

de la **PH** *reflets* **SIQUE**

www.refletsdelaphysique.fr

Dossier de la Société Française de Physique

Dossier **Spintronique**

Rédacteur en chef invité : Olivier Fruchart

Dossier de la Société Française de Physique - mars 2012 - 10 €



www.sfpnet.fr

Reflets de la physique publie un « dossier spintronique »...

Cela faisait un certain temps que nous voulions publier dans *Reflets de la physique* un dossier sur l'électronique de *spin*, ce nouveau champ de recherche appelé maintenant « spintronique ». Ce dossier répondait à une demande du Bureau de la Société Française de Physique, suite au prix Nobel attribué en 2007 à Albert Fert (et Peter Grünberg), mais aussi à celle de nombreux lecteurs de notre revue.

C'est grâce au soutien actif de la division de la matière condensée, et en particulier à Olivier Fruchart, rédacteur en chef invité, que ce dossier a pris forme en 2009. Le sujet de la spintronique est exemplaire, en ce qu'il montre comment des progrès considérables en élaboration des matériaux, en instrumentation avancée et en simulation *ab initio*, ont abouti tout à la fois à un renouveau de la physique du magnétisme et à des applications nombreuses (têtes de lecture d'enregistrement magnétique, capteurs, stockage de l'information...), ouvrant un marché important.

Les articles de ce dossier ont été publiés en 2009 et 2010 dans les numéros 15 à 18 de *Reflets de la physique*. Nous avons souhaité les réunir ici en un document unique. Après une introduction d'Olivier Fruchart, le dossier comprend deux parties. La première partie, « Les avancées fondamentales », décrit les débuts de la spintronique (Albert Fert), les découvertes récentes (Bernard Dieny) et les nouveaux matériaux (Agnès Barthélémy, Joël Cibert et Martin Bowen). La seconde partie, sur « Les applications », introduite par Bernard Dieny, traite des capteurs (Claude Fermon et Myriam Pannetier-Lecœur) et de l'enregistrement magnétique (Jean-Pierre Nozières).

Nous remercions Bernard Dieny (SPINTEC, CEA/Grenoble) et la photothèque du CNRS pour les images qui illustrent ce dossier.

Olivier Fruchart

Rédacteur en chef invité du « dossier spintronique ».

Olivier Fruchart est né en 1971. Après des études de physique à l'ENS Paris, une thèse en magnétisme soutenue en 1998 au Laboratoire Louis Néel de Grenoble et un stage postdoctoral au Max-Planck Institut de Halle (Allemagne), il est recruté au CNRS en 1999.

Actuellement directeur de recherche à l'Institut Néel à Grenoble, dans l'équipe « Micro et nanomagnétisme », il s'intéresse au magnétisme de systèmes modèles, principalement des nanostructures épitaxiales auto-organisées, élaborées par dépôt par laser pulsé sous ultra-vide.

Ces nanostructures peuvent être distribuées aléatoirement, ou organisées sur une surface en réseaux à une ou deux dimensions. Les problématiques abordées sont la mise en ordre et l'anisotropie magnétique en basse dimensionnalité pour les structures de dimensions nanométriques, et les domaines et parois magnétiques confinés pour les structures micrométriques, avec récemment un accent particulier sur les degrés de liberté internes dans les parois magnétiques, et les processus de renversement d'aimantation associés.

Albert Fert, prix Nobel de physique 2007

En octobre 2007, le prix Nobel de physique a été attribué conjointement à Albert Fert (Université Paris-Sud 11 et Unité mixte de physique CNRS/Thalès) et à Peter Grünberg (Forschungszentrum Jülich, Allemagne), pour « leur découverte de la magnétorésistance géante ».

C'est en 1988 que ces deux chercheurs mirent en évidence la magnétorésistance géante (GMR) dans des multicouches métalliques composées de couches ferromagnétiques séparées par des couches non magnétiques, dont les épaisseurs étaient proches de quelques dizaines de plans atomiques.

Les résultats obtenus ont conduit, non seulement à l'émergence d'un nouveau domaine de recherche, la spintronique, qui fait l'objet de ce dossier, mais aussi à des applications très variées et encore en pleine évolution : informatique, lecture de disques durs, nouvelles mémoires, capteurs, appareils photo numériques, télécommunications...

Albert Fert est né le 7 mars 1938. Ancien élève de l'École normale supérieure, il a obtenu son diplôme de docteur *es-sciences* en 1970 et a été nommé professeur à l'université de Paris-Sud 11 (Orsay) en 1976. Il est lauréat de nombreuses distinctions, dont le Grand prix de physique Jean Ricard de la SFP en 1994 et la médaille d'or du CNRS en 2003. Élu membre de l'Académie des sciences en 2004, il est actuellement directeur scientifique à l'Unité mixte de physique CNRS/Thalès et professeur émérite à l'université d'Orsay.

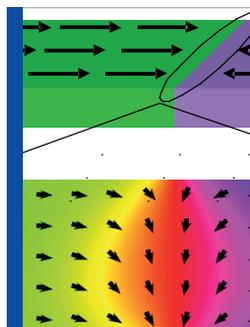


© Bruno Fert (in VSA)

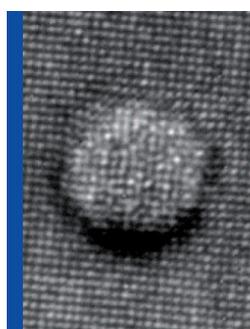


© ENSI Phronétique / BAQUET Hubert

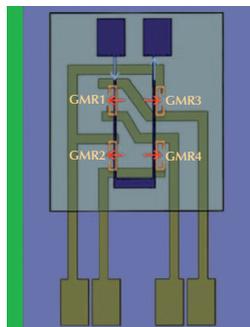
► p. 9



► p. 18



► p. 22



► p. 32



© Artechhouse/CEA

Tête de lecture-écriture du banc testeur quasi-statique du CEA/Grenoble.

