

Jacek Gierałtowski¹

Note d'information relative aux thèmes de la coopération scientifique entre l'Institut de Physique (IF) de l'Académie Polonaise des Sciences (PAN), Varsovie, Pologne, et le Laboratoire de Magnétisme de Bretagne (LMB, FRE CNRS 2697) du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et de l'Université de Bretagne Occidentale (UBO), Brest, France

La collaboration entre les deux Centres fut initiée officiellement en 2005 et concernait un projet pluridisciplinaire relatif aux capteurs électromagnétiques ultra-sensibles pour les applications biomédicales développés dans le cadre d'un thème générique concernant les micro- et nano-technologies pour l'investigation du vivant. Le projet a fait l'objet d'une convention bilatérale de collaboration PAN-CNRS, ratifiée par les deux parties pour les périodes annuelles 2005-2008. Au cours des années 2006-2008, le projet a été élargi (en dehors de la convention pré-citée) aux études expérimentales/fondamentales relatives à la physique des nanostructures magnétiques à dimensionnalité réduite telles que les nanofils ferromagnétiques (2007-2008) et, récemment, aux structures ferro-/antiferromagnétiques nanométriques couplées par échange (2008).

Ainsi, les thèmes de recherches dégagés dans le passé et actuellement en cours réalisation sont les suivants :

1. Micro- et nanotechnologies intégrées pour les capteurs électromagnétiques ultra-sensibles intéressant les applications biomédicales (2005-2008, Convention d'échange CNRS-

¹ (ndr) Laboratoire de Magnétisme de Bretagne, CNRS-Université de Bretagne Occidentale, Brest.

PAN N°19 536, IF PAN (Unité de recherche sur la physique du magnétisme), Varsovie, Pologne – LMB (FRE CNRS 2697, UBO, Brest, France). Responsables (coordonnateurs) du projet : Dr Andrzej WIŚNIEWSKI (coordonnateurs polonais) et Prof. Jacek GIERAŁTOWSKI (coordonnateurs français).

2. Élaboration et étude des propriétés statiques et dynamiques des nano-fils ferromagnétiques (collaboration bilatérale entre IF PAN, Varsovie, Pologne – LMB, UBO, Brest, France).
3. Mécanismes d'aimantation des bi- et tri-couches ferro-/antiferromagnétiques nanométriques couplées par échange (collaboration bilatérale entre IF PAN, Varsovie, Pologne – LMB, UBO, Brest, France).

Les actions listées sont détaillées et commentées davantage dans les parties suivantes de ce document sous forme d'un texte concernant la coopération pluriannuelle et ses résultats (Thème 1) et d'un propos exposant des sujets nouveaux de coopération et des personnes y engagés (Thèmes 2 et 3).

Partie 1 : La coopération pluriannuelle et ses résultats (Thème 1)

Thème 1 : Micro- et nanotechnologies intégrées pour les capteurs électromagnétiques ultra-sensibles intéressant les applications biomédicales

1.1. Présentation générale

Le projet est réalisé conjointement au sein du Laboratoire de Magnétisme de Bretagne, UBO, Brest, France, et du Département de physique du magnétisme de l'IF PAN, Varsovie, Pologne, en collaboration avec le laboratoire de Biophysique de la Faculté de Médecine à l'UBO, Brest, et le laboratoire de l'École Normale Supérieure de Cachan, France (laboratoire SATIE, UMR CNRS 8029) ainsi qu'avec le laboratoire GREYC (UMR CNRS 6072) à l'Université de Caen, France.

Le but du projet est de mettre en œuvre des programmes de recherche en amont coopératifs et exploratoires aboutissant à la réalisation de prototypes de dispositifs et de composants faisant l'objet du projet. Plus précisément, le projet concerne la mise en œuvre d'une action scientifique et technique relative à l'imagerie magnétique (en

particulier, biomédicale) haute résolution, non-invasive. L'objectif recherché est d'utiliser le magnétisme pour proposer une nouvelle génération des prototypes de biocapteurs. Ces capteurs seraient sans contact, à haute sensibilité et intégration, plus performants en termes d'identification rapide et faible seuil de détection d'entités biologiques. La conception des capteurs est basée sur un effet physique, la Magnéto-Impédance-Géante¹ (GMI), bien approprié à la réalisation des composants-capteurs de haute sensibilité, de grande résolution, de faible consommation d'énergie et de faible coût.

