



Recueil des Résumés

**des Journées Thématiques « Capteurs Magnétiques &
Électromagnétiques (EM) et Applications »**

**GDR Ondes CNRS 2451, GT3-Capteurs,
Inversion & Imagerie**

31 Mai - 1^{er} Juin 2018

au Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2Elab)





CAPTEURS A MAGNETO-IMPEDANCE GEANTE (GMI) : RECENTS DEVELOPPEMENTS

Aktham Asfour¹, Julie Nabias¹, Papa Silly Traoré¹ et Jean-Paul Yonnet¹

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP¹, G2Elab, 38000 Grenoble, France

aktham.asfour@g2elab.grenoble-inp.fr

RÉSUMÉ

L'objectif de cette conférence plénière est de présenter une synthèse de deux volets de travail récemment effectué au Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2Elab) autour des capteurs à Magnéto-Impédance Géante (GMI). Le premier volet concerne la mise en œuvre d'un capteur de courant. Les règles et les choix d'implémentation sont présentés et discutés. Le deuxième volet traite de la mise en œuvre et performances en bruit de nouvelles techniques numériques de conditionnement des capteurs GMI à haute sensibilité.

MOTS-CLEFS : *GMI (Magneto-Impédance Géante) ; capteur de courant ; conditionnement numérique, haute sensibilité,*

1. CAPTEUR DE COURANT A MAGNETO-IMPEDANCE GEANTE

Un des avantages des capteurs GMI est de pouvoir mesurer des champs magnétiques DC et AC par le même élément sensible. Cet avantage est mis à profit dans le cadre d'une étude de faisabilité d'un capteur de courant sans contact (basé sur la mesure du champ magnétique produit par le courant mesuré) [1]. Dans cette étude, une attention particulière est portée à l'impact des paramètres d'influence qui conditionnent largement les solutions de mise en œuvre du capteur. Dans le cadre de l'application visée, le capteur a une forme toroïdale impliquant une contrainte de flexion sur l'élément sensible du capteur (l'élément sensible forme une boucle autour du conducteur d'intérêt). Cet effet de contrainte a été caractérisé [2]-[3]. Les autres paramètres d'influence considérés sont la température de fonctionnement [4] et l'effet des perturbations magnétiques telles que l'excentration du conducteur d'intérêt et l'impact des champs magnétiques environnant (champ terrestre ou champs produits par d'autres conducteurs en proximité immédiate du capteur) [5]. Des solutions de mise en œuvre, tenant compte de l'impact des paramètres d'influence, sont proposées. Un prototype de capteur est présenté ainsi que ses performances actuelles. Les pistes d'optimisation et d'amélioration sont également discutées [5].

2. MISE EN ŒUVRE ET PERFORMANCE DE TECHNIQUES NUMERIQUES DE CONDITIONNEMENT DE CAPTEURS GMI

En plus des atouts liés à la mesure DC/AC, la GMI présente un potentiel certain pour la réalisation de capteurs et magnétomètres à haute sensibilité. Actuellement, les performances en bruit de ces capteurs

¹ Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes.

avoisinent le $1 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ en zone de bruit blanc et quelques dizaines de $\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ à 1 Hz. A basse fréquence, le bruit de ces capteurs est d'origine magnétique, tandis que dans la zone de bruit blanc, les performances sont limitées par le bruit de l'électronique analogique de conditionnement [6]-[7].

De nouvelles solutions de conditionnement numériques des capteurs GMI sont implémentées et évaluées. Issues des applications de télécommunication, ces techniques sont principalement basées sur l'utilisation d'un synthétiseur numérique de fréquence (ou DDS pour « Direct Digital Synthesizer ») pour fournir le courant d'excitation haute fréquence à l'élément sensible et de radio-logicielle (ou SDR pour Software Defined Radio) pour la démodulation numérique d'amplitude en quadrature. En effet, la tension aux bornes de l'élément sensible est directement numérisée à une haute fréquence d'échantillonnage par un convertisseur analogique-numérique (CAN). La démodulation est ensuite réalisée à l'aide d'un DDC (pour « Digital Down-Converter »). Ce DDC est constitué d'un oscillateur numérique local (NCO pour « Numerically-Controlled-Oscillator ») pour fournir le signal de référence pour le mixeur numérique, et de filtres numériques passe-bas décimateurs [8]-[9].

Les règles d'implémentation de telles techniques numériques sont déclinées. Un modèle analytique est développé pour prédire les performances en bruit en zone de bruit blanc et les limitations en tenant compte des contraintes d'implémentation en temps-réel et des performances de la technologie actuelle des circuits numériques [10]-[11]. Un prototype de capteur GMI numérique est présenté. Ses niveaux de bruit sont de $1.4 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ en zone de bruit blanc et $33 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ à 1 Hz, proches de l'état de l'art actuel [11]. Le modèle développé montre néanmoins qu'avec les technologies numériques actuellement disponibles, notamment des convertisseurs CAN, il est possible d'atteindre un niveau de $400 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ en zone de bruit blanc. Un saut technologique de la technologie (dans un futur proche ?) permet d'avoir un niveau de bruit dominé par le bruit intrinsèque de l'élément sensible et non pas par l'électronique de conditionnement [12].

REFERENCES

- [1] A. Asfour, J.-P. Yonnet, et M. Zidi, *J. Sens. Technol.*, 2(4), p. 165, 2012.
- [2] J. Nabias, A. Asfour et J.-P. Yonnet, *IEEE Trans. Mag.*, 53(11), nov., 2017
- [3] J. Nabias, A. Asfour et J.-P. Yonnet, *Sensors*, 17(3), mars., 2017
- [4] J. Nabias, A. Asfour et J.-P. Yonnet, *IEEE Trans. Mag.*, 53(4), avril., 2017
- [5] J. Nabias, Thèse de doctorat, Communauté Université Grenoble Alpes, février, 2018.
- [6] B. Dufay, Thèse de doctorat, Université de Caen, 2012.
- [7] E. Portalier, Thèse de doctorat, Université de Caen, 2016.
- [8] A. Asfour, J.-P. Yonnet, et M. Zidi, *IEEE Trans. Magn.*, 51(1), pp 1-4, 2015.
- [9] P.S. Traoré, A. Asfour, J.-P. Yonnet, *IEEE Trans. Magn.*, 53(4), 2017.
- [10] P.S. Traoré, A. Asfour, J.-P. Yonnet, C. Dolabdjian, *IEEE Sensors J.*, 17(19), pp : 6175-6184, 2017.
- [11] P.S. Traoré, A. Asfour, J.-P. Yonnet, *Sensors and Actuators Physical: A.*, 271, pp: 290-302, 2018.
- [12] P.S. Traoré, Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2017.



BUILDING THE "DOPED FIBER" FOR MAGNONS WITH SPIN TRANSFERT TORQUE TO PROPAGATING SPIN-WAVE.

N. Thiery¹, L. Vila¹, V.V. Naletov¹, G. de Loubens², M. Viret², M. Anane³, V. Cros³, and Olivier Klein¹

¹ SPINTEC, Université Grenoble Alpes, CEA, CNRS 38054 Grenoble, France

² SPEC, Université Paris Saclay, CEA, CNRS 91191 Gif-sur-Yvette, France

³ Unité Mixte de Physique CNRS, Thales, Université Paris-Saclay, 91767 Palaiseau, France

[olivier.klein\(at\)cea.fr](mailto:olivier.klein(at)cea.fr)

RÉSUMÉ

The topic of this presentation inserts itself in the emerging field of magnon spintronics [1], whose aim is to create a self-consistent nano-toolbox exploiting spinorbitronic effects (spin torque, spin-charge conversion, etc) to excite, detect and control propagating spin-waves (SWs), or their quanta magnons, with characteristic frequencies ranging from GHz to THz and wavelengths from μm to nm. The long term vision behind is to develop a novel hardware paradigm for sustainable information technology based on the transport of pure spin currents [2]. Interest in the spin current paradigm is to capitalize on a vectorial processing platform, which promises higher energy efficiency while remaining adaptive and miniaturized, and new functionalities that go beyond the potential of CMOS based electronics. The recent ascertainment that one could modulate the propagation characteristics of SWs in magnetic insulators using pure spin currents was recently demonstrated by the consortium through the discovery that the spin-orbit torques (SOT) can be efficiently used to control the magnons' lifetime [3] in Yttrium Iron Garnet (YIG) thin films. These results have generated a lot of interest world wide since the novel concept of active magnon-based media is now seen as a reachable goal, and signal amplification of high fidelity Larmor resonance signals could be foreseen for building a new generation of future microwave functions [4].

MOTS-CLEFS : *magnonic, spin Hall effect, spin-orbit torque.*

RÉFÉRENCES

- [1] V.V. Kruglyak, S.O. Demokritov, D. Grundler, "Magnonics", J. Phys. D: Appl. Phys. 43, 264001 (2010)
- [2] V.E. Demidov, S. Urazhdin, G. de Loubens, O. Klein, V. Cros, A. Anane, S.O. Demokritov, "Magnetization oscillations and waves driven by pure spin currents", Phys. Rep. 673, 1–31 (2017)
- [3] M. Evelt, V.E. Demidov, V. Bessonov, S.O. Demokritov, J.L. Prieto, M. Muñoz, J. Ben Youssef, V.V. Naletov, G. de Loubens, O. Klein, M. Collet, K. Garcia-Hernandez, P. Bortolotti, V. Cros, A. Anane, "High-efficiency control of spin-wave propagation in ultra-thin YIG by the spin-orbit torque", APL 108, 172406 (2016)

- [4] M. Evelt, V.E. Demidov, V. Bessonov, S.O. Demokritov, J.L. Prieto, M. Muñoz, J. Ben Youssef, V.V. Naletov, G. de Loubens, O. Klein, M. Collet, K. Garcia-Hernandez, P. Bortolotti, V. Cros, A. Anane, “High-efficiency control of spin-wave propagation in ultra-thin YIG by the spin-orbit torque”, APL 108, 172406 (2016)



INFLUENCE DE LA STRUCTURE DES MATERIAUX POUR LES APPLICATIONS EN SPINTRONIQUE ET MAGNONIQUE

Nicolas Biziere

Centre d'Elaboration et d'Etudes Structurales (CEMES-UPR 8011) et Université de Toulouse,
29 rue Jeanne Marvig, Toulouse

Nicolas.biziere@cemes.fr

RÉSUMÉ

Cette présentation montrera l'influence de différents types de désordre chimique sur les propriétés magnétiques statiques et dynamiques de l'alliage d'Heusler Co_2MnSi . Pour cela, nous avons utilisé l'irradiation ionique afin de modifier la structure interne du matériau. Les propriétés magnétiques en fonction du désordre sont mesurées par résonance ferromagnétique (FMR) et comparées à des calculs ab-initio de structure de bande électronique et de coefficient de relaxation.

MOTS-CLEFS : *Heusler, résonance ferromagnétique, désordre atomique.*

1. INTRODUCTION

Bien qu'étudiés depuis plus de 30 ans, les matériaux de la famille des Heusler sont l'objet d'une recherche très intense depuis le début des années 2000 dans le but d'améliorer les performances des capteurs issus de l'électronique de spins (spintronique), en particulier les vannes de spins et les jonctions tunnels.

Par exemple, les Heusler de formule générale X_2YZ avec X et Y des atomes de la famille des métaux de transitions et Z un atome de type sp (figure 1), sont métalliques et présentent théoriquement une polarisation en spin de 100%. Celle-ci s'accompagne d'un coefficient de relaxation dynamique très faible ($< 10^{-3}$) comparé aux matériaux habituellement utilisés en spintronique. Ces propriétés en font des candidats très intéressants pour des applications utilisant le principe de transfert de spins (Ex : ST-MRAM) ou des applications dans le domaine émergent de la magnonique qui nécessite de grandes longueurs d'atténuation des ondes de spins. Enfin, leur température de Curie élevée garantit une bonne stabilité thermique pour la plupart des applications actuelles comme par exemple en automobile.

Cependant, en dehors de quelques exceptions [2,3], le moment magnétique, la polarisation en spin et le coefficient de relaxation α mesurés expérimentalement sont généralement éloignés des prédictions théoriques. Ceci est particulièrement vrai pour le Co_2MnSi qui est l'un des matériaux les plus prometteurs pour les applications citées plus haut. L'une des explications possibles réside dans la présence de défauts de structure à l'échelle atomique qui modifient localement les propriétés du matériau.

2. IRRADIATION IONIQUE DU Co_2MnSi

Dans cette présentation, nous montrerons comment différents types d'échange chimique influent sur les propriétés magnétiques de l'alliage Co_2MnSi . Pour réaliser cette étude nous avons d'abord fait croître par pulvérisation cathodique des films de 40 nm d'épaisseur de Co_2MnSi sur des substrats de MgO. Ensuite le film mince est irradié avec des ions He^+ accélérés à 150 KeV pour induire des échanges chimiques entre sites cristallins. Le taux de désordre sur chaque site est

déterminé par une méthode d'analyse quantitative basée sur des mesures de diffraction X combinées à des techniques d'imagerie par microscopie électronique. Ainsi, nous montrerons que l'irradiation ionique permet de stabiliser une phase cristalline de type B2 (échange entre atomes Mn/Si) et d'induire des échanges entre atomes de Co et de Mn dans la phase L2₁.

L'évolution des propriétés magnétiques en fonction du type de désordre est mesurée par résonance ferromagnétique avec une ligne micro-ruban large bande (1-30 GHz). Les résultats expérimentaux obtenus seront comparés à des calculs réalisés avec le code SPR-KKR permettant d'obtenir la structure de bande électronique en fonction du type de désordre et d'évaluer le coefficient de relaxation de Gilbert. Si les méthodes numériques rendent bien compte qualitativement des résultats expérimentaux, le désaccord quantitatif reste important et sera discuté.

X ₂ YZ Heusler compounds																					
H																	He				
Li	Be															B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
Cs	Ba	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn					
Fr	Ra																				
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu					
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr					

Fig. 1 : Tableau périodique montrant les éléments constituant les Heusler du type X₂YZ (tiré de [1]).

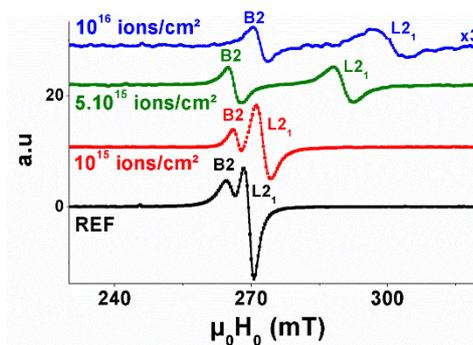


Fig. 2 : Evolution du spectre FMR à 17 GHz d'un échantillon de Co₂MnSi irradié à différentes fluences (ions/cm²).

RÉFÉRENCES

- [1] T. Graf, C. Felser, and S. S. P. Parkin, *Simple rules for the understanding of Heusler compound*, **Prog. Solid State Chem.**, 39, 1, 2011.
- [2] M. Jourdan et al, *Direct observation of half-metallicity in the Heusler compound Co₂MnSi*, **Nat. Commun.** 5, 3974, 2014.
- [3] S. Andrieu et al, *Direct evidence for minority spin gap in the Co₂MnSi Heusler compound*, **Phys. Rev. B** 93, 094417, 2016.



REDUCTION DES FLUCTUATIONS D'OFFSET EN TEMPERATURE DE MAGNETOMETRE MIG

Alexandre ESPER, Basile DUFAY, Christophe DOLABDJIAN

Groupe de recherche en Informatique, Image et Instrumentation de CAEN (GREYC),
6, Bd du maréchal Juin - 14050 CAEN Cedex, France

alexandre.esper@unicaen.fr

RÉSUMÉ

Un capteur MIG en mode off-diagonal est généralement constitué d'un fil ferromagnétique doux à base de $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ couplé à une bobine de détection. Son impédance varie en fonction du champ magnétique externe et axiale qui lui est appliqué [1]. Aux très basses fréquences, cette variation d'impédance ne dépend pas seulement du champ magnétique à détecter, mais aussi de la température. L'objectif de cette présentation est de décrire l'effet de la température sur la réponse MIG mais aussi, les bases théoriques d'une modulation permettant de s'en affranchir à l'appui de résultats expérimentaux. Une méthode semblable a été mise en œuvre sur des flux-gates orthogonaux en mode fondamental (FGO) [2, 3].

MOTS-CLEFS : *Magneto-Impédance Géante ; Fluctuations de température; Stabilité à long terme.*

1. INTRODUCTION

A ce jour, il n'y a eu que très peu d'étude de l'impact de la température sur les performances d'un magnétomètre à MIG pour des mesures à long terme [4], telles que celles réalisées en observatoire. Les fluctuations d'offset en température des capteurs MIG sont principalement induites par une variation de la conductivité du fil, cette dernière variant, généralement, de 500 à 600 $\mu\Omega/\text{K}$ en régime quasi statique. Dans une certaine mesure, il est possible de s'en affranchir. La méthode proposée consiste à exciter, simultanément, le dispositif MIG par deux courants alternatifs, respectivement, de haute et basse fréquences. En effet, cette méthode permet de moduler la sensibilité de la MIG par celle du signal de basse fréquence. L'expression de la tension apparaissant aux bornes de la bobine couplée à la MIG peut s'exprimer, pour une pulsation du courant de haute fréquence d'excitation ω_0 , par :

$$V_A(t) \approx \text{Re} \left(\left[Z(\omega_0) e^{j\varphi_1} + \frac{\partial Z(\omega_0)}{\partial B} e^{j\varphi_2} b(t) U(t) + z_n(T, t) \right] I_{ac} \cos(\omega_0 t) \right). \quad (1)$$

où $Z(\omega_0)$, $\partial Z(\omega_0)/\partial B$ sont, respectivement, l'impédance et la sensibilité intrinsèque de la MIG au point de fonctionnement en champ et en fréquence. B , $b(t)$ et $z_n(T, t)$ sont, respectivement, l'induction magnétique, le champ magnétique de basse fréquence à détecter et les fluctuations de l'impédance induites par les fluctuations de la température. Le signal carré $U(t)$ d'amplitude 1 et ayant la même pulsation que celle du courant d'excitation de basse fréquence est centré. L'utilisation

d'une double démodulation par $\text{Cos}(\omega_0 t + \varphi_2)$ et $U(t)$ permet alors d'obtenir le signal, $b(t)$, de très basse fréquence à détecter. Soit

$$V_B(\omega) \approx \frac{I_{ac}}{2} \left[\frac{\partial Z(\omega_0)}{\partial B} \right] b(t). \quad (2)$$

Sur la base du modèle classique de la réponse de MIG (cf. Eq. (1)), l'expression obtenue montre explicitement que les fluctuations d'impédance induites par celle de la température sont en théorie rejetées.

2. DE LA THEORIE A L'EXPERIENCE

L'élément constituant la MIG est un fil de 2,4 cm de longueur et de 120 μm de diamètre. Il est couplé, dans ce mode off-diagonal, à une bobine de 450 tours. La MIG est excitée, par deux courants sinusoïdaux ayant, respectivement, une fréquence 1 MHz et 10 kHz et des amplitudes de 10 mA. Ce quadripôle est complété par une double démodulation et un étage d'intégration. Ce dernier permet d'asservir en champ la réponse de l'élément sensible afin de réaliser un magnétomètre sur la même base que ceux de nos précédents travaux [5]. Les performances de ce magnétomètre ont été caractérisées dans notre chambre amagnétique. Le tableau 1 présente le niveau des performances obtenues en termes de sensibilité aux fluctuations de la température dans le cas d'une mise en œuvre classique, avec la méthode proposée et un capteur de référence. Au regard de ces premiers résultats, un gain d'un facteur 9 a été obtenu en termes de rejections des fluctuations de la température à l'aide de la méthode proposée par rapport à un magnétomètre MIG classique.

	Mag. MIG classique (simple modulation)	Mag. MIG à double excitation en courant	Flux-gate de référence
Sensibilité en champ	200 kV/T	255 kV/T	143 kV/T
Niveau de bruit blanc	5 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$	200 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$	6 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Dérive en température	20 nT/K	2,2 nT/K	3,1 nT/K

Table 1 : Comparaison des résultats expérimentaux obtenus à l'aide de magnétomètres MIG et FG dans notre chambre amagnétique.

CONCLUSION

L'étude présentée à l'aide d'un modèle simplifié permet d'expliquer la méthode de compensation des variations d'offset induites par des fluctuations de la température et mise en œuvre sur des capteurs MIG. Cette méthode s'appuie sur un double régime d'excitation en courant. Elle a été appliquée avec succès sur nos échantillons. Les performances obtenues en termes de sensibilité à la température rivalisent avec celle des meilleurs flux-gates commerciaux. Cependant, le niveau de bruit blanc a notablement évolué lors de l'utilisation de cette méthode. Des travaux sont en cours pour comprendre l'origine de ce phénomène.