Le mot de la rédaction

- 2 Reflets de la physique publie un « dossier spintronique »...
- 2 Albert Fert, prix Nobel de physique 2007

Avant-propos

- 4 L'électronique de *spin* : un renouveau de la science et de la technologie du magnétisme
Olivier Fruchart

Avancées fondamentales

- 8 Les débuts de la spintronique – Travaux précurseurs et magnétorésistance géante
Albert Fert
- 14 Faits marquants en spintronique depuis la découverte de la magnétorésistance géante
Bernard Dieny
- 20 De nouveaux matériaux pour l'électronique de *spin*
Agnès Barthélémy, Martin Bowen et Joël Cibert

Applications

- 28 Développements applicatifs de l'électronique de *spin*
Bernard Dieny
- 30 Électronique de *spin* et capteurs magnétiques
Claude Fermon et Myriam Pannetier-Lecœur
- 34 Têtes de lecture et mémoires magnétiques
Jean-Pierre Nozières
- 39 Glossaire

Comité de rédaction

Président : Jean-Pierre HULIN
Membres : Patricia BASSEREAU - Michel BELAKHOVSKY - Fabienne CASOLI - Anne DAVAILLE - Olivier DULIEU - Étienne GUYON - Stéphane LABROSSE - Michèle LEDUC - Roland LEHOUCQ - Jérôme MARGUERON - Stéphane MAZOUFFRE - Vincent MOSSER - Charles de NOVION - Marios PETROPOULOS - Sophie REMY - Thierry SARRAZIN - Claude SÉBENNE - José TEIXEIRA - Jean VANNIMENUS

Directeur de la publication :

Mohamed DAOUD
Rédacteur en chef : Charles de NOVION
Conception : Laetitia MORIN - Keith VILLEMEUR
Réalisation graphique : Laetitia morin@free.fr
Suivi de rédaction : Agathe CYMER
Service publicité : Jessica EKON - Tél. : 01 69 18 92 40
 e-mail : publicite@edpsciences.org

Dépôt légal : 1^{er} trimestre 2012
 ISSN : 1953-793X - e-ISSN : 2102-6777
 © SFP

Imprimerie Jouve.

11, bd de Sébastopol, 75036 Paris Cédex 01
 Tél. : 01 44 76 54 40.

Société Française de Physique.

33, rue Croulebarbe, 75013 Paris
 Tél. : 01 44 08 67 10 - Fax : 01 44 08 67 19
 e-mail : sfp@sfpnet.org

Serveur : www.sfpnet.fr
SFP Bulletin, Institut Henri-Poincaré,
 11, rue Pierre-et-Marie Curie, 75005 Paris
 e-mail : sfp-bulletin@ihp.fr
 Serveur : www.refletsdelaphysique.fr



© A. Fruchart - D. Miron / CEA

Plaque de silicium portant des puces de mémoire magnétique à accès aléatoire MRAM (Magnetic Random Access Memory).

L'électronique de *spin*

Un renouveau de la science et de la technologie du magnétisme

Olivier Fruchart (olivier.fruchart@grenoble.cnrs.fr)

Institut Néel (CNRS & UJF), 25 rue des Martyrs, BP 166, 38042 Grenoble Cedex 9

Le magnétisme est parfois considéré comme une science un peu poussiéreuse, fondée sur l'électromagnétisme au XIX^e siècle pour les aspects macroscopiques, et définitivement cernée au milieu du XX^e siècle par la mécanique quantique et la physique de la matière condensée, pour la partie microscopique. Pour qui croyait en ces clichés, le renouveau du magnétisme durant les dernières décennies a pu surprendre. Parmi les avancées majeures figurent les aimants permanents de haute performance et l'électronique de *spin*. Les aimants permanents de haute performance dérivent de la découverte de composés d'éléments 3d (apportant le magnétisme à température ambiante) et de terres rares (source de la forte anisotropie magnétique) : $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, SmCo_5 , etc. Ils ont permis une (r)évolution industrielle majeure pour la miniaturisation et le gain de puissance des dispositifs électromécaniques (moteurs et générateurs). La seconde avancée, l'électronique de *spin* (ou « spintronique »), couple les aspects de transport électronique

concernant la charge de l'électron et les champs électriques, et le magnétisme concernant le *spin* de l'électron et les champs magnétiques. Son émergence a suscité un engouement majeur car, outre la nouvelle physique fondamentale à défricher, elle laissait entrevoir des applications combinant directement le stockage de l'information (le caractère rémanent des mémoires magnétiques) et son traitement (l'électronique, basée sur les charges électriques).

La date de naissance symbolique de l'électronique de *spin* est souvent fixée en 1988, année de publication de la découverte de la magnétorésistance géante par les équipes d'Albert Fert en France et de Peter Grünberg en Allemagne, et pour laquelle le prix Nobel de Physique 2007 leur a été coattribué. À cette occasion, la Société Française de Physique a souhaité consacrer un dossier à l'électronique de *spin*, et a demandé aux « magnéticiens » du bureau de la matière condensée de le coordonner : Bernard Doudin (IPCMS – Strasbourg), Henri Mariette (Institut Néel

– Grenoble) et moi-même. Pour des raisons pratiques, les articles de ce dossier ont été répartis dans quatre numéros successifs de *Reflets de la physique* (n°15 à n°18).