Le projet engage les connaissances, le savoir-faire et le grand potentiel d'expérimentation des laboratoires concernés surtout dans la recherche en amont de matériaux nouveaux ayant des compositions ou de structures nouvelles présentant un comportement magnétique doux intéressant les capteurs GMI, puis, relative à la réalisation des prototypes de capteurs recherchés.

La thématique de recherche du projet concerne surtout les domaines appliqués suivants :

a) Biomédecine minimalement- ou non-invasive :

- Imagerie médicale magnétique ;
- Micro- et nanotechnologies médicales ou biologiques : nanomatériaux magnétiques de contraste, nanomatériaux pour les capteurs ultra-sensibles électromagnétiques du champ magnétique faible.

b) Détection et dépistage micro-fluidique in vitro et/ou in vivo des molécules biologiques à l'aide d'un réseau de nano-fils ferromagnétiques ayant une structure appropriée.

La mise en œuvre du projet prévoit la participation du personnel des laboratoires précités, et surtout des chercheurs suivants :

¹ GMI : variation relative de l'impédance électrique complexe d'un conducteur ferromagnétique doux parcouru par un courant alternatif de faible amplitude lorsqu'il est dans un champ magnétique extérieur ; elle peut atteindre, dans certaines géométries, ~1000%, à comparer aux ~50% d'une magnétorésistance à effet tunnel utilisée dans le stockage de données.

1. IF PAN, Varsovie, Pologne : Dr Marek KUŹMIŃSKI, Dr Ryszard ŻUBEREK, Dr Andrzej WIŚNIEWSKI, Prof. Anna SŁAWSKA-WANIEWSKA, Prof. Henryk SZYM CZAK.
2. LMB, UBO et laboratoires coopérants, France : Mlle Saïda NABILY (thèse de doctorat de 3 ans financée par la Région Bretagne dans le domaine de « Nanomatériaux et Technologies pour la Santé », Directeur de thèse : Prof. J. Gierałtowski), Dr Alain FAISSANT, Prof. Jacek GIERAŁTOWSKI, Prof. Charbel TANNOUS, Dr Alexandre TURZO (Faculté de Médecine, UBO, Brest), Dr Frédérique BLANC (Faculté de Médecine, UBO, Brest), Prof. Christophe DOLABDIJAN (laboratoire GREYC, Caen), Prof. Francisco ALVES (laboratoire SATIE à l'ENS Cachan et Laboratoire de Génie Électrique de Paris/membre de SPEE Labs., UMR 8507 CNRS – SUPELEC-Universités Paris 6 et Paris 11, Département de Recherche MOCOSEM, Équipe COCODI, Gif-sur-Yvette).

1.2. Objectifs scientifiques détaillés du projet conjoint

Les Nanotechnologies pour la Santé jouent un rôle de plus en plus croissant et stratégique dans les applications biomédicales. Elles sont issues de recherches multidisciplinaires, associant des laboratoires de recherche en mathématiques, physique, chimie, biologie, des professionnels de la santé et des industriels du domaine.

Le but recherché du projet est d'utiliser les bienfaits de matériaux magnétiques et de profiter des avancées dans le domaine des micro-et nanotechnologies pour proposer une nouvelle génération de biocapteurs plus performants en terme d'identification rapide et de diminution du seuil de détection d'entités biologiques allant de la cellule (1 μm) à un fragment d'ADN (100 nm) et finalement à la protéine (10 nm).

Le fonctionnement des capteurs mentionnés sera basé sur le phénomène de Magnéto-Impédance Géante (GMI).

Bien que les techniques classiques de détection (électrique, électrochimique et optique) soient éprouvées, elles présentent néanmoins des inconvénients tels que coût élevé, temps d'analyse long et seuil de détection non-approprié. La méthode magnétique offre des avantages indéniables comme des mesures rapides, un

faible coût et une meilleure sensibilité. Les dimensions des capteurs magnéto-impédants à développer seront donc à l'image des éléments biologiques à étudier, à savoir de 20 μm (couches minces ou micro-fils) à 30-100 nm (nano-fils).

