



# Pince électromagnétique pour l'application d'un couple au niveau moléculaire

Simon Buy<sup>1</sup>, Christophe Coillot<sup>1</sup>, Christophe Goze-Bac<sup>1</sup>, Francesco Pedaci<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Charles Coulomb UMR 5221, Université de Montpellier, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier, France

<sup>2</sup>Centre de Biochimie Structurale, Université de Montpellier, CNRS, INSERM, 29 rue de Navacelles, 34090 Montpellier, France  
[simon.buy@outlook.com](mailto:simon.buy@outlook.com)

## RÉSUMÉ

Nous présentons ici le principe d'une pince électromagnétique qui permet la création d'un champ magnétique tournant localisé. Ce système est destiné à l'étude du couple développé par le moteur flagellaire de la bactérie *Escherichia coli* (*E. coli*). Il est possible de mesurer ce couple en appliquant un champ magnétique tournant à une micro-bille superparamagnétique accrochée à un flagelle de la bactérie.

Le champ magnétique tournant est réalisé grâce à deux électroaimants alimentés par des courants de même intensité mais déphasés temporellement de 90°. Il est concentré au plus proche de la bactérie grâce à une armature en ferrite.

**MOTS-CLEFS:** pince électromagnétique ; champ tournant ; mesure du couple ;

## 1. INTRODUCTION

L'utilisation par certains complexes protéiques, d'un flux de proton pour produire un mouvement de rotation et un couple est appelée transformation mécano-chimique. Chez les procaryotes ce complexe est le doublet rotor-stator du moteur flagellaire [1]. On peut mesurer ce couple en étudiant le mouvement d'une micro-bille superparamagnétique attachée à l'un des flagelles plongés dans un milieu visqueux. Sous l'action du champ magnétique tournant d'un angle  $\theta_0$  la bille s'oriente selon un angle  $\theta$ . Le couple exercé par le champ sur la bille est directement lié à la différence angulaire  $\Phi = \theta_0 - \theta$  [2]. En étudiant les différentes valeurs de ce couple on en déduit les valeurs du couple résistant exercé par le moteur flagellaire.

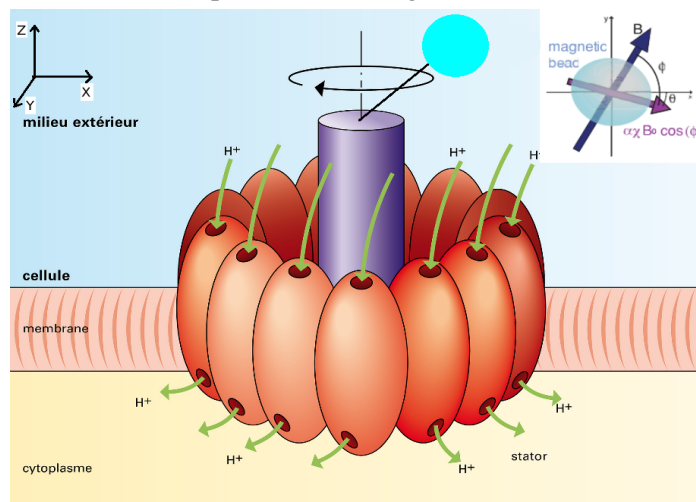


Fig. 1 : Bille superparamagnétique fixée au rotor du moteur flagellaire [1]

## 2. PINCE ÉLECTROMAGNÉTIQUE ET CHAMP TOURNANT

Pour permettre l'étude du couple développé par le moteur flagellaire dans différentes conditions (flux de proton, taille de la bille, viscosité du milieu...) nous devons moduler la vitesse de rotation du champ de quelque dizaines de radian par seconde à quelque dizaines de kilo, le tout pour une intensité de champ de 150mT au niveau de la bille superparamagnétique. Pour cela il nous faut deux électroaimants pouvant chacun développer un champ  $B_{gap}=300mT$  (1) dans l'entrefer.

$$B_{gap} \simeq \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{l_{gap}} = 300 mT \quad (1)$$

Le design retenu pour atteindre une telle valeur de champ est  $N=200$  spires et  $I=2.5$  Ampères. Le tout enroulé autour d'une armature en ferrite 3C90 qui permet de contenir et concentrer les lignes de champs. Pour fournir une telle intensité de courant sur une plage de fréquence de 20 Hz à 20 kHz, le circuit utilisé est composé d'amplificateurs opérationnels LT1006 montés en parallèle.

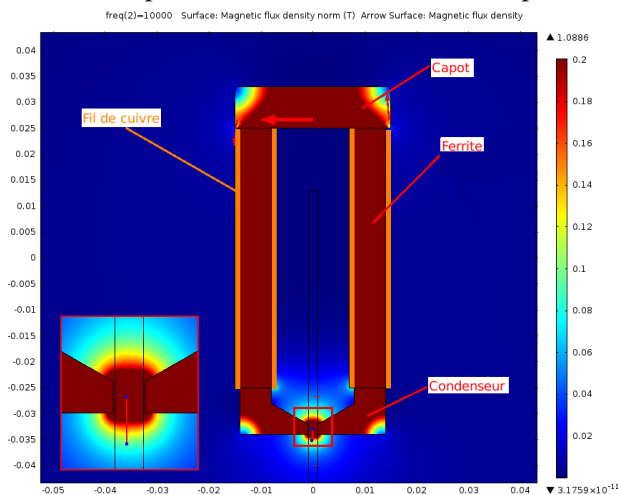


Fig. 2 : Simulation Comsol 2D du champ magnétique créé par un électroaimant

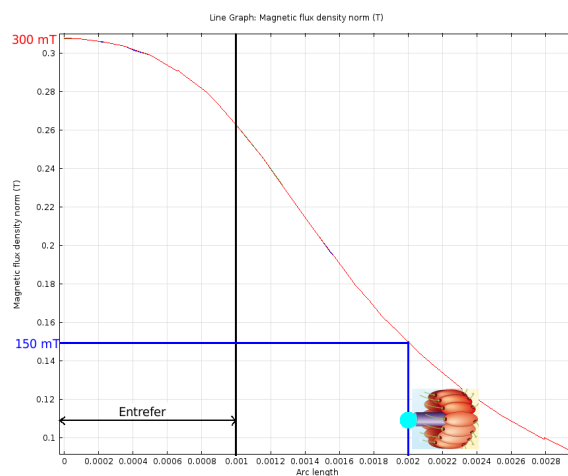


Fig.3 : Évolution du champ magnétique en fonction de la distance à l'entrefer

## 3. PROBLÈMES

Même si la résistance propre de la bobine n'est pas très élevée, les courants relativement importants qui la traverse entraînent un échauffement par effet Joule non négligeable. Ce système étant utilisé pour l'étude de cellules dépendantes de leur environnement, le facteur échauffement doit être contrôlé.

L'impédance totale des électroaimants varie fortement en fonction de la fréquence du signal imposé à leurs bornes. Pour maintenir le courant, et donc le champ dans l'entrefer, constant en fonction de la fréquence du signal, l'alimentation doit être asservie aux variations d'impédances des électroaimants.

## CONCLUSION

Ce système permettant la création d'un champ variant de façon spatiotemporelle sera utilisé pour manipuler mécaniquement un moteur flagellaire appartenant à une cellule bactérienne vivante. Cela va nous permettre de mieux connaître la dynamique interne de ce nano-moteur et de mieux comprendre comment il fonctionne.

## RÉFÉRENCES

- [1] Michel BORNENS, Matthieu PIEL, « MOTILITÉ, biologie ». In Universalis éducation [en ligne]. Encyclopædia Universalis, consulté le 28 avril 2016. Disponible sur <http://www.universalis-edu.com/encyclopedia/motilite-biologie/>
- [2] Francesco Mosconi, Jean François Allemand, "Soft magnetic tweezers: A proof of principle", (2011)



# CAPTEURS MAGNETIQUES & ELECTRIQUES A HAUTE SENSIBILITE : ETAT DE L'ART ET APPLICATIONS AU REGARD DE DEVELOPPEMENTS REALISES AU GREYC

**Christophe Dolabdjian**

GREYC, UMR 6072, UCN, ENSICAEN, 6 Bd Maréchal Juin  
CS 45053 14050 Cedex 4 Caen, France

[christophe.dolabdjian@unicaen.fr](mailto:christophe.dolabdjian@unicaen.fr)

## RÉSUMÉ

L'objet de cette contribution est de présenter l'état de l'art des développements des capteurs magnétiques, et dans une moindre mesure électriques, dits à haute sensibilité. Pour cela, une revue des principaux capteurs et de leurs performances, notamment, en termes de bruit équivalent en champ sera donnée. Des technologies de rupture plus récentes seront présentées. Le principe de fonctionnement de quelques capteurs, tels les MR, GMI et Magnéto(Elasto)Electrique, sera expliqué. Le niveau de bruit intrinsèque de ces dispositifs sera clarifié afin de fixer plus clairement les limites de détection. Dans une seconde partie, des exemples d'applications seront donnés afin de mettre en avant les contraintes associées à ces développements. Cette présentation s'appuiera notamment sur les travaux menés au GREYC depuis un certain nombre d'années dans le domaine.

**MOTS-CLEFS :** *Capteurs magnétiques ; Magnétométrie fine ; Faible bruit*

## 1. CAPTEURS

Il existe un bon nombre de capteurs magnétiques. Leurs performances et domaines d'usages sont variés et dépendent de multiples paramètres ou contraintes qui dépassent parfois les problèmes technologiques.

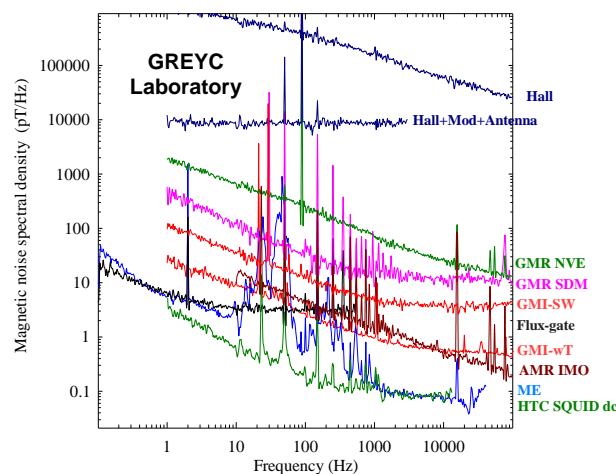


Fig. 1 : Niveau de bruit équivalent en champ de dispositifs caractérisés au GREYC.

Cette présentation fera l'état des performances des principaux dispositifs de détection. Un focus sera fait sur les résultats obtenus au GREYC (cf. figure 1) [1, 2, 3, 4].

## 2. APPLICATIONS

L'accent sera mis sur le niveau de bruit équivalent en champ à 1 Hz. Ce dernier reste à ce jour une valeur clef pour l'accès à certains développements comme le montre la figure 2 (cf. point jaune au centre de la figure). Il est à noter que d'autres paramètres sont à considérer dès lors que ce niveau de bruit est atteignable. Une étude rigoureuse des performances requises est donc à prendre en compte en fonction de l'application visée.

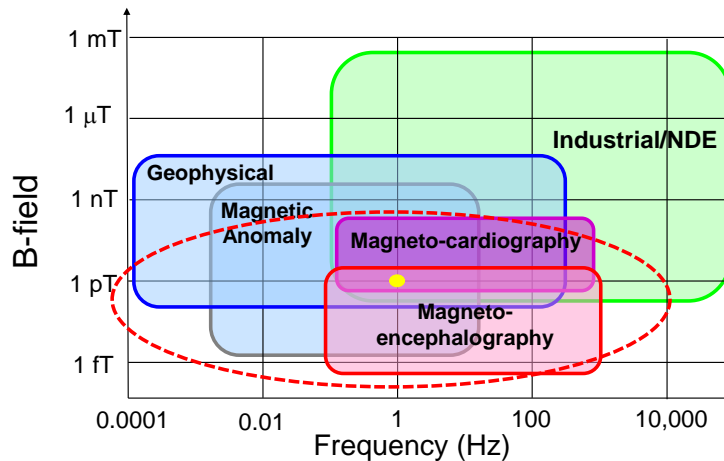


Fig. 2 : Principaux champs d'applications en magnétométrie fine et performances de détection attendues [5].

## CONCLUSION

Cette présentation vise à décrire, dans une certaine mesure, l'état des développements actuels tant en termes de technologies que d'applications et, d'apporter des éléments de réflexion sur les recherches et les perspectives en magnétométrie fine.

## RÉFÉRENCES

- [1] A.Qasimi, C.Dolabdjian, D.Bloyet, IEEE Sensors Journal, 4(1), 160-166(2004)
- [2] C.Dolabdjian, S.Saez, D.Robbles, C.Bettner, U.Loreit, F.Dettmann, G.Kaiser, A.Binneberg, Inst. Phys. Conf. Ser. Num. 167, 441-444(1999)
- [3] B.Dufay, S.Saez, C.Dolabdjian, A.Yelon, D.Menard, IEEE Sensors Journal, 13(1), 379-388(2013)
- [4] C.Dolabdjian, S.Saez, A.Yelon, D.Menard, ICMAS'T13 Conference, 17 - 19 September, Prague (2013)
- [5] X.Zhuang, M.Lam, C.Dolabdjian, P.Finkel, J.Li, D.Viehland, IEEE Sensors Journal, 14(1), 150-158(2014)
- [6] X.Zhuang, C.Cordier, S.Saez, M.Lam Chok Sing, C.Dolabdjian, J. Gao, J.Li, D.Viehland, Appl. Phys Letters, 109, 124512(2011)
- [7] X.Zhuang, M.Lam, C.Dolabdjian, Y.Yang, P.Finkel, J.Li, D.Viehland, IEEE Sensors Journal, 15(3), 1575-1587(2015)
- [8] P. Ripka, "Magnetic Sensors and Magnetometers", Artech, (2001)



## Imaging magnetism at the nanoscale with a single spin microscope

Vincent Jacques

*Laboratoire Charles Coulomb, Université de Montpellier and CNRS,  
34095 Montpellier, France*

In the past years, it was realized that the experimental methods allowing for the detection of single spins in the solid-state, which were initially developed for quantum information science, open new avenues for high sensitivity magnetometry at the nanoscale. In that spirit, it was recently proposed to use the electronic spin of a single nitrogen-vacancy (NV) defect in diamond as an atomic-sized magnetic field sensor [1,2]. This approach promises significant advances in magnetic imaging since it provides non-invasive, quantitative and vectorial magnetic field measurements, with an unprecedented combination of spatial resolution and magnetic sensitivity under ambient conditions. In this talk, I will show how scanning-NV magnetometry can be used as a powerful tool for fundamental studies in nanomagnetism, focusing on magnetic vortices in ferromagnetic dots [3] and domain walls in ultrathin ferromagnetic wires [4]. Applications in the fields of quantum information science and biology will also be discussed.

[1] G. Balasubramanian *et al.*, *Nature* **455**, 648 (2008), J. Maze *et al.*, *Nature* **455**, 644 (2008).

[2] L. Rondin *et al.*, *Rep. Prog. Phys.* **77**, 056503 (2014).

[3] L. Rondin *et al.*, *Nat. Commun.* **4**, 2279 (2013).

[4] J.-P. Tetienne *et al.*, *Science* **344**, 1366 (2014), *Nat. Commun.* **6**, 6733 (2015).

# CONCEPTION ET TEST DE MAGNETOMETRES POUR LA NAVIGATION

Augustin Jouy<sup>1,2,3</sup>, Malik Mansour<sup>1</sup>, Henri Jaffres<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 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

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

<sup>3</sup> Sysnav, 57 Rue de Montigny, 27200 Vernon, France

[augustin.jouy@lpp.polytechnique.fr](mailto:augustin.jouy@lpp.polytechnique.fr)

## RÉSUMÉ

Nous présentons des résultats préliminaires portant sur le développement, la fabrication et l'étude de deux dispositifs de mesure magnétique : magnétomètre et gradiomètre, exploitant les phénomènes de magnétorésistance anisotrope (AMR) et de magnétorésistance géante (GMR) et destinés à des applications de navigation magnéto-inertielle.

**MOTS-CLEFS :** *AMR ; Magnétomètre ; Gradiomètre ; Concentrateur magnétique.*

## 1. INTRODUCTION

La navigation magnéto-inertielle, technologie émergente développée par la société Sysnav, nécessite une mesure précise du champ magnétique local et de son gradient [1]. Les qualités requises pour une telle application sont un faible bruit à basse fréquence, une faible dérive en température, une très bonne linéarité ainsi qu'une bonne sensibilité auxquelles s'ajoutent les contraintes liées aux systèmes embarqués comme une faible consommation ainsi qu'une taille réduite. Le fort potentiel d'intégration des dispositifs spintroniques a motivé le choix de cette technologie de capteur. L'étude menée conjointement par la société Sysnav, l'Unité Mixte de Recherche en Physique (CNRS/Thales) et le Laboratoire de Physique des Plasmas vise donc à identifier le meilleur candidat pour l'application visée.

## 2. CAPTEURS AMR

Nous avons développé, fabriqué et testé un premier dispositif de mesure magnétique basé sur la technologie AMR. Le capteur (Fig.1) met à profit l'anisotropie de forme d'un réseau de barreaux résistifs de Permalloy montés en série afin de définir une direction d'aimantation stable [2]. Ce réseau de barreaux est assemblé sous la forme d'une structure en pont. Les barreaux sont ensuite recouverts d'une structure de type « barber-poles » qui assure que la direction du courant forme un angle de 45° avec l'aimantation et ce, afin de maximiser la sensibilité et la linéarité du capteur à faible champ. Nous présentons les premiers résultats de la performance de ce capteur en termes de résolution en champ.

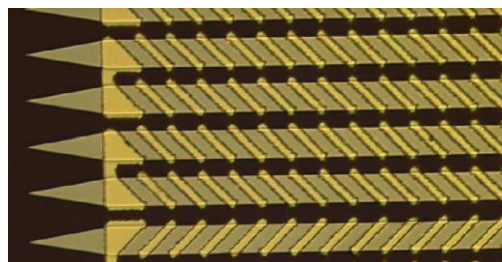
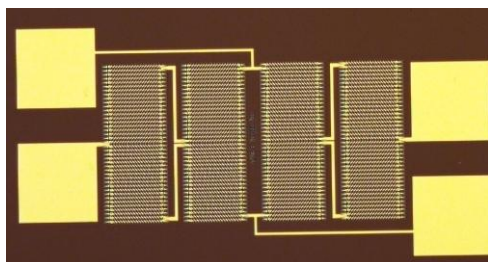


Fig. 1 : Vue d'ensemble d'un capteur AMR (à gauche) et détail de la structure « barber-poles » (à droite).

### 3. GRADIOMETRE

Les magnétomètres AMR développés sont ensuite utilisés comme cellules de base pour l'élaboration de gradiomètres optimisés pour la mesure des variations magnétiques (Fig.2). L'utilisation de gradiomètres plutôt qu'un ensemble de magnétomètres espacés présente l'avantage de parfaitement aligner les capteurs et évite de dédoubler l'amplification/numérisation. Ici une structure en pont de Wheatstone est à nouveau utilisée et placée de manière à ce que la différence de potentiel mesurée soit proportionnelle au gradient. Enfin une géométrie innovante de concentrateur magnétique (Fig.2) dont la forme est adaptée pour maximiser l'amplification du gradient est implémentée. Nous présentons des résultats préliminaires de mesures et de simulations numériques portant sur ces nouvelles structures.