RÉFÉRENCES

- [1] Knobel, M., Vázquez, M. & Kraus, L. (2003). Giant Magnetoimpedance. *Handbook of Magnetic Materials*, 15(03), 497–563.
- [2] Sasada, I. (2002). Orthogonal fluxgate mechanism operated with dc biased excitation. *Journal of Applied Physics*, 91(10 I), 7789–7791.
- [3] Butta, M., Sasada, I. & Janosek, M. (2012). Temperature dependence of offset and sensitivity in orthogonal fluxgate operated in fundamental mode. *IEEE Transaction on Magnetics*, 48(11), 4103–4106.
- [4] Dufay, B., Esper, A., Portalier, E., Dolabdjian C. & Gieraltowski, J. (2017). Long-time fluctuations of off-diagonal GMI-based magnetometers. *Sensors*, 2017 IEEE, Conference.
- [5] Dufay, B., S.Saez, S., Dolabdjian, C., Yelon, A. & Menard, D. Development of a high sensitivity Giant MagnetoImpedance magnetometer: Comparison with a commercial flux-gate, *IEEE Trans. Magn.*, 49(1), 85-88(2013)

MAGNETOMETRE A POMPAGE OPTIQUE, DU SPATIAL AU MEDICAL

M. Le Prado¹, S. Morales¹, T. Jager¹, F. Bertrand¹, W. Fourcault¹, E. Labyt¹, G. Vanzetto², A. Palacios-Laloy¹

¹ CEA, LETI, MINATEC Campus, F-38054 Grenoble, France

² Service de Cardiologie, CHU, Grenoble, France

matthieu.leprado@cea.fr

RÉSUMÉ

Nous présentons dans cet article les évolutions des magnétomètres à pompage optique de l'hélium, développés au CEA-Léti, depuis le lancement en 2013 des magnétomètres de la mission spatiale Swarm.

MOTS-CLEFS : *pompage-optique, magnétomètre, magnétoencéphalographie, magnétocardiographe*

INTRODUCTION

Le CEA-Léti développe des magnétomètres à pompage optique depuis 30 ans. Basés sur la résonance magnétique de l'hélium-4 métastable, cette technologie permet notamment de mesurer le module du champ magnétique avec une justesse de un millionième du champ magnétique terrestre.

UN ANCRAGE DANS LES APPLICATIONS SPATIALES

A l'occasion du projet spatial Swarm, six magnétomètres développés avec le CNES ont été mis en orbite en 2013. Ces magnétomètres (Fig. 1) permettent de corriger les dérives des fluxgates qui fournissent la mesure vectorielle. Avec une justesse de 50 pT et un bruit de 1 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$, ils assurent la précision des mesures magnétiques tout au long des 8 années de la mission.

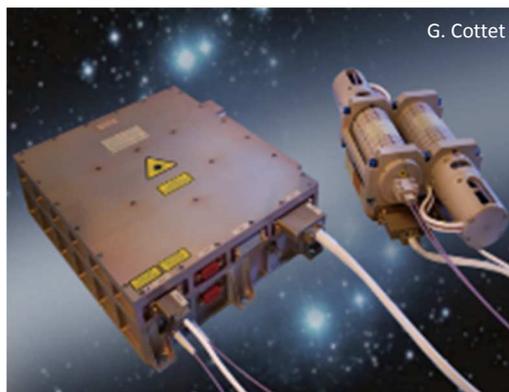


Fig. 1 : Photo du magnétomètre à pompage optique envoyé dans l'espace, et du boîtier optronique qui lui est associé

Nous travaillons sur de futures générations de magnétomètres spatiaux miniaturisés pour être embarqués sur des constellations de nano-satellites. Cet effort de miniaturisation ouvre également la

possibilité d'adresser un autre domaine en pleine expansion : celui de l'imagerie magnétique du cœur et du cerveau.

VERS L'IMAGERIE MEDICALE

Depuis 3 ans, l'imagerie magnétique du cerveau a été validée pour le diagnostic de l'épilepsie aux USA. Or, les imageurs actuels emploient des SQUID refroidis à 4°K et le coût, voisin de 3M€, est un frein à leur diffusion. Pour lever ces deux verrous, plusieurs équipes dans le monde développent des magnétomètres à pompage optique. C'est notamment le cas du CEA-Léti dont la technologie Hélium-4 présente l'atout d'opérer à température ambiante.

Par rapport aux magnétomètres conçus pour le projet spatial, le volume des prototypes de ces magnétomètres médicaux (Fig. 2) a été réduit d'un facteur 12 (20 cm³) tout en améliorant le bruit d'un facteur 15 (70 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$).



Fig. 2 : Photo du magnétomètre miniature à pompage optique

Des essais préliminaires ont été conduits en imagerie magnétique du cœur, puis du cerveau. Bien que le niveau de bruit des capteurs reste supérieur à celui des SQUIDs, le magnétomètre à pompage optique peut être appliqué directement sur la peau, sans isolation thermique, ce qui aboutit à un rapport signal à bruit comparable à celui des SQUIDs.

CONCLUSION

La route jusqu'à la réalisation d'un imageur magnétique complet est encore longue. Nous avons toutefois démontré qu'il est possible d'appliquer des magnétomètres à pompage optique de l'hélium à l'imagerie médicale. Cette technologie pourrait conduire à une baisse des coûts des magnéto-encéphalographes d'un facteur 5 à 10 et démocratiser l'accès à ces imageurs pour le diagnostic de maladies neurologiques à fort impact sociétal (Alzheimer, Parkinson...).

RÉFÉRENCES

- [1] J-M. Léger, F. Bertrand, T. Jager, M. Le Prado, I. Fratter, J-C. Lalaurie, " SWARM absolute scalar and vector magnetometer based on helium 4 optical pumping", Eurosensors XXIII, du 6 au 9 septembre 2009, Lausanne.
- [2] S. Morales, M.C. Corsi, W. Fourcault, F. Bertrand, G. Cauffet, C. Gobbo, F. Alcouffe, F. Lenouvel, M. Le Prado, F. Berger, G. Vanzetto and E. Labyt, "Magnetocardiography measurements with 4He vector optically pumped magnetometers at room temperature, Phys Med Biol" 2017 Aug 21;62(18):7267-727



BOBINES HOMOGÈNES POUR LA RÉSONANCE MAGNÉTIQUE NUCLÉAIRE PORTABLE (RMN) APPLIQUÉE À L'AGROÉCOLOGIE

Rahima Sidiboulouar^{1,2}, Pauline de Pellegars⁴, Eric Nativel³, Eric Alibert¹, Sébastien Rousset¹, Christophe Goze-Bac¹, Michel Zanca¹, Frédéric Gatineau², Alexandre Grondin⁵, Jean-Luc Verdeil², Alexie Techer^{1,5}, Khallil El Hamdaoui¹ et Christophe Coillot¹

¹ *Laboratoire Charles Coulomb, Université de Montpellier, CNRS, 34095 MONTPELLIER, France*

² *UMR AGAP, CIRAD, Université de Montpellier, France*

³ *Institut d'Electronique des Systèmes, Université de Montpellier, France*

⁴ *RS2D, Mundolsheim, France*

⁵ *IRD, MONTPELLIER, France*

christophe.coillot@umontpellier.fr

RÉSUMÉ

Un instrument de quantification de l'eau dans les végétaux par RMN dans différents contextes agronomiques (stress hydrique en agriculture conventionnelle et croissance des végétaux en contexte agroécologique) est au coeur du travail. Cet instrument, dit « **RMN portable bas champ** », nécessite de générer un champ magnétique stable et homogène pour la polarisation des spins et des sondes RMN performantes (en termes de Rapport Signal à Bruit (RSB)) et homogènes. De nouvelles configurations de bobines exploitant une méthode de Suppression des Harmoniques Spatiales (SHS) sont présentées offrant une solution de choix pour la **RMN portable bas champ**.

MOTS-CLEFS : *agroécologie ; RMN ; bobines homogènes ; harmoniques spatiales.*

1. DE L'AGRONOMIE À L'AGROÉCOLOGIE

La prégnance des dégradations de l'environnement doit nous amener à reconsidérer nos modes de production et de consommation. L'agriculture conventionnelle est à la fois cause de ces dégradations du fait de sa contribution importante aux émissions de gaz à effet de serre (près de 20 % [1]) et en subit d'ores et déjà les conséquences à travers des épisodes de stress hydriques qui pèsent sur la productivité des parcelles agricoles. A ce titre, la transition agroécologique, s'inspirant des synergies à l'oeuvre dans la nature, est porteuse de solutions. Il est donc important, de développer de nouveaux instruments pour le suivi du comportement des plantes *in naturae*

2. RMN PORTABLE ET ENJEUX

Les spectromètres RMN de laboratoire, difficilement transportables, exploitent des bobines supraconductrices B0 de l'ordre de plusieurs Teslas pour une polarisation efficace des spins (puisque

$M \propto B_0$). Pourtant des travaux précurseurs ont montré la faisabilité de la RMN bas-champ ($B_0 = 4.5 \text{ mT}$) au moyen de bobines Helmholtz [2] ouvrant la voie à une RMN portable. Celle-ci nécessite toutefois des bobines générant un champ magnétique B_0 stable et homogène, doit présenter un échauffement réduit pour ne pas perturber les végétaux. Par ailleurs, les bobines RF utilisées pour exciter et détecter les spins à la fréquence de Larmor ($\omega_0 = \gamma B_0$, γ étant le rapport gyromagnétique de l'espèce nucléaire mesurée) doivent aussi produire un champ magnétique (dit B_1) homogène tout en maximisant le RSB.

3. BOBINES HOMOGENES PAR LA METHODE SHS

La distribution cosinusoidale de la densité de courant en géométrie cylindrique ou sphérique de révolution est connue pour favoriser l'obtention de bobines homogènes [3]. Ce principe est exploité par un déphasage spatio-temporel dans les sondes IRM de type Birdcage [3]. L'approche proposée consiste à représenter la position des conducteurs par un Développement en Série de Fourier. La suppression des harmoniques conduisant alors à des configurations de bobines homogènes [4], cf. Fig. 1. Celles-ci sont implémentées dans une RMN portable [4] utilisée dans les serres du CIRAD (cf. Fig 2.) .

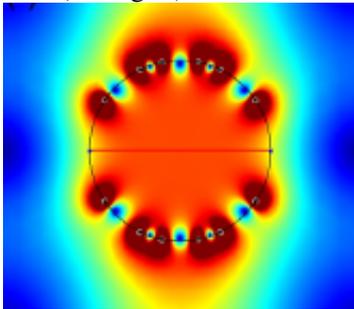


Fig. 1 : Bobine homogène SHS



Fig.2 : RMN portable dans les serres

CONCLUSION

Les bobines SHS présentent des performances bien supérieures aux bobines conventionnelles et peuvent également être utiles pour concevoir des bobines d'étalonnage.

RÉFÉRENCES

- [1] Pellerin S. et al., Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 92 p, (2013).
- [2] Asfour A.: Low-Field NMR/MRI Systems Using LabVIEW and Advanced Data-Acquisition Techniques, Folea Silviu, Practical Applications and Solutions Using LabVIEW TM Software, Intech Edition, 17–40, 978-953-307-650-8, 2011.
- [3] Hayes C. E., et al., M.: An Efficient Highly Homogeneous Radiofrequency Coil for Whole-Body NMR Imaging at 1.5 T, J. Magn. Reson., 622–628, 1985.
- [4] Sidi-Boulenouar, et al.: Homogenous static magnetic field coils dedicated to portable nuclear magnetic resonance for agronomic studies, J. Sens. Sens. Syst., 7, 227-234, <https://doi.org/10.5194/jsss-7-227-2018>, 2018.

SPINTRONICS FOR WIRELESS SENSOR NETWORK COMMUNICATION

U. Ebels

Univ. Grenoble Alpes, CEA-INAC, CNRS, SPINTEC, G-INP, Grenoble, France

Ursula.ebels@cea.fr

RÉSUMÉ

The spin polarized transport properties of magnetic tunnel junction devices provide functionality for microwave applications, whereby the conversion of a DC current into an RF voltage can be used for microwave signal generation and the conversion of an RF current into a DC voltage for microwave signal detection. These rf functions can bring multifunctional, compact, low power, low cost, CMOS compatible solutions to wireless communication systems used for smart sensors and sensor networks. In this presentation an overview will be given on the realization of rf spintronic devices and their corresponding rf performances for signal generation, modulation and detection.

MOTS-CLEFS : *Spintronics, microwave magnetization dynamics, DC to RF conversion, RF to DC conversion*

1. SPINTRONICS CONCEPTS AND RF FUNCTIONS

The two important spintronic concepts are (i) the magneto-resistance MR and (ii) the spin transfer torque STT [1]. The *magneto-resistance* is used to read out the magnetization state of the free layer of the magnetic tunnel junction device. It depends on the relative orientation of the free layer and pinned layer magnetization. The *spin transfer torque STT effect*, is used to act on the magnetization state. It is given by the transfer of spin angular momentum from conduction electrons to the local magnetization. By appropriate choice of the sign and amplitude of the spin polarized DC current, the spin transfer torque compensates the intrinsic losses, inducing steady state oscillations of the magnetization at constant precession amplitude. These steady state magnetization oscillations are converted into a voltage signal via the magneto-resistance. An important property of these DC-to-RF converters, is that the frequency depends on the precession amplitude that is set by the DC current. Increase of the DC current will therefore lead to a change in frequency. Hence the nanoscale magneto-resistive element represents a compact frequency tunable rf signal generator when injecting a DC current, see Fig. 1. When adding an additional rf signal source to the DC current this DC-to-RF converter can either be injection locked to an external source [2] or its frequency and amplitude can be modulated (source frequency below the STO frequency) [3]. Combination of both (injection locking and modulation) provides potential for phase shift keying. A fourth function is the inverse of signal generation: when injecting only an rf current, then the device acts as an RF-to-DC converter through the rectification effect, where one can distinguish passive detection (zero DC current) and active detection (non-zero DC current), see Fig. 1 [4].

Besides multifunctionality, another advantage of spintronic devices is that they can cover a very large range of frequencies. In nanopillar devices the base frequency is defined by the magnetic configuration of the free layer: (i) for thick layers (~ 5 -10nm) the magnetic state is a vortex configuration suitable for signal emission and detection in the range of 0.1-2GHz, (ii) for intermediate thickness (2-3nm) and very thin layers (1-2nm) the magnetic state is uniform with in-plane respectively out-of-plane magnetization. Both uniform states are suitable for emission and detection in the range of 2-20 GHz.

In this presentation, efforts will be summarized towards realization of spintronics devices, their DC-to-RF and RF-to-DC conversion properties as well as first implementation in rf circuits [5, 6, 7].

The achieved performances provide potential for use in wireless sensor network communication schemes, that will be presented and were possible benchmarked.

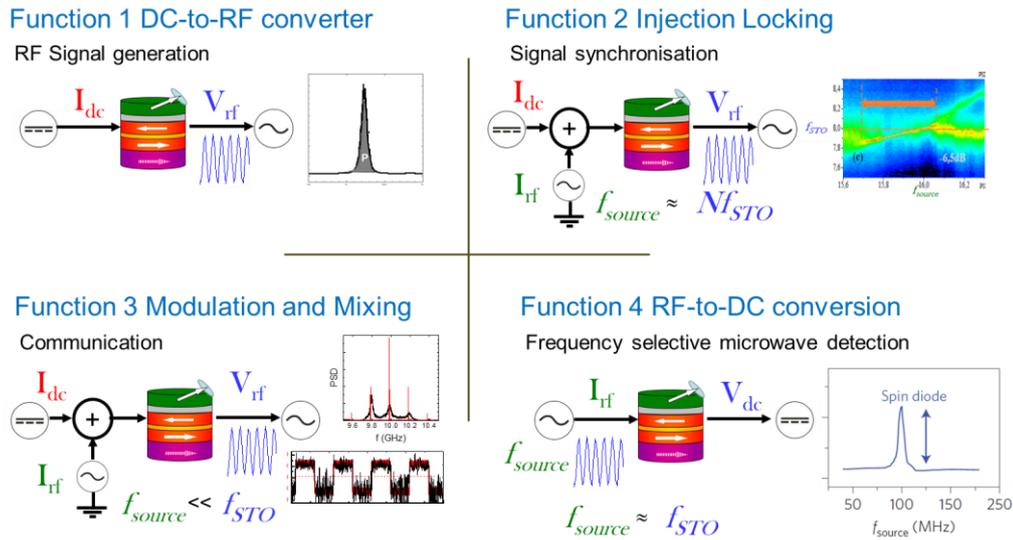


Fig. 1 Four different RF functions of spintronic devices.

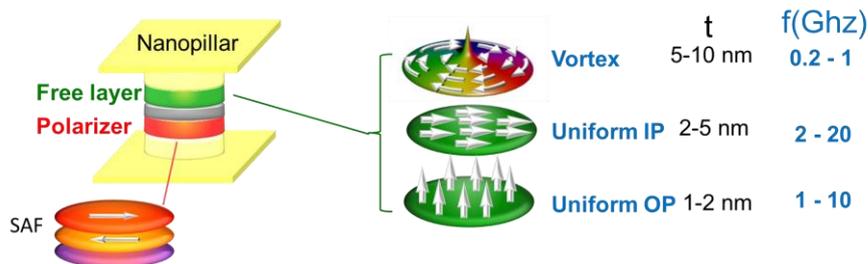


Fig. 2 Different device configurations and their frequency range

[1] IEEE Proceedings DOI:10.1109/ JPROC.2016.2554518.
 [2] B. Georges et al., Phys. Rev. Lett. **101**, 017201 (2008) ; M. Quinsat et al. Appl. Phys. Lett.. **98**, 182503 (2011)
 [3] M. Quinsat et al. Appl. Phys. Lett. **105**, 152401 (2014) ; A. Ruiz-Calafora et al., Appl. Phys. Lett. **111**, 082401 (2017)
 [4] A.S. Jenkins, et al., Nature Nanotech **11**, 360-364 (2016)
 [5] M. Kreißig, F. Ellinger, et al., AIP Advances **7**, 056653 (2016)
 [6] S. Menshawy et al., AIP Advances **7**, 056608 (2016)
 [7] R. Ma et al., 13th Conference PRIME, Giardini Naxos, 2017,
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7974092&isnumber=7974086>

Acknowledgement: The results reported here were obtained in a collaborative effort within the FP7 project MOSAIC [www.fp7-Mosaic.eu] and beyond including different laboratories SPINTEC-UGA/CEA/CNRS (F); CEA-LETI (F); INL, Braga (Pt); TUD (G); UMPPhy CNRS/THALES (F); THALES TRT (F);



LES CAPTEURS MAGNETO(ELASTO)ELECTRIQUES EN MODE NON LINEAIRE

May Tia YANG, Marc LAM CHOK SING, Christophe DOLABDJIAN

Groupe de recherche en Informatique, Image et Instrumentation de CAEN (GREYC),
6, Bd du maréchal Juin - 14050 CAEN Cedex, France

christophe.dolabdjian@unicaen.fr

RÉSUMÉ

Au regard de l'évolution des propriétés de certains matériaux, un regain d'intérêt a été porté ces dernières années sur le développement de capteurs magnétiques de type magnétoélectrique ou magnéto(élasto)électrique. Ils offrent, en effet, des caractéristiques très intéressantes en termes de niveau de bruit équivalent en champ et de consommation. Plus récemment, nous avons étudié les performances de ces dispositifs en mode non linéaire afin d'étendre, notamment, sa mesure à celle du champ statique/quasi statique. L'objet de cette présentation est donc d'en donner les performances et de décrire les principales limitations. En appui de ces résultats expérimentaux, les niveaux théoriques attendus tenant compte dans une certaine mesure de la chaîne de détection seront présentés.

MOTS-CLEFS : *magnéto(élasto)électrique ; bruit ; modélisation.*

1. INTRODUCTION

Les premiers effets magnétoélectriques ont été découverts en 1888 par W. Röntgen. Dans les années 2000, des matériaux émergents et de nouvelles méthodes d'assemblage ont permis de réaliser des capteurs magnéto(élasto)électriques à très hautes sensibilités [1]. Ils ont été étudiés et caractérisés par quelques groupes au niveau international. Cependant, ces capteurs très performants n'ont pas la capacité de détecter des champs statiques et ont un bruit intrinsèque excédentaire aux basses fréquences. Afin de pallier à cette difficulté, il a été envisagé de mettre en œuvre ces capteurs en mode non linéaire à l'aide de techniques judicieuses de modulation. Elles permettent la mesure du champ DC [2] et d'accroître en théorie leur performance en termes de niveau de bruit équivalent en champ.