Les applications de la GMI dans le domaine médical voient actuellement un développement spectaculaire (dépistage de tumeurs, tomographie médicale en 3D, endoscopie par cathéter en présence de capteurs GMI, etc....) en offrant un outil puissant avec une nouvelle approche (peu coûteuse et non invasive biologiquement) de l'imagerie médicale par détection de champs magnétiques faibles. Ce type d'étude est reconnu comme novateur et stratégique pour des applications scientifiques et industrielles de pointe qui se distingue des techniques SQUID (supraconducteurs) ou de résonance nucléaire (IRM) qui exigent des investissements conséquents.

Aujourd'hui, les systèmes de biocapteurs à magnétorésistance géante, par exemple, utilisant les micro- ou nanoparticules magnétiques de contraste et le champ magnétique extérieur de polarisation, sont à l'étude dans le domaine de la recherche académique. Ces particules utilisées comme des marqueurs magnétiques biocompatibles ont des caractéristiques supérieures aux molécules fluorescentes, aux radio-isotopes et aux enzymes. L'accroissement de la sensibilité et de la fiabilité d'un biocapteur est ici la clé déterminante pour la détection de faibles concentrations d'entités biologiques.

Le projet est principalement de caractère expérimental et devrait être réalisé conjointement au sein des laboratoires participants compétents. L'objectif visé est surtout la recherche de nouveaux matériaux magnétiques du point de vue des compositions et de la structure (en mono- et/ou multi- couches micro- et nanométriques, micro- et nanofils) présentant un comportement magnétique superdoux intéressant les capteurs GMI pour les applications biomédicales. Ainsi, les travaux du projet en commun, en ce qui concerne la recherche et les applications, sont les suivants :

1. Recherche, étude et/ou élaboration de nouveaux matériaux amorphes et/ou nanocristallins super doux à base de Cobalt et de Fer à grande aimantation de saturation, préconisés pour un effet GMI, biocompatibles avec les systèmes visés. On

pourra raisonnablement atteindre des sensibilités au champ magnétique de l'ordre de 2,5% / μT à des fréquences de 10 MHz. Ces matériaux présentent également une stabilité thermique sans équivalent dans le monde des matériaux magnétiques.

2. Recherche de nanoparticules à forte aimantation magnétique biocompatibles avec les systèmes biologiques étudiés.
3. Caractérisation électromagnétique de l'effet GMI et des propriétés physico-chimiques des matériaux et des structures élaborés.
4. Transfert des résultats obtenus vers des applications liées au domaine de capteurs biomédicaux GMI à haute sensibilité.
5. Réalisation de prototypes de capteurs biocompatibles avec les systèmes biologiques visés (y compris ceux à base de nanofils) pour les applications biomédicales et expérimentation in vitro et/ou in vivo sur les animaux (en collaboration avec les services biomédicaux compétents).

Temps nécessaire pour la réalisation du projet : 4 ans.

1.3. Information sur la période, le mode et les résultats principaux déjà obtenus de la coopération précédente entre les partenaires

La collaboration entre les deux Centres de recherche fut initiée en 2003 et concernait la recherche sur le phénomène de magnéto-impédance géante (GMI) dans les couches minces et les micro- et nanofils magnétiques. Cette thématique a été ensuite élargie, en 2005 (convention officielle de collaboration), par l'étude concernant les biocapteurs (cf. § 1.1. – 1.3. de ce document).

La réalisation de la phase initiale du projet (étapes I et II prévues pour les années 2006–2007) a été effectuée dans le cadre des activités propres des Centres concernés (IF PAN et LMB UBO) ainsi que des consultations courantes et visites d'échange du personnel scientifique participant dans la réalisation du projet, c'est-à-dire des visites scientifiques de deux semaines à l'IF PAN par 2 membres du LMB CNRS (2006 et 2007) ainsi que des visites scientifiques de deux semaines au LMB CNRS à Brest par 3 personnes de l'IF PAN (2006 et 2007).

Le caractère expérimental du projet ainsi que les objectifs visés justifiaient le montage des actions orientées principalement sur la recherche et l'investigation de nouveaux matériaux magnétiques adaptés à la réalisation des capteurs utilisant l'effet de la magnéto-impédance géante (GMI) du point de vue de leurs composition chimique et structure (structures en films minces mono- et multicouches, micro- et nanofils magnétiques) ainsi que de leurs propriétés magnétiques (matériaux magnétiques doux). Les travaux étaient menés simultanément et concernaient aussi bien les structures nanométriques (nanofils ferromagnétiques) et micrométriques (micro-fils amorphes magnétiques doux) que les structures magnétiques planaires (films minces et rubans amorphes).

