



HAL
open science

Habilitation à diriger des Recherches de Daniel Lacour

Daniel Lacour

► **To cite this version:**

Daniel Lacour. Habilitation à diriger des Recherches de Daniel Lacour. Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci]. Université de Lorraine, 2019. tel-02426455

HAL Id: tel-02426455

<https://hal.science/tel-02426455>

Submitted on 2 Jan 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Habilitation à diriger des Recherches

Spécialité : *Physique*

Présentée par :

LACOUR Daniel

Habilitation soutenue publiquement le 16 décembre 2019 à Nancy devant le jury composé de :

Dr. Stéfania Pizzini,	(rapporteur)	Institut Néel, Grenoble
Dr. Agnès Barthélémy,	(rapporteur)	Unité Mixte de Physique CNRS/Thales, Palaiseau
Pr. Nathalie Viart,	(rapporteur)	Institut de Physique et Chimie des matériaux de Strasbourg
Pr. Michel Hehn,	(examinateur)	Université de Lorraine, Institut Universitaire de France
Pr. Jean-Eric Wegrowe,	(examinateur)	École Polytechnique
Dr. Nicolas Rougemaille,	(examinateur)	Institut Néel, Grenoble
Dr. Martin Bowen,	(examinateur)	Institut de Physique et Chimie des matériaux de Strasbourg



1. BRÈVE INTRODUCTION.....	4
2. MICROMAGNÉTISME ET COUPLAGE DIPOLAIRE	5
2.1 Divers travaux dans le domaine	5
2.1.1 Les parois bloquées par des constriction.....	5
2.1.2 Les parois dans les nanostructures multicouches.....	6
2.2 La frustration géométrique dans des réseaux de nanostructures	8
2.2.1 Effet de couplage à longue portée	9
2.2.2 Modèle de Potts dipolaire à quatre états	10
2.2.3 Perspective pour le calcul bio-inspiré	13
3. TRANSPORT DÉPENDANT DU SPIN	15
3.1 Divers travaux dans le domaine	15
3.1.1 Transport tunnel et états localisés	15
3.1.2 Effets de transport magnéto-thermique anisotrope	18
3.2 Précession de spin électronique aux basses énergies	20
3.2.1 Contexte scientifique.....	20
3.2.2 Dispositif expérimental.....	22
3.2.3 Optimisation de la structure et magnéto-courant.....	25
3.2.4 Dépendance angulaire.....	26
3.2.5 Mesure de précession, Résultats et discussion	27
3.2.7 Perspectives.....	31
4. DIFFUSION DE LA CULTURE SCIENTIFIQUE.....	34
4.1 Communications scientifiques reprises par le CNRS.....	34
4.2 Exposition de NanoArt	36
4.3 Festival, Magnetica et Fête de la Science	39
5. AUTRES ACTIVITÉS LIÉE À LA RECHERCHE	41
5.1 Encadrements	41
5.1.1 Thèses.....	41
5.1.2 Stagiaires & Post-doctorants	42
5.2 Enseignement et Formation	42
5.3 Expertises	43
5.4 Organisation de colloques	43
5.5 Participation à des contrats de recherche.....	44
5.6 Brevet et applications.....	45
5.6.1 Brevet	45
5.6.2 Applications	45
5.7 Responsabilités collectives	48
5.8 Développements instrumentaux	49
5.8.1 Transport électronique sous champ magnétique	49
5.8.2 Microscopie en champ proche.....	50
5.8.3 Grand Instrument.....	51
6. Production scientifique.....	52
6.1 Publications dans des revues internationales	53
6.2 Publications dans des revues sans comité de lecture	58
6.3 Conférences invitées.....	58
6.3 Conférences	60
6.2 Prix	66
ANNEXE 1 : NANOART	67

1. BRÈVE INTRODUCTION

J'effectue mon activité de recherche à l'**Institut Jean Lamour UMR 7198**, institut trouvant ses racines dans cinq unités mixtes de recherche qui ont fusionné le 1er janvier 2009. L'institut est organisé autour de quatre départements scientifiques et 8 centres de compétences. Le département dans lequel je suis intégré est le **département de la physique de la matière et des matériaux**. Je travaille plus particulièrement au sein de l'**équipe 101** qui traite d'**Électronique de spin et de nanomagnétisme**. Cette équipe jouit d'une reconnaissance internationale sur le plan de la croissance de nanostructures magnétiques, avec un intérêt tout particulier pour l'étude des propriétés magnétiques de nanostructures et des propriétés de transport électronique liée à la polarisation en spin des porteurs de charges.

Depuis la fin de mes études en 1999, j'ai effectué mon travail de recherche dans le domaine du nanomagnétisme et de l'électronique de spin. Dans ces domaines, j'ai successivement effectué mes travaux de thèse et de post-doctorat, de chargé de recherche au CNRS dans plusieurs des meilleurs laboratoires du domaine. *J'ai souvent travaillé sur des sujets originaux en les initiant dans mes différents laboratoires d'accueil pour les porter au plus haut niveau international.* À diverses occasions, je me suis intéressé aux retombées éventuelles de mes recherches tout en participant à de nombreuses activités de vulgarisation et d'action vers le Grand Public. Mon parcours a également été jalonné par la prise en charge de responsabilités techniques et administratives, d'encadrement de travaux de recherche et d'écriture de projet.

De **1999 à 2002**, j'ai abordé dans ma thèse, effectuée à l'UMR CNRS Thales et au LPM à Nancy, l'effet tunnel dépendant du spin comme sonde du micro-magnétisme et du transport d'électrons chauds. Cette thèse CIFRE, réalisée conjointement sur deux sites, m'a permis d'une part de développer une architecture de capteur de champ magnétique cher à l'UMR CNRS Thales et d'autre part de développer les premières architectures permettant de mesurer le transport dépendant du spin pour les électrons chauds. Ces développements ont été faits dans le cadre de deux contrats européens : Nanomem (MRAM) et Tunnelsense (Capteur de champ magnétique sur la base de jonctions tunnel).

De **2003 à 2004**, j'ai ensuite abordé la conception et caractérisation de nano-dispositifs pour l'électronique de spin et l'étude de l'effet de transfert de spin appliqué aux vannes de spin, jonctions tunnel magnétiques et aux parois de domaines magnétiques lors d'un stage post-doctoral à Hitachi Global Storage Technologies, Almaden San Jose CA, USA. Ces expériences ont été pionnières dans le domaine et ont nécessité la mise en place d'un banc de caractérisation magnéto-électrique à basse température. Ainsi des diagrammes de phase ont été mesurés mettant en évidence les précessions ou le retournement de l'aimantation sous courant polarisé en spin dans des jonctions tunnel magnétiques. À cette époque, j'ai également pris la responsabilité du service de microscopie en champ proche (2 AFM/MFM).

De **2005 à 2006**, j'ai effectué un second stage post-doctoral à l'Université Henri Poincaré, Nancy. Ici encore, afin de pouvoir réaliser mes études liées à l'électronique de spin, j'ai conçu un banc de caractérisation électrique en champ proche et travaillé sur le magnétisme moléculaire.

Mon embauche au CNRS au LPM en 2006 s'est faite avec la volonté de développer à Nancy un axe de recherche dans le domaine de l'électronique de spin. Depuis 1999 s'était développé autour d'Alain Schuhl un groupe dédié à la spintronique soutenu par des moyens expérimentaux nécessaires à cette activité de recherche avec l'aide de P. Alnot. Depuis mon embauche, les objectifs de mon travail de recherche continuent à se situer selon deux axes – souvent indissociables- à savoir la compréhension des comportements magnétiques obtenus dans des nanostructures et leur utilisation dans le transport électronique. Je profite des

développements expérimentaux de ces dix dernières années pour participer ou lancer de nouveaux axes de recherche dans lesquels mon apport en termes de transport électronique sous champ magnétique et microscopie champ proche est déterminant. Dans la suite de ce document, je donnerai quelques résultats majeurs issus du travail de ces 10 dernières années. Je détaillerai d'avantage les travaux que je compte poursuivre dans les années à venir, travaux dont je donnerai les perspectives.

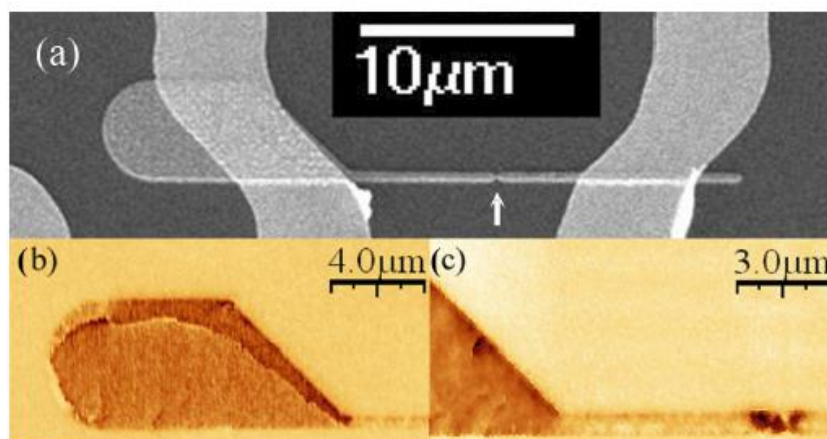
Les idées avancées tout au long de ma carrière m'ont permis d'être récompensé en 2007 par le Grand Prix de la Société Industrielle de l'Est, d'être récipiendaire, avec l'équipe en Janvier 2019, du Prix interrégional de la recherche de la Grande Région Sarre Lor Lux pour les recherches en magnétisme dans la Grande Région et d'être récipiendaire de la Prime d'Encadrement Scientifique du CNRS.

2. MICROMAGNÉTISME ET COUPLAGE DIPOLAIRE

2.1 Divers travaux dans le domaine

2.1.1 Les parois bloquées par des constriction

La propagation et le piégeage de parois de domaines magnétiques sont des phénomènes fondamentaux cruciaux à étudier pour le développement de nouveaux composants de l'électronique de spin. Ces dernières années, avec la mise en évidence d'effets de transfert de spin, ces aspects du micro-magnétisme ont été revisités. Nous avons étudié le processus de "dépiégeage" d'une paroi de domaines magnétiques lorsque celle-ci est confinée dans un fil ferromagnétique submicronique faisant partie d'une structure vanne de spin.



(a) Image MEB d'un dispositif typique. La flèche blanche indique la position de l'encoche. (b) et (c) Images MFM de la paroi piégée, respectivement, avant l'injection et à proximité de l'encoche.

La partie (a) de la figure ci-dessus montre une image de microscopie électronique à balayage d'un des dispositifs que nous avons réalisés en lithographie électronique au laboratoire. Un défaut de structure dans le fil (ici une entaille) situé entre deux contacts électriques a été introduit de façon intentionnelle. Celui-ci constitue un site de piégeage pour la paroi domaine à l'étude. Des mesures de microscopie de force magnétique (MFM) attestent que le comportement sous champ magnétique de la structure est celui attendu : un domaine magnétique est nucléé dans le pad de nucléation (partie (b) de la figure ci-dessus) puis la paroi

de domaine associée est injectée dans le fil submicronique. La propagation de cette paroi est alors stoppée à proximité du défaut artificiellement introduit (partie (c) de la figure ci-dessus). L'effet de magnéto-résistance géante (GMR) provenant de la structure vanne de spin nous a permis de suivre avec précision la position de la paroi de domaine injectée dans le fil. La présence de larges plateaux de résistance intermédiaires dans les mesures de résistance en fonction du magnétique nous permet de confirmer le positionnement d'une paroi de domaine à proximité du défaut artificiel. Afin de faire une étude statistique sur la valeur des champs magnétiques de "dépiégeage" un grand nombre de cycles R(H) a été enregistré puis exploité (plus d'un millier). L'étude des histogrammes de distribution obtenus a permis de faire apparaître deux points importants. Tout d'abord les distributions obtenues ne peuvent pas s'expliquer avec simplement des effets d'agitation thermique. Nous pensons que la présence de plusieurs pics dans les distributions pourrait correspondre à différents types ou configurations de parois.

Le second point important que nous avons pu mettre en évidence grâce à ce type de mesure statistique concerne la forte différence de distribution observée dans le cas de parois de type "head to head" ou de type "tail to tail". Cette forte différence a été attribuée à l'effet du couplage par champ dipolaire au niveau de la constriction. Afin d'obtenir plus d'informations sur la nature du mécanisme de "dépiégeage" mis en jeu, des mesures résolues en temps ont été effectuées. L'étude des probabilités de piégeage en fonction du temps et du champ magnétique appliqué comparé à l'histogramme de distribution des champs de "dépiégeage" a permis de mettre en évidence un mécanisme en plusieurs étapes. Chacune des étapes étant identifiée par un temps caractéristique.

Publications associées à ces travaux :

● **Switching the magnetic configuration of a spin valve by current induced domain wall motion**

J. Grollier, **D. Lacour**, V. Cros, A. Hamzic, A. Vaurès, A. Fert, D. Adam and G. Faini
J. Appl. Phys. 92, 4825 (2002)

● **Experimental measurements of multiple stable trapped domain wall states induced in nanofabricated elements**

D. Lacour, J. A. Katine, L. Folks, T. Block, J. R. Childress, M. J. Carey, and B. A. Gurney
Appl. Phys. Lett. 84, 1910 (2004)

● **Nanometer Scale Observation of High Efficiency Thermally Assisted Current-Driven Domain Wall Depinning**

D. Ravelosona, **D. Lacour**, J.A. Katine, B.D. Terris, C. Chappert
Phys. Rev. Lett. 95, 117203 (2005)

● **Stochastic and complex depinning dynamics of magnetic domain walls**

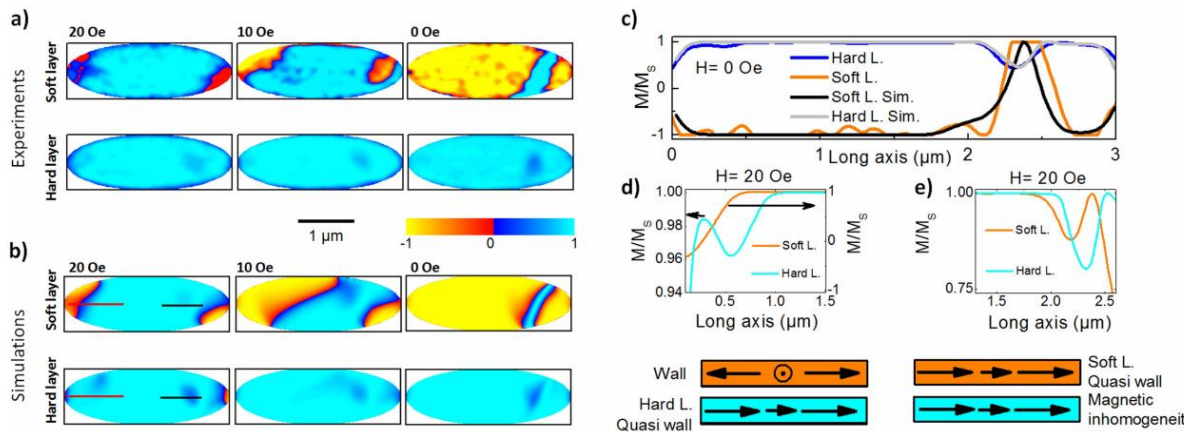
J. Briones, F. Montaigne, M. Hehn, **D. Lacour**, J. R. Childress and M. J. Carey
Phys. Rev. B 83, 060401 (R) (2011)

● **Unidirectional thermal effects in current-induced domain wall motion**

J. Torrejon, G. Malinowski, M. Pelloux, A. Thiaville, J. Curiale, **D. Lacour**, F. Montaigne, M. Hehn
Phys. Rev. Lett. 109, 106601 (2012)

2.1.2 Les parois dans les nanostructures multicouches

La plupart des études portant sur les propriétés micro-magnétiques de nano-structures sont conduites sur des échantillons incluant une seule couche d'éléments ferromagnétiques. Cependant, les dispositifs basés sur l'électronique de spin intègrent très souvent plusieurs couches ferromagnétiques. Et lorsque celles-ci sont très proches les unes des autres, typiquement quelques nanomètres dans le cas de jonctions tunnel, des phénomènes de couplage magnétique modifient les propriétés des électrodes. C'est pourquoi en 2007 nous avons entrepris d'étudier l'influence du couplage dipolaire qui prend place entre une couche de FeNi et une couche de Co lorsqu'elles sont utilisées comme électrodes dans une jonction tunnel magnétique en forme d'ellipse.



(a) **Images XMCD-STXM.** Les configurations magnétiques des couches douces et dures ont été enregistrées sur une ellipse typique en fonction du champ appliqué après saturation à champ positif élevé. Lorsque le champ est réduit à zéro, une paroi à 360° se forme dans la couche douce au-dessus d'une inhomogénéité magnétique située dans la couche dure.
 (b) **Configurations micro-magnétiques calculées** en fonction du champ appliqué. La simulation tient compte d'une inclinaison locale de l'anisotropie à la position correspondant à l'inhomogénéité spatiale de l'aimantation observée expérimentalement ;
 (c) **Profils d'aimantation** à champ nul extraits des images expérimentales et des simulations ;
 (d) **Profils d'une paroi à 180°** (orange) dans la couche douce associée à sa quasi paroi (cyan) dans la couche dure. Les deux profils sont extraits de la configuration micro-magnétique simulée (voir lignes rouges sur la figure b 20 Oe) ;
 (e) **Profils de l'inhomogénéité** dans la couche dure (ligne cyan) avec sa quasi paroi associée (ligne orange) dans la couche douce. Les deux profils sont extraits de la configuration micro-magnétique simulée correspondant à un champ de 20 Oe (voir la ligne noire de la figure b 20 Oe) ; **Schéma de principe** représentant les couples paroi/quasi paroi et fluctuation/quasi paroi.

Nous avons pour ce faire utilisé la sélectivité en éléments ainsi que la haute résolution spatiale des techniques de X-PEEM (microscope de photo- électrons X du laboratoire Soleil) et STXM (*scanning transmission X-ray microscope* du synchrotron suisse SLS). La comparaison des résultats expérimentaux avec des simulations micro-magnétiques nous a permis de comprendre de façon très fine l'impact du couplage dipolaire sur le processus de retournement de l'aimantation de l'électrode la plus douce. Ainsi les conditions d'apparition de parois de domaines à 360° , leur stabilité et leur localisation ont été établies. Nous avons montré que les fluctuations spatiales de l'anisotropie magnétique présentes dans nos couches sont le paramètre clé gouvernant à la fois processus de formation et de localisation spatiale des parois de domaines à 360° observées. La figure ci-dessus montre des images STXM acquises au seuil d'absorption du Ni et du Co pour différentes valeurs du champ magnétique appliqué. Le contraste observé renseigne sur la valeur de la projection de l'aimantation le long du grand axe de l'ellipse. Lorsque la valeur du champ s'approche de zéro on observe tout d'abord une nucléation de domaines magnétiques aux extrémités de l'ellipse en NiFe. Comme prévue par les simulations micro-magnétiques que nous avons effectuées (code OOMMF et programme LLG Micromagnetics Simulator™) le champ dipolaire généré par l'aimantation de l'électrode de cobalt active la nucléation de deux domaines d'aimantation opposés dans l'électrode de NiFe. Ensuite ces domaines vont se propager.

Deux scénarios sont alors observés expérimentalement et bien reproduits par les simulations. Tandis qu'un premier scénario mène à la formation d'une paroi à 360° stable en champ nul, le second scénario laisse l'aimantation de l'électrode de NiFe quasiment uniforme. Ces deux scénarios sont bien reproduits par les simulations prenant en compte une distribution non uniforme de l'anisotropie dans la couche de NiFe. Nous avons pu montrer que c'est la distribution d'anisotropie qui est déterminante en ce qui concerne la formation de la paroi. Néanmoins, dans ces conditions les expériences "*in silico*" prévoient une localisation de la paroi au centre des ellipses de NiFe ; Cela est rarement le cas dans les systèmes réels. La sélectivité en éléments de la technique STXM nous a permis d'imager de façon indépendante l'état magnétique sous champ de chacune des deux électrodes. Ainsi la présence d'une légère fluctuation de la direction d'aimantation dans l'électrode de Co avant la formation de la paroi a

pu être mise en évidence. Nous avons observé que la position de la paroi présente dans la couche de NiFe est fortement corrélée à la position de la fluctuation d'aimantation dans l'électrode de Co. Les simulations réalisées prenant en compte la présence de cette fluctuation spatiale d'aimantation montre que le champ de fuite dû à une divergence non nulle de l'aimantation de la couche de Co crée une position stable pour la paroi de domaine présente dans l'électrode de NiFe et impose sa localisation. Ces résultats ont une importance notable dans un contexte d'intensification de la recherche concernant la manipulation de parois de domaines individuels soit par un champ soit par un courant polarisé.

Publications associées à ces travaux :

● **360° domain wall generation in the soft layer of magnetic tunnel junctions**

M. Hehn, **D. Lacour**, F. Montaigne, J. Briones, R. Belkhou, S. El Moussaoui, F. Maccherozzi, N. Rougemaille
Appl. Phys. Lett. 92 072501 (2008)

● **Magnetic domain wall propagation in a submicron spin-valve stripe: influence of the pinned layer**

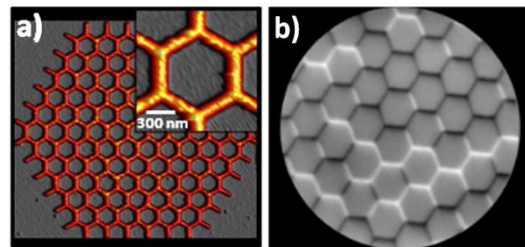
J. Briones, F. Montaigne, **D. Lacour**, M. Hehn, M.J. Carey, J.R. Childress
Appl. Phys. Lett. 92, 032508 (2008)

● **Indirect localization of a magnetic domain wall mediated by quasi walls**

D. Lacour, F. Montaigne N. Rougemaille, R. Belkhou, J. Raabe, M. Hehn
Scientific Reports 5, 9815 (2015)

2.2 La frustration géométrique dans des réseaux de nanostructures

Les progrès de ces dernières années dans le domaine de la lithographie permettent l'élaboration de nano-structures artificielles "à la demande". Ainsi, les études menées sur les nano-structures magnétiques permettent une comparaison inédite entre les résultats expérimentaux et les prévisions de certains modèles théoriques. C'est le cas en particulier des modèles de glace de spin dans lesquels des spins sont arrangés sur un réseau à deux dimensions et interagissent via une interaction soit ferromagnétique soit antiferromagnétique à courte ou longue portée. Sous certaines conditions (géométrie, nature de l'interaction) des effets de frustration apparaissent. Ceux-ci engendrent l'apparition de propriétés "exotiques" notamment dues à la forte dégénérescence du niveau fondamental.



a) Images AFM d'un réseau kagomé réalisé en lithographie électronique; b) Image XMCD-PEEM du réseau renseignant sur la direction de l'aimantation de chaque "pseudo spin".

Nous avons étudié le magnétisme frustré de réseaux bidimensionnels et mis en évidence de façon expérimentale quelques-unes des propriétés "exotiques" évoquées précédemment. Cela a été fait dans le cas d'un réseau à géométrie kagomé (voir les images AFM de la figure ci-dessus). La direction d'aimantation de chaque pseudo spin (nano-aimant) est déterminée par microscopie XMCD-PEEM (partie b de la figure ci-dessus) ou par microscopie à force magnétique. La combinaison de simulations micro-magnétiques, de calculs de type Monte Carlo et de nos expériences a permis de mettre en évidence des effets d'interactions longues portées. Globalement les études que nous menons sur cette thématique permettent de cerner les limites de la comparaison entre glaces de spin artificielles et modèles classiques.

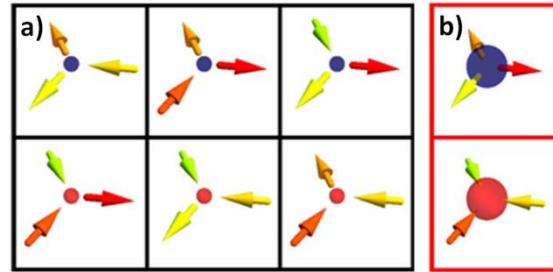
En effet, si un certain nombre d'observations expérimentales sont interprétables avec les modèles classiques (règle de la glace, apparition de domaines de charges magnétique émergentes), l'ensemble des mesures montre que seule une prise en compte des aspects spécifiques aux glaces spin artificielles (propriétés micro-magnétiques, matériaux) permet de reproduire les expériences. Fort de l'expérience acquise ces dernières années concernant cette thématique nous avons élargi ce champ d'activité en proposant de réaliser, avec les

réseaux artificiels de spin frustrés, des dispositifs de reconnaissance de formes basés sur le calcul bio-inspiré.

2.2.1 Effet de couplage à longue portée

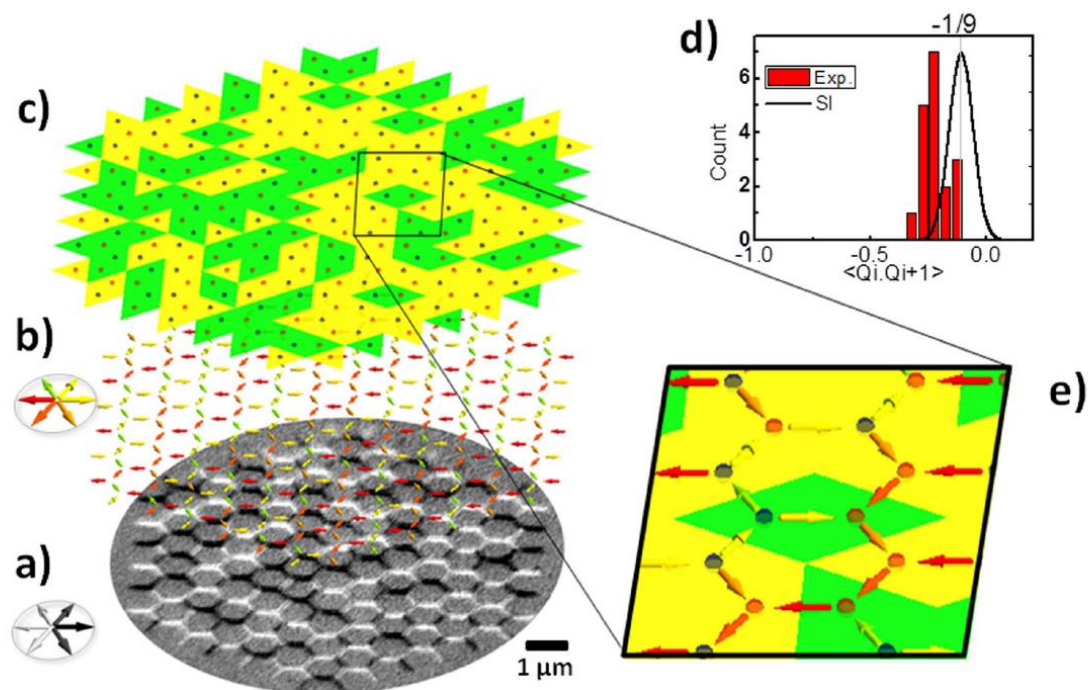
En 2010 sur la base de travaux théoriques de G. Moller and R. Moessner (PRB 2009), nous avons, en collaboration avec Nicolas Rougemaille et Benjamin Canals de l'Institut Néel, entrepris d'étudier l'impact du couplage dipolaire agissant à longue portée au sein de réseaux kagomé magnétiques.

À haute température (comparée à l'énergie de couplage premier voisin) il n'existe aucune corrélation spin-spin dans le réseau kagomé. Le réseau est dans un état paramagnétique. Lorsque la température est abaissée, le réseau entre dans un état dit de glace de spin. Dans cet état, chaque vertex du réseau (ensemble de trois spin situés sur des nœuds adjacents), qui à haute température était huit fois dégénéré (2^3 fois), est maintenant six fois dégénéré : les deux configurations magnétiques de vertex formées par des aimantations pointant toutes vers l'intérieur ou l'extérieur d'un vertex ne sont plus accessibles thermiquement. Ces deux configurations de vertex sont appelées états interdits par les règles de la glace. Le système est dans un état nommé *Spin Ice* (i.e. respectant les règles de la glace). La figure ci-dessus résume l'ensemble des configurations magnétiques que peut prendre un vertex.



a) Représentation des six configurations de vertex permises par la règle de glace. Les sphères bleues et rouges de petit rayon correspondent respectivement aux charges magnétiques -1 et +1 situées au centre du vertex.
b) Représentation des deux états interdits. Les sphères bleues et rouges de grand rayon correspondent aux charges magnétiques -3 et +3.

À plus basse température, dans un modèle prenant en compte seulement les interactions entre premiers voisins cette situation n'évoluera plus. À *contrario* si les interactions dipolaires qui agissent à longue portée sont prises en compte dans les simulations de type Monte Carlo un nouveau type d'ordre apparaît. Cette phase, appelée *spin ice II*, est caractéristique de la glace de spin dipolaire : Une glace de spin pour laquelle les interactions à longue portée ont un impact mesurable. Dans l'état *spin ice II* un cristal de charges émergentes est formé. À chacun des six vertex autorisés par la règle de la glace il est possible d'associer une charge magnétique -1 ou +1 selon que deux aimantations pointent vers le centre ou vers l'extérieur du vertex (cf. figure ci-dessus). Le cristal de charge émergent présent dans la phase *spin ice II* est constitué d'un arrangement périodique de charges fictives coexistant avec un réseau de pseudo spin encore partiellement désordonné. C'est en 2014 que nous avons pu mettre en évidence expérimentalement l'existence de ce type d'ordre. La figure ci-dessous (parties a, b, et e) montre qu'après refroidissement un polycristal de charge est obtenu. Pour quantifier le degré de cristallisation il est possible, une fois la configuration magnétique du réseau déterminée, de calculer le corrélateur charge-charge $\langle Q_i \cdot Q_{i+1} \rangle$ (moyenne des produits de la charge d'un vertex par les charges adjacentes). Le corrélateur charge-charge prend une valeur égale à -1 dans le cas d'un cristal de charge parfait et égale à 1/9 dans la phase *spin ice*. La partie d de la figure ci-dessous compare les distributions de corrélateur charge-charge mesurées (en rouge) et calculées dans le modèle d'interaction courte portée SI (courbe noire). Le fait de ne pas observer d'état interdit dans nos réalisations expérimentales et d'obtenir des corrélateurs charge-charge inférieur à -1/9, confirme une entrée de notre système dans la phase *spin ice II* et donc l'influence du couplage dipolaire à longue portée dans ce type de système.



(a) Image XMCD-PEEM d'un réseau kagomé magnétique ; (b) Configuration de spin déduite de l'image XMCD-PEEM ; (c) Configuration de charge magnétique associée et domaines de charges magnétiques émergentes (vert et jaune) après une désaimantation thermique. (d) Distribution du corrélateur de charge mesurée (en rouge) et calculée dans le modèle d'interaction courte portée SI (courbe noire). (e) Zoom montrant les pseudospin, les charges émergentes et les domaines de charges.

Publications associées à ces travaux :

- **Artificial Kagome Arrays of Nanomagnets: A Frozen Dipolar Spin Ice**

N. Rougemaille, F. Montaigne, B. Canals, A. Duluard, **D. Lacour**, M. Hehn, R. Belkhou, O. Fruchart, S. El Moussaoui, A. Bendounan, and F. Maccherozzi

Phys. Rev. Lett. 106, 057209 (2011)

- **Energy levels of interacting curved nanomagnets in a frustrated geometry: increasing accuracy when using finite difference methods**

H. Riahi, F. Montaigne, N. Rougemaille, B. Canals, **D. Lacour** and M. Hehn

J. Phys.: Condens. Matter 25, 296001 (2013)

- **Size distribution of magnetic charge domains in thermally activated but out-of-equilibrium artificial spin ice**

Montaigne, F., **Lacour, D.**, Chioar, I.A., Rougemaille, N., Louis, D., Murry, S.M., Riahi, H., Burgos, B.S., Menteş, T.O., Locatelli, A., Canals, B., Hehn, M.

Scientific Reports, 4, 5702 (2014)

- **Non-universality of artificial frustrated spin systems**

Chioar, I.A., Rougemaille, N., Grimm, A., Fruchart, O., Wagner, E., Hehn, M., **Lacour, D.**, Montaigne, F., Canals, B.

Physical Review B 90, 064411 (2014)

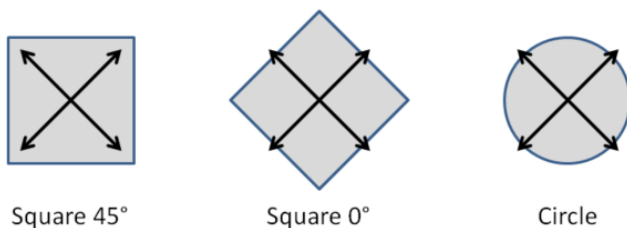
- **Fragmentation of magnetism in artificial kagome dipolar spin ice**

B. Canals, I.-A. Chioar, V.-D. Nguyen, M. Hehn, **D. Lacour**, F. Montaigne, A. Locatelli, T. O. Menteş, B. Santos Burgos, N. Rougemaille,

Nat. Commun. 7, 11446 (2016)

2.2.2 Modèle de Potts dipolaire à quatre états

Dans la littérature, les modèles de spin qui ont été testés expérimentalement à l'aide de nanostructures sont très souvent des modèles Ising : Des nano-aimants à deux états stables sont fabriqués à partir d'une couche mince et soit d'une anisotropie induite par la forme allongée des éléments (dans le cas des aimantations planaires), soit en tirant profit d'une anisotropie perpendiculaire induite par les interfaces (cas des Co/Pt) ou par le volume (CoTb par exemple). La stabilisation dans une nanostructure unique de quatre états possibles de l'aimantation pour la réalisation d'un modèle de Potts est une chose beaucoup plus ardue !

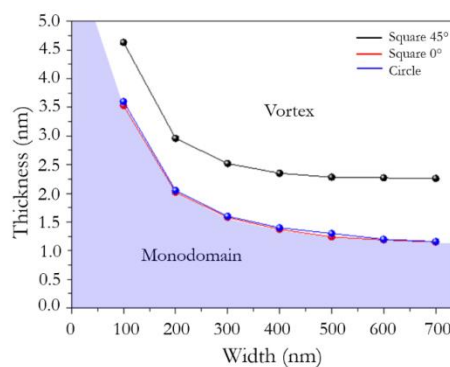


Les trois formes présélectionnées. Les doubles flèches indiquent les directions d'anisotropie magnétique. **Carré 45°** : carré avec axes d'anisotropie le long des diagonales. **Carré 0°** : carré avec des axes d'anisotropie parallèles aux bords du carré. **Cercle**.

que les nanostructures se trouvent dans un état d'aimantation homogène, condition nécessaire à la réalisation d'un "pseudo spin". C'est pour cela que nous avons entrepris une étude micro-magnétique d'une part pour connaître l'épaisseur de couche pour laquelle le passage monodomaine – vortex ou multidomaines s'opère et d'autre part pour évaluer le degré d'homogénéité de l'aimantation dans la nanostructure. Nous avons utilisé le code Mumax3 avec les paramètres du Fe à savoir : $M_S=1700 \cdot 10^3$ A/m, $J=21 \cdot 10^{-12}$ J/m, $K=48 \cdot 10^3$ J/m³ et $damping=0.2$. La taille des cellules est prise égale à 2nm.