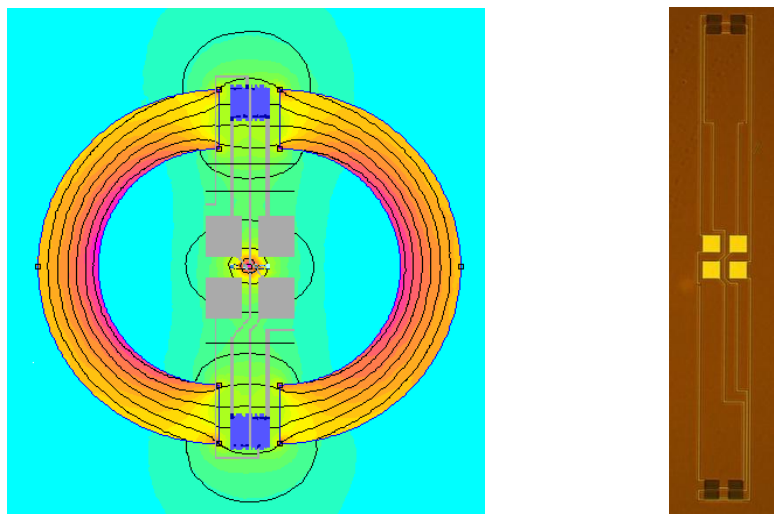


Fig. 2 : Modélisation d'un concentrateur magnétique pour gradiomètre (à gauche) et Vue d'ensemble d'un gradiomètre AMR (à droite).

### CONCLUSION

Dans le cadre d'une étude visant à concevoir et à caractériser un dispositif innovant de mesure magnétique adapté à la navigation magnéto-inertielle, on présente les premiers résultats portant sur des dispositifs de mesure de type AMR.

### REFERENCES

- [1] D. Vissiere, A. P. Martin et N. Petit, *Using magnetic disturbance to improve imu-based position estimation*, **9th European control conf.** (2007).
- [2] T. R. McGuire et R. Potter, *Anisotropic magnetoresistance in Ferromagnetic 3d alloys*, **IEEE Transactions on magnetics.** (1975).
- [3] W. C. Griffith, R. Jimenez-Martinez, V. Shah, S. Knappe and J. Kitchnig. *Miniature atomic magnetometer integrated with flux concentrators*. **Appl. Phys. Lett.** (2009).



# Environment smart sensors as cyberphysical devices

Bao Hoai Lam  
 Université de Bretagne Occidentale,  
 LAB-STICC, UMR CNRS 6285  
 Email: bao-hoai.lam@uinv-brest.fr

Bernard Pottier  
 Université de Bretagne Occidentale,  
 LAB-STICC, UMR CNRS 6285  
 Email: pottier@uinv-brest.fr

**Abstract**—Smart sensors for environment integrates physical interfaces and calculation aspect. They demonstrate a feedback loop between sensor decisions and environmental factors: the node can control environments and vice versa. We describe practical cases where an high performance smart vision sensor will achieve insect recognition, and we discuss possible interactions such as attraction of variety of insects in different angles or range, by emitting different kind of lights. Such nodes have cyberphysical characteristics, they can be networked, and are valuable for evaluating biology behaviour.

Wireless Sensor Network (WSN) can observe natural phenomena constituting *bio-environmental surveillance network* [2]. They are a kind of cyber physical system[1], where a physical system is observed and controlled by a distributed system through sensing interfaces.

## I. SMART SENSOR NODE FOR BIO-DIVERSITY RECOGNITION

### A. Description

Automatic observation of living species is on the agenda for several reasons. First, it is fear for effects of climate change and intensive activities on these species, and it is important to understand what the evolution of the situation is. Second, there is a significant development of species without predators which unbalance some environments. For example, insect pests cause extensive damage in several tropical countries: brown planthoppers in Vietnam, or locusts in Africa.

The automatic observation of these species using WSN approach leads to an architecture of a smart sensor node for bio-diversity recognition (fig. 1). The architecture follows the principle described in fig. 3. Main cores of the sensor node is a smart vision sensor (camera) and a trap to catch insects.

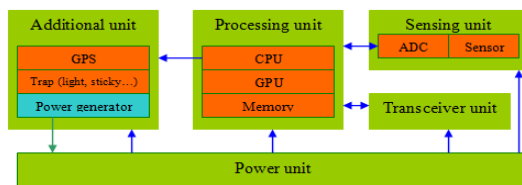


Fig. 1. Architecture of a smart sensor node for bio-diversity recognition.

### B. Smart vision sensor

1) *Architectures*: Fig. 2a illustrates the architecture of widespread cameras used in mobile phones. They are inexpensive and follow standardization of access interfaces. In

principle, a camera has a sensor matrix which is isolated with a processing unit. A micro-controller can control the structure of the image, resolution, acquisition speed in frames per second. This affects the quality of videos relevant to the end user.

Other cameras for industrial controls integrate the processor (a parallel processor) and the sensor array (fig. 2b). The analysis can thus be carried out directly into the camera without rendering image format. These cameras can recognize tens of thousands of objects per second, without significant energy expenditure and allow the development of machine learning techniques.

Halfway between these two techniques, devices in figure 2c) are able to control the acquisition of image segments by sending them directly to a graphics accelerator.

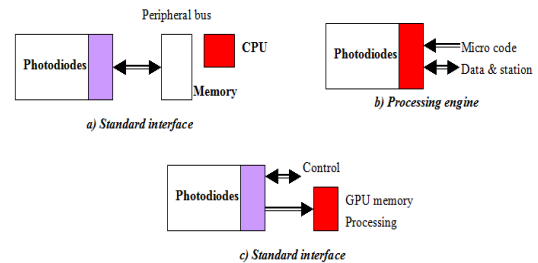


Fig. 2. 3 vision approaches: standard camera, high performance intelligent camera, camera integrates with a graphical processing unit (GPU).

The paper focuses on using the latest generation of physical media to recognize small objects such as insects. In fact, it is a dynamic recognition technology next to the limits of this equipment: cameras coupled with direct access by fast bus parallel graphics accelerators memories. The technology uses on-board, miniature, but powerful equipments and develops original parallel algorithms for tracking multiple targets with complex shapes.

2) *Algorithms*: In addition to choosing an architecture for a class of biodiversity problems, it is necessary to decline algorithms and programs. The architecture of GPUs is data parallelism [3] of which varying aspects relate to the memory capacity, the number of processors, feed rates. Basically, a vision algorithm consists of a finite number of following procedural elements:

- Parallel computations without general dependencies. They are done by taking a few local elements on an



interval  $[i-d1, d2 + i]$  to produce a result of  $i$ . These calculations can be 1D (which is the case here) or 2D.

- Reduction calculations. They are desired to produce an overall value from a vector of values  $x_i$ . These reductions lead to tree calculations, for example, a width of 1024 may be reduced in 10 steps with a complexity of  $\log n$ .
- Pipeline calculations where they drain a vector of size  $n$  with a complexity of  $n$ .

### C. Bio-diversity trap example

Insect trap (bio-diversity trap) is a trap to monitor behaviors of insects and other arthropods. It is able to reduce their populations and thanks to the data collection from the trap, people can know better the situation of their crops.

The actuator in the trap is the main factor that change insect behaviors. For example, light bulb in a light trap simulates insects due to their phototactics. Indeed, the structure of compound eyes of insects influences their spectral sensitivities such as yellowish devices with planthoppers, leafhoppers, aphids, whiteflies and leafminer flies [4][5].

In addition, a bio-diversity trap is a sensing device by having its own sensing range. For example, in light trap, the sensing device relies on several factors, from different light traps to lunar phases [6].

- Although the luminous intensity of an artificial light (candela) is theoretically constant, the change of voltage may modify some parameters of the light such as life cycle, power input, and luminous efficiency.
- The illumination of environments (time and span of twilights, the periodical changes of the Moon, light pollution) may be integrated with the intensity of the light as well. This illumination may be calculated upon the geographical position, the season of the year or during one night.

The sensing range of a light trap can be calculated as [6]:

$$r = \sqrt{\frac{I}{ES + EM + EN + ELp}} \quad (1)$$

Where

- $r$ : sensing radius.
- $I$ : illumination from the lamp.
- Denominator: illumination from the environment consists of the rising sun, the moon, the starry sky and the light pollution. For example, the sensing radius for 125W mercury vapour lamp [7] is 35m at a Full Moon, 518m at a New Moon. Another example [8] is that a 125W HPL light source has the sensing radius of 70m at a Full Moon and 830m at a New Moon.

## II. CONCLUSION

A smart sensor node in a bio-environmental surveillance network is a device which can estimate and control environmental factors. Estimation can lead to influence the environment neighborhood to measure some characteristics. Mutual influences bring a feedback loop between the sensor node and

surrounding conditions. The loop is depicted in the following model (fig. 3)

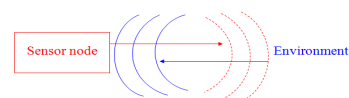


Fig. 3. The interaction between a smart sensor node and environment in a bio-environmental surveillance network.

We advocate a design method based on networked smart sensor nodes acting as cyber physical device, able to manage interactions between the information system and the physical aspects. Local analysis is supported by an architecture for high performance vision suitable to handle insect recognition using parallel algorithms.

Many applications can benefit from the integrated vision, or the acquisition of other variables such as sound. It is known that physical measurements often depend on several basic parameters, and sensors may also affect these measurements. For instance, it is possible to emit light signals of different colors and different intensities to sound environment. It is also possible to rotate the light signals, a camera, a microphone or a speaker. It can be seen that measurements, control devices, recognition, form an indivisible whole which can be classified in the cyber-physical domain.

## REFERENCES

- [1] Edward A. Lee, *CPS Foundations*. In Proc. of the 47th Design Automation Conference (DAC), ACM, pp. 737-742, 2010.
- [2] Bao Hoai Lam, Hiep Xuan Huynh and Bernard Pottier *Synchronous networks for bio-environmental surveillance based on cellular automata*. In EAI Endorsed Trans. Context-aware Syst. & Appl. 3(8): e5, 2016.
- [3] Hillis, W. Daniel and Steele, Guy L., *Data Parallel Algorithms*. In Communications of the ACM, Volume 29 Issue 12, 1986
- [4] Vaishampayan SM, Kogan M, Waldbauer GP and Wooley JT, *Spectral specific responses in the visual behaviour of the greenhouse whitefly, Trialeurodes vaporariorum*. In Entomologia Experimentalis et Applicata Volume 18, Issue 3, pages 344–356, 1975.
- [5] Esker PD, Obrycki J and Nutter FW, *Trap height and orientation of yellow sticky traps affect capture of Chaetocnema pulicaria (Coleoptera: Chrysomelidae)*. In Journal of Economic Entomology 97(1):145-149. 2004.
- [6] Nowinszky L. and Puskás J, *Efficiency of light traps in relation the number of caught species*. In International journal of science and nature, vol. 2, pp. 161-167, 2011.
- [7] Bowden, John, *An Analysis of Factors Affecting Catches of Insects in Light-Traps*. In Bulletin of Entomological Research, vol 72, issue 04, ISSN 1473-2670, pp. 535-556, 1982.
- [8] Dufay, C., *Contribution a l'Étude du phototropisme des Lépidopteres noctuides*. In Annales des Sciences Naturelles Zoologie, Paris. 12. 6, pp. 281-406, 1964.



## **INSTRUMENTATION LARGE BANDE A COURANTS DE FOUCAULT POUR LA MESURE DE CONDUCTIVITE ELECTRIQUE DE WAFERS**

**Florent Loete, Yann Le Bihan, Josué Ferreira et Denis Mencaraglia**

GeePs | Génie électrique et électronique de Paris, UMR CNRS 8507, CentraleSupélec,  
Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06  
3 & 11 rue Joliot-Curie, Plateau de Moulon 91192 Gif-sur-Yvette CEDEX, France

florent.loete@geeps.centralesupelec.fr

### **RÉSUMÉ**

Cette communication présente le développement d'un dispositif à courants de Foucault pour la mesure de la conductivité de wafers. Il est basé sur le principe de la réflectométrie avec l'émission d'un signal large bande multifréquence. Cette instrumentation associée à un modèle analytique permet une caractérisation rapide d'une large gamme de semi-conducteurs.

**MOTS-CLEFS** : *contrôle non destructif; capteurs à courants de Foucault; réflectométrie large bande; semi-conducteurs.*

### **1. INTRODUCTION**

La détermination de la conductivité électrique des wafers de semi-conducteurs présente un grand intérêt dans différents domaines tels que le photovoltaïque [1]. La technique de mesure quatre pointes est délicate à mettre en œuvre pour ce contrôle car elle peut endommager le wafer sous test. La technique du contrôle non destructif par courants de Foucault (CF), méthode sans contact, est alors une solution pertinente pour la détermination de la conductivité des wafers. Avec cette technique, les CF induits dans le wafer par une bobine se traduisent par une modification de l'impédance de celle-ci qui peut être détectée selon différents dispositifs électroniques [2-5]. Un inconvénient majeur des systèmes existants est qu'ils reposent sur un principe de fonctionnement monofréquence. Cela réduit la gamme de semi-conducteurs pouvant être caractérisés et est un inconvénient majeur pour le développement et l'optimisation de nouveaux matériaux. Cette communication présente le développement d'un système CF multifréquence large bande présentant une très large gamme de mesure d'épaisseur et de conductivité de wafers.

### **2. SYSTEME DEVELOPPE ET RESULTATS**

L'architecture du dispositif est présentée Fig. 1 [6]. L'impédance de la bobine est déterminée par réflectométrie avec un signal d'excitation multifréquence large bande émis sous forme de bursts. L'émission du signal et la réception de l'onde réfléchi sont assurés par un FPGA. L'impédance présentée en bout de ligne par la bobine est déduite du coefficient de réflexion obtenu. Un modèle analytique de l'interaction bobine-wafer est ensuite utilisé pour estimer la conductivité du wafer. Le système élaboré permet une grande dynamique de fréquences (ex : 10 MHz – 250 MHz) sous forme d'harmoniques, offrant la possibilité de caractériser différents types de wafers. L'émission simultanée des fréquences permet un contrôle rapide et autorise l'observation de transitoires.

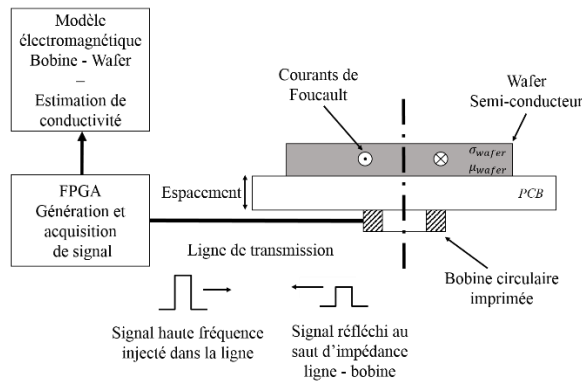


Fig. 1 : Structure du dispositif développé.

La Fig. 2 présente des résultats d'estimation de conductivité obtenus avec le dispositif CF pour 8 wafers couvrant 4 décades de conductivité. La comparaison avec des résultats de référence (mesure quatre pointes) montre la pertinence du dispositif. Les 2 plus faibles conductivités dévient par rapport aux résultats attendus, montrant la nécessité d'utiliser de très hautes fréquences.

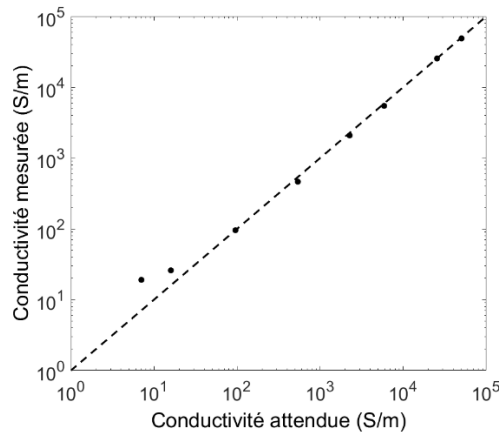


Fig. 2 : Conductivité de wafers estimées par CF en comparaison avec la méthode quatre pointes.

## CONCLUSION

Le dispositif développé permet d'améliorer considérablement la gamme de mesure de conductivité par rapport aux systèmes CF existant.

## REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié du soutien financier du Labex LaSIPS (ANR-10-LABX-0040-LaSIPS) géré par l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre du programme « Investissements d'avenir » (n°ANR-11-IDEX-0003-02).

## RÉFÉRENCES

- [1] S. Dauwe, J. Schmidt, R. Heze, "Very low surface recombination velocities on p- and n-type silicon wafers passivated with hydrogenated amorphous silicon films," Photovoltaic Specialists Conference. Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE, New Orleans, 2002.
- [2] R. A. Sinton, A. Cuevas, "Contactless determination of current voltage characteristics and minority carrier lifetimes in semiconductors from quasi steady state photoconductance data," Appl. Phys. Lett., vol. 69, pp. 2510-2512, 1996.
- [3] C. C. Watson, W. K. Chan, "High-spatial-resolution semiconductor characterization using a microwave eddy current probe," Appl. Phys. Lett., vol. 78, pp. 129-131, 2001.
- [4] G. L. Miller, U.S. patent 4,286,215, 25 August 1981.
- [5] S. W. Johnston, R. K. Ahrenkiel, U.S. patent 6,369,603, 9 April 2002.
- [6] F. Loete, Y. Le Bihan, D. Mencaraglia, brevet FR1553392, 16 avril 2015.



## Etat de l'art des capteurs effet Hall à puits quantiques

Vincent Mosser

*ITRON, Issy Technology Center  
92448 Issy-les-Moulineaux, France*

When properly manufactured, Quantum Well Hall sensors (QWHS) based on heterostructures of III-V semiconductors can be made free from parasitic effects such as backgating, thus achieving an excellent linearity as a function of biasing.

This makes them perfectly suited for the application of dynamic noise/offset cancellation methods such as the so-called Spinning Current Modulation Technique (SCMT).

Recent progress has shown that, when properly implemented, SCMT allows to fully cancel (i) the offset and low-frequency noise of the Hall sensor itself, (ii) the offset and low-frequency noise of its processing electronics, as well as (iii) electromagnetic interferences due to the interconnections even for a remote sensing element as far as 1 m from its processing electronics.

Using AlGaAs/InGaAs/GaAs based Hall sensors and a dedicated electronic circuit, we have developed hybrid Hall microsystems with an excellent linearity in a large dynamic range (6 decades), and white residual noise just above thermal noise  $4kTR$  in a large frequency range extending from mHz up to several kHz. Typical performances are an offset down to 50 nT for a sensor with span +/-25 mT, and a very low thermal drift (<100 ppm/K above 150 K, and flat below this value). Thanks to the remote electronics, these performances can be in principle maintained in harsh temperature or pressure conditions.

The range of targeted applications extends from high accuracy current sensing, to various lab applications involving micromagnetometry. Other sensor types of interest are AlGaN/GaN for very high temperature, or very high mobility InAs/AlSb devices for improved resolution.