Parmi les prototypes de capteurs élaborés, les capteurs réalisés sur la base de micro-fils amorphes montraient les paramètres techniques les plus intéressants permettant d'effectuer la mesure de champs magnétiques faibles de l'ordre de 10^{-12} T. Ce résultat, obtenu avec la prise en compte de mesure du bruit, a été estimé expérimentalement dans le cadre d'une collaboration avec le laboratoire de magnétométrie GREYC (Université de Caen, France). Les sensibilités de mesure ainsi obtenues se sont montrées satisfaisantes pour effectuer à bien des essais initiaux de détection *in vitro* de faibles variations de champs magnétiques induites par l'introduction dans l'espace de mesure, entre autres, d'échantillons biologiques contenant des nanoparticules ayant un contraste magnétique (γ -Fe₂O₃) avec différentes concentrations de l'ordre de grandeur de 1.10^{-2} à 6 mg/ml, calibrées par ailleurs. Les échantillons prémentionnés ont été élaborés dans un laboratoire spécialisé de médecine nucléaire de l'hôpital CHU à Brest sur la base de cellules de cancer de la prostate. Les expérimentations en cours sont orientées vers l'optimisation des paramètres technologiques du système de détection (suite des investigations structurales des matériaux concernés ainsi que sur l'élaboration d'un prototype de système numérique de visualisation des agglomérats de particules révélant un contraste magnétique de la distribution spatiale donnée (limitées dans un premier temps à un espace bidimensionnel).

Des perspectives de l'accroissement de la sensibilité et du pouvoir de résolution du dispositif réalisé sont actuellement liées à la conception d'utilisation des nano-fils magnétiques (préparés et

étudiés au LMB CNRS à Brest) à l'élaboration d'une matrice de mesure multiélément.

Des descriptions et observations plus détaillées sur quelques travaux effectués/avancés sont présentées ci-dessous :

1. Quelques séries d'échantillons ont été élaborées au LMB CNRS à Brest : (i) échantillons de nanofils de Nickel et Cobalt déposés dans les matrices de polycarbonate, (ii) séries d'échantillons de micro-fils amorphes d'alliages de Co-Fe-Si-B de différents diamètres, (iii) séries d'échantillons de micro-fils amorphes d'alliages de Fe-Co-Si-B et Fe-Si-B de différents diamètres et couverts par une couche de verre de différentes épaisseurs, (iv) échantillons de couches minces polycristallines d'alliage de type Ni-Fe de différentes épaisseurs micro-/nanométriques). Par ailleurs, les échantillons élaborés à l'IF PAN sont d'alliages amorphes magnétiques doux de type Co-Fe-Mo-Si-B modifiés technologiquement par des recuits à différentes températures (200-500°C). Ils possèdent une géométrie variable (rubans de différentes largeurs et longueurs).
2. Une étude de l'influence des contraintes sur l'anisotropie magnétique des nanofils de Nickel et de Cobalt dans les matrices de polycarbonate élaborés au LMB à Brest a été effectuée. L'étude a été réalisée à l'IF PAN à l'aide de la résonance ferromagnétique FMR dans la bande de fréquence X. Les nanofils de Nickel et de Cobalt, préparés à l'aide de l'électrodéposition dans une matrice de polycarbonate, avaient des diamètres de 50 et 80 nm et des densités de pores de l'ordre de $10^8/\text{cm}^2$ (porosité de 1-2%). La longueur des nanofils était de 6 μm . Les mesures de l'anisotropie de nanofils ont été effectuées dans les champs magnétiques extérieurs ayant soit une orientation parallèle, soit à une orientation perpendiculaire à l'axe des nanofils et dans une gamme de températures de l'Hélium liquide (4,2 K) jusqu'à la température ambiante. Étant donné que des interactions dipolaires dépendent de la porosité de la matrice, on a constaté que l'anisotropie magnétique à la température ambiante était proche de l'anisotropie de forme de l'échantillon. La porosité des échantillons étudiés

étant très faible, l'influence des interactions dipolaires était négligeable. En raison de la modification des valeurs des coefficients de dilatation thermique avec le changement de la température, des contraintes mécaniques significatives pouvaient apparaître au sein des échantillons et modifier, via l'effet magnétostrictif l'anisotropie magnétique des échantillons mesurés. On a constaté une augmentation particulièrement marquée de l'anisotropie pour les nanofils de Nickel. La variation d'anisotropie en fonction de la température était beaucoup moins significative dans les cas de nanofils de Cobalt. La raison plausible d'un tel comportement peut être la non homogénéité des nanofils de Cobalt, par exemple. Un caractère novateur des travaux et les résultats obtenus ont permis de les soumettre sous forme d'une communication scientifique (session poster) au symposium scientifique organisé par le CNRS et la PAN à Paris, en octobre 2007, à l'occasion de la célébration du 50^e anniversaire de la coopération scientifique entre le CNRS et la PAN [1]. Indépendamment, une publication à soumettre dans une revue scientifique internationale à comité de lecture est en cours de rédaction.