Trois géométries ont été considérées et sont reportées dans la figure ci-dessus. Ces dernières ont été choisies car elles ne brisent pas la symétrie imposée par l'axe d'anisotropie d'ordre 4 du Fe. Selon leur largeur et leur épaisseur, les états magnétiques les plus stables des nano-aimants peuvent varier de l'état monodomaine, à un état à domaines multiples ou à un état vortex. Nous avons calculé le diagramme de stabilité pour les trois géométries sélectionnées, pour les états uniformes ou vortex. Pour toutes les géométries, l'état monodomaine est le plus stable lorsque l'épaisseur de la couche de Fe est inférieure à 1nm. Cependant, en réduisant trop l'épaisseur du Fe, nous serons confrontés à des fluctuations de l'aimantation lorsque la taille latérale des plots est réduite. La configuration carré 45° sera alors choisie car elle permet d'utiliser les épaisseurs de Fe les plus grandes tout en conservant l'état monodomaine. Ainsi, nous avons choisi de travailler avec une épaisseur de 2nm.

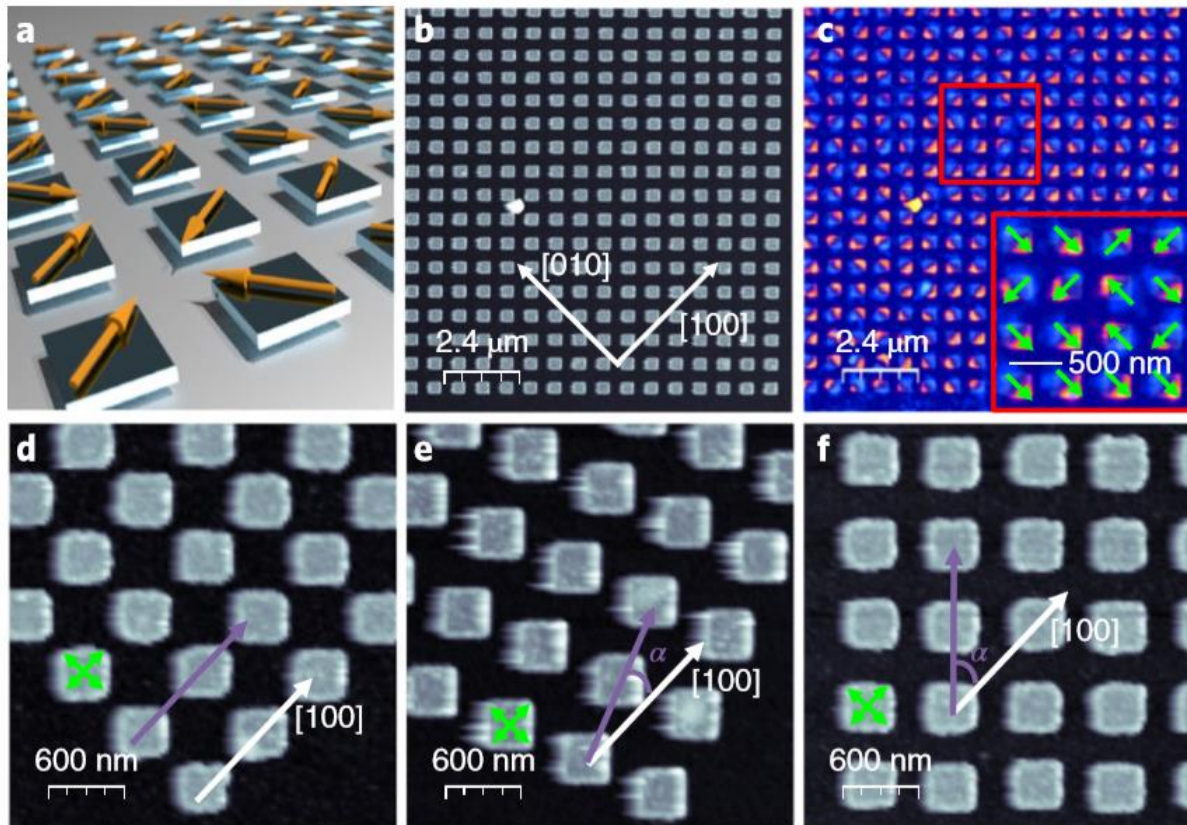
Pour cela, nous sommes partis d'une base constituée d'une couche de Fe épitaxiée. Celle-ci possède une structure cubique centrée ayant une anisotropie d'ordre 4 dans le plan de la couche mince. Ainsi, en champ nul, l'aimantation dans le plan de la couche peut posséder 4 directions stables différentes. Mais il est loin d'être évident que ces 4 directions soient conservées lorsque la couche sera découpée en nanostructures. De plus, il n'est pas évident non plus



Diagrammes de stabilité pour l'état vortex et l'état monodomaine pour les trois formes présélectionnées.

De plus, en regardant la configuration micro-magnétique à l'intérieur du plot carré 45°, il apparaît que la rémanence en champ nul est de 0,99 c'est-à-dire que la configuration carré 45° est quasiment monodomaine.

Nous avons ensuite réalisé en lithographie électronique des réseaux de plot carré 45°. La partie a) de la figure suivante montre le schéma de principe du système étudié ainsi qu'une image de microscopie à fore atomique enregistrée sur un réseau en fin de fabrication (partie b). La distance entre les plots et l'angle α défini dans la figure suivante a été variée. Trois exemples de réalisation pour des angles α égaux à 0°, 22.5°, et 45° sont présentés dans les panneaux d, e et f de la figure ci-après.



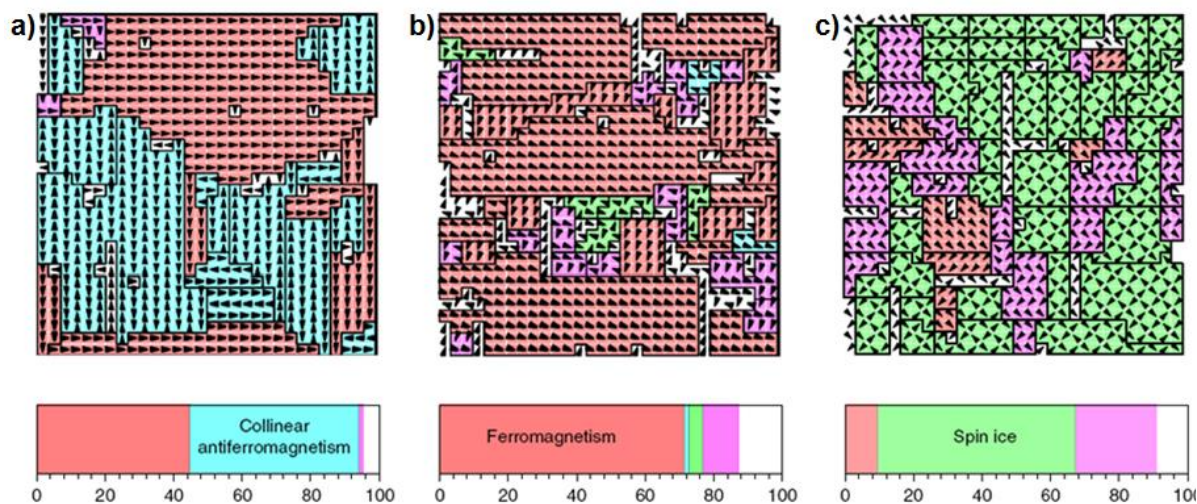
Réalisation du modèle de Potts à quatre états basé sur un système de spin artificiel. a) *Vue artistique du système de spin artificiel* fabriqué à partir des films minces de Fe de 2 nm d'épaisseur avec une orientation de l'aimantation spin le long des diagonales des plots carrés. b) *Image de microscopie à force atomique* d'une partie du réseau. c) *Image MFM correspondante*. L'encadré montre la correspondance entre le contraste MFM et la direction de l'aimantation dans les plots. d-f) *Images de microscopie à force atomique* décrivant les trois orientations de réseau étudiées, $\alpha = 0^\circ$ d), $\alpha = 22,5^\circ$ e) et $\alpha = 45^\circ$ f). La flèche violette indique la direction du réseau, les flèches vertes les axes de facile aimantation et α est l'angle entre la direction du réseau et la direction cristalline [100].

Après une étape de chauffage, au cours de laquelle l'aimantation au sein de chaque plot fluctue, la configuration magnétique des réseaux est imagée par microscopie de force magnétique. Cette technique d'imagerie magnétique nous a permis de déterminer la direction de l'aimantation au sein de chacun des plots comme le montre la partie b de la figure précédente.

La figure suivante présente les configurations magnétiques dans lesquelles les réseaux 0° , 22.5° et 45° sont mesurés après chauffage. Une analyse de l'ordre magnétique dans l'espace direct montre que le réseau 0° présente majoritairement un ordre appelé antiferromagnétique colinéaire (partie a). Le réseau 22.5° est ordonné de façon ferromagnétique. Finalement pour $\alpha = 45^\circ$ c'est un ordre magnétique nommé *Spin Ice* qui est formé.

Nous avons pu montrer que la prise en compte des interactions dipolaires au-delà du premier voisin permettait de rendre compte des faits expérimentaux rapportés précédemment. On notera que dans un modèle où seules les interactions entre premiers voisins sont prises en compte l'ordre ferromagnétique observé pour $\alpha = 22.5^\circ$ n'est pas stable énergétiquement.

Cette étude pionnière a donc étendu le champ de recherche concernant les glaces de spin artificielles (utilisant usuellement des pseudos *spin* d'Ising). De plus, le modèle de Potts dipolaire à quatre états offre la possibilité d'effectuer un réglage précis (via un paramètre géométrique) du diagramme énergétique du système et donc de son état fondamental. Par exemple pour $\alpha = 31.8^\circ$ plusieurs phases ordonnées ont la même énergie.



Ordres magnétiques déduits des mesures de microscopie à force atomique pour les réseaux 0° (a), $22,5^\circ$ (b) et 45° (c). Les domaines colorés correspondent à des ordres magnétiques différents. Les parties blanches correspondent à des régions trop petites pour être attribuées à un ordre magnétique particulier.

Publications associées à ces travaux :

- **Interfaces anisotropy in single crystal V/Fe/V trilayer**
Louis, D., Lytvynenko, I., Hauet, T., **Lacour, D.**, Hehn, M., Andrieu, S., Montaigne, F.
Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 372, pp. 233-235 (2014)
- **Four states magnetic dots: A design selection by micromagnetic modeling**
D. Louis, T. Hauet, S. Petit-Watlot, **D. Lacour**, M. Hehn, F. Montaigne
Proc. of SPIE Vol. 9931, 99311M (2016)
- **A tunable magnetic metamaterial based on the dipolar four-state Potts model**
D. Louis, **D. Lacour**, M. Hehn, V. Lomakin, T. Hauet and F. Montaigne
Nature Materials 17, 1076-1080 (2018)

2.2.3 Perspective pour le calcul bio-inspiré

En raison de leur faible consommation d'énergie prévue et de leurs propriétés hautement adaptables, les systèmes *hardware* bio-inspirés sont des candidats prometteurs pour l'électronique du futur. Leurs applications vont de la classification automatique pour la gestion de grandes quantités de données au contrôle de véhicules autonomes. L'un des défis actuels pour envisager des applications bio-inspirées est de construire des réseaux de très forte densité à partir d'unités de traitement réglables.

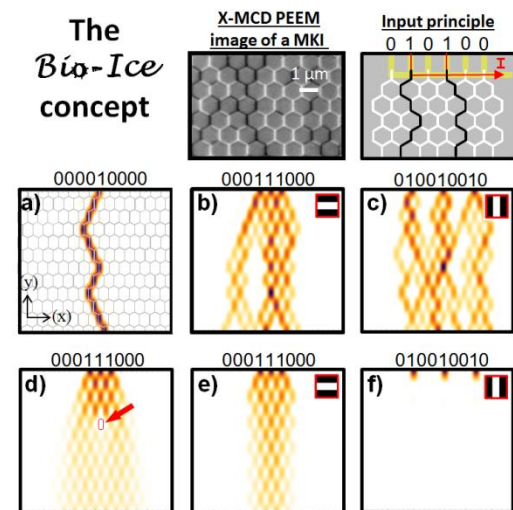
Les dispositifs magnétiques à l'échelle nanométrique pourraient être une technologie clé dans ce contexte. Un certain nombre de groupes ont proposé des architectures bio-inspirées comprenant un ou plusieurs types de nano-dispositifs magnétiques cependant les démonstrateurs expérimentaux restent rares. Les glaces de spin artificielles magnétiques, qui sont constituées d'un grand nombre de nano-aimants en interaction disposés dans une géométrie spécifique, pourraient permettre d'effectuer de la classification. En particulier, le réseau kagomé magnétique (présenté précédemment) semble bien adapté au calcul bio-inspiré en raison de la complexité de son processus de retournement d'aimantation et de ses fonctionnalités réglables.

C'est dans le cadre du projet Bio-Ice (financé par l'ANR) que nous tenterons de démontrer que, grâce à une utilisation pertinente de ce type de glace de spin, des fonctionnalités de reconnaissance de formes peuvent être réalisées via un processus d'apprentissage.

Si jusqu'à présent, la recherche concernant les glaces de spin artificielles s'est principalement concentrée sur l'exploration de la physique fondamentale, nous proposons

maintenant d'utiliser la physique de ces systèmes complexes. En particulier, le cerveau est connu pour partager des caractéristiques communes avec des réseaux complexes couplés. Dans le cas du réseau kagomé magnétique, le retournement de l'aimantation s'effectue par avalanches : les nano-aimants s'inversent les uns après les autres comme des dominos lorsque les parois du domaine sont injectées aux entrées (voir l'image X-MCD PEEM de la figure ci –après).

Afin d'obtenir une fonction de reconnaissance de formes, un des défis principaux est de pouvoir contrôler localement le processus d'avalanche, de sorte qu'à la fin, différents schémas d'entrée créent différents types d'avalanches. Ceci permet une classification. La figure ci-contre montre comment des images simples de 3x3 pixels peuvent être classées en fonction de leur contenu : barres blanches horizontales ou verticales. Les images sont converties en une séquence de 0 (px noir) et 1 (px blanc). Pour 1, une paroi de domaine magnétique est créée et injectée en entrée, tandis que pour 0, rien n'est injecté (voir *input principle* sur la figure ci-contre). Les avalanches correspondantes, générées par un processus de marche aléatoire, ont été simulées pour 20 injections (partie c de la figure par exemple). En ajustant localement les propriétés d'inversion de certains éléments magnétiques choisis, on peut stopper le processus d'avalanche et ainsi contrôler la forme de la distribution de retournement obtenue en sortie. Le panneau d montre un exemple de distribution fractionnée obtenue en arrêtant le processus d'avalanche à l'endroit indiqué par la flèche rouge (50 injections) ; le type de reconnaissance de formes que le réseau sera capable d'obtenir est alors défini par le choix des nano-aimants dont les propriétés ont été modifiées. Par exemple dans les parties e) et f), seules les avalanches correspondant à la barre horizontale arrivent à la sortie : le réseau a appris à discriminer les orientations des barres. La robustesse au bruit de notre concept a été testée en ajoutant 10% de bruit dans les images. Parmi les dix images testées, une seule image a été mal classée ! Ces simulations préliminaires démontrent l'intérêt de notre proposition. Un avantage de cette approche réside dans sa faible consommation énergétique. En effet, la majeure partie de la consommation proviens de l'injection des entrées, de la lecture des sorties et du "réglage" du réseau.



Concept du projet Bio-Ice. a)-f) Simulations de retournement des nano-aimants par avalanches. L'échelle de couleur est proportionnelle à la probabilité de retournement de chaque nano-aimant.

3. TRANSPORT DÉPENDANT DU SPIN

3.1 Divers travaux dans le domaine

3.1.1 Transport tunnel et états localisés

- Identification de défauts et transport tunnel à travers les défauts

Début 2013, en collaboration avec le groupe DMONS de L'IPCMS (Strasbourg), nous avons débuté une étude se situant à la frontière entre Spintronique et Optronique. L'objectif ici est de coupler magnéto-transport et optique. Cela est rendu possible par la présence de centres colorés (F, F+ par exemple dans les barrières de MgO voir la figure ci-dessous). Nous avons dans un premier temps mis en évidence par spectroscopie tunnel polarisée en spin l'impact de la présence de ces lacunes d'oxygène sur le magnéto-transport. La magnétorésistance tunnel montre en effet des variations marquées dans des gammes de tension correspondant aux énergies pour lesquelles des états localisés dans la bande interdite du MgO sont présents (voir figure ci-dessous). Nous avons également montré que le type de défauts était grandement lié à la technique de fabrication du MgO de la jonction tunnel. Ainsi, des défauts de type M, proches du niveau de Fermi, sont favorisés lors de la croissance par oxydation du Mg alors qu'ils sont quasiment absents lors de la croissance directe du MgO. La présence de ces états dans la bande interdite a été confirmée par des mesures de photoluminescence.

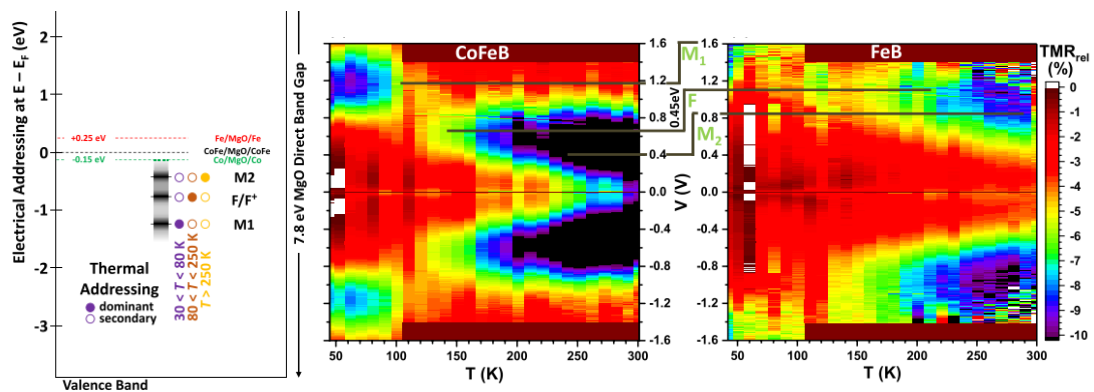


Schéma des positions énergétiques des états localisés dues aux lacunes d'oxygène. Les cercles indiquent la plage de température à laquelle un état localisé domine expérimentalement le paysage potentiel des barrières tunnels. **Variation de TMR relative** (tunnel magnéto résistance) en fonction de la température et de la tension pour une électrode supérieure en FeCoB et électrode supérieure en FeB. Un décalage de 0,45 eV est matérialisé par des lignes droites chevauchant les deux panneaux.

- Propriétés électroniques d'une MTJ pendant la mesure

Dans un second temps, nous avons voulu pousser plus loin l'identification des espèces responsables du transport tunnel par les défauts. Pour cela, nous avons entrepris des études *in operando* pour mieux révéler le lien de causalité entre les propriétés des matériaux du dispositif et son fonctionnement. Nous avons donc observé les propriétés électroniques des atomes impliqués dans le fonctionnement d'un dispositif lorsque que celui-ci est en opération. Le courant traversant une jonction tunnel magnétique (MTJ), qui implique le transport de charges à travers différentes espèces atomiques et interfaces, est mesuré pendant que ces atomes absorbent les rayons X issus d'un faisceau de photons de forte brillance issu d'un synchrotron. Nous avons pu démontrer expérimentalement un lien explicite

entre la performance de la MTJ et l'excitation de atomes d'oxygène présents dans la barrière tunnel et même des liaisons Fe-O situées aux interfaces barrière/électrode.

- Propriétés électroniques locales pendant la mesure d'une MTJ

Ensuite nous avons voulu pousser ces travaux plus loin par une analyse à la fois locale et *in operando* du fonctionnement de la jonction tunnel. Ainsi dans la continuité de l'étude exposée précédemment, nous avons cherché à connaître la réponse des jonctions tunnel lorsque celles-ci sont irradiées par un faisceau de rayons X focalisé. Nous avons donc proposé de scanner les jonctions tunnel magnétiques (MTJ) avec le nano-faisceau de rayons X du STXM de la ligne Hermès du synchrotron Soleil. Cette expérience devrait révéler spatialement pour la première fois les points chauds en fonctionnement dans une MTJ et révéler la structure électronique des points chauds (dûe aux lacunes d'oxygène par exemple), ainsi que le rôle des liaisons d'interfaces (Fe-O, Co-O) situées en regard de ces points chauds.

-Microscopie à balayage en mesure de total electron yield (STEYM)

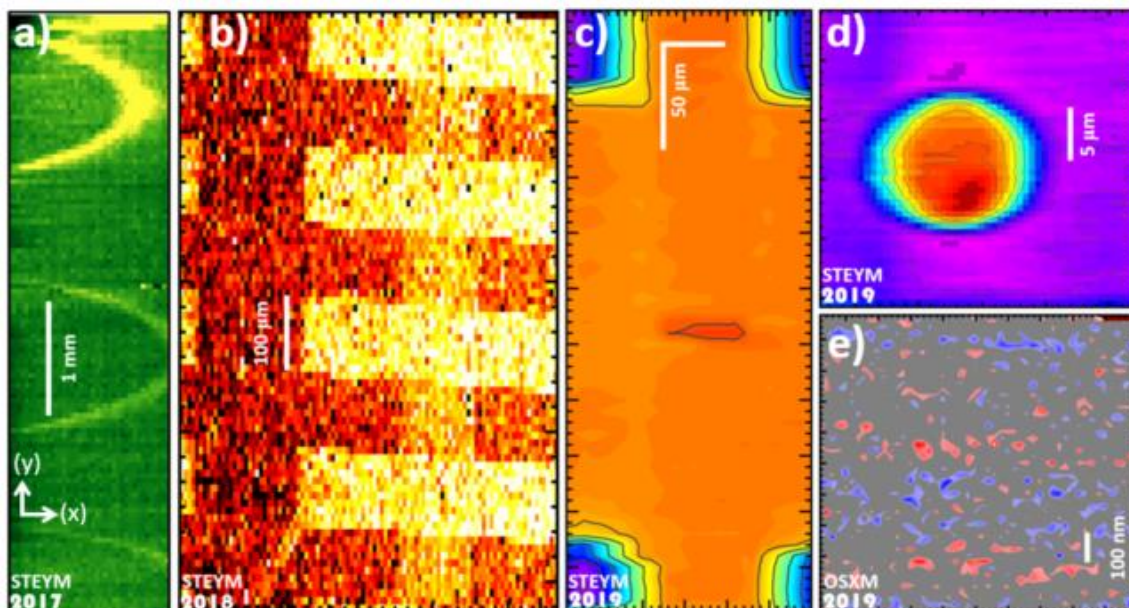
Dans un premier temps, il nous a fallu développer la technique de microscopie à balayage en mesure de *total electron yield* (STEYM) sur la ligne STXM Hermès du synchrotron SOLEIL. Le panneau f de la figure suivante montre le schéma du montage. Grâce à cela nous avons alors sans ambiguïté repéré la position des électrodes et des jonctions tunnels (voir sur la figure ci-après les panneaux a-d). Cette série d'expériences constituait un prérequis pour les mesures *in operando* locales sans utilisation de membranes.

-Microscopie à rayons X à balayage in operando (OSXM)

i.e. cartographie de la résistance d'une jonction tunnel obtenue en fonction de la position d'un faisceau de rayons X focalisé à la surface d'une jonction.

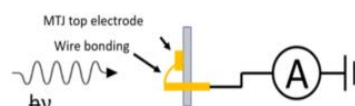
Une fois la MTJ localisée, nous nous sommes placés dans la configuration de mesure *in operando* (voir le panneau g de la figure suivante). Après un long processus de focalisation (le protocole expérimental optimal est toujours en cours de détermination), nous avons finalement réussi à enregistrer la toute première image OSXM (partie e de la figure ci-après). Cette image a été obtenue en enregistrant la résistance de la jonction tunnel lors du balayage de sa surface avec le faisceau de rayons X focalisé ayant une énergie réglée à 550 eV.

Il nous faudra dans la suite de cette étude vérifier i) la reproductibilité de cette première cartographie, ii) son lien avec l'énergie des rayons X, iii) sa dépendance à l'état magnétique de la MTJ et iv) sa variation lors du changement de la tension appliquée sur la MTJ.

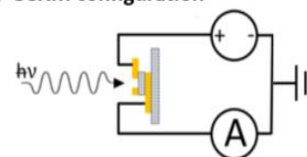


Ligne Hermès en mode in Operando : a-d) Images STEYM à différente échelle après chaque temps de faisceaux la résolution spatiale a été augmentée. L'échelle de couleur est proportionnelle au courant mesuré. **a)** Image STEYM des pinoches de connexion électrique. **b)** Image STYEM des électrodes composant nos jonctions tunnel magnétiques. **c)** Image prise au croisement des électrodes on distingue à peine la jonction tunnel. **d)** Image de la jonction tunnel. **e)** Image $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ en OSXM : résistance de la jonction codée en couleur en fonction de la position (x,y) du faisceau de rayon X focalisé. **f) et g)** Schéma de principe des montages pour les deux types de microscopie utilisée.

f) STEYM configuration



g) OSXM configuration



Publications associées à ces travaux :

- **Impact of electron-electron interactions induced by disorder at interfaces on spin dependent tunneling in Co-Fe-B/MgO/Co-Fe-B magnetic tunnel junction**

J. Bernos, M. Hehn, F. Montaigne, C. Tiusann **D. Lacour**, M. Alnot, B. Negulescu, G. Lengaigne, E. Snoeck, and F. G. Aliev
Phys. Rev. B 82, 060405 (R) (2010)

- **Localized states in advanced dielectrics from the vantage of spin-and symmetry-polarized tunnelling across MgO**

F. Schleicher, U. Halisdemir, **D. Lacour**, M. Gallart, S. Boukari, G. Schmerber, V. Davesne, P. Panissod, D. Halley, H. Majjad, Y. Henry, B. Leconte, A. Boulard, D. Spor, N. Beyer, C. Kieber, E. Sternitzky, O. Cregut, M. Ziegler, F. Montaigne, E. Beaurepaire, P. Gilliot, M. Hehn, M. Bowen
Nature Communications, 5, art. no. 4547 (2014)

- **MgO Magnetic Tunnel Junctions of Enduring F-type upon Annealing**

F. Schleicher, U. Halisdemir, E. Urbain, **D. Lacour**, M. Gallart, S. Boukari, F. Montaigne, E. Beaurepaire, P. Gilliot, M. Hehn, M. Bowen,
J. of Physics D: Applied Physics 48, 435004 (2015)

- **Probing a device's active atoms using synchrotron radiation**

M. Studniarek, U. Halisdemir, F. Schleicher, B. Taudul, E. Urbain, M. Herve, C-H. Lambert, A. Hamadeh, S. Petit-Watelot, O. Zill, **D. Lacour**, S. Boukari, L. Joly, F. Scheurer, G. Schmerber, V. Da Costa, A. Dixit, P.-A. Guitard, M. Acosta, C. Suergers, F. Leduc, F. Chouekani, E. Otero, W. Wulfhekel, F. Montaigne, J. Arabski, P. Ohresser, E. Beaurepaire, W. Weber, M. Alouani, M. Hehn, M. Bowen,
Adv.Mat. 29, 1606578(2017)

- **Tunnelling spintronics across MgO driven by double oxygen vacancies**

B. Taudul, E. Monteblanco, U. Halisdemir, **D. Lacour**, F. Schleicher, F. Montaigne, E. Beaurepaire, S. Boukari, M. Hehn, M. Alouani, and M. Bowen
Advanced Electronic Materials DOI: 10.1002/aelm.201600390 (2017)

- **Linking Electronic Transport through a Spin Crossover Thin Film to the Molecular Spin State Using X-ray Absorption Spectroscopy Operando Techniques**

F. Schleicher, M. Studniarek, K-S. Kumar, E. Urbain, K. Katcko, J. Chen, T. Frauhammer, M. Hervé, U. Halisdemir, L. M. Kandpal, **D. Lacour**, A. Riminucci, L. Joly, F. Scheurer, B. Gobaut, F. Chouekani, E. Otero, P. Ohresser, J. Arabski, G. Schmerber, W. Wulfhekel, E. Beaurepaire, W. Weber, S. Boukari, M. Ruben and M. Bowen
ACS Appl. Mater. Interfaces, 10 (37), 31580–31585 (2018)

- **Consolidated picture of tunnelling spintronics across oxygen vacancy states in MgO**

F. Schleicher, B. Taudul, U. Halisdemir, K. Katcko, E. Monteblanco, **D Lacour**, S. Boukari, F. Montaigne, E. Urbain, L. M. Kandpal, J. Arabski, W. Weber, E. Beaurepaire, M. Hehn, M. Alouani and M. Bowen
J. Phys. D: Appl. Phys. 52, 305302 (2019)

3.1.2 Effets de transport magnéto-thermique anisotrope

Compte tenu de l'augmentation importante des puissances dissipées dans les composants électroniques, l'utilisation des courants de chaleur pour alimenter d'autres dispositifs constitue une stratégie prometteuse en termes d'efficacité énergétique.

Depuis 2008, une série de publications fait état d'un signal magnéto-voltaïque, mesuré sur une électrode en réponse à une excitation thermique. Cet effet, appelé effet "spin-Seebeck", se distingue clairement des effets thermoélectriques dépendants du spin mesurés depuis longtemps sur les nano-structures magnétiques, qui sont la conséquence thermoélectrique directe de l'accumulation de spin. En effet, dans le cas de l'effet "spin-Seebeck", les échantillons typiques sont des couches minces de taille macroscopique dans la direction des courants (c'est-à-dire plusieurs ordres de grandeurs supérieurs à la longueur de diffusion de spin), et l'effet a été mesuré dans des matériaux magnétiques conducteurs, semi-conducteurs et isolants, lui donnant un caractère universel.

Dans ce contexte en 2014, et dans le cadre d'une collaboration avec Jean-Eric Wegrowe de l'école Polytechnique, Nous avons proposé une interprétation alternative pour laquelle les effets magnéto-voltaïques du type "spin-Seebeck" sont la conséquence d'un gradient de température dépendant de la direction d'aimantation. C'est ainsi que de façon similaire à l'équation de transport électronique anisotrope standard :

$$\vec{\varepsilon} = \rho \vec{J}^e + (\rho_z - \rho)(\vec{J}^e \cdot \vec{m})\vec{m} + \rho_H \vec{m} \times \vec{J}^e \quad (1),$$

Nous avons établi une équation transcrivant les différents effets de transport magnéto-thermique anisotrope :

$$\vec{\nabla}T = r \vec{J}^Q + \Delta r (\vec{J}^Q \cdot \vec{m})\vec{m} + r_{aRL} \vec{m} \times \vec{J}^Q \quad (2).$$

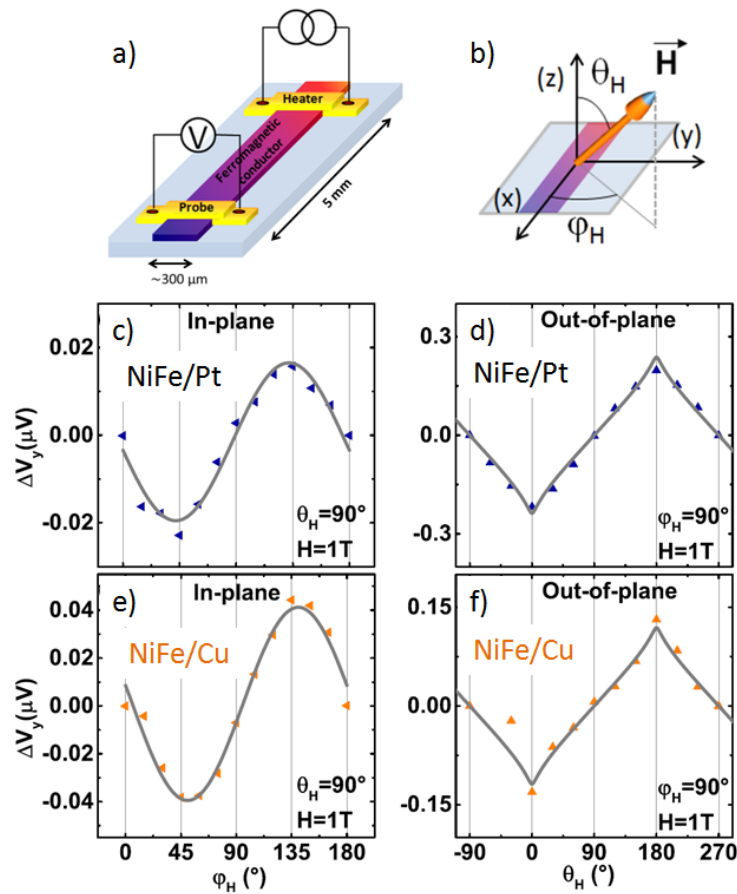
\vec{m} représente un vecteur unitaire associé à la direction de l'aimantation. Dans l'équation (1) $\vec{\varepsilon}$ est le champ électrique, \vec{J}^e représente le courant électronique, ρ la résistivité électrique, $(\rho_z - \rho)$ le terme responsable de l'effet d'anisotropie de magnétorésistance (AMR) et de l'effet Hall planaire (PHE), et ρ_H le terme associé à l'effet Hall anomal (parfois appelé effet Hall extraordinaire). Dans l'équation (2) $\vec{\nabla}T$ est un gradient thermique, \vec{J}^Q représente le courant de chaleur, r la résistivité thermique, Δr l'effet Righi-Leduc planaire, r_{aRL} l'effet Righi-Leduc anomal.

Après avoir remarqué la forte similarité des équations de transport électronique (1) et thermique (2), il est intéressant de s'attarder sur les conséquences du terme Righi-Leduc anomal. Dans une géométrie simple : présence d'un courant de chaleur orthogonale à la direction de l'aimantation, le développement d'un gradient de chaleur dans une direction orthogonale aux deux précédentes. Ce gradient thermique peut être mesuré par des électrodes faisant office de thermocouples. Le signal magnéto-voltaïque ΔV_y attendu sur l'électrode transverse en réponse à un courant de chaleur J_x^Q aligné le long de l'axe x suit alors la loi :

$$\Delta V_y = \Delta S J_x^Q \left(\frac{\Delta r}{2} \sin^2(\theta) \cdot \sin(2\phi) + r_{aRL} \cos(\theta) \right) \quad (3),$$

où θ et ϕ sont les angles définissant la direction de l'aimantation supposée uniforme, ΔS est l'amplitude du thermocouple formé par les différentes interfaces métalliques.

Pour confirmer la validité de l'équation (2) nous avons entrepris une étude expérimentale dont la figure suivante rapporte les principales mesures.



Etude expérimentale de l'effet Righi-Leduc Anomal. a) Vue schématique d'un dispositif typique et montage électrique associé. b) Définition du système de coordonnées. c-f) Mesures de tension transverse en fonction de la direction du champ magnétique appliqué pour deux types d'échantillon se distinguant par la nature de l'électrode de mesure composée soit de platine soit de cuivre. Les courbes grises sont des ajustements réalisés à partir de l'équation (2) et d'une détermination de la direction de l'aimantation basée sur un calcul de minimisation de l'énergie.

L'équation (2) est validée par la mise en évidence des trois propriétés suivantes : i) la variation de la tension ΔV_y en fonction des angles θ et ϕ suit très exactement celle prédite, ii) la tension ΔV_y est proportionnelle à la puissance de chauffage, et elle suit une fonction décroissante en fonction de l'épaisseur d de l'électrode (une électrode épaisse créant un court-circuit pour le courant de chaleur), iii) la tension ΔV_y est proportionnelle au thermocouple ΔS mesuré pour une électrode donnée.