2. LES CAPTEURS MAGNETO(ELASTO)ELECTRIQUES

Les capteurs magnéto(élasto)électriques étudiés [1] et présentés sont principalement constitués d'une structure sandwich. Cet assemblage permet de coupler judicieusement un matériau ferromagnétique à une structure piézoélectrique. La déformation du premier, soumis à un champ magnétique, induit concomitamment une déformation du second, laissant apparaître aux faces de ce dernier des charges. Elles sont généralement collectées par un simple amplificateur. En mode non linéaire, le principe reste identique. Seule, une excitation électrique ou magnétique à la fréquence de résonance du dispositif, permettant d'engendrer une réponse non linéaire du capteur est, de plus, appliquée. La réponse du dispositif est alors observée selon deux modes possibles de fonctionnement. Soit par une modulation d'amplitude (AM) ou une modulation de phase (PM). En mode AM, l'excitation susmentionnée est appliquée à une fréquence constante. En mode FM, la fréquence d'excitation se veut suivre celle de la fréquence de résonance du dispositif.

Les bases des équations physiques mises en jeu dans ces deux modes sont semblables. Cependant, ces derniers diffèrent quelque peu en termes de sensibilité et de bruit. Nous présenterons les bases théoriques des modèles [2] et les performances attendues. Expérimentalement, les meilleurs résultats obtenus avoisinent la dizaine de pT/Hz en zone de bruit blanc et les quelques dizaines de pT/Hz à 1 Hz. L'état des résultats actuels sera présenté.

	Mesure		Modélisation	
	Sensibilité	Niveau de bruit blanc	Sensibilité	Niveau de bruit blanc
<i>AM-E/E</i>	2.5 kV/T	150 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$	2.5 kV/T	13 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$
<i>AM-M/E</i>	14 kV/T	10 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$	14 kV/T	\ll pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$
<i>PM-E/E</i>	260 V/T	6 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$	33 V/T	5 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$
<i>PM-M/E</i>	19.4 kV/T	515 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$	19.4 kV/T	150 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$

Table 1 : Présentation et comparaison de résultats expérimentaux et théoriques

3. LES MODES DE CONDITIONNEMENT

Un exemple de conditionnement en mode PM est présenté en figure 1. Il met en œuvre une PLL et un circuit judicieux de bouclage en fréquence permettant d'exciter le capteur tout en l'asservissant à la fréquence de résonance de l'élément sensible en champ. Les grands principes des chaînes de mesure mise en œuvre seront présentés.

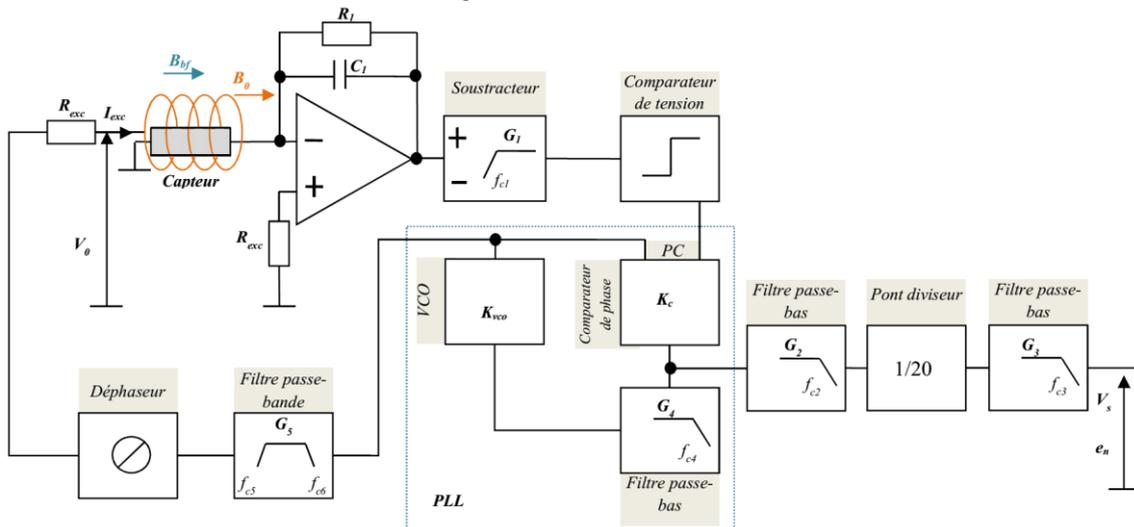


Fig. 1 : Synoptique de la chaîne de conditionnement en mode PM.

CONCLUSION

Ces travaux de recherche ont permis d'évaluer les performances de ces dispositifs en mode non linéaire. Ces dernières mêmes si elles sont tout à fait honorables n'atteignent pas encore les performances théoriques escomptées. Néanmoins, des travaux sont en cours. Ils doivent permettre d'accroître notamment les fréquences de résonance et donc la sensibilité de ces dispositifs et in fine réduire leur niveau de bruit équivalent en champ aux basses fréquences.

RÉFÉRENCES

- [1] X.Zhuang, C.Cordier, S.Saez, M.Lam Chok Sing, C.Dolabdjian, J. Gao, J.Li, D.Viehland, "Theoretical analysis of the intrinsic magnetic noise spectral density of magnetostrictive piezoelectric laminated composite", Appl. Phys Letters, 109, 124512(2011)
- [2] X.Zhuang, M.Lam, C.Dolabdjian, Y.Yang, P.Finkel, J.Li, D.Viehland, "Mechanical noise limit of a strain coupled magneto(elasto)electric sensor operating under a magnetic or an electric field modulation", IEEE Sensors Journal, 15(3), 1575-1587(2015)



DEVELOPPEMENT ET PREUVES DE CONCEPTS D'UN MAGNETOMETRE AMR POUR LA MESURE DES COUPLES DE TRANSFERT DE SPIN AUX INTERFACES NiFe/Pt.

Augustin Jouy^{1,2,3}, Malik Mansour¹, Henri Jaffres², Sophie Collin²

¹ Laboratoire de Physique des Plasmas, CNRS, Ecole Polytechnique, UPMC, Univ. Paris VI, Univ. Paris-Sud, Observatoire de Paris, Université Paris-Saclay, Sorbonne Universités, PSL Research University, 91128 Palaiseau, France

² Unité mixte de physique, CNRS, Thales, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 91767 PALAISEAU Cedex, France

³ Sysnav, 57 Rue de Montigny, 27200 Vernon, France

augustin.jouy@lpp.polytechnique.fr

RÉSUMÉ

Nous présentons les résultats des mesures de torques de spin-orbite statique (SOT) sur des bicouches NiFe/Pt réalisées sur un principe de « spin-torque-bridge »: Le spin-torque bridge se présente comme un dispositif ultrasensible au design inspiré des magnétomètres AMR à barberpole à pont de Wheatstone conçu et développé au laboratoire. Nous estimons ainsi, par des mesures de déséquilibre du pont, les deux couples de transfert opérant sur ces interfaces en fonction des densités de courant appliquées.

MOTS-CLEFS : *spin-orbite-torque ; pont de Wheatstone ; spin-Hall-effect.*

1. INTRODUCTION

Les applications des dispositifs spintroniques de type mémoire magnétiques (MRAM) ou les oscillateurs à transfert de spin requièrent un contrôle de l'aimantation des éléments magnétiques nanométriques par le biais d'un champ magnétique ou d'un courant polarisé en spin [1]. De tels courants de spin sont générés par l'aimantation d'un milieu magnétique (cas du spin-transfer-torque STT) ou par l'apparition d'un courant de moment angulaire créé par l'effet Hall de spin de métaux de transition lourds (spin-orbit-torque SOT) [2].

2. PRESENTATION DU SPI-TORQUE-BRIDGE

L'idée du spin-torque-bridge est d'utiliser un schéma de pont (circuiterie de barberpole) particulier qui permet de mesurer le déséquilibre du pont par l'action des couples de transfert de spin agissant différemment sur les bras du pont dans le régime quasi-statique. Ceci constituera un design particulier sensible respectivement aux deux composantes (field-like et Slonczewski ou damping-like):

- ❖ **Field-like** agissant comme un champ magnétique effectif quasi-statique
- ❖ **Slonczewski** agissant comme un cross axe aux autres composantes

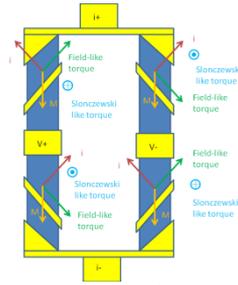


Fig. 1 : Champs effectifs dans le spin-torque-bridge

3. MESURE DE SOT DANS LES TRICOUCHES NiFe/Pt/AuW

Afin d'exploiter les symétries des spin-transfert-torque, nous effectuons, en angle donné, quatre mesures différentes contenant chacune un balayage en champ tournant. Pour deux des mesures la densité de courant j injecté est opposée et inversée et dans deux des mesures le champ magnétique extérieur H appliqué est inversé. On relève alors quatre courbes $R(\theta)$: $j+H+$, $j-H-$, $j+H-$ et $j-H+$. Un Algorithme de fit est alors utilisé pour extraire de ces courbes les champs effectifs du SOT

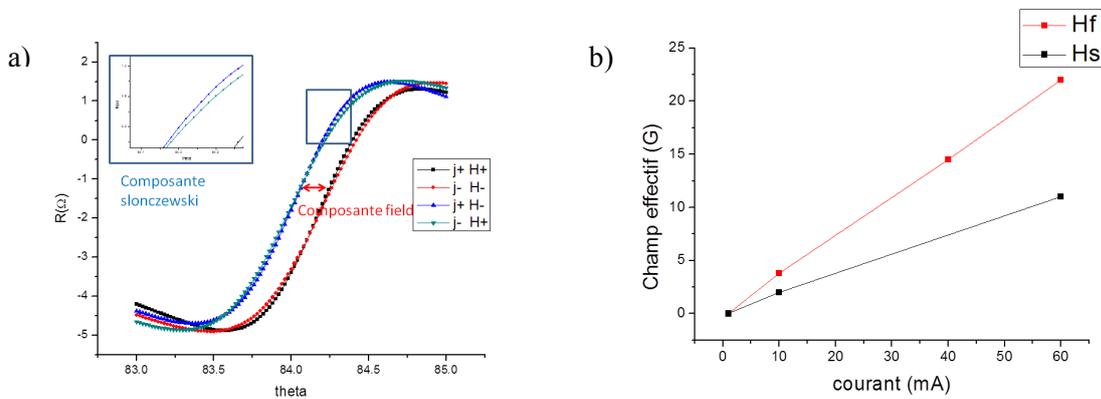


Fig. 3 : a) Mise en évidence des composantes Field et Slonczewski b) Champs effectifs (composantes champ et Slonczewski) extraits pour différents courants injectés dans une multicouche NiFe(10)/Pt(6)/AuW(3)

CONCLUSION

Selon ces configuration de mesure, le spin-torque-bridge à permis de mesurer avec précision les champs effectifs des torques de spin-orbite produites par effet Hall de spin dans des couches minces dans les bicouches de type NiFe/Pt ou les éléments lourds sont joués par le Pt ([3]) et par l'Au :W ([4]) Ces résultats expérimentaux couplés à un travail de modélisation des comportements électromagnétiques dans les structures composites alliant matériaux magnétiques et matériaux à fort couplage spin-orbite sont d'un grand intérêt pour la communauté scientifique de la spintronique.

REFERENCES

- [1] F. Hellman *et al*, *Interface-induced phenomena in magnetism*, **Reviews of Modern Physics**, (2017).
- [2] J. Sinova, S. O. Valenzuela, J. Wunderlich, C. H. Back, T. Jungwirth, *Spin Hall effects*, **Reviews of Modern Physics**, (2015).
- [3] J.-C. Rojas-Sánchez, N. Reyren, P. Laczkowski, W. Savero, J.-P. Attané, C. Deranlot, M. Jamet, J.-M. George, L. Vila, H. Jaffers, *Spin Pumping and inverse Spin Hall Effect in Platinum: The Essential Role of Spin-Memory Loss at Metallic Interfaces*, **Physical Review Letters**, (2014).
- [2] P. Laczkowski *et al*. *Experimental evidences of a large extrinsic spin hall effect in AuW alloy*. **Applied Physics Letter**, (2014).



MAGNETOMETRIE A MICROSONDES HALL : PROGRES RECENTS ET APPLICATIONS NOUVELLES

Marcin Konczykowski¹ et Vincent Mosser²

¹Laboratoire des Solides Irradiés, École Polytechnique, CNRS, CEA, Université Paris-Saclay,
91128 Palaiseau, France

²ITRON France, ITC, 1 rue de Paris, 92190 Meudon, France

marcin.konczykowski@polytechnique.edu

RÉSUMÉ

Les dispositifs métrologiques basés sur les capteurs Hall à gaz bidimensionnel d'électrons confinés dans un puits quantiques (Quantum Well Hall Sensors) sont utilisés dans plusieurs domaines de la physique. Chaque application requiert l'optimisation des structures et des paramètres. Nous allons présenter le progrès dans la conception et la réalisation de ces dispositifs et l'illustrer avec des exemples d'applications.

MOTS-CLEFS : *capteurs Hall; micromagnétométrie; gradiomètres*

1. INTRODUCTION

Un domaine de choix dans lequel l'utilisation des microsondes de Hall a permis plusieurs percées décisives est la supraconductivité. La mesure locale de l'induction magnétique à la surface de l'échantillon a permis la détection de phénomènes révélés par une variation infime de flux magnétique, tels que les transitions de phase de réseau de vortex [1, 2]. Cependant les autres applications des microcapteurs de Hall dans les mesures magnétiques permettent la réalisation d'expériences impossibles par d'autres techniques. Dans cet exposé, nous allons présenter une liste (non exhaustive) d'axes de recherche explorés par cette technique, en mettant l'accent sur les propriétés critiques des capteurs mises en jeu.

2. DOMAINES D'APPLICATION NOUVELLES DES MICROCAPTEURS

Dans le domaine des supraconducteurs, l'exploration des phénomènes à température très basse (subkelvin) a connu un développement spectaculaire. Cependant, deux obstacles doivent être contournés. Le premier est l'émergence de la non-linéarité des caractéristiques résistance Hall - induction magnétique, conséquence de l'effet Hall quantique. Une procédure expérimentale spécifique permet d'utiliser les capteurs Hall pour la détection des sauts d'aimantation et **l'identification de transitions de phases sous champ de plusieurs teslas** [3]. La stabilité des paramètres des capteurs lors de cycles en température est la condition indispensable pour ce type d'opération. Le facteur critique pour l'utilisation des capteurs de Hall à faible champ est la dissipation de chaleur. L'extension des **mesures de champ critique inférieur H_{c1} jusqu'à 7 mK** a été réalisée récemment [4]. Partenaires : Centro Atomico Bariloche, Argentine, Institute of Low Temperatures, Wrocław, Pologne.

Une autre application classique des capteurs de Hall dans le domaine des **supraconducteurs est la mesure du courant critique**. Des gradiomètres composés de deux ou plusieurs capteurs sont utilisés dans ces mesures en mode Zero Field Cooled - Field Cooled (ZFC-FC) [5]. La reproduc-

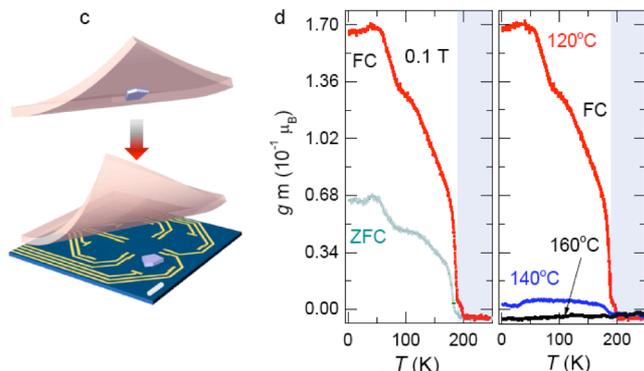


Figure 1. Gauche, procès d'exfoliation-déposition sur capteur Hall. Droite, signal magnétique différentiel enregistré pour une couche amorphe Sb_2Te_3 en mode ZFC-FC et en mode FC lors de recuit progressif in-situ.

moments magnétiques localisés en refroidissant vers 200K [7]. Partenaire: CUNY New York.

La séparation de l'aimantation d'origine itinérante de spin-orbitale d'un antiferromagnétique Mn_3Sn est un nouveau projet réalisé à l'aide de microcapteurs de Hall [8]. Les mesures de topographie d'induction magnétique sont effectuées avec un champ magnétique dans le plan. Les paramètres critiques sont: opération des capteurs QWHS à haute température, et sélectivité directionnelle permettant la détection de la composante orthogonale, sur fond de très fort champ dans le plan. Partenaire : Tokyo University.

REMERCIEMENTS

Le développement des capteurs QWHS qui ont permis ces nouveaux résultats est supporté par les projets ANR "DiSSCo-Hall", "Micromag" et Labex PALM "Super2FM".

RÉFÉRENCES

- [1] E. Zeldov, D. Majer, M.Konczykowski, V.B. Geshkenbein, V.M.Vinokur, and H. Shtrikman, "Thermodynamic observation of first-order lattice-melting transition in $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ " Nature 375, 373 (1995)
- [2] M. I. Dolz, Y. Fasano, N. R. Cejas Bolecek, H. Pastoriza, V. Mosser, M. Li, and M. Konczykowski, "Size-Induced Depression of First-Order Transition Lines and Entropy Jump in Extremely Layered Nanocrystalline Vortex Matter", Phys. Rev. Lett. 115, 137003 (2015) cover page
- [3] R. Okazaki et al. "High-field superconducting transition of $CeCoIn_5$ studied by local magnetic induction measurements", Phys. Rev. B 76, 224529 (2007)
- [4] J. Juraszek et. al., "Anomalous enhancement of the lower critical field deep in superconducting state of $LaRu_4As_{12}$ " Physica B 536 813–815 (2018)
- [5] M. Konczykowski et al. "Vortex creep and critical current densities in superconducting $(Ba,K)Fe_2As_2$ single crystals" Phys. Rev. B 86, 024515 (2012)
- [6] V. Mosser, N. Matringe and Y. Haddab, "A spinning current circuit for Hall measurements down to the nanotesla range" IEEE Trans. Instrum. Meas. 66, No. 4, 637-650 (2017)
- [7] Shihua Zhao et al. "Non-magnetic disorder threshold of the topological state in Sb_2Te_3 thin film" APS March Meeting 2018
- [8] Masaaki Shimozawa, et al "Anomalous magnetization of the chiral antiferromagnet Mn_3Sn ", idem

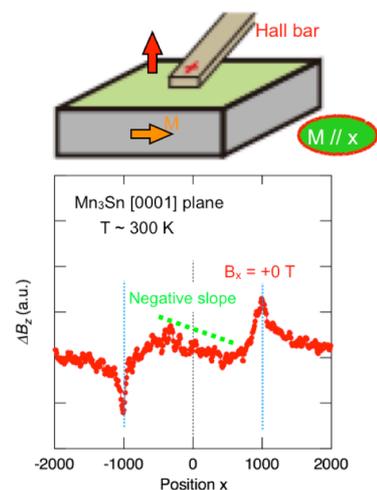


Figure 2. Schéma de capteur Hall en mode balayage. Champ magnétique appliqué dans le plan, et induction magnétique mesurée en direction perpendiculaire. Pente négative $\partial B_z / \partial x$ dans le centre : contribution de l'aimantation itinérante orbitale. Pics sur les bords : l'aimantation locale d'origine spin-orbitale.

tibilité des paramètres et leur stabilité pendant les cycles sont essentielles.

La détection de nouveaux états magnétiques (à mémoire de spin) dans les isolants topologiques désordonnés est une nouvelle découverte réalisée avec l'aide des capteurs de Hall. La fabrication de sondes dédiées avec une surface parfaitement plane pour y permettre l'adhésion par forces de van der Waals d'une couche exfoliée de Sb_2Te_3 a été nécessaire pour ce projet. Les mesures différentielles sur deux sondes de Hall en mode « spinning current » [6] (inversion de contacts) ont permis de détecter l'émergence des



CAPTEURS DE CHAMPS MAGNETIQUES DE TYPE MAGNONIQUE EVALUATION DES PERFORMANCES DE DETECTIONS

Olivier HAAS, Basile DUFAY, Sébastien SAEZ, Christophe DOLABDJIAN

Laboratoire GREYC UMR 6072, Normandie Univ, UNICAEN, ENSICAEN, CNRS
6 Boulevard Maréchal Juin, 14050 Caen cedex

sebastien.saez@unicaen.fr

RÉSUMÉ

Depuis quelques années, la magnonique, l'étude des phénomènes de propagation des ondes de spin dans les matériaux magnétiques, s'est développée conjointement à l'avènement de la spintronique et des structures magnétiques nanostructurées. Quelques publications récentes présentent l'apport de ces dispositifs pour la réalisation de capteurs magnétiques en appui de l'évolution du paramètre de transmission S_{21} à quelques GHz, et ce, en fonction du champ magnétique.