3. Une étude de la magnéto-impédance (MI) en haute fréquence (jusqu'à 500 MHz) a été faite pour une série d'échantillons magnétiquement doux d'alliages amorphes de type Co-Fe-Mo-Si-B et ayant différentes géométries de forme (rubans de différentes largeurs). Ces échantillons étaient modifiés par un recuit à différentes températures (200-500°C). De cette manière, on a étudié l'influence de la relaxation thermique (températures faibles) ainsi que les effets de nano-cristallisation (températures plus élevées) sur les propriétés des échantillons testés. Pour les mesures en fonction de la fréquence, on a utilisé un analyseur de réseau pouvant déterminer le coefficient de réflexion (S_{11}) du signal électrique HF d'une ligne coaxiale chargée par l'échantillon de forme allongée. Les résultats obtenus indiquent une forte dépendance de la susceptibilité circonférentielle et de la magnéto-impédance du champ magnétique. Les doubles maxima (avec faibles hystérésis) observés dans le profil de la MI, sont liés principalement à une contribution à la susceptibilité magnétique du processus de rotation des

moments magnétiques dans le mécanisme d'aimantation. Un recuit de relaxation à basses températures (200-300°C), au dessus de la température de Curie mais nettement au dessous de la température de cristallisation, modifie de façon significative la susceptibilité transverse et les caractéristiques de la magnéto-impédance, particulièrement très près des maxima du profil de la MI. C'est une méthode d'amélioration de la sensibilité maximale transverse différentielle des échantillons MI. Ceci permet également une modification (optimisation) du profil de l'impédance $Z(H)$ de l'échantillon en fonction du champ utilisé et bien adapté aux besoins pratiques imposés par l'application donnée. Un recuit aux températures plus élevées mène vers une recristallisation et, pour des températures proches de 500°C, à l'obtention d'une nanostructure homogène modifiant les propriétés magnétiques du matériau. Par conséquent, on obtient des pentes abruptes dans le profil de la MI (près des maxima) donnant une grande valeur de la sensibilité maximale transverse différentielle des échantillons. En général, la variation du module de l'impédance en fonction du champ magnétique pour la transition en fréquence de 10^6 à 10^8 Hz, est fluide (en grande partie monotone). On observe en même temps une diminution significative du coefficient relatif de la MI. Ceci est principalement dû à une faible valeur de la résistance électrique (en courant continu) des échantillons par rapport à la partie réactante dans l'impédance et dépendant de l'induction dite géométrique des échantillons. On observe également une réduction de l'effet d'hystérésis de la MI pour laquelle les maxima deviennent moins abrupts. Ce comportement est dû, entre autre, à l'amortissement de mouvement des parois magnétiques, à l'accroissement de l'influence de l'amortissement sur la rotation des moments magnétiques dans le processus d'aimantation ainsi qu'à l'accroissement du rôle des parties surfaciques de l'échantillon sur la formation du profil de la MI. Les résultats obtenus ont été publiés sous forme d'un poster à la Conférence internationale « Soft Magnetic Materials » à Cardiff [2] ainsi qu'à la session poster au symposium scientifique organisé par le CNRS et la PAN à Paris, en octobre 2007 à l'occasion de la célébration du 50^e

anniversaire de la coopération scientifique entre le CNRS et la PAN [3]. Indépendamment, une publication à soumettre dans une revue scientifique internationale à comité de lecture est en cours de rédaction.

4. On vient de commencer l'étude de l'effet de la MI pour les échantillons en films minces polycristallins de Ni-Fe de différentes épaisseurs. Le but visé de cette étude est le test des modèles théoriques existants concernant la magnéto-impédance (en basses, moyennes et hautes fréquences de l'ordre de GHz) pour des échantillons élaborés d'un alliage magnétiquement homogène et doux ayant une géométrie bien déterminée.