Publications associées à ces travaux :

- **Anisotropic magnetothermal transport and spin Seebeck effect**

J.-E. Wegrowe, H.-J. Drouhin and **D. Lacour**,
Physical Review B 89 (9), art. no. 094409 (2014)

- **Anomalous and planar Righi-Leduc effects in NiFe ferromagnet**

B. Madon, Do Ch. Pham, J.-E. Wegrowe, **D. Lacour**, M. Hehn, V. Polewczyk, A. Anane, V. Cros,
Phys. Rev. B 94, 144423 (2016)

- **Towards Thermal Reading of Magnetic States in Hall Crosses**

Y. Xu, S. Petit-Watelot, V. Polewczyk, G. Parent, F. Montaigne, J.-E. Wegrowe, S. Mangin, D. Lacroix, M. Hehn, and **D. Lacour**
Phys. Rev. Applied 9, 034028 (2018)

3.2 Précession de spin électronique aux basses énergies

Les descriptions théoriques des effets liés à la magnéto-résistance géante (GMR) et à la magnéto-résistance tunnel (MRT) sont en général données pour *des configurations colinéaires* des aimantations en contact avec la couche séparatrice métallique ou isolante respectivement. Dans ce cas, si le spin des électrons est conservé lors du processus de transport, deux canaux de conduction (associés à chaque direction de spin) sont considérés comme indépendants. Lorsque les aimantations passent d'une configuration parallèle à antiparallèle, une forte variation de résistance est alors observée. Cette considération a donné lieu à de multiples études.

Lorsque *des configurations d'aimantations non colinéaires* sont prises en compte, la base correspondant aux états propres des fonctions d'ondes électroniques change lors du passage d'une électrode à l'autre. Cela entraîne une *précession du spin électronique* liée à un mélange des deux canaux de conduction. C'est cet effet de précession du spin électronique que j'ai proposé d'étudier lors de mon entrée au CNRS. Après plus de dix années d'efforts, nous sommes arrivés à mettre en évidence cette précession dans une gamme d'énergie qui n'a pas été explorée jusqu'à présent. Dans cette partie du tapuscrit, je présenterai les différentes étapes qui ont été nécessaires à cette démonstration et je donnerai les perspectives ouvertes dans le domaine.

3.2.1 Contexte scientifique

Jusqu'à présent, l'électronique de spin "conventionnelle" à base de vannes de spin et de jonctions tunnel magnétiques n'exploite pas le phénomène de précession du spin des porteurs de charge sous l'influence d'un champ magnétique ou électrique. Or, la prise en compte de cette précession apporterait un nouveau degré de liberté dans l'utilisation des courants polarisés en spin comme cela a été proposé avec des semi-conducteurs [S. Datta et B. Das, APL 1990]. C'est pourquoi l'étude du comportement du spin d'électrons ou de trous se déplaçant dans un métal ou un semi-conducteur constitue un des nouveaux challenges de l'électronique de spin.

D'un point de vue expérimental, trois éléments distincts sont nécessaires à ce type d'étude : un polariseur, une couche active et un analyseur. Le rôle du polariseur consiste à générer un courant de porteurs de charge polarisés en spin et l'analyseur va permettre d'obtenir une information sur la polarisation en spin du courant après son passage dans la couche active. C'est dans la couche active que prend place une interaction qui va modifier la direction du spin des porteurs de charge.

Le vecteur de cette interaction peut être soit un champ électrique, soit un champ magnétique. Dans le cas d'un champ électrique, c'est par l'intermédiaire du couplage spin orbite que va prendre place la précession du spin des porteurs de charge. Dans le cas d'un champ magnétique, c'est directement le couple exercé par le champ sur le moment magnétique associé au spin qui induit une précession du spin des porteurs de charge. Les champs électriques ou magnétiques mis en jeu dans l'effet de précession peuvent être : soit des champs externes (appliqués au cours de la mesure), soit des champs internes.

Bref résumé de l'état de l'art & Situation de nos travaux (colonne grisée)

Références	Awschalom	Appelbaum	van Wees	Siegmann	Nous
Couche active	Semi-Conducteur		Métal Non-magn.	Métal Ferromagnétique (MF)	
Interaction	E int. / B ext.	B ext.	B ext.	B ext.	B int.
Polariseur/ Analyseur	Lumière polarisée	MF	MF	Photocathode + vide/ vide + détect. de Mott	MF
E : Energie des porteurs de charge	$E_{BV}-E_F < E \leq E_{exc.}$	$E_{Sch.} < E < E_F + 2eV$	$E = E_F$	$E_F + 2 eV < E$	$E_{Sch.} < E < E_F + 2eV$
Régime des porteurs de charge	Balistique et diffusive	Balistique	Diffusif	Balistique	Balistique

[**Awschalom**] Y. Kato et al, Nature 427, 50 (2004); J.M Kikkawa and D. D. Awsachalom, Nature 391, 139 (1999)

[**Appelbaum**] I. Appelbaum, B. Huang, D. J. Monsma, Nature 447, 295 (2007)

[**vanWees**] F. J. Jedema, H. B. Heersche, A. T. Filip, J. J. A. Baselmans and B. J. van Wees, Nature 416, 713 (2002)

[**Siegmann**] D. Oberli, R. Burgermeister, S. Riesen, W. Weber, and H. C. Siegmann, Phys. Rev. Lett. 81, 4228 (1998)

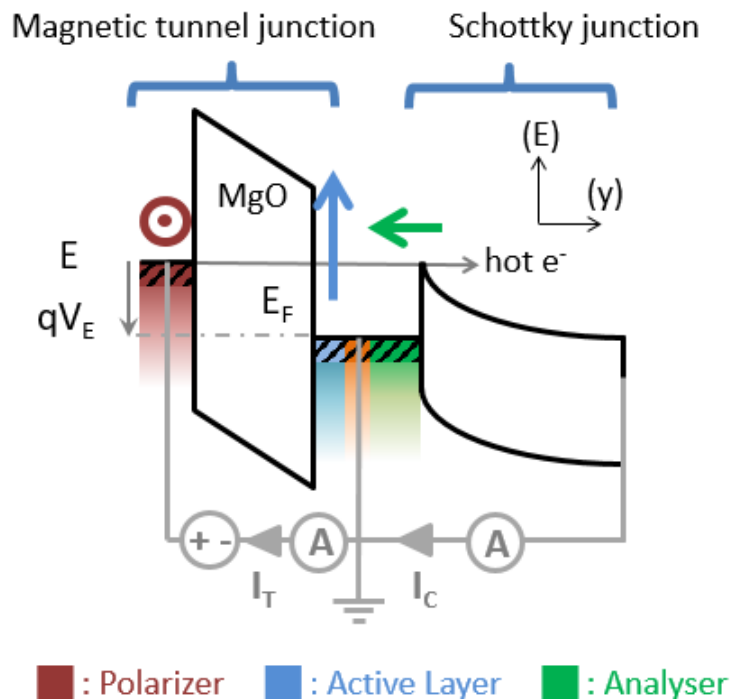
Il est possible de classer les différentes expériences déjà rapportées de ce domaine en fonction de la nature de la couche active. Le tableau ci-dessus résume ce classement et situe la thématique du projet de recherche.

- i) Dans les expériences de manipulation de spin menées par les groupes D. D. Awschalom et I. Appelbaum, c'est une couche active constituée d'un matériau semi-conducteur qui est utilisée (voir la première colonne du tableau). La précession de spin est engendrée soit par un champ électrique interne (dû aux contraintes dans le matériau), soit par un champ magnétique externe. Dans le cas du transistor de Datta et Das, la précession de spin serait engendrée par un champ électrique externe.
- ii) Un effet de précession de spin dû à un champ magnétique extérieur a également été mis en évidence dans le cas d'une couche active en aluminium par F. J. Jedema (deuxième colonne du tableau). Les porteurs de charge situés au niveau de Fermi sont alors dans un régime diffusif.
- iii) Le troisième type d'expériences implique une couche active composée d'un métal ferromagnétique. C'est le cas des travaux de D. Oberli et de ses collaborateurs pour lesquels un faisceau d'électrons polarisés en spin est extrait d'une photo cathode en GaAs dans le vide puis injecté à travers une couche de cobalt. Après avoir traversé la couche de cobalt, la polarisation en spin du faisceau électronique est analysée grâce à un détecteur de Mott. Au cours de ces dernières expériences, l'énergie des électrons en interaction avec le champ moléculaire peut varier de 1 eV à environ 16 eV au-dessus du niveau de Fermi (troisième colonne du tableau).

Il apparaît que très peu d'études expérimentales et théoriques concernant *l'interaction spin de porteurs de charge - champ magnétique ou électrique dans la gamme des basses énergies* ont été menées à ce jour. C'est pourquoi, nous avons engagé une activité de recherche sur *l'étude spectroscopique (aux basses énergies) de cette interaction* (colonne grisée du tableau). Cette étude est à la fois complémentaire et novatrice au regard des activités déjà menées dans le domaine.

3.2.2 Dispositif expérimental

Dans ce paragraphe, je vais détailler la composition du dispositif expérimental que j'ai développé pour la mesure de la précession. Comme cela a été évoqué précédemment, trois éléments sont essentiels à la réalisation d'expériences mesurant la précession de spin des porteurs de charge : un analyseur, un polariseur et une couche active. De plus, afin de parvenir à étudier la dépendance aux énergies proches du niveau de Fermi de l'interaction spin de porteurs de charge - champ magnétique interne, il faut imaginer un dispositif tout intégré afin de s'affranchir des travaux de sortie des matériaux. C'est pour cela qu'une jonction tunnel magnétique est utilisée pour l'injection de porteurs de charges polarisés en spin ayant des énergies comprises entre 0 eV et la tension de claquage de la jonction (supérieure à 1eV). L'utilisation d'un système "tout solide" va donc permettre d'accéder à la gamme des faibles énergies qui sont inaccessibles dans les cas des expériences de D. Oberli.



Dispositif tout solide utilisé pour la mesure de la précession du spin électronique aux basses énergies dans le champ moléculaire d'une couche magnétique.

L'injection des porteurs de charges se fera donc à l'aide d'une jonction tunnel magnétique (*cf.* ci-dessus). Les porteurs seront alors polarisés en spin grâce à l'aimantation de la couche magnétique appelée polariseur sur la figure. Le transport tunnel au travers de la barrière de MgO isolante conservant le spin à l'arrivée dans la couche active, le spin des électrons chauds est perpendiculaire au champ moléculaire de cette couche. Ceci va induire une précession du spin lors de la propagation de la couche active. En changeant la tension sur la barrière tunnel, il sera possible de faire varier l'énergie des porteurs de charges injectés et donc de faire une analyse spectroscopique de l'angle de précession en fonction de l'énergie dans une gamme d'énergies comprises entre 0.7 eV et environ 2 eV.

Il nous faut alors une dernière couche magnétique pour effectuer l'analyse de l'angle de précession. Celle-ci devra avoir une aimantation dont la direction stable est orthogonale aux directions d'aimantations stables des deux autres couches ferromagnétiques. C'est la

raison de la présence de la couche ferromagnétique nommée analyseur dans la figure précédente. Celle-ci forme avec la couche active une vanne de spin (tricouche bleu/orange/vert) qui grâce à l'effet de magnéto-résistance géante (GMR), rendra possible l'analyse de l'angle de précession.

Enfin, le dernier élément clef pour l'analyse de la précession est une barrière Schottky placée en-dessous de la vanne de spin. Cette diode Schottky permet une analyse double.

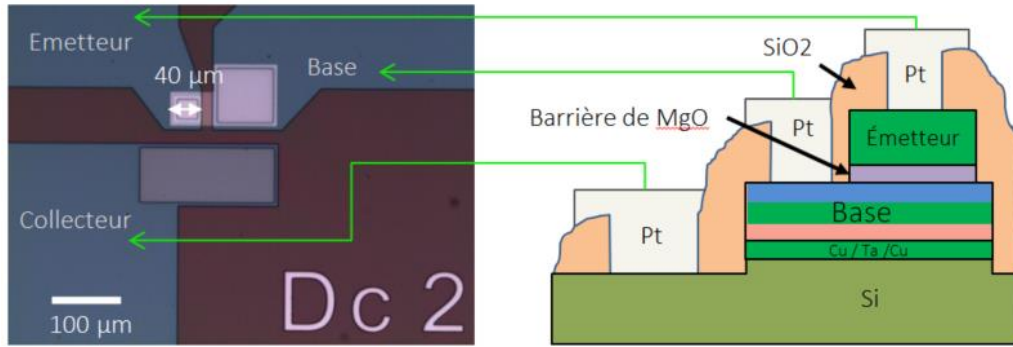
Tout d'abord, les électrons qui seront collectés dans le semi-conducteur, ici du silicium, auront une énergie après passage par la vanne de spin GMR supérieure à 0.7 eV (la hauteur de la barrière Schottky). Ainsi, nous analyserons la précession uniquement d'électrons chauds. Tous les électrons thermalisés retourneront à la masse via un contact électrique pris sur la vanne de spin présente entre la barrière tunnel et la diode Schottky.

D'autre part, la conservation du moment parallèle à l'interface Cu/Si va induire l'existence d'un cône d'acceptance à l'interface Cu/Si. L'angle maximum d'incidence des électrons θ_c a été évalué par le passé dans divers travaux de recherche comme étant égal à :

$$\sin \theta_c^2 = \frac{v_{my}^2 + v_{mz}^2}{v_{mx}^2 + v_{my}^2 + v_{mz}^2} = \frac{m_{Si}^*}{m_m^*} \left(\frac{E - q\Phi_B}{E + E_C} \right)$$

où v_{mi} sont les composantes de la vitesse dans le métal dans la direction i . La valeur de l'angle θ_c peut être estimée dans le cas de l'interface Cu/Si[100]. En effet, $\frac{m_{Si}^*}{m_{Cu}^*} = 0.2$, $q\Phi_B = 0.75\text{eV}$ et $E_C = 7.1\text{ eV}$. Il vient alors que $\theta_c = 4.5^\circ$ pour une énergie d'injection $E_c = 1\text{ eV}$. Ce filtrage angulaire en vecteur d'onde est complété par une injection filtrée angulairement par la jonction tunnel. Ainsi, pour une injection en énergie autour de 0.7eV, les électrons qui seront mesurés dans le silicium auront passé la vanne de spin de manière quasi balistique.

Un des points clefs quant à la réalisation d'une telle expérience réside dans la stabilisation de la configuration tridimensionnelle spécifique d'aimantation mentionnée ci-dessus. Cette stabilisation a été possible par l'optimisation des propriétés magnétiques. Nous souhaitons étudier la précession dans divers matériaux ferromagnétiques, or il est plus simple d'obtenir en couches minces des matériaux à aimantation planaire. Ainsi, la couche active aura une aimantation planaire et cela nous donnera dans la suite une plus grande latitude. De plus, une bonne texture cristalline est souvent nécessaire pour obtenir une couche mince ayant une aimantation perpendiculaire au plan. Ceci est plus aisé lorsque l'on est proche du substrat. Ainsi, la couche à aimantation perpendiculaire, commune à toutes les études, sera la plus proche du substrat. Nous avons choisi d'utiliser une multicouche Co/Ni pour diverses raisons : (i) pour cette couche une très forte polarisation en spin est prédite, cela devrait donner un effet GMR important, (ii) l'absence de métaux lourds qui pourraient soit induire des effets liés au couplage spin-orbite soit réduire fortement le courant d'électrons chauds. Enfin, la direction de facile aimantation de la couche injectrice sera pilotée par couplage d'échange direct avec une couche antiferromagnétique en alliage IrMn. Finalement une multicouche type pour l'étude de la précession du spin électronique est la suivante : Pt(5) IrMn(7.5) Co(2) Ta(0.5) CoFeB(2) MgO(2.5) X(y) Cu(3,5) [Ni(0,6)/Co(0,2)]₅ Ni(0,6) Cu(5) Ta(1) Cu(5) // Si[100,HF] (les nombres entre parenthèses sont des épaisseurs en nanomètres). Le contrôle des propriétés magnétiques est l'une des plus importantes causes de la complexité de cet empilement de couches. Après le dépôt de la multicouche et le recuit pour initier le champ d'échange, il est nécessaire de passer par 4 étapes de lithographie optique pour prendre des contacts électriques sur les différentes couches d'intérêt. La figure suivante montre une photographie optique d'un dispositif en fin de lithographie ainsi qu'une vue en coupe présentant les différents contacts électriques.



Dispositif tout solide pour la mesure de la précession à base énergie dans le champ moléculaire d'une couche magnétique. À gauche, une photo de microscopie optique des contacts en surface. À droite, un schéma représentant les différents contacts électriques de taille macroscopique.

Pour finir, le processus de précession vu du point de vue magnétique dans la structure multicouche est présenté dans la figure ci-après où ne sont représentées que les couches magnétiques. Des porteurs de charges polarisés par la couche nommée *Polarizer* sont injectés de gauche vers la droite. La polarisation en spin est alors selon l'axe défini par \vec{P}_0 . À l'arrivée dans la couche active le spin des électrons chauds est perpendiculaire au champ moléculaire de cette couche et va entrer en précession lors de sa propagation dans celle-ci. Lorsque les électrons traversent la couche active, il y a à la fois un phénomène de précession, défini par l'angle ε , et un phénomène de filtrage, défini par l'angle θ , qui ramène le spin des électrons le long de l'aimantation de la couche active (cf. figure suivante). C'est l'effet de GMR dû à l'empilement couche active/ espaceur / analyseur qui va permettre de quantifier les effets de précession et de filtrage.

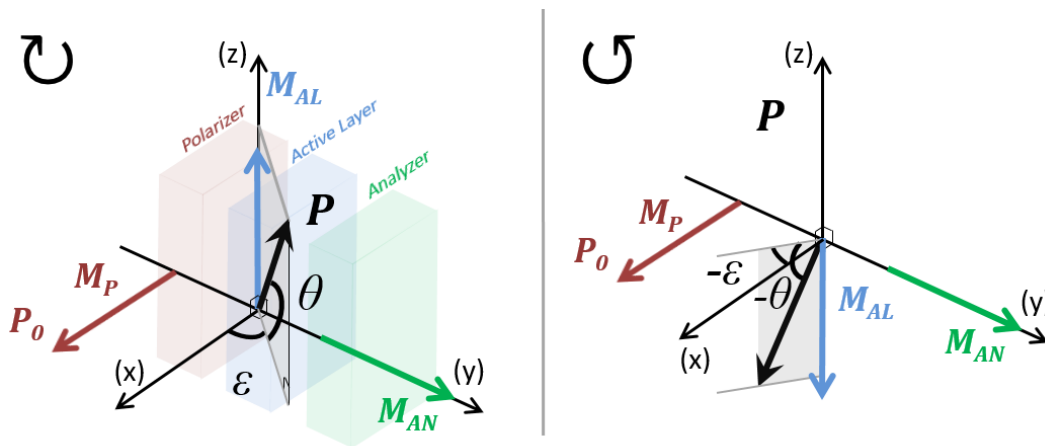
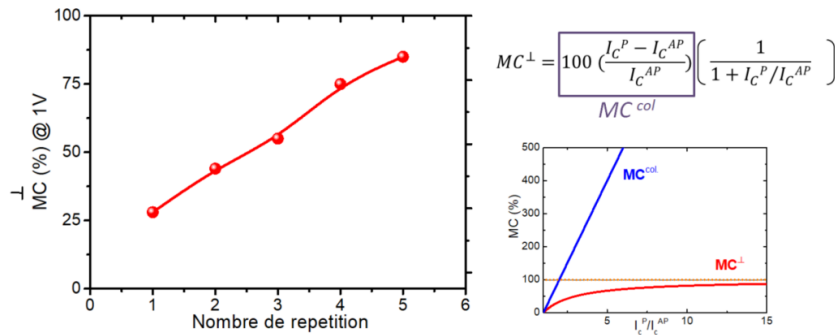


Schéma de la configuration magnétique et présentation des fonctions des trois couches magnétiques de la structure.

3.2.3 Optimisation de la structure et magnéto-courant

La première étape de constitution du dispositif a été l'optimisation du couple $[\text{Ni}(x)/\text{Co}(y)]_z$ et $\text{Cu}/\text{Si}[100,\text{HF}]$. Nous sommes partis de l'optimisation d'une diode Schottky $\text{Cu}/\text{Si}[100,\text{HF}]$ puis nous y avons intégré la multicouche Co/Ni . Cependant, la texture (100) du Cu déposé sur Si n'est pas propice à la texture (111) nécessaire à l'obtention d'une aimantation perpendiculaire dans le système Co/Ni . Ainsi, une fine couche intermédiaire de Ta a été insérée au sein de la couche de Cu pour obtenir du $\text{Cu}(100)$ sur le $\text{Si}(100)$ et au-dessus du Ta du $\text{Cu}(111)$. Après optimisation des épaisseurs, nous sommes arrivés à un compromis texture/rugosité/conservation des électrons chauds/stabilité aux recuits en température $\text{Cu}(111)(5\text{nm})/\text{Ta}(1\text{nm})/\text{Cu}(100)(5\text{nm})//\text{Si}(100, \text{décapé HF})$. Nous avons ensuite entamé l'étude de la multicouche Co/Ni sur ce Cu texturé (111). Après optimisation des épaisseurs des différentes couches, l'aimantation est perpendiculaire pour un nombre de répétitions allant au-delà de 5 si la multicouche démarre par le dépôt d'une couche de Ni . Ainsi le détecteur de la structure intégrée sera composé de $[\text{Ni}(0,6)/\text{Co}(0,2)]_z \text{Ni}(0,6)\text{Cu}(5)\text{Ta}(1)\text{Cu}(5) // \text{Si}[100,\text{HF}]$.



Optimisation du magnéto-courant dans une structure à aimantations croisées en fonction du nombre de répétition du Co/Ni .

Nous avons ensuite optimisé le magnéto-courant dans la structure $\text{Pt}(5)\text{Cu}(20)\text{MgO}(2.5)\text{Co}(3)\text{Cu}(3,5)[\text{Ni}(0,6)/\text{Co}(0,2)]_z \text{Ni}(0,6)\text{Cu}(5)\text{Ta}(1)\text{Cu}(5)//\text{Si}[100,\text{HF}]$. Le résultat de l'étude est présenté dans la figure ci-dessus. À première vue, les résultats sont décevants car pour 5 répétitions, le magnéto-courant perpendiculaire, variation relative du courant d'électrons chauds entre les configurations parallèle et croisée, n'atteint que 85% alors que le magnéto-courant colinéaire, variation relative du courant d'électrons chauds entre les configurations parallèle et antiparallèle, peut atteindre plus de 2000%.

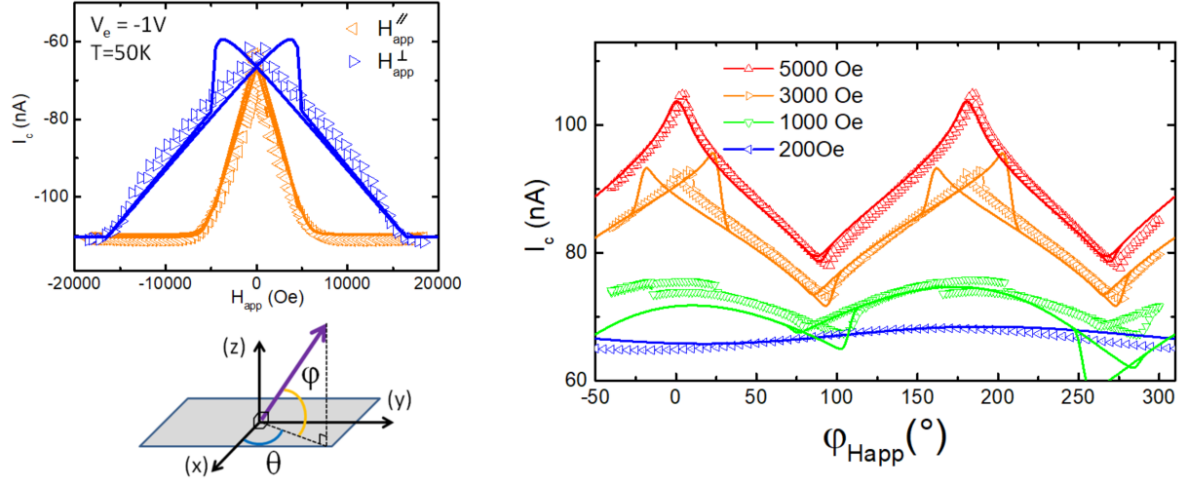
En fait, les valeurs du magnéto-courant perpendiculaire sont au plus égales à 100%. En effet, il est possible d'exprimer le magnéto-courant perpendiculaire en fonction du magnéto-courant colinéaire comme

$$MC^{\perp} = MC^{\text{colinéaire}} \left(\frac{1}{1 + \frac{I_C^P}{I_C^{AP}}} \right)$$

Lorsque le rapport $\frac{I_C^P}{I_C^{AP}}$ tend vers l'infini, le $MC^{\text{colinéaire}}$ croît très fortement alors que le MC^{\perp} sature à 100%. Avec une valeur à 85% de MC^{\perp} , on se trouve dans une situation où $\frac{I_C^P}{I_C^{AP}} = 10$ et $MC^{\text{colinéaire}} = 910\%$. Ainsi, la structure développée est à l'état de l'art et ces mesures constituent une première dans le domaine. Pour la suite, nous allons maximiser l'effet GMR et choisir d'utiliser une multicouche $[\text{Ni}(0,6)/\text{Co}(0,2)]_4$ ou $5\text{Ni}(0,6)$.

3.2.4 Dépendance angulaire

Il va de soi que la prochaine étape consiste à mesurer la dépendance angulaire du magnéto-courant. En effet, la mesure du courant collecté en fonction de l'angle relatif entre les aimantations des électrodes ferromagnétiques va nous permettre d'étalonner notre détecteur de polarisation. Or cette dépendance n'a jamais été vérifiée dans le cadre du transport d'électrons chauds.



Etude de la variation angulaire du magnéto-courant dans une structure $Pt(5)/Cu(20)/MgO(2.5)/Co(3)/Cu(3,5)[Ni(0,6)/Co(0,2)]_4 Ni(0,6)Cu(5)Ta(1)Cu(5)//Si[100, HF]$. **À gauche**, dans deux configurations simples : champ perpendiculaire au plan des couches (courbe bleue) et champ dans le plan des couches (courbe orange). **À droite**, variation du courant en fonction de l'angle d'application du champ et en fonction de l'intensité du champ appliqué. Les lignes continues sont issues de simulations.

Sur la base des développements réalisés sur la dépendance angulaire de la GMR dans les vanes de spin, nous allons chercher une dépendance du courant d'électrons chauds sous la forme :

$$I_C = I_C^\perp (1 + MC^\perp \overrightarrow{u_{Co}} \cdot \overrightarrow{u_{Co/Ni}})$$

où $\overrightarrow{u_{Co}}$ et $\overrightarrow{u_{Co/Ni}}$ sont les vecteurs unitaires porteurs des aimantations de la couche de Co et de la multicouche Co/Ni. Dans un premier temps, des historiques en champ magnétique simples ont été simulés à l'aide d'un modèle macrospin pour les deux couches magnétiques : champ perpendiculaire au plan des couches (ligne continue bleue) et champ dans le plan des couches (ligne continue orange) de la figure ci-dessus. L'ajustement des simulations aux mesures dans ces deux configurations simples permettent d'extraire les paramètres magnétiques des couches (champ d'anisotropie, champ démagnétisant) ainsi que les éventuels désalignements. Puis à l'aide de ces paramètres, les histoires en angle et en intensité de champs ont pu être simulées (lignes continues sur les courbes à droite de la figure précédente). Un très bon accord avec les mesures a pu être obtenu en utilisant la relation ci-dessus reliant I_C à $\overrightarrow{u_{Co}} \cdot \overrightarrow{u_{Co/Ni}}$ tant du point de vue des amplitudes que de la variation angulaire. Seul les sauts de I_C ne sont pas reproduits aux bons champs ce qui n'est pas anormal pour un modèle macrospin sans température. Nous pouvons donc par la suite utiliser cette relation pour notre détecteur de précession de spin intégré.

3.2.5 Mesure de précession, Résultats et discussion

Nous voici donc à la dernière étape de cette étude dans laquelle nous intégrons la troisième électrode ferromagnétique qui va entraîner la polarisation en spin du courant injecté par la jonction tunnel magnétique. Nous détaillons maintenant comment, à l'aide d'une combinaison de mesures du courant d'électrons chauds dans différentes configurations magnétiques, nous allons extraire l'angle de précession.

Les mesures qui suivent sont donc faites sur des multicouches du type Pt(5) IrMn (7.5) Co(2) Ta(0.5) CoFeB(2) MgO(2.5) X(y) Cu(3,5) [Ni(0,6)/Co(0,2)]₅ Ni(0,6) Cu(5) Ta(1) Cu(5) // Si[100,HF].

Comme nous prévoyons de réaliser une étude en fonction de l'énergie d'injection des électrons, nous serons amenés à changer la tension de polarisation sur la jonction tunnel. Or, si la tension change, le courant injecté par la jonction tunnel va varier et par voie de conséquence le courant d'électrons chauds collecté. Pour s'affranchir de cet effet, il est préférable de travailler avec des taux de transfert (*transfer ratio*) définis comme les rapports entre les courants collectés et les courants injectés :

$$TR = I_c / I_e.$$

Il vient alors :

$$TR = TR^\perp (1 + MC^\perp \vec{P} \cdot \overrightarrow{u_{Co/Ni}}),$$

où \vec{P} est la polarisation des électrons après le passage dans la couche active, MC^\perp est le magneto-courant relatif défini comme $\frac{I_c^\parallel - I_c^\perp}{I_c^\perp}$ où I_c^\parallel et I_c^\perp sont respectivement les courants collectés lorsque \vec{P} et $\overrightarrow{u_{Co/Ni}}$ sont parallèles ou perpendiculaires.

Le produit $\sin(\varepsilon) \cos(\theta)$ contenant les angles θ et ε que nous cherchons à déterminer peut être obtenu en mesurant les taux de transfert dans trois configurations magnétiques différentes : parallèle \parallel , *clock wise* \cup and *counter clock wise* \cup (définies dans la figure présentée dans la partie Dispositif expérimental de ce chapitre). Ces trois taux de transfert notés TR^\parallel , TR^\cup et TR^\cup , peuvent s'écrire :

$$TR^\parallel = TR^\perp (1 + MC^\perp P_0) \text{ et}$$

$$TR^\cup/\cup = TR^\perp [1 \pm MC^\perp P_0 \cos(\theta) \sin(\varepsilon)].$$

Ainsi le produit $\sin(\varepsilon) \cos(\theta)$ s'exprime comme en fonction de quantités déterminées expérimentalement :

$$\sin(\varepsilon) \cos(\theta) = \frac{TR^\cup - TR^\cup}{2TR^\parallel - (TR^\cup + TR^\cup)}.$$

Les mesures de trois taux de transfert effectuées sur un échantillon ayant une couche active composée d'un film CoFeB de 1 nm d'épaisseur sont rapportées dans la figure ci-contre. Elles fournissent des preuves claires d'un effet de précession dans la couche de CoFeB puisque TR^{\downarrow} et TR^{\uparrow} ne sont pas superposés. De plus, comme TR^{\downarrow} est toujours supérieur à TR^{\uparrow} , nous pouvons affirmer que s'il est continu avec l'énergie, $0 < \varepsilon < \pi$ pour l'épaisseur et la plage d'énergie considérée.

Les résultats du calcul des angles de précession ε pour des filtrages θ allant de 0° à 85° sont représentés sur la partie basse de la figure précédente. Il faut noter que les valeurs obtenues sont toujours inférieures à celles rapportées par Weber et al. et ce même si l'on prend en compte de forts effets de filtrage. Augmenter θ vers 90° augmente mécaniquement ε vers les valeurs de Weber mais un effet de filtrage de spin aussi élevé n'est pas attendu pour une couche aussi fine. Aussi une estimation de l'effet de filtrage devient nécessaire.

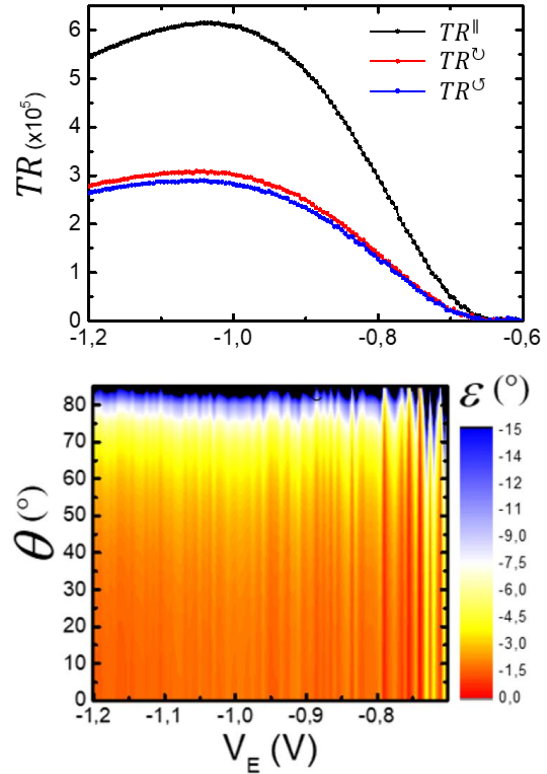
Cela peut se faire en variant l'épaisseur de la couche de précession en considérant que les électrons qui franchissent la barrière Schottky ont $\vec{k}_{\parallel} = \vec{0}$ (cette hypothèse est forte et nous y reviendrons après la présentation des résultats). Dans ce cas, la distance parcourue par les électrons est égale à d , l'épaisseur de la couche magnétique. Puisque le courant d'électrons chauds diminue de façon exponentielle avec la distance parcourue par les électrons chauds dans la couche active d , le produit $\sin(\varepsilon) \cos(\theta)$ peut être réécrit comme :

$$\sin(\varepsilon) \cos(\theta) = \sin(\varepsilon^* d) \cosh\left(\frac{d}{2\lambda^-}\right)^{-1},$$

où ε^* est l'angle de précession par nanomètre et $\frac{1}{\lambda^-} = \frac{1}{\lambda^{\downarrow}} - \frac{1}{\lambda^{\uparrow}}$ (λ^{\downarrow} étant les libres parcours moyens des électrons \downarrow et \uparrow). Des ajustements du produit $\sin(\varepsilon) \cos(\theta)$ vs. d permettent alors l'extraction de ε^* et λ^- en fonction de l'énergie des électrons chauds (cf. figure page suivante).

La précession a été étudiée dans deux couches ferromagnétiques, Co et CoFeB. Ces deux matériaux ont été choisis pour la qualité des barrières de tunnel qui peuvent être obtenues lorsque le MgO est déposé sur ces matériaux. Les épaisseurs des couches de précession varient entre 1 et 10 nm. ε^* et λ^- sont constants dans la fenêtre d'énergie étudiée. Leurs valeurs moyennes sont rapportées dans le tableau suivant et comparées aux valeurs issues dans la littérature.

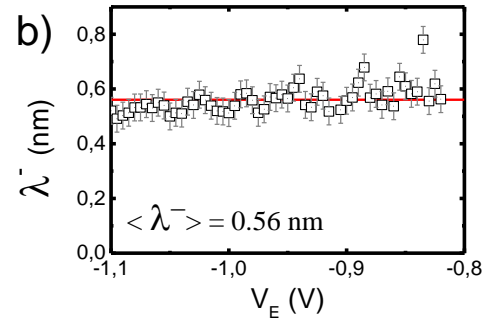
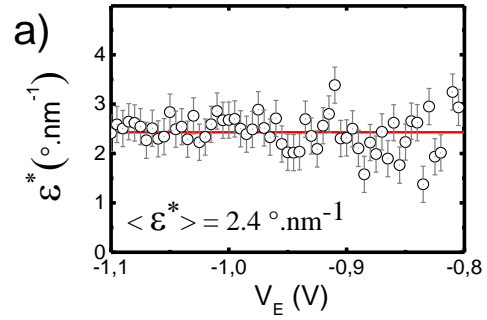
Tout d'abord, regardons les valeurs de λ^- pour le cobalt puisque plusieurs valeurs concernant ce matériau peuvent être trouvées dans la littérature. Toutes ces valeurs sont en



Haut : Taux de transfert mesurés à 60 K dans les trois configuration magnétique d'intérêt. **Bas :** Angles de précession calculés à partir des TR en fonction de la tension appliquée sur la barrière du tunnel en considérant différents valeurs de θ .

bon accord (notre travail, Weber et al, Van Dijken et al). Lorsque du fer est inséré dans la couche de cobalt ($\text{Co}_{84}\text{Fe}_{16}$), λ^- diminue pour atteindre une valeur 0,81 nm d'après Van Dijken et al (Phys. Rev. B 66, 094417 2002). Dans notre travail nous déterminons une valeur de 0.56 nm pour $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$. Le fait que λ^- varie très peu avec l'énergie dans notre fenêtre d'énergie a été souligné théoriquement par Nechaev et al. (Eur. Phys. J. B 77, 31–40 2010).