La magnétorésistance géante (acronyme anglais : GMR) est la variation significative (jusqu'à plusieurs dizaines de pourcents) de la résistance électrique entre deux électrodes ferromagnétiques, en fonction de leurs directions d'aimantation respectives. Dans son article (p. 8), Albert Fert replace cette découverte dans son contexte historique, et décrit la physique sous-jacente. On notera que cette découverte fracassante faisait en réalité suite à des concepts anciens et à des recherches longues et fondamentales, par exemple l'étude de la résistivité électrique dans des alliages massifs binaires et ternaires.

La GMR n'a été qu'un point de départ. La mise en évidence de nouveaux effets en nanomagnétisme et électronique de *spin* s'est depuis accélérée à un rythme impressionnant : couplage RKKY, magnétorésistance tunnel, renversement précessionnel de l'aimantation, couple et transfert de *spin*, renversement optique de l'aimantation. Cette série de découvertes a été favorisée par la conjonction de progrès extraordinaires dans les techniques de dépôt de couches minces, de nanofabrication (lithographie), de microscopies notamment magnétiques, de sondes physiques résolues en temps ($< 10^{-12}$ s), du rayonnement synchrotron, de la montée en puissance des outils de simulation *ab initio*. Complétant l'article d'Albert Fert, Bernard Dieny (p. 14) expose l'essentiel de ces effets. Il décrit également plus en détail une brique de base des dispositifs d'électronique de *spin* : la vanne de *spin*.

Durant cette période, la France a tenu une place très honorable parmi les grandes nations qui ont été sur l'avant-scène des progrès de l'électronique de *spin*, dont les États-Unis d'Amérique, le Japon, l'Allemagne, etc. La qualité des recherches en France a bénéficié du travail en réseau de la communauté française par le biais de GdR du CNRS (« Nanostructures Magnétiques » puis « POMMES »), et du colloque Louis Néel qui se tient tous les dix-huit mois (et rassemble maintenant près de 250 personnes !)

et où les jeunes scientifiques sont mis en avant et préparent ainsi la relève. Ceci a été complété au niveau européen par de nombreux projets et réseaux, et l'émergence d'une grande conférence récurrente sur le magnétisme (JEMS : Joint European Magnetic Symposia, dont la première édition a eu lieu en 2001 à Grenoble) et d'une école (ESM : European School on Magnetism, organisée par la communauté grenobloise) ; l'électronique de *spin* y est largement représentée.

L'âge d'or de l'électronique de *spin* est-il atteint, voire dépassé ? Que reste-t-il à découvrir ? Constatons en tout cas que la communauté académique concernée n'a jamais été si importante, et que les idées fourmillent. Une tendance forte est la recherche d'effets fondamentaux nouveaux par des couplages multiphysiques : magnétisme et champ électrique (changement de niveau de Fermi dans les semi-conducteurs magnétiques, couplage de déformations ou couplage d'ordres dans les multiferroïques), magnétisme et optique (renversement d'aimantation opéré par le transfert de moment orbital du photon vers les *spins*), magnétisme et chaleur (renversement d'aimantation assisté thermiquement, effet Seebeck magnétique), architectures métal-organique, etc. Ces perspectives sont développées dans l'article d'Agnès Barthélémy *et al.* (p. 20).

Au-delà de cette communauté essentiellement académique, le transfert de l'électronique de *spin* vers les applications a été très rapide, s'appuyant sur deux propriétés particulièrement intéressantes du magnétisme : l'action à distance par le biais du champ magnétique (pour les capteurs et les actionneurs), et l'hystérésis (phénomène de bistabilité, base du stockage de l'information). Dans un préambule (p. 28), Bernard Dieny dresse un panorama général des applications existantes et prospectives. Le transfert est pleinement effectif en ce qui concerne les capteurs de champ ultrasensibles, décrits plus en détail dans l'article de Claude Fermon et Myriam Pannetier-Lecœur (p. 30). Dans le domaine des mémoires, les capteurs à base de vannes de *spin* ont permis des gains considérables de densité d'enregistrement des disques durs. En parallèle, est apparue au milieu des années 1990 la perspective de réaliser des mémoires magnétiques à

accès aléatoire (MRAM : Magnetic Random Access Memory) de hautes performances, alliant rapidité, non volatilité (donc faible consommation), cyclabilité infinie ; bref, une mémoire idéale et universelle. Ces mémoires arrivent actuellement en R&D chez tous les grands groupes électroniques mondiaux. Jean-Pierre Nozières retrace cette épopée et l'état actuel des MRAMs dans son article (p. 34).

En conclusion, l'électronique de *spin* a contribué à un renouvellement majeur et continu du magnétisme durant les vingt dernières années. Elle illustre parfaitement de nombreuses caractéristiques de la recherche en général : largement non déterministe et souvent issue de découvertes très fondamentales ; stimulée par les perspectives d'applications, même si les dispositifs finaux n'ont pas toujours été ceux qui avaient été escomptés ; rendue possible par des progrès dans l'instrumentation. Ces observations doivent nous faire réfléchir sur la manière la plus efficace de favoriser les progrès scientifiques et technologiques à long terme. Les recherches fondamentales initiales sur la conduction dans les métaux à plusieurs impuretés pourraient-elles encore être facilement financées aujourd'hui en France, où les appels à projet à court terme et sur des thématiques « prioritaires » drainent l'essentiel du financement ? Puisse les décideurs avisés admettre que la science, en principe un modèle de rigueur, doit paradoxalement s'accommoder de cette indétermination majeure, et qu'en conséquence un soutien large à la recherche fondamentale est un bon garant des découvertes et applications futures.