# EVALUATION EXPERIMENTALE DE L'EFFET DE LA FLEXION SUR LES MICROFILS AMORPHES DANS LES CAPTEURS A MAGNETO-IMPEDANCE GEANTE (GMI)

Julie Nabias<sup>1</sup>, Aktham Asfour<sup>1</sup>, Jean-Paul Yonnet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univ. Grenoble Alpes, G2Elab, F-38000 Grenoble, France  
CNRS, G2Elab, F-38000 Grenoble, France

[Julie.nabias@g2elab.grenoble-inp.fr](mailto:Julie.nabias@g2elab.grenoble-inp.fr)

## RÉSUMÉ

Cet article présente les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de l'étude de la dépendance à la flexion de la Magnéto-Impédance Géante (Giant Magneto-Impedance, GMI) dans des microfils amorphes largement utilisés pour des applications de capteur magnétique. L'étude a montré que l'effet de la flexion se traduit par une variation de la courbe du module de l'impédance et par une baisse de la sensibilité dans la région des champs faibles. Le phénomène reste néanmoins réversible.

**MOTS-CLEFS :** *Magnéto-Impédance Géante, Giant Magneto-Impedance, GMI ; microfils amorphes ; flexion ; contraintes.*

## 1. CONTEXTE

La composition amorphe des microfils utilisés pour leur effet de Magnéto-Impédance Géante (ou GMI pour Giant Magneto-Impedance) les rend assez flexibles, ce qui en fait de bons candidats pour des applications où ils doivent être déformés pour être alignés avec le champ magnétique à mesurer. Notre étude concerne le comportement en flexion d'un microfil amorphe à base de cobalt fourni par Unitika Ltd. Nous avons étudié l'impact de la flexion sur le fil et la réversibilité du phénomène (i.e. si la courbe caractéristique de la GMI retrouve son état initial après la flexion).

## 2. RESULTATS

Nous avons étudié expérimentalement l'évolution du module de l'impédance «  $|Z|$  » du fil amorphe sous une contrainte de flexion, pour un courant d'excitation d'amplitude 0.7 mA et de fréquence 1 MHz. Le fil de 90 mm de long a été placé dans une gaine flexible. Le champ magnétique externe «  $H$  » a été appliqué grâce à un solénoïde placé autour de la gaine. La caractéristique  $|Z(H)|$  a été obtenue en mesurant l'amplitude de la tension aux bornes du fil avec une détection synchrone.

Quand le fil est fléchi, nous avons remarqué une baisse de la sensibilité dans la région des champs faibles (0 ; 50 A/m) où celle-ci est généralement maximale. La flexion a tendance à diminuer la sensibilité du fil amorphe au champ magnétique extérieur  $H$ . Cette diminution résulte de l'effet conjugué de la traction et de la compression qui sont induites par la flexion [2]. Notre expérience a aussi montré que quand la contrainte est relâchée, la courbe de  $|Z(H)|$  retrouve ses valeurs initiales (Fig. 1.).

Selon nos tests, ce comportement est très répétitif. Quelques solutions pour pallier la baisse de sensibilité causée par la flexion peuvent inclure le recuit sous les conditions appropriées [3]. Cependant, dans ce cas, la flexibilité du fil peut être altérée puisque cette technique pourrait en fait conduire à une cristallisation de certaines parties du fil amorphe.

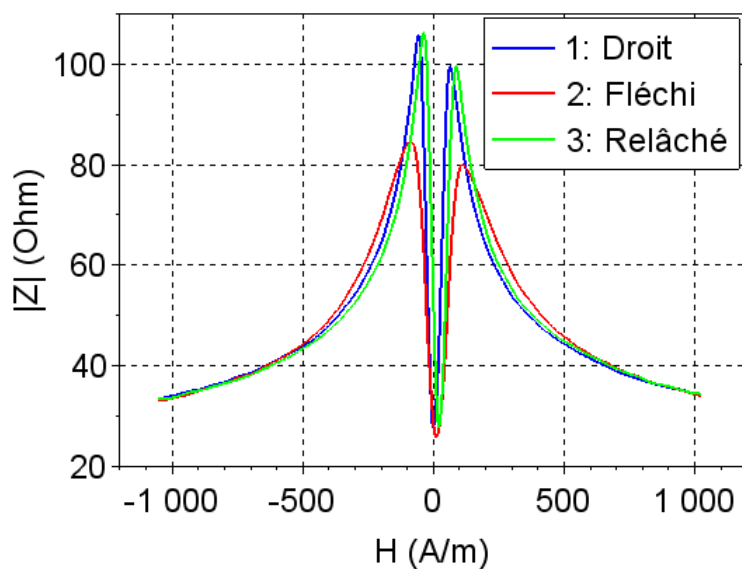


Fig. 1. : Variation de la courbe de  $|Z(H)|$  avec la flexion

#### REFERENCES

- [1] Y.W. Rheem et al., Sensors and Actuators 106 (2003) 19–21
- [2] K. Mohri, T. Uchiyama, IEEE Trans. Magn., vol.38, No.5, (2002) 3063–3068
- [3] Z. Zhan et al., Sensors and Actuators 137 (2007) 64–67



# ÉTUDE EXPERIMENTALE DE LA DÉPENDANCE EN TEMPÉRATURE DE LA MAGNETO-IMPÉDANCE GÉANTE (GMI) DANS DES MICROFILS AMORPHES

Julie Nabias<sup>1</sup>, Aktham Asfour<sup>1</sup>, Jean-Paul Yonnet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univ. Grenoble Alpes, G2Elab, F-38000 Grenoble, France  
CNRS, G2Elab, F-38000 Grenoble, France

[Julie.nabias@g2elab.grenoble-inp.fr](mailto:Julie.nabias@g2elab.grenoble-inp.fr)

## RÉSUMÉ

Cet article présente les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de l'étude de la dépendance de la caractéristique de la Magnéto-Impédance Géante (Giant Magneto-Impedance, GMI) à la température, dans des microfils amorphes utilisés pour des applications de capteur magnétique. Les résultats ont montré un effet non négligeable de la température sur la courbe du module de l'impédance GMI et sur la sensibilité.

**MOTS-CLEFS :** *Magnéto-Impédance Géante (GMI); microfils amorphes; température.*

## 1. CONTEXTE

La dépendance en température de la Magnéto-Impédance Géante (ou GMI pour Giant Magneto-Impedance) est déjà connue pour les rubans et a été mentionnée dans certains travaux de développement de prototypes de capteurs GMI [1], [2]. Cependant, il existe peu d'études sur la dépendance en température dans les microfils amorphes pour une application de capteur GMI. Notre étude porte sur la caractérisation expérimentale de fils amorphes à base de cobalt (Unitika Ltd.), de diamètre 100  $\mu\text{m}$ , qui sont utilisés pour la conception de capteurs magnétiques de haute sensibilité. L'objectif est d'évaluer l'impact de la température, en tant que facteur d'influence sur ce capteur, lors de l'utilisation du capteur dans un environnement réel de mesure.

## 2. RESULTATS

Le protocole de mesure a consisté à placer les microfils à l'intérieur d'une enceinte thermique pour être soumis à des températures allant de  $-20^{\circ}\text{C}$  à  $120^{\circ}\text{C}$ . À l'aide d'un analyseur d'impédance (4294A), nous avons mesuré la courbe du module de l'impédance  $|Z(H)|$  à chaque température dans une gamme de champ allant de  $-150\text{ A/m}$  à  $+150\text{ A/m}$ . Le fil était parcouru par un courant d'excitation d'amplitude 3 mA et de fréquence 1 MHz.

Nous avons observé une variation de l'allure de la courbe avec la température, comme on peut le voir à la Fig. 1. Le module de l'impédance à un point de polarisation donné ( $H=25\text{ A/m}$  à titre d'exemple) (voir Fig. 2.) et la sensibilité augmentent avec la température dans la plage de  $-20^{\circ}\text{C}$  à  $100^{\circ}\text{C}$ . Au-delà de  $100^{\circ}\text{C}$ , ce comportement semble s'inverser.

Cela signifie que pour des applications de capteur GMI, des solutions doivent être mises en place afin de limiter l'influence de la température sur la sensibilité du capteur et sur le décalage (offset) final de mesure.



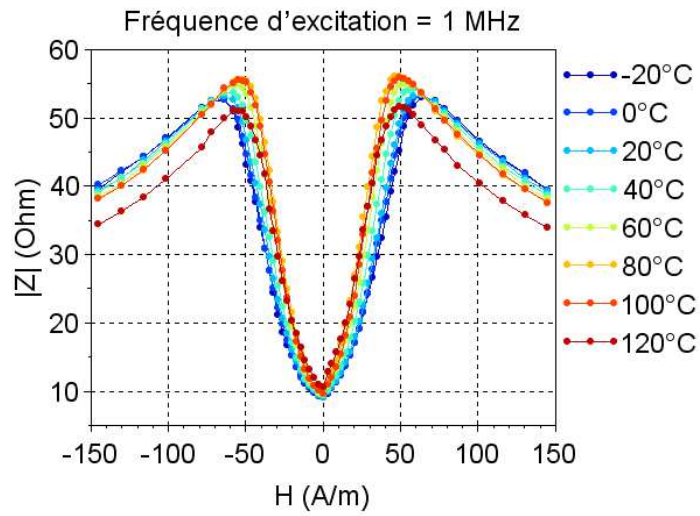


Fig. 1. Module de l'impédance  $|Z(H)|$  pour des températures allant de  $-20^{\circ}\text{C}$  à  $120^{\circ}\text{C}$ . La longueur du fil GMI est d'environ 50 mm.

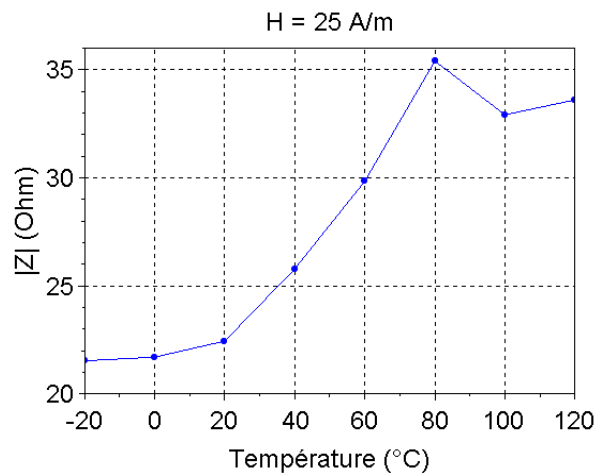


Fig. 2. Module de l'impédance  $|Z(H)|$  en fonction de la température à un point de fonctionnement en champ  $H=25\text{ A/m}$

#### REFERENCES

- [1] M. Malatek et al., Sensors and Actuators A 147 (2008) 415–418
- [2] Y. Honkura, J. Magn. Mater. 249 (2002) 375–381

## **Magnétométrie de l'activité cardiaque et neuronale par électronique de spin**

Myriam Pannetier-Lecoecur

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

L'électronique de spin explore la variation du transport des électrons de conduction en fonction de l'état de leur spin. Il est ainsi possible de modifier la résistance d'un élément en fonction du champ magnétique de son environnement. Cette propriété a été largement exploitée dans les têtes de lecture de disques durs, mais ouvre aussi la possibilité de fabriquer des capteurs magnétiques très sensibles et miniaturisables.

Nous avons développé des capteurs à base de magnétorésistance géante (GMR) issus de principes de l'électronique de spin pour mesurer les champs magnétiques créés par l'activité électrique des cellules du corps humain.

L'association de GMR et de concentrateurs supraconducteurs nous a permis de développer un magnétomètre sensible dans la gamme de femtotesla ( $10^{-15}$ T) au picotesla ( $10^{-12}$ T), et de réaliser des mesures sans contact de l'activité cardiaque à travers sa signature magnétique. Ceci permet une imagerie résolue en temps et non invasive.

Par ailleurs, nous avons développé des sondes GMR miniaturisées pour interroger à l'échelle locale la transmission d'information dans les cellules excitables (cellules musculaires ou neuronales). Les sondes développées, appelées magnétrodes, par analogie avec les électrodes utilisées en électrophysiologie, permettent d'accéder pour la première fois à l'activité neuronale magnétique au sein des tissus et ouvre le champ à un nouveau moyen d'explorer le fonctionnement neuronal : la magnétophysiologie.

Cet exposé présentera les principes généraux de la mesure magnétique par l'électronique de spin, puis l'application d'une part sur la mesure de l'activité cardiaque et d'autre part sur la réponse magnétique neuronale locale.



## DIMENSIONNEMENT & HOMOGENEITE D'UNE SONDE INDUCTIVE RF POUR L'IMAGERIE PAR RESONANCE MAGNETIQUE

Pauline de Pellegars<sup>1</sup>, Eric Native<sup>2</sup>, Corinne Lautier<sup>3</sup>, Christophe Goze-Bac<sup>1</sup> et Christophe Coillot<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Charles Coulomb (L2C-UMR5221), Plateforme BioNanoMRI, Université de Montpellier, 34095 Montpellier

<sup>2</sup> Institut d'Electronique et Systemes (IES), Université de Montpellier, 34095 Montpellier

<sup>3</sup> MMDN (INSERM1198), Université de Montpellier, 34095 Montpellier

Pauline.de-pellegars@etu.umontpellier.fr

### RÉSUMÉ

En Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) la qualité des images résulte de la combinaison entre l'intensité du champ magnétique  $B_0$  et la qualité de la sonde RF. Cette dernière résulte de ses performances en termes de Rapport Signal à Bruit (RSB) et d'homogénéité. Le RSB est inhérent à l'adéquation entre la taille de la sonde et celle de l'échantillon tandis que l'homogénéité sera liée à la disposition des conducteurs électriques.

**MOTS-CLEFS :** sonde RF, homogénéité, modèle électrique, blindage

### 1. INTRODUCTION & PROBLÉMATIQUE

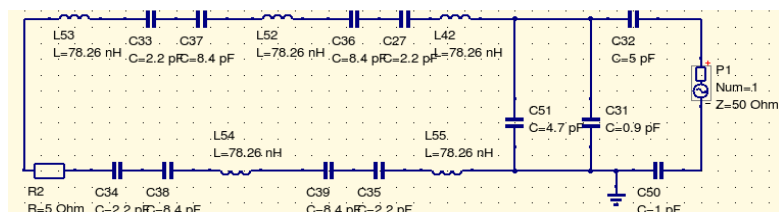
L'IRM est un outil très puissant pour les investigations biologiques. Néanmoins, la qualité de résolution des images de la qualité de l'antenne/sonde RF utilisée à la fois pour exciter les spins et pour les détecter. Comment dimensionner une sonde RF pour en obtenir les meilleures performances ?

Pour les besoins d'une étude sur les acouphènes menée sur des rats, une antenne casque hémisphérique, commercialisée par la société ExtendMR, était utilisée. Cependant cette antenne présente des pertes de signal visibles en profondeur. C'est cette contrainte sur l'homogénéité qui nous a conduit à développer une sonde RF, de type bobine selle, pour l'IRM.

### 2. MODÈLE ÉLECTROCINÉTIQUE D'UNE SONDE DITE « BOBINE SELLE »

La bobine selle est une conformation particulière des bobines Helmholtz sur un tube cylindrique (Fig 1 – à gauche). La bobine selle (ou « saddle coil ») se comporte comme un circuit RLC résonant (Fig 1 – à droite) qui doit être **accordé** à la fréquence de précession des spins. L'IRM de la Plateforme BioNanoMRI possède un champ de 9,4 T et le noyau d'intérêt est celui de l'hydrogène, par conséquent la fréquence d'observation, dite de Larmor, ( $f_0$ ) est alors d'environ 400 MHz (puisque  $\omega_0 = -\gamma B_0$  avec  $\gamma = 42.57 * 2 * \pi$  pour le noyau d'hydrogène). L'impédance de l'antenne doit

également être **adaptée** à l'impédance standard de 50 ohms pour minimiser la puissance réfléchiée. Les éléments du circuit équivalent de la sonde et de son circuit d'accord-adaptation seront discutés.



### Fig 1 : Bobine selle & Modélisation électrique de la bobine selle

La sonde est finalement équipée d'un blindage électrostatique qui permet de s'affranchir des perturbations et notamment de l'influence de la présence de l'opérateur lors des phases d'accord-adaptation de l'antenne. Cependant, la présence d'un blindage autour de l'antenne modifie le champ magnétique produit par la sonde (champ dit «  $B_1$  »), ce qui impacte à la fois la valeur de L et de R. Une simulation sous COMSOL (logiciel de simulation multiphysique) a permis de valider un modèle d'évolution du champ  $B_1$  en fonction du rayon du blindage [1].

### 3. ETUDE DE L'HOMOGENÉITÉ DE LA BOBINE SELLE

Pour l'étude de l'homogénéité de l'antenne type saddle coil nous avons comparé un modèle analytique donnant l'intensité du signal en fonction de la cartographie de  $B_1$  et du type de séquence d'imagerie [2] à des images obtenues sur un fantôme ajusté à l'antenne (fabriqué sur mesure par imprimante 3D) dans l'IRM 9.4T (cf. Fig.2). Ces résultats montrent une zone d'homogénéité de l'image confortable. La validité du modèle dans le cas d'une séquence IRM d'écho de spin sera discutée.

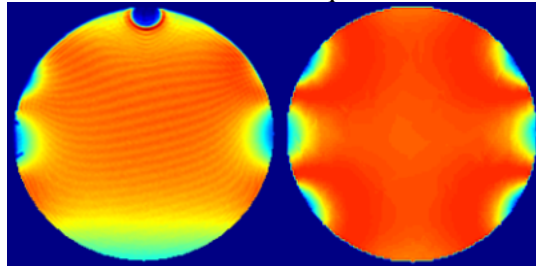


Fig 2 : Gauche : Image obtenue avec l'antenne dans l'IRM 9.4T

Droite : Simulation de l'image en modélisant l'homogénéité du champ  $B_1$  (COMSOL+MATLAB)

La bobine selle a ensuite été utilisée sur l'animal témoin pour acquérir des images pouvant être comparées avec celles obtenues au moyen de l'antenne commerciale. On constate ainsi que cette nouvelle sonde permet de pallier au manque d'homogénéité.

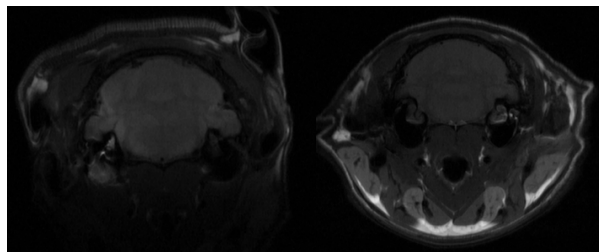


Fig 3 : Gauche : Acquisition réalisée avec l'antenne Helmet avec perte de signal en profondeur.

Droite : Acquisition réalisée avec l'antenne saddle coil : meilleure homogénéité

### CONCLUSION

Ces différents points de modélisation vont permettre d'accélérer le processus de confection/conception. En effet, nous pourrions prévoir plus facilement les différents effets intervenants, mais aussi augmenter les performances des prochaines antennes.