1.4. Communications scientifiques communes soumises et/ou publiées à des symposiums/conférences scientifiques internationaux :

[1] R. Żuberek (a), J. Gieraltowski (b), A. Ghaddar (b), F. Gloaguen (c), P. Aleshkevych (a), H. Szymczak (a), « Ferromagnetic resonance (FMR) studies of magnetic anisotropy in Ni and Co nanowires embedded in polycarbonate membranes », (a) Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Al. Lotników 32/46 02-668, Warsaw, Poland ; (b) Laboratoire de Magnétisme de Bretagne, FRE CNRS N° 2697, Université de Bretagne Occidentale, 6, Avenue Le Gorgeu, C.S. 93837 - 29238 Brest Cedex 3, France ; (c) Laboratoire de l'Électrochimie Moléculaire et de la Chimie Analytique, CNRS, UMR 6521, Université de Bretagne Occidentale, 6, Avenue Le Gorgeu, C. S. 93837 - 29238 Brest Cedex 3, France.

Publication commune en préparation.

[2] M. Kuźmiński, S. Nabily, J. Gieraltowski, A. Krzyżewski, « Giant Magnetoimpedance in soft magnetics studied in a wide AC - current frequency range », Conférence Internationale SMM 18 à Cardiff, Grande Bretagne, sept. (2007).

[3] M. Kuźmiński (a), J. Gieraltowski (b), S. Nabily (b), A. Krzyżewski (a), « Giant Magneto-Impedance effect in Co-rich melt-spun alloys for high sensitivity magnetometers ».

(a) Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warsaw, Poland, (b) Laboratoire de Magnétisme de Bretagne, FRE CNRS N° 2697, Université de Bretagne Occidentale, 6, Avenue Le Gorgeu, C.S. 93837 - 29238 Brest Cedex 3, France.

Partie 2 : Des sujets nouveaux de coopération et des personnes y engagées (thèmes 2 et 3)

Thème 2 : Élaboration et étude des propriétés statiques et dynamiques des nano-fils ferromagnétiques

Le sujet de collaboration concerne les structures magnétiques nanométriques de basse dimensionnalité possèdent des propriétés spécifiques différentes de celles des matériaux massifs et des structures en films minces. Les paramètres géométriques (forme, dimension caractéristique minimale) prennent ici une importance significative quand les échelles de longueurs des structures deviennent comparables avec des grandeurs caractéristiques du matériau (ou de la structure magnétique) telles que la dimension du grain, l'épaisseur de la paroi magnétique ou la portée de l'interaction d'échange ou plus spécifiquement dans des utilisations en fréquence avec la longueur d'onde du signal interagissant. De plus, un grand rapport de surface sur volume magnétique (en particulier dans le cas des hétérostructures) amplifie le rôle de l'anisotropie de surface. Ceci est à l'origine des nombreuses propriétés et phénomènes physiques inhabituels se retrouvant à la base de technologies nouvelles appliquées dans certains nano-dispositifs modernes. Ce fut le cas de la Magnétorésistance Géante (GMR), étudiée intensivement depuis 1988 et utilisée à présent dans les têtes de lecture des systèmes d'enregistrement magnétique, par exemple.

Les nano-fils ferromagnétiques possédant une GMR pourraient prendre la relève dans ce domaine des couches minces utilisées jusqu'à maintenant. Ils peuvent trouver des applications dans une nouvelle génération de mémoires magnétiques (type plots), dans un nouveau type de capteurs magnétiques, dans les matériaux micro-ondes ou dans les dispositifs optiques ou électroluminescents.

L'objectif visé de collaboration est d'étudier la dynamique de spins et les phénomènes linéaires et non-linéaires de renversement de

l'aimantation (en particulier la résonance de spins) dans les nano-objets structurés. L'étude s'effectuera principalement en fonction de la fréquence dans les nano-fils constitués des structures en multicouches de Ni, NiFe, Co/Cu ou de piliers Co/Cu/Co (60 nm de diamètre environ), élaborés par la technique d'électrodéposition. Ces types de structures sont particulièrement intéressants pour des études fondamentales dans les différents domaines de sciences nanométriques appliquées telles que le transport électronique direct (GMR) ou par injection du courant polarisé en spin, le renversement de l'aimantation, ou enfin, tout autre phénomène opérant à des longueurs caractéristiques comparables ou plus faibles que les longueurs de cohérence du ferromagnétisme.