Ce dossier montre également que l'électronique de *spin* touche des disciplines variées, avec des problématiques d'élaboration, de caractérisation avancée, et combinant de multiples effets physiques. Elle présente donc un aspect exigeant de l'interdisciplinarité, qui est de savoir combiner une culture générale et une grande ouverture d'esprit, avec une expertise plus que jamais pointue dans chacun des domaines concernés. Tout ceci doit en faire un terrain intellectuellement stimulant pour les jeunes scientifiques, en particulier physiciens. ■

► Avancées fondamentales

La première partie de ce dossier comprend trois articles présentant les bases physiques de l'électronique de *spin*.

Albert Fert replace la découverte de la magnétorésistance géante dans son contexte historique, et décrit la physique sous jacente. Puis, Bernard Dieny expose l'essentiel des nouveaux dispositifs et effets trouvés depuis lors : vannes de *spin*, magnétorésistance tunnel, couple et transfert de *spin*... Enfin, Agnès Barthélémy, Martin Bowen et Joël Cibert présentent les principaux résultats obtenus et les perspectives offertes par certains matériaux non métalliques (semi-conducteurs, oxydes, matériaux organiques), qui ont révélé des propriétés spintroniques nouvelles, mettant en jeu des couplages multiphysiques.

Jonction tunnel magnétique micrométrique (dispositif d'électronique de *spin*), fabriquée par microlithographie optique. Sur le cliché, on ne voit que les quatre plots de contacts (gros carrés d'or) permettant la mesure de transport, et le substrat de silicium (zone bleue). La jonction, non visible à cette échelle, se trouve à l'intersection des lignes de contacts.



Les débuts de la spintronique

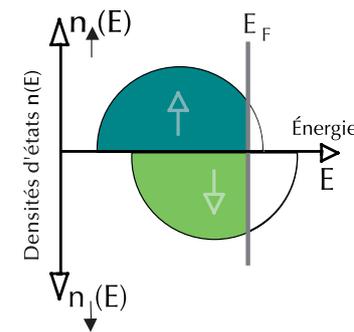
Travaux précurseurs et magnétorésistance géante

Albert Fert (albert.fert@thalesgroup.com)

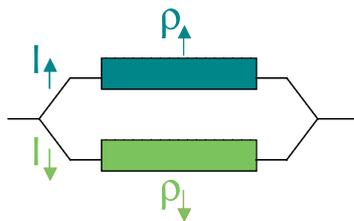
Unité Mixte de Physique CNRS/Thales, 91767 Palaiseau, et Université Paris-Sud, 91405 Orsay
Prix Nobel de Physique 2007

Dans cet article, Albert Fert présente les débuts et les concepts fondamentaux de la spintronique : les premiers travaux effectués à Orsay sur la conduction électrique des alliages ferromagnétiques, les progrès dans l'élaboration des couches minces, la découverte de la magnétorésistance géante en 1988, et les résultats importants obtenus au début des années 90, qui ont permis de déboucher sur de nombreuses applications.

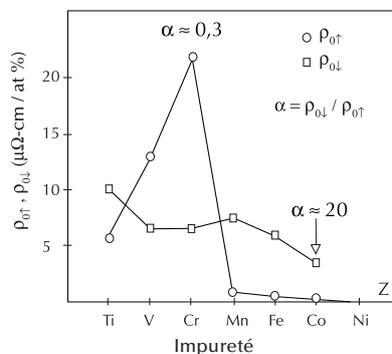
Dans une seconde partie, il traite plus en détail de la physique de l'accumulation de *spins*, qui gouverne la propagation d'un courant polarisé de *spin* dans une succession de conducteurs magnétiques et non magnétiques.



a



b



c

1. (a) Représentation schématique des densités d'états $n(E)$ des bandes d'énergie décalées pour les électrons de *spin* majoritaire (*spin*↑ en bleu) et minoritaire (*spin*↓ en vert) dans un métal ferromagnétique.