### RÉFÉRENCES

[1] Nicola De Zanche Chapitre 11 : Birdcage Volume Coil Design dans Vaughan, J. Thomas and John R Griffiths. RF Coils For MRI. Chichester: Wiley, 2012.

[2] Coillot, Christophe, Rahima Sidiboulouar, Eric Nativel, Michel Zanca, Eric Alibert, Maida Cardoso, and Guillaume Saintmartin et al. "Signal Modeling Of An MRI Ribbon Solenoid Coil Dedicated To Spinal Cord Injury Investigations". Journal of Sensors and Sensor Systems 5, no. 1 (2016) : 137-145.



## OPTIMISATION D'UN MAGNETOMETRE VIBRANT DE TYPE MEMS A COUCHE MINCE FERROMAGNETIQUE

Thomas Perrier<sup>1</sup>, Raphaël Levy<sup>1</sup>, Béatrice Bourgeteau<sup>1</sup>, Patrick Kayser<sup>1</sup>, Johan Moulin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ONERA – The French Aerospace Lab, 29 Avenue de la Division Leclerc, 92320 Châtillon, France

<sup>2</sup> Institut d'Electronique Fondamentale UMR 8622, Université Paris-Sud, Bât. 220, Rue André Ampère, 91405 Orsay, France

[thomas.perrier@onera.fr](mailto:thomas.perrier@onera.fr)

### RÉSUMÉ

Cet article présente les différents modèles comportementaux mis au point pour le développement d'un magnétomètre vibrant de type MEMS dont la partie sensible est une couche mince d'un matériau ferromagnétique.

**MOTS-CLEFS :** MEMS ; quartz ; couche ferromagnétique

### 1. INTRODUCTION

Les magnétomètres de type MEMS ont été mis au point au cours de la dernière décennie en raison de leurs nombreux avantages, notamment leur petite taille et faible consommation. Cependant, les magnétomètres miniatures actuels (MEMS et AMR) n'ont pas une résolution suffisante pour répondre aux besoins de nouvelles applications comme la navigation indoor. Afin d'atteindre une résolution de quelques nanoteslas, le magnétomètre utilise le grand facteur de qualité Q d'un diapason piézoélectrique en quartz. La partie sensible du magnétomètre est une couche mince en Nickel-Cobalt déposée par pulvérisation cathodique sur les poutres du diapason et aimantée ( $M_R$ ) dans la longueur des poutres [1]. Lors de la vibration, l'aimantation de la couche mince ne va plus être alignée sur le champ magnétique extérieur, un couple de rappel périodique va alors agir sur les branches du diapason. Ce couple périodique va légèrement modifier la fréquence de résonance du diapason. La valeur du champ magnétique est alors déduite de la variation de fréquence du résonateur [2].



Fig. 1: Branche du diapason en vibration (gauche) et prototype de résonateur en quartz avec une couche mince magnétique en face arrière (droite)

### 2. MODELE COMPORTEMENTAL

La résolution d'un capteur à sortie fréquentielle est donnée par la relation (1) issue de [1] :

$$B_{résolution} = \sqrt{\frac{\ln(2)b_{-1}}{2} \frac{f_0}{QK_B}} \quad (1)$$

Où  $b_{-1}$  est défini à partir du palier de la variance d'Allan de l'oscillateur et  $f_0$ ,  $Q$  et  $K_B$  sont respectivement la fréquence de résonance, le facteur de qualité et le facteur d'échelle (sensibilité) du capteur. Il est alors évident qu'une bonne connaissance des paramètres influençant  $Q$  et  $K_B$  est nécessaire pour optimiser la résolution du magnétomètre. Les origines des pertes d'énergies sont bien identifiées et une étude sur un plus grand nombre de prototypes est en cours pour valider le modèle mis au point dans [1]. L'expression du facteur d'échelle  $K_B$  peut s'exprimer simplement pour une poutre encastrée-libre [2], ce qui peut s'adapter immédiatement à une géométrie en diapason. En effet, le diapason permet seulement de limiter les pertes d'énergies au support, son comportement est le même que celui d'une poutre simple. Cependant, pour des géométries plus complexes dont le facteur d'échelle ne peut pas être calculé analytiquement, un modèle a été implémenté en langage Verilog-A en utilisant la bibliothèque NODAS [3]. Ce modèle applique les équations de Bernoulli, qui régissent le mouvement des poutres en vibrations, à des éléments infinitésimaux de poutres de longueur  $\Delta x$  mis bout à bout sur lesquels est déposée une couche aimantée de section  $A$ . Un couple de rappel magnétique  $\tau$  défini à partir des équations de la magnéto-statique est appliqué à chaque élément de poutre :

$$\tau(x) = M_R B A \Delta x \sin(\theta(x)) \quad (1)$$

Cela permet d'appliquer un couple de rappel différent à chaque élément car le couple dépend de l'angle  $\theta$  que forme localement la poutre avec le champ magnétique extérieur  $B$ . Le circuit oscillateur du magnétomètre peut également être modélisé en Verilog-A ce qui permet de remonter à la fréquence de résonance du magnétomètre et donc à son facteur d'échelle en faisant varier la valeur de  $B$ . Le bon fonctionnement de ce modèle a été validé en le comparant à l'expression analytique du facteur d'échelle pour une poutre simple recouverte intégralement d'une couche mince ferromagnétique [1-2].

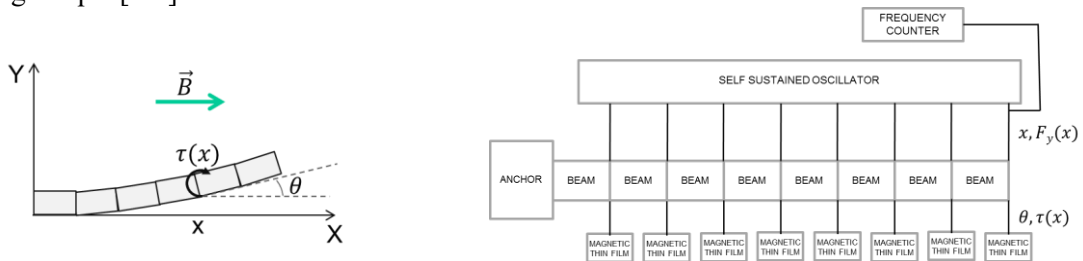


Fig. 2 : Poutre encastrée-libre constituée d'éléments de longueur  $\Delta x$  (gauche) et schéma explicatif du modèle implanté en verilog-A (droite)

## CONCLUSION

Un premier modèle analytique permettant d'identifier les paramètres influençant le facteur de qualité  $Q$  du résonateur a été établi et est en cours de validation [1]. Un modèle permettant de déterminer le facteur d'échelle du capteur a été validé sur des géométries simples et une étude est en cours pour déterminer des géométries plus complexes permettant d'obtenir une meilleure sensibilité et ainsi d'améliorer la résolution du magnétomètre.

## RÉFÉRENCES

- [1] R. Levy et al., "A micro-resonator based magnetometer", *Microsyst. Technol.*, (2016).
- [2] Kynäräinen et al., "A 3D micromechanical compass", *Sens Actuat A Phys*, pp. 561–568, 2008.
- [3] "Nodal Design of Actuators and Sensors." Workshop on Behavioral Modeling and Simulation. 1998



## MESURE DE LA PARTIE IMAGINAIRE DE LA SUSCEPTIBILITE MAGNETIQUE DE CAPTEURS MIG - APPLICATION A L'EVALUATION DE LEUR BRUIT EN $1/f$

Elodie Portalier<sup>1</sup>, Basile Dufay<sup>1</sup>, Christophe Dolabdjian<sup>1</sup>,  
Djamel Seddaoui<sup>2</sup>, Arthur Yelon<sup>2</sup>, David Ménard<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Equipe Electronique Laboratoire GREYC, UMR 6072, ENSICAEN 6 BD Maréchal Juin  
CS 45053 14050 Cedex 4 Caen, France

<sup>2</sup> Polytechnique Montréal, Département de génie physique & Regroupement québécois des  
matériaux de pointe, Montréal, Québec, Canada H3C3A7

[elodie.portalier@unicaen.fr](mailto:elodie.portalier@unicaen.fr)

### RÉSUMÉ

Récemment, un modèle du bruit intrinsèque du capteur MIG aux basses fréquences a été proposé suggérant que le bruit excédentaire serait induit par les fluctuations thermiques de l'aimantation et donc, lié à la partie imaginaire (dissipative),  $\chi''$ , de sa susceptibilité magnétique circonférentielle. Ce modèle permet de rendre compte d'un comportement en bruit dit en  $1/f$  aux basses fréquences si la valeur de  $\chi''(f)$  apparait indépendante de la fréquence. Dans le but de valider ce modèle, nous avons étudié la dépendance en fréquence de ce terme par deux voies de mesures. L'analyse des premiers résultats expérimentaux montre qu'il est possible de prédire dans une certaine mesure le niveau de bruit magnétique de ces dispositifs aux basses fréquences.

**MOTS-CLEFS :** *Instrumentation ; Bruit magnétique ; Théorème de Fluctuation-Dissipation ; Capteur MIG.*

### 1. INTRODUCTION

La présence d'un bruit excédentaire à basse fréquence constitue une limite de détection et un défi dans la conception de magnétomètres à haute sensibilité. Actuellement, les meilleures performances en bruit, mesurées au laboratoire GREYC, pour un fil MIG de 2,4 cm de long et d'un rayon de 50  $\mu\text{m}$  atteignent les 3 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  en zone de bruit blanc et un bruit en  $1/f$  ayant une fréquence de coude d'environ 50 Hz, conduisant à un niveau de 20 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  à 1 Hz.

Dans un premier temps, des mesures de cohérence spectrale  $\gamma(f)$  ont permis d'identifier le bruit basse fréquence mesuré comme un bruit intrinsèque au capteur, les autres sources de bruit présentes le long de la chaîne d'instrumentation électronique apparaissant comme négligeables.

Un modèle de bruit, basé sur le théorème de Fluctuation-Dissipation, a été développé [1, 2] établissant un lien entre les fluctuations d'impédance  $z_n^2(f)$  (en  $\Omega^2/\text{Hz}$ ) et la densité spectrale de puissance des fluctuations thermiques de la direction de l'aimantation,  $S_{\theta\theta}(f)$  (en  $\text{rad}^2/\text{Hz}$ ) tel que :

$$z_n^2(f) = \left( \frac{\partial Z}{\partial \theta_M} \right)^2 S_{\theta\theta}(f). \quad (1)$$

Le bruit équivalent en champ (en  $\text{T}^2/\text{Hz}$ ) du capteur MIG est alors donné par :

$$b_n^2(f) = z_n^2(f) / \left( \frac{\partial Z}{\partial B} \right)^2. \quad (2)$$

où  $\frac{\partial Z}{\partial B}$  représente la sensibilité intrinsèque du capteur.



En tenant compte de certaines hypothèses [2], l'expression de  $z_n^2(f)$  se simplifie et permet d'exprimer le bruit équivalent en champ du capteur par :

$$b_n^2(f) = \frac{3\mu_0 k_B T}{\pi V} \left( \frac{H_k}{M_s} \right)^2 \frac{\chi''(f)}{f}. \quad (3)$$

où  $k_B T$  est l'énergie thermique,  $V$  le volume de l'échantillon,  $H_k$  le champ d'anisotropie,  $M_s$  l'aimantation à saturation et  $\chi''(f)$  est la partie imaginaire de la susceptibilité magnétique complexe. Cette dernière est associée à plusieurs phénomènes physiques de dissipation au sein du matériau magnétique tels que les pertes par hystérésis (classique et dynamique) ou celles liées aux mouvements de parois de domaines magnétiques.

## 2. EXPERIMENTATION

D'après l'équation (3), une valeur constante de  $\chi''(f)$  en fonction de la fréquence conduit à un spectre de bruit en  $1/f$ , comme généralement observé expérimentalement. Dans ce travail, la dépendance en fréquence de  $\chi''(f)$  est étudiée au moyen de deux techniques. La première permet d'extraire la valeur de  $\chi''$  à partir de la partie réelle de l'impédance du dispositif MIG,  $Re(Z(f))$ . La seconde technique consiste à évaluer  $\chi''(f)$  à partir de l'aire du cycle d'hystérésis circconférentiel ( $M-H$ ). Ces deux techniques mènent à une évaluation de valeurs semblables de  $\chi''(f)$ . La prédiction du niveau de bruit à l'aide de ce terme et de l'équation (3) conduit à des résultats en accord avec les résultats expérimentaux de mesure de bruit. Les courbes de la figure 1 présentent une comparaison entre les niveaux de bruit équivalent en champ obtenus expérimentalement et attendus à partir du modèle proposé.

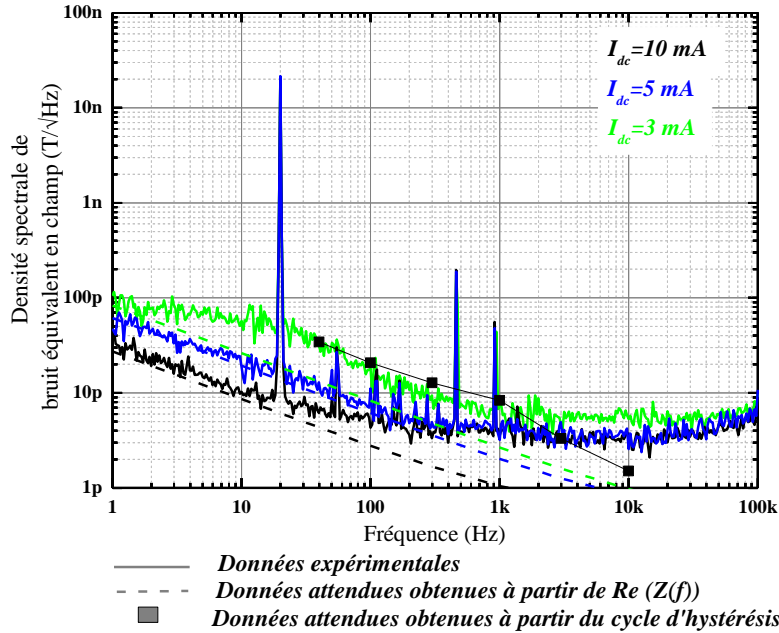


Fig. 1 : Présentation de densités spectrales de bruit équivalent en champ d'un capteur GMI pour un courant d'excitation de 10 mA et à une fréquence de 1 MHz en fonction de la valeur du courant statique de polarisation,  $I_{dc}$ . Les courbes en ligne pointillée et les carrés représentent les niveaux attendus au regard de la mesure de  $\chi''(f)$ .

## REFERENCES

- [1] D. Ménard, G. Rudkowska, L. Clime, P. Ciureanu, a. Yelon, S. Saez, C. Dolabdjian, and D. Robbes, "Progress towards the optimization of the signal-to-noise ratio in giant magnetoimpedance sensors," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 129, no. 1–2, pp. 6–9, May 2006.
- [2] C. Dolabdjian, B. Dufay, S. Saez, A. Yelon, D. Ménard, "Is low frequency excess noise of GMI induced by magnetization fluctuations?," *Key Engineering Materials.*, vol. 605, pp. 437-440, 2014.

# EXEMPLES DE CARACTÉRISATION DE SOURCES MAGNÉTOSTATIQUES PAR RÉSOLUTION D'UN PROBLÈME INVERSE, EN CHAMP FAIBLE

Laure-Line ROUVE<sup>1</sup>, Olivier CHADEBEC<sup>1</sup>, Jean-Louis COULOMB<sup>1</sup>, Gilles CAUFFET<sup>1</sup>,  
Olivier PINAUD<sup>1</sup>

<sup>1</sup> G2Elab, Université Grenoble Alpes, UMR 5269, Bâtiment GreEn-ER, 21 avenue des martyrs, CS  
90624, 38031 Grenoble CEDEX 1, France  
[Laure-Line.Rouve@g2elab.grenoble-inp.fr](mailto:Laure-Line.Rouve@g2elab.grenoble-inp.fr)

## RÉSUMÉ

Cet article présente deux exemples de caractérisation de sources magnétostatiques obtenue à partir de mesures et de modèles numériques adaptés en champ faible, par résolution de problème inverse. Les applications choisies concernent la discrétion magnétique des navires et la caractérisation de champ sur zone.

**MOTS-CLEFS :** *champs magnétostatiques faibles ; problème inverse ; magnétomètres Fluxgate.*

## 1. INTRODUCTION

Deux exemples de travaux illustrent l'identification de sources magnétiques statiques par résolution d'un problème inverse : profils d'aimantations de la coque de navires en vue de l'extrapolation de leur signature magnétique [1], et sources équivalentes multipolaires permettant la reconstruction du champ dans un véhicule électrique, à partir d'un nombre réduit de mesures et d'ajout d'information a priori [2].

## 2. IDENTIFICATION DES AIMANTATIONS D'UN NAVIRE

Afin d'autoévaluer en temps réel son indiscretion, un navire doit connaître l'état d'aimantation des parties ferromagnétiques qui le constituent (principalement sa coque). Un modèle, basé sur des intégrales de volumes, permet de relier les sources (aimantations) aux effets (champ faible externe produit de quelques centaines à quelques  $\mu\text{T}$ ). Une maquette de sous-marin double coque a permis de valider l'approche (Fig. 1). 80 capteurs Fluxgate placés entre les coques, mesurent le champ produit à bord. L'inversion numérique permet alors d'identifier les sources inconnues et de reconstruire la signature magnétique à plus grande distance avec une faible erreur.

Les mesures ont été menées au LMMCF (Laboratoire de Métrologie Magnétique en Champ Faible), doté d'un simulateur de champ 3 axes (8m de diamètre sur 26m de long) permettant d'annuler ou de reproduire le champ terrestre en tout point du globe.

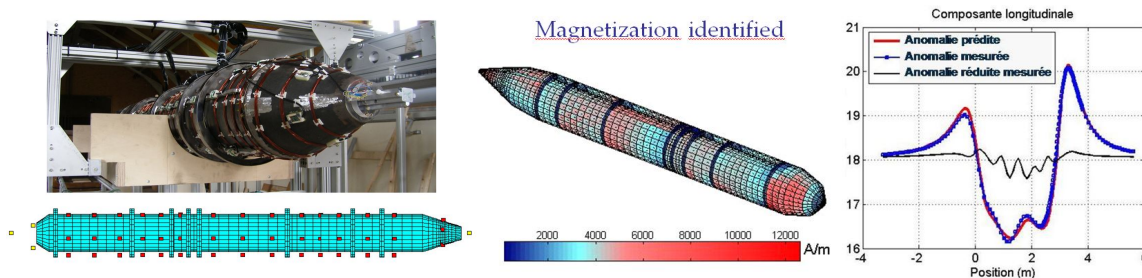


Fig. 1 : Maquette de sous-marin instrumentée sans coque externe et placement des capteurs autour de la coque épaisse interne (à gauche), Répartition d'aimantation identifiée (au centre) et Signature reconstruite (à droite)

### 3. RECONSTRUCTION DU CHAMP DANS UNE ZONE INTERNE

Le champ magnétique peut s'approcher par une somme finie de fonctions spatiales harmoniques, dans un volume donné. La connaissance des coefficients harmoniques de la décomposition permet de reconstruire le champ avec la précision voulue sur la zone d'étude. Ces coefficients, ne dépendant que des sources placées à la périphérie, constituent un modèle équivalent multipolaire (somme d'un dipôle, quadripôle, etc) et caractérisent totalement les sources.