Cette communication présente, d'une part nos premiers résultats obtenus dans le cadre de la mise en œuvre d'un dispositif YIG et d'autre part une estimation des performances de détections attendues.

MOTS-CLEFS : *capteur ; magnétomètre ; magnonique ; résonance ferromagnétique*

1. INTRODUCTION

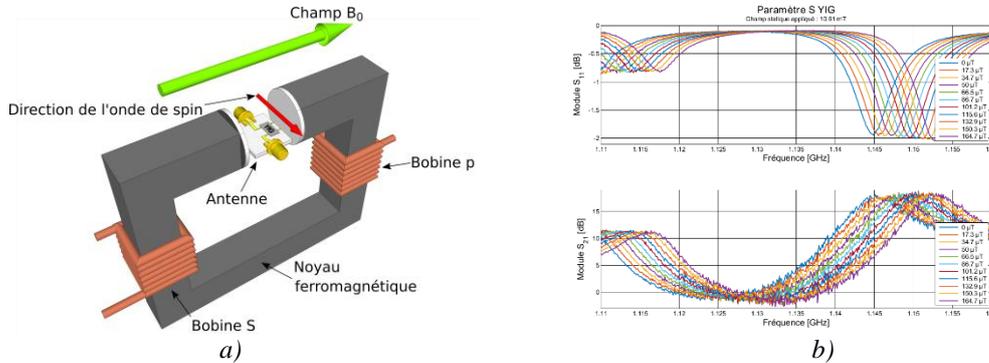
Des travaux récents [1,2] ont exploré le potentiel des cristaux magnoniques dans la réalisation de capteurs magnétiques à haute sensibilité. Le principe utilisé est basé sur la propagation des ondes de spin dans un matériau magnonique, souvent réalisé à l'aide d'un film mince de type YIG. Pour un champ magnétique statique B_0 suffisamment intense, les moments magnétiques du matériau sont alignés. L'excitation du matériau par une onde électromagnétique à haute fréquence conduit à une précession cohérente de ces derniers et se traduit, notamment par un phénomène de résonance dont la fréquence varie en fonction du champ magnétique B_0 . Il s'agit de la résonance ferro-magnétique (FMR). Lorsque les dimensions du matériau augmentent, un déphasage peut apparaître entre ces moments traduisant la propagation d'une onde de spin. Comme dans le cas des filtres à ondes acoustiques de surface (SAW), une modification structurelle du matériau conduit à privilégier la transmission des ondes de spin à certaines fréquences. Ainsi, des mesures du coefficient de transmission direct S_{21} du dispositif montrent un déplacement significatif du pic d'absorption aux fréquences de résonance en fonction du champ magnétique statique B_0 appliqué [1,2].

Notre objectif à moyen terme est d'évaluer les performances d'un magnétomètre réalisé à partir de ce principe. Pour cela, il convient de ne pas se limiter à la seule prise en compte de la transduction, mais de considérer l'ensemble du système (élément sensible et l'électronique de conditionnement). Nos premières études ont porté sur le film homogène. Elles nous serviront de référence afin d'évaluer l'apport de la modification structurelle du YIG et sont présentées ici.

2. MISE EN ŒUVRE ET RESULTATS

Le cristal magnonique utilisé est un film mince de type YIG déposé sur un substrat GGG. Sa taille est de 10 mm \times 5 mm. Il a une épaisseur de 19,4 μ m. Ce film est placé sur une structure en

cuiivre plane et son support d'époxy. La configuration est conçue de manière à privilégier le mode de propagation MSSW (*Magnetostatic Surface Spin Wave*) (cf. figure 1a). Les paramètres S_{ij} sont mesurés à l'aide d'un analyseur de réseau (Rohde & Schwarz ZNC3 - 9kHz-3GHz). La figure 1b présente l'effet du champ magnétique statique sur les paramètres S_{11} et S_{21} du dispositif, soit la différence entre la mesure réalisée au champ B_0 et celle en champ nul. Comme attendu, les pics observés à ladite résonance varient linéairement en fonction du champ magnétique B_0 , de quelques dizaines de GHz/T.





MAGNÉTOMÉTRIE SQUID EN MILIEU BAS BRUIT POUR LES GÉOSCIENCES

Elisabeth Pozzo di Borgo¹, Charles Danquigny¹, Jean-Baptiste Decitre², Alain Cavailhou² & Pascal Febvre³

¹EMMAH, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, INRA, F-84000, Avignon, France

²LSBB, UMR 3538 La Grande Combe, F-84000 Rustrel

³IMEP-LAHC, Université Savoie Mont Blanc, F-73376 Le Bourget du Lac

elisabeth.pozzo-di-borgo@univ-avignon.fr

RÉSUMÉ

Depuis 2007, le Laboratoire Souterrain à Bas Bruit de Rustrel-Pays d'Apt héberge le système [SQUID]², un magnétomètre 3 axes ultrasensible positionné au sein d'un massif karstique. Les mesures effectuées au cours de plusieurs années de fonctionnement continu suggèrent que les signaux magnétiques enregistrés sont étroitement liés à la quantité d'eau présente dans le massif. Nous présentons ici les principaux résultats qui étayent l'incidence de la charge hydrique et le potentiel des mesures magnétiques dans l'étude de cet aquifère, dans le contexte du changement climatique et des enjeux sociétaux de la distribution d'eau potable.

MOTS-CLEFS : SQUID ; géomagnétisme ; séismes ; charge hydrique

1. CONTEXTE

Le champ magnétique terrestre est la somme de plusieurs contributions naturelles et artificielles dont la valeur varie selon l'évolution des sources qui les génèrent. L'observation des variations très fines du champ géomagnétique, qui représentent entre 0,02 et 2% de sa valeur moyenne, est un objectif essentiel à la description complète de la Terre et son environnement. Le développement des magnétomètres à SQUIDS permet d'accéder à de telles mesures sous réserve de s'affranchir du bruit électromagnétique lié aux activités anthropiques. C'est le cas du système [SQUID]², magnétomètre à base de dispositifs quantiques supraconducteurs (SQUIDS), situé dans l'enceinte blindée du Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (LSBB).

2. - LE LSBB ET LE SYSTÈME [SQUID]²

Le LSBB est un site d'observation interdisciplinaire (<http://lsbb.eu/>) où s'exerce notamment une surveillance permanente de l'environnement sur le plan sismique, magnétique et hydrogéologique. Il abrite entre autres une antenne sismique large-bande 3D déployée sur les 4 km de galeries et un magnétomètre supraconducteur 3 axes à SQUID's à basse température critique. Les galeries sont par ailleurs creusées au sein d'un massif karstique à travers lequel l'eau de pluie s'infiltré. On y trouve ainsi plusieurs points d'écoulements, dont certains pérennes, qui sont suivis sur le plan hydrochimique et hydrodynamique.

Moyen expérimental permanent du LSBB, le système [SQUID]² est l'association d'un instrument ultrasensible dans un environnement sans équivalent. Les caractéristiques de la chambre blindée qui l'abrite, combinées à son implantation sous plus de 500 mètres de roche karstifiée, en

¹ [SQUID]² : Superconducting Quantum Interference Device in a Shielding Qualified for Ionosphere Detection

font un filtre passe-bas au-delà de 40 Hz. Du fait de l'écrantage du bruit extérieur, le niveau de bruit résiduel se situe autour de $2 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ (c.à.d. proche du bruit intrinsèque de l'appareil). Ces conditions ont permis d'identifier différentes sources de perturbations liées aux orages magnétiques ou aux contributions de différentes sources ionosphériques connues, mais aussi à l'activité sismique, la détection s'effectuant par le biais d'un couplage Terre solide/Ionosphère [1],[2][3].

3. INFLUENCE DE LA TENEUR EN EAU DU MASSIF KARSTIQUE

L'analyse croisée des données magnétiques et sismiques montre l'existence d'une corrélation dite sismo-hydro-magnétique, variation du champ magnétique local synchrone avec le passage des ondes issues de forts séismes. Cette corrélation est attribuée à un couplage électrocinétique généré dans les eaux d'infiltration lors du passage des ondes [4]. Plus récemment des variations magnétiques de l'ordre du picotesla, liées à la présence d'écoulements, ont été mises en évidence par gradiométrie entre deux magnétomètres à SQUIDS distants de 700 m [5].

L'environnement de l'instrument lui-même est difficile à appréhender du fait de la complexité topographique du site : le karst est milieu poreux fracturé anisotrope évolutif comportant failles et nappes perchées et dont la charge hydrique peut fortement varier. Afin d'en estimer l'influence, une analyse de la transmission des signaux magnétiques à travers le massif a été menée. Elle consiste à évaluer la fonction de transfert entre l'extérieur et l'intérieur du massif. Ne disposant pas de capteur magnétique extérieur, le signal de référence a été obtenu par combinaison linéaire des signaux de 3 observatoires nationaux formant un triangle autour de la position du système [SQUID]². La comparaison systématique entre le signal ainsi reconstitué et celui du magnétomètre du site montre que le facteur de transmission du signal évolue au cours du temps, c'est-à-dire avec le cycle hydrologique. Il semble ainsi possible de suivre le front d'infiltration d'un épisode pluvieux au sein du massif. Ces résultats préliminaires doivent être confirmés par une étude globale couvrant plusieurs cycles. Il est effectivement probable que le cumul des précipitations soit un paramètre clef du coefficient de transfert du massif.

4. CONCLUSION

Ce travail expérimental est encore en développement et les premiers résultats montrent que la fonction de transfert caractéristique de la réponse magnétique peut être exploitée comme un indicateur complémentaire de l'état d'hydratation d'un massif karstique. Il s'agit à terme d'accroître la compréhension et d'élargir le champ d'application des méthodes électromagnétiques pour la prospection hydrogéophysique.

RÉFÉRENCES

- [1] Waysand G., J. Marfaing, E. Pozzo di Borgo, R. Blancon, M. Pyée, M. Yedlin, P. Barroy, M. Auguste, D. Boyer, A. Cavaillou, J. Poupény, and C. Sudre *Earth-ionosphere couplings, magnetic storms, seismic precursors and TLEs: Results and prospects of the [SQUID]² system in the low-noise underground laboratory of Rustrel-Pays d'Apt* – **CR Physique** 12, p. 192-202, doi:[10.1016/j.crhy.2011.02.008](https://doi.org/10.1016/j.crhy.2011.02.008), (2011)
- [2] Pozzo di Borgo E., J. Marfaing & G. Waysand *Minimal global magnetic millihertz fluctuation level determined from mid latitude underground observations*, **European Physics Letters** 97, 4 49001 doi:[10.1209/0295-5075/97/49001](https://doi.org/10.1209/0295-5075/97/49001), (2012)
- [3] Marfaing, J., Pozzo di Borgo, E., Waysand, G., Cavaillou, A., and Parrot, M, *Global observation of 24 November 2006 Pc5 pulsations by single mid-latitude underground [SQUID]² system*, **Ann. Geophys.**, 29, pp 1977-1984, doi:[10.5194/angeo-29-1977-2011](https://doi.org/10.5194/angeo-29-1977-2011), (2011).
- [4] Gaffet S., Guglielmi Y., Virieux J., Waysand G., Chwala A., Stolz R., Emblanch C., Auguste M., Boyer D. and Cavaillou A. (2003), *Simultaneous seismic and magnetic measurements in the Low-Noise Underground Laboratory (LSBB) of Rustrel, France, during the 2001 January 26 Indian earthquake*. **Geophys. J. Int.** 155, pp 981–990, (2003).
- [5] Henry S., Pozzo di Borgo E. & Cavaillou A. *Tracking geomagnetic fluctuations to picotesla accuracy using two superconducting quantum interference device vector magnetometers*, **Rev. Sci. Instrum.** 84, 024501,doi:[10.1063/1.4790715](https://doi.org/10.1063/1.4790715), (2013).



E-CUBE: A SELF-POWERED WIRELESS SENSOR

Olivier Coutelou¹, Vianney Poiron²

¹ *Schneider-Electric, Industry BU, Technology & Innovation*
38HP4, 5, avenue Raymond Chanas 38320 EYBENS, France

² GULPLUG
32, rue des Berges, 38000 Grenoble, France

olivier.coutelou@schneider-electric.com

vianney.poiron@gulplug.com

RÉSUMÉ

L'objet de cet article est de présenter le fonctionnement du capteur E-Cube qui est sans fil, autonome en énergie et qui permet d'estimer l'énergie électrique consommée par une charge industrielle. D'autre part, sera exposé la genèse de cette innovation chez Schneider-Electric, puis sa mise en application chez des clients, grâce à la start-up gulplug, conformément à la méthodologie nommée « design thinking ».

MOTS-CLEFS : *capteur sans fils ; auto-énergisation ; efficacité énergétique ; design thinking*

1. LE PROBLEME CLIENT DANS LES USINES

Le projet collaboratif nommé PLESMO et piloté par Schneider-electric a permis d'identifier l'existence de talons d'énergie dans les usines. Ces talons correspondent aux énergies électriques consommées par les machines et par les infrastructures alors que les usines ne sont pas en phase de production. Ces talons d'énergie peuvent bien souvent correspondre à 50% (voire 70%) des factures énergétiques. Les charges consommatrices sont, la plupart du temps, non identifiées, non suivies, ignorées car nos usines sont faites pour produire de gros volumes, efficacement, avec un souci de qualité, dans un délai donné et il n'y a pas de véritable attention sur ce qui peut sembler être un détail.

2. LA REPONSE : UNE SOLUTION DE MONITORING DESTINEE AUX MACHINES EXISTANTES

Sur un site industriel, il est très difficile d'identifier les charges consommatrices durant les phases de non production. L'idée est de proposer aux clients une solution très simple à déployer, connectée au cloud et qui permet d'identifier facilement les charges consommatrices afin de pouvoir éventuellement les éteindre.

Dans ce système connecté, l'E-Cube est le capteur « clé de voute » qui permet de collecter facilement les énergies électriques consommées, et ceci avec une très bonne granulométrie car les capteurs sont montés au plus près des charges et non pas dans des grosses armoires électriques dans lesquelles, l'identification des consommateurs n'est pas aisée.

L'E-Cube est alimenté par le champ magnétique généré par le courant qui alimente la charge. Il n'y a donc pas de pile et donc pas de soucis de maintenance. Le capteur est toujours opérationnel. Le capteur compte les coulombs qui transitent vers la charge. Des hypothèses sont prises concernant la tension et le déphasage courant/tension afin de transformer les coulombs mesurés en énergie électrique. Tous les x mWh, un message radio contenant le compteur d'énergie est envoyé vers le récepteur.

3. VALIDATION DU MARCHE ET DU BUSINESS

Le pilote de PLESMO, Xavier Pain (actuellement CEO de gulplug) avait identifié le capteur E-Cube qui jusque-là ne trouvait pas son application dans les différents marchés adressés par Schneider-electric. Dans le cadre du projet collaboratif, des prototypes et des premiers tests en clientèle prometteurs ont été réalisés. En fin de projet, la propriété intellectuelle de l'E-cube a été confiée à la start-up gulplug afin de poursuivre et d'aller beaucoup plus loin dans l'exploration et afin d'apprendre si un business autour de la solution imaginée pouvait être rentable. Plusieurs cas d'application nous montrent l'intérêt de la solution.

4. UN PROCESSUS D'INNOVATION ALLANT DE L'IDEE DE L'E-CUBE A LA CREATION DE GULPLUG

Il nous a semblé important de partager avec les chercheurs académiques la mise en application sur un cas concret et réel, de la démarche « design thinking ». Le processus suivi allant de l'idée discutée entre deux collègues sur un coin de table, à la vente de produits et services par une véritable petite entreprise qui est en train de grandir.

SUPER – QIF PROJECT: TOWARD LOW-FIELD AND ULTRA-LOW-FIELD MRI

**Aimé Labbé¹, Eric Thiaudière¹, Philippe Massot¹, Jean-Michel Franconi¹, Christian Ulysse²,
Yves Lemaître³, Denis Créte³, Bruno Marcilhac³, Julien Kermorvant⁴ and Elodie Parzy⁴**

¹*Centre de Résonance Magnétique des Systèmes Biologiques, UMR 5536 CNRS, Université de
Bordeaux, 146 rue Léo Saignat, 33076 Bordeaux Cedex*

²*Laboratoire de Photonique et Nanostructures, UPR 20, CNRS, Route de Nozay, 91460, Marcoussis*

³*THALES Research and Technology, Unité Mixte de Recherche, CNRS, Thales, Université Paris-
Sud, Université Paris-Saclay, 91767, Palaiseau, France*

⁴*THALES SIX GTS France, 4 Avenue des Louvresses, 92230 Gennevilliers*

aime.labbe@rmsb.u-bordeaux2.fr

ABSTRACT

The Super-QIF project aims at Magnetic Resonance signal detection with unparalleled sensitivity. Sensors are high temperature Superconducting Quantum Interference Filters (SQIFs), a promising class of low-noise magnetometers. Ultra-sensitive detection with SQIFs will be evaluated for low-field (0.2 T) and ultra-low-field (50 μ T) MRI. The project is multidisciplinary and combines classical and superconducting electronics, cryogenics, vacuum engineering, automation and MRI. We designed and built a first demonstrator, the Super-QIF system, that will soon be integrated into an MRI magnet.

KEYWORDS: *SQIF; low-field MRI.*

1. INTRODUCTION

Low-field (< 0.5 T, LF) and ultra-low-field (< 1 mT, ULF) MRI are still unconventional and little-used techniques. In comparison with conventional high-field MRI, they offer images with better contrasts and less artifacts, and they are less expensive. Unfortunately, they suffer from one major drawback: using classical Faraday antennas, the signal-to-noise ratio of the LF MRI experiment is poor, even abysmal for ULF MRI. To circumvent this issue, the use of Superconducting Quantum Interference Device, or SQUID, a superconducting loop containing Josephson Junctions (JJ), a small non-superconducting gap in the superconducting loop, has become widespread [1]. The SQUID response is Φ_0 -periodic, with $\Phi_0 \sim 2$ fWb being the magnetic flux quantum, frequency independent (until a few GHz), low-noise and with high sensitivity ($\sim \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$). But the Φ_0 -periodic response prevent the use of SQUID as absolute magnetometer, and complex digital electronic is usually required to pinpoint the device at an operating point. Superconducting Quantum Interference Filters, or SQIFs, are arrays of SQUIDs and do not display this periodicity [2]. The constructive signals from each SQUID at zero-input flux lead to a highly-peaked and symmetric transfer function with enhanced slopes, or gain. They can therefore be used for absolute magnetometry or act as large band receivers. As part of the Super-QIF project, we propose using high-temperature SQIF technology (~ 60 K) for LF and ULF MRI, which has not been done before. To that end, we developed new designs of SQIF antennas. We constructed an MRI compatible vacuum cryostat: The Super-QIF system. We also present some of the challenges awaiting us for the integration of SQIF into the MRI experiment.

2. SQIF DESIGN AND RESPONSE

We studied several geometries of SQIF antennas. The source material is an alumina wafer with a 150 nm thick $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ layer, a high temperature superconductor, in-situ covered by a 100 nm thick gold layer. The devices are made with the ion-irradiation technique, strongly inspired from the

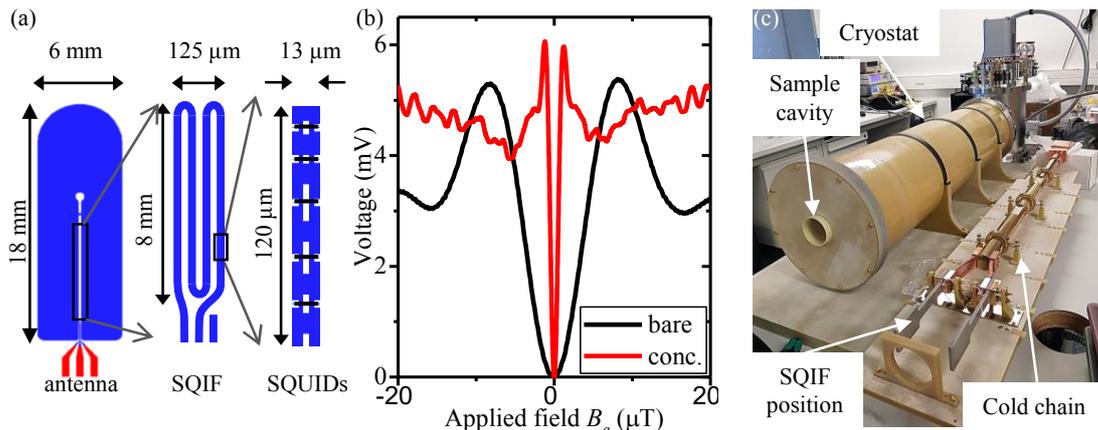


Fig. 1 : (a) SQIF antenna design with flux concentrator. Black straight lines in JJ array are the JJs. (b) SQIF responses for the bare SQIF (black line) and the SQIF with flux concentrator (red line). Responses are vertically and horizontally shifted to the origin to allow comparison. (c) Super-QIF system. The cold chain will be put inside the vacuum cryostat, with the SQIF antenna next to the sample cavity.

semiconductor industry. Our antennas usually contain three components, a SQIF circuit in 1D (series) or 2D (parallel) configuration, a flux concentrator device, and electrical contacts. In Fig. 1.a, we present a SQIF antenna design: 1500 SQUIDs in a series configuration laid out as a meander with four branches. Two antennas were built, one with a flux concentrator shaped as a “U” around the SQIF, and one without. The corresponding SQIF responses were measured and are compared in Fig. 1.b. The bare SQIF has a gain of 1.0 kV/T, whereas the flux concentrator-enhanced SQIF has slopes of 8.4 kV/T. We are currently studying 2D-SQIFs with flux concentrators.