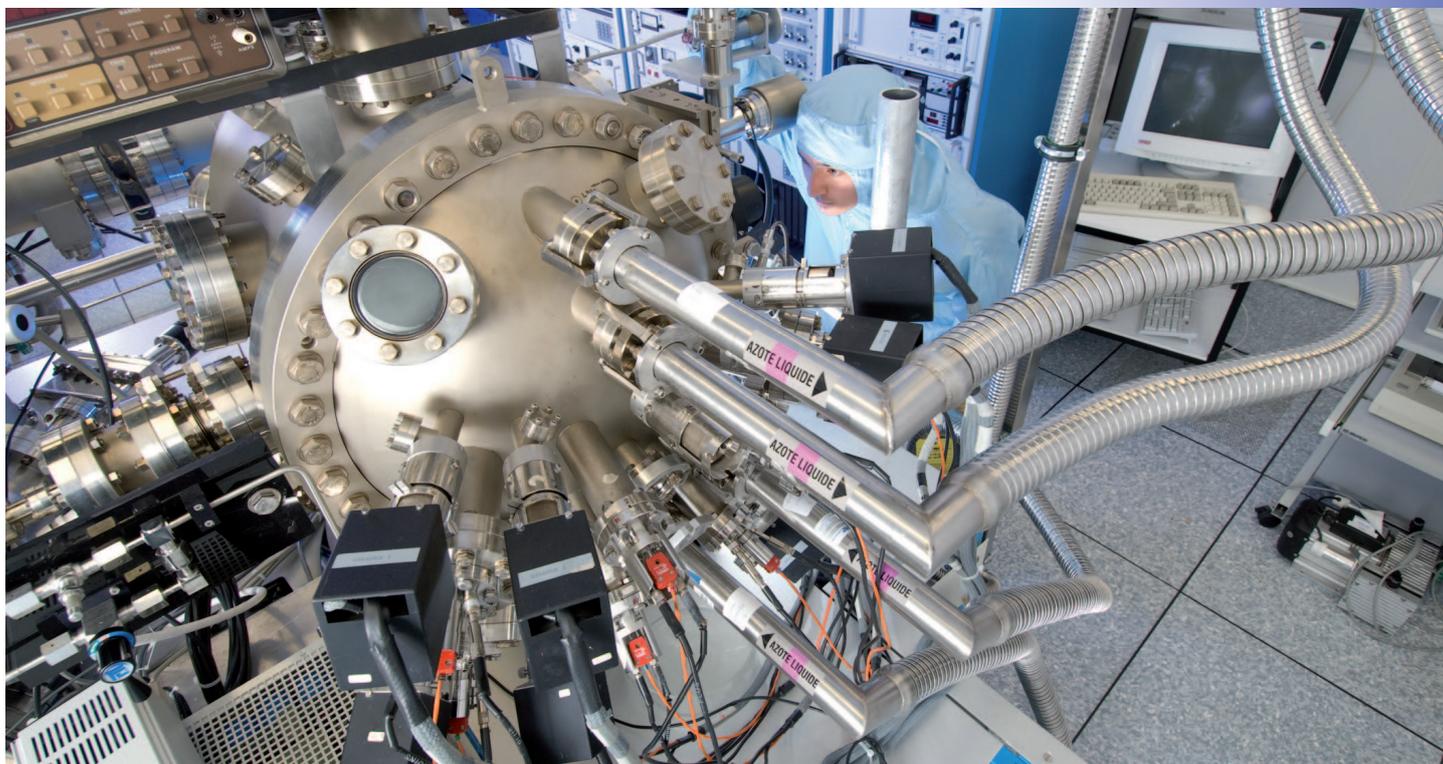
(b) Illustration de la conduction par deux canaux indépendants de résistivités ρ_{\uparrow} et ρ_{\downarrow} pour les électrons de *spin*↑ et *spin*↓ respectivement. Selon le métal, l'on peut avoir $\rho_{\downarrow} > \rho_{\uparrow}$ ou $\rho_{\downarrow} < \rho_{\uparrow}$ pour les résistivités des deux canaux.

(c) Résistivités des canaux de *spin*↑ et *spin*↓ pour du nickel dopé avec 1% de différentes impuretés (mesures à 4,2 K) [4]. Dans un métal, la présence d'impuretés freine le courant et, à basse température, est l'origine principale de la résistivité électrique. Dans le cas d'un métal ferromagnétique, une impureté peut freiner très différemment les électrons de *spin*↑ et *spin*↓.

La spintronique peut se décrire comme une électronique qui exploite non seulement la charge, mais aussi le *spin* des électrons. Son développement a suivi la découverte de la magnétorésistance géante (GMR) en 1988 [1, 2]. Le concept général de la spintronique est de placer des matériaux ferromagnétiques sur le trajet des électrons et d'utiliser l'influence du *spin* sur la mobilité des électrons dans ces matériaux. Cette influence, d'abord suggérée par Mott [3] en 1936, a été ensuite démontrée expérimentalement et décrite théoriquement à la fin des années 60 [4, 5]. La découverte de la GMR a conduit aux premières utilisations pratiques de cette influence. De nombreux autres phénomènes exploitant aussi le *spin* des électrons se sont ensuite révélés et, aujourd'hui, la spintronique se développe dans de très nombreuses directions, qui sont traitées dans les autres articles de ce dossier : magnétorésistance tunnel, phénomènes de transfert de *spin*, spintronique avec semi-conducteurs, spintronique moléculaire, spintronique avec multiferroïques, etc.

La conduction électrique dans les métaux et alliages ferromagnétiques

Un métal ferromagnétique, comme le fer ou le nickel, se caractérise par un décalage des bandes d'énergie des électrons de *spin* parallèle et antiparallèle à l'aimantation (fig. 1a). Ces bandes sont peuplées jusqu'au niveau de Fermi (E_F sur la figure 1a), et du décalage résultent des populations différentes pour les deux directions de *spin*, que nous appellerons dans la suite de l'article *spin*↑ pour les *spins* majoritaires et *spin*↓ pour les minoritaires. C'est l'origine de l'aimantation spontanée des ferromagnétiques. La conduction électrique, quant à elle, est liée à la mobilité des électrons à E_F , et du décalage des bandes résulte de façon générale



© CNRS Photographie / RAOULET Hubert

Chambre d'épitaxie par jets moléculaires utilisée pour la croissance de multicouches magnétiques (UMR 137, Unité mixte de physique CNRS/THALES, Orsay). Ce dispositif permet le dépôt sur un substrat de couches métalliques ultraminces, de quelques plans atomiques d'épaisseur. L'empilement alterné de films minces magnétiques et non magnétiques permet d'obtenir des multicouches magnétiques dans lesquelles est produit l'effet de magnétorésistance géante.

une mobilité différente pour $spin\uparrow$ et $spin\downarrow$, ce qui, en fin de compte, se traduit par une conduction en parallèle par deux canaux de résistivités différentes (fig. 1b). L'influence du $spin$ sur la conduction électrique dans les métaux ferromagnétiques fut proposée par Mott [3] en 1936, pour expliquer certaines anomalies de la résistivité de ces métaux au voisinage de la température de Curie.