Ce modèle harmonique a été appliqué pour reconstruire le champ magnétique à l'intérieur d'un véhicule électrique. Dans une première approche, seul le circuit de puissance, continu, a constitué la source principale de champ : une maquette de ce circuit a été réalisée (Fig.2). La proximité aux sources induit un nombre important de coefficients à déterminer. Typiquement, pour la zone associée à un passager, 48 coefficients sont nécessaires. Sans information a priori, il faut autant de mesures (utilisation de 16 magnétomètres Fluxgate triaxes) bien réparties sur la sphère entourant le passager (sphère bleue, Fig. 2), pour identifier par inversion ces coefficients. Cette mise en œuvre, bien qu'efficace, n'est pas réaliste. Grâce à l'ajout d'information a priori décrivant le circuit de puissance avec certaines incertitudes de position, les 48 coefficients sont identifiés avec uniquement 6 capteurs triaxes (18 mesures), placés au niveau du siège du véhicule (Fig. 2). Le test s'effectue par comparaison entre champ reconstruit et mesuré sur des capteurs de validation : 10% d'erreur est obtenue avec information a priori alors que sans a priori, cette erreur se chiffre à 35%.

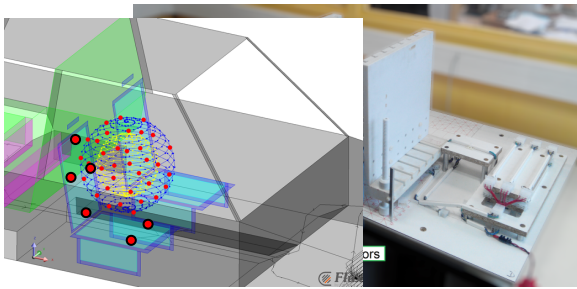


Fig. 2 : Maquette physique instrumentée du circuit de puissance (à gauche) et position des capteurs sur la sphère ou dans le siège (à droite)

### CONCLUSION

Les exemples présentés démontrent l'efficacité d'une approche inverse pour identifier des sources complexes, impossibles à modéliser de façon directe. Celle-ci s'appuie sur une double compétence en métrologie en champ faible et en modélisation numérique adaptée aux sources. Les modèles s'appuient sur des représentations physiques de sources (aimantations, courants) mais aussi mathématiques équivalentes (multipoles). L'ajout d'information a priori sur les sources mais aussi les mesures, dans un cadre bayésien, permet de réduire le nombre de capteurs et améliorer la qualité de l'inversion.

### RÉFÉRENCES

- [1] Y. Vuillermet, O. Chadebec, J.-L. Coulomb, L.-L. Rouve, G. Cauffet, « Formulations intégrales magnéto-statiques Un bilan pour l'identification de l'aimantation de tôles ferromagnétiques », **Revue Internationale de Génie Electrique**, Vol. 11 n° 2-3 11-2008, pp 287-302 (2008)
- [2] O. Pinaud, O. Chadebec, L.-L. Rouve, Coulomb J.-L., J.-M. Guichon, A. Vassilev, "A Bayesian Approach for Spherical Harmonic Expansion Identification: Application to Magnetostatic Field Created by a Power Circuitry", **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, vol.57, no.6, Dec. 2015, 1501-9. (2015)



## CAPTEURS MAGNETORESISTIFS POUR LE CONTROLE NON-DESTRUCTIF

**Natalia Sergeeva-Chollet<sup>1</sup>, Fawaz Hadadeh<sup>1, 2</sup>, Claude Fermon<sup>2</sup>, Jean-Marc Decitre<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> CEA LIST, Digiteo Labs CEA Saclay bat 565, 91191 Gif-sur-Yvette, France

<sup>2</sup> SPEC, CEA, CNRS, Université Paris Saclay, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France

[natalia.sergeeva-chollet@cea.fr](mailto:natalia.sergeeva-chollet@cea.fr)

### RÉSUMÉ

Pour renforcer la fiabilité et la sécurité des installations, différentes techniques de contrôle non destructif sont utilisées, comme la technique de contrôle par courants de Foucault. L'enjeu actuel réside dans la détection de défauts de plus en plus petits, de plus en plus profonds, tout en diminuant la durée du contrôle. Pour répondre à ces contraintes, de nouvelles technologies de capteurs sont investiguées. L'objet de cet article est de montrer des avancées techniques permettant l'utilisation de capteurs magnétorésistifs pour la réalisation de sondes multi-éléments par courants de Foucault intégrant ces capteurs comme récepteurs.

**MOTS-CLEFS :** *contrôle non destructif ; courant de Foucault ; GMR ; capteurs magnétiques.*

### 1. INTRODUCTION

Les capteurs inductifs sont les capteurs les plus utilisés pour le CND par courants de Foucault. Cependant, les nouvelles technologies de capteurs magnétiques sont beaucoup étudiées afin de dépasser les performances de capteurs bobinés en sensibilité et résolution [1-2]. Aussi il existe une forte demande d'inspection des pièces avec les zones complexes. Les capteurs à base de magnétorésistances à effet géant (GMR) sont à même de répondre à cette problématique.

Cette contribution présente les résultats associés au développement de sondes CF en utilisant des barrettes de capteurs à magnétorésistance géante (GMR) comme récepteurs.

### 2. OPTIMISATION DE SONDES ET RESULTATS OBTENUS

Dans le cadre d'un projet Européen, IMAGIC, et d'un projet ANR CANOE, nous avons travaillé sur le développement de sondes CF à base des barrettes de capteurs GMR pour la détection de tous petits défauts de surface et de défauts enterrés. La technologie de leur fabrication est issue de filières de fabrication collective, qui offre la possibilité de réalisation de matrice de capteurs pour permettre de diminuer le temps d'inspection de pièces industrielles.

La géométrie de sondes prototypes permettant de répondre aux applications sélectionnées a été optimisée en utilisant le logiciel CIVA [3]. Les configurations décrivant les applications définies ont été simulées pour définir la configuration optimale de la sonde. Cette étude a permis d'évaluer les paramètres de l'inducteur (type d'inducteur, fréquence du travail, dimensions) et du récepteur (positionnement, pas entre éléments pour les capteurs multi-éléments).

L'électronique et le packaging de la connectique en vue de l'intégration de composants magnétiques en tant qu'éléments récepteurs dans les sondes CF, aussi bien pour la détection de défauts enterrés que de défauts surfaciques ont été développé pendant ces projets.

Les résultats obtenus pendant les tests des capteurs ont montré une bonne performance de capteurs GMR pour la détection de défauts enterrés et surfaciques, et ce avec une bonne résolution spatiale [4-5]. Un exemple de la détection d'un défaut sub-surfacique de 6.5mm de long dans une maquette plane en inconel est montré sur la Figure 1. Les extrémités du défaut sont visibles car la composante normale du champ magnétique est détectée par la sonde.

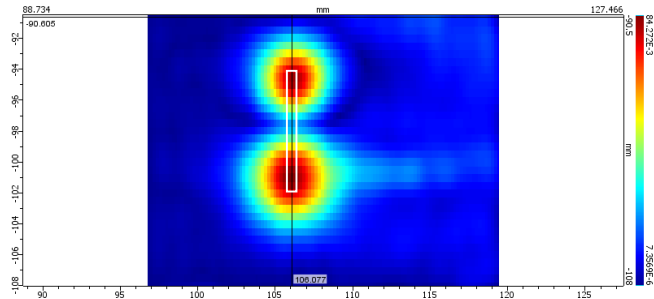


Fig. 1 : CSCAN du défaut avec le ligament 0.6mm inconel,  $f=240\text{kHz}$

Pour pouvoir mieux caractériser les défauts, la détection de plusieurs composantes du champ magnétique est nécessaire. Pour répondre à ce besoin, une sonde avec quatre GMR d'orientations différentes est en cours de développement (Fig.2)

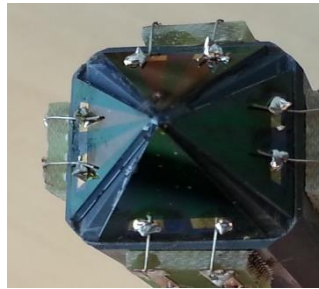


Fig. 2 : Photo de quatre GMR montées dans la sonde en vue de l'acquisition des 3composantes du champ magnétique

## CONCLUSION

Cette contribution présente les résultats obtenus dans le cadre du développement des sondes à base de capteurs magnéto-résistifs. Elle met en évidence les performances de détection des sondes CF à base de capteurs GMR, ainsi que la nécessité du développement de sondes pour la mesure de plusieurs composantes du champ magnétique pour pouvoir caractériser les défauts.

## RÉFÉRENCES

- [1] T. Dogaru, *et al.*, "Giant magnetoresistance-based eddy current sensor", IEEE Transactions in Magnetics, 37, No.4, pp.2790-2793 (2001)
- [2] B. Marchand *et al.*, "Flexible and array eddy current probes for fast inspection of complex parts", in Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 29A and 29B, edited by D.O. Thompson and D.E. Chimenti, AIP Conference Proceedings 211, American Institute of Physics, Melville, NY, pp.385-392 (2010)
- [3] <http://www-civa.cea.fr>
- [4] N. Sergeeva-Chollet *et al.*, "Development of Eddy Current probes based on magnetoresistive sensors arrays" 40<sup>th</sup> Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE), Baltimore, MD, Vols 33A & 33B, Book Series: AIP Conference Proceedings Volume: 1581, pp.1374-1379 (2013)
- [5] B. Ribes *et al.*, "Results of MR based ET probes for buried flaw detection over different metallic materials", 11<sup>th</sup> European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), October 6-10, 2014, Prague, Czech Republic



## **Dynamical monitoring of water status in plants : low fields NMR investigations**

**Rahima Sidi-Boulenouar<sup>1,2</sup>, Eric Nativel<sup>3</sup>, Christophe Coillot<sup>1</sup>, Olivier Yzebe<sup>1</sup>, Jean Luc Verdeil<sup>2</sup>, Frédéric Gatineau<sup>2</sup>, Eric Nativel<sup>3</sup>, Eric Alibert<sup>1</sup>, Christophe Goze-Bac<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Charles Coulomb Laboratory (L2C-BioNanoNMRI team), UMR 5221 Centre National de la Recherche Scientifique -University, Montpellier, France ; <sup>2</sup> Centre internationale pour le développement durable des régions tropicales et méditerranéennes (CIRAD), UMR AGAP, Montpellier, France ; <sup>3</sup>Institut d'Electronique et des systèmes (IES), UMR5214 Centre National de la Recherche Scientifique -University, Montpellier, France  
( [rahima.sidiboulenouar@umontpellier.fr](mailto:rahima.sidiboulenouar@umontpellier.fr) )*

**Keywords :** *RF Antennas, Climatic chamber, NMR rates.*

Understand how plants respond to water stress is essential today to meet the challenge of developing new cultivars and new management cultures compliant with the productivity of plants, despite the global warming. Water/plant relation is of central interest but paradoxically, there is no direct and non-invasive method to quantify and measure the flow of water in plants.

In this purpose, studying plants in their natural environment is achieved by putting the NMR setup inside a climatic chamber in order to monitor the environmental parameters. Then, we extract from NMR relaxation rates measurements at low fields some ecophysiological markers like water content and its mobility for different plants in normal and water stress conditions.

For this purpose, a dedicated apparatus is developed with various electromagnetic coils (which acts both as a transmitter & receiver such a magnetic field sensor) designed from an analytical model. A comparative study of the Signal to Noise Ratio (SNR) at different static field corresponding to different gyromagnetic frequencies will be presented.

The ultimate goal is to perform the experiments in the fields with a portable NMR device.

1. NMR probeheads for biophysical and biomedical experiments, Mispelter J, Lupu M, Briguët A, Theoretical principles and practical guidelines., London: Imperial College Press, 2006.
2. MRI of plants and foods, Henk Van As and John van Duynhoven, Journal of Magnetic Resonance 229 , 25–34., 2013.
3. Signal Modelling of MRI Ribbon Solenoid Coil Dedicated to Spinal Cord Injuries Studies, C. Coillot, R.Sidi-Boulenouar, E. Nativel, E. Alibert, M. Zanca, G. Saintmartin, H. Noristani, N. Lonjon, F. Perrin and C. Goze-Bac, J. Sens. Sens. Syst., Accepted, <http://www.j-sens-sens-syst.net/5/137/2016/>, 2016.

*This work has been carried out with financial aid of the LabEx NUMEV and CIRAD.*





# DETECTION DE CHAMPS MAGNETIQUES FAIBLES A TEMPERATURE AMBIANTE PAR DES STRUCTURES MAGNONIQUES

Philippe Talbot<sup>1</sup>, Alain Fessant<sup>2</sup>, Jacek Gieraltowski<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Lab-STICC UMR CNRS 6285

<sup>2</sup> Laboratoire de Magnétisme de Bretagne (LMB),

<sup>3</sup> LDO-IUEM UMR CNRS 6358,

Université de Bretagne Occidentale, CS 93837, 6 avenue le Gorgeu, 29238 Brest Cedex 3, France

[Philippe.Talbot@univ-brest.fr](mailto:Philippe.Talbot@univ-brest.fr)

## RÉSUMÉ

Une étude exploratoire de détection à haute sensibilité, basés sur des structures magnoniques et des d'excitation de type lignes et antennes microrubans, pour la mesure de champs magnétiques faibles à température ambiante est présentée. Les éléments sensitifs sont des films monocristaux de YIG, déposés sur un substrat de Grenat Gallium-Gadolinium (GGG), munis de structures périodiques surfaciques de gravures ou de bandes d'or. La mesure des paramètres de dispersion montrent un important décalage en fréquence du pic d'absorption maximale des ondes magnétostatiques de surface, qui dépend du champ magnétique continu appliqué au cristal.

**MOTS-CLEFS** : structures magnoniques et microruban, détection, champ magnétique, hyperfréquence.

## 1. INTRODUCTION

La détection des champs magnétiques faibles à température ambiante est un sujet qui intéresse de nombreux domaines, tels que, par exemple, le Contrôle Non Destructif (CND) ou l'imagerie biomédicale. Les travaux actuels sur le sujet visent, outre l'amélioration de la sensibilité et de la résolution, à réduire les coûts et les contraintes d'utilisation des dispositifs de mesure. De récentes publications [1, 2] montrent que des capteurs basés sur l'excitation et l'analyse d'ondes magnétostatiques de surfaces (MSSW) dans des structures magnoniques offrent des perspectives intéressantes pour la réponse à ces problématiques.

## 2. EXPERIMENTATION

Les échantillons étudiés sont des films minces monocristallins de YIG ( $4\pi M_s = 1750$  G,  $\Delta H < 0,8$  Oe), de  $10 \mu\text{m}$  d'épaisseur, déposés par épitaxie en phase liquide sur un substrat GGG ( $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{22}$ ). Les structures périodiques expérimentées sont constituées de séries de 10 bandes d'or déposées ou de rayures de surface gravées, d'une période de  $150 \mu\text{m}$ .



Fig. 1 : Echantillons de cristal magnonique sur substrat GGG : a) structures périodiques à bandes d'or, b) et gravées.

Une ligne de transmission et des structures antennaires planaires microruban, déposées sur de substrats de faibles constantes diélectriques, sont utilisées pour l'excitation des ondes MSSW dans les structures magnoniques. Un analyseur de réseau vectoriel, couvrant les fréquences de 0,1 à 20 GHz, permet la mesure les paramètres de dispersion complexes  $S_{ij}$ , de ces structures microruban chargées par les cristaux magnoniques. Un électroaimant assure l'application d'un champ magnétique continu polarisant  $H_{dc}$ , dans le plan du film mince, perpendiculairement à la direction de propagation, dans une gamme variant de 0 à 2,5 kOe.

## 3. RESULTATS

Sur la figure 2 sont présentés deux exemples de résultats obtenus, sur les échantillons à bandes d'or et à gravures, au moyen de la ligne de transmission microruban réalisée sur substrat TaclamPlus (Taconics) ( $\epsilon' = 2,1$  et  $\tan \delta = 0,0008$ ).



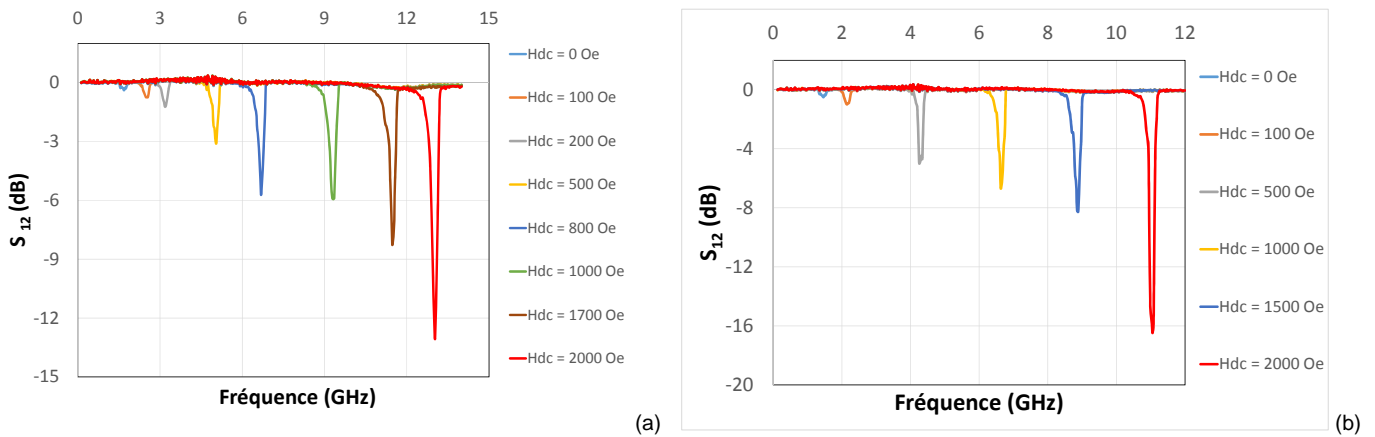


Fig. 2 : Paramètre de transmission  $S_{12}$  de la ligne microruban en fonction de la fréquence (0.1 – 12 GHz) et du champ magnétique  $H$  (0 – 2 kOe) : films à bandes d’or (a) et film gravés (b).

Dans les deux cas, pour les deux types d’échantillons, les résultats obtenus présentés sur la figure 3 montrent un déplacement linéaire important ( $\sim 5$  MHz/Oe) de la fréquence du pic d’absorption maximale, induit par la variation de l’amplitude du champ magnétique continu polarisant  $H_{dc}$ , l’amplitude du pic étant toutefois plus important dans le cas du cristal à bandes d’or. Ce comportement semble indiquer que ce type de dispositifs pourrait être intéressant pour la détection de faibles variations de champ magnétiques [3].