3. SUPER-SQIF SYSTEM

The conception of the Super-QIF system was a crucial part of this project. Displayed in Fig. 1.c, it allows for cryogenic working temperature in vacuum. It is MRI compatible, using as little metal as possible in the imagery area (sample cavity) and only non-magnetic materials such as epoxy resin and copper. The system is currently under characterization and optimization. It showed good vacuum performances and cryogenic tests are under way.

4. SQIF INTEGRATION INTO MRI ENVIRONMENT

What comes next is the integration of system into the magnetic environment. The main difficulty comes from inserting a SQIF, an absolute magnetometer that works only at $0 \pm 0.5 \mu\text{T}$, into a 0.2 T magnet. Even though the SQIF orientation has been chosen to be parallel to the magnetic field, the slightest position error will result in unusable antennas. To circumvent this issue, we designed a system control apparatus. A custom made Super-QIF table will allow the Super-QIF system to enter the magnet smoothly, pushed by a linear actuator, while a feedback loop measures and opposes any magnetic field entering the SQIF.

CONCLUSION

We introduced the Super-QIF project, which proposes using SQIF antennas for LF and ULF MRI. To enhance further the sensitivity of SQIF, we explore new geometries of superconducting circuits. We built an entire experimental set-up, with the Super-QIF system and a control system. This ensures that our SQIF antennas will work under optimal conditions.

REFERENCES

- [1] Y. S. Greenberg, “Application of superconducting quantum interference devices to nuclear magnetic resonance,” *Rev. Mod. Phys.*, vol. 70, no. 1, pp. 175–222, Jan. 1998.
- [2] S. Ouanani-Sakhri, “Étude de réseaux de jonctions Josephson à haute température critique,” Université Paris-Saclay, 2015.

Wireless Sensor Network: Long-range Radio Coverage Prediction for Complex Terrain Areas

Tuyen Phong Truong^{1,2}, Hiep Xuan Huynh², Bernard Pottier¹

¹Lab-STICC UMR CNRS 6285, France

²Can Tho University, Vietnam

1. Problems and Objectives

Communication coverage refers to a zone consisting of places where radio signals can reach. To optimize ranges two major issues need to be concerned with. These issues are radio waves locked by obstacles and propagation loss proportioning with the distance due to the conditions of the transmission environment. In smooth terrain areas, without significant changes of topographic surface, it can be considered as near line-of-sight for radio transmission in which distance for communicating data could be reached up to hundreds of kilometers over the Earth plane. Otherwise, in complex terrain areas, terrain heterogeneity causes serious impact on the quality of radio links, especially for low power and long-range communication networks. In theory, an ideal coverage is usually indicated by a circle with a certain radius considering as maximum communication range. Due to the complexity of geography and obstacles such as building, vegetation, etc. the actual coverages in the real world are seldom as uniform dishes. Consequently, unpredictable gaps need to be solved when deploying sensor nodes to establish robust radio links in wireless sensor network considering geographic topology. From these reasons, we proposed a CAD tool flow [1] which helps to predict rapidly the coverage of a LoRa emitter based on cellular automata and massive parallel execution.

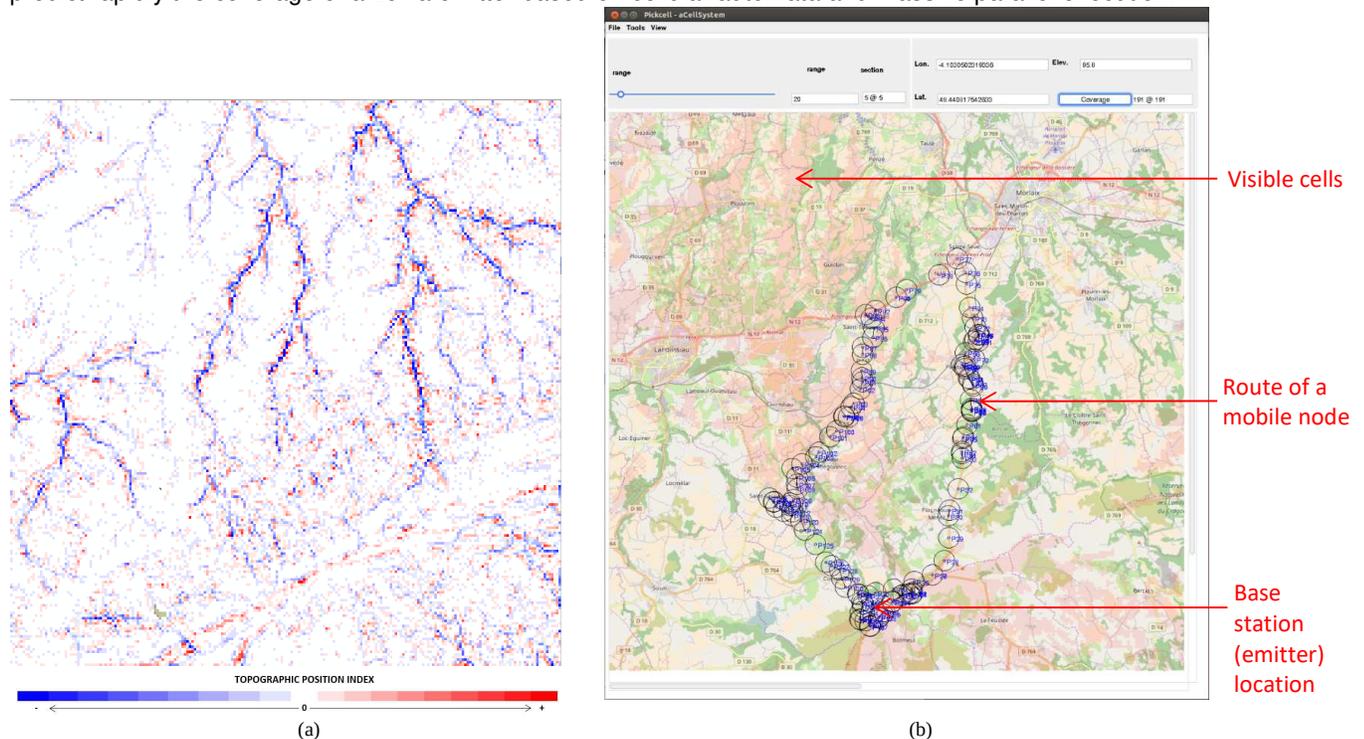


Figure 1: (a) The topographic complexity of Roc'h Trevezel area is quantified using Topographic Position Index (TPI) [2]. Red lines represent higher points, difficult to overcome and blue lines are for lower points, difficult to reach. The white zones refer to flat zones almost without remarkable obstacles. This grid is 262 x 226 cells, representing an area about 50 x 40 kilometers.

(b) The base station (emitter) is located on top of the mountain (latitude: 48.4051306, longitude: -3.9077762, elevation: 345 m). Another RECoco board is placed on a car (receiver) traveling around the area with many hills, valleys, and big trees. From simulation results, places (cells) are able to receive the radio signal highlighted in pink color. Blue circles show points where the receiver got messages successfully in our real measurement.

Topographic Position Index (TPI) [2] is the amount of difference between the elevation value of a center cell and the mean value of its neighbor cells. These indices for Roc'h Trevezel (see Figure 1a) was obtained by executing parallel computation on DEM (Digital elevation model) data based on cellular technology. The positive value of TPI refers that the cell is higher while a negative one means it is lower than its adjacent neighbors. It is important that TPI values are essentially very scale-dependent. For grid data produced by NetGen [1], the scale is determined associated with a neighborhood of regular grid cells. With each physical simulations, it should consider intensively which scale is most appreciate with both phenomenon and landscape being analyzed. TPI is usually used to classify the landscape into landform category and define boundaries with respect to its relative position with surroundings. This is a critical reference in order to deploy efficiently wide area coverage networks for environmental sensing, especially in complex topographic areas. Our experimental measurement comparison was carried out to evaluate the reliability of coverage prediction based on cellular approach.

2. System Preparation for experimental measurements

Our aim is to establish a radio link between a fixed node (base station) and a mobile node moving around for collecting the strength of radio signal corresponding to geology location. For sake of simplicity, we use Arduino board as a microcontroller. We designed and implemented a board namely RECoco (Radio Estimation Coverage). RECoco can be stacked on Arduino board including a GPS module and a LoRa transceiver. GPS module used to obtain the geolocation of the node from the satellite. LoRa transceiver [3] is a radio circuitry for sending and receiving data in long distance.

To collect the data from a mobile node moving around, at the base station (BS) (fixed node) both of nodes are equipped RECoco. At the mobile node, the information consisting of local time, latitude, longitude, altitude from GPS is packed and then sent to the BS via LoRa radio channel [3]. A particular map browser and control called Quickmap [1] running on PC at BS side are employed to establish the connection between PC and RECoco board through USB port for receiving messages from the mobile node. The received message is unpackaged to retrieve data and then display position of the node on the map in real time. Received signal strength indicator (RSSI) captured at LoRa circuitry is used to evaluate the quality of radio connection [4]. These data are also logged in files or insert into the database at data center directly through 3G/4G connection available on PC.

3. Results

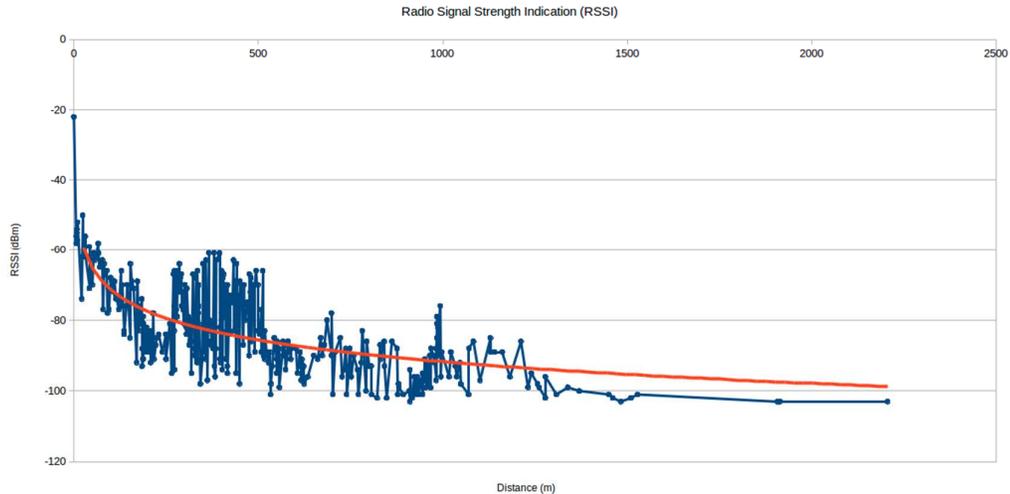


Figure 2: RSSI values decay as a negative exponential function of distance. Obstacles cause serious impact on quality of radio waves.

We did several experiments with various terrains and obtained the distances of links in the range from 3 km to 10 km as shown in Table 1. Accuracy comparisons in various terrains at Brest city, France are shown in column % Error.

Area name	Description	Resolution (pixels)	Actual size (m)	Range (km)	Matched	Mismatched	% Error
Albert 1 ^{er}	Urban area	5 x 5	24	3	64	13	20.21%
Plougastel	River and its banks	5 x 5	96	9	129	4	3.10%
Roc'h Trevezel	Mountain area	5 x 5	191	11	45	8	17.78%

Table 1: Three areas with different complexity terrains. *Resolution* and *Actual size* columns give the size in pixels associated with actual size in meters of each cell in regular grid data. The maximum communication in each experiment is shown by column *Range*. *Matched* and *Mismatched* column provides a number of visible points which are right matched and mismatched respectively between simulation results and obtained values in real measurements.

4. Conclusion

The experiments validate that Light of Sight (LoS) algorithm [1] is more reliable for smooth terrain area. It goes down in proportion to terrain turbulence. Even though most of our measurements in a variety of topographies, the accuracy of simulation results is approximately 80 percent. Further details could be found in my report on this site <http://wsn.univ-brest.fr/tuyen>

It can be concluded that communication in LoRa network is strongly depended on transmission environment in reality. Hence, the actual coverage prediction must be taken topographic complexity into account as a critical factor.

We believe that our proposed tool flow is a promising approach to deploy rapidly long-range communication network for monitoring environment, especially in complex topographic areas.

References

1. Tuyen Phong Truong, Hiep Xuan Huynh, Bernard Pottier. 2016. Monitoring Of Environment: A High Performance Method for Radio Coverage Exploration. IEEE Radio 2016, Hotel Le Récif, Saint-Gilles Les Bains Réunion Island, 10 – 13 October 2016. Publisher: IEEE
2. Jenness, J. Topographic Position Index (TPI) v. 1.2 2006. p. 42
3. Semtech Corporation. Sx1276/77/78/79 -137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver. Rev. 4 422 - March 2015. Technical Report August 2016.
4. Theodore S. Rappaport: Wireless Communications: Principles and Practice (2nd Edition). Hall PTR, Technology & Engineering (1996)



Quantum Well Hall Sensors

Vincent Mosser, Marcin Konczykowski
IIRON, Technology Center
92130 Meudon, France

Depuis le début des années 2000, Itron a utilisé plus de 100 millions de sondes de Hall pour la métrologie du courant dans les compteurs électriques des marchés de norme ANSI. Ces sondes de Hall, dont la technologie est propriétaire, permettent la réalisation de compteurs électriques de classe ANSI 0.2 (justesse 0.2% de la mesure sur une dynamique de courant de 100 mA à 200 A)

En parallèle, de nombreux *runs* d'engineering et de R&D ont permis la fabrication à partir de la même technologie de différents types de microsondes de Hall destinées à diverses applications. Ces microsondes croix de Hall, des gradiomètres, des barrettes de Hall sont utilisées dans de nombreux laboratoires de recherche dans le monde. Elles ont permis l'obtention de résultats dont beaucoup auraient été inatteignables par toute autre méthode (voir l'exposé de Marcin Konczykowski).

Ces sondes sont réalisées à partir d'hétérostructures dites "pseudomorphiques", où un canal de conduction 2D en $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ dans lequel l' InGaAs est sous contrainte, est inséré dans un ensemble de couches de $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$ et de GaAs isolantes. Expérimentalement ces sondes présentent une excellente linéarité sur plus de 8 décades de champ magnétique (100 nT-30T), stabilité temporelle, stabilité dans un grand domaine de température (10 mK- 473 K), résolution spatiale jusqu'au micron.

L'ensemble des qualités métrologiques des sondes découle directement du choix du matériau, ainsi que de la maturité et maîtrise des technologies d'épitaxie et de lithographie utilisées.

La qualité du matériau permet de tirer parfaitement profit de la technique de modulation par "spinning current" (spinning current modulation technique, SCMT), qui permet l'élimination dynamique de tous les signaux parasites de la chaîne de mesure.

L'offset et le bruit basse fréquence de la sonde de Hall, l'offset et le bruit basse fréquence du préamplificateur, l'ensemble des contributions des interconnexions entre la sonde de Hall et son électronique de traitement (effet thermoélectriques et perturbations électromagnétiques) peuvent ainsi être tous éliminés.

Les récentes avancées concernent d'une part la composition des couches épitaxiales (-contenu en indium jusqu'à 36%, améliorant encore la mobilité, - couche de barrière amincie, permettant de diminuer la taille des contacts ohmiques, et donc d'améliorer la résolution spatiale).

Elles concernent également les applications, notamment la métrologie des champs forts ($B \geq 1\text{T}$) en sus des applications détaillées dans la présentation de Marcin Konczykowski.



REMOTE AND GROUND SENSING METHODOLOGIES. A CASE STUDY FOR LOW EARTH ORBITERS

Chi-Nguyen Lam¹, My-Thu-Thao Truong¹, Bernard Pottier¹

¹ LabSTICC, Université de Bretagne Occidentale, Brest, France

chinguyen.lam@univ-brest.fr, My-Thu-Thao.Truong@univ-brest.fr, pottier@univ-brest.fr

ABSTRACT

Climate changes bring the necessity to understand appearing phenomena of different kinds: environment evolutions, physical or biological modifications. Starting from ground sensing frameworks (cite), we propose to associate ground data analysis with remote sensing from LEO Nano satellite in the context of low energy systems.

KEYWORDS :CELLULAR SYSTEMS, NANO SATELLITE, MULTI PARAMETER KNOWLEDGE SYNTHESIS.

1. INTRODUCTION

Sensor systems oriented to environment observation will help in following environment changes. It is admitted that climate impacts on several aspects of life, such as biodiversity, species evolutions, vegetation, water and littoral systems. Delta of the Mekong offers lot of problems of this kind: erosion, increase of sea level, water salinity, pollutions, insect swarm threats on cultures. The group in France and Vietnam developed a methodology based on cellular partitioning and geography, to structure observation and simulation of physical phenomena [1].

Completing ground observation, it becomes attractive to consider aerial observation and decision making. LEO technology offers short distances communications, meaning low energy budget, large footprint coverage over ground sensor systems, at the cost of short delays for exchanges. By coupling sky and ground observation we can expect to answer several questions:

1. Interpolation between sensing points and effective geometry of phenomena
2. Relation between sky remote sensing and ground sensor information
3. Large scale observation system managed from satellite geo-localized data
4. Control of remote operations and distribution of analysis results.

2. PHYSICAL PROPERTIES LEAD METHODOLOGY

Phenomena can be described as processes grouping several aspects with several measurable impacts. Cell division help to maintain a geographic status with localization, and set of parameters. This representation produces large data systems that evolve in the time, and offers serious chances to predict future effects.

The phenomena themselves are a set of physical properties represented by cell state variables. States and state evolutions lead to observable characteristics. As examples:

- Water salinity comes from ocean invading low elevation regions, it can be measured by some sensor distribution that produce a distributed sampling. Aerial observation will reveal a particular image spectrum.

- Pollutions can be detected as a result of a chemical water or gas sensor measure, or ground image observation, Aerial observation will allow to detect polluted zones and follow pollution expansion. Algal blooms can be controlled in a simulation way.

3. INFORMATION AND OBSERVATION SYSTEM DESIGN

Managing information needs is the structural abstraction of cellular systems holding ground and sky measures, plus results of interpolation computations. This information must also maintain the notion of time, possibly with large history. Sensor inter-connection design is done at medium scale using long range radio systems. Interaction between sensor fields and satellite is controlled using a network model and one or several LEO visits [2] . These interactions will lead to on-the-fly estimations in the satellite and its clients, with projection of control on the ground system. The nature of estimation is probabilistic [3]: the state of cell(i,j) at time t+1 will be calculated by all of its neighbor cells $n_k(i,j)$ at time t with the probabilistic $p(k)$.

$$s(i, j, t + 1) = \sum_{k=1}^m s(n_k(i, j), t) \cdot p(k)$$

With

$$\sum_{k=1}^m p(k) = 1$$

CONCLUSION

In this paper, we propose the methodology of cellular system to simulate the physical phenomena with data collected from remote and ground sensing. Previous work from LabSTICC offer a framework for geographic data management and system coordination.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is developed as a contribution to the Nano satellite Micas project involving people from LabSTICC, UMR 6285, IUEM, UMR 6358, Can Tho university from Mekong Delta, Vietnam. Micas is funded by Region Bretagne. Thanks are due to Mrs. S.Niculescu, Mr.Hiep Xuan Huynh, Mr. V. Rodin, and Mr. B.Pottier.

REFERENCES

- [1] B. H. Lam, "Sensors and wireless networks for monitoring climate and biology in a tropical region of intensive agriculture methods, tools and applications to the case of the Mekong Delta of Vietnam," Brest university (UBO), Brest, 2018.
- [2] P.-Y. Lucas, L. H.-V. Nguyen, P.-T. Truong and B. Pottier, "Wireless Sensor Networks and Satellite Simulation," in *Wireless and Satellite Systems*, Springer, 2015, pp. 185-198.
- [3] N. Boccara and H. Fuks, "Modeling diffusion of innovations with probabilistic cellular automata" in *Cellular Automata : A parallel model*, Lyon, Springer Science+Business Media Dordrecht, 1999, pp. 263-276.