Le projet concerne l'élaboration des nano-fils ferromagnétiques sur la base d'une technologie transférée sur le site brestois de l'École Polytechnique de Palaiseau (dans le cadre d'une collaboration scientifique concernant les nano-fils) et développée sur place, au LMB à Brest, en collaboration avec le Laboratoire de Chimie, Electrochimie Moléculaires et Chimie Analytique de l'UBO, Brest (UMR 6521) et une étude magnétique des structures élaborées en fonction de la fréquence (dans une première phase jusqu'à 6 GHz) et du champ continu. La construction des dispositifs de mesure spécifiques à ce type de spectroscopie large bande en fréquence est envisagée. Actuellement, l'élaboration des échantillons de mesure (LMB, Brest) et leurs caractérisations structurales et électromagnétiques (en statique et en dynamique) au LMB, Brest et à l'IF PAN, Pologne, sont en cours. Les résultats déjà obtenus sont partiellement publiés comme c'est mentionné dans la Partie 1 de ce rapport.

Participants :

IF PAN, Varsovie, Pologne : Dr Ryszard ŻUBEREK, Dr Andrzej WIŚNIEWSKI, Prof. Anna SŁAWSKA-WANIEWSKA, Prof. Henryk SZYMCZAK.

LMB, UBO et laboratoires coopérants, France : Mr Abbas GHADAR (thèse de doctorat de 3 ans financée par le Ministère, France, Directeur de thèse : Prof. J. Gierałtowski), Prof. Jacek GIERAŁTOWSKI, Prof. Charbel TANNOUS, Dr Frédéric GLOUAGEN (Laboratoire de

Chimie, Électrochimie Moléculaires et Chimie Analytique de l'UBO, Brest, UMR 6521).

Thème 3 : Mécanismes d'aimantation des bi- et tri-couches ferro/antiferro-magnétiques nanométriques couplées par échange

L'objet de collaboration concerne la thématique relative aux mécanismes d'aimantation des bi- et tri-couches ferro/antiferromagnétiques nanométriques couplées par échange.

Le but de travail est justifié par un effort important porté récemment dans beaucoup de laboratoires mondiaux sur l'étude de la dynamique de l'aimantation dans les nanostructures magnétiques et les applications potentielles annoncées.

Parmi les nanostructures évoquées, les structures en bicouches ferromagnétique (F)/antiferromagnétique (AF) se sont révélées extrêmement intéressantes pour une application dans les systèmes magnéto-résistifs. Ce contexte justifiait le démarrage, en 2008, d'une collaboration thématique entre l'IF PAN en Pologne et le LMB à Brest en France, sur l'étude de bi-couches et de tri-couches F/AF et F/AF/F. Dans le projet en question, les deux laboratoires manifestent leurs complémentarités concernant la préparation des échantillons (LMB, Brest) et les caractérisations spécialisées telles que la résonance ferromagnétique FMR et la magnéto-mètre VSM en basse températures (IF PAN, Pologne) ainsi que la réflectivité de neutrons polarisés (LMB, Brest *via* CEA à Saclay, France).

Ainsi, des expériences de magnéto-métrie et de résonance ferromagnétique sont actuellement réalisées sur des couches NiFe/FeMn et NiFe/FeMn/Co des basses températures jusqu'à l'ambiante. Elles sont complétées par d'autres techniques expérimentales comme la réflectivité de neutrons polarisés. Les mesures expérimentales sont comparées à un modèle théorique prenant en compte la compétition entre le couplage interfacial et la création possible d'une paroi magnétique dans la structure AF. De plus, des recuits en température sous champs magnétique permettent l'étude des modifications magnétiques aux interfaces ainsi que la création possible d'une inter-diffusion d'alliages magnétiques de natures différentes.

Les travaux de caractérisation, d'échange des échantillons et des résultats obtenus sont actuellement en cours.

Participants :

1. IF PAN, Varsovie, Pologne : Dr Ryszard ŻUBEREK, Prof. Henryk SZYMCZAK, Prof. Rita SZYMCZAK
2. LMB, UBO et laboratoires coopérants, France : Dr Stephane RIOUAL (LMB, Brest), Prof. Bruno ROUVELLOU (LMB, Brest), Dr Frédérique OTT (LLB - CEA - Saclay)