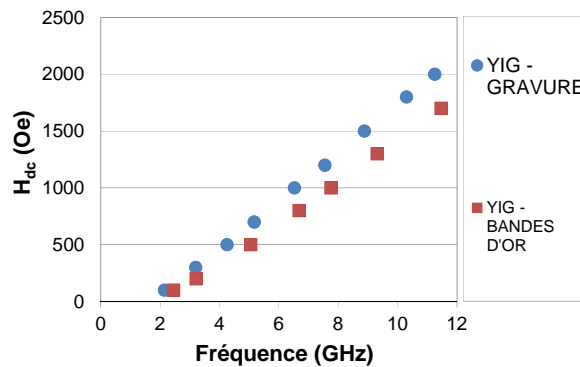


Fig. 3 : Variation de la fréquence d’absorption maximale en fonction du champ magnétique  $H$  pour les films à bandes d’or (■) et les films gravés (●).

#### 4. CONCLUSION

L’étude d’un concept nouveau de détection de champ magnétique à température ambiante est abordée. La modification de la propagation des ondes magnétostatiques de surface dans une structure magnonique, constituée d’un cristal de YIG munis sur sa surface de structures périodiques de bandes d’or ou de stries gravées, est utilisée pour détecter les variations d’amplitude du champ magnétique continu appliqué au cristal. La mesure des paramètres de dispersion de lignes de transmission et antennes planaires microrubans chargées par le cristal, montre un déplacement linéaire important de la fréquence d’absorption maximale en fonction du champ magnétique appliqué au cristal. Ce comportement nous semble intéressant dans la perspective du développement de capteurs de haute sensibilité pour la mesure de champs magnétiques faibles à température ambiante, applicables dans les domaines du Contrôle Non Destructif (CND) et biomédical.

#### 5. REFERENCES

- [1] Inoue M. , Baryshev A., Takagi H., Boey Lim P., Hatafuku K., Noda J., and Togo K., “Investigating the use of magnonic crystals as extremely sensitive magnetic field sensors at room temperature”, Applied Physics Letters 98, (2011)132511.
- [2] Serga A. A., Chumak A.V., Hillebrands B., “Scattering of surface and volume spin waves in a magnonic crystal”, Journal of Physics D, 43, 264002 (2010).
- [3] Talbot P., Fessant A., Gieraltowski J., “Electromagnetic sensors based on magnonics crystal for applications in the field of biomedical and NDT”, Procedia Engineering of EuroSensors 2015 - September 2015 - Freiburg (Germany).



## MODELISATION ET INVERSION DE DONNEES ELECTROMAGNETIQUES EN GEOSCIENCES

**Pascal Tarits<sup>1,2,3</sup>, Jean-Michel Ars<sup>1</sup>, Vincent Brandon<sup>3</sup>, Sophie Hautot<sup>2</sup>, Anne Maisonneuve<sup>1</sup>,  
Matthieu Plasman<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Laboratoire Domaines Océaniques UMR 6358, Institut Universitaire Européen de la Mer, rue Dumont d'Urville, 29280 PLOUZANÉ, France*

<sup>2</sup> *IMAGIR Sarl, 38 rue Jim Sévellec, 29200 Brest, France*

<sup>3</sup> *MAPPEM Geophysics SA, Institut Universitaire Européen de la Mer, rue Dumont d'Urville, 29280 PLOUZANÉ, France*

[tarits@univ-brest.fr](mailto:tarits@univ-brest.fr)

### RÉSUMÉ

L'objet de cet article est de détailler un certain nombre de développements récents en modélisation et inversion électromagnétique pour imager le sous-sol à différentes échelles, de la proche surface à l'échelle globale.

**MOTS-CLEFS :** *électromagnétisme, géosciences, inversion, modélisation.*

### 1. INTRODUCTION

Le groupe Electromagnétisme pour les Géosciences du laboratoire Domaines Océaniques de l'Institut Universitaire Européen de la Mer développe depuis de nombreuses années des instruments et des méthodes de modélisations/inversions pour mesurer et interpréter des données électromagnétiques sensibles à la structure géologique. Nous travaillons à toutes les échelles qu'il est possible d'étudier avec ces méthodes, de la proche surface (moins que quelques dizaines de mètres dans le sol) à l'échelle globale (plusieurs centaines de kilomètres de profondeur). Dans cette présentation, nous parlerons de nos approches modélisation/inversion.

### 2. LA PROCHE SURFACE

Pour les études de proche surface, nous sommes spécialisés dans les mesures électromagnétiques marines principalement pour le domaine industriel. Nous avons notamment créé la start up MAPPEM Geophysics SAS début 2015 suite au développement d'un outil de profilage électromagnétique fond de mer. Ce développement a été l'opportunité d'étudier des algorithmes de modélisation 3-D et d'inversion de données électromagnétiques en forme d'onde complète (du continu au signal temporel induit) afin de restituer avec la plus grande précision la structure en conductivité du sous-sol. Du fait du mode particulier d'acquisition de notre système (acquisition de séries toutes les 0.5 s, forme d'onde enregistrées 0.2 ms à 50kHz), nous avons à modéliser une quantité inhabituellement grande de données comparé aux techniques EM habituellement utilisées à

terre. L'approche TDEM (time domain electromagnetic) a été privilégiée. Nous présentons les approches numériques utilisées pour aborder l'inversion 3-D.

### **3. IMAGERIE ELECTROMAGNETIQUE PROFONDE**

Nous présentons nos travaux sur l'inversion électromagnétique 3-D de données très basse fréquence ( $\ll$ mHz) pour l'imagerie du sous-sol jusqu'à des profondeurs de quelques 1-10 km. La méthodologie est basée sur l'enregistrement des fluctuations naturelles du champ géo-électromagnétique (les champs électriques et magnétiques naturels sont enregistrés simultanément), leur analyse et modélisation. Cette méthode, nommée magnétotellurique (MT), permet d'obtenir une vision 3-D du sous-sol. Un important volet industriel a été développé et une startup créée en 2010, IMAGIR Sarl. Nous présentons ici l'approche numérique utilisée pour l'inversion 3-D de ces données. De nouveaux développements sont également présentés sur l'inversion conjointe de données géophysiques multi-paramètres avec la MT.

### **4. IMAGERIE ELECTROMAGNETIQUE GLOBLALE**

Enfin, nos approches méthodologiques ont été appliquées à l'imagerie globale. Nous entendons par imagerie globale l'imagerie de l'intérieur de la terre à l'échelle globale. La particularité de la méthodologie est de n'utiliser que les fluctuations naturelles du champ géomagnétique, soit enregistrées dans les nombreux observatoires géomagnétiques à travers le monde, soit à bord de satellites dédiés (Oersted, Champ, Swarm). A cette échelle, le problème de l'induction dans une terre 3-D doit être résolu en coordonnées sphérique et les méthodes d'inversion adaptées au très grand nombre de paramètres. Nous présenterons l'approche et des résultats obtenus jusqu'à des profondeurs  $>1000$  km. Un exemple d'extension de l'approche aux planètes telluriques (telle que Mars) sera également présentée.



## Evaluation des performances en bruit d'un capteur GMI associé à une détection de type radio-logicielle

Papa Silly Traoré<sup>1</sup>, Aktham Asfour<sup>1</sup>, Jean-Paul Yonnet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univ. Grenoble Alpes, G2Elab, F-38000 Grenoble, France  
CNRS, G2Elab, F-38000 Grenoble, France

[papa-silly.traore@g2elab.grenoble-inp.fr](mailto:papa-silly.traore@g2elab.grenoble-inp.fr)

### RÉSUMÉ

Cet article étudie les performances en bruit d'un capteur GMI (Magnéto-Impédance Géante) associé à un détecteur synchrone numérique par SDR (Software Defined Radio). Un modèle analytique permettant de prédire les performances a été développé. Une comparaison des résultats du modèle et ceux des mesures est effectuée.

**MOTS-CLEFS :** *Magnéto-Impédance Géante (GMI), SDR; bruit.*

### 1. DESCRIPTION ET RESULTATS

Une étude des performances en bruit d'un détecteur synchrone numérique en quadrature nouvellement développé pour les capteurs GMI (Magnéto-Impédance Géante) est présentée. Les concepts généraux de ce détecteur sont basés sur une radio-logicielle ou (SDR pour Software Defined Radio). Ils ont été brièvement abordés dans nos travaux récents [1]. L'idée de base est de numériser directement, avec une haute fréquence d'échantillonnage, la tension aux bornes de l'élément sensible. La démodulation est réalisée numériquement à l'aide d'une détection synchrone numérique suivi d'un filtrage de décimation pour obtenir les deux signaux I (in-phase) et Q (Quadrature) en bande de base.

Dans cette étude, un modèle analytique a été développé afin de quantifier les contributions des différentes sources de bruit du système. Une mesure des performances en bruit a également été effectuée à l'aide de l'analyseur du signal HP3562A. Les résultats obtenus ont été comparés au modèle analytique. La figure 1 montre les résultats de calcul du modèle et de la mesure du bruit magnétique équivalent en champ du capteur. La mesure était en très bon accord avec le modèle théorique en zone de bruit blanc. La bande passante à -3 dB et la sensibilité du capteur en boucle ouverte étaient respectivement d'environ 6 kHz et 17 kV / T.

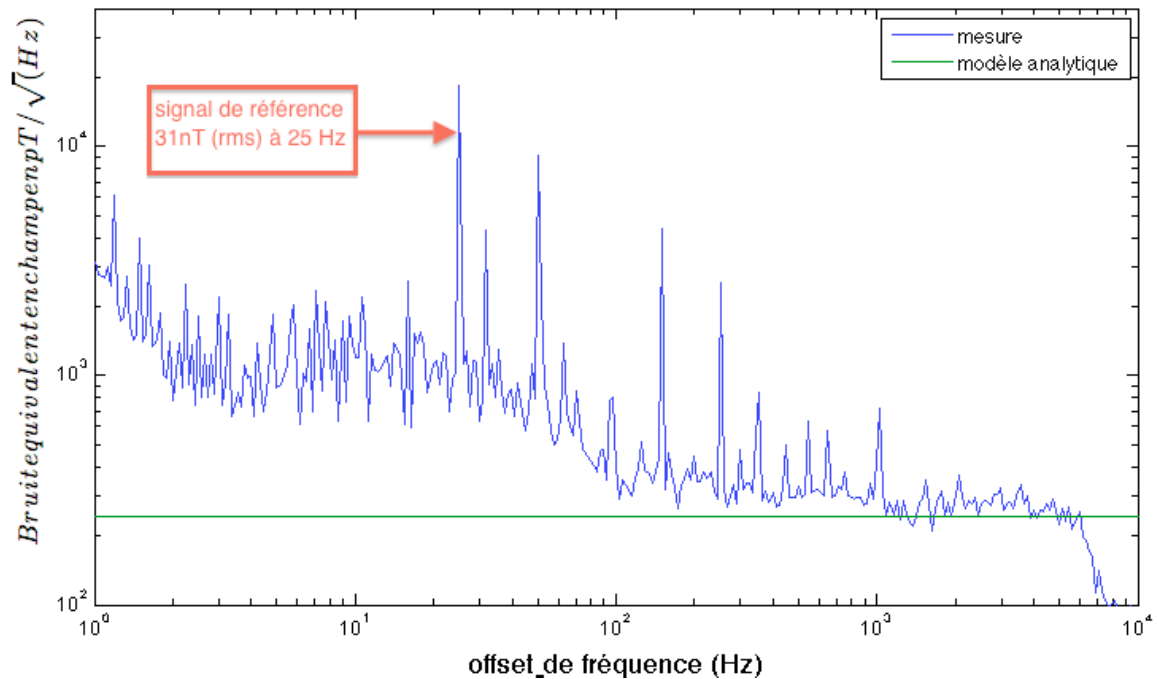


Figure 1. : Bruit magnétique équivalent en champ du capteur GMI. Un fil GMI à base de Cobalt de  $100\ \mu\text{m}$  de diamètre et 40 mm de longueur a été utilisé. Le champ de polarisation est d'environ 50 A/m. La fréquence et l'amplitude du courant alternatif étaient d'environ 2 MHz et 2 mA, respectivement.

Comparé aux détecteurs analogiques, le premier avantage de cette technique numérique réside dans le fait que la contribution du bruit électronique du détecteur est annulée, ou au moins minimisée. De plus, le concept numérique permet l'utilisation de techniques de traitement qui peuvent être difficilement réalisables avec de l'électronique analogique. Au-delà de l'optimisation des performances en bruit des capteurs GMI, les principaux avantages sous-jacents du SDR sont aussi la facilité de mise en œuvre et le potentiel d'intégration ainsi que la flexibilité pour l'optimisation des paramètres physiques du capteur.

## REFERENCES

- [1] A. Asfour *et al* IEEE Trans. Magn., vol: 51, Issue: 1, pp 1-4, 2015.



## Mise en œuvre de radio-logicielle pour les capteurs GMI en configuration off-diagonal

Papa Silly Traoré<sup>1</sup>, Aktham Asfour<sup>1</sup>, Jean-Paul Yonnet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univ. Grenoble Alpes, G2Elab, F-38000 Grenoble, France  
CNRS, G2Elab, F-38000 Grenoble, France

[papa-silly.traore@g2elab.grenoble-inp.fr](mailto:papa-silly.traore@g2elab.grenoble-inp.fr)

### RÉSUMÉ

Cet article traite de l'implémentation d'une technique de démodulation numérique par radio logicielle (ou SDR pour Software Defined Radio) pour le conditionnement des capteurs GMI (Magnéto-Impédance Géante). Associée à la configuration off-diagonal du capteur, cette technique permet d'annuler directement le décalage (offset) du capteur. Une brève description de l'approche et les résultats obtenus sont présentés.

**MOTS-CLEFS :** *Magnéto-Impédance Géante, SDR; radio logicielle ; off-diagonal.*

### 1. CONTEXTE

Une des principales problématiques dans la mise en œuvre des capteurs GMI (Magnéto-Impédance Géante) est d'obtenir une réponse linéaire avec une sortie nulle du capteur à champ magnétique nul. Dans la configuration conventionnelle dite « diagonale » des capteurs GMI, cette mise en œuvre pourrait effectivement être réalisée par une variété de techniques comme l'utilisation d'un champ statique de polarisation associée à un dispositif d'annulation de décalage tel qu'un amplificateur différentiel [1], [2]. Une autre solution utilise un champ de polarisation alternatif associé à une double démodulation d'amplitude [3].

Dans la configuration « off-diagonale » du capteur GMI, la sortie de celui-ci peut naturellement être presque nulle à champ nul, sans faire appel à des champs de polarisation. Cependant, le choix d'une démodulation adéquate est nécessaire pour garantir cet avantage. Il est intéressant de noter que les détecteurs de crête, couramment utilisés, ne conviennent pas à cet effet.

Une détection synchrone associée à un capteur « off-diagonal » permet d'obtenir la réponse souhaitée. Néanmoins, une détection synchrone analogique introduit inévitablement du bruit et des non linéarités (dues à la multiplication) supplémentaires dans la chaîne de conditionnement.

Nous présentons dans cet article une nouvelle technique de détection synchrone numérique. Le détecteur intégré au sein du système est de type radio-logicielle (ou SDR pour Software Defined Radio). Il est généralement utilisé dans les applications de télécommunications. Son application dans les capteurs GMI a déjà été présentée dans nos précédents travaux [4]. Il est basé sur le principe d'une détection numérique en quadrature fournissant deux signaux en quadrature (I et Q pour In-phase et Quadrature, respectivement). L'avantage du détecteur numérique réside aussi dans la facilité d'implémentation et la flexibilité de traitement. Il reste aussi un candidat prometteur pour

la miniaturisation et l'intégration des capteurs. Comparé par exemple aux détecteurs de crête, le SDR permet également d'obtenir l'information de la phase.

## 2. RESULTATS

Un prototype de capteur GMI intégrant le SDR a été réalisé et validé. La figure 1 montre la sortie du capteur (signaux I et Q) en fonction du champ magnétique. Comme attendu, cette sortie est quasiment nulle à champ nul.

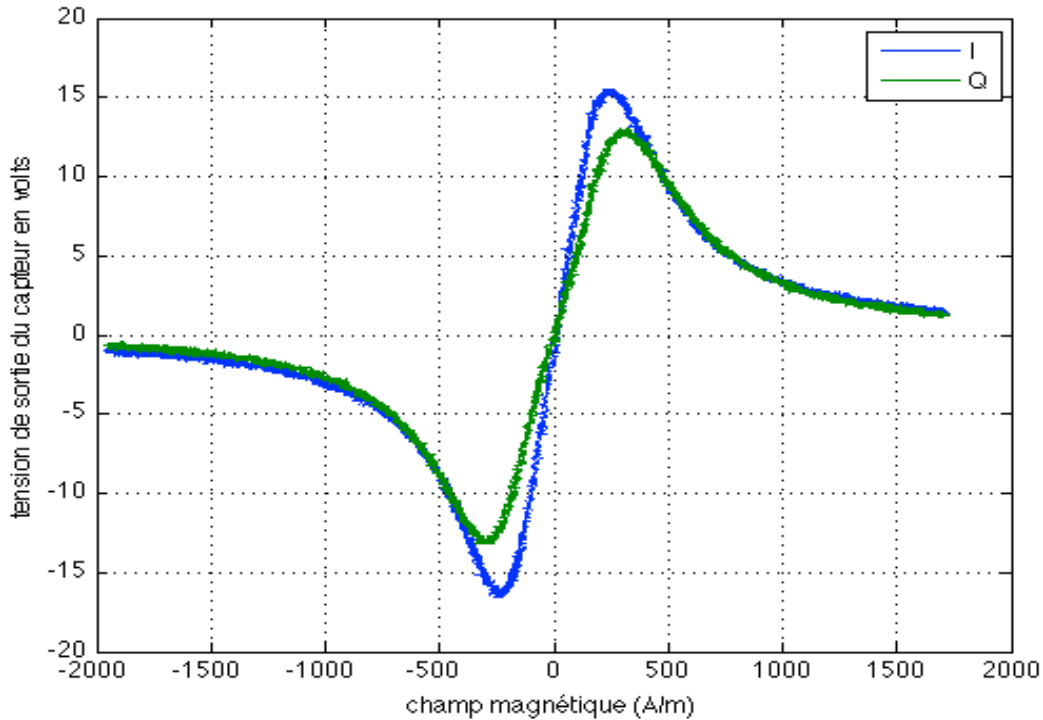


Fig. 1. Réponse du capteur GMI en configuration off-diagonal utilisant le SDR. L'élément sensible est un fil à base Cobalt (de  $100 \mu\text{m}$  diamètre et 4 cm de longueur) autour duquel est bobiné 200 spires de cuivre. Le courant d'excitation du fil est d'environ 3 mA d'amplitude et 2 MHz de fréquence. Un courant de polarisation continu de 4 mA est injecté dans le fil.

## REFERENCES

- [1] B. Dufay *et al.*, IEEE Sensors J. vol: 13, Issue: 1, pp 379-388, 2013.
- [2] Z. Zhan *et al.*, Sensors and actuators A. vol: 137, pp 64-67, 2007.
- [3] C. Coillot *et al.* J. Sens. Sens. Syst., 2, pp 137-145, 2013.
- [4] A. Asfour *et al* IEEE Trans. Magn., vol: 51, Issue: 1, pp 1-4, 2015.