Les valeurs obtenues concernant les angles de précession sont plus surprenantes. Comme aucune donnée n'est actuellement disponible dans cette gamme d'énergie, le point de comparaison le plus proche, pour le même matériau (Co), est le travail de Weber et al : l'angle de précession par nanomètre que nous déterminons est 30 fois plus petit. L'addition de Fe au Co augmente cet angle de précession d'un facteur 3,5 et cette tendance semble être suivie à haute énergie puisque lors du changement de matériau de Co à Fe, l'angle de précession par nanomètre est augmenté.



a) ε^* vs. V_E b) et λ^- vs. V_E pour une couche active de 1 nm de CoFeB .

Tableau de comparaison des résultats				
	Notre étude		W. Weber et al.	
Couche active	CoFeB	Co	Co	Fe
Energie (+ E_F)	1 eV	1 eV	7 eV	7 eV
$\langle \varepsilon^* \rangle$	$2.4^\circ \text{ nm}^{-1}$	$0.7^\circ \text{ nm}^{-1}$	19° nm^{-1}	33° nm^{-1}
$\langle \lambda^- \rangle$	0.56 nm	1.39 nm	1.54 nm	1.49 nm

Lorsqu'un spin est injecté dans une région de l'espace où il existe une aimantation perpendiculaire à sa direction de polarisation initiale, ce spin précesse théoriquement en $\varepsilon^*(E) = \Delta k$ avec $\Delta k = k^\uparrow - k^\downarrow$. Notons que lorsqu'une seule bande est accessible $\Delta k = k^\uparrow$. En conséquence, la valeur de ε^* devrait être fortement dépendante de la structure de la bande de matériau composant la couche active. Des calculs *Ab Initio* ont été effectués pour obtenir la structure en bande d'une couche $\text{CoFe}(100)$ parfaitement ordonnée dans la direction Δ (partie a de la figure suivante). Ce calcul permet la détermination de $\varepsilon^*(E)$ (partie b de la figure). Aux énergies supérieures à 2 eV, il est possible d'accéder aux deux bandes de spin et, en diminuant l'énergie, on obtient une augmentation de ε^* , comme Weber et al. l'ont observé expérimentalement. Pour une énergie comprise entre 1.1 eV et 2 eV une seule bande est accessible (l'ouverture d'une bande interdite dans la plage d'énergie entre 0,7eV et 1,2eV est liée à la nature *supercellule* utilisée pour le calcul et ne doit pas exister dans notre travail expérimental). Dans cette gamme d'énergie $\Delta k = k^\uparrow$ diminue quand l'énergie diminue et des valeurs ε^* excédant 4π sont prédites !

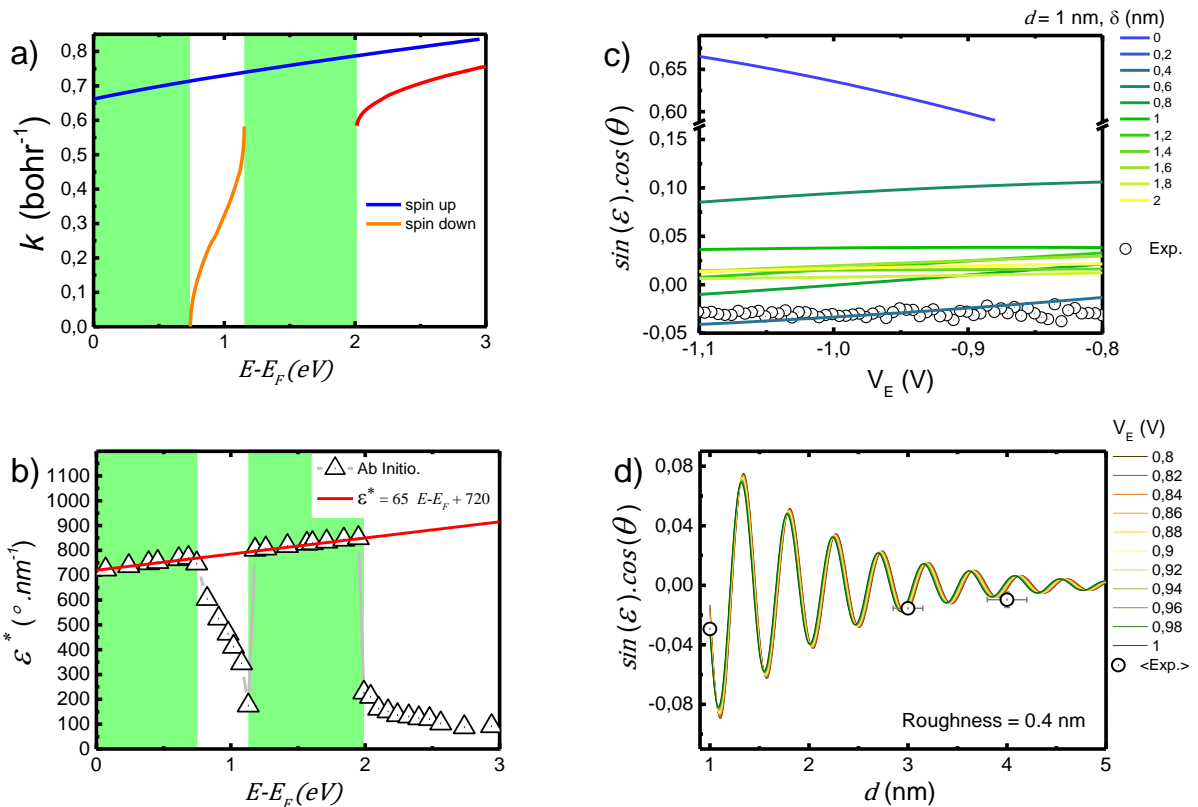
Dans la réalité, il existe de fluctuations de la distance parcourue par les électrons chauds. En considérant une variation linéaire de ε^* vs. E (ce qui est très raisonnable : voir la

courbe rouge de la partie **b** de la figure suivante) nous avons calculé une valeur moyenne $\langle \sin(\varepsilon) \cos(\theta) \rangle$ en considérant une distance de déplacement variant de d à $d+\delta d$:

$$\langle \sin(\varepsilon) \cdot \cos(\theta) \rangle = \frac{1}{\delta d} \int_d^{d+\delta d} \frac{\sin(\varepsilon^* \cdot x)}{\cosh(\frac{x}{2\lambda})} \cdot dx .$$

Les valeurs expérimentales de $\sin(\varepsilon) \cos(\theta)$ vs. E peuvent être reproduites avec $d = 1$ nm et $\delta d = 0,4$ nm (partie **c** de la figure suivante). Cette différence de distance de déplacement ne peut être liée $k_{\parallel} \neq 0$ car elle correspond à un angle supérieur de 44° . C'est un ordre de bien au-delà de l'angle d'acceptance déterminé précédemment ($\theta_c = 4.5^\circ$). Par contre une rugosité de couche de 0,4 nm est raisonnable. Cette rugosité peut être considérée comme constante en fonction de l'épaisseur de la couche et nous avons calculé les valeurs de $\langle \sin(\varepsilon) \cos(\theta) \rangle$ en fonction de d et de l'énergie d'injection en considérant $\delta d = 0,4$ nm. Des oscillations compatibles avec nos résultats expérimentaux sont obtenues (partie **d** de la figure ci-après) !

Pour conclure, grâce à notre dispositif tout solide nous avons montré pour la première fois une manipulation du spin à basse énergie. Ce résultat est le point de départ de nouvelles études dans lesquelles les matériaux, les orientations cristallographiques, la structure de la bande sont autant de paramètres dont l'influence rend l'étude de précession à basse énergie particulièrement intéressante.



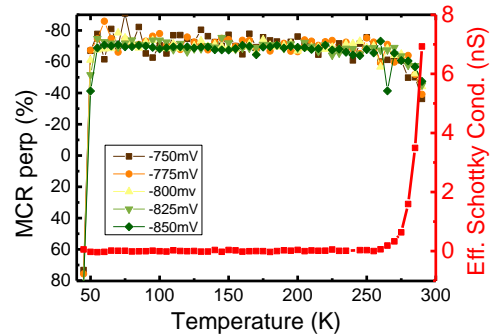
a) Structure de bande Δ pour le CoFe (100) d'après les calculs Ab Initio. b) ε^* vs. $E-E_F$ déduit des calculs Ab Initio. c) Moyenne de $\sin(\varepsilon)\cos(\theta)$ vs. V_E . Les lignes continues sont les résultats de calculs effectués pour une couche active de 1 nm d'épaisseur et différentes valeurs de δd . Les points sont les valeurs issues des expériences. d) Mean $\sin(\varepsilon)\cos(\theta)$ vs. d pour différentes valeurs d'énergie.

3.2.7 Perspectives

Les perspectives ouvertes par ces premières mesures sont nombreuses.

- Tester les processus de diffusion en fonction de la température

Jusqu'à présent, nous avons limité notre étude à une température autour de 60K. Une température suffisamment haute pour limiter des effets de piègeages de charges à l'interface Cu/Si et suffisamment basse pour éviter des courants de fuite de la diode Schottky. Dans un travail récent, nous avons tenté de quantifier les fuites de la diode Schottky et le résultat est rapporté dans la figure ci-contre. Cette mesure a été faite sur une structure avec un injecteur non magnétique. Nous voyons très clairement que la diode est suffisamment bloquante pour permettre des mesures entre 60 et 250K. Le magnétocourant perpendiculaire est constant sur toute cette gamme de température. Cette mesure nous montre qu'il sera possible de faire les mesures de précession dans une large gamme de température, au détail prêt que les jonctions tunnel devront tenir sous forte tension à des températures assez hautes. Ces mesures en température nous permettront peut-être de montrer quels sont les processus de diffusion à prendre en compte.



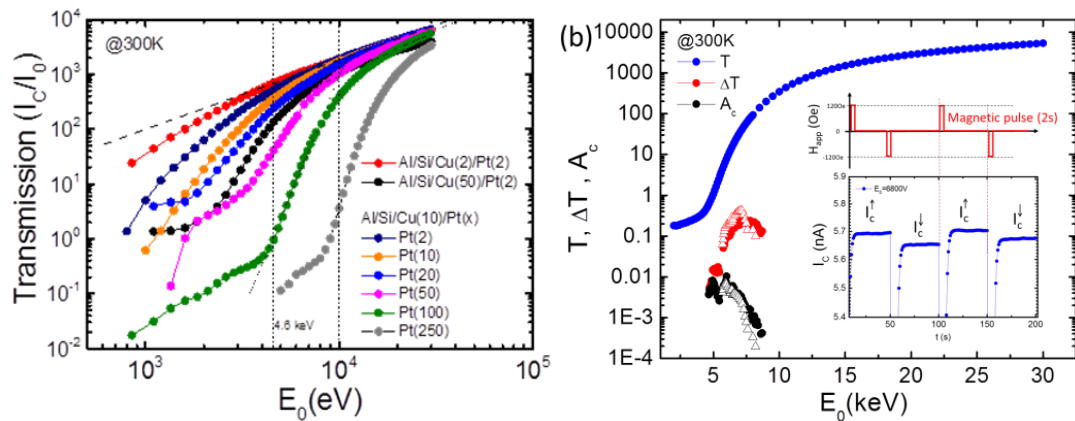
Axe de gauche, MC^\perp à différentes tensions en fonction de la température. Axe de droite, conductance effective de la jonction Schottky définie comme dI_c/dV_{tunnel} à basse tension.

précession dans une large gamme de température, au détail prêt que les jonctions tunnel devront tenir sous forte tension à des températures assez hautes. Ces mesures en température nous permettront peut-être de montrer quels sont les processus de diffusion à prendre en compte.

- Réalisation d'un détecteur de spin

Une seconde perspective consiste à utiliser l'optimisation que nous avons faite de la diode Schottky ainsi que de notre connaissance du transport des électrons chauds pour réaliser un détecteur de spin 3D fonctionnant à haute énergie dont l'énergie de fonctionnement peut être adaptée. En spectroscopie électronique, la mesure de la polarisation en spin à l'aide de détecteurs Mott, SPLEED ou à absorption nécessite généralement des conditions de fonctionnement sévères (haute tension, préparation de surface sous ultra vide, etc.). Le détecteur que nous proposons sera simplement composé d'une fine multicouche.

Dans un premier temps, en utilisant le faisceau d'électrons d'un microscope électronique à balayage comme source de courant externe à énergie accordable, nous avons étudié les propriétés de transport des électrons à haute énergie injectés sous vide dans la couche métallique de jonctions Schottky Pt/Cu/Si Schottky. Lorsque l'énergie d'injection varie entre 1 et 30 keV, le courant transmis dans le semi-conducteur augmente de plusieurs ordres de grandeur et atteint des valeurs supérieures de plusieurs ordres de grandeur au courant injecté par le vide. L'origine de cette amplification de courant provient de l'excitation d'électrons chauds pendant le processus de transport. Ceux-ci contribuent alors au courant collecté. Ce courant supplémentaire peut être généré soit dans la base métallique, par multiplication d'électrons secondaires, soit dans le substrat semi-conducteur par ionisation par impact. Ces deux situations se produisent dans notre expérience et la transition entre les deux régimes peut être distinguée directement dans la courbe de transmission montrée dans la partie gauche de la figure qui suit.



À gauche, transmission en fonction de l'énergie d'injection pour différentes multicouches déposées sur la diode Schottky Cu/Si. À droite, transmission dépendante du spin. Insert : variation du courant détecté dans le silicium en fonction de la configuration d'aimantation induite par les pulses de champ magnétique appliqué in situ.

Dans un second temps, nous avons placé dans la multicouche au-dessus de la diode Schottky une vanne de spin Pt/IrMn/Co/Cu/Co/Co dans une configuration polariseur/analyseur. Cette multicouche doit dans un premier temps simuler l'impact d'un faisceau polarisé en spin (ce qui n'est pas le cas dans notre microscope électronique à balayage). En effet, les électrons entrants dans la multicouche interagissent avec les électrons du métal, ce qui entraîne la formation d'une distribution d'électrons. Cette distribution d'électrons alors non polarisée se polarise en spin après avoir traversé la couche biaisée magnétique IrMn/Co. Les électrons polarisés seront ensuite filtrés en spin dans la couche libre de Co. L'aimantation de cette dernière couche est inversée in situ à l'aide d'une bobine magnétique montée dans le SEM. La partie de la distribution d'électrons ayant une énergie supérieure à la hauteur de barrière Schottky est transmise dans le semi-conducteur. En faisant passer l'énergie d'injection (E_0) de 1 à 30 keV, la dépendance en spin de la transmission $\Delta T = (I_{c\uparrow\uparrow} - I_{c\downarrow\downarrow})/I_0$, obtenue lorsque l'orientation relative des deux aimantations est modifiée, est fortement dépendante de l'énergie (voir partie droite de la figure ci-dessus). L'asymétrie de spin, définie comme $A_c = (I_{c\uparrow\uparrow} - I_{c\downarrow\downarrow})/(I_{c\uparrow\uparrow} + I_{c\downarrow\downarrow})$, atteint quelques pour cent pour des énergies de plusieurs keV. Ces résultats montrent qu'une grande sélectivité de spin peut être obtenue à température ambiante, offrant ainsi de nouvelles possibilités de détection de spin.

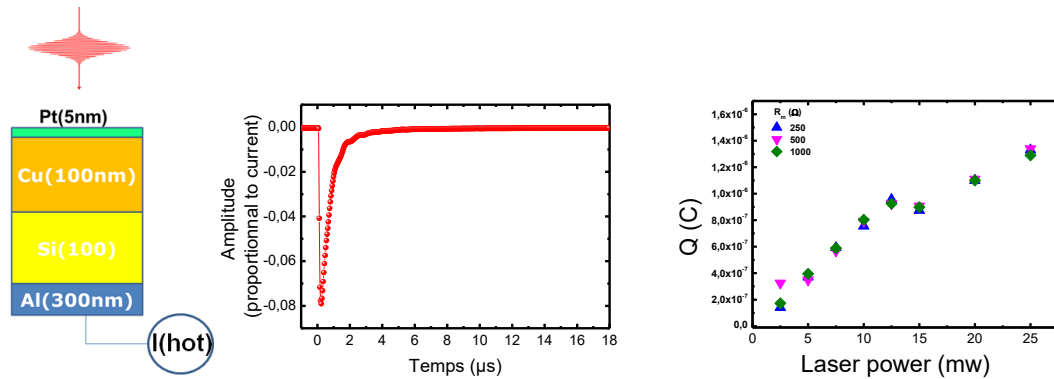
À l'heure actuelle, nous travaillons sur l'extension de cette géométrie à aimantation perpendiculaire afin de mesurer la composante du spin perpendiculaire. En combinant les 2 géométries, nous serons alors en mesure de mesurer les 2 composantes du spin d'un faisceau d'électrons. Dans une dernière étape, nous irons tester le détecteur dans un premier temps sur un SPLEEM et dans un second temps sur un réel dispositif de photoémission résolu en spin où nous comparerons les performances de notre détecteur avec les détecteurs actuellement utilisés.

- Mesure des électrons chauds

Une troisième perspective consiste à utiliser l'optimisation que nous avons faite de la diode Schottky ainsi que de notre connaissance du transport des électrons chauds pour réaliser des mesures du courant d'électrons chauds émis lors de la désaimantation ultra rapide de couches ferromagnétiques sous faisceau laser pulsé. Depuis quelques années, ce phénomène est étudié au laboratoire : un pulse laser femtoseconde induit la création d'un pulse ultra-bref d'électrons dans une couche absorbante telle que le Pt. Ce dernier atteint en partie une couche magnétique et entraîne sa désaimantation partielle ou totale. Ce

phénomène a été décrit théoriquement mais à l'heure actuelle, aucune mesure de ce courant n'a pu être faite. Nous profiterons de notre barrière Schottky pour réaliser cette mesure.

La géométrie de mesure est reportée dans la partie gauche de la figure suivante. À droite la figure reporte le courant mesuré en fonction du temps et l'intégrale de courbe donne la quantité de charges ayant été collectée (Q) dans le Si. Cette première expérience montre, comme attendu, que la quantité de charges augmente quasi linéairement avec la puissance laser. La quantité de charges mesurée est très proche de celle estimée étant produite par le laser dans la couche de Pt. Ce résultat est très surprenant car il montrerait que peu d'électrons ont été perdus lors de la propagation à travers 100nm de Cu. Ces résultats sont très encourageants et permettront un nouveau type de caractérisation dans un domaine en plein essor.



À gauche, géométrie expérimentale. Au centre, variation temporelle du courant.
 À droite, estimation de la quantité de charges collectées dans le Si en fonction de la puissance laser.

4. DIFFUSION DE LA CULTURE SCIENTIFIQUE

4.1 Communications scientifiques reprises par le CNRS

Quelques-unes des communications scientifiques issues de mes travaux de recherches ont été reprises pour alimenter soit le site web de l'Institut de Chimie du CNRS soit le rapport d'activité de la délégation Centre-Est du CNRS. Ces productions sont présentées ci-après.



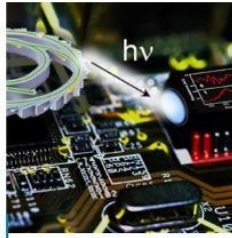
The screenshot shows the 'Archives des actualités de l'INC' page on the CNRS website. The main article is titled 'Domaines de charges magnétiques dans des glaces de spin artificielles', dated 'mercredi 16 juillet 2014'. The article text states: 'Les travaux effectués par l'équipe de l'Institut Jean Lamour (CNRS / Université de Lorraine), en collaboration avec une équipe de l'Institut Néel (CNRS), portent sur des "spins" artificiels disposés sur un réseau de type « Kagomé ». Pour ce réseau, les études théoriques prédisent un diagramme de phase complexe avec, notamment, un ordre de "charges magnétiques". Ces résultats sont publiés dans la revue en ligne Scientific reports.'

Capture d'écran d'une partie de la page du [site web de l'INC](#) associée à l'article *Size distribution of magnetic charge domains in thermally activated but out-of-equilibrium artificial spin ice* publié dans la revue *Scientific Reports* en 2014.



The screenshot shows the INC website with an article titled 'Un système magnétique où ordre et désordre se superposent', dated '30 juin 2016'. The article is categorized as 'RESULTAT SCIENTIFIQUE'. The text states: 'Des physiciens ont pour la première fois réalisé un système magnétique où l'ordre et le désordre sont superposés au point que chaque aimant élémentaire se trouve à la fois dans la phase ordonnée et dans la phase désordonnée.' To the left of the text are two images: 'Simulation' and 'Expérience', showing magnetic charge distributions. Below the simulation image is a plot of q_x (r.l.u) with values from -1 to 2.

Capture d'écran d'une partie de la page du [site web de l'INC](#) associée à l'article *Fragmentation of magnetism in artificial kagome dipolar spin ice* publié dans la revue *Nature Communication* en 2016.



© Daniel Laccour/CNRS

Accueil > Actualités

Le synchrotron mis à profit pour sonder les atomes actifs dans une jonction tunnel magnétique

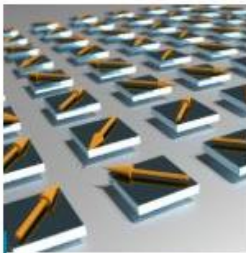
11 juillet 2017

RÉSULTATS SCIENTIFIQUES
INSTRUMENTS ET ANALYSE

Des physiciens ont réussi une première mondiale en mesurant la conduction électrique d'une cellule mémoire magnétique en fonctionnement lorsque celle-ci est exposée au rayonnement synchrotron.

A- / A+

Capture d'écran d'une partie de la page du site web de l'INC associée à l'article *Probing a device's active atoms using synchrotron radiation* publié dans la revue **Advanced Materials** en 2017.



Vue artistique du système de spins artificiels réalisant le modèle Potts à quatre états. ©D. Laccour

Accueil > Actualités

Vers de nouveaux métamatériaux magnétiques

04 janvier 2019

RÉSULTATS SCIENTIFIQUES
NANOSCIENCES
MATÉRIAUX

Des chercheurs de l'Institut Jean Lamour (CNRS/Université de Lorraine) et de l'Université de San Diego ont réussi à concevoir des réseaux de nanoaimants à quatre orientations de spin possibles. Les premiers résultats expérimentaux laissent entrevoir le développement de nouvelles générations de composants électroniques. Ces travaux ont été publiés dans *Nature Materials* le 29 octobre 2018.

A- / A+

Capture d'écran d'une partie de la page du site web de l'INC associée à l'article *A tunable magnetic metamaterial based on the dipolar four-state Potts model* publié dans la revue **Nature Materials** en 2018.

Le synchrotron mis à profit pour sonder les atomes actifs dans une jonction tunnel magnétique

Grâce à la brillance du rayon synchrotron, la science des matériaux est aujourd'hui capable de réaliser une spectroscopie poussée de matériaux complexes. Cependant, une telle étude ne renseigne pas toujours de manière pertinente sur le fonctionnement de dispositifs façonnés à partir de ces matériaux. De plus, tester les performances d'un dispositif tandis que l'on explore un espace de paramètres en science des matériaux potentiellement très vaste représente une méthodologie de recherche longue, qui présume un lien de causalité entre la modification de propriétés de matériaux et la performance du dispositif. C'est un changement de paradigme concernant ce lien de causalité qu'ont proposé les physiciens des différents laboratoires français dont l'IJL¹, en réalisant l'exploit de sonder, en fonctionnement, une mémoire magnétique à accès aléatoire (STTMRAM). Celle-ci constitue une des briques élémentaires des ordinateurs de prochaine génération. Ces résultats sont le fruit d'une proche collaboration entre deux UMR de la région Grand EST : l'IJL (Nancy, délégation Centre-Est) et l'IPCMS² (Strasbourg, délégation régionale Alsace) et l'équipe de recherche de la ligne DEIMOS du Synchrotron Soleil.

Advanced Material, juillet 2017

¹Institut Jean Lamour

²Institut de Physique et Chimie des Matériaux de Strasbourg

— UNE ANNÉE AVEC LE CNRS EN CENTRE-EST

Extrait du rapport d'activité 2017 de la délégation Centre Est du CNRS relatant les travaux publiés dans la revue *Advanced Materials* : *Probing a device's active atoms using synchrotron radiation*.

4.2 Exposition de NanoArt

Au cours de ces dernières années, j'ai réalisé une exposition de NanoArt qui s'intitule "When Magnetism meets NanoArt". Celle-ci est composée de plus d'une dizaine de tableaux réalisés à partir de données que j'ai collectées au cours des quinze dernières années (images de microscopie à force atomique, images de microscopie de force magnétique, simulations). L'objectif de cette exposition est de montrer à un large public des objets étudiés en laboratoire sous un angle esthétique. Chaque œuvre est associée à au moins une publication scientifique.

Le NanoArt est une discipline artistique aux intersections art-science-technologie. Elle met en valeur des nano-paysages visualisés à l'aide d'outils de recherche et traités en utilisant différentes techniques artistiques pour les convertir en œuvres d'art présentées à un large public. La façon dont les images sont capturées dans NanoArt distingue ce processus d'imagerie de la photographie où les images sont créées par des photons (cette définition inspirée principalement de celle donnée par Wikipédia).

Chaque pièce est signée et numérotée. Les œuvres d'art seront dupliquées sur demande dans la limite de 10 reproductions. L'entreprise allemande WhiteWall a été chargée de la production des tableaux finaux. La plupart du temps, deux types de rendus ont été utilisés. Soit l'œuvre d'art est recouverte d'une résine, soit elle sera directement imprimée sur de l'aluminium (voir Schémas ci-dessous). La production de la première série de tableaux a été financée par le projet GRMN (Greater Region Magnetism Network). Ce projet de type

INTERREG IV A, cofinancé par l'Union Européenne et les universités partenaires vise à développer le transfert de technologie vers le tissu économique local et à assurer une offre de formation complémentaire pérenne en magnétisme pour dynamiser la compétitivité de la Grande Région.



Deux types de finitions utilisés pour l'édition des tableaux. À gauche, œuvre recouverte d'une résine, à droite, œuvre imprimée directement sur une plaque l'aluminium.

Les œuvres de cette exposition sont répertoriées dans un livret où sont données des explications en Français et en Anglais sur l'œuvre, ses dimensions, le sujet d'étude, les techniques utilisées. Il donne également les applications possibles de ce type d'études. Ce livret peut être trouvé en annexe I de ce tapuscrit.

Le vernissage de cette exposition a eu lieu le 8 septembre 2014 au centre Prouvé (Nancy) dans le cadre de la conférence MSnow2014 (<http://nanomaterials2014.event.univ-lorraine.fr/the-workshop/>). L'exposition a ensuite été présentée à de multiples occasions (conférences, fêtes de la sciences, Science and You...) et a donné lieu à plusieurs communications dans les médias (voir figure ci-dessous).

En pointe sur les nanomatériaux et leurs usages...



Daniel Lacour, chercheur au sein de l'équipe "Nanomagnétisme et électronique de spin" de l'Institut Jean Lamour et auteur d'une exposition intitulée "Quand le magnétisme rencontre le Nano-Art", est l'invité du Café de Candide organisé par le CCAS de Neufchâteau le 12 mai 2016. Il y fera une présentation et dialoguera avec le public sur le thème : "Art et Science à l'échelle Nano".

Le Nano-Art est une discipline à la jonction entre l'art et la technologie. Il représente en général des nano-paysages visualisés grâce aux outils utilisés par les chercheurs. Les images ainsi obtenues sont ensuite travaillées numériquement afin d'obtenir un rendu esthétique. La façon d'acquies ces images différencie le Nano-Art de la photographie dont les images sont créées à partir de lumière. Au cours de ce café scientifique les différentes techniques utilisées seront présentées. Les sujets et le choix des quelques compositions (qui sont également des objets de recherches aussi bien fondamentales qu'appliquées) pourront également être discutés.

LA SEMAINE DE NANCY n° 228 du 4 septembre 2014

Les nanomatériaux et « nanoart » à Nancy

Nancy sera le lieu de rendez-vous international des spécialistes des nanomatériaux du 8 au 11 septembre au Centre Jean Prouvé.

L'événement «Nanomaterials 2014», organisé par des chercheurs de l'Institut Jean Lamour dans le cadre de deux consortiums européens s'articule autour de deux axes forts :
- un congrès scientifique, qui rassemble les meilleurs spécialistes internationaux du sujet. Parmi eux, Eric Fullerton (Etats-Unis), docteur honoris causa de l'Université de Lorraine, dont les recherches portent sur

l'écriture d'information sur disque dur.
- des rencontres entre laboratoires et industriels sur les nanotechnologies, avec un temps fort le 10 septembre : un forum co-organisé avec la CCI de Lorraine sur l'usage des nanomatériaux dans l'énergie, les transports et les emballages.
Cette journée du 10 sera ouverte par un invité prestigieux : le Britannique Stuart Parkin, lauréat 2014 du « Millennium Technology Prize » (l'équivalent du Nobel pour les découvertes appliquées) pour des travaux qui ont permis d'augmenter la

capacité de stockage sur disque dur. Physicien chez IBM et professeur à l'Université de Stanford, Stuart Parkin évoquera les enjeux industriels et économiques des nanomatériaux. 150 participants du monde entier sont attendus à cet événement. A cette occasion, le hall du Centre Prouvé accueillera une exposition de « nanoart », nouvelle discipline à la croisée de l'imagerie scientifique et de la peinture abstraite, réalisée par le chercheur Daniel Lacour, de l'Institut Jean Lamour.

POUR LA TROISIÈME ANNÉE consécutive, et pour la première fois au centre Prouvé, des spécialistes mondiaux des nanotechnologies sont réunis pour une semaine à Nancy, afin d'échanger des informations sur leurs recherches, de comparer leurs conclusions, d'ouvrir de nouvelles pistes. Le congrès, qui réunit 150 chercheurs de dix nationalités

différentes, est organisé par le laboratoire de recherche en sciences des matériaux de l'Institut Jean-Lamour, organisme lié au CNRS et à l'Université de Lorraine. Le chercheur Daniel Lacour a monté une exposition, dans le hall d'accueil du centre Prouvé, pour dévoiler au public le monde de l'infiniment petit des nanomatériaux.

Ses photos prises au microscope à force atomique plongent les visiteurs dans un autre univers. « Ce sont des images d'objets qui existent vraiment. Mais qui mesurent de 500 à 80 nanomètres... » Et de préciser qu'un cheveu coupé en 50 équivaut à un micron, et coupé en mille à un nanomètre. « Quand on réduit les di-

mensions, on exacerbe les effets. En arrivant à la taille nanométrique, les propriétés des objets changent. Les nanomatériaux offrent de nouvelles fonctionnalités aux composants électroniques... » commente le chercheur.

Le Britannique Stuart Parkin, lauréat 2014 du millennium technology prize, l'équivalent du prix Nobel, a expliqué aux congressistes comment il a réussi à augmenter la capacité de stockage sur disque dur grâce aux nanomatériaux. Avec tous les enjeux industriels et économiques qui en découlent.

Les chercheurs de l'Institut Jean-Lamour de Nancy partagent eux aussi une certaine renommée internationale en matière de recherche en sciences des matériaux. Ils disposeront d'ailleurs prochainement d'un outil ultraperformant pour fabriquer des matériaux. Il s'agit d'un tube sous vide de 40 m de long qui permettra de mutualiser l'ensemble de leurs équipements de fabrication. L'installation du tube commencera au mois de novembre, dans les locaux construits sur le site Artem.



Le chercheur Daniel Lacour a monté une exposition, dans le hall d'accueil du centre Prouvé, pour dévoiler au public le monde de l'infiniment petit des nanomatériaux... Photo Mathieu CUGNOT

Ph. M.



En images : l'exposition "When Magnetism meets NanoArt"

Chercheur à l'Institut Jean Lamour (Université de Lorraine/CNRS), Daniel Lacour signe une exposition d'images issues de ses travaux sur l'étude du magnétisme à l'échelle nanoscopique. Sélection de ses œuvres à découvrir dans la suite.

"Ça fait 10 ans que je conserve mes plus belles images". Chercheur de l'équipe Nanomagnétisme et Electronique de spin à l'Institut Jean Lamour, Daniel Lacour a mis sur pied une exposition de nano-art, une discipline qui mêle art, science et technologie. Ses "nano-paysages" présentés dans "When Magnetism meets NanoArt" ont été conçus en utilisant un microscope à force atomique ou à force magnétique puis traités numériquement. Cette technique d'acquisition des images permet d'étudier le magnétisme à l'échelle nanoscopique. Les œuvres de Daniel Lacour, issues de ses travaux de recherche, sont destinées à "proposer à tous une approche plus esthétique de la science". Elles ont déjà illustré plusieurs publications dans des revues scientifiques internationales telles que *Physical Review Letters*, *Scientific Reports* ou *Applied Physics Letters* et seront présentées dans le cadre de Nanomaterials 2014 avant d'être exposées à Sarrebruck par les partenaires allemands du réseau GRMN.



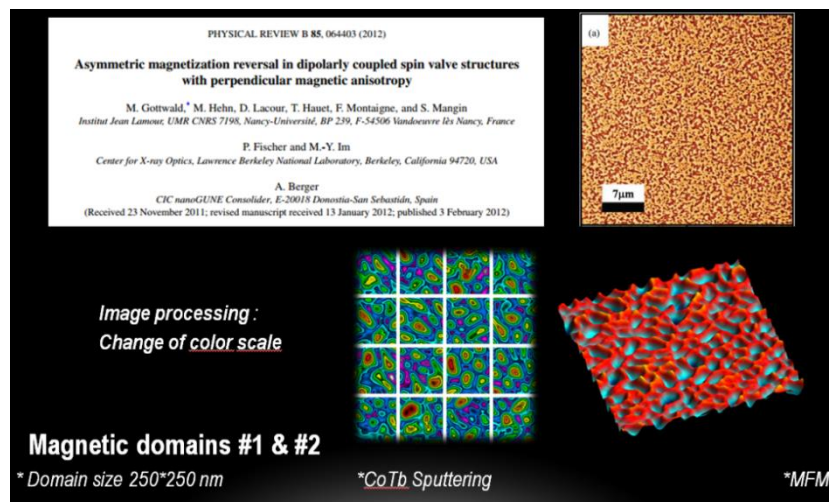
France 3 Lorraine : Reportage sur les travaux de Nano-Art de Daniel Lacour



Extrait de communications parues dans les médias et photographies liées à l'exposition *When Magnetism meets NanoArt*.

Le succès de cette exposition m'a amené à donner des conférences grand public à l'IUT Charlemagne (dans le cadre des journées Art et Techne), à Kaiserslautern (à l'attention des étudiants en master et doctorat), à Université de la Culture Permanente, à Neufchâteau à

l'occasion d'un café Candide. Au cours de ces conférences je détaille ce qu'est le NanoArt et comment à l'aide des mesures scientifiques réalisées en laboratoire la synthèse d'œuvres artistiques est possible. La figure ci-après montre un exemple de diapositive utilisée comme support lors d'une conférence.