Cependant, à l'époque (en 1966) où j'arrivai au Laboratoire de Physique des Solides d'Orsay, le sujet était resté complètement inexploré et Ian Campbell me le proposa comme sujet de thèse. Cette thèse démarra donc par des mesures de la résistivité de fer et de nickel dopés de divers types d'impuretés. L'analyse comparée de la dépendance en température de la résistivité de ces alliages, ainsi que l'étude d'alliages ternaires que je décrirai plus loin, nous permirent de confirmer la proposition de Mott et de montrer que, pour certains dopages, la mobilité pouvait être très différente pour les électrons de $spin\uparrow$ et de $spin\downarrow$. La figure 1c montre les valeurs des résistivités $\rho_{0\downarrow}$ et $\rho_{0\uparrow}$ des canaux de $spin\downarrow$ et de $spin\uparrow$ (mesurées à 4,2 K) pour du nickel contenant 1% de diverses impuretés [4]. On peut voir que le rapport $\alpha = \rho_{0\downarrow}/\rho_{0\uparrow}$ peut être aussi grand que 20 pour des impuretés de cobalt, mais aussi

être plus petit que 1 pour des impuretés de chrome ou de vanadium.

Ces résultats pouvaient être expliqués par les modèles de structure électronique développés par Friedel pour les alliages de métaux ferromagnétiques. Après les premières mesures de la fin des années 60, le modèle de conduction à deux courants dans les métaux et alliages ferromagnétiques fut rapidement confirmé dans d'autres groupes, par exemple par Loegel et Gautier [5] dans les cas d'alliages de cobalt.

À la fin de ce premier chapitre, je voudrais faire remarquer que la spintronique n'a retenu jusqu'à présent qu'une version simplifiée du modèle à deux courants de ma thèse, en oubliant en route les effets de $spin\ mixing$ [4], c'est-à-dire les échanges de quantité de mouvement par renversement de $spin$, essentiellement par collision entre électrons et ondes de $spin$ dans un métal ferromagnétique. La « résistivité de $spin\ mixing$ », $\rho_{\uparrow\downarrow}$, augmente progressivement avec la température. À la température ambiante, elle atteint une dizaine de $\mu\Omega\text{-cm}$ dans des métaux comme le fer ou le nickel, et égalise partiellement les deux courants. De nombreux résultats de spintronique, pour une analyse plus rigoureuse, devraient sans doute être revisités en tenant compte du $spin\ mixing$.

Le concept de la magnétorésistance géante dans des expériences sur des alliages magnétiques ternaires

Dans mon travail avec Ian Campbell, certaines expériences sur des alliages ternaires [4] anticipaient déjà la GMR, comme illustré par la figure 2. Supposons, par exemple, que l'on dope du nickel à la fois avec des impuretés de Co, qui freinent fortement les électrons dans le canal de $spin\downarrow$ en laissant le canal de $spin\uparrow$ relativement « ouvert », et des impuretés de Rh pour lesquelles c'est l'inverse. Dans l'alliage Ni(Co+Rh), que nous appellerons de type #1, les électrons des deux canaux sont alors fortement freinés, soit par les impuretés de Co dans un canal, soit par celles de Rh dans l'autre. Il n'y a plus de canal « ouvert », et la résistivité est fortement augmentée par rapport à celle d'alliages contenant seulement soit Co, soit Rh (fig. 2a). Au contraire, il n'y a pas cette augmentation de résistivité pour des alliages ternaires de type #2 dopés par des impuretés (Co et Au, par exemple) qui, toutes deux, freinent les électrons d'un même canal et laissent le deuxième canal relativement libre (fig. 2b).