VOIES ALTERNATIVES POUR LES CAPTEURS DE CHAMP MAGNETIQUE SPINTRONIQUES

Claire Baraduc¹, Luis Angel Cubero Montealegre¹, Claude Cavoit², Salim Dounia¹, Titiksha Srivastava¹, Philippe Sabon¹, Hélène Béa¹, Guillaume Jannet², Lucian Prejbeanu¹

¹ SPINTEC, Univ. Grenoble Alpes, CEA, CNRS, Grenoble INP, 38000 Grenoble, France

²LPC2E, CNRS-Université d'Orléans, 45071 Orléans, France

claire.baraduc@cea.fr

RÉSUMÉ

Différentes approches sont testées pour améliorer les performances ou pour apporter de nouvelles fonctionnalités aux capteurs de champ magnétique basse fréquence à base de jonction tunnel magnétiques : capteur de haute sensibilité obtenue par amplification et modulation du champ ; capteur bas bruit utilisant des configurations magnétiques non uniformes ; capteur à sensibilité ajustable par une tension de grille.

MOTS-CLEFS : *jonction tunnel magnétique ; concentrateur de flux ; vortex ; effet de champ électrique.*

1. INTRODUCTION

Les capteurs spintroniques à base de jonctions tunnel magnétiques sont déjà largement exploités industriellement, par exemple comme têtes de lecture de disques durs. Ils fonctionnent dans ce cas à haute fréquence. Leur utilisation à basse fréquence est plus compliquée à cause de leur bruit en $1/f$. Différentes pistes sont explorées pour améliorer les performances de ces capteurs à basse fréquence, par exemple en amplifiant et modulant le champ magnétique. On peut également utiliser une configuration magnétique particulière (vortex) dont l'extension spatiale est suffisamment importante pour que cet objet soit a priori peu susceptible de fluctuer. Enfin, on peut envisager d'apporter de nouvelles fonctionnalités aux capteurs spintroniques en utilisant l'effet du champ électrique sur les propriétés magnétiques d'interface pour moduler leur sensibilité et leur gamme d'utilisation avec une tension de grille. Ces différentes voies sont actuellement à l'étude au laboratoire et sont présentées brièvement ci-dessous.

2. CAPTEUR ULTRA-SENSIBLE PAR AMPLIFICATION ET MODULATION DU CHAMP

L'amélioration de la sensibilité du capteur est obtenue en combinant amplification et modulation du champ magnétique [1]. L'amplification du champ à mesurer est réalisée grâce à un concentrateur de flux en NiFe dont la géométrie est calculée pour assurer un gain très élevé ($\times 400$). Par ailleurs, pour réduire le bruit, un champ alternatif à 100 kHz permet une modulation du signal à une fréquence où le bruit en $1/f$ devient négligeable. Ce champ est généré par des bobines de polarisation intégrées dans le capteur. Un tel dispositif, entièrement intégré (Fig. 1a), occupe une surface de $4 \times 10 \text{ mm}^2$, et ne pèse que quelques grammes, alors que la détectivité attendue ($< 1 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$) est comparable à celle de capteurs inductifs, beaucoup plus volumineux et plus lourds. Ce capteur, destiné initialement aux missions spatiales pour lesquelles sa faible masse est un atout déterminant, pourrait également avoir de nombreuses autres applications : magnétocardiographie, surveillance géologique, contrôle non destructif, etc.

3. CAPTEUR A VORTEX

Les capteurs spintroniques sont basés sur le fait que la résistance du capteur varie selon l'orientation relative des aimantations des deux couches ferromagnétiques composant le dispositif. Dans le cas usuel, chaque couche possède une aimantation uniforme. Ici, nous explorons le potentiel d'un capteur dans lequel une des deux couches est dans une configuration magnétique particulière dite *vortex* [2]: l'aimantation locale, toujours dans le plan de la couche, suit des cercles concentriques, son centre, ou cœur, présentant très localement une aimantation hors du plan du film (Fig. 1b). Le vortex, dont le cœur est initialement au centre du plot à champ nul, va se déplacer avec le champ magnétique appliqué, ce qui provoque une variation linéaire de la résistance de la jonction. La sensibilité d'un tel dispositif n'est pas très élevée mais le bruit devrait être particulièrement faible. L'étude en cours montre cependant que le piégeage du cœur par les défauts est une difficulté à prendre en compte.

4. CAPTEUR A SENSIBILITE COMMANDEE PAR UNE TENSION DE GRILLE

La découverte de l'influence du champ électrique sur l'anisotropie de surface [3], a ouvert la voie au contrôle des propriétés magnétiques des couches ferromagnétiques nanométriques. Un tel effet pourrait alors être mis à profit pour contrôler, avec une tension de grille, la sensibilité et la gamme de fonctionnement des capteurs spintroniques. Dans cette optique, l'optimisation des matériaux est essentielle afin d'obtenir un effet maximal. Des résultats récents [4], obtenus au laboratoire, ont montré que le champ électrique pouvait moduler également une autre propriété d'interface, l'interaction Dzyaloshinskii-Moriya, qui permet de stabiliser des configurations micromagnétiques particulières. On pourrait alors envisager de combiner une approche inspirée du capteur à vortex et la commande par une tension de grille.

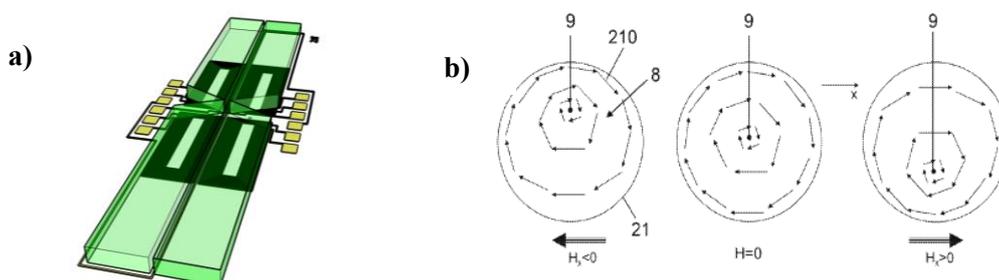


Fig. 1 : a) Design du capteur ultra-sensible : l'amplification du champ est réalisée par le concentrateur de flux (en vert) et la modulation par des bobines de polarisation (en noir) ; les jonctions, invisibles à cette échelle, sont dans le gap du concentrateur ; b) vortex magnétique se déplaçant sous l'effet du champ magnétique.

CONCLUSION

La diversité des phénomènes spintroniques peut être mise à profit pour développer des capteurs de champ magnétique intégrés et présentant des performances supérieures aux capteurs à effet Hall.

RÉFÉRENCES

- [1] C. Cavoit, *Dispositif pour détecter et/ou mesurer un champ magnétique faible*, Brevet WO 2010/109138 A1 (2010)
- [2] I.L. Prejbeanu, B. Dieny, K. Mackay, B. Cambou, *Magnetic logic unit (MLU) cell and amplifier having a linear magnetic signal* WO2014/048758, US9583695 (B2) (2017)
- [3] M. Weisheit, S. Fähler, A. Marty, Y. Souche, C. Poinsignon and D. Givord, *Electric Field-Induced Modification of Magnetism in Thin-Film Ferromagnets*, **Science**, 315, pp. 349 (2007)
- [4] T. Srivastava et al., *Large voltage tuning of Dzyaloshinskii-Moriya Interaction: a route towards dynamic control of skyrmion chirality*, arXiv 1804.09955



MAGNETIC NANOPARTICLES DETECTION IN A MICROFLUIDIC CHIP

B. Garlan¹, G. Perry¹, K. Ngo², H.-J. Krause³, H. Kokabi¹

¹ Sorbonne Universités, UR2, L2E (Laboratoire d'Electronique et Electromagnétisme), Paris

² Sorbonne Universités, UPMC, UMR 8235, LISE (Laboratoire d'Interfaces et Systèmes Electrochimiques), Paris

³ Institute of Bioelectronics, Peter Grünberg Institute (PGI-8), Forschungszentrum Jülich (FZJ), Germany

Benjamin.garlan@gmail.com

SUMMARY

The magnetic detection frequency mixing technique with a set of miniaturized planar coils is investigated regarding its use toward a completely integrated Lab-on-Chip (LoC) pathogen sensing system. The system allows the detection and quantification of superparamagnetic beads. Analytical calculations for both excitation and pick up coils are presented; the goal is to investigate the miniaturization of simple and cost effective planar spiral coils. Following these calculations, a first Printed Circuit Board (PCB) prototype has been designed, manufactured and tested for limit of detection, linear response and validation of theoretical concepts. A limit of detection of 15 μ g/mL of 20 nm core sized nanoparticles was achieved.

KEYWORDS : *Lab-on-chip; magnetic detection; pathogen sensing; multiphysics simulations.*

1. INTRODUCTION

Due to the effect of spread diseases and pandemics caused by the amount of people that travel every day, a need of rapid, low cost and sensitive pathogen sensing systems is urgent. Many approaches try to develop a Lab-On-Chip (LOC) system. Among them, electrochemical and optical based methods are dominant. However, some suffer from few drawbacks like nonlinear detection range, lack of sensitivity, non-specific detection and complexity of integration [1-3]. Other methods include mechanical and magnetic based methods. The magnetic based ones hold promising perspectives due to their miniaturization possibility [4-5]. Some attempts have been made in order to embed magnetic sensors such as GMR, TMR, and planar Hall Effect sensors [6]. Main drawbacks include magnetic nanoparticles residues due to sticking effect in the edge of the magnetic material area and hysteresis effects. A good LOC pathogen sensing system should be sensitive with a low limit of detection, cost effective, selective, and simple to use and with a large dynamic range.

The miniaturized system that we aim to develop tends to overcome these challenges. In our case, the nonlinearity of superparamagnetic nanoparticles (SPN) has been exploited. The frequency mixing method has been used with two magnetic excitation signals at distinct frequencies (f_1, f_2) and we measure the amplitude of the signal response at a specific frequency ($f_1 + 2f_2$) that allows detecting and quantifying the amount of SPN [7].

2. PCB STRUCTURE

To design the PCB structure for the planar coils, an analytical program that includes the calculation of axial magnetic field along with sensor sensitivity and magnetic field noise has been

developed. The magnetic excitation field and induced sensitivity formulas depend both on a geometrical function that represents the dimensions of the studied coil.

Finally, the excitation coils are optimized according to the produced magnetic field, heat dissipation and total impedance value.

3. MICROFLUIDIC STRUCTURE

Based on the multiphysics optimization of the microfluidic reservoir and coils dimensions, we designed and realized the whole structure (Fig 1). Because of the compromise between high number of turns and vicinity of excitation coils to sample reservoir, we chose to use a 8-layer for the realization of the excitation and pick-up coils. Four layers are assigned to each coil and the appropriate number of turns were chosen from the analytical and multiphysics simulations. The PCB structure allows accurate gradiometric detection, with one reference side and one detection side, the measuring coil must then be wounded in opposition.



Fig.1 (a) Realized PCB sandwich structure that includes excitation coils (HF and LF) and sensors; (b) Realized microfluidic reservoir

Besides, a PDMS based microfluidic reservoir was made in accordance to the microfluidic simulations. Fabrication steps include mask design, mold fabrication, PDMS replica structure fabrication and plasma bonding to a glass substrate.

4. CONCLUSIONS

In this work, a first miniaturized system with planar excitation and detection coils for magnetic frequency mixing SPN detecting system was designed and fabricated. Both analytical and multiphysics simulation tools have been developed in order to optimize and miniaturize the system. Consequently, microfluidic reservoirs along with a multilayer printed circuit board have been realized in accordance.

- [1] J. Wu et M. Gu, «Microfluidic sensing: state of the art fabrication and detection techniques,» *Journal of biomedical optics*, vol. 16, n° %18, pp. 080901-080901, 2011.
- [2] M. Roppert, J. a. Ertl et K. a. Peter, «Microfluidic systems for pathogen sensing: a review,» *Sensors*, vol. 9, n° %16, pp. 4804--4823, 2009.
- [3] A. H. Ng, U. Uddayasankar et A. R. Wheeler, «Immunoassays in microfluidic systems,» *Analytical and bioanalytical chemistry*, vol. 397, n° %13, pp. 991-1007, 2010.
- [4] Koh.Isaac et Josephson.Lee, «Magnetic nanoparticle sensors,» *Sensors*, vol. 9, n° %110, 2009.
- [5] J. B. Haun, T.-J. Yoon, H. Lee et R. Weissleder, «Magnetic nanoparticle biosensors,» *Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine and Nanobiotechnology*, vol. 2, n° %13, pp. 291-304, 2010.
- [6] C. Tamanaha, S. Mulvaney, J. Rife et L. Whitman, «Magnetic labeling, detection, and system integration,» *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 24, n° %11, pp. 1-13, 2008.
- [7] H.-J. Krause, N. Wolters, Y. Zhang, A. Offenhausser, P. Miethe, M. H. Meyer, M. Hartmann et M. Keusgen, «Magnetic particle detection by frequency mixing for immunoassay applications,» *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 311, n° %11, pp. 436-444, 2007.



CARACTERISATION MAGNETIQUE D'AIMANTS D'ACCELERATEURS

Gaël Le Bec, Joël Chavanne, Loïc Lefebvre, Christophe Penel

European Synchrotron Radiation Facility, 71 avenue des Martyrs, 38000 Grenoble, France

lebec@esrf.fr

RÉSUMÉ

Les accélérateurs de particules sont équipés de nombreux aimants de guidage et de focalisation. Ces aimants sont tous mesurés avant d'être installés : une cartographie de leur champ est indispensable pour contrôler leur homogénéité et pour les aligner. Cette cartographie est réalisée à l'aide de fluxmètres. D'autres systèmes magnétiques, les onduleurs, sont utilisés comme sources de rayonnement X. Le champ magnétique des onduleurs est mesuré avec des capteurs à effet Hall et de fluxmètres. Nous présenterons ces aimants, leurs spécificités et les bancs de mesure que nous avons développés pour les caractériser.

MOTS-CLEFS : *Mesures magnétiques ; aimants d'accélérateurs ; fluxmètres ; capteurs à effet Hall.*

1. AIMANTS D'ACCELERATEURS

Les aimants sont des composants essentiels des accélérateurs de particules. La figure 1 montre quelques aimants de l'Extremely Brilliant Source (EBS) qui seront installés à l'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) en 2019 [1]. En tout, plus de 1000 aimants ont été fabriqués à cette occasion [2]. Les erreurs magnétiques des aimants et les erreurs d'alignement ont un fort impact sur les performances des accélérateurs. Les aimants qui définissent l'optique des accélérateurs sont souvent caractérisés à l'aide de fluxmètres, basés sur des systèmes à bobines tournantes [3] ou à fil [4, 5]. La figure 2 montre une vue CAO d'un fluxmètre à fil tendu développé à l'ESRF, et le spectre d'harmoniques du champ magnétique d'un quadrupôle, mesuré avec un banc de mesure de ce type.



Fig. 1 : Assemblage des aimants d'optique de l'EBS sur leur supports, à l'ESRF.

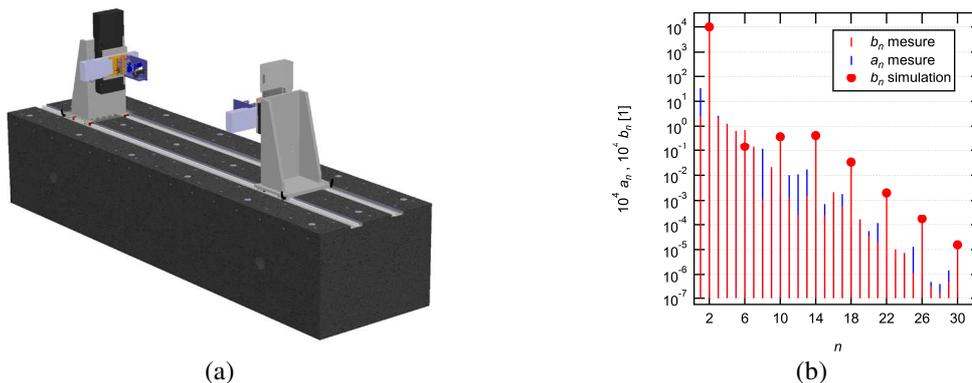


Fig. 2. (a) : vue CAO d'un fluxmètre à fil tendu. (b) : harmoniques du champ d'un quadrupôle de 90 T/m, mesurés à un rayon de 12,4 mm et exprimés à 7 mm.

2. ONDULATEURS

Les onduleurs sont des sources des rayonnement synchrotron. Ils dévient les électrons de façon périodique et des photons sont émis chaque fois que la trajectoire des particules est courbée. Environ 80 onduleurs sont installés à l'ESRF. Les assemblages magnétiques mesurent entre 1,4 m et 2,5 m et leurs entrefers minimum sont de 6 mm à 11 mm. Selon les cas d'utilisation, les onduleurs peuvent être dans l'air, sous vide ou cryogéniques.

Le champ magnétique de ces onduleurs doit être mesuré précisément, pour limiter leur influence sur le faisceau de particules et pour optimiser le spectre du rayonnement. Les mesures locales du champ magnétiques sont réalisées à l'aide de capteurs à effet Hall qui sont déplacés dans l'entrefers. La figure 3 montre la CAO d'un banc de mesure à effet Hall dédié aux onduleurs sous vide et cryogéniques.

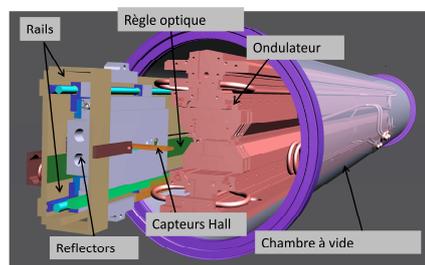


Fig. 3 : Banc de mesure d'ondulateurs sous vide et cryogéniques.

REFERENCES

- [1] L. Farvacque, N. Carmignani, J. Chavanne, A. Franchi, G. Le Bec, S. Liuzzo, *et al.*, "A low-emittance lattice for the ESRF," in *IPAC13*, Shanghai, 2013, pp. 79-81.
- [2] G. Le Bec, J. Chavanne, F. Villar, C. Benabderrahmane, S. Liuzzo, J.-F. Bouteille, *et al.*, "Magnets for the ESRF diffraction limited light source project," *IEEE transactions on applied superconductivity*, vol. 26, 2016.
- [3] L. Walckiers, "The Harmonic-Coil Method," in *CERN Accelerator School : Magnetic measurement and alignment*, Montreux, Switzerland, 1992, pp. 138-166.
- [4] J. DiMarco and J. Krzywinski, "MTF single stretched wire system," Fermilab MTF-96-0001, 1996.
- [5] G. Le Bec, J. Chavanne, and C. Penel, "Stretched-wire measurements of small bore multipole magnets," in *IPAC12*, New Orleans, 2012, p. THPPD001.



PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL DIAGNOSIS BY EXTERNAL MAGNETIC FIELD MEASUREMENTS

Lyes Ifrek^{1,2}, Gilles Cauffet¹, Olivier Chadebec¹, Yann Bultel², Sébastien Rosini³

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab, F-38000 Grenoble, France

²Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, LEPMI, F-38000 Grenoble, France

³Univ. Grenoble Alpes, CEA, LITEN, F-38054 Grenoble, France

lyes.ifrek@g2elab.grenoble-inp.fr

ABSTRACT

A non-invasive tool used for fault identification on a fuel cell is developed. It is based on solving an ill-posed linear magnetostatic inverse problem. The current density is built from the external magnetic field generated by the stack. This approach is validated for detection of faults on a stack simulator and on a real stack.

INDEX TERMS: *Fuel cell, non-invasive diagnosis, inverse problems, truncated SVD.*

1. INTRODUCTION

The diagnosis allows a prevention of a possible fuel cell breakdown and ensure its maintenance at an appropriate time. The presented diagnosis technique consists to reconstruct the the current density distribution within the stack without disturbing its operation because it prevents any dysfunction due to an intrusive instrumentation.

2. PRINCIPLE

From the electrical conductivities of each part of the stack and by coupling the model with an external electrical circuit representation, the current density distribution inside the stack is obtained by solving an electrokinetic problem. The key point being the current solenoidality, a Finite Element (FE) approach based on face shape function interpolation [1] for the current distribution is selected. Then, thanks to the Biot and Savart law (1) numerically integrated, the magnetic field is calculated. The magnetic field generated by a healthy stack was studied in order to define suitable magnetic sensors positions and orientations for optimizing the measurement ranges [2].

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\Omega_s} \frac{(\mathbf{r}_s - \mathbf{r})}{|\mathbf{r}_s - \mathbf{r}|^3} \times \mathbf{j}(\mathbf{r}_s) d\Omega_s \quad (1)$$

with \mathbf{B} : the magnetic induction at position \mathbf{r} generated by the current source \mathbf{j} at the point \mathbf{r}_s , and Ω_s : the stack volume and μ_0 : magnetic permeability of the vacuum.