# Cellular methods and tools for sensing and simulation

Tuyen Phong Truong<sup>†‡</sup>, Bernard Pottier<sup>†</sup>  
<sup>†</sup>LabSTICC/UBO, UMR CNRS 6275, <sup>‡</sup>Can Tho University

## I. ERA OF MASSIVE INFORMATION

One of the most impressive benefits from technologies is the capability of sensing. Sensing means translating physical information into numeric information to be processed by systems. An illustration is the number of devices used by the automotive industry that grow from 100 (2014) to 200 sensors (2020). Benefits are security, smartness, pollution and waste of energy reduction.

We also know that sensors are developed for measuring distributed values in many domains : reducing traffic by monitoring available parking lots, measuring city pollution, measuring the cycle of water. Sensors are developed based on physical properties and are created in many different places such as nano-technologies, mechanics, vision, or biology.

Considering the huge space range, the number of valuable applications, or savings, structuring information, structuring sensing, building knowledge systems is a major challenge. Due to many risks from climate change and socio-economics problems, sensing for the environments appears in the first ranks. Radio links are the key technology allowing to connect sensors into networks that can operate on range from meters to kilometers.

This contribution will describe methods and tools easing the design of such systems with respect to scales adapted to the environments. The flow proceeds top down from space to modeling and simulation :

**Space** space descriptions.

Zone to study is selected from maps, photographs, measures, human body model, nano-architecture model.

**Partition** cell partition of Space. Map regular segments are produced keeping geometric references (possibly geo coordinates)

**Subsystems** cell subsystems are produced by grouping based on criteria (colors, elevation, other data)

**Cellular automata** are built by connecting neighbour cells according to a connectivity pattern (Von Neumann, Moore)

**Cell Behaviour** describe physical cell behaviour with transitions and physical neighborhood influences

**WSN** sensor systems are networks of measure points with geometric references, wireless communication capabilities, estimated coverage ranges.

**WSN Behaviour** logical behaviour of sensors cooperating inside networks, achieving local perception and contributing to distributed algorithms.

This define a *cyberphysical* machine model embedding physical reality, perception, distributed decision, and possible physical control on real world.

## II. STRUCTURING SPACE

Radio signal propagation can be described as a physical fact, or as a logical connectivity between nodes. Several approximation of this propagation can be done, as example by disk modeling coverage for a particular range, by ray tracing computations, or line of sight computations.

We use this last model to summarize how the flow is working. Figure 1 shows a Space exploration tool (QuickMap, P-Y. Lucas) that can switch different kind of tiles, zoom and unzoom, walking anywhere, any scale. Once Space is selected, a cell resolution is chosen (square of 25 by 25 pixels on figure 3, representing  $478 \times 478$  meters). Not shown is the synthesis of a cell system according to execution target. We used a Von Neumann N, W, S, E neighborhood. At this stage, additional data are fetched from servers outside : we have added elevation based on each cell geographic position. Simulation programs are produced in few seconds, then they are bound to a particular behaviour, compiled and executed.

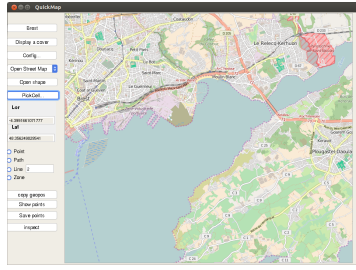


FIGURE 1. Quickmap map browser

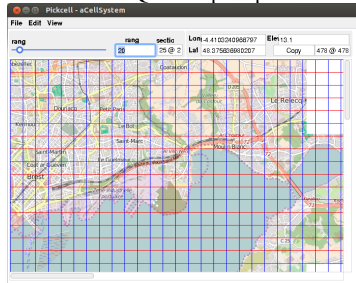


FIGURE 2. Cell system preparation

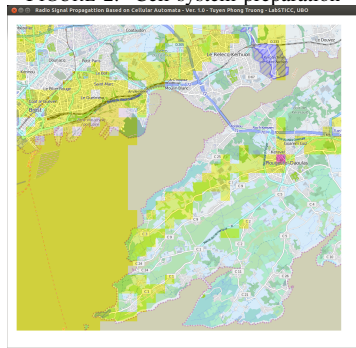


FIGURE 3. Cells illuminated by a radio, center right

### III. ALGORITHM FOR LINE OF SIGHT COMPUTATION

When the physical space description is obtained, we are interested to compute reachable cells in line of sight from an emitting position. Each cell will be represented by a process, either in software (Occam processes[2]), or in hardware (processing elements in a graphic accelerator[4]). Simulation is achieved in a lock-step fashion by cycling on a *synchronous parallel program* : communicate with neighbours, observe local status (sensing), decide about a new status, and prepare next cycle communications. Our sensing machine is a distributed product of automata of any shape.

Line of sight represents a ray broadcast in any direction from the emitter. The ray propagation can be stopped by ground topology (hills, valley). Simulation mimics the physical behaviour, by pro-

pagating the signal inside a tree rooted at the emitter cell, and covering all the Space in concentric circles. Each new step in the algorithm cover a new circle, and the computation finish in  $2 \times \log n$  steps where  $n$  is the number of cells. During ray propagation, the ground profile is collected into *routes* that are completed progressively based on positions and elevations. Each cell can decide if the emitter is visible or not by comparing its elevation to the received profile.

In practice, for execution, tools allocate cells on the accelerator and compute channel connectivities. The level of effective parallelism is high : common GPUs have several hundred of processors, thus the computation finish at impressive speed (see Table I).

pixels	Processes	GPU
50	1.274	0.194
30	14.624	0.781
25	25.097	1.087

TABLE I

COMPUTATION TIME (SECONDS) UP TO 800 NODES

### IV. CONCLUSION

In the proposed approach, the design of sensor networks and the simulation of physical processes share the same internal model and share generators. These simulations can be federated to build even bigger systems using an approach called High Level Architecture (HLA). It is thus possible to build complex representations taking care of risks, or adjusting control to objectives [3].

Line of sight is currently under practical investigation to support long range radios such as LoRa[1]. LoRa protocol has been experimented on range above 10 kilometers. We expect to introduce signal power estimators inside the developed algorithm.

### RÉFÉRENCES

- [1] LoRa Alliance, 2016.
- [2] Adnan Iqbal and Bernard Pottier. Meta-simulation of large WSN on multi-core computers. In ACM SCS, editor, *SpringSim '10 Proceedings of the 2010 Spring Simulation Multiconference*, Orlando, United States, June 2010.
- [3] Bao Hoai Lam, Tran Hoang van, Hiep Xuan Huynh, and Bernard Pottier. Synchronous networks for insects surveillance. In ACM, editor, *SoICT 2015*, Hue, Vietnam, November 2015.
- [4] Bernard Pottier, Hritam Dutta, Failler Thibault, Nicolas Melot, and Serge Stinckwich. An execution flow for dynamic concurrent systems : simulation of WSN on a Smalltalk/CUDA environment. In Emanuele Menegatti, editor, *SIMPAR'10*, ISBN 978-3-00-032-863, page DYROS, Darmstadt, Germany, November 2010. 6 pages.

# DEVELOPPEMENT D'UN CIRCUIT INTEGRE DE CONDITIONNEMENT HAUTE PERFORMANCE POUR DES APPLICATIONS DE MAGNETOMETRIE SPATIALE

Laurent Varizat<sup>1,2</sup>, Gérard Sou<sup>1</sup>, Malik Mansour<sup>2</sup>, Amine Rhouni<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Electronique et d'Electromagnétisme, Université Pierre et Marie Curie, 4 Place Jussieu, 75005 PARIS, France

<sup>2</sup> 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

[Laurent.varizat@upmc.fr](mailto:Laurent.varizat@upmc.fr)

## RÉSUMÉ

Un nouveau design de circuit de conditionnement pour fluxmètres spatiaux, en technologie AMS 0,35nm est introduit. Un banc instrumental de caractérisation à température cryogénique de cette technologie est présenté. De nouveaux modèles de simulation implémentables dans les outils de CAO microélectronique sont proposés.

**MOTS-CLEFS :** *magnétomètre à induction; ASIC ; AMS 0,35µm ; températures cryogéniques.*

## 1. CONTEXTE

Ce travail s'inscrit dans le cadre du programme spatial (EJSM<sup>1</sup>) d'étude de Jupiter et de ses lunes, mené par l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Il a pour objectif le développement d'un circuit intégré de conditionnement pour des magnétomètres à induction (Fluxmètre) spatiaux. Aux exigences de performance, de consommation, de poids et de taille portant sur ce type d'électronique, s'ajoute des contraintes liées à l'environnement spatial. Elles doivent résister à de fortes doses de radiation pouvant atteindre 400 krads et à des températures pouvant descendre jusqu'à 100 Kelvins. Compte tenu des conditions très particulières de fonctionnement il est nécessaire d'élaborer des modèles de simulation dédiés, représentatifs de l'environnement auquel sera confrontée l'électronique. En effet, les modèles implémentés dans les outils de développement communément utilisés ne peuvent rendre compte des phénomènes liés à ces environnements extrêmes. On présente ici les premiers résultats d'une étude portant sur la caractérisation, à température cryogénique, de la technologie AMS 0,35µm. Cette étude a permis l'élaboration de modèles de simulation qui serviront à la conception d'un circuit de conditionnement haute performance dont on présente le design préliminaire.

## 2. CIRCUIT CRYOGENIQUE POUR MAGNETOMETRES SPATIAUX

Le circuit de conditionnement d'un fluxmètre spatial comporte de nombreuses fonctionnalités (régulation, amplification...) ce qui en fait un circuit de taille conséquente. La demande de miniaturisation et d'intégration, en constante augmentation dans l'industrie spatiale, nécessite une réelle rupture technologique. Les circuits intégrés dédiés (ASIC) permettent cette rupture technologique se traduisant par une réduction de la taille des circuits électroniques embarqués d'un facteur supérieur à 1000 tout en améliorant les performances électriques et instrumentales. Pour réaliser notre circuit, dont le schéma bloc est présenté ci-après (Fig. 1), nous avons fait le choix d'utiliser la technologie CMOS 0.35µm d'AMS<sup>2</sup>, qui est une technologie commerciale, connue pour sa

---

<sup>1</sup> Europa Jupiter System Mission : <http://sci.esa.int/juice/>

<sup>2</sup> Austria Micro System : <http://www.ams.com>

robustesse, ses performances et encore très utilisée en électronique analogique. Cependant il n'existe pas pour cette technologie de bibliothèque de simulation en environnement radiatif et cryogénique standardisée et certifiée.

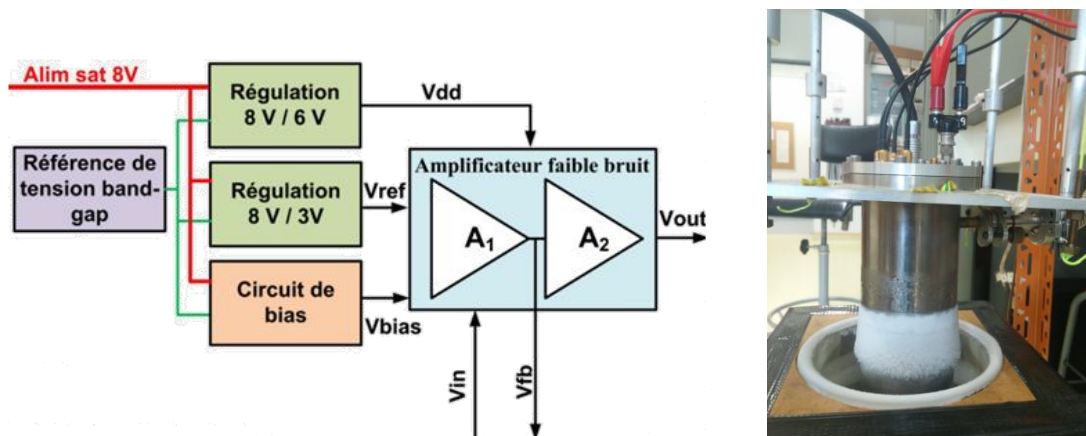


Fig. 1 : Schéma block du circuit de conditionnement du fluxmètre (à gauche) et photo du banc de caractérisation cryogénique (à droite).

Afin d'élaborer les modèles numériques, nécessaires à la conception de notre circuit, un banc de test cryogénique (Fig.1) constitué d'un cryostat, d'un circuit sous vide, d'un ensemble de contrôleurs et d'instruments de mesure a été développé. Le cryostat qui peut être maintenu à une température de consigne en modifiant sa profondeur d'immersion dans un bain d'azote permet une caractérisation par palier, de l'ambiante à 77K. Un circuit de test comportant plusieurs jeux de transistors de différentes formes, types et dimensions a été réalisé. Un protocole précis a été mis en place à l'aide du logiciel IC-CAP<sup>3</sup> permettant l'extraction des paramètres électriques (BSIM3) des différents transistors jusqu'à 77K. On présente les résultats de cette campagne de caractérisation qui a permis de développer des modèles numériques fiables, prenant en compte les phénomènes apparaissant à basse température tel que l'effet de « freeze-out » – correspondant au gel des porteurs de charge dans le semi-conducteur et se manifestant aux alentours de 100K.

### CONCLUSION & PERSPECTIVES

Dans le cadre du développement d'une nouvelle génération de circuit de conditionnement pour fluxmètre spatiaux dont nous présentons le design préliminaire, nous avons mené une campagne de caractérisation de la technologie AMS 0,35 $\mu$ m en environnement cryogénique. Une étude complémentaire portant sur le comportement en radiation, actuellement en cours, permettra à termes de fournir à la communauté un outil de simulation numérique adapté au design de magnétomètres spatiaux.

### REFERENCES

- [1] M. Joël Moutoussamy, "Nouvelles solutions de capteurs à effet de magnétoimpédance géante : Principe, Modélisation et Performances", (2009).
- [2] Fan Xue and Al., "Gate-enclosed nmos transistors", Journal of Semiconductors, (2011).

<sup>3</sup> De Keysight Technologies : <http://www.keysight.com/>



## Etude des performances de capteurs Magnéto(Elasto)Electriques implémentés à l'aide d'une boucle à verrouillage de phase.

May-Tia Yang<sup>1</sup>, Marc Lam Chok Sing<sup>1</sup>, Christophe Dolabdjian<sup>1</sup>,  
Margo Staruch<sup>2</sup>, David Goldstein<sup>2</sup>, Peter Finkel<sup>2</sup>, Jiefang Li<sup>3</sup> and Dwight Viehland<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire GREYC, Université de Caen Normandie, Caen 14032, France

<sup>2</sup>Naval Research Laboratory, Washington, DC 20375, USA

<sup>3</sup>Materials Science and Engineering, Virginia Tech, Blacksburg, Virginia 24061, USA

may-tia.yang@ensicaen.fr

### RÉSUMÉ

Une méthode originale de conditionnement des capteurs Magnéto(Elasto)Electrique est présentée. Elle met en œuvre une boucle à verrouillage de phase (PLL). Cette dernière a pour objectif de suivre la variation de la phase, proportionnelle au champ magnétique appliquée, à la fréquence de résonance du capteur. La méthode et les premiers résultats obtenus, tout à fait honorables pour ce type de dispositif, sont présentés.

**MOTS-CLEFS:** *Magnéto(Elasto)Electrique ; modulation.*

### I. INTRODUCTION

Les capteurs MagnétoElectriques (ME) sont capables de détecter des champs magnétiques de très faibles amplitudes [1], avoisinant le sub-pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  en zone de bruit blanc et les quelques dizaines de fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  en régime de résonance. Le capteur ME utilisé est un « sandwich » formé d'une couche piézoélectrique sertie/collée entre deux électrodes et deux couches magnétostrictives. L'ensemble étant solidaire, toute déformation de la couche ferromagnétique induite par un champ magnétique externe engendre une déformation mécanoélastique de la couche piézoélectrique. Cependant, une haute sensibilité de ces dispositifs requiert une optimisation des circuits de conditionnement et d'amplification. La sensibilité en champ du capteur peut être alors vue dans différents modes de fonctionnement. Soit comme un capteur actif (mode passif) [2], comme un capteur passif (mode actif) [3] (mesure de la variation de la fréquence de résonance électromécanique en fonction du champ magnétique appliqué) ou comme capteur passif (mode actif) en régime de fonctionnement fortement non linéaire [4] (application d'une forte excitation en champ électrique ou magnétique à une fréquence caractéristique). Il est à noter que ces modes de fonctionnement diffèrent notablement. Ici, nous nous intéressons plus particulièrement au mode passif visant à la mesure de la fréquence de résonance. Cette méthode originale de mesure met en œuvre une PLL dans deux modes d'excitation. La mise en place d'une PLL permet de suivre, dans une certaine mesure, les variations de la fréquence de résonance électromécanique du dispositif sous test [5]. Deux modes sont étudiés. Ils sont nommés, respectivement, *E/E* et *M/E* (modulation Electrique ou Magnétique associée à une détection Electrique) [6,7]. La sensibilité maximale en phase est observée à la fréquence de résonance du dispositif. Comme présenté en figure 2, l'erreur de phase observée est alors proportionnelle au champ magnétique (ou à l'induction magnétique) appliqué. La sortie de la boucle de la PLL est, quant à elle, appliquée au capteur. Cette structure permet ainsi d'exciter (électriquement ou magnétiquement) continuellement le capteur

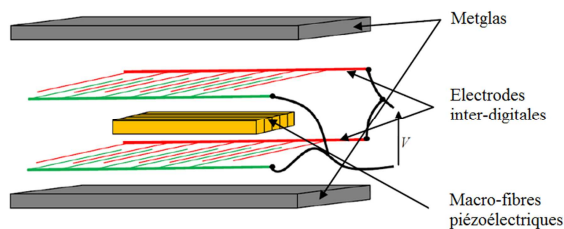


Fig.1 : Détail du capteur étudié

à la fréquence de résonance. Le bruit et la sensibilité du capteur sont observés à la sortie du comparateur de phase,  $V_c$ .

## II. MESURE DE BRUIT

De précédents travaux [5, 8] ont permis de déterminer les sources de bruits dominantes et intrinsèques de ces dispositifs. Néanmoins, les mesures actuelles (cf. Fig.2 (b)) montrent que le bruit de l'électronique de conditionnement domine comme cela a été confirmé à l'aide de mesures faites avec une simple capacité imitant le fonctionnement du capteur.

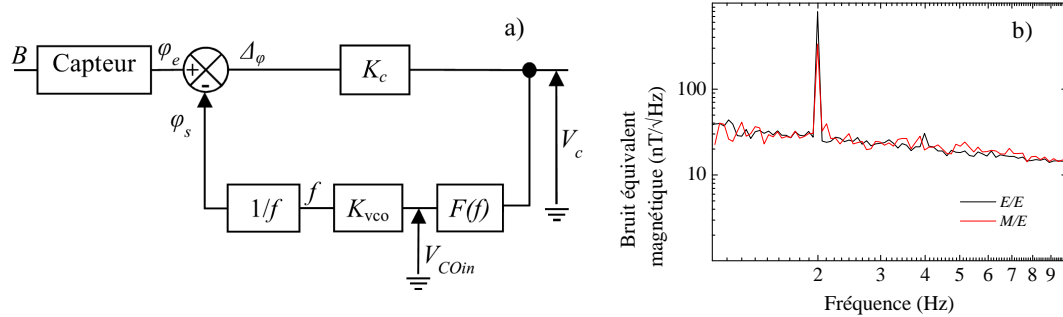


Fig.2 (a) Schéma simplifié de la PLL, (b) mesures du bruit magnétique équivalent en champ apparaissant en modes E/E et M/E. Un signal magnétique de 2 Hz est utilisé comme référence et permet de valider le bon fonctionnement de la chaîne de mesure.