>>>

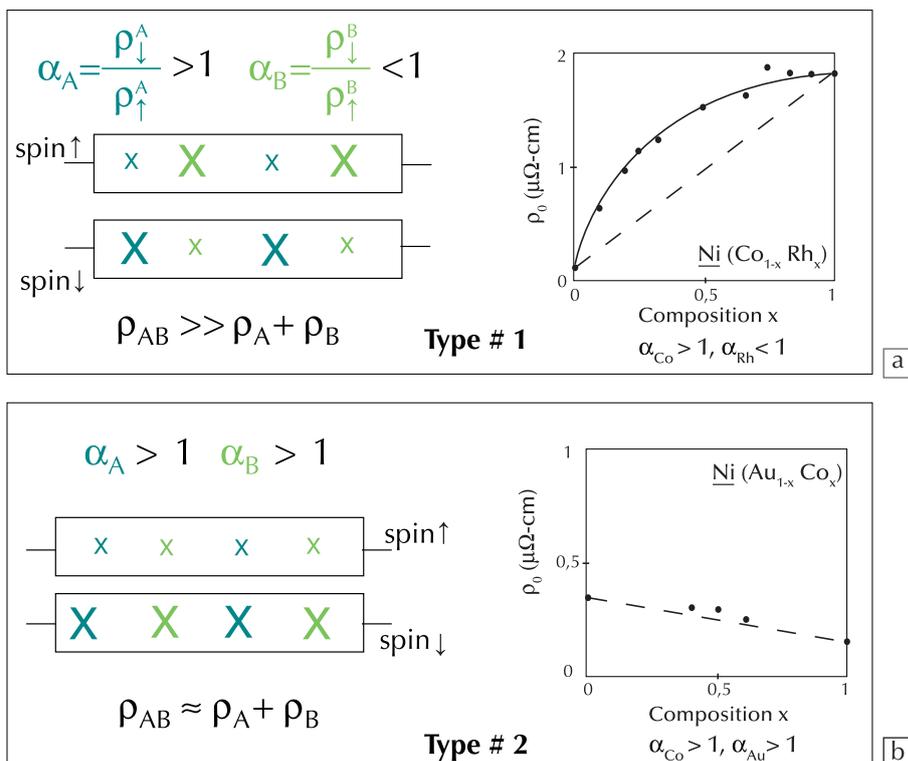
>>>

L'idée de la GMR est de remplacer les impuretés A et B de l'alliage ternaire par deux couches magnétiques F1 et F2 d'un même métal ferromagnétique, séparées par une couche non magnétique M (fig. 3b). Si les deux couches ont leurs aimantations dans des directions opposées (configuration dite antiparallèle, AP), la couche F1 freinera les électrons d'un canal, la couche F2 ceux de l'autre canal, et l'on retrouve donc la situation de résistivité élevée d'un alliage ternaire de type #1 dans lequel les électrons des deux canaux sont freinés, par les impuretés A dans l'un, les impuretés B dans l'autre. Par contre, la configuration d'aimantations parallèles (P) correspond à l'alliage de faible résistivité de type #2 dans lequel les impuretés A et B laissent un des canaux relativement libre. L'élément nouveau vient de la possibilité de passer de grande à petite résistivité, en appliquant un champ magnétique pour aligner les aimantations d'une configuration initialement antiparallèle.

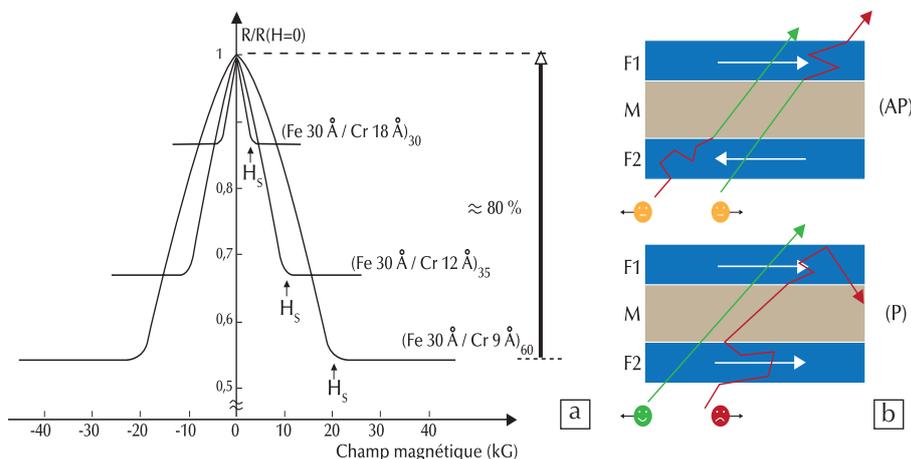
Cependant, les équations de transport nous disent que les électrons ne pourront sentir l'orientation relative des aimantations des couches F1 et F2 que si la distance entre les couches est inférieure au « libre parcours moyen » des électrons, c'est-à-dire, en pratique dans des films métalliques, si cette distance n'est que de quelques nanomètres. Malheureusement, en 1970, il n'était pas techniquement possible de fabriquer des multicouches constituées de couches épaisses de seulement quelques nanomètres. Il fallut attendre le milieu des années 80.

La découverte de la GMR

Au milieu des années 80, avec le développement de techniques de dépôt sous ultraviolet comme l'épitaxie par jets moléculaires (EJM), il devint possible de fabriquer des multicouches empilant des couches ultrafines et d'envisager l'extension des expériences de ma thèse sur des alliages ternaires à des multicouches magnétiques. De plus, en 1986, les expériences de diffusion Brillouin de Peter Grünberg [6] révélèrent l'existence d'un « couplage d'échange » antiferromagnétique entre couches de fer ferromagnétiques, séparées par de très fines couches de chrome non magnétiques. Une multicouche Fe/Cr pouvait donc donner la possibilité de commuter d'une configuration à aimantations opposées à une autre à aimantations parallèles, par application d'un champ magnétique. À cette



2. **Expériences sur des alliages ternaires, basées sur le même concept que la GMR** [4]. Sur les schémas illustrant la conduction par deux canaux, on a représenté l'efficacité plus ou moins grande d'une impureté A (bleu) ou B (vert) au freinage des électrons par des X (représentatifs d'obstacles) plus ou moins grands. (a) Schéma pour la conduction dans des alliages dopés avec des impuretés diffusant les électrons avec des asymétries en *spin* opposées ($\alpha_A = \rho_{A\downarrow} / \rho_{A\uparrow} > 1$, $\alpha_B = \rho_{B\downarrow} / \rho_{B\uparrow} < 1$, $\rho_{AB} \gg \rho_A + \rho_B$) et résultats expérimentaux pour des alliages Ni(Co_{1-x}Rh_x) [4]. (b) Même schéma qu'en (a) pour des alliages dopés avec des impuretés diffusant les électrons avec des asymétries en *spin* semblables ($\alpha_A > 1$, $\alpha_B > 1$, $\rho_{AB} \approx \rho_A + \rho_B$) et résultats expérimentaux pour des alliages Ni(Au_{1-x}Co_x). Pour la GMR, les impuretés A et B sont remplacées par des couches magnétiques F1 et F2 d'un même métal ferromagnétique, la situation de (a) correspondant à la configuration antiparallèle (parallèle) des aimantations des couches F1 et F2.



3. (a) **Premières observations de magnétorésistance géante à Orsay sur des multicouches Fe/Cr(001)** [1]. La résistance, mesurée pour un courant parallèle aux couches, chute d'une valeur R_{AP} à une valeur R_P quand un champ magnétique aligne les aimantations. Avec la définition adoptée aujourd'hui pour le rapport de magnétorésistance, $MR = 100(R_{AP} - R_P) / R_P$, MR vaut 80% pour la multicouche (Fe 3nm/Cr 0,9nm). (b) **Schéma du mécanisme de la GMR**. Dans la configuration magnétique parallèle P (bas), les électrons d'une direction de *spin* peuvent traverser facilement toutes les couches magnétiques et le court-circuit par ce canal conduit à une faible valeur de la résistance. Dans la configuration antiparallèle AP (haut), les électrons de chaque canal sont ralentis une fois sur deux en traversant les couches magnétiques, et la résistance est élevée. Les trajectoires des électrons sont représentées obliques car, même pour un courant parallèle aux couches, c'est seulement la direction moyenne des vitesses qui est parallèle aux couches. On passe de la configuration antiparallèle AP à la configuration parallèle P par application d'un champ magnétique.