Equation (1) can be discretized and a linear relation is obtained.

$$\mathbf{B} = \mathbf{J}\mathbf{S} \quad (2)$$

with \mathbf{S} : the discretized Biot and Savart operator, \mathbf{B} : measurements and \mathbf{J} : the current density.

$$\mathbf{J} = \mathbf{S}^+ \mathbf{B} \quad (3)$$

The problem being ill-posed [3], the pseudo inverse \mathbf{S}^+ is calculated from classical singular value decomposition (SVD) which can be truncated in order to limit the measurement noise.

3. EXPERIMENTAL RESULTS

a) Stack simulator

In [4] is shown that we can simulate the electrical behaviour of a fuel cell by using graphite material. To validate the inversion algorithm, a graphite block with a removed part (Fig. 1b) ended by copper plates is used as stack simulator (Fig. 1c-d).

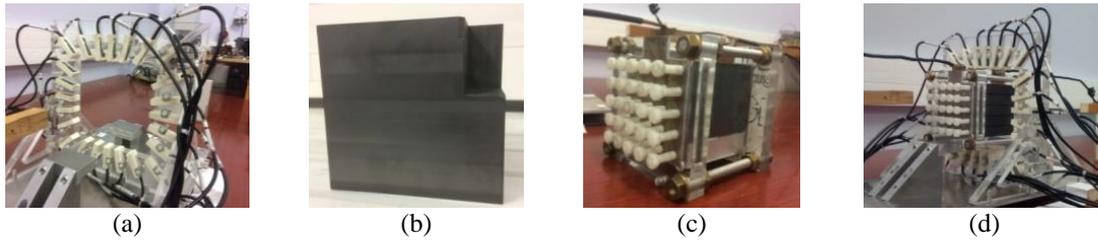


Fig. 1 Experimental Set-Up: Sensors array (a), Graphite block with removed part (b), Simulator (c), Whole system (d)

A current is imposed inside the graphite block and the magnetic field is measured using the sensor array (Fig. 1a). Finally, The current density is identified (Fig. 2b).



Fig. 2 Experimental results – Stack simulator: Real current (a), Identified current from magnetic field (b)

1. Real fuel cell stack

A stack containing 100 cells was disassembled and five cells were extracted. A portion of the active surface of each cell was covered with a resin, which inhibit this area. The magnetic field on three sensor array positions along the stack is recorded for a current $I = 100$ A (Figure 4b). From this magnetic signature the current distributions is identified (Fig. 4c). Its observed that the current becomes heterogenous at the fault position and it is almost equal to zero in the fault location.

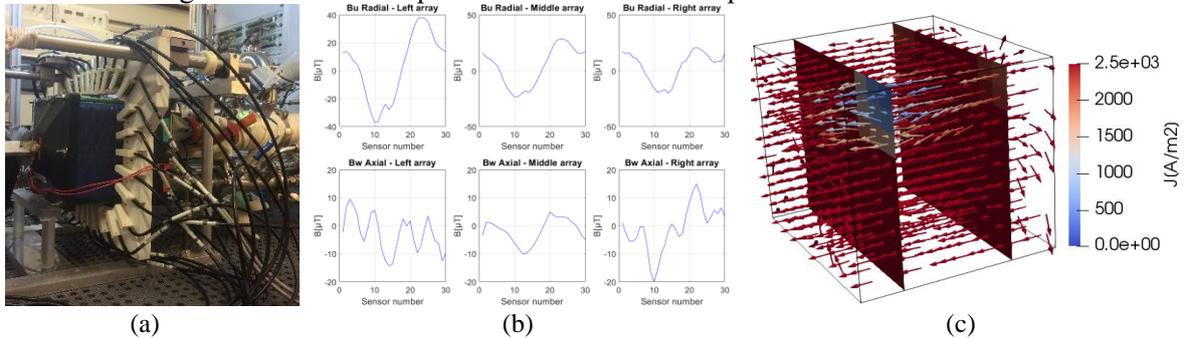


Fig. 3 Real stack: Stack and sensors (a), Magnetic signature on three positions along the stack (b), Identified current (c)

4. CONCLUSION

The approach is validated on a stack simulator in order to check the feasibility of the method in a real environment. The error comparing to a numerical real current is not perfect but the main current component is observed. Then, a local fault affecting five cells on a real stack is identified.

5. REFERENCES

- [1] T. T. Nguyen, “Méthode PEEC inductive par élément de facette pour la modélisation des régions conductrices volumiques et minces”, Thesis, Grenoble, 2014.
- [2] M. L. Ny et al., “Current Distribution Identification in Fuel Cell Stacks From External Magnetic Field Measurements”, IEEE Trans. Magn., vol. 49, no 5, p. 1925-1928, may 2013.
- [3] J. Hadamard, “Lectures on Cauchy’s problem in linear partial differential equations”. Yale University Press, 1923.
- [4] M. Le Ny et al., “A Three Dimensional Electrical Model of PEMFC Stack”, Fuel Cells, vol. 12, no 2, p. 225-238,2012.



MISE EN ŒUVRE ET PERFORMANCES D'UN CAPTEUR GMI NUMERIQUE A HAUTE SENSIBILITE BASE SUR UN FPGA

Papa Silly Traoré^{1,2}, Aktham Asfour¹, and Jean-Paul Yonnet¹

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP¹, G2ELab, 38000 Grenoble, France

²Ecole Supérieure Polytechnique (ESP); Université Cheikh Anta Diop (UCAD), Dakar, Sénégal
papasilly.traore@esp.sn, aktham.asfour@g2elab.grenoble-inp.fr, Jean-Paul.Yonnet@g2elab.grenoble-inp.fr

RÉSUMÉ

Cet article présente un capteur GMI (Magnéto-Impédance Géante) en configuration off-diagonal associé à une électronique de conditionnement entièrement numérique implémenté sur FPGA (Field-Programmable-Gate-Array). L'architecture du système proposé et les performances en bruit associées sont présentées.

MOTS-CLEFS : *GMI (Magneto-Impédance Géante) ; électronique numérique ; FPGA (Field Programmable Gate Array).*

1. DESCRIPTIF ET RESULTATS

L'électronique numérique de conditionnement pour les capteurs magnétiques GMI (Magnéto-Impédance Géante) à haute sensibilité présentent des performances en bruit très prometteuses [1-2]. Un intérêt similaire de ces techniques numériques a également été rapporté pour le conditionnement des capteurs de type Fluxgate orthogonal en mode fondamental [3].

De loin, une telle électronique est principalement composée d'un synthétiseur numérique de fréquence (ou DDS pour « Direct Digital Synthesizer ») pour fournir le courant d'excitation haute fréquence, i_{ac} , à l'élément sensible. La tension aux bornes de l'élément sensible peut être directement numérisée à une haute fréquence d'échantillonnage par un convertisseur analogique-numérique (CAN). La démodulation d'amplitude est ensuite réalisée numériquement à l'aide d'un DDC (pour « Digital Down-Converter »). Ce DDC est constitué d'un oscillateur numérique local (NCO pour « Numerically-Controlled-Oscillator ») pour fournir le signal de référence pour le mixeur numérique, et de filtres numériques passe-bas décimateurs.

Ces fonctions impliquées dans un tel conditionnement numérique peuvent être réalisées à l'aide de circuits spécifiques de type ASIC (Application-Specific-Integrated-Circuit) [1-2] ou de cartes d'acquisition à usage général à coût élevé [3]. Dans cet article, un nouveau concept pour la mise en œuvre de l'électronique numérique de conditionnement pour les capteurs GMI est présenté. Ce concept est basé sur l'utilisation des circuits reconfigurables FPGA (Field-Programmable-Gate-Array). Comparé aux ASIC, le FPGA présente plusieurs avantages tels que le haut degré de flexibilité lors de la mise en œuvre ainsi qu'un coût très faible. L'architecture du capteur GMI en configuration

¹ Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes.

off-diagonal développé à l'aide du FPGA est illustrée par la Fig. 1. Le DDS et le DDC sont entièrement implémentés dans le FPGA.

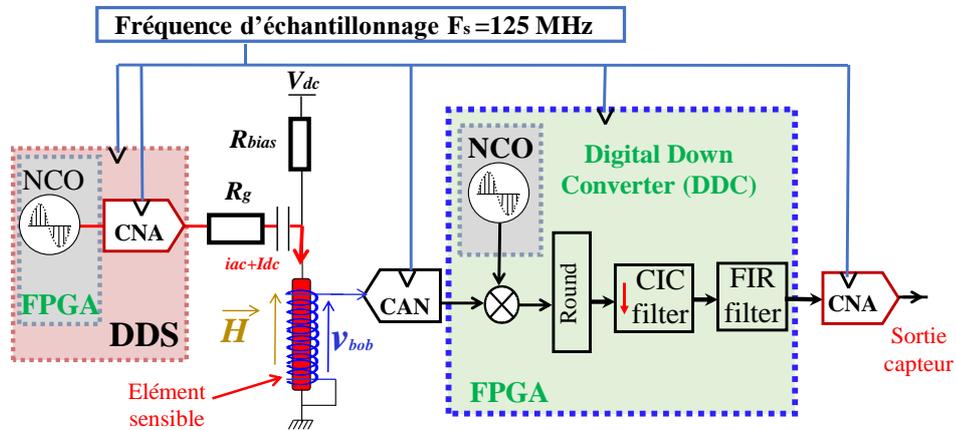


Fig.1. Architecture d'un capteur GMI numérique basé sur FPGA.

Il est à noter que la conception intègre également des fonctions spécifiques (telles que la fonction d'arrondi "Round") qui sont nécessaires pour toute implémentation en temps-réel puisque seul un nombre limité de bits peut être traité par l'architecture matérielle. Par ailleurs, le choix du FPGA pour la réalisation du capteur GMI à haute sensibilité se justifie également par la flexibilité de choisir judicieusement la taille des accumulateurs de calcul en sortie de chaque fonction afin d'optimiser les performances de bruit du capteur.

Dans la conception actuelle, le bruit magnétique équivalent en champ mesuré et calculé est donné sur la Fig. 2. Des niveaux de bruit équivalent en champ de 33 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ et de 1.8 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ sont obtenus à 1 Hz et en zone de bruit blanc, respectivement [4].

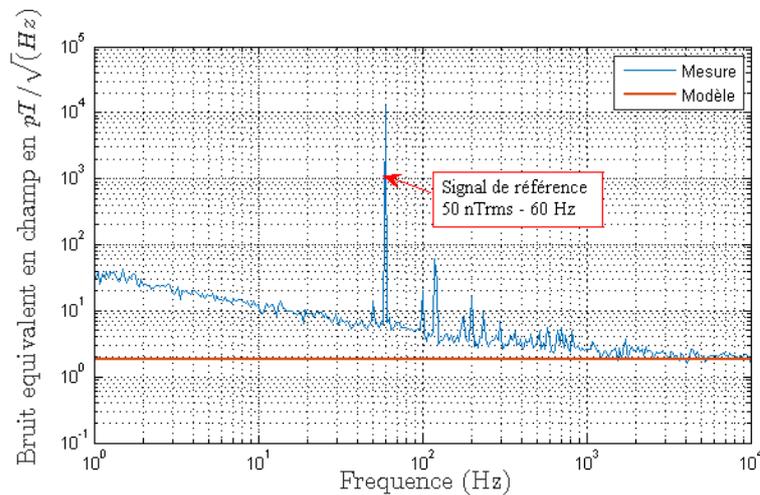


Fig.2. Bruit équivalent en champ du capteur GMI numérique. Les paramètres d'excitation sont $i_{ac}=1$ MHz/7 mA, $I_{dc}=5$ mA. L'élément sensible est fil CoFesiB de longueur 25 mm et de diamètre 100 μm .

RÉFÉRENCES

- [1] P.S. Traoré *et al*, *IEEE Sens. J.*, 17(19), pp : 6175-6184, 2017.
- [2] P.S. Traoré *et al*, *IEEE Trans. Magn.*, 53(4), 2017.
- [3] M. Butta, *et al*, *IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 2016.
- [4] P.S. Traoré, Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2017.



VERS LES MAGNETOMETRES GMI NUMERIQUES

Papa Silly Traoré^{1,2}, Aktham Asfour¹, and Jean-Paul Yonnet¹

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP¹, G2Elab, 38000 Grenoble, France

²Ecole Supérieure Polytechnique (ESP); Université Cheikh Anta Diop (UCAD), Dakar, Sénégal

papasilly.traore@esp.sn, aktham.asfour@g2elab.grenoble-inp.fr, Jean-Paul.Yonnet@g2elab.grenoble-inp.fr

RÉSUMÉ

Cet article présente un magnétomètre GMI (Magnéto-Impédance Géante) basé sur une électronique de conditionnement entièrement numérique. Des résultats préliminaires permettant la validation du concept proposé sont présentés. Une comparaison des résultats du calcul théorique et ceux de la mesure est également effectuée.

MOTS-CLEFS : *GMI (Magnéto-Impédance Géante); électronique numérique; magnétomètre.*

1. DESCRIPTIF ET RÉSULTATS

De nouvelles techniques de conditionnement numériques des capteurs magnétiques GMI ont été présentées dans nos récents travaux [1-3]. Les niveaux de bruit prometteurs obtenus en boucle ouverte (33 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ à 1 Hz et 1.8 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ en zone de bruit blanc [4]) motivent aujourd'hui le développement du magnétomètre complet.

Dans cet article, un magnétomètre numérique GMI en configuration off-diagonal est présenté (Fig. 1). L'élément sensible est un microfil CoFeSiB de longueur 25 mm et de diamètre 100 μm . Autour de celui-ci sont bobinés 400 tours de fil de cuivre. Le courant d'excitation, i_{ac} , est fourni par un synthétiseur numérique de fréquence (ou DDS pour « Direct Digital Synthesizer »). La tension aux bornes de la bobine est directement échantillonnée, par un convertisseur numérique-analogique (CAN), à une fréquence de 125 MHz. La démodulation numérique (ou DDC pour « Digital Down Conversion ») comprend le mixage (multiplication numérique entre les signaux issus du CAN et ceux provenant d'un oscillateur numérique local (ou NCO pour « Numerically-Controlled-Oscillator ») et un filtrage passe-bas. Celui-ci est assuré grâce à une cascade de deux filtres décimateurs : un filtre CIC (Cascaded-Integrator-Comb) et un filtre à réponse Impulsionnelle finie (RIF). Les données en sortie du filtre RIF sont par la suite converties en signal analogique grâce à un Convertisseur numérique-analogique (CNA). La tension résultante, V_0 , est utilisée pour créer le champ de contre-réaction, B_f , en utilisant une résistance, R_f , associée à une bobine de contre-réaction de 220 spires.

Les grandeurs α et β désignent les gains statiques de la chaîne directe et celle de la chaîne de retour, respectivement. Pour s'assurer du bon fonctionnement du magnétomètre numérique, ces gains ont été fixés ($\alpha = 87.6 \text{ kV/T}$, $\beta = 0.000157 \text{ T/V}$). Ainsi, la sensibilité théorique, V_0/B_{meas} , en boucle

¹ Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes.

fermée est approximée par $1/\beta$. La sensibilité mesurée était d'environ 6,4 kV/T, proche de cette estimation théorique $1/\beta$.

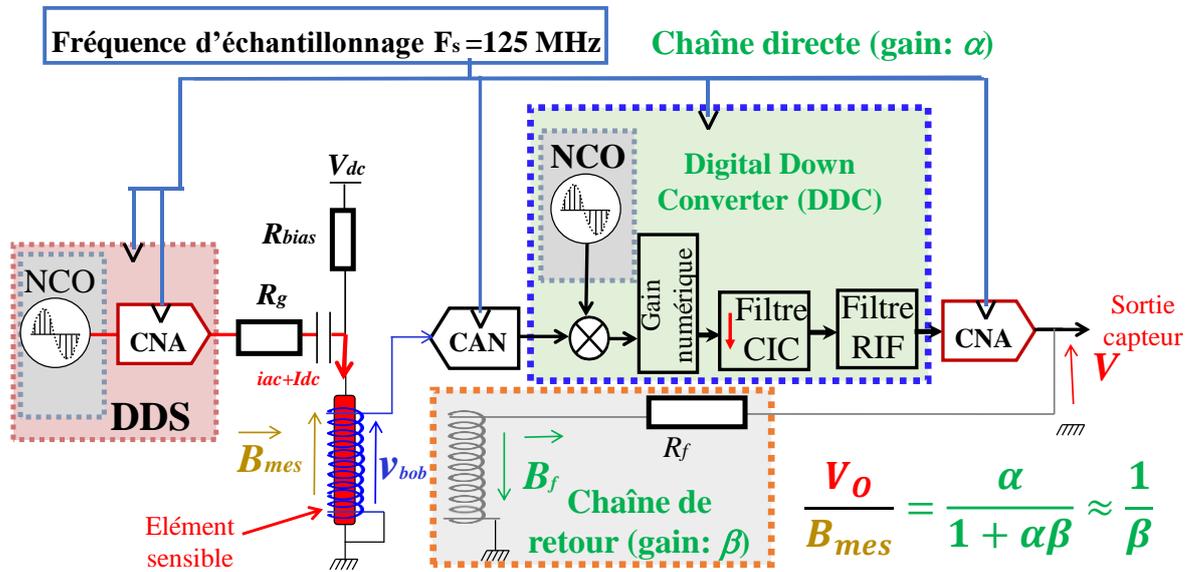


Fig.1. Architecture matérielle d'un magnétomètre GMI numérique en configuration off-diagonal. B_{mes} est champ magnétique mesuré. Le courant d'excitation, i_{ac} est de 1 MHz de fréquence et 6.5 mA d'amplitude. Le courant continu, I_{dc} est 3.8 mA. $R_f = 22 \Omega$ est la résistance de contre-réaction. Aucun champ de polarisation n'est utilisé.

Il est à noter qu'aucune optimisation de la sensibilité ni du niveau de bruit du magnétomètre n'a été effectuée à ce stade.

Par ailleurs, le traitement numérique introduit un certain retard qui pourrait avoir un impact sur la stabilité de la boucle. Dans la conception actuelle, un retard de 44 μ s a été estimé et mesuré. Ce petit délai, intrinsèque à tout système numérique, devrait imposer une fréquence maximale pour la mesure du champ magnétique. L'investigation de ces différents aspects fait l'objet des travaux en cours.

RÉFÉRENCES

- [1] Asfour *et al*, *IEEE Trans. Magn.*, 51(1), pp 1-4, 2015.
- [2] P.S. Traoré *et al*, *IEEE Trans. Magn.*, 53(4), 2017.
- [3] P.S. Traoré *et al*, *IEEE Sens. J.*, 17(19), pp : 6175-6184, 2017.
- [4] P.S. Traoré *et al*, *Sensors and Actuators Physical: A.*, 271, pp: 290-302, 2018.



EFFET DE LA FLEXION SUR LES COMPOSANTES DU TENSEUR D'IMPEDANCE GMI

Julie Nabias¹, Aktham Asfour¹, and Jean-Paul Yonnet¹

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP¹, G2Elab, 38000 Grenoble, France

aktham.asfour@g2elab.grenoble-inp.fr

RÉSUMÉ

Cet article présente une étude de l'effet de la flexion sur la Magnéto-Impédance Géante (GMI) dans les fils amorphes Co-Fe-Si-B. Les deux composantes diagonale et off-diagonale du tenseur d'impédance ont été considérées. Les résultats ont montré que la sensibilité intrinsèque variait avec la flexion pour les deux composantes. Une nette variation de l'offset en fonction de la flexion a été observée pour la composante diagonale alors que cette variation était quasiment nulle pour la composante off-diagonale.

MOTS-CLEFS : *GMI (Magnéto-Impédance Géante) ; flexion ; diagonale ; off-diagonale ; sensibilité, offset.*

1. INTRODUCTION

Les capteurs à Magnéto-Impédance Géante (GMI) sont des candidats prometteurs pour la mesure sans contact du courant électrique. Dans une telle application, l'axe de l'élément sensible (fil amorphe dans la présente étude) doit être aligné avec le champ magnétique produit par le courant mesuré. C'est typiquement le cas dans une structure toroïdale du capteur où cet élément sensible est déformé pour former une boucle autour du conducteur véhiculant le courant [1]-[2]. Une telle déformation induit une contrainte de flexion dans le fil [1]. Ce type de contrainte, très peu étudié, peut avoir des conséquences importantes sur les quantités intrinsèques de la GMI qui conditionnent la mise en œuvre du capteur. Dans cet article, l'effet de la flexion a été étudié dans des fils amorphes riches en Co (Fe-Si-B). Les deux composantes, diagonale Z_{11} et off-diagonale Z_{21} , du tenseur d'impédance ont été considérées, en mettant l'accent sur les changements de la sensibilité intrinsèque et de l'offset qui sont des quantités « clé » pour la mise en œuvre pratique du capteur.