Exemple de diapositive issue d'une des conférences 'NanoArt' que j'ai données. Cette diapositive donne une référence à un travail publié, les données scientifiques publiées ainsi que deux rendus possibles après traitement d'image.

4.3 Festival, Magnetica et Fête de la Science

- Festival du Film de chercheur

En 2015 suite à mes actions de communication grand public et la constitution de l'exposition, j'ai été sollicité pour participer au **jury de présélection du film de chercheur** du CNRS et au **jury du concours Filmer sa Recherche**. J'ai également été invité à échanger avec le grand public suite à deux projections données dans le cadre du festival Festhi'sciences² (à Thionville) et dans le cadre du festival du film du chercheur (à Nancy). Le dépliant édité pour cette animation est présenté ci-dessous.



Dépliant édité l'occasion du festival du film de chercheur (2015)

- **Magnetica, une exposition attirante**

Au cours de ces trois dernières années, j'ai contribué à élaborer une exposition itinérante tout public « MAGNETICA, une expo attirante ». Elle a pour objectif de mettre à mal les croyances liées au magnétisme. Dans cette exposition, j'ai participé à la création d'un film sur la NanoArt et sur la microscopie de champ proche, notamment à force atomique et à force magnétique. D'ailleurs, une partie de mes œuvres contribue au design de l'exposition et notamment mes œuvres sont utilisées pour habiller les murs, pour la réalisation des supports de communication, pour certaines illustrations d'expérience. J'ai également participé au tout début de la constitution de l'exposition, à la définition des thèmes et des manipulations. Ce travail a été exposé au musée de l'Histoire du Fer à Jarville en mars 2019 et finira l'année au Palais de la découverte. Un bel hommage à ce travail collectif directement issu du savoir-faire de l'équipe magnétisme de l'Institut Jean Lamour !

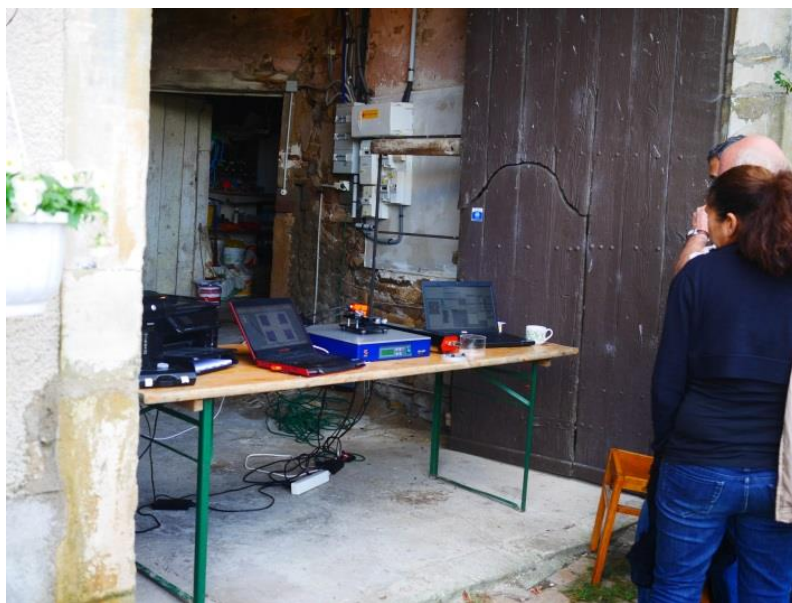
MAGNETICA
UNE EXPO ATTIRANTE
 ... vous propose un parcours magnétique.
 Nous vous invitons à le découvrir dans l'ordre proposé ...

- **Ilot 1 : Le magnétisme, où le trouver ?**
 - o Table 1 : les aimants : attraction / répulsion.
 - o Table 2 : Et les autres matériaux : magnétiques ou non magnétiques ?
 - o Table 3 : La boussole. Pôle Nord / pôle Sud.
 - o Table 4 : Diverses visualisations de champ magnétique.
 - o Table 5 : Un courant pour créer un champ magnétique.
 - o Table 6 : La Terre : un gigantesque aimant.
- **Ilot 2 : Le magnétisme, comment l'expliquer ?**
 - o Table 1 : Différents comportements magnétiques.
 - o Table 2 : Quelques propriétés des matériaux magnétiques.
 - o Table 3 : Visualisation des différents comportements magnétiques.
 - o Table 4 : Visualisation des domaines magnétiques.
- **Ilot 3 : Le magnétisme pour quoi faire ?**
 - o Table 1 : La force de Lorentz à travers le jeu Magnetica Strike.
 - o Table 2 : La force de Laplace et diverses applications.
 - o Table 3 : L'éducation et la production d'électricité.
 - o Table 4 : L'éolienne.
 - o Table 5 : les courants de Foucault.
 - o Table 6 : le ralentisseur à courants de Foucault.
 - o Table 7 : le chauffage par induction et le transformateur.
 - o Table 8 : le Wtrichy et le système ERD
- **Ilot 4 : Le magnétisme, quel rôle dans un PC ?**
 - o Table 1 : le magnétisme classique et en couche mince dans un PC.
 - o Table 2 : L'enregistrement magnétique numérique.
 - o Table 3 : les effets magnéto-optiques pour lire les informations codées.
 - o Table 4 : la magnéto-résistance géante.
- **Ilot 5 : Le magnétisme, quelles recherches à l'IJL ?**
 - o Table 1 : le TUBE DAUM.
 - o Table 2 : la lithographie et les caractérisations magnétiques.
 - o Table 3 : les capteurs magnétiques.
 - o Table 4 : la magnétographie.
- **Ilot 6 : Le magnétisme à ARTEM, un jeu d'enfants ?**
 - o Tables 1 et 2 : Minecraft magnétique

Les thèmes abordés dans l'exposition itinérante MAGNETICA

- **Fête de la science**

Tout au long de ma carrière de chercheur, j'ai contribué à la mise en place de démonstrations pour le grand public et à la participation de divers événements. À titre d'exemple et pour montrer la difficulté de certaines interventions, J'ai participé en 2014 à la fête de la science à Bouxurulles (village de 168 habitants situé en pleine campagne Lorraine). Lors de cette intervention, j'ai mis en place dans une grange le microscope à force atomique des travaux pratiques Nano et nous avons observé, avec le microscope posé sur une table de brasserie, un CD. Les visiteurs ont ainsi pu découvrir à quoi ressemblait un tel microscope, et comment fonctionnait un lecteur de Blu-Ray / DVD /CD de salon. Ils ont pu repartir avec une impression couleur de la surface de CD qu'ils avaient observée.



Microscopie de force atomique sur des CD dans une grange de Bouxurule

5. AUTRES ACTIVITÉS LIÉE À LA RECHERCHE

5.1 Encadrements

5.1.1 Thèses

Au cours de mes années de recherche, j'ai eu et j'ai encore la chance d'encadrer des travaux de thèse. Cet encadrement s'est fait en plus des encadrements non officiels réalisés sur les divers instruments dont j'ai la responsabilité au sein du laboratoire.

De **2008 à 2010** j'ai co-encadré à **50 %** la thèse de M. Julien Bernos qui s'intitule « Elaboration de jonctions tunnel magnétiques et de jonctions métal/oxyde/semi-conducteur pour l'étude du transport et de la précession du spin d'électrons chauds ».

De **2010 à 2013** j'ai co-encadré à **50 %** la thèse de Mlle Hanna Riahi qui s'intitule « Propriétés du réseau kagomé artificiel : micro-magnétisme, chiralités et cristaux de charges émergents ».

De **2014 à 2017** j'ai co-encadré à **50%** la thèse de M. Christopher Vautrin. Le travail de recherche effectué dans ce cadre concerne l'étude de la précession de spin aux basses énergies.

Depuis **2017**, je co-encadre à **50%** la thèse de M. Kosseila Ait Oukaci. Le travail de recherche effectué dans ce cadre concerne le contrôle des parois de domaines magnétiques ? pour la propagation d'ondes de spin.

Depuis **2017**, je co-encadre à **50%** la thèse de Mlle Maryam Massouras. Le travail de recherche effectué dans ce cadre concerne les réseaux de spin artificiels pour le calcul bio-inspiré.

Depuis **2018**, je co-encadre à **20%** la thèse de Mlle C. P. Bhavishya. Le travail de recherche effectué dans ce cadre concerne les mesures *operando* sur des dispositifs spintroniques pour l'étude du transport assisté par des défauts.

5.1.2 Stagiaires & Post-doctorants

J'ai eu également l'occasion d'encadrer des étudiants en stage de master (première et deuxième année), de dernière année d'école d'ingénieur et des post-doctorants sur des sujets se rapportant au micro-magnétisme. À titre ponctuel, j'ai encadré des étudiants en TIPE sur la mesure AFM et des collégiens en stage d'observation.

Post-doctorant

K. Mitzusuka, B. Negulescu, Y. Xu, F. Schleicher, E. N. Montebianco, I. Cinar

Master 2

D. P. Gweha (2019), B. Sheng (2018), D. Turenne (2017), V. Polewczyk (2016), J. Richie (2012)

Master 1 & École d'ingénieur

F. Al Mouatamid & Yvan Denis, C. Vautrin, D. Boivin & M.Y. Sfaxi

5.2 Enseignement et Formation

De 2008 à 2012 j'ai dispensé un cours d'introduction au magnétisme et à l'électronique de spin (4 h) à des étudiants en dernière année d'école d'ingénieur de l'ENSMM (<http://www.ens2m.fr/>).

Dans le cadre de l'accueil de stagiaires M1 et M2 et de doctorants, j'assure leur formation aux techniques de champs proches (AFM et MFM). Cette mission est assez conséquente car, sur la durée d'un master, les étudiants ne sont pas souvent autonomes même à la fin du stage. Un suivi quotidien est souvent nécessaire pour l'acquisition des images ou le traitement des données à assurer suite aux mesures.

C'est dans ce cadre, mais également dans le cadre du traitement des données issues de l'ensemble de ma recherche, que je me suis formé et que j'ai approfondi ma connaissance du logiciel Mathematica. À l'heure actuelle, j'ai développé des codes qui permettent rapidement de traiter les données de mesure des instruments de transport sous champ magnétique, des microscopes champs proches et des grands instruments (*i.e.* synchrotrons). Je fais également de la modélisation "macrospin" des résultats de mesure de transport et d'effet de transport électronique (AMR, TMR, Effet Hall, Corbino...). Je passe un temps non négligeable dans la transmission de ce savoir auprès des étudiants. Ainsi, en plus des compétences expérimentales développées, ils repartent du laboratoire avec des bases solides concernant l'utilisation de ce "couteau suisse" qu'est Mathematica.

5.3 Expertises

De 2007 à 2011, j'ai fait partie du groupe d'experts nano-magnétisme et électronique de spin de l'**OMNT** (feu unité mixte de service UMS CNRS CEA). Dans ce cadre, j'ai participé à la sélection et au commentaire des sujets couverts par la revue de l'observatoire des micros et nano-technologies.

Depuis mes plus jeunes années de recherche, je suis "*reviewer*" pour de nombreuses revues : **PRL, PRB, JAP, APL, MMM...**

Finalement je participe régulièrement à des expertises pour des **agences/organismes de financement de la recherche** (ANR, NanoSaclay...)

5.4 Organisation de colloques

En **2012** j'ai co-organisé un mini colloque intitulé **Micro et Nano magnétisme** aux **JMC13** (13^{èmes} journées de la matière condensée).

En **2014** je participais au comité d'**organisation** de la conférence **MSnows**.

En **2016** j'ai participé au comité d'organisation de la conférence **IWST**.

En **2016** également, j'ai piloté et été organisateur principal du **Colloque Louis Néel 2016** à Saint-Dié-des-Vosges. Cette manifestation rassemble tous les 18 mois l'ensemble de la communauté du magnétisme en France. Ceci correspond à environ 200 participants et a nécessité un travail d'organisation sur toute une année. Pour cette occasion et avec le support de l'atelier de conception de l'institut (J-G Mussot) j'ai créé le trophée Louis Néel : une récompense remise en jeu à chaque colloque Louis Néel (voir figure ci-contre).



Trophée Louis Néel : Conception & Réalisation

Je fais également partie de plusieurs comités scientifiques de congrès et conférences internationales. Depuis **2014**, je fais partie du comité scientifique de **SPIE Spintronics** (symposium international sur le magnétisme et électronique de spin) qui organise chaque année au mois d'Aout un symposium à San Diego CA. En **2018**, j'ai fait partie du comité scientifique du **Colloque C'Nano** organisé à Toulon dans le symposium dédié au nano-magnétisme et à l'électronique de spin.

5.5 Participation à des contrats de recherche

ANR VOICE (2009-2012)

Implication : 31%

Montant (pour le partenaire IJL) : 107,7 k€

Partenaires : SPEC URA 2464, UMφ CNRS-Thales UMR 137, IEF UMR 8662, In Sicilicio (<http://www.insilicio.fr/>)

Thème : Etude de la dynamique de vortex magnétique par transfert de spin

Rôle : Expertise en micro et nano-magnétisme, mesures de microscopie à force magnétique et simulation micro-magnétique.

ANR SPINPRESS (2009-2013)

Implication : 50%

Partenaire : IPCMS UMR 7503, Institut Néel UPR 2940, LPMC UMR 7336

Montant (pour le partenaire IJL) : 113,9 k€

Thème : Etude de la précession du spin électronique aux basses énergies.

Rôle : Expertise en transport électronique polarisé en spin, magnétisme et micro fabrication.

ANR FRUSTRATED (2012-2015)

Implication : 31%

Partenaire : Institut Néel UPR 2940

Montant (pour le partenaire IJL) : 120 k€

Thème : Etude de la frustration magnétique au sein de glace spin frustrés

Rôle : Expertise en micro-magnétisme et micro fabrication.

Projet ICEEL (institut Carnot) FLAMME (2014-2015)

Implication : Coordinateur

Partenaire : LEMTA UMR 7563

Montant (pour le partenaire IJL) : 100 k€

Thème : Etude d'effet magneto-voltaïque induit par des courants de chaleur

Rôle : Expertise en transport électronique polarisé en spin, magnétisme et micro fabrication.

ANR SPINAPSE (2014-2017)

Implication : Coordinateur local

Partenaire : IPCMS UMR 7503

Montant (pour le partenaire IJL) : 164 k€

Thème : Etude du transport tunnel polarisé en spin assisté par des lacunes

Rôle : Expertise en transport électronique polarisé en spin, magnétisme et micro fabrication.

ANR SWANGATE (2017-2020)

Implication : 30%

Partenaire : IPCMS UMR 7503, C2N

Montant (pour le partenaire IJL) : 207 k€

Thème : Logique magnétique par ondes de spin guidées dans les parois de domaines

Rôle : Expertise en microscopie de force magnétique, grand instrument.

ANR POLARSPIN (2017-2020)

Implication : 30%

Partenaire : Institut Néel UPR 2940, Cryoscan

Montant (pour le partenaire IJL) : 162 k€

Thème : Capteur de polarisation en spin

Rôle : Expertise en transport électronique polarisé en spin, magnétisme et micro-fabrication.

ANR Biolce (2018-2020)

Implication : Coordinateur principal

Partenaire : Institut Néel UPR 2940, UMφ CNRS-Thales UMR 137, C2N

Montant (pour le partenaire IJL) : 205 k€

Thème : Calcul Bio-Inspiré à base de réseaux magnétique frustrés

Rôle : Expertise en microscopie de force magnétique, grand instrument.

5.6 Brevet et applications

5.6.1 Brevet

En **2013** mes recherches concernant la propagation de paroi de domaines magnétiques dans des matériaux à aimantation perpendiculaire m'ont amené à déposer un **brevet** concernant une unité **logique magnétique** qui permet la comparaison de donnée.

Demande de Brevet FR N°1450427 du 20 janvier 2014 déposé au nom de l'Université de Lorraine et du CNRS par les inventeurs T. Hauet, D. Lacour, F. Montaigne M. Hehn. Il demande la protection de l'invention intitulée «Circuit de vérification d'informations binaires telles qu'une clé de sécurité pour un dispositif électronique». Extension internationale PCT/EP2015/050646 du 15 Janvier 2015.

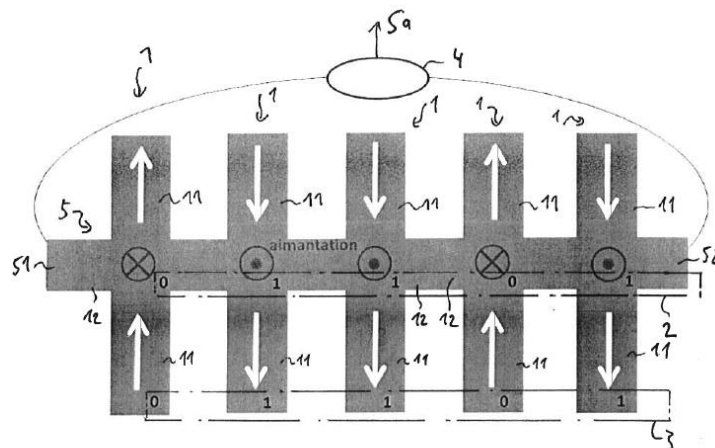


Fig. 1

Figure illustrant le fonctionnement de l'unité logique magnétique extraite du brevet.

5.6.2 Applications

- **Magnetic Logic Unit (MLU)**

Courant 2014, nous avons donc proposé et breveté un circuit de vérification d'informations binaires basé sur l'utilisation de croix de Hall à aimantation perpendiculaire. Cette solution présente plusieurs avantages par rapport à celle qui a été proposée par le passé. Nous avons testé son fonctionnement et montré que sa réalisation était possible.

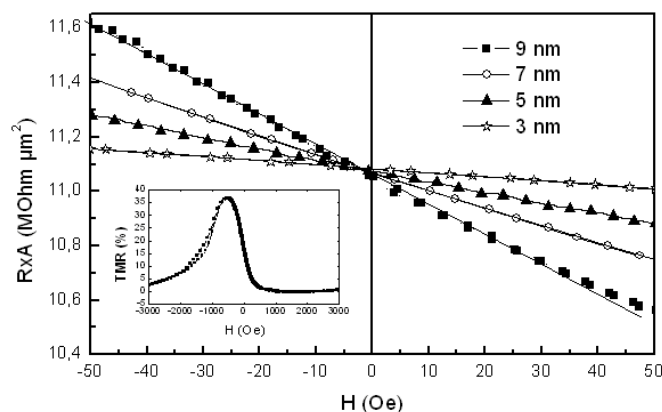
Publication associée à ce travail :

- *Extraordinary Hall effect based magnetic logic*

T. Liu, **D. Lacour**, F. Montaigne, S. Le Gall, M. Hehn and T. Hauet, Appl.Phys. Lett 106, 052406 (2015)

- **Capteur de champ magnétique à base de jonctions tunnel**

Les capteurs de champ magnétique couvrent un vaste champ d'application : on citera par exemple les têtes de lecture des disques durs, les détecteurs de courant électrique, et les capteurs de rotation ou de position utilisés dans l'industrie automobile. De nos jours la majorité des capteurs de champs magnétiques destinés à des applications industrielles est basée soit sur l'effet Hall, la magnéto-résistance anisotrope ou la magnéto-résistance géante et cela est en grand partie dû à la combinaison d'un faible coût de fabrication à une relative facilité d'intégration. L'utilisation de jonctions tunnel magnétiques permet ici d'envisager une nouvelle génération de capteurs de champ magnétique ayant une sensibilité largement accrue. De plus, la résistance importante des dispositifs à base de jonction tunnel leur assure une consommation de basse puissance. Cette dernière propriété constitue sans doute l'avantage majeur des capteurs à base de jonction tunnel par rapport aux capteurs utilisant d'autres technologies dans un contexte où les économies d'énergie sont devenues une préoccupation de chaque instant. En partenariat avec la Société Nationale du Roulement et la société Sensitec nous avons réalisé un capteur de champ magnétique à base de jonction tunnel dont l'architecture aisément modifiable permet de mesurer une large gamme de champ magnétique. Les propriétés magnétiques de l'électrode de référence et de la couche de détection sont pilotées par couplage d'échanges unidirectionnels avec une couche antiferromagnétique. Grâce à la différence de température de blocage présentée par les couches antiferromagnétiques d'épaisseurs différentes et à l'utilisation du structure AAF pour l'électrode de référence nous avons obtenu un signal électrique linéaire et réversible (voir figure). Nous avons également démontré que l'architecture utilisée permet à la fois de régler la sensibilité et la gamme de champ mesurée (fenêtre de linéarité du capteur). La sensibilité varie linéairement avec l'épaisseur de la couche ferromagnétique utilisée comme électrode de détection : une épaisseur accrue de cette couche provoque une augmentation de sensibilité. Celle-ci s'accompagne d'une réduction de la fenêtre de linéarité. En accord avec un calcul analytique nous avons montré expérimentalement que la sensibilité de capteurs basés sur l'architecture originale proposée peut être variée sur plus d'une décade tandis que la fenêtre de linéarité peut être modifiée d'un facteur 5. Cette architecture permettant d'obtenir une successibilité magnétique qui n'est en rien liée à la forme du dispositif est de fait très prometteuse car celle-ci doit supporter une réduction drastique de la surface de la jonction tunnel. Elle permet par exemple d'envisager la mesure d'un champ magnétique avec une excellente résolution spatiale (surface de la jonction tunnel).



Produit Résistance*Surface de jonctions tunnel magnétique ayant des épaisseurs de couches sensibles différentes en fonction du champ magnétique appliqué. La linéarité du signal observée permet une mesure simple du champ magnétique.

Publications associées à ces travaux :

• **Field sensing using the magnetoresistance of IrMn exchange-biased tunnel junctions**
D. Lacour, H. Jaffrès, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, A. Vaurès and J. Humbert
 J. Appl. Phys. 91, 4655 (2002)

• **On the use of exchange biased top electrodes in magnetic tunnel junctions**

D. Lacour, H. Jaffrès, O. Durand, J-L. Maurice, F. Nguyen Van Dau, P. Etienne, F. Petroff, A. Vaurès and J. Humbert
J. Magn. Magn. Mat. 270, 403 (2003)

• **Wide range and tunable linear TMR sensor using two exchange pinned electrodes**

B. Negulescu, D. Lacour, F. Montaigne, A. Gerken, J. Paul, V. Spetter, J. Marien, C. Duret, M. Hehn
Appl. Phys. Lett. 95, 112502 (2009)

• **On the control of spin flop in synthetic antiferromagnetic films**

B. Negulescu, **D. Lacour**, M. Hehn, A. Gerken, J. Paul, C. Duret
J. Appl. Phys. 109, 103911 (2011)

- **Capteur magnétique à base d'ondes acoustiques de surface**

En collaboration avec une équipe de l'Institut Jean Lamour, nous mettons actuellement au point un capteur de champ magnétique, interrogeable à distance, passif. Ce dernier ne comporte aucune source d'alimentation électrique, l'énergie de fonctionnement étant donnée par le signal d'interrogation. À l'aide de notre connaissance des matériaux magnétostrictifs, nous avons déjà prouvé la fonctionnalité magnétique et nous mettons au point des capteurs de sensibilité et de plage de fonctionnement divers pour diverses applications.

Publication associée à ce travail :

• **High field unipolar and bipolar magnetic field sensors based on Surface Acoustic Wave resonators**

V. Polewczyk, K. Dumesnil, **D. Lacour**, M. Moutaouekkil, H. Mjahed, N. Tiercelin, S. Petit Watelot, H. Mishra, Y. Dusch, S. Hage-Ali, O. Elmazria, F. Montaigne, A. Talbi, Olivier Bou Matar and M. Hehn
Phys. Rev. Appl. 8, 024001 (2017)

- **Capteur pour la biologie**

En collaboration avec une équipe de l'Université Ben-Gurion (Israël), nous avons développé un piège magnétique qui sera utile pour la détection de la présence dans un liquide d'espèces dangereuses. Cette mise au point rend le capteur actuel portable et permet d'en accroître la sensibilité.

Avec une équipe de l'Institut Jean Lamour, nous projetons maintenant d'utiliser la même technologie pour étudier l'influence d'ondes acoustiques sur des cellules.

Publication associée à ce travail :

• **Biochip based on Arrays of switchable Magnetic nano-traps**

Christopher Vautrin, Maria Vyazmensky, Stanislav Engel, Stéphane Mc. Murtry, Michel Hehn, François Montaigne, **Daniel Lacour**, and Robert S. Marks,
Sensors and Actuators B 251, 699–705 (2017).

- **Collaboration avec la société NIPSON Technologie.**

L'équipe « nanomagnétisme et électronique de spin » de l'institut Jean Lamour et la société NIPSON Technology SAS, spécialisée dans la conception de presses magnétographiques se sont associés pour créer le laboratoire commun « I-MAG » (Laboratoire de recherche et développement en Impression Magnétique) afin de mener conjointement des activités de recherche portant sur les phénomènes magnétiques mis en jeu lors d'une impression magnétographique. L'objectif *in fine* est de proposer, tester, développer et d'industrialiser des solutions innovantes pour améliorer la performance des imprimantes magnétiques et d'en élargir leur potentialité en offrant de nouvelles fonctionnalités. Pour ce faire, l'IJL a en charge la simulation des processus magnétiques de l'imprimante d'une part, et la caractérisation structurale et magnétique des composants mis en jeu d'autre part. Je participe à ce travail de R&D par mon soutien en termes de microscopie champ proche, traitement des données, simulations et discussions scientifiques.

5.7 Responsabilités collectives

Participation à des jurys

- de thèse :

Mouvement de parois de domaines magnétiques dans des nanofils cylindriques modulés
Alexis Wartelle (soutenu en **2018**)

Étude des effets magnéto-transverses dans les matériaux ferromagnétiques : effets Righi-Leduc planaire et anomal et géométrie Corbino.
Benjamin Madon (Soutenu en **2017**)

Réseaux artificiels à frustration géométrique
Yann Perrin (Soutenu en **2016**)

Réduction du champ d'écriture de mémoires magnétiques à écriture assistée thermiquement à l'aide du couple de transfert de spin
Antoine Chavent (Soutenu en **2016**)

Développement d'un système magnéto-optique à balayage jusqu'à 10 T pour la caractérisation de couches magnétiques dures à gradient de composition
André Dias (Soutenu en **2016**)

Glaces kagomé de spins artificiels : de la dégénérescence à courte-portée vers l'ordre dipolaire
Ioan-Augustin Chioar (Soutenu en **2015**)

Capteurs à ondes élastiques de surface (SAW) pour champs magnétiques à base de structures multicouches piézo-magnétiques
Meriem Elhosni (Soutenu en **2015**)

Effets thermoélectriques anisotropes dans les couches minces ferromagnétiques Py et YIG
Do Chung PHAM (Soutenu en **2014**)

Modélisation de la dynamique d'aimantation par effet de transfert de spin dans des vannes de spin de taille nanométrique
Christel Berthelot (Soutenu en **2012**)

- d'habilitation à diriger de recherches :

De la microscopie de Lorentz in situ à l'interférométrie électronique in operando
A. Masseboeuf (Soutenu en **2019**)

Autres responsabilités collectives :

Responsable de 3 microscopes champ proche AFM/MFM (formation, maintenance et développement)

Responsable du déménagement sur un nouveau site de l'équipe (bureaux et équipements de 36 membres)

Comité scientifique du Colloque Louis Néel (conférence française sur le magnétisme et l'électronique de spin)

Comité scientifique de SPIE Spintronics (symposium international sur le magnétisme et l'électronique de spin)

5.8 Développements instrumentaux

5.8.1 Transport électronique sous champ magnétique

Une première tâche que j'ai entreprise lors de mon arrivée au laboratoire est l'homogénéisation des interfaces utilisateurs des bancs de transport. Cette dernière repose sur un programme Labview versatile dans lequel tous les pilotes des divers instruments utilisés au laboratoire sont déclarés. Ainsi, selon la configuration de mesure et le banc de mesures le même programme permet le pilotage. De fait chaque utilisateur peut alors adapter la géométrie de mesure à ses besoins et surtout il trouve la même interface sur l'ensemble du parc instrumental.

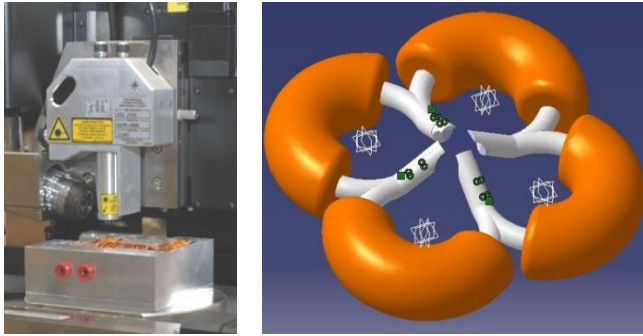
En plus de l'évolution des bancs de transport existants au laboratoire (homogénéisation des interfaces utilisateurs, mise en place d'une caméra CCD), j'ai été amené à construire deux nouveaux bancs de transport électronique sous champ magnétique (voir photographies ci-dessous). Ceux-ci sont complémentaires aux bancs de mesure déjà existants au sens où ils offrent de nouvelles possibilités. Ces derniers permettent de caractériser les propriétés de transport à des températures comprises entre 15 K et 450 K. Le champ magnétique tournant (électroaimant monté sur un support rotatif) peut atteindre une valeur de 1,8 Tesla pour le premier et 1,4 Tesla pour le second et être appliqué soit dans le plan de l'échantillon soit perpendiculairement au plan de l'échantillon. Les propriétés de transport peuvent être caractérisées soit grâce à une excitation continue (technique DC) soit grâce à l'alternative (technique AC ou Lock-in). De plus, les échantillons peuvent séjourner dans le banc de transport à basse température pendant de longues périodes afin de mener une caractérisation complète sans qu'aucune manipulation de liquide cryogénique ne soit nécessaire (ces dernières pouvant causer la destruction des échantillons particulièrement sensibles aux décharges électrostatiques). Cette contrainte nous a imposé le choix d'un cryo-générateur fonctionnant en circuit fermé. De plus, une attention toute particulière a été portée sur la construction d'un système basses vibrations afin d'éviter toutes sorte de signaux de type courants induits. Le design des bancs de transport a été conçu pour permettre une utilisation aisée de façon à ce qu'une majorité d'utilisateurs puisse y accéder. Depuis leur mise en fonctionnement (2009) ces bancs de transport qui fonctionnent de façon quasiment continue totalisent plus de 35000 heures de fonctionnement et sont impliqués dans plusieurs projets de recherche menés au sein de l'équipe. La duplication du premier banc a été nécessaire pour satisfaire la demande de caractérisations électriques de l'équipe.



Deux bancs de test électrique sous champ magnétique à basse température et zoom sur un échantillon en place sur le doigt froid.

5.8.2 Microscopie en champ proche

- **Etendre les possibilités de mesures en champ proche à l'IJL**



Dispositifs de production de champ magnétique compatible avec la mesure sur le microscope Nanoscope III

Lors de mon arrivée au laboratoire, afin de franchir une étape supplémentaire nécessaire à une meilleure caractérisation locale des propriétés micro-magnétiques, nous avons été amenés à développer des dispositifs de production de champs magnétiques s'adaptant au microscope champ proche équipant le laboratoire. Ce genre de dispositif permet d'étudier avec soin les fluctuations locales d'aimantation présentes dans nos échantillons. Ceci est d'une importance primordiale afin d'interpréter en

profondeur les résultats de transport des expériences où les propriétés magnétiques et micro-magnétiques ont une incidence directe sur les propriétés de transport (c'est dans la majeure partie des recherches menées par l'équipe). Une première version a d'ores et déjà abouti et permet l'application d'un champ magnétique d'une valeur maximum de 400 Oe au cours des mesures. La photographie ci-dessus montre le dispositif en place sous le scanner du microscope champ proche. Dans une seconde version, ce type de dispositif permet d'appliquer un champ magnétique dans une direction quelconque du plan des échantillons et cela toujours au cours des mesures (électroaimant quadripolaire). Une pré-étude a permis de définir la géométrie ainsi que la répartition des électroaimants. Le schéma ci-dessus montre la géométrie retenue. Un premier prototype a été réalisé. Ces dispositifs offrent non seulement la possibilité d'effectuer des mesures de microscopie à force atomique sous champ magnétique au laboratoire (possibilité déjà validée) mais devraient également permettre d'effectuer des mesures de transport de façon locale en faisant varier le champ magnétique au cours d'une mesure locale de résistance (à démontrer).

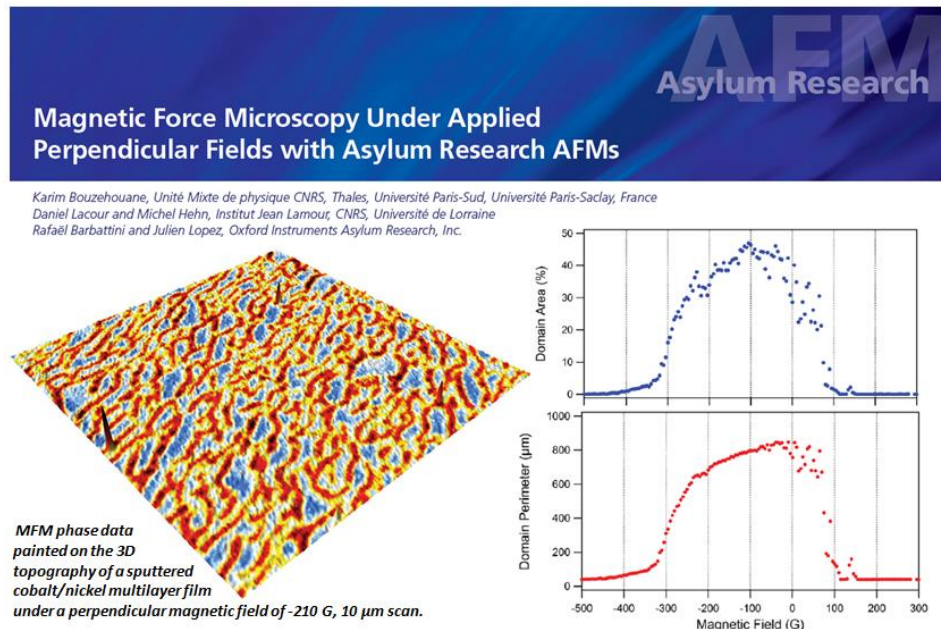
- **Mise en place d'un parc de MFM sous champ magnétique**

Dans un second temps, j'ai étendu le parc instrumental de microscopes champs proches. Ces derniers sont dotés de systèmes de production de champ magnétique dans le plan ou en perpendiculaire au plan des échantillons. Ces instruments permettent le lancement de script permettant d'explorer une excursion en champ sans la présence d'un opérateur. Nous avons maintenant à notre disposition 2 AFM/MFM de ce type, le dernier a été installé très récemment (Mars 2019). Ainsi, dans la salle propre de microscopie du nouveau bâtiment IJL, 1 AFM et 2 MFM fonctionnent quasiment à 100% de leur temps (figure ci-contre).



Parc instrumental de microscopes champs proches. Ces derniers sont dotés de systèmes de production de champ magnétique dans le plan ou en perpendiculaire. Deux de ces instruments permettent le lancement de scripts permettant d'explorer une excursion en champ sans qu'une présence humaine soit requise.

Les développements *software* (scripts) et *hardware* (dispositif d'application de champ perpendiculaire) effectués en étroite collaboration avec la société Oxford Instruments Asylum Research nous ont amenés à écrire une note d'application concernant les mesures MFM sous magnétique appliqué effectuées sur les microscopes MFP-3D Infinity et Origin+. Cette note d'application montre les possibilités offertes grâce à nos efforts conjoints.