## CONCLUSION

Ces travaux ont montré la faisabilité de la méthode de détection proposée. Actuellement, les niveaux de bruit observés sont principalement dominés par l'électronique de conditionnement. Néanmoins, il est envisagé d'accroître notablement ces performances par l'utilisation de dispositifs MEMS comme le montrent les premières modélisations physiques et comportementales de ces capteurs.

## RÉFÉRENCES

- [1] J. Das, J. Gao, Z. Xing, J. F. Li and D. Viehland "Enhancement in the field sensitivity of magnetoelectric laminate heterostructures", *J. Appl.Phys.*, Vol 95, p. 092501, 2009
- [2] X. Zhuang, S. Saez, M. Lam Chok Sing, C. Cordier, C. Dolabdjian, J. Li, D. Viehland, S. K. Mandal, G. Sreenivasulu, G. Srinivasan, "Investigation on the magnetic noise of stacked magnetostrictive-piezoelectric laminated composites", *Sens. Lett.*, Vol 10 p.961-965, 2012
- [3] J. Kiser, P. Finkel, J. Gao, C. Dolabdjian, J. Li, and D. Viehland "Stress reconfigurable tunable magnetoelectric resonators as magnetic sensors", *J. Appl.Phys.*, Vol. 102, p.042909, 2013
- [4] X. Zhuang, M. Lam Chok Sing, C. Dolabdjian, P. Finkel, J. F. Li, D. Viehland, "Investigations on the equivalent magnetic noise of Magneto(Elasto)Electric sensors by using modulation techniques", *Key Eng. Mater.*, Vol. 605, pp. 344-347, 2014
- [5] M.-T. Yang, X. Zhuang, M. Lam Chok Sing, C. Dolabdjian, D. Goldstein, P. Finkel, J. Li and D. Viehland, "Investigation of a bending mode Magneto(Elasto)Electric sensor using a phase modulation with a PLL", submitted to *IEEE Sensors J.*
- [6] X. Zhuang, M. Lam Chok Sing, C. Dolabdjian, Y. Wang, 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 J.*, Vol 15 p.1575-1587, 2015.
- [7] X. Zhuang, M. Lam Chok Sing and C. Dolabdjian, "Investigation of the near-carrier noise for strain-driven ME laminates by using cross-correlation techniques", *IEEE Trans. Magn.*, Vol 49 p.120-123, 2013
- [8] X. Zhuang, M.T. Yang, M. Lam Chok Sing, C. Dolabdjian, P. Finkel, J. Li and D. Viehland, "Tunable Magnetoelectric bending resonance for sensing static magnetic fields", *IEEE Sensors J.*, Vol.16 p.662-669, 2015





## COMMENT UTILISER L'EFFET GMI ?

Jean-Paul Yonnet

Avec la collaboration de :

**Aktham Asfour, Julie Nabias, Papa Silly Traoré et Manel Zidi**

Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble « G2E Lab », Université Grenoble Alpes – CNRS  
Grenoble, Bât GrEn-ER, 21 rue des Martyrs, 38031 GRENOBLE Cedex 1, France

[Jean-Paul.Yonnet@g2elab.grenoble-inp.fr](mailto:Jean-Paul.Yonnet@g2elab.grenoble-inp.fr)

### RÉSUMÉ

L'objet de cette présentation est de montrer comment il faut alimenter un fil en matériau magnétique amorphe pour obtenir l'effet « Magnéto-Impédance Géante » (GMI), et comment effectuer la mesure d'impédance pour pouvoir mesurer un champ magnétique extérieur.

**MOTS-CLEFS :** *GMI ; capteur de champ magnétique.*

### 1. INTRODUCTION

La Magnéto-Impédance Géante (GMI pour Giant Magneto-Impedance) est une variation importante de l'impédance d'un matériau ferromagnétique amorphe parcouru par un courant alternatif de haute fréquence (HF) quand il est soumis à un champ magnétique extérieur. De nombreuses études ont montré que la GMI dépend fortement du courant HF : sa fréquence, son amplitude et sa valeur moyenne (Figure 1).

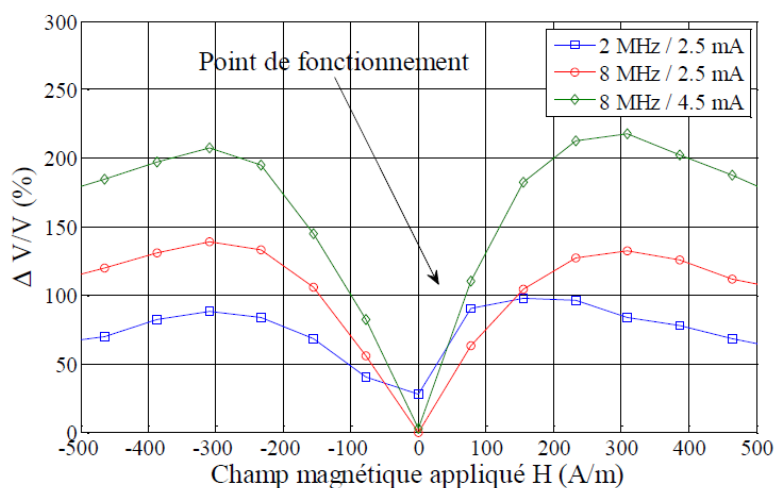


Figure 1 : dépendance de la réponse GMI au champ magnétique appliqué pour différentes fréquences et amplitudes du courant d'excitation.



## **2. ALIMENTATION DU FIL GMI**

La source HF (ou l'oscillateur) permettant d'alimenter en courant l'élément sensible constitue un élément important dans un capteur GMI. Différents types d'oscillateurs sont utilisés, générant des signaux carrés, sinusoïdaux ou impulsionnels.

## **3. MESURE DE L'IMPÉDANCE**

Plusieurs systèmes électroniques permettent de mesurer la tension aux bornes d'un conducteur. Par exemple, les détecteurs de crête sont basés sur un système diode - condensateur - résistance. Ils sont simples à mettre en œuvre, compact et peu coûteux par rapport à d'autres démodulateurs plus sophistiqués. Ce détecteur est largement utilisé dans les capteurs GMI, mais il est limité par la tension de seuil de la diode. Une autre solution à ce problème consiste à utiliser un redresseur actif. Ce type de détecteur permet de redresser le signal alternatif et de mesurer la valeur moyenne du signal redressé. Il est aussi possible d'utiliser un convertisseur « RMS-to-DC ». Cette technique de mesure donne des informations d'amplitude très précise quelle que soit la forme d'onde du signal mesuré. D'autres systèmes ont aussi été testés.

Toutes ces techniques doivent être comparées pour l'application GMI envisagée, en termes de bande passante, de plage dynamique, de complexité, etc. Par exemple certains systèmes de mesure sont mieux adaptés pour les champs magnétiques statiques ou à basse fréquence.

## **4. TRAITEMENT NUMERIQUE DE LA GMI : DDS ET SDR**

L'évolution vers l'électronique numérique apporte des fonctionnalités supplémentaires. Pour l'oscillateur, le générateur est réalisé par DDS (Direct Digital Synthétiser). La mesure de l'impédance est faite par démodulation en quadrature I-Q et le traitement est effectué par logiciel de type SDR [1]. L'ensemble du système est facilement programmable par DSP (Digital Signal Processor).

## **CONCLUSION**

La présentation détaillera ces différents aspects de la conception des capteurs GMI, de l'alimentation du fil à la mesure de l'amplitude. Ces capteurs permettent de mesurer des champs magnétiques, mais aussi de nombreux autres grandeurs comme les courants électriques par la mesure de champ magnétique.

## **RÉFÉRENCES**

- [1] A. Asfour, J-P. Yonnet and M. Zidi, "Towards a Novel Digital Electronic Conditioning for the GMI Magnetic Sensors: the Software Defined Radio (SDR)", IEEE Trans on Magn, Vol. 51, 2015, n°1, DOI 10.1109/TMAG.2014.2357053

# MESURE DE ROTATIONS DE POLARISATION AU NANORADIAN

**Indira Zhaksylykova, Yves Lassailly, Jacques Peretti et Alistair Rowe**

Laboratoire de Physique de la Matière Condensée, Ecole Polytechnique, CNRS, 91128 Palaiseau,  
France

[indira.zhaksylykova@polytechnique.edu](mailto:indira.zhaksylykova@polytechnique.edu)

## RÉSUMÉ

La mesure de rotations de polarisation au niveau du nanoradian est un enjeu pour l'étude des matériaux faiblement magnétiques (supraconducteurs exotiques, nanoparticules magnétiques, semi-conducteurs aimantés par injection d'électrons polarisés de spin). Nous comparons ici les performances ultimes de trois méthodes : les polariseurs croisés partiellement (PCP), le pont optique et l'interféromètre de Sagnac. La détection d'une rotation Faraday de 3 nrad est démontrée dans un grenat. La meilleure figure de mérite est obtenue avec le pont optique qui permet facilement de se placer dans les conditions optimales de mesure limitée par le bruit de grenaille des photons, ce qui est plus difficile avec les autres configurations en raison de rapports d'extinction (ou de visibilités de franges) non nulles. L'interféromètre de Sagnac, fonctionnellement équivalent au PCP, a lui pour avantage de pouvoir être utilisé dans différentes configurations qui permettent de discriminer entre les phénomènes optiques de symétries différentes: rotation Faraday, biréfringence linéaire et chiralité.

**MOTS-CLEFS :** *nanoradian, rotation Faraday, pont optique, interféromètre de Sagnac.*

## 1. INTRODUCTION

La mesure de l'angle de rotation Faraday ( $\theta_F$ ) est généralement réalisée avec des polariseurs croisés partiellement (PCP). Le signal maximum est obtenu pour un angle d'analyse de  $\pi/4$  mais l'optimum du rapport signal-à-bruit est obtenu lorsque la mesure est limitée par le bruit de grenaille des photons ce qui peut être réalisé lorsque l'analyseur est désorienté d'un angle de l'ordre de  $\sqrt{\theta_F}$  par rapport à la position croisée. L'alignement de l'analyseur est alors un défi pour des rotations de quelques nanoradians. Une autre possibilité, qui permet d'éviter ce problème, est le pont optique, dans lequel l'analyseur est remplacé par un cube séparateur de polarisation et la différence entre les intensités des deux faisceaux est directement mesurée dans un système de deux photodiodes connectées tête-bêche. Dans ce cas, les conditions optimales de signal et de rapport signal-à-bruit limitée par le bruit de grenaille de photons sont facilement réalisées simultanément lorsque le pont est équilibré. Une troisième technique, plus récente, utilise un interféromètre de Sagnac modifié où le faisceau sonde est séparé en deux faisceaux de puissances égales, qui circulent en sens opposés dans une boucle et sondent l'échantillon dans deux directions réciproques, puis se recombinent sur le séparateur de faisceau. Dans la géométrie adaptée, l'interférence résultante est uniquement sensible à des phénomènes optiques non réciproques telles que la rotation de Faraday. Dans ce cas, le Sagnac est fonctionnellement identique aux PCP. Avec les trois techniques, les bruits extrinsèques tels que le bruit électronique (indépendant de l'intensité lumineuse) et le bruit de source (proportionnel à l'intensité lumineuse) peuvent être minimisés de sorte qu'une mesure limitée par le bruit de grenaille des photons est possible. Dans ces conditions, la valeur optimum de la figure de mérite (FM) devrait être, en principe, identique pour les trois techniques.

## 2. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Nous avons mis en œuvre les trois techniques pour mesurer  $\theta_F$  sur un grenat Tb-Ga jusqu'à l'échelle du nanoradian. La FM en fonction de l'angle d'analyse est représentée sur la Fig. 1. Les contributions associées à chaque source de bruit sont tracées. L'allure similaire des courbes

obtenues avec les PCP et le Sagnac reflète l'équivalence fonctionnelle des deux configurations, avec une FM maximale au voisinage du croisement (ou de la frange sombre). A cause de la valeur non nulle du rapport d'extinction des PCP ( $4 \times 10^{-4}$ ) et de la visibilité des franges ( $4 \times 10^{-2}$ ) dues aux réflexions inévitables dans le Sagnac, le bruit source domine et la FM est réduite. Par contre, la limite de bruit de grenaille est obtenue avec le pont optique équilibré, qui présente une FM 1,7 fois supérieure à la meilleure configuration des PCP et environ 6 fois supérieure à celle du Sagnac. Les encarts montrent la mesure, dans une bande passante de 1,5 Hz, d'une rotation Faraday de 3 nrad lorsqu'un faible champ magnétique est appliqué (zone grisée). Un signal significatif est observé dans le cas du pont optique et des PCP, mais est au-dessous du seuil de détection dans le Sagnac.

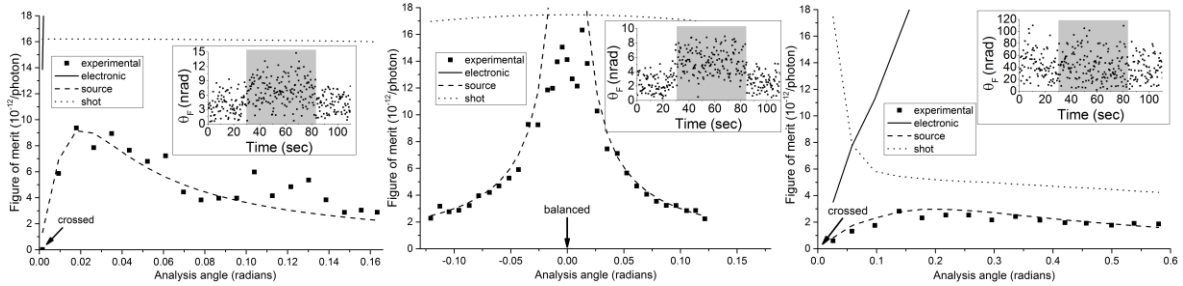


Fig. 1: FM en fonction de l'angle d'analyse (de gauche à droite) des PCP, du pont optique et du Sagnac pour  $\theta_F = 36 \mu\text{rad}$ . En encart, signal mesuré pour  $\theta_F = 3 \text{ nrad}$  (zone grisée) avec une bande passante de 1,5 Hz.

### 3. L'INTERFEROMETRE DE SAGNAC

Du point de vue de la sensibilité, le Sagnac semble être l'option la moins performante. L'utilité du Sagnac [1] tient en fait plutôt à ce qu'il est capable de discriminer entre des phénomènes optiques de différentes symétries temporelles et spatiales. En utilisant le formalisme de Jones, on montre facilement que les trois géométries présentées dans la Fig. 2, sont sensibles, respectivement, (de gauche à droite) au magnétisme seul, à la biréfringence linéaire et la chiralité et, enfin, à la chiralité uniquement. Le point important à noter est que, contrairement à ce qui est souvent avancé dans la littérature, l'interféromètre de Sagnac n'est pas intrinsèquement sensible au magnétisme seulement, mais sa symétrie peut être adapté à la mesure souhaitée. Ceci sera discuté en détail.

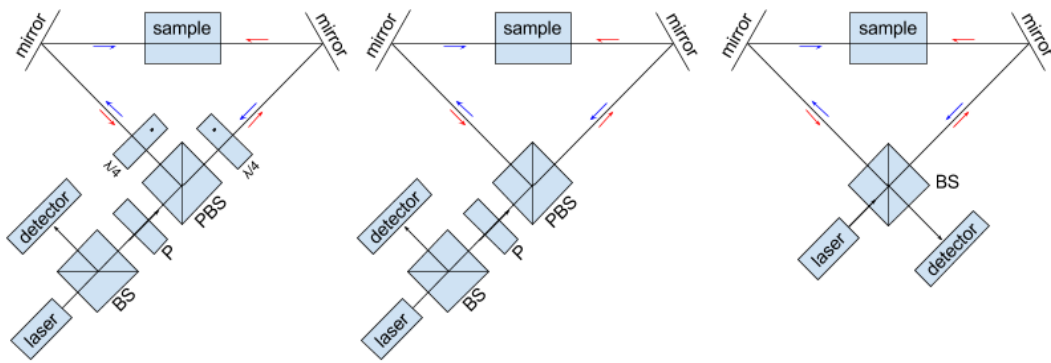


Fig. 2 : Différentes géométries de l'interféromètre de Sagnac sensibles au magnétisme seul (gauche), à la biréfringence linéaire et la chiralité (centre), et à la chiralité seule (droite).

### CONCLUSION

La meilleure configuration pour réaliser une mesure de rotation de polarisation au niveau du nanoradian, dans la limite de bruit quantique des photons, est celle du pont optique. L'interféromètre de Sagnac est fonctionnellement équivalent aux PCP et n'a d'intérêt spécifique que lorsque la discrimination entre différents phénomènes optiques est par ailleurs impossible.

### REFERENCES

[1] A. Kapitulnik, J. S. Dodge, and M. M. Fejer, J. Appl. Phys. **75**, 6872 (1994)



## **DEVELOPMENT OF MICRONIC GMR-MAGNETORESISTIVE SENSORS FOR NON-DESTRUCTIVE SENSING APPLICATIONS.**

Henri Jaffrès<sup>1</sup>; Yves Lemaitre<sup>1</sup>; Sophie Collin<sup>1</sup>; A. Jouy<sup>1</sup>, Frédéric Nguyen Vandau<sup>1</sup>; Natalia Sergeeva-Chollet<sup>2</sup>; Jean-Marc Decitre<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Unité Mixte de Physique, CNRS, Thales, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 91767 Palaiseau, France

<sup>2</sup>CEA-LIST Saclay, DIGITEO Labs Bât. 565, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

henri.jaffres@thalesgroup.com

### **RÉSUMÉ**

We will present our last development of GMR-based magnetic sensors devoted to sensing application for non-destructive control application. In these first realizations, we have chosen a so-called shape anisotropy - exchange biased strategy to fulfill the field-sensing criteria in the  $\mu\text{T}$  range in devices made of micronic single elements. Our devices realized by optical lithography, and whose typical sizes range from  $150\ \mu\text{m} \times 150\ \mu\text{m}$  to  $500\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$  elements, are made of trilayers GMR-based technology and consist of several circuitries of GMR elements of different lengths, widths and gaps. To obtain a full sensing linearity and reversibility requiring a perpendicular magnetic arrangement between both sensitive and hard layer, the magnetization of the latter have been hardened by pinning it with an antiferromagnetic material. The specific geometry of the design have been engineered in order to optimize the magnetic response of the soft layer via the different magnetic torques exerted on it essentially played by the dipolar fields or shape anisotropy, and the external magnetic field to detect. The smaller dimensions in width and in gap are then respectively of  $2\ \mu\text{m}$  and  $3\ \mu\text{m}$  to benefit of the full shape anisotropy formatting the magnetic response.

### **MOTS-CLEFS :**

*Magnetoresistive sensors.*

*Giant MagnetoResistance.*

*Non-Destructive control.*

*Magnetic coupling,*

*Magnetostatic.*