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif expérimental est présenté par la Fig.1 [2]. L'échantillon était un fil amorphe de 100 μm de diamètre et de 150 mm de longueur. Ce fil était alimenté par un courant alternatif de fréquence de 800 kHz et d'amplitude de 5 mA. Une bobine de détection d'environ 2400 tours a également été enroulée autour du fil pour mesurer la composante off-diagonale. Dans ce cas, un courant continu de 1 mA (nécessaire pour l'apparition du composant off-diagonale dans les fils à anisotropie circumférentielle) a également été fourni au fil. La contrainte de flexion a été appliquée en positionnant l'échantillon le long d'un support rigide et circulaire. Dans ces conditions, théoriquement, la contrainte s'exerce de manière uniforme le long du fil car le rayon de courbure, qui détermine l'amplitude de flexion, est constant le long du fil. Pour les dimensions du fil choisies et le rayon de courbure, ρ , de 25

¹ Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes.

mm, la contrainte maximale appliquée est d'environ 320 MPa (nettement inférieure à la limite élastique du fil, qui est de 3600 MPa).

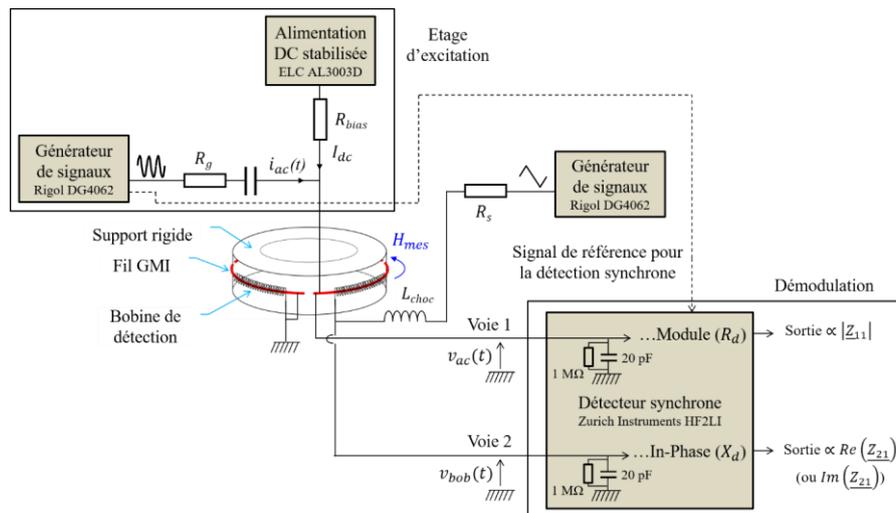


Fig.1 Schéma du dispositif expérimental pour la caractérisation en flexion des composantes diagonale, \underline{Z}_{11} , et off-diagonale, \underline{Z}_{21} [2].

Le champ magnétique était créé par la même bobine de détection servant à la mesure de la composante off-diagonale. Des tensions « images » des composantes du tenseur d'impédance ont été obtenues en utilisant un détecteur synchrone.

3. RESULTATS

La figure 2 présente les composantes du tenseur d'impédance en position droite et en position fléchi du fil [2].

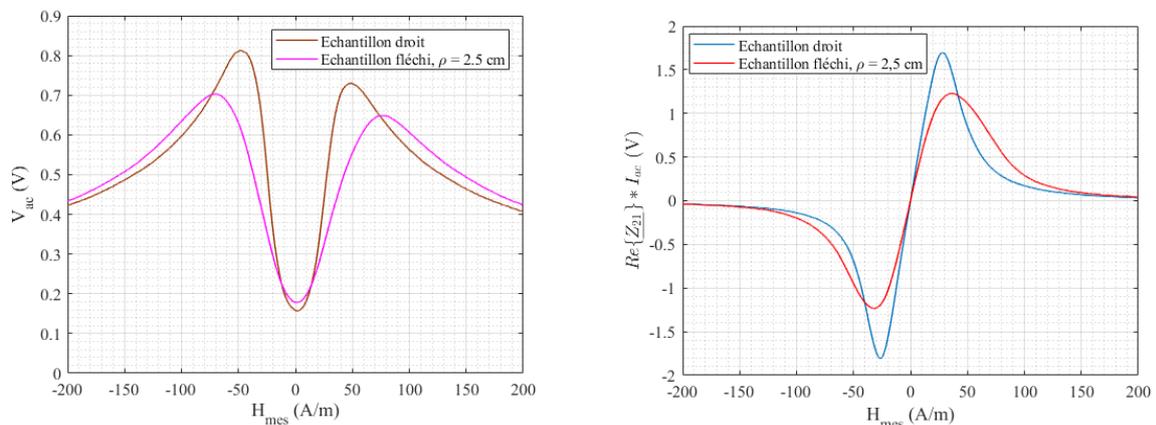


Fig.1. Effet de la flexion sur les composantes de la tenseur d'impédance GMI. Figure de gauche : tension « image » de $|Z_{11}|$. Figure de droite: tension « image » de partie réelle, $Re\{Z_{21}\}$, de \underline{Z}_{21} en fonction du champ magnétique. I_{ac} est l'amplitude du courant d'excitation [2].

Pour le composant Z_{11} , les résultats ont montré une variation maximale de l'offset, à un champ de polarisation de 25 A / m, de $-0,02$ (A / m) / MPa (soit -25 nT / MPa). La sensibilité à ce champ a diminué d'environ 50% (soit -0.16% / MPa). Pour la composante off-diagonale, Z_{21} , le changement de l'offset autour du champ nul était quasiment nulle tandis que la sensibilité diminuait avec la flexion d'environ -0.09% / MPa

REFERENCES

- [1] J. Nabias, A. Asfour et J-P. Yonnet, *IEEE Trans. Mag*, 53(11), nov., 2017
- [2] J. Nabias, Thèse de doctorat, Communauté Université Grenoble Alpes, février, 2018.



ÉTUDE COMPARATIVE DE L'EFFET DE LA TEMPÉRATURE SUR LES COMPOSANTES DIAGONAL ET OFF-DIAGONAL DE LA GMI

Julie Nabias¹, Aktham Asfour¹, and Jean-Paul Yonnet¹

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP¹, G2Elab, 38000 Grenoble, France

julie.nabias@g2elab.grenoble-inp.fr, aktham.asfour@g2elab.grenoble-inp.fr, Jean-Paul.Yonnet@g2elab.grenoble-inp.fr

RÉSUMÉ

Cet article présente une étude comparative de l'effet de la température sur la Magnéto-Impédance Géante (GMI) dans les fils amorphes Co-Fe-Si-B. Les deux composantes diagonal et off-diagonal du tenseur d'impédance ont été considérées. Les résultats ont montré que la sensibilité intrinsèque variait avec la température pour les deux composantes. La variation de l'offset en fonction de la température était nettement moins importante pour la composante off-diagonal.

MOTS-CLEFS : *GMI (Magneto-Impédance Géante) ; température ; diagonal ; off-diagonal ; sensibilité, offset.*

1. INTRODUCTION

L'impact des grandeurs d'influence telle que la température sur les performances des capteurs GMI est devenu un sujet d'actualité ces dernières années [1] - [3]. La robustesse du capteur par rapport aux changements de température dans un environnement de mesure réel est une caractéristique clé aussi bien pour les fabricants que pour les utilisateurs. Dans cet article, l'effet de la température a été étudié dans des fils amorphes riches en Co (Fe-Si-B). La composante diagonale Z_{11} et la composante off-diagonale Z_{21} du tenseur d'impédance ont été considérées, en mettant l'accent sur les changements de sensibilité intrinsèque et de l'offset qui sont des quantités « clé » pour la mise en œuvre pratique du capteur.

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif expérimental est présenté par la Fig.1 [4]. L'échantillon était un fil amorphe de 100 μm de diamètre et de 50 mm de longueur. Ce fil était alimenté par un courant alternatif de fréquence de 1 MHz et d'amplitude de 5 mA. Une bobine d'environ 800 tours a également été enroulée autour du fil pour mesurer la composante off-diagonale. Dans ce cas, un courant continu de 10 mA (nécessaire pour l'apparition du composant off-diagonale dans les fils à anisotropie circonférentielle) a également été fourni au fil. L'échantillon a été placé dans une chambre thermique régulée. Les expériences ont été menées dans la gamme de températures de [-20 ° C, 120 ° C]. Le champ magnétique était créé par un solénoïde. Les composantes du tenseur d'impédance ont été indirectement obtenues en utilisant un détecteur synchrone.

¹ Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes.

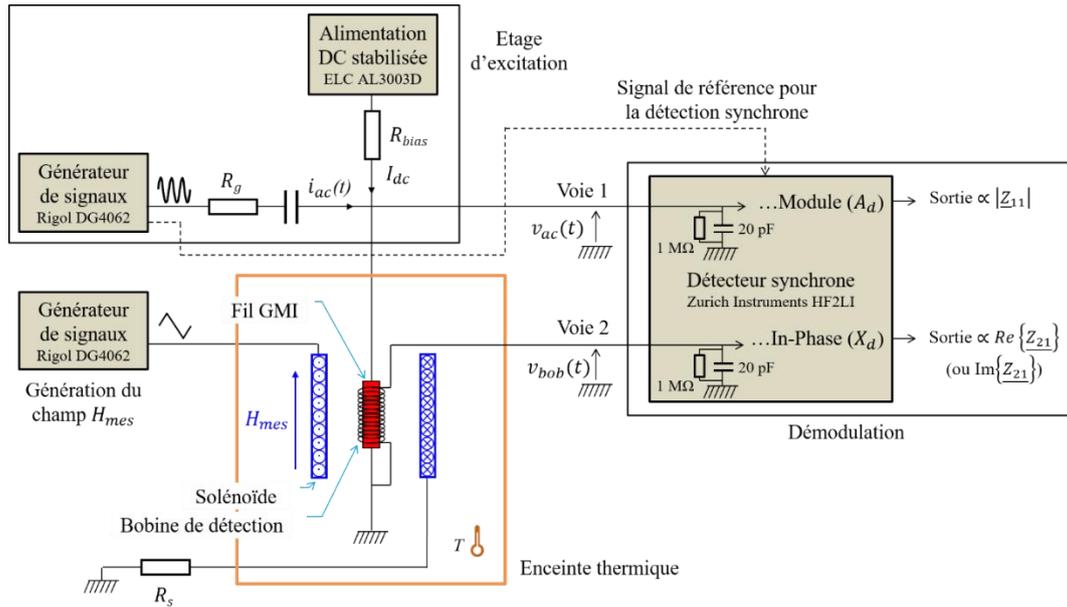


Fig.1 Schéma du dispositif expérimental pour la caractérisation en température des composantes diagonale, Z_{11} , et off-diagonale, Z_{21} .

3. RESULTATS

La figure 2 présente les composantes du tenseur d'impédance à différentes températures.

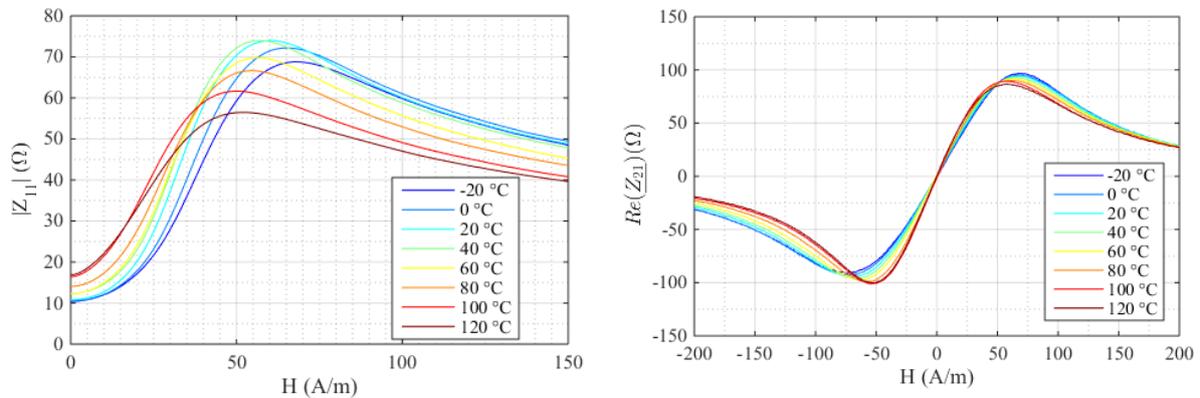


Fig.1. Effet de la température sur les composantes du tenseur d'impédance GMI. Figure de gauche : $|Z_{11}|$.
Figure de droite : partie réelle de Z_{21} en fonction du champ magnétique.

Pour le composant Z_{11} , les résultats ont montré une variation maximale de l'offset, à un champ de polarisation de 30 A / m, de $-0,13$ (A / m) / ° C (soit 170 nT / ° C). La sensibilité à ce champ a augmenté pour des températures comprises entre -20 ° C et $+40$ ° C, puis a diminué (variation maximale de $-0,5\%$ / ° C). Pour la composante off-diagonale, Z_{21} , le changement de l'offset autour du champ nul était plus faible ($-0,015$ (A / m) / ° C ou -19 nT / ° C), tandis que la sensibilité augmentait avec la température d'environ $+0,4\%$ / ° C dans la plage de $[-20$ ° C, 120 ° C].

REFERENCES

- [1] A. A. Chlenova, A. A. Moiseev, *et al.*, *Sensors*, 17(8), 1900; 2017.
- [2] L. V. Panina, *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater. In press*, doi: 0.1016/j.jmmm2017.11.057.
- [3] N. A. Yudanov *et al.*, *Phys. Status Solidi A*, 213(2), pp. 372–376, 2016.
- [4] J. Nabias, Thèse de doctorat, Communauté Université Grenoble Alpes, février, 2018.



EFFET DE L'EXCENTRATION DU CONDUCTEUR ET DES CHAMPS PERTURBATEURS SUR LA REPOSE D'UN CAPTEUR DE COURANT GMI

Julie Nabias¹, Aktham Asfour¹, and Jean-Paul Yonnet¹

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP¹, G2Elab, 38000 Grenoble, France

aktham.asfour@g2elab.grenoble-inp.fr

RÉSUMÉ

Cet article présente un modèle analytique qui permet d'expliquer l'effet de l'excentricité du conducteur d'intérêt par rapport au centre d'un capteur de courant GMI (Magnéto-Impédance Géante) de structure toroïdale. Le modèle développé permet aussi de prendre en compte l'effet d'autres perturbations magnétiques comme le champ magnétique terrestre et les champs magnétiques créés par d'autres conducteurs environnant. Les résultats montrent que ces différents effets se traduisent par une déformation de la réponse du capteur due à l'inhomogénéité du champ le long de l'élément sensible.

MOTS-CLEFS : *GMI (Magneto-Impédance Géante) ; capteur de courant, excentration, champ perturbateur.*

1. INTRODUCTION

La Magnéto-Impédance Géante (GMI) peut être utilisée pour le développement de capteurs de courant électrique. Ces capteurs mesurent le champ magnétique produit par le conducteur véhiculant le courant à mesurer. Dans une configuration toroïdale du capteur, l'élément sensible GMI (un fil par exemple) entoure le conducteur d'intérêt [1] & [2]. Ce conducteur peut facilement être excentré par rapport au centre du capteur, ce qui entraîne une modification de la réponse du capteur et, par conséquent, des erreurs de mesure. Des effets similaires peuvent être rencontrés lorsque le capteur est soumis à des champs magnétiques parasites environnants tels que le champ terrestre et ceux produits par d'autres conducteurs à proximité immédiate. Le but de ce travail est de proposer un modèle analytique pour expliquer l'effet de l'excentricité du conducteur et d'autres perturbations magnétiques sur la réponse du capteur de courant GMI.

2. MODELE DEVELOPPÉ ET RESULTATS

Dans le cas d'un conducteur centré, le champ magnétique produit par le courant mesuré est uniforme le long de l'élément sensible et une courbe GMI de référence typique du fil entier est obtenue. Cette réponse est modifiée lorsque le conducteur est excentrique. Le modèle analytique développé permet de prédire cette réponse modifiée. Il est basé sur le calcul du champ magnétique, produit par le conducteur excentrique, le long du fil sensible. Ce champ inhomogène entraîne une nouvelle réponse GMI qui est calculée et prédite par le modèle. A titre d'exemple des résultats obtenus, la Fig. 1 illustre

¹ Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes.

une courbe de référence GMI (en termes de tension mesurée aux bornes de l'élément sensible) obtenue lorsque le conducteur est centré et la courbe calculée lorsque le conducteur est excentré.

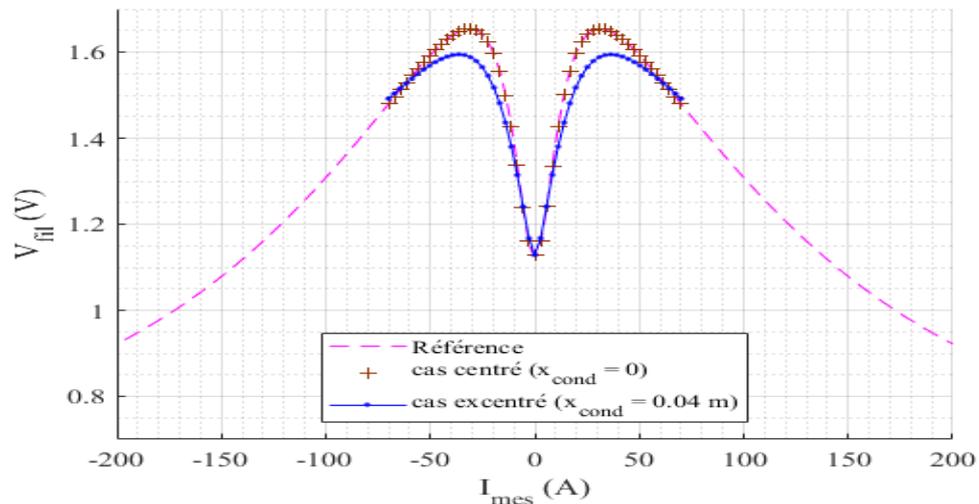


Fig.1: Réponse du capteur dans le cas d'un conducteur centré (courbe de référence) et dans le cas d'un conducteur excentré (courbe prédite par le modèle analytique). I_{mes} est le courant mesuré.

La Fig. 2 montre les résultats expérimentaux où l'on peut voir que la courbe mesurée est considérablement déformée. Cette déformation, qui ne peut évidemment pas être expliquée par la seule excentricité, peut être attribuée à l'effet du champ magnétique terrestre. Cela a été confirmé par le modèle qui a été étendu pour prendre également en compte l'effet d'un champ magnétique environnant sur la réponse GMI.

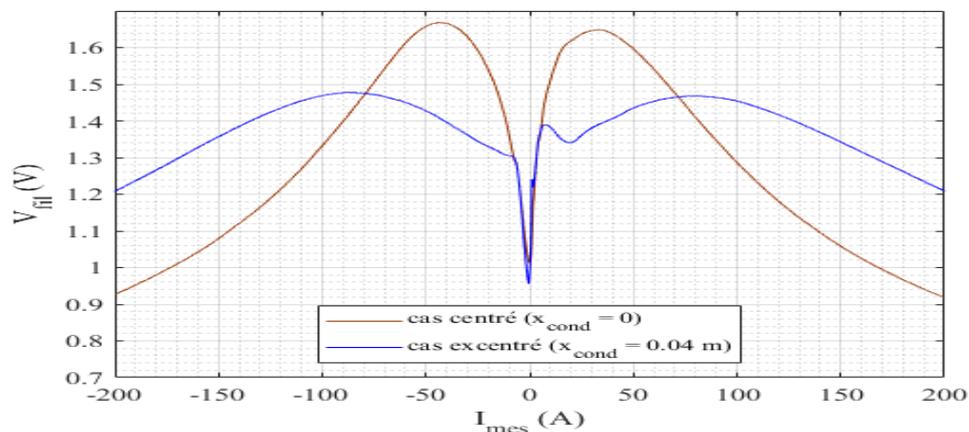


Fig.2: Réponse du capteur dans le cas d'un conducteur centré (courbe de référence) et dans le cas d'un conducteur excentré (courbe mesurée). I_{mes} est le courant mesuré.

En conclusion, le modèle analytique montre clairement que c'est l'inhomogénéité du champ magnétique, due à diverses origines de perturbation, le long de l'élément sensible qui est responsable de la déformation de la réponse GMI.

RÉFÉRENCES

- [1] B. Fisher, L. V. Panina, N. Fry, et D. J. Mapps, *IEEE Trans. Magn.*, 49(1), p. 89-92, 2013.
- [2] A. Asfour, J.-P. Yonnet, et M. Zidi, *J. Sens. Technol.*, 2(4), p. 165, 2012.