Note d'application pour les microscopes MFP-3D Infinity et Origin+ écrite en collaboration avec Karim Bouzehouane (Unité Mixte de physique CNRS, Thales), Rafaël Barbattini et Julien Lopez (Oxford Instruments Asylum Research, Inc). 190 images MFM ont été acquises de façon automatique en décrémentant le champ magnétique appliqué entre chacune des images. Les images sont ensuite traitées automatiquement afin d'en extraire la surface et le périmètre des domaines magnétiques en fonction du champ magnétique.

5.8.3 Grand Instrument

Les développements instrumentaux que j'ai effectués vont jusqu'à la mise en place de nouvelles techniques de mesure sur Grand Instrument. Dans l'un des projets communs mené avec IPCMS et la ligne HERMÈS du synchrotron Soleil, nous voulions faire une mesure de la résistance d'une jonction tunnel lorsque celle-ci est irradiée localement avec le faisceau de rayons X du synchrotron SOLEIL. Le but étant ici d'observer, selon l'énergie utilisée, l'impact des atomes actifs sur le transport tunnel et cela à une échelle proche de la dizaine de nanomètre. Pour cela, nous avons installé les instruments nécessaires aux mesures de transport électronique sur la station standard STXM de la ligne HERMES. Un logiciel que nous avons développé pour ce type de mesures permet de synchroniser les mesures de transport avec les scanners du microscope afin de reconstituer une cartographie de la résistance tunnel en fonction de la position du faisceau sur la jonction tunnel. Afin d'avoir accès à la mesure de résistance de la jonction tunnel, un support spécifique a été développé en collaboration avec Adrien Besson de la ligne HERMÈS. Ce dernier permet un report des contacts pris sur la jonction tunnel à l'extérieur de la chambre de mesures du microscope. La figure suivante présente la station terminale du STXM modifiée pour les études *in operando* ainsi qu'une photographie d'un support échantillon optimisé pour les mesures de transport électronique.

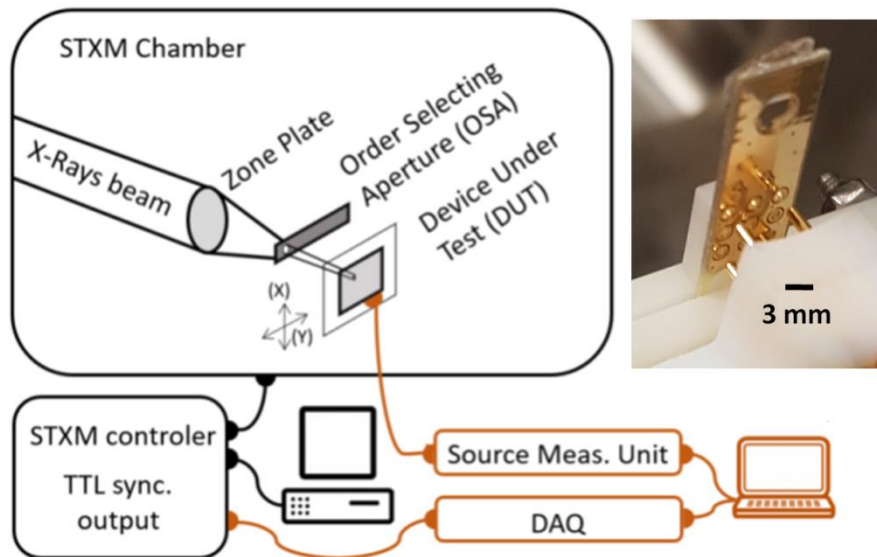


Schéma de principe du dispositif expérimental développé sur le STXM de la ligne HERMES. La partie ajoutée à la station est en orange. Photo d'un support échantillon optimisé pour les mesures *in operando*.

6. Production scientifique

L'ensemble des mes publications ont été citées plus de 2100 fois et 25 de mes publications ont été citées plus de 25 fois (h factor 25) selon [Google Scholar](https://scholar.google.com/citations?user=...). La plupart de mes publications sont disponibles sur mon profil Researchgate et sur mon lien ORCID :

Lien ResearchGate : https://www.researchgate.net/profile/Daniel_Lacour

Lien ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-5871-8870>



Vue rapide des journaux principaux dans lesquels mes communications ont été publiées selon Web of Science.

6.1 Publications dans des revues internationales

2000

1. Magnetic anisotropy and domain duplication in transport properties of tunnel junctions

M. Hehn, O. Lenoble, D. Lacour and A. Schuhl

Phys. Rev. B 62 (17), 11344 (2000)

2. Tunnel Magneto-Resistance and Induced Domain Structure in AL₂O₃ based Junctions

M. Hehn, O. Lenoble, D. Lacour, C. Féry, M. Piécuch, C. Tiusan and K. Ounadjela

Phys. Rev. B 61, 11643 (2000)

2001

3. Angular dependence of tunnel magnetoresistance in transition metal-based junctions

H. Jaffrès, D. Lacour, F. Nguyen Van Dau, J. Briatico, F. Petroff, A. Vaurès

Phys Rev B 64, 64427 (2001)

4. Domain duplication in ferromagnetic sandwiches

D. Lacour, M. Hehn, O. Lenoble, A. Schuhl, C. Tiusan and K. Ounadjela

J. Appl. Phys. 89, 8006 (2001)

5. Domain duplication in magnetic tunnel junctions studied by Kerr microscopy

O. Lenoble, D. Hrabovsky, M. Hehn, D. Lacour, J. Bobo, A. R. Fert, and A. Schuhl

Phys. Rev. B 63, 11643 (2001)

2002

6. Switching the magnetic configuration of a spin valve by current induced domain wall motion

J. Grollier, D. Lacour, V. Cros, A. Hamzic, A. Vaurès, A. Fert, D. Adam and G. Faini

J. Appl. Phys. 92, 4825 (2002)

7. Field sensing using the magnetoresistance of IrMn exchange-biased tunnel junctions

D. Lacour, H. Jaffrès, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, A. Vaurès and J. Humbert

J. Appl. Phys. 91, 4655 (2002)

8. Hot electron transport in 3-terminal devices based on magnetic tunnel junctions

D. Lacour, M. Hehn, F. Montaigne, H. Jaffrès, P. Rottländer, G. Rodary, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff and A. Schuhl

EuroPhys. Lett. 60, 896 (2002)

2003

9. On the use of exchange biased top electrodes in magnetic tunnel junctions

D. Lacour, H. Jaffrès, O. Durand, J-L. Maurice, F. Nguyen Van Dau, P. Etienne, F. Petroff, A. Vaurès and J. Humbert

J. Magn. Magn. Mat. 270, 403 (2003)

10. Using antiferromagnetic/ferromagnetic bilayers as detection layers in magnetic tunnel junctions

G. Malinowski, M. Hehn, M. Sajieddine, F. Montaigne, E. Jouguelet, F. Canet, M. Alnot, D. Lacour and A. Schuhl

Appl. Phys. Lett. 83, 4372 (2003)

2004

11. Thermal Effects on the Magnetic Field Dependence of Spin Transfer Induced Magnetization Reversal

D. Lacour, J. A. Katine, N. Smith, M. J. Carey, J. R. Childress

Appl. Phys. Lett. 85, 4681 (2004)

12. Experimental measurements of multiple stable trapped domain wall states induced in nanofabricated elements

D. Lacour, J. A. Katine, L. Folks, T. Block, J. R. Childress, M. J. Carey, and B. A. Gurney

Appl. Phys. Lett. 84, 1910 (2004)

2005

13. Spin dependent transport: GMR & TMR

A. Schuhl, D. Lacour

C. R. Physique 6, 944 (2005)

14. Nanometer Scale Observation of High Efficiency Thermally Assisted Current-Driven Domain Wall Depinning

D. Ravelosona, D. Lacour, J.A. Katine, B.D. Terris, C. Chappert

Phys. Rev. Lett. 95, 117203 (2005)

2006

15. An unforeseen supramolecular helicate from a bis-bidentatebipyridine-bipyrazine ligand and NiII self-assembly

J. Mathieu, B. Fraisse, D. Lacour, N. Ghermani, F. Montaigne and A. Marsura

Euro. J. Inorg. Chem. 133 (2006)

2007

16. Magnetic properties of post oxidized Pt/Co/Al layers with perpendicular anisotropy

D. Lacour, M. Hehn, M. Alnot, F. Montaigne, F. Greullet, G. Lengaigne, O. Lenoble, S. Robert, and A. Schuhl

Appl. Phys. Lett. 90, 192506 (2007)

2008

17. Influence of interfacial oxygen on single-crystal magnetic tunnel junctions

F. Bonell, A.M. Bataille, S. Andrieu, C. Tiusan, B. Kierren, G. Lengaigne, D. Lacour
Eur. Phys. J. Appl. Phys. 43, 357–361 (2008)

18. 360° domain wall generation in the soft layer of magnetic tunnel junctions

M. Hehn, D. Lacour, F. Montaigne, J. Briones, R. Belkhou, S. El Moussaoui, F. Maccherozzi, N. Rougemaille
Appl. Phys. Lett. 92 072501 (2008)

19. Large inverse magnetoresistance in fully epitaxial Fe/Fe₃O₄/MgO/Co magnetic tunnel junctions

F. Greullet, C. Tiusan, M. Hehn, D. Lacour, E. Snoeck, C. Magen, L. Calmels
Appl. Phys. Lett. 92 053508 (2008)

20. Magnetic domain wall propagation in a submicron spin-valve stripe: influence of the pinned layer

J. Briones, F. Montaigne, D. Lacour, M. Hehn, M.J. Carey, J.R. Childress
Appl. Phys. Lett. 92, 032508 (2008)

21. X-ray diffraction, microstructure, Mossbauer and magnetization studies of nanostructured Fe₅₀Ni₅₀ alloy prepared by mechanical alloying

A. Guittoum, A. Layadi, A. Bourzami, H. Tafat, N. Souami, S. Boutarfaïd, D. Lacour
Journ. Magn. Magn. Mat. 320, 1385 (2008)

2009

22. Wide range and tunable linear TMR sensor using two exchange pinned electrodes

B. Negulescu, D. Lacour, F. Montaigne, A. Gerken, J. Paul, V. Spetter, J. Marien, C. Duret, M. Hehn
Appl. Phys. Lett. 95, 112502 (2009)

23. Telegraph noise due to domain wall motion driven by spin current in perpendicular magnetized nanopillars

J. Cucchiara, Y. Henry, D. Ravelosona, D. Lacour, E. E. Fullerton, J. A. Katine, and S. Mangin
Appl. Phys. Lett. 94, 102503 (2009)

2010

24. Impact of electron-electron interactions induced by disorder at interfaces on spin dependent tunneling in Co-Fe-B/MgO/Co-Fe-B magnetic tunnel junction

J. Bernos, M. Hehn, F. Montaigne, C. Tiusan, D. Lacour, M. Alnot, B. Negulescu, G. Lengaigne, E. Snoeck, and F. G. Aliev
Phys. Rev. B 82, 060405 (R) (2010)

25. Local magnetic anisotropy induced by a nano-modulated surface and application to two-dimensional magnetic sensors

J. Briones, F. Montaigne, G. Lengaigne, D. Lacour, M. Hehn
Appl. Phys. Express 3 073002 (2010)

2011

26. Finite tunnel magnetoresistance at the compensation point of Sm_{1-x}Gd_xAl₂, a ferromagnetic electrode with zero magnetization

M. Da Silva, K. Dumesnil, C. Dufour, M. Hehn, D. Pierre, D. Lacour, F. Montaigne, G. Lengaigne, and S. Robert
Appl. Phys. Lett. 98, 232504 (2011)

27. On the control of spin flop in synthetic antiferromagnetic films

B. Negulescu, D. Lacour, M. Hehn, A. Gerken, J. Paul, C. Duret
J. Appl. Phys. 109, 103911 (2011)

28. Stochastic and complex depinning dynamics of magnetic domain walls

J. Briones, F. Montaigne, M. Hehn, D. Lacour, J. R. Childress and M. J. Carey
Phys. Rev. B 83, 060401 (R) (2011)

29. Artificial Kagome Arrays of Nanomagnets: A Frozen Dipolar Spin Ice

N. Rougemaille, F. Montaigne, B. Canals, A. Duluard, D. Lacour, M. Hehn, R. Belkhou, O. Fruchart, S. El Moussaoui, A. Bendounan, and F. Maccherozzi
Phys. Rev. Lett. 106, 057209 (2011)

2012

27. Measurement of the dynamical dipolar coupling in a pair of magnetic nano-disks using a Ferromagnetic Resonance Force Microscope

B. Pigeau, C. Hahn, G. De Loubens, V. V. Naletov, O. Klein, K. Mitsuzuka, M. Hehn, S. Andrieu, D. Lacour, F. Montaigne
Phys. Rev. Lett. 109, 247602. (2012)

28. Unidirectional thermal effects in current-induced domain wall motion

J. Torrejon, G. Malinowski, M. Pelloux, A. Thiaville, J. Curiale, D. Lacour, F. Montaigne, M. Hehn
Phys. Rev. Lett. 109, 106601 (2012)

29. Light-induced magnetization reversal of high-anisotropy TbCo alloy films

S. Alebrand, M. Gottwald, M. Hehn, D. Steil, M. Cinchetti, D. Lacour, E. E. Fullerton, M. Aeschlimann, S. Mangin
Appl. Phys. Lett. 101, 162408 (2012)

30. Spin-orbit coupling effect by minority interface resonance states in single-crystal magnetic tunnel junctions

Y. Lu, H.-X. Yang, C. Tiusan, M. Hehn, M. Chshiev, A. Duluard, B. Kierren, G. Lengaigne, D. Lacour, C. Bellouard, and F. Montaigne
Phys. Rev. B 86, 184420 (2012)

- 31. Real time AFM imaging and transport measurement during formation of a nanogap by electromigration**
S. Girod, J.-L. Bubendorf, F. Montaigne, L. Simon, D. Lacour, M. Hehn
Nanotechnology 23, 365302 (2012)
- 32. Periodic array of magnetic nanostructures by depositing Co/Pt multilayers on the barrier layer of ordered anodic alumina templates**
L. Piraux, V. A. Antohe, F. Abreu Araujo, S. K. Srivastava, M. Hehn, D. Lacour, S. Mangin, and T. Hauet
Appl. Phys. Lett. 101, 013110 (2012)
- 33. Magnetic vortices in single crystalline Fe-V disks with four folds magnetic anisotropy**
K. Mitsuzuka, D. Lacour, M. Hehn, S. Andrieu, and F. Montaigne
Appl. Phys. Lett. 100, 192406 (2012)
- 34. Magnetoresistance effect in perpendicularly magnetized TbCo based thin film and spin valve**
M. Gottwald, M. Hehn, F. Montaigne, D. Lacour, G. Lengaigne, S. Suire, S. Mangin
J. of Appl. Phys. 111, 083904 (2012)
- 35. Fe/MgO/Fe (100) textured tunnel junctions exhibiting spin polarization features of single crystal junctions**
A. Duluard, B. Negulescu, C. Bellouard, M. Hehn, D. Lacour, Y. Lu, G. Lengaigne, F. Montaigne, S. Robert, S. Suire, C. Tiusan
Appl. Phys. Lett. 100, 072408 (2012)
- 36. Asymmetric magnetization reversal in dipolar-coupled spin valve structures with perpendicular magnetic anisotropy**
M. Gottwald, M. Hehn, D. Lacour, T. Hauet, F. Montaigne, S. Mangin, P. Fischer, M.-Y. Im, A. Berger
Phys. Rev. B 85, 064403 (2012)
- 2013**
- 37. Large area patterned magnetic films by depositing cobalt layers on nano-wrinkled polydimethylsiloxane templates**
J. Briones, P. Toro, A. Encinas, L. Caballero, J. C. Denardin, F. Melo, E. Cerda, S. Robert, D. Lacour, and F. Montaigne
Appl. Phys. Lett. 103, 072404 (2013)
- 38. Energy levels of interacting curved nanomagnets in a frustrated geometry: increasing accuracy when using finite difference methods**
H Riahi, F. Montaigne, N. Rougemaille, B. Canals, D. Lacour and M. Hehn
J. Phys.: Condens. Matter 25, 296001 (2013)
- 39. Chiral nature of magnetic monopoles in artificial spin ice**
N. Rougemaille, F. Montaigne, B. Canals, M. Hehn, H. Riahi, D. Lacour, and J.-C. Toussaint
New J. Phys. 15, 035026 (2013)
- 40. Interfacial trapping for hot electron injection in silicon**
Y. Lu, D. Lacour, G. Lengaigne, S. Le Gall, S. Suire, F. Montaigne, and M. Hehn
Appl. Phys. Lett. 103, 022407 (2013)
- 2014**
- 41. Reversal mechanism, switching field distribution, and dipolar frustrations in Co/Pt bit pattern media based on auto-assembled anodic alumina hexagonal nanobump array**
T. Hauet, I. Piraux, S. K. Srivastava, V. A. Antohe, D. Lacour, M. Hehn, F. Montaigne, J. Schwenk, M. A. Marioni, H. J. Hug, O. Hovorka, A. Berger, S. Mangin, and F. Abreu Araujo
Phys. Rev. B 89, 174421 (2014)
- 42. Localized states in advanced dielectrics from the vantage of spin-and symmetry-polarized tunnelling across MgO**
F. Schleicher, U. Halisdemir, D. Lacour, M. Gallart, S. Boukari, G. Schmerber, V. Davesne, P. Panissod, D. Halley, H. Majjad, Y. Henry, B. Leconte, A. Boulard, D. Spor, N. Beyler, C. Kieber, E. Sternitzky, O. Cregut, M. Ziegler, F. Montaigne, E. Beaurepaire, P. Gilliot, M. Hehn, M. Bowen
Nature Communications, 5, art. no. 4547 (2014)
- 43. Size distribution of magnetic charge domains in thermally activated but out-of-equilibrium artificial spin ice**
Montaigne, F., Lacour, D., Chioar, I.A., Rougemaille, N., Louis, D., Murry, S.M., Riahi, H., Burgos, B.S., Menteş, T.O., Locatelli, A., Canals, B., Hehn, M.
Scientific Reports, 4, art. no. 5702 (2014)
- 44. Anisotropic magnetothermal transport and spin Seebeck effect**
Wegrowe, J.-E., Drouhin, H.-J., Lacour, D.
Phys. Rev. B 89 (9), art. no. 094409 (2014)
- 45. Interfaces anisotropy in single crystal V/Fe/V trilayer**
Louis, D., Lytvynenko, I., Hauet, T., Lacour, D., Hehn, M., Andrieu, S., Montaigne, F.
Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 372, pp. 233-235 (2014)
- 46. Electrical control of interfacial trapping for magnetic tunnel transistor on silicon**
Y. Lu, D. Lacour, G. Lengaigne, LE GALL, S., SUIRE, S., MONTAIGNE, F., HEHN, M., WU, M. W.
Applied Physics Letters, 104, art. no. 042408 (2014)
- 47. Non-universality of artificial frustrated spin systems**
I. A. Chioar, N. Rougemaille, A. Grimm, O. Fruchart, E. Wagner, M. Hehn, D. Lacour, F. Montaigne, B. Canals
Physical Review B 90, art. no. 064411 (2014)

2015

48. *Thermally activated domain wall motion in [Co/Ni](111) superlattices with perpendicular magnetic anisotropy*

S. Le Gall, N. Vernier, F. Montaigne, M. Gottwald, D. Lacour, M. Hehn, D. Ravelosona, S. Mangin, S. Andrieux, T. Hauet
Appl. Phys. Lett. 106, (6) 062406 (2015)

49. *Stability of a pinned magnetic domain wall as a function of its internal configuration*

F. Montaigne, A. Duluard, J. Briones, D. Lacour, M. Hehn, J. Childress
J. of Appl. Phys. 117, 023909 (2015)

50. *Extraordinary Hall effect based magnetic logic application*

T. Liu, D. Lacour, F. Montaigne, S. Le Gall, M. Hehn and T. Hauet
Appl. Phys. Lett. 106, 052406 (2015)

51. *Magnetic quasi walls inducing domain walls localization*

D. Lacour, F. Montaigne, N. Rougemaille, R. Belkhou, J. Raabe, M. Hehn
Scientific Reports 5, 9815 (2015)

52. *Enhanced magnetoresistance by monoatomic roughness in epitaxial Fe/MgO/Fe tunnel junctions*

A. Duluard, C. Bellouard, Y. Lu, M. Hehn, D. Lacour, F. Montaigne, G. Lengaigne, S. Andrieu, F. Bonell, C. Tiusan
Phys. Rev. B 91, 174403 (2015)

53. *Experimental study of spin wave dispersion in Py/Pt film structures in the presence of a Dzyaloshinskii-Moriya interaction*

A. A. Stashkevich, M. Belmehguenai, Y. Roussinge, S.M. Cherif, M. Kostylev, M. Gabor, D. Lacour, C. Tiusan, M. Hehn
Phys. Rev. B 91, 214409 (2015)

54. *Long Range Phase Coherence in Double Barrier Magnetic Tunnel Junctions with 12nm Thick Metallic Quantum Well*

B. S. Tao, H. X. Yang, Y. L. Zuo, X. Devaux, G. Lengaigne, M. Hehn, D. Lacour, S. Andrieu, M. Chshiev, T. Hauet, S. Mangin, F. Montaigne, X. F. Han, Y. Lu,
Phys. Rev. Lett. 115, 157204 (2015).

55. *MgO Magnetic Tunnel Junctions of Enduring F-type upon Annealing*

F. Schleicher, U. Halisdemir, E. Urbain, D. Lacour, M. Gallart, S. Boukari, F. Montaigne, E. Beaurepaire, P. Gilliot, M. Hehn, M. Bowen,
J. of Physics D: Applied Physics 48, 435004 (2015)

56. *Phase diagram in exchange biased CoTb/[Co/Pt] multilayer based magnetic tunnel junctions*

M. Bersweiler, D. Lacour, K. Dumesnil, F. Montaigne, M. Hehn,
Phys. Rev. B 92, 224431 (2015).

2016

57. *Origin of large light induced voltage in magnetic tunnel junction grown on semiconductor substrates*

Y. Xu, W. Lin, S. Petit-Watelot, M. Hehn, H. Rinnert, Y. Lu, F. Montaigne, D. Lacour, S. Andrieu and S. Mangin,
J. Appl. Phys. 119, 023907 (2016)

58. *Fragmentation of magnetism in artificial kagome dipolar spin ice*

B. Canals, I.-A. Chioar, V.-D. Nguyen, M. Hehn, D. Lacour, F. Montaigne, A. Locatelli, T. O. Mendes, B. Santos Burgos, N. Rougemaille,
Nat. Commun. 7, 11446 (2016).

59. *Magnetic tunnel transistor with a perpendicular Co/Ni multilayer sputtered on Si/Cu(100) Schottky diode.*

C. Vautrin, Y. Lu, S. Robert, G. Sala, O. Lenoble, S. Petit-Watelot, X. Devaux, F. Montaigne, D. Lacour, M. Hehn,
J. of Phys. D: Appl. Phys. 49, 355003 (2016).

60. *Impact of buffer layer and Pt thickness on the interface structure and magnetic properties in (Co/Pt) multilayers*

M Bersweiler, K Dumesnil, D Lacour and M Hehn
J. Phys. Cond. Mat. 28, 336005(2016)

61. *Ferroelectric Control of Organic/Ferromagnetic Spinterface*

S. Liang, H. Yang, H. Yang, B. Tao, A. Djeflal, M. Chshiev, W. Huang, X. Li, A. Ferri, R. Desfeux, S. Mangin, D. Lacour, M. Hehn, O. Copie, K. Dumesnil, and Y. Lu
Advanced Materials 28, 10204 (2016).

62. *Anomalous and planar Righi-Leduc effects in NiFe ferromagnet*

B. Madon, Do Ch. Pham, J.-E. Wegrowe, D. Lacour, M. Hehn, V. Polewczyk, A. Anane, V. Cros
Phys. Rev. B 94, 144423 (2016)

63. *Magnetic field SAW sensors based on magnetostrictive-piezoelectric layered structures.*

M. Elhosni, O. Elmazria, S. Petit-Watelot, L. Bouvot, S. Zhgoon, A. Talbi, M. Hehn, K. Ait Aissa, S. Hage-Ali, D. Lacour, F. Sarry, O. Boumatar
Sensors and Actuators A: Physical 240, 1 April 2016, Pages 41–49

2017

64. *Probing a device's active atoms using synchrotron radiation*

M. Studniarek, U. Halisdemir, F. Schleicher, B. Taudul, E. Urbain, M. Herve, C-H. Lambert, A. Hamadeh, S. Petit-Watelot, O. Zill, D. Lacour, S. Boukari, L. Joly, F. Scheurer, G. Schmerber, V. Da Costa, A. Dixit, P.-A. Guitard, M. Acosta, C. Suergers, F. Leduc, F. Chouekani, E. Otero, W. Wulfhekkel, F. Montaigne, J. Arabski, P. Ohresser, E. Beaurepaire, W. Weber, M. Alouani, M. Hehn, M. Bowen, *Adv.Mat.* 29, 1606578(2017)

65. *Tunnelling spintronics across MgO driven by double oxygen vacancies*

B. Taudul, E. Monteblanco, U. Halisdemir, D. Lacour, F. Schleicher, F. Montaigne, E. Beaurepaire, S. Boukari, M. Hehn, M. Alouani, and M. Bowen
Advanced Electronic Materials DOI: 10.1002/aelm.201600390 (2017)

66. *Biochip based on Arrays of switchable Magnetic nano-traps*

Christopher Vautrin, Maria Vyazmensky, Stanislav Engel, Stéphane Mc. Murtry, Michel Hehn, François Montaigne, Daniel Lacour, and Robert S. Marks
Sensors and Actuators B 251, 699–705 (2017)

67. *High field unipolar and bipolar magnetic field sensors based on Surface Acoustic Wave resonators*

Polewczyk, K. Dumesnil, D. Lacour, M. Moutaouekkil, H. Mjahed, N. Tiercelin, S. Petit Watelot, H. Mishra, Y. Dusch, S. Hage-Ali, O. Elmazria, F. Montaigne, A. Talbi, O. BouMatar, M. Hehn
Phys. Rev. Appl. 8, 024001 (2017)

68. *Metalliclike behavior of the exchange coupling in (001) Fe/MgO/Fe junctions*

C. Bellouard, A. Dulaud, E. Snoeck, Y. Lu, B. Negulescu, D. Lacour, C. Senet, S. Robert, N. Maloufi, S. Andrieu, M. Hehn, C. Tiusan
Phys. Rev. B 96, 134416 (2017)

69. *Thickness and angular dependence of magneto-current of hot electrons*

C. Vautrin, D. Lacour, G. Sala, Y. Lu, F. Montaigne, M. Hehn
Phys. Rev. B 96, 174426 (2017).

2018

70. *Linking Electronic Transport through a Spin Crossover Thin Film to the Molecular Spin State Using X-ray Absorption Spectroscopy Operando Techniques*

F. Schleicher, M. Studniarek, K-S. Kumar, E. Urbain, K. Katcko, J. Chen, T. Frauhammer, M. Hervé, U. Halisdemir, L. M. Kandpal, D. Lacour, A. Riminucci, L. Joly, F. Scheurer, B. Gobaut, F. Chouekani, E. Otero, P. Ohresser, J. Arabski, G. Schmerber, W. Wulfhekkel, E. Beaurepaire, W. Weber, S. Boukari, M. Ruben and M. Bowen
ACS Appl. Mater. Interfaces, 10 (37), 31580–31585 (2018)

71. *Spin-orbit torque-induced switching in ferrimagnetic alloys: Experiments and modeling*

S-G. Je, J-C. Rojas-Sánchez, T-H. Pham, P. Vallobra, G. Malinowski, D. Lacour, T. Fache, M-C. Cyrille, D-Y. Kim, S-B. Choe, M. Belmeguenai, M. Hehn, S. Mangin, G. Gaudin and O.Boulle
Appl. Phys. Lett. 112, 062401 (2018)

72. *Spin-polarized resonant surface state in (1 1 1) SmGdAl, a zero-magnetization ferromagnet*

M. Bersweiler, K. Dumesnil, Y. Fagot-Revurat, P. Le Fèvre, C. Tiusan, D. Lacour and M. Hehn
J. Phys.: Condens. Matter 30 435501 (2018)

73. *Statistical study of domain-wall depinning induced by magnetic field and current in an epitaxial Co/Ni-based spin-valve wire*

S. Le Gall, F. Montaigne, D. Lacour, M. Hehn, N. Vernier, D. Ravelosona, S. Mangin, S. Andrieu, and T. Hauet
Phys. Rev. B 98, 024401 (2018)

74. *Thermal Contribution to the Spin-Orbit Torque in Metallic-Ferrimagnetic Systems*

T-. Pham, S.-G. Je, P. Vallobra, T. Fache, D. Lacour, G. Malinowski, M. C. Cyrille, G. Gaudin, O. Boulle, M. Hehn, J.-C. Rojas-Sánchez, and S. Mangin
Phys. Rev. Applied 9, 064032 (2018)

75. *Towards Thermal Reading of Magnetic States in Hall Crosses*

Y. Xu, S. Petit-Watelot, V. Polewczyk, G. Parent, F. Montaigne, J.-E. Wegrowe, S. Mangin, D. Lacroix, M. Hehn, and D. Lacour
Phys. Rev. Applied 9, 034028 (2018)

76. *Tunneling anisotropic magnetoresistance in fully epitaxial magnetic tunnel junctions with different barriers*

B. S. Tao, L. N. Jiang, W. J. Kong, W. Z. Chen, B. S. Yang, X. Wang, C. H. Wan, H. X. Wei, M. Hehn, D. Lacour, Y. Lu, and X. F. Han
Appl. Phys. Lett. 112, 242404 (2018)

77. *A tunable magnetic metamaterial based on the dipolar four-state Potts model*

D. Louis, D. Lacour, M. Hehn, V. Lomakin, T. Hauet and F. Montaigne
Nature Materials 17, 1076-1080 (2018)

78. *Corbino magnetoresistance in ferromagnetic layers: Two representative examples Ni₅₁Fe₁₉ and Co₈₃Gd₁₇*

B. Madon, J.-E. Wegrowe, M. Hehn, F. Montaigne, and D. Lacour
Phys. Rev. B 98, 220405(R) (2018)

2019

79. Consolidated picture of tunnelling spintronics across oxygen vacancy states in MgO

F Schleicher, B Taudul, U Halisdemir, K Katcko, E Montebaldo, D Lacour, S Boukari, F Montaigne, E Urbain, L M Kandpal, J Arabski, W Weber, E Beurepaire, M Hehn, M Alouani and M Bowen
J. Phys. D: Appl. Phys. 52, 305302 (2019)

80. Coherent Resonant Tunneling through Double Metallic Quantum Well States

Bingshan Tao, Caihua Wan, Ping Tang, Jiafeng Feng, Hongxiang Wei, Xiao Wang, Stéphane Andrieu, Hongxin Yang, Mairbek Chshiev, Xavier Devaux, Thomas Hauet, François Montaigne, Stéphane Mangin, Michel Hehn, Daniel Lacour, Xiufeng Han and Yuan Lu
Nano Letters 19, 3019-3026 (2019)

6.2 Publications dans des revues sans comité de lecture

2008

Mémoire magnétique à propagation de parois, le projet Magnetic Racetrack Memory

D. Lacour

Revue de veille OMNT Nanocomposants 16, Octobre 2008

Generation of 360° domain walls in magnetic tunnel junctions

F. Montaigne, M. Hehn, N. Rougemaille, S. El Moussaoui, F. Maccherozzi, R. Belkhou, D. Lacour
Elettra Highlights (2008)

Génération de parois de domaines à 360° dans des jonctions tunnel magnétiques

F. Montaigne, M. Hehn, N. Rougemaille, S. El Moussaoui, F. Maccherozzi, R. Belkhou, D. Lacour
Soleil Highlights (2008)

2010

Jonctions tunnels magnétiques CoFeB/MgO/CoFeB à aimantations perpendiculaires

D. Lacour, D. Ravelosona

Revue de veille OMNT Spintronique 3, Décembre 2010

Stochastique accrue du déplacement de parois dans des pistes magnétiques due à la dynamique de piégeage

D. Lacour

Revue de veille OMNT Spintronique 3, Décembre 2010

11th Joint MMM-Intermag Conference, 18–22 January 2010, Washington, DC

D. Lacour

Revue de veille OMNT, Spintronique 2, Juin 2010

2011

Déplacement de parois de domaines magnétiques à hautes vitesses stabilisées par effet Rashba

D. Lacour

Revue de veille OMNT Spintronique 6, Septembre 2011

Effet de magnétorésistance dans des jonctions tunnel ayant une électrode antiferromagnétique

D. Lacour

Revue de veille OMNT Spintronique 5, Juin 2011

Effets d'inertie sur la dynamique de parois de domaines magnétiques

D. Lacour, D. Ravelosona

Revue de veille OMNT Spintronique 4, Mars 2011

La manipulation du spin s'invite en électronique

D. Lacour, M. Jamet, J-E Wegrowe

Synthèse annuelle OMNT Spintronique, Janvier 2011

6.3 Conférences invitées

2009

Local magnetic anisotropy controlled by a surface nano-modulation

F. Montaigne, J. Briones, M. Hehn, D. Lacour, M. J. Carey, J. R. Childress

Euromat 2009, Glasgow, Ireland (2009)

Thermally Activated Depinning of a Domain Wall: interplay of field depinning statistical distributions and relaxation times. Towards a consistent picture of the stochastic behaviour of domain walls

F. Montaigne, J. Briones, M. Hehn, D. Lacour, M. J. Carey, J. R. Childress

Euromat 2009, Glasgow, Ireland (2009)

Thermally activated depinning of a domain wall: interplay of depinning field statistical distributions and relaxation times

F. Montaigne, J. Briones, M. Hehn, D. Lacour, M. J. Carey, J. R. Childress
SPIE Optics+Photonics, San Diego, USA (2009)

2011

Indirect localization of a magnetic domain wall mediated by its quasi wall.

D. Lacour, F. Montaigne, M. Hehn, R. Belkhou, N. Rougemaille and J. Raabe
SPIE Optics+Photonics, San Diego, USA (2011)

La manipulation du spin s'invite en électronique.

D. Lacour
Séminaire annuel de l'OMNT, Institut Pasteur, France (2011)

MR Sensors and Advanced Applications

M. Hehn, D. Lacour, F. Montaigne, J. Briones, B. Négulescu, G. Lengaigne, C. Duret, J. Paul, A. Gerken, J. Marien, J.-B. Kammerer, L. Hébrard
11th Symposium Magnetoresistive Sensors and Magnetic Systems Basic principles, manufacturing and applications, Wetzlar, Germany (2011)

2012

Characterization and control of the dynamic dipolar coupling between magnetic nanodisks by MRFM

B. Pigeau, G. de Loubens, V. Naletov, O. Klein, K. Mitsuzuka, D. Lacour, Michel Hehn, S. Andrieu
Intermag Vancouver (2012)

Interface scattering by negative donor for hot-electron injection in n-doped silicon

Y. Lu, D. Lacour, S. Suire, F. Montaigne, J. Bernos and M. Hehn
SPIE Optics+Photonics, San Diego, USA (2012)

Magnetic behavior of Co/Pt and Tb/Conanocaps assembly for bit pattern media

A. Sediri, L. Piraux, V. A. Antohe, F. Abreu Araujo, M. Hehn, D. Lacour, S. Mangin, T. Hauet
Nanomaterials: Applications and Properties (Crimea, Ukraine) 2012

Vanishing pure spin-current: the equilibrium states under spin-injection in non-local geometry

J-E. Wegrowe, H-J Drouhin, D. Lacour
SPIE Optics+Photonics, San Diego, USA (2012)

2013

• *Biochip based on Arrays of switchable Magnetic nano-trap*

Christopher Vautrin, Maria Vyazmensky, Stanislav Engel, Stéphane Mc. Murtry, Michel Hehn, François Montaigne, Daniel Lacour, and Robert S. Marks

Donostia International Conference on Nanoscaled Magnetism and Applications, San Sebastian, Spain, (2013)

2014

Unconventional magnetic states in artificial spin ice systems

N. Rougemaille, F. Montaigne, H. Riahi, B. Canals, I. A. Chioar, D. Lacour and M. Hehn
MSnows 2014, Nancy, France (2014)

Anisotropic magneto-thermal transport: theory and experiments

J.-E. Wegrowe, Ph. Do Chung, B. Madon, H.-J. Drouhin, M. Hehn, D. Lacour, A. Anane
SPIE Symposium, California, USA (2014)

2015

• *Magnon Hall effect and planar Righi-Leduc effect measured in NiFe and YIG ferromagnets*

B. Madon, D. C. Pham, D. Lacour, A. Anane, R. Bernard, V. Cros, M. Hehn, J.-E. Wegrowe
Spintronics VIII, SPIE NanoScience + Engineering, San Diego, August 2015

• *Hot electrons transport in devices combining tunnel and Schottky barriers*

C. Vautrin, Y. Lu, S. Le Gall, G. Sala, S. Robert, O. Lenoble, F. Montaigne, M.-W. Wu, D. Lacour, M. Hehn
Spintronics VIII, SPIE NanoScience + Engineering, San Diego, August 2015

Unconventional spin textures in magnetically frustrated topologies

N. Rougemaille, I. Chioar, M. Hehn, D. Lacour, F. Montaigne, B. Canals
Spintronics VIII, SPIE NanoScience + Engineering, San Diego, August 2015

2016

• *Dipolar "Pott" model as a new artificial spin system*

D. Louis, F. Montaigne, T. Hauet, D. Lacour, M. Hehn
Spintronics IX, part of SPIE NanoScience + Engineering, San Diego, August 2016

Electrical spin injection in Cobalt/MoS₂ hybrid systems

S. H. Liang, Y. Lu, L. Calmels, H. Jaffres, B. S. Tao, T. Garandel, S. Mc-Murty, F. Cadiz, R. Arras, G. Wang, F. Montaigne, D. Lacour, S. Petit-Watelot, T. Amand, J.M. George, M. Hehn, A. Djéffal, S. Mangin, X. Marie, P. Renucci
International Workshop on Physics of 2D Crystals at Campofelice di Roccella, Sicily, Italy, 29 may-04 june, 2016.

About spin-dependent thermo-voltage measured on Pt electrodes deposited on a ferromagnets

B. Madon, J.-E. Wegrowe, D. Lacour, M. Hehn, A. Anane, Vincent Cros, Rozenn Bernard
Spintronics IX, SPIE NanoScience + Engineering, San Diego, August 2016

Tuning the Spin Orbit Torque-critical current density to reverse perpendicular magnetization in CoTb alloys

T.-H. Pham, P. Vallobra, S-G.Je, O. Boule, G. Gaudin, D. Lacour, G. Malinowsky, M. Hehn, S. Mangin and J.-C. Rojas-Sánchez
14th RIEC International Workshop on Spintronics (Sendai, Japan), November 2016

Spin fragments in artificial kagome magnetic ice

B. Canals, I. A. Chioar, V. D. Nguyen, M. Hehn, D. Lacour, F. Montaigne, A. Locatelli, T. O. Montes, B. Santos Burgos, N. Rougemaille
Spintronics IX, SPIE NanoScience + Engineering, San Diego, August 2016

Oxygen-vacancy driven tunnelling spintronics across MgO

U. Halisdemir, F. Schleicher, M. Studniarek, B. Taudul, N. Montebianco, K. Katcko, E. Urbain, M. Herve, D. Lacour, M. Gallart, S. Boukari, L. Joly, F. Scheurer, G. Schmerber, V. Davesne, P. Panissod, C-H Lambert, A. Hamadeh, S. Petit-Watelot, O. Zill, D. Halley, H. Majjad, Y. Henry, B. Leconte, A. Boulard, D. Spor, N. Beyer, C. Kieber, E. Sternitzky, M. Acosta, C. Suergers, F. Chouekani, E. Otero, O. Cregut, M. Ziegler, W. Wulfhekel, F. Montaigne, J. Arabski, E. Beaupaire, W. Weber, P. Gilliot, Philippe Ohresser, M. Alouani, M. Hehn, M. Bowen
Spintronics IX, SPIE NanoScience + Engineering, San Diego, August 2016

2017

• *Chiral magnetic monopoles in artificial spin systems*

Y. Perrin, I. A. Chioar, H. Riahi, Van D. Nguyen, A. Masseboeuf, C. Gatel, S. McMurtry, B. S. Burgos, T. O. Montes, A. Locatelli, J.-C. Toussaint, F. Montaigne, D. Lacour, N. Rougemaille, B. Canals, M. Hehn
Spintronics X, part of SPIE NanoScience + Engineering, San Diego, August 2017

High field bipolar magnetic field sensors based on surface acoustic wave resonators

V. Polewczyk, K. Dumesnil, D. Lacour, M. Moutaouekkil, H. Mjaded, N. Tiercelin, S. Petit Watelot, Y. Dusch, O. Elmazria, A. Talbi, O. BouMatar, Michel Hehn
Spintronics X, SPIE NanoScience + Engineering, San Diego, August 2017

2018

• *Artificial Spin Ice architectures for Bio-Inspired computation*

M. Massouras, Y. Perrin, M. Arino, J. Grollier, D. Querlioz, J.-M. George, N. Reyren, M. J.-C. Toussaint, F. Montaigne, N. Rougemaille, B. Canals, M. Hehn, D. Lacour
Workshop on Spintronics and Nanomagnetism for Neuromorphic Computing, Leed 2018

• *Bio-Inspired computing based on artificial spin ices*

M. Hehn, F. Montaigne, D. Lacour, Y. Perrin, B. Canals, N. Rougemaille, J. Grollier, D. Querlioz, A. Masseboeuf
Spintronics X, SPIE NanoScience + Engineering, San Diego, August 2018

Electronic spin precession at low energy in all solid state devices

Christopher Vautrin, Daniel Lacour, Yuan Lu, François Montaigne, Michel Hehn,
Spintronics X, SPIE NanoScience + Engineering, San Diego, August 2017

2019

• *Dipolar “Pott” model as a new artificial spin system*

D. Louis, F. Montaigne, T. Hauet, D. Lacour, M. Hehn
Frontiers in Artificial Spin Ice, Bad Zurzach, Switzerland, Février 2019

6.3 Conférences

2000

Capteurs magnétiques basés sur l'effet tunnel dépendent du spin

H. Jaffrès, D. Lacour, F. Nguyen Van Dau, A. Vaurès, J. Humbert et F. Petroff
G.d.r POMMES, Nancy, France (2000)

2001

Domain structures during magnetization reversal in exchange-biased layers

A. Kirilyuk, Th. Rasing, H. Jaffrès, D. Lacour and F. Nguyen Van Dau
46th Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Seattle, USA (2001)

• *Magnetoresistance and induced domain structure in tunnel junctions*

D. Lacour, M. Hehn, O. Lenoble, A. Schuhl
M.R.S. spring meeting, San Francisco, USA (2001)

• *Realization of high sensitive field sensors based on spin-dependent tunneling*
H. Jaffrès, D. Lacour, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, A. Vaurès, J. Humbert
M.R.S. spring meeting, San Francisco, USA (2001)

• Paramètres gouvernant la duplication de domaines magnétiques dans les jonctions tunnel
D. Lacour, M. Hehn, O. Lenoble, A. Schuhl
7ième colloque Louis Néel, Dourdan, France (2001)

2002

• *Magnetic Sensor based on Spin-dependent Tunneling*
D. Lacour, H. Jaffrès, O. Durand, J.-L. Maurice, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, J. Humbert, and A. Vaurès
47th Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Tampa, USA (2002)

Hot electron transport in 3-terminal devices based on magnetic tunnel junctions
D. Lacour, M. Hehn, F. Montaigne, H. Jaffrès, P. Rottländer, G. Rodary, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff and A. Schuhl
47th Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Tampa, USA (2002)

Domain wall displacement induced by a large DC current
J. Grollier, V. Cros, D. Lacour, A. Hamzic, H. Jaffrès, A. Vaurès, A. Fert, D. Adam, D. Dubreuil, G. Faini
47th Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Tampa, USA (2002)

• Transport d'électrons chauds dans des dispositifs à trois entrées à base de jonctions
D. Lacour, M. Hehn, F. Montaigne, H. Jaffrès, P. Rottländer, G. Rodary, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff et A. Schuhl
8ième colloque Louis Néel, Gérardmer, France (2002)

• *Low-power consuming magnetic field sensor based on spin dependent tunneling*
D. Lacour, H. Jaffrès, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, O. Durand, J.-L. Maurice, J. Humbert, A. Vaurès
Eurosensor XVI, Prague (2002)

2004

Magnetic field sensor with low temperature drift using Ferro/Anti-Ferromagnetic bilayer
G. Malinowski, M. Hehn, M. Sajjeddine, F. Montaigne, E. Jouguelet, F. Canet, M. Alnot, D. Lacour, A. Schuhl.
IEEE SENSORS Vienna, Austria (2004)

Capteur magnétique linéaire basé sur l'utilisation d'une bicouche sensible Ferro-/Anti-ferromagnétique
G. Malinowski, M. Hehn, M. Sajjeddine, F. Montaigne, E. Jouguelet, F. Canet, M. Alnot, D. Lacour, A. Schuhl.
9ième Colloque Louis Néel, Autrans, France (2004)

• Preuve expérimentale de la métastabilité d'une paroi de domaine piégée par une nanoconstriction
D. Lacour, J. Katine, L. Folks, T. Block, J. Childress, M. Carey et B. Gurney
9ième colloque Louis Néel, Autrans, France (2004)

• *Experimental study of domain wall trapped by a nanofabricated notch: Evidence of multiple magnetically stable states induced*
D. Lacour, J. Katine, L. Folks, T. Block, J. Childress, M. Carey and B. Gurney
9th Joint MMM-Intermag Conference, Anaheim, USA (2004)

Development of a semiconductor free memory element based on a double magnetic tunnel junction
G. Rodary, D. Lacour, T. Dimopoulos, M. Hehn, H. Jaffrès, F. Montaigne, J. Bangert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, A. Schuhl and J. Wecker
9th Joint MMM-Intermag Conference, Anaheim, USA (2004)

2005

• Retournement d'aimantation par transfert de spin dans des structures magnétorésistive
D. Lacour, J. Katine, F. Montaigne, N. Smith, M. Carey, J. Childress
10ième Colloque Louis Néel, Dourdan, France (2005)

Thermal effects on the magnetic field dependence of spin transfer induced magnetization reversal
D. Lacour, J. Katine, N. Smith, M. Carey, J. Childress
Intermag, Nagoya, Japan (2005)

Nanometer scale observation of current induced narrow domain wall depinning in perpendicular spinvalves
D. Ravelosona, D. Lacour, J. A. Katine, B. D. Terris
Intermag, Nagoya, Japan (2005)

Nanometer scale observation of current induced narrow domain wall depinning in perpendicular spinvalves
D. Ravelosona, D. Lacour, J. A. Katine, B. D. Terris
APS march meeting, Los Angeles, US (2005)

2007

Local control of magnetic anisotropy by a sub-micrometric topological modulation

J. Briones, F. Montaigne, G. Lengaigne, S. Girod, R. Legaie, M. Hehn, D. Lacour
ITFPC07, Nancy, France (2007)

• *Superparamagnetic/Ferromagnetic transtion induced by oxydation*

D. Lacour, M. Hehn, M. Alnot, F. Montaigne, F. Greullet, G. Lengaigne, O. Lenoble, S. Robert, and A. Schuhl
MML07, Perth, Australie (2007)

Modulation des effets de filtrage par insertion de bcc Cr(001) fin dans des jonctions tunnel monocristallines Fe/Cr/MgO/Fe(001)

F. Greullet, D. Halley, C.V. Tiusan, M. Hehn, F. Montaigne, G. Lengaigne, J. Arabski, W. Weber, O. Bengone, D. Lacour. Briones, F. Montaigne,

11ième Colloque Louis Néel, Valpré Lyon, France (2007)

Propagation d'une paroi magnétique dans une piste sub-micronique : Stochastique et influence de la couche dure

J. Briones, F. Montaigne, D. Lacour, M. Hehn, M.J. Carey, J.R. Childress

11ième Colloque Louis Néel, Valpré Lyon, France (2007)

Stochastic behavior of domain wall manipulation in magnetic nano-wires

J. Briones, F. Montaigne, M. Hehn, D. Lacour, M.J. Carey and J.R. Childress

10th Joint MMM-Intermag Conference, Baltimore, USA (2007)

2008

On the control of spin flop in synthetic antiferromagnet films for orthogonal pinning applications

B. Negulescu, D. Lacour, M.Hehn, A. Gerken, J. Paul

JEMS, Dublin, Irland (2008)

J. Cucchiara, Y. Henry, D. Ravelosona, D. Lacour, E. E. Fullerton, J. A. Katine, S. Mangin

JMC10, Strasbourg, France (2008)

Bruit télégraphique et transfert de spin dans un nanopilier à aimantation perpendiculaire

F. Montaigne, J. Briones, D. Lacour, M. Hehn, M. J. Carey, J. Childress

Dynamic of depinning of a magnetic domain wall from a single defect

Intermag, Madrid, Spain (2008)

360° domain wall generation in the soft layer of magnetic tunnel junctions

F. Montaigne, M. Hehn, D. Lacour, J. Briones, R. Belkhou, S. El Moussaoui, F. Maccherozzi, N. Rougemaille

Intermag, Madrid, Spain (2008)

2D magnetic sensor based on planar Hall effect and surface nano-structuration

J. Briones, F. Montaigne, M. Hehn, G. Lengaigne, D. Lacour

Intermag, Madrid, Spain (2008)

Magnetic Frustration in "spin ice" Nanostructures Networks

S. El Moussaoui, R. Belkhou, F. Maccherozzi, F. Montaigne, D. Lacour, M. Hehn, J. Briones and N. Rougemaille

M.R.S. spring meeting, San Francisco, USA (2008)

2009

Local magnetic anisotropy controlled by a surface nano-modulation

F. Montaigne, J. Briones, M. Hehn, D. Lacour

Euromat 2009, Glasgow, Irland (2009)

Domain wall induced telegraph noise switching driven by spin transfer in nanopillars with perpendicular anisotropy

J. Cucchiara, Y. Henry, D. Ravelosona, D. Lacour, E.E. Fullerton, J.A. Katine, S. Mangin

Intermag, Sacramento, USA (2009)

2010

Long range correlations in geometrically frustrated networks of nanomagnets

R. Belkhou, A. Bendounan, B. Canals, A. Duluard, S. El Moussaoui, O. Fruchart, D. Lacour, M. Hehn, F. Maccherozzi

11th Joint MMM-Intermag Conference, Washington, USA (2010)

Wide range and tunable linear TMR sensor including two exchange pinned electrodes

B. Negulescu, D. Lacour, F. Montaigne, A. Gerken, J. Paul, V. Spetter, J. Marien, C. Duret and M. Hehn

11th Joint MMM-Intermag Conference, Washington, USA (2010)

2011

• *Tunnel magnetoresistance based on a ferromagnetic electrode with zero-magnetization.*

M. Da Silva, K. Dumesnil, C. Dufour, M. Hehn, D. Pierre, D. Lacour, F. Montaigne, G. Lengaigne and S. Robert

Intermag, Taipei, Taiwan (2011)

• *About the necessity of measuring the depinning field distribution and relaxation times to adequately describe thermally activated complex depinning processes.*

J. Briones, F. Montaigne, M. Hehn, D. Lacour, J.R. Childress and M.J. Carey

Intermag, Taipei, Taiwan (2011)

• *Artificial kagome arrays of nanomagnets: Spin Ice or Dipolar Spin Ice?*

N. Rougemaille, F. Montaigne, B. Canals, A. Duluard, D. Lacour, M. Hehn, R. Belkhou, O. Fruchart, S. El Moussaoui, A. Bendounan and F. Maccherozzi

Intermag, Taipei, Taiwan (2011)

• *Indirect localization of a magnetic domain wall mediated by its quasi wall.*

D. Lacour, F. Montaigne, M. Hehn, R. Belkhou, N. Rougemaille and J. Raabe

Intermag, Taipei, Taiwan (2011)

Concurrence entre transfert de spin et effets thermiques dans les nanopistes de permalloy

J. Torrejon, J. Curiale, G. Malinowski, A. Thiaville, D. Lacour, F. Montaigne and M. Hehn

14^{ième} Colloque Louis Néel, Brest, France (2011)

Corrélation entre couplage AF et structure électronique dans les jonctions tunnel épitaxiées

A. Duluard, C. Bellourad, C. Tiusan, B. Negulescu, D. Lacour, M. Hehn, F. Montaigne

14^{ième} Colloque Louis Néel, Brest, France (2011)

Joule heating effect as additional source of domain wall motion in NiFenanostrrips.

J. Torrejon, J. Curiale, G. Malinowski, A. Thiaville, D. Lacour, F. Montaigne and M. Hehn

MMM, Scottsdale, USA (2011)

Finite tunnel magnetoresistance at the compensation point of Sm1-xGdxAl2, A ferromagnetic electrode with zero magnetization.

K. Dumesnil, M. Da Silva, C. Dufour, M. Hehn, D. Pierre, D. Lacour, F. Montaigne, G. Lengaigne and S. Robert

MMM, Scottsdale, USA (2011)

Concurrence entre transfert de spin et effets thermiques dans les nanopistes de permalloy

J. Torrejon, J. Curiale, G. Malinowski, A. Thiaville, D. Lacour, F. Montaigne and M. Hehn

14^{ième} Colloque Louis Néel, Brest, France (2011)

Corrélation entre couplage AF et structure électronique dans les jonctions tunnel épitaxiées

A. Duluard, C. Bellourad, C. Tiusan, B. Negulescu, D. Lacour, M. Hehn, F. Montaigne

14^{ième} Colloque Louis Néel, Brest, France (2011)

Joule heating effect as additional source of domain wall motion in NiFenanostrrips.

J. Torrejon, J. Curiale, G. Malinowski, A. Thiaville, D. Lacour, F. Montaigne and M. Hehn

MMM, Scottsdale, USA (2011)

Finite tunnel magnetoresistance at the compensation point of Sm1-xGdxAl2, A ferromagnetic electrode with zero magnetization.

K. Dumesnil, M. Da Silva, C. Dufour, M. Hehn, D. Pierre, D. Lacour, F. Montaigne, G. Lengaigne and S. Robert

MMM, Scottsdale, USA (2011)

Impact of electron-electron interactions in CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions.

J. Bernos, M. Hehn, F. Montaigne, C. Tiusan, D. Lacour, M. Alnot, B. Negulescu, G. Lengaigne, E. Snoeck and F.G. Aliev

Intermag, Taipei, Taiwan (2011)

Wide range and tunable magnetic tunnel junction sensor using two exchange pinned electrodes.

B. Negulescu, D. Lacour, F. Montaigne, A. Gerken, J. Paul, V. Spetter, J. Marien, C. Duret and M. Hehn

Intermag, Taipei, Taiwan (2011)

Monolithic two-dimensional magnetic sensors based on local magnetic anisotropy induced by a nano-modulated substrate.

J. Briones, F. Montaigne, D. Lacour, G. Lengaigne, S. Girod and M. Hehn

Intermag, Taipei, Taiwan (2011)

2012

Chiral nature of magnetic monopoles in artificial spin ice

H. Riahi, N. Rougemaille, F. Montaigne, B. Canals, M. Hehn, D. Lacour and J-C Toussaint

JMC13, Montpellier, France (2012)

Finite tunnel magnetoresistance in junctions with zero magnetization ferromagnetic electrode

M. Bersweiler, M. Da Silva, K. Dumesnil, C. Dufour, M. Hehn, D. Pierre, D. Lacour, F. Montaigne, G. Lengaigne, S. Robert

JMC13, Montpellier, France (2012)

Emergence of a magnetic charge crystal in artificial dipolar spin ice

N. Rougemaille, F. Montaigne, B. Canals, A. Duluard, D. Lacour, M. Hehn, R. Belkhou, O. Fruchart, S. El Moussaoui, A. Bendounan, and F. Maccherozzi

Sixth edition of Joint European Magnetic Symposia, Parma, Italy (2012)

2013

Chiral nature of forbidden states in artificial spin ice

H. Riahi, F. Montaigne, N. Rougemaille, B. Canals, J.-C. Toussaint, M. Hehn, D. Lacour
12th Joint MMM-Intermag Conference, Chicago, USA (2013)

Measurement of the dynamical dipolar coupling in a pair of magnetic nano-disks.

B. Pigeau, C. Hahn, G. deLoubens, V. Naletov, O. Klein, K. Mitsuzuk, D. Lacour, M. Hehn, S. Andrieu; F. Montaigne
12th Joint MMM-Intermag Conference, Chicago, USA (2013)

Antiferromagnetically coupled artificial Ising spin systems

I. Chioar, B. Canals, O. Fruchart, A. Grimm, M. Hehn, D. Lacour, F. Montaigne, N. Rougemaille, E. Wagner
12th Joint MMM-Intermag Conference, Chicago, USA (2013)

Strangling of an artifact in micromagnetic simulations: Application to artificial spin systems

F. Montaigne, H. Riahi, N. Rougemaille, J.-C. Toussaint, B. Canals, M. Hehn, D. Lacour
12th Joint MMM-Intermag Conference, Chicago, USA (2013)

Real time Atomic Force Microscopy imaging versus transport measurements during nanogap fabrication by electromigration

J-L Bubendorff, S. Girod, F. Montaigne, L. Simon, D. Lacour, M. Hehn
E-MRS 2013 Spring Meeting (2013)

Electron trapping for hot electron spin injection in silicon

Y. Lu, D. Lacour, S. Suire, F. Montaigne, M. Hehn, J. Li, I. Appelbaum
GRMN workshop on magnetism, Nancy, France, 2013

Effet de transfert de spin dans des jonctions tunnel magnétiques de taille nanométrique de type annulaire (nano-anneaux)

S. Le Gall, H. F. Liu, M. Hehn, D. Lacour, Y. Lu, X. F. Han, S. Mangin
XVème Colloque Louis Neel, Tours, France, 2013.

Jonctions tunnel à anisotropie perpendiculaire à base de multicouches Co/Pt : polarisation en spin et couplages dipolaires

M. Bersweiler, K. Dumesnil, D. Lacour, G. Lengaigne, M. Hehn
XVème Colloque Louis Neel, Tours, France, 2013

Domains duplication in perpendicular magnetic tunnel junctions

M. Bersweiler, K. Dumesnil, D. Lacour, G. Lengaigne, M. Hehn
58th MMM Conference, Denver, USA, 2013

5f surface state on Sm1-xGdxAl2, a ferromagnet without magnetization

M. Bersweiler, K. Dumesnil, P. Lefevre, A. Taleb, D. Pierre, D. Lacour, M. Hehn
58th MMM Conference, Denver, USA, 2013

2014

Controlling hot electrons injection into silicon via charge trapping at the Schottky interface

Lu, Y., Lacour, D., Lengaigne, G., Le Gall, S., Suire, S., Montaigne, F., Hehn, M.
IEEE Intermag Conference Dresden (2014)

Kinetic processes in thermal demagnetization of artificial spin ices

Montaigne, F., Lacour, D., Hehn, M., McMurtry, S., Louis, D., Riahi, H., Chioar, I., Rougemaille, N., Canals, B., Santos Burgos, B., Mentès, T. O., Locatelli, A.
IEEE Intermag Conference Dresden (2014)

Laser Powered Magnetic-Random Access Memory

Yong Xu; Weiwei Lin; Sébastien Petit-Watlot; Michel Hehn; Hervé Rinnert; Yuan Lu; François Montaigne; Daniel Lacour; Stéphane Andrieu; Stéphane Mangin
59th MMM conference, Honolulu, Hawaii (2014)

Reversal mechanism in Co/Pt patterned media with dipolar frustrations

Thomas Hauet; Luc Piraux; Sandeep Srivastava; Vlad Antohe; Daniel Lacour; Michel Hehn; François Montaigne; Johannes Schwenk; Miguel A. Marioni; Hans J. Hug; Ondrej Hovorka; Andreas Berger; Stephane Mangin; Flavio Abreu Araujo
59th MMM conference, Honolulu, Hawaii (2014)

New insights in perpendicular [Co/Pt]-based magnetic tunnel junctions: spin polarization, domains duplication and phase diagram

M. Bersweiler, K. Dumesnil, D. Lacour, M. Hehn
MSNOWS-UNIGR, Nancy (2014)

2015

Phase diagrams in exchange biased CoTb/[Co/Pt] multilayers based magnetic tunnel junctions

K. Dumesnil, M. Bersweiler, D. Lacour, F. Montaigne, M. Hehn
ICM 2015 Barcelone, Espagne (2015)

Thermally activated domain wall motion in [Co/Ni](111) superlattices with perpendicular magnetic anisotropy.

S. Legall, T. Hauet, N. Vernier, M. Hehn, D. Lacour, F. Montaigne, M. Gottwald, S. Andrieu, D. Ravelosona and S. Mangin
INTERMAG 2015 Conference, Beijing, China (2015)

Reversal mechanism, switching field distribution and dipolar frustrations in Co/Pt bit pattern media based on AAO auto-assembled hexagonal array of nanobumps

T. Hauet, L. Piraux, S. K. Srivastava, V.A. Antohe, D. Lacour, M. Hehn, F. Montaigne, J. Schwenk, M.A. Marioni, H.J. Hug, O. Hovorka, A. Berger, S. Mangin, F. Abreu Araujo
20th International Conference on Magnetism, Barcelona, Spain (2015)

2016

Probing frustrations with artificial magnets.

B. Canals, N. Rougemaille, I.A. Chioar, Y. Perrin, V. Nguyen, F. Montaigne, M. Hehn and D. Lacour
Intermag Joint Conference, San Diego (2016)

Dipolar 4-state Potts model: Presentation and experimental realization.

D. Louis, F. Montaigne, T. Hauet, D. Lacour, M. Hehn, N. Rougemaille and B. Canals
Intermag Joint Conference, San Diego (2016)

Control of electrical and magnetic properties of Magnetic Tunnel Transistor

C. Vautrin, Y. Lu, S. Le Gall, G. Sala, S. Robert, O. Lenoble, F. Montaigne, M. Wu, D. Lacour and M. Hehn
Intermag Joint Conference, San Diego (2016)

Long range phase coherence in double barrier magnetic tunnel junctions with large thick metallic quantum well.

Y. Lu, B. Tao, H. Yang, Y. Zuo, X. Devaux, G. Lengaigne, M. Hehn, D. Lacour, S. Andrieu, M. Chshiev, T. Hauet, F. Montaigne, S. Mangin and X. Han
Intermag Joint Conference, San Diego, (2016)

Tunneling across MgO barrier driven by double oxygen vacancies

E. Monteblanco, B. Taudul, U. Halisdemir, D. Lacour, F. Schleicher, 2 F. Montaigne, 2 E. Beaurepaire, 2 S. Boukari, 2 M. Hehn, 1 M. Alouani, 2 and M. Bowen, 2,
MMM New Orleans (2016)

Extraordinary Hall effect based magnetic comparison applications

T. Liu, D. Lacour, F. Montaigne, S. Le Gall, M. Hehn, T. Hauet
JEMS, Glasgow, Ecosse (2016)

Dipolar 4-state Potts model: Presentation and experimental realization

D. Louis, F. Montaigne, T. Hauet, D. Lacour, M. Hehn
JEMS, Glasgow, Ecosse (2016)

Magnetization switching through spin orbit torque in CoxTb1-x based multilayers

T.H. Pham, P. Vallobra, S.-G. Je, T. Fache, M.-C. Cyrille, O. Boulle, G. Gaudin, D. Lacour, G. Malinowski, J-C. Rojas Sánchez, M. Hehn and S. Mangin
Second Marie Curie School on Domain Walls and Spintronics, Spetses, Greece (2016)

Spin transport in molybdenum disulfide multilayer channel

S. H. Liang, Y. Lu, B. S. Tao, S. Mc-Murtry, G. Wang, X. Marie, P. Renucci, H. Jaffrès, F. Montaigne, D. Lacour, J.-M. George, S. Petit-Watelot, M. Hehn, A. Djéffal, S. Mangin
Graphene 2016, Genoa, Italy (2016)

Long range phase coherence in double barrier magnetic tunnel junctions with large thick metallic quantum well

B. S. Tao, H. X. Yang, Y. L. Zuo, X. Devaux, G. Lengaigne, M. Hehn, D. Lacour, S. Andrieu, M. Chshiev, T. Hauet, F. Montaigne, S. Mangin, X. F. Han, Y. Lu
17ème colloque Louis Néel, San-Dié-des-Vosges, France (2016)

Transistor tunnel magnétique à aimantations croisées

C. Vautrin, Y. Lu, G. Sala, S. Robert, F. Montaigne, D. Lacour, M. Hehn
17ème colloque Louis Néel, San-Dié-des-Vosges, France (2016)

2017

Magnetic sensors based on surface acoustic wave resonators

K. Dumesnil, V. Polewczyk, S. Petit-Watelot, M. Moutaouekkil, H. Mjahed, H. Mishra, S. Hage-Ali, O. Elmazria, F. Montaigne, D. Lacour, M. Hehn, N. Tiercelin, Y. Dusch, A. Talbi, O. Bou Matar
MMM, Pittsburgh USA (2017)

Unipolar and Bipolar High-Magnetic-Field Sensors Based on Surface Acoustic Wave Resonators

V. Polewczyk, K. Dumesnil, S. Petit-Watelot, M. Moutaouekkil, H. Mjahed, H. Mishra, S. Hage-Ali, O. Elmazria, F. Montaigne, D. Lacour, M. Hehn, N. Tiercelin, Y. Dusch, A. Talbi, O. Bou Matar
Colloque Louis Neel, Paris (2017)

Probing a device's active atoms

M. Studniarek, U. Halisdemir, F. Schleicher, B. Taudul, E. Urbain, S. Boukari, M. Hervé, C.- H. Lambert, A. Hamadeh, S. Petit-Watelot, O. Zill, D. Lacour, L. Joly, F. Scheurer, G. Schmerber, V. Da Costa, A. Dixit, P. Guitard, M. Acosta, F. Leduc, F. Choueikani, E. Otero, W. Wulfhekel, F. Montaigne, E. Monteblanco, J. Arabski, P. Ohresser, E. Beaurepaire, W. Weber, M. Alouani, M. Hehn, M. Bowen 9h30 EDS-O4 Tunneling Spintronics Across MgO Driven by Oxygen Vacancies. B. Taudul, E. N. Monteblanco, U. Halisdemir, F. Schleicher, D
Colloque Louis Neel, Paris (2017)

Tunneling Spintronics Across MgO Driven by Oxygen Vacancies

Beata Taudul, Elmer N. Montebancho, Ufuk Halisdemir, Filip Schleicher, Daniel Lacour, François Montaigne, Eric Beaupaire, Samy Boukari, Michel Hehn, Martin Bowen, Mébarek Alouani
Colloque Louis Neel, Paris (2017)

Minimizing the critical current for spin-orbit torque switching in CoxB1-x ferrimagnetic alloys

T. Pham; S. Je; P. Vallobra; T. Fache; M. Cyrille; O. Boulle; G. Gaudin; D. Lacour; G. Malinowski; M. Hehn; J. Rojas-Sanchez; S. Mangin
Intermag Conference, Dublin, Ireland (2017)

Decreasing the Spin Orbit Torque-critical current density to reverse perpendicular magnetization in CoxB1-x ferrimagnetic based alloys

Juan-Carlos Rojas-Sánchez. T. Pham, P. Vallobra, D. Lacour, T. Fache, G. Malinowski, M. Hehn, S. Mangin, M. C. Cyrille, S.-G. Je; G. Gaudin and O. Boulle.

APS March Meeting, New Orleans, USA (2017)

2018

Magnetic sensors based on surface acoustic wave resonators

V. Polewczyk, K. Dumesnil, S. Petit-Watelot, D. Lacour, M. Hehn, M. Moutaouekkil, H. Mjahed, H. Mishra, S. Hage-Ali, O. Elmazria, N. Tiercelin, Y. Dusch, A. Talbi, O. Bou Matar

MSNOW Nancy (2018)

Magnetic sensors based on surface acoustic wave resonators

K. Dumesnil, V. Polewczyk, S. Petit-Watelot, D. Lacour, M. Hehn, M. Moutaouekkil, H. Mjahed, H. Mishra, S. Hage-Ali, O. Elmazria, N. Tiercelin, Y. Dusch, A. Talbi, O. Bou Matar

ICM San Francisco (2018)

2019

Effective temperature of tilted artificial spin ice system

Maryam Massouras, Daniel Lacour, Michel Hehn and François Montaigne

Colloque Louis Neel, Toulouse (2019)

Spin-driven electrical power generation at room temperature

K. Katcko, E. Urbain, B. Taudul, F. Schleicher, J. Arabski, E. Beaupaire, B. Vilenó, D. Spor, W. Weber, D. Lacour, S. Boukari, M. Hehn, M. Alouani, J. Fransson, M. Bowen

Colloque Louis Neel, Toulouse (2019)

6.2 Prix

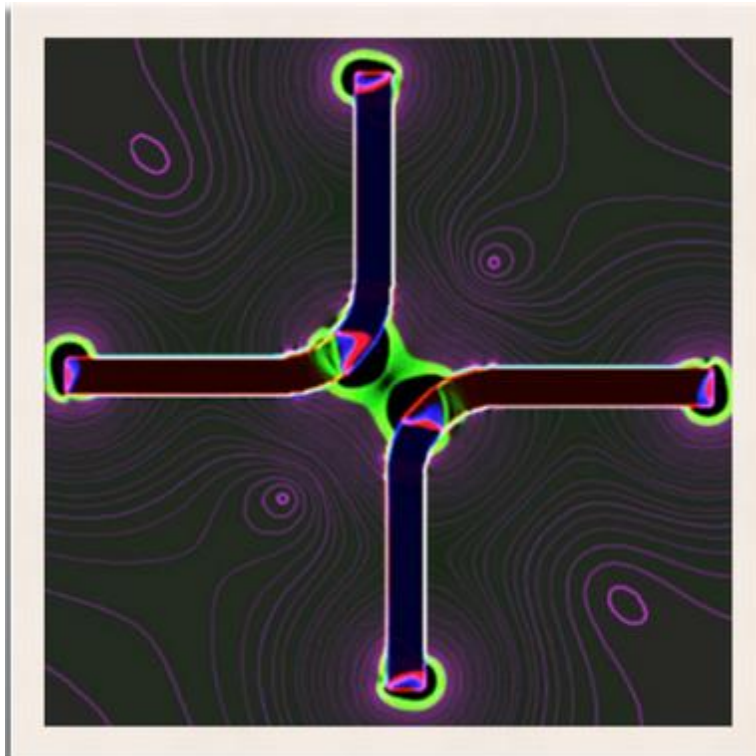
- Grand Prix pour la Recherche de la Société Industrielle de l'Est à l'équipe 'Nanomagnétisme et Electronique de Spin' de l'Université Henri Poincaré, Nancy I (2007).
- Prix interrégional de la recherche de la Grande Région Sarre Lor Lux pour les recherches en magnétisme dans la Grande Région décerné aux équipes participant à cette activité. Remis le 15 Janvier 2019.



Prix International de la Recherche 2018 décerné la Grande Région

ANNEXE 1 : NANOART

Dans cette première annexe, je rapporte le document que j'ai constitué concernant l'exposition. Pour chaque tableau, nous trouvons une reproduction de l'œuvre, une explication de son contenu, la ou les méthodes utilisées pour l'obtention de l'image et une publication scientifique associée. Comme l'exposition a en partie été réalisée dans le cadre d'un projet européen transfrontalier, une traduction anglaise est également disponible.



Génération de parois vortex (2008)

Generating vortex walls

Dimensions: 88 x 88 cm, imprimé directement sur aluminium

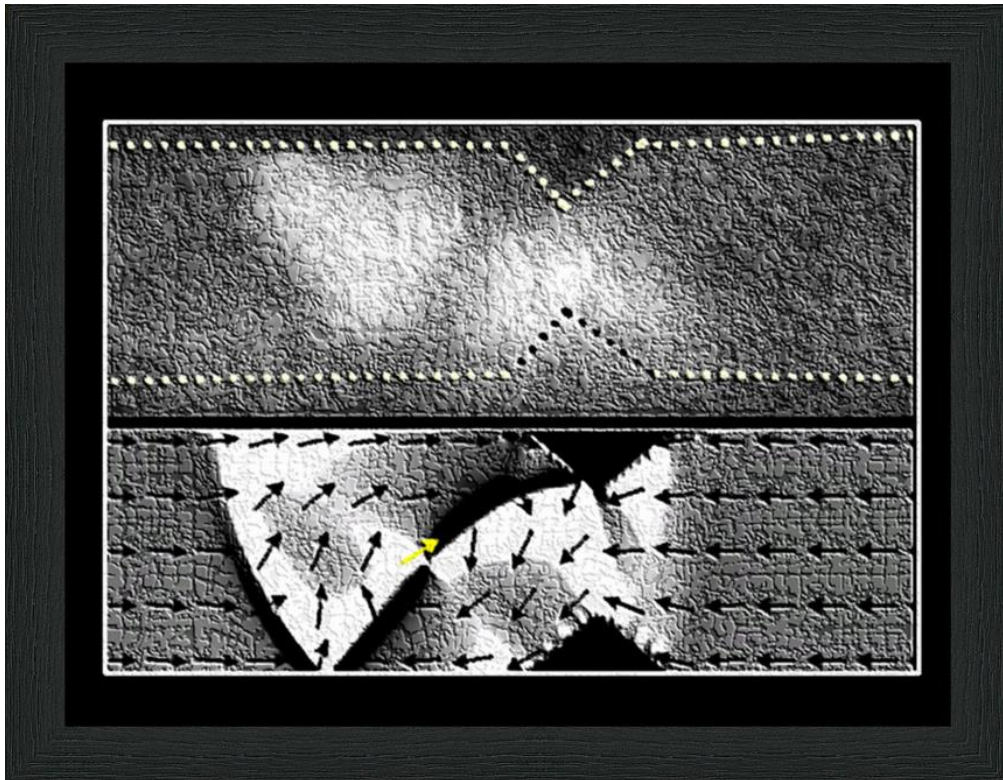
Génération de parois vortex est issue de la modélisation numérique du champ magnétique créé par de deux pistes en forme de boomerang. Cette forme a été choisie afin de générer de façon simple des frontières magnétiques appelées parois vortex au sommet des boomerangs. Le champ d'application de ces objets couvre aussi bien les nouvelles technologies de stockage de l'information numérique, que la réalisation de synapses artificielles ou des capteurs biologiques.

Generating vortex walls is a numerical simulation of the magnetic field emerging from two magnetic tracks (boomerangs shaped). This shape has been selected because it constitutes an easy way to create magnetic borders in the curves. The application field of these objects covers aspects such as the storage of numerical information, artificial synapses realization and sensors for biologic species.

Technique utilisée : modélisation Mumax2

Publication associée :

Christopher Vautrin, Maria Vyazmensky, Stanislav Engel, Stéphane Mc. Murtry, Michel Hehn, François Montaigne, Daniel Lacour, and Robert S. Marks
Biochip based on Arrays of switchable Magnetic nano-traps
Sensors and Actuators B 251, 699–705 (2017)



Capture de paroi vortex (2008)

Capturing a vortex wall

Dimension : 68 x 53 cm, imprimé directement sur aluminium

Capture de paroi vortex est composée d'une image de Microscopie à Force Magnétique accompagné de sa modélisation. Une entaille faite dans une piste magnétique permet la capture d'une paroi vortex (frontière entre deux régions où l'aimantation prend une direction différente).

Capturing a vortex wall is composed of a magnetic force microscopy picture associated with its corresponding simulation. A notch fabricated in a magnetic track allows to capture a vortex wall (border between two areas in which the magnetization direction differs).

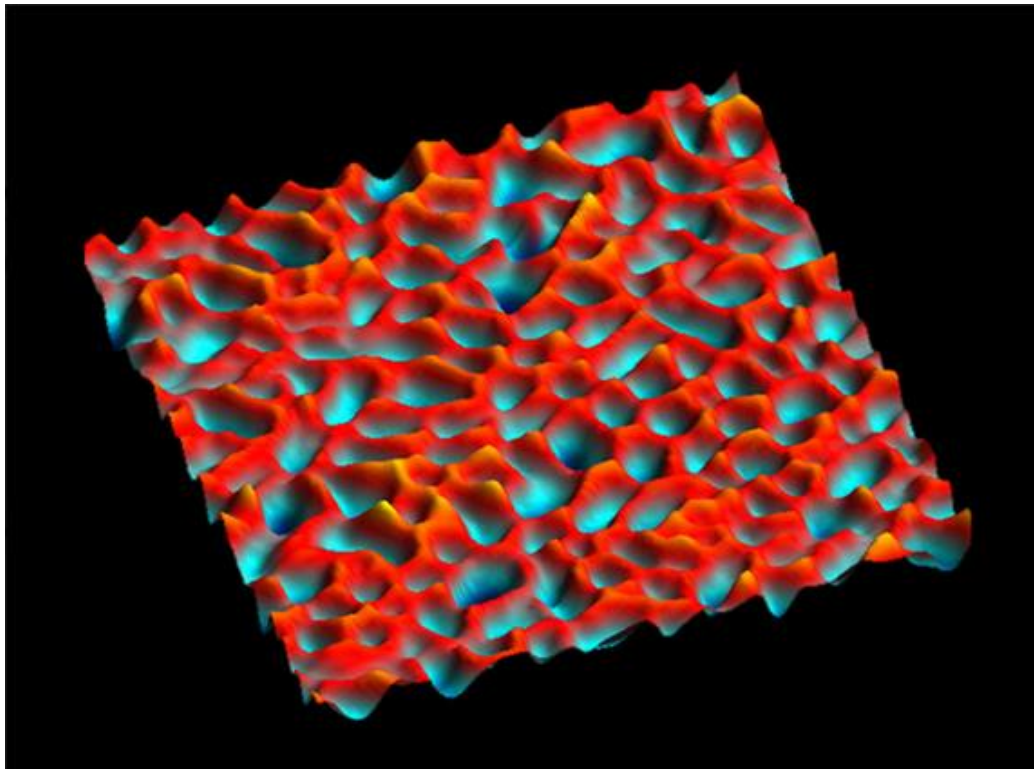
Matériaux : Alliage de nickel et de fer

Technique utilisée : Microscopie de force magnétique & modélisation OOMMF

Publication associée :

J. Briones, F. Montaigne, D. Lacour, M. Hehn, M.J. Carey, J.R. Childress
Magnetic domain wall propagation in a submicron spin-valve stripe: influence of the pinned layer

Appl. Phys. Lett. 92, 032508 (2008)



Domaines magnétiques #1 (2011)

Magnetic domains #1

Dimensions: 60 x 45 cm, noyé dans de la résine

Domaines magnétiques #1 est une image de microscopie à force magnétique rendue en trois dimensions. Les alternances de zones rouges et bleues sont caractéristiques des régions où l'aimantation* est orientée soit vers le haut soit vers le bas.

Magnetic domains #1 is 3D picture taken with a magnetic force microscope. Red and blue regions are characteristic patterns for domains in which magnetization is point toward opposite directions.

Matériau : alliage Cobalt Terbium

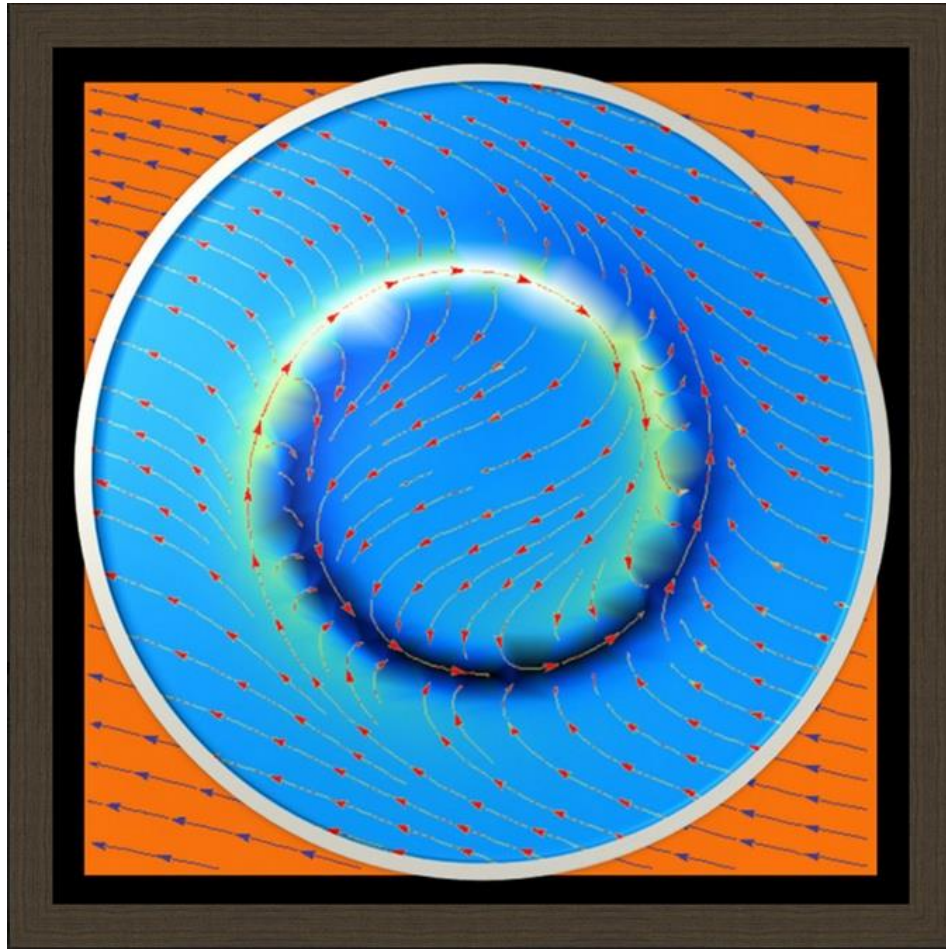
Technique utilisée : Microscopie de force magnétique

Publication associée :

M. Gottwald, M. Hehn, D. Lacour, T. Hauet, F. Montaigne, S. Mangin, P. Fischer, M.-Y. Im, A. Berger

Asymmetric magnetization reversal in dipolar-coupled spin valve structures with perpendicular magnetic anisotropy

Phys. Rev. B 85, 064403 (2012)



Ligne de flux magnétique d'une paroi annulaire (2011)

Magnetic stream of an annular wall

Dimensions : 88 x 88 cm, imprimé directement sur aluminium

Ligne de flux magnétique d'une paroi annulaire est issue de la modélisation numérique du champ magnétique créé par une configuration d'aimantations complexe rencontrée dans une multicouche composée de films minces magnétiques utilisée pour la réalisation d'un capteur de champ magnétique.

Magnetic stream of an annular wall is derived from the numerical modeling of the magnetic field created by a complex magnetization configuration encountered in a multilayer composed of thin magnetic films used for the realization of a magnetic field sensor.

Technique utilisée : modélisation Mathematica

Publication associée :

B. Negulescu, D. Lacour, M. Hehn, A. Gerken, J. Paul, C. Duret
 On the control of spin flop in synthetic antiferromagnetic films
 J. Appl. Phys. 109, 103911 (2011)



Contour du flux magnétique d'une paroi annulaire

(2011)

Magnetic flux contour of an annular wall

Circularshape, dimension : Ø 80 cm, imprimé directement sur aluminium

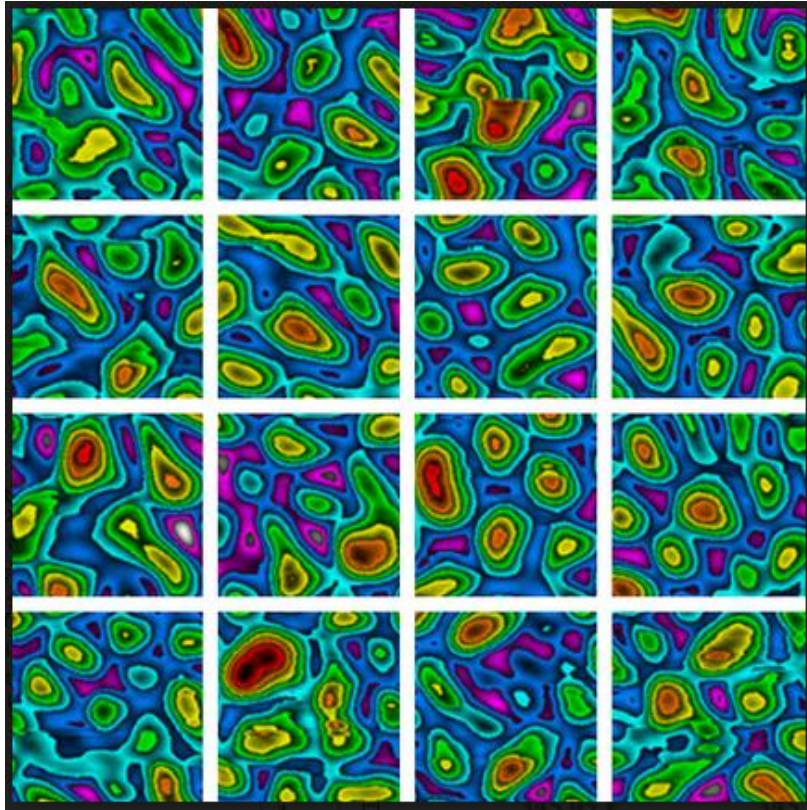
Contour du flux magnétique d'une paroi annulaire est issue de la modélisation numérique du champ magnétique créé par une configuration d'aimantations complexe rencontrée dans une multicouche composée de films minces magnétiques utilisée pour la réalisation d'un capteur de champ magnétique.

Magnetic flux contour of an annular wall is derived from the numerical modeling of the magnetic field created by a complex magnetization configuration encountered in a multilayer composed of thin magnetic films used for the realization of a magnetic field sensor.

Technique utilisée : modélisation Mathematica

Publication associée:

B. Negulescu, D. Lacour, M. Hehn, A. Gerken, J. Paul, C. Duret
On the control of spin flop in synthetic antiferromagnetic films
J. Appl. Phys. 109, 103911 (2011)



Domaine magnétique #2 x 100 000(2011)
Magnetic domains #2

Multi-panel (4x4), Dimensions : 120 x 120 cm, noyé dans de la résine

Domaine magnétique #2 est une image de microscopie à force magnétique. Les alternances de couleurs font ressortir les zones de transition séparant des régions où l'aimantation pointe alternativement hors du tableau ou vers le tableau.

Magnetic Domain #2 is a magnetic force microscopy image. The alternating colors highlight the transition areas separating regions where the magnetization points alternately out of or towards the surface of the board.

Matériau : Alliage de cobalt et terbium

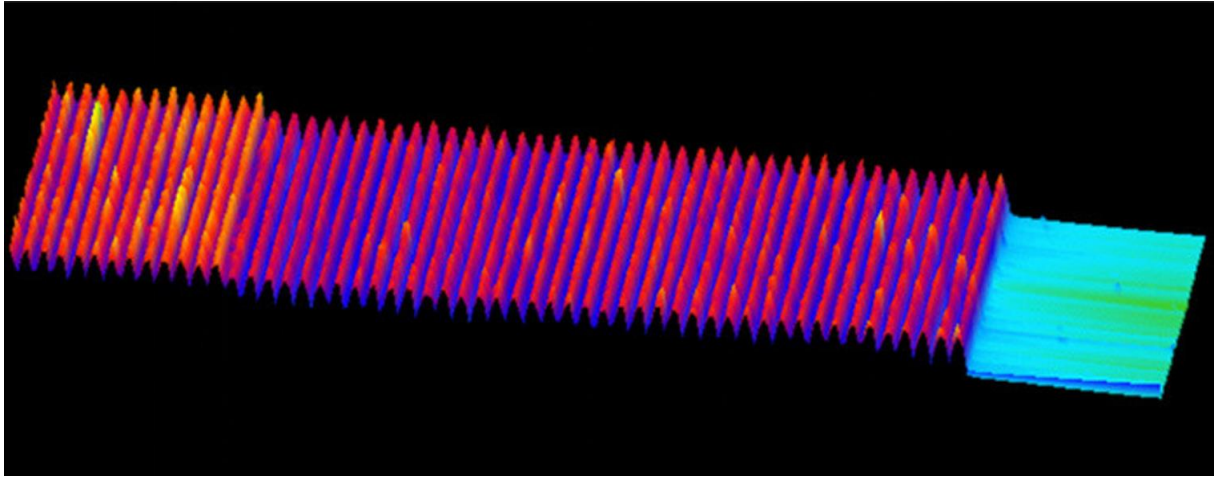
Technique utilisée : Microscopie de force magnétique

Publication associée :

M. Gottwald, M. Hehn, D. Lacour, T. Hauet, F. Montaigne, S. Mangin, P. Fischer, M.-Y. Im, A. Berger

Asymmetric magnetization reversal in dipolar-coupled spin valve structures with perpendicular magnetic anisotropy

Phys. Rev. B 85, 064403 (2012)



Fronces sur surface magnétique (2010)

Gathers on magnetic surface

Dimensions : 125 x 49 cm, noyé dans de la résine

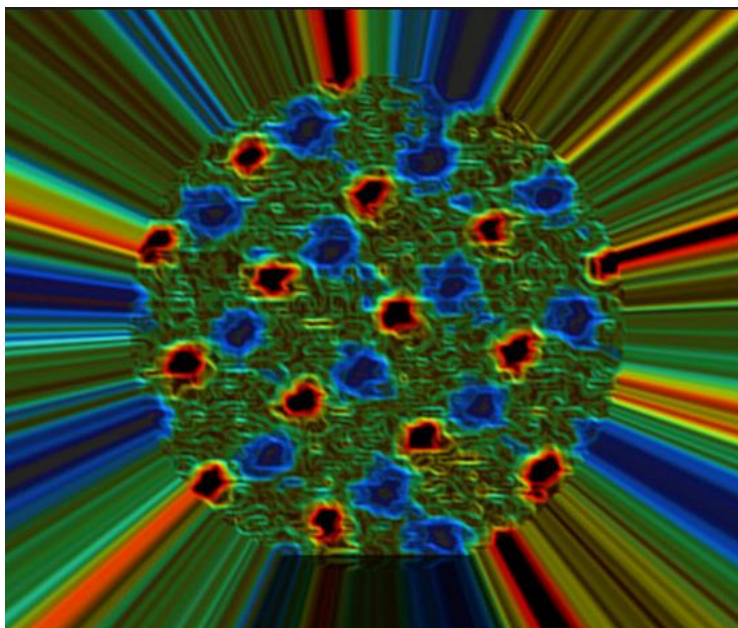
Fronces sur surface magnétique est une image de microscopie de force atomique vue en trois dimensions. Des travées de dimension nanométrique (un milliardième de mètre) sont formées sur un support extrêmement plat à l'origine. La nouvelle surface sert alors de support à une fine couche magnétique qui va épouser sa forme et ainsi acquérir de nouvelles propriétés magnétiques utiles à la réalisation de capteur.

Gathers on magnetic surface is an atomic force microscopy image seen in three dimensions. Spans of nanometric size (one billionth of a meter) are formed on an extremely flat support. The new surface then serves as a support for a thin magnetic layer that will conform to its shape and thus acquire new magnetic properties useful for sensor construction.

Matériau : alliage de nickel et fer

Technique utilisée : Microscopie de force atomique

Publication associée : J. Briones, F. Montaigne, G. Lengaigne, D. Lacour, M. Hehn
Local magnetic anisotropy induced by a nano-modulated surface and application to two-dimensional magnetic sensors.
Appl. Phys. Express 3 073002 (2010)



Réseau かごめ magnétique

(2011)

Kagomé magnetic network

Dimensions : 100,8 x 84,3 cm, impression sur toile

Réseau かごめ magnétique est image de microscopie à force magnétique d'un réseau de nano-aimants. Les contours bleus et rouges indiquent l'orientation de l'aimantation de chaque nano-aimant.

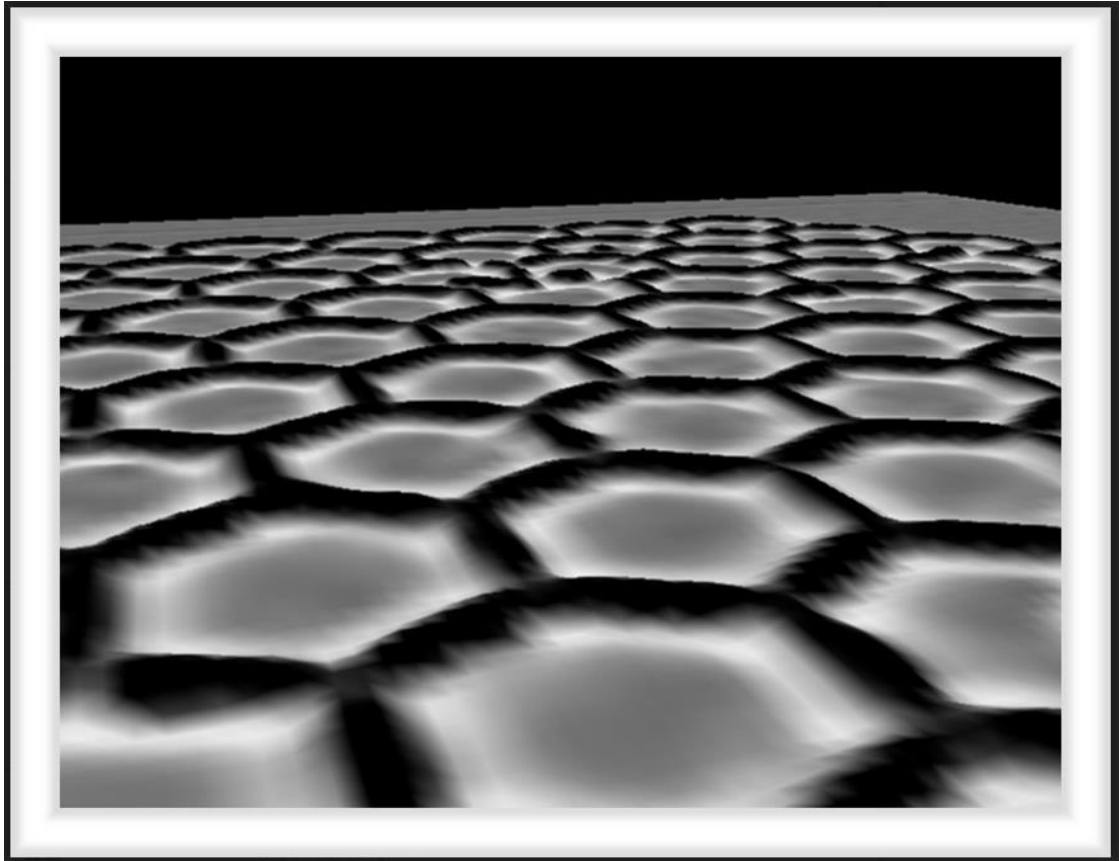
Kagomé magnetic network is a magnetic force microscopy image of a nanomagnet network. The blue and red contours indicate the magnetization orientation of each nanomagnet.

Matériau : cobalt

Technique utilisée : Microscopie de force magnétique

Publication associée :

N. Rougemaille, F. Montaigne, B. Canals, A. Duluard, D. Lacour, M. Hehn, R. Belkhou, O. Fruchart, S. El Moussaoui, A. Bendounan, and F. Maccherozzi
Artificial Kagome Arrays of Nanomagnets: A Frozen Dipolar Spin Ice
Phys. Rev. Lett. 106, 057209 (2011)



Réseau かごめ magnétique #2 (2011)

Magnetic kagomé network #2

Dimensions : 110 x 85 cm, imprimé directement sur aluminium

Réseau かごめ magnétique #2 est une image de microscopie à force atomique d'un réseau de nano-aimants.

Magnetic kagomé network #2 is an atomic force microscopy image of a nanomagnet network.

Technique utilisée : Microscope de force atomique, Rendu des données avec WSxM

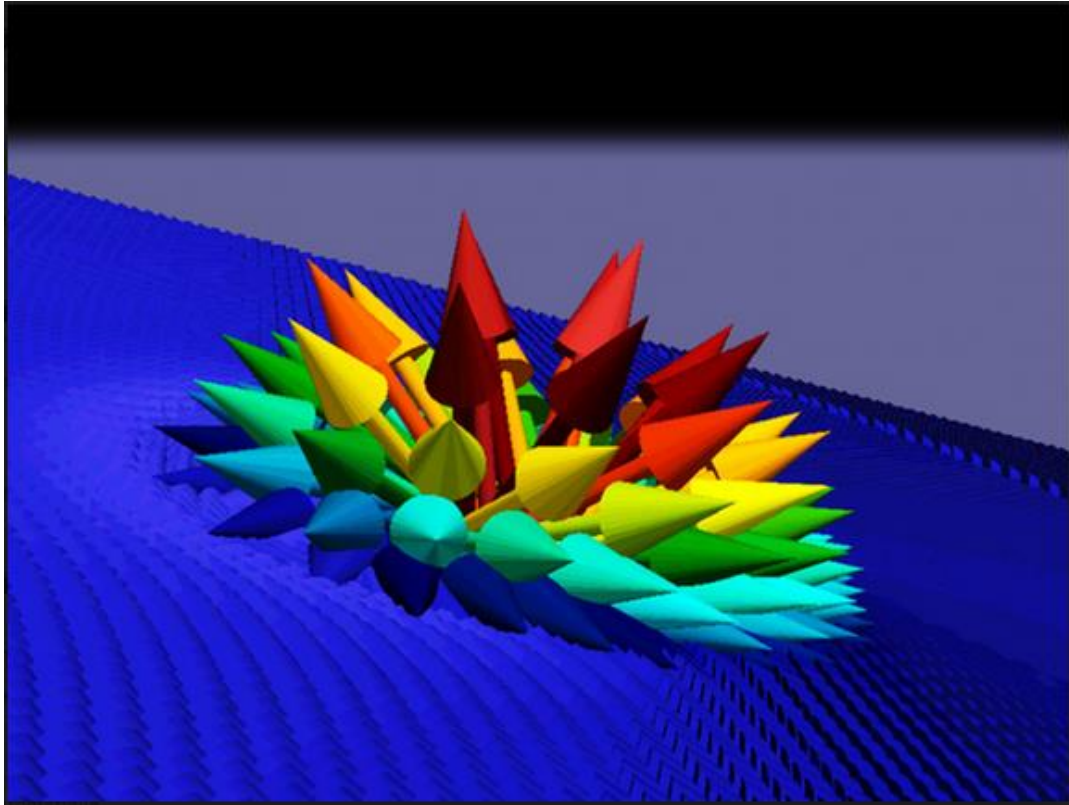
Matériau : cobalt

Publication associée :

H Riahi, F Montaigne, N Rougemaille, B Canals, D Lacour, M Hehn

Energy levels of interacting curved nanomagnets in a frustrated geometry: increasing accuracy when using finite difference methods.

Journal of Physics Condensed Matter 296001 (2013)



Bouquet magnétique (2011)

Magnetic bouquet

Dimensions : 80 x 60 cm, noyé dans de la résine

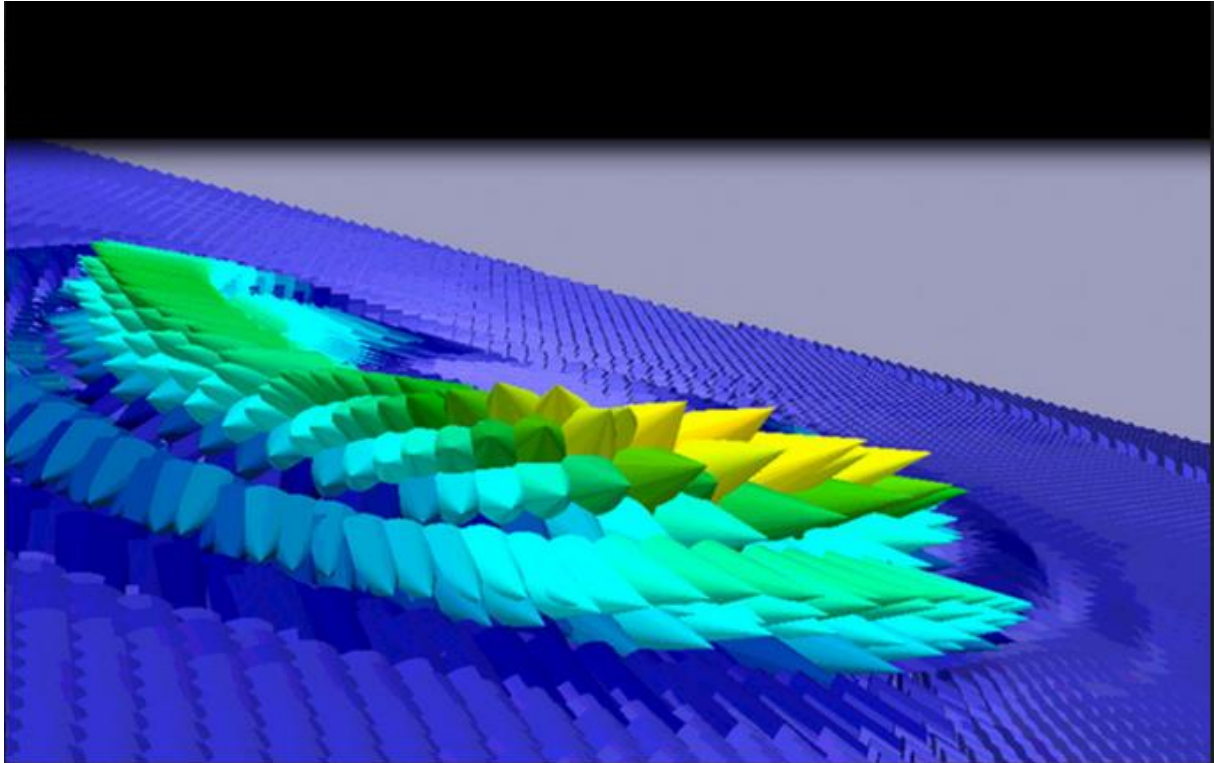
Bouquet magnétique est issu d'une simulation numérique. Dans certaines conditions de confinement, l'aimantation s'enroule en formant un tourbillon (vortex). Au cœur de ce vortex l'aimantations jaillit hors du plan.

Magnetic bouquet is the result of a digital simulation. Under certain confinement conditions, the magnetization coils up forming a vortex. In the heart of this vortex, the magnets spurt out of the plane.

Technique utilisée : Simulation Mumax2, Rendu de donnée avec ParaView.

Publication associée :

K. Mitsuzuka, D. Lacour, M. Hehn, S. Andrieu, and F. Montaigne
Magnetic vortices in single crystalline Fe-V disks with four folds magnetic anisotropy
Appl. Phys. Lett. 100, 192406 (2012)



Cœur de vortex évanescent (2011)

Evanescent vortex core

Dimensions : 82,3 x 52 cm, noyé dans de la résine

Cœur de vortex évanescent est issu d'une simulation numérique. Lorsqu'un cœur de vortex est mis en mouvement sa structure interne peut-être fortement perturbée comme le montre cette représentation.

Evanescent vortex core is the result of a digital simulation. When a vortex core is set in motion, its internal structure can be severely disrupted as shown in this representation.

Technique utilisée : Microscopie de force magnétique

Publication associée :

K. Mitsuzuka, D. Lacour, M. Hehn, S. Andrieu, and F. Montaigne
Magnetic vortices in single crystalline Fe-V disks with four folds magnetic anisotropy
Appl. Phys. Lett. 100, 192406 (2012)

ANNEXE 2 : CV

Daniel Lacour

43 ans, Tél : 06 48 28 57 90 / Courriel : daniel.[lacour@ijl.nancy-universite.fr](mailto:daniel.lacour@ijl.nancy-universite.fr)

- 2019 [Membre d'une commission CNRS](#) :
Recherche compatible avec le développement durable
-
- 2014 [Membre du comité scientifique du Colloque Louis Néel](#)
[Membre du comité scientifique de la conférence SPIE Spintronic](#)
-
- 2010 [Passage CR1](#)
-
- 2007-2014 [OMNT](#)
Expert pour la section nano-magnétisme et électronique de spin
-
- 2006 [Université de Nancy - CNRS, Nancy, CR2](#)
Micromagnétisme et électronique de spin
-
- 2005-2006 [Université Henri Poincaré, Nancy, Stage postdoctoral](#)
Conception et caractérisation de nano-structures pour l'électronique de spin.
Cours et TP : Introduction à la microscopie en champ proche (10 h, Master 2^{ième} année)
-
- 2003-2004 [Hitachi, San Jose, USA, Stage postdoctoral](#)
Conception et caractérisation de nano-dispositifs pour l'électronique de spin.
Etudes de l'effet de transfert de spin appliqué aux vannes de spin, jonctions tunnel magnétiques et aux parois de domaines magnétiques.
-
- 1999–2002 [UMP CNRS/Thales Research and Technology, Orsay, Doctorant](#)
[Université Henri Poincaré, Nancy](#)
Thèse de doctorat CIFRE avec mention très honorable et félicitations du jury.
Titre : «L'effet tunnel dépendant du spin comme sonde du micromagnétisme et du transport d'électrons chauds : application aux capteurs».
Participation à deux contrats européens : [Nanomem](#)(MRAM) et [Tunnelsense](#) (Capteur de champ magnétique sur la base de jonctions tunnel).
Travaux Pratiques de mécanique du point (première année de DEUG, 16h)
-
- 1998–1999 [Université Henri Poincaré, Nancy, France, Etudiant](#)
DEA en Physique et Chimie de la matière et des matériaux
Sujet : « élaboration et caractérisation de jonctions tunnel magnétiques réalisées par pulvérisation cathodique »
Tutorat : encadrement d'étudiants en première année de DEUG (40h)
-



Résumé :

Dans ce manuscrit d'habilitation à diriger des recherches je résume les travaux que j'ai effectués au sein de l'équipe **nano-magnétisme et électronique de spin** de Nancy depuis mon embauche au CNRS en 2006. Ce document est divisé en quatre parties. Dans la première partie il est question des propriétés de **parois de domaines magnétiques** bloquées par des constriction et de leur comportement lorsqu'elles se propagent dans une multicouche magnétique. Le lecteur trouvera également dans cette partie une section dédiée à la frustration géométrique au sein de **réseaux de nano-aimants couplés par champ dipolaire**. Des perspectives de ces travaux en vue d'applications y sont également évoquées. La deuxième partie est consacrée au **transport polarisé spin**. Y figurent notamment les plus récents résultats découlant du projet de recherche proposé à mon entrée au CNRS s'intitulant : Étude de la **pression du spin électronique aux basses énergies**. Une troisième partie présente les actions de **diffusion de la culture scientifique** auxquelles j'ai participé. Finalement la quatrième partie regroupe diverses activités liées à mon activité de recherche.