époque, j'avais justement discuté de l'intérêt des multicouches magnétiques avec Alain Friederich du LCR Thomson-CSF, et une collaboration s'était établie entre mon équipe d'Orsay et la sienne pour l'élaboration de telles couches. Patrick Étienne, l'expert EJM au LCR, adapta aux métaux les techniques mises au point pour les semi-conducteurs et guida les premières fabrications de multicouches Fe/Cr de la thèse de Frédéric Nguyen Van Dau. Cela conduisit rapidement à nos premières observations (fig. 3a) de la GMR sur des super-réseaux Fe/Cr(001) au début de 1988 [1]. Les postdocs Mario Baibich et Jean-Marc Broto, ainsi que les doctorants Agnès Barthélémy et Frédéric Petroff, participèrent aussi à l'aventure. Des résultats semblables sur des tricouches Fe/Cr/Fe furent obtenus à peu près simultanément dans l'équipe de Peter Grünberg à Jülich [2]. Les équipes française et allemande déposèrent des brevets sur les applications possibles de la GMR ; les Allemands furent les plus rapides.

L'interprétation de la GMR est en gros semblable à celle des expériences sur des alliages ternaires que nous avons décrites plus haut, et est schématisée dans la figure 3b. Un modèle classique de la GMR fut publié dès 1989 par Camley et Barnas [7]. Vint ensuite un modèle quantique que je publiai avec Levy et Zhang en 1991 [8].

L'âge d'or de la GMR

La découverte de la GMR attira rapidement l'attention, aussi bien pour ses possibilités d'applications que pour l'intérêt fondamental d'expériences de transport électronique exploitant le *spin*. Les études de la GMR se multiplièrent dans de nombreux laboratoires et notre petite équipe se lança aussi avec enthousiasme dans l'exploration de ce nouveau champ de recherche, qui allait s'appeler bientôt « spintronique ».

Sur le plan expérimental, deux résultats importants furent publiés en 1990. Stuart Parkin *et al* [9] démontrèrent l'existence de GMR dans des multicouches Fe/Cr, Co/Ru et Co/Cr élaborées par la méthode plus simple et plus rapide de pulvérisation cathodique. Ils découvrirent aussi une oscillation de la GMR en fonction de l'épaisseur des couches d'espacement (Cr ou Ru). Cette oscillation traduit la succession périodique d'épaisseurs dans lesquelles l'interaction entre couches magnétiques

est antiferromagnétique (ce qui donne de la GMR) et d'épaisseurs à interaction ferromagnétique (sans GMR).

Également en 1990, l'équipe de Jean-Pierre Renard à Orsay et celle de Teruya Shinjo à Kyoto démontrèrent que les effets GMR pouvaient aussi être obtenus dans des multicouches sans couplage d'échange antiferromagnétique, mais composées de couches magnétiques de coercivités différentes [10, 11]. Un autre résultat important, en 1991, fut l'observation d'effets GMR grands et oscillants dans Co/Cu, qui deviendra un archétype de système GMR. Les premières observations [12] furent réalisées par un doctorant brésilien de notre équipe, Dante Mosca, sur des multicouches préparées par pulvérisation cathodique à Michigan State University, et, à peu près à la même époque, dans l'équipe de Stuart Parkin.

En 1991 également, Bernard Dieny et l'équipe d'IBM Almaden [13] montrèrent la possibilité de détecter de très petits champs magnétiques par GMR dans des tricouches dites « vannes de *spin* », aujourd'hui à la base de nombreux dispositifs [14, 15]. Les vannes de *spin* et leurs applications sont décrites dans les autres articles de ce dossier.

Parallèlement à l'exploration de la GMR dans de nombreux types de structures, un gros effort de recherche fut fait pour le développement de modèles théoriques, et notamment de modèles s'appuyant sur des déterminations *ab initio* de la structure électronique des multicouches. Une description de ces modèles serait trop longue, et le lecteur pourra consulter des articles de revue récents [16]. Je veux cependant faire remarquer que l'influence du *spin* sur la conduction électrique, et la GMR en particulier, est très dépendante de défauts difficiles à connaître précisément (impuretés, rugosité d'interface, etc.). Les modèles théoriques ne peuvent guère prendre en compte ces défauts de façon réaliste et ne sont pas réellement prédictifs. La situation est différente pour la GMR en courant perpendiculaire aux couches, décrite plus loin.

Les applications de la GMR sont présentées par C. Fermon et M. Pannetier-Lecœur, et par J.P. Nozières, dans ce même dossier. L'application la plus connue est la lecture des disques durs [14, 15], où les capteurs GMR à structure vanne de *spin* ont remplacé la magnétorésistance

classique. La GMR, grâce à sa sensibilité et aux possibilités amenées pour la miniaturisation des capteurs, a rendu possible une forte réduction de la taille des inscriptions magnétiques et a ainsi conduit à une augmentation de la capacité d'information stockée dans les disques, de plus de deux ordres de grandeur (de ≈ 1 à ≈ 600 Gbit/in² en 2009). Cette augmentation a conduit non seulement à la réalisation de disques de très grande capacité (jusqu'au teraoctet), mais aussi à celle de disques de la taille de pièces de monnaie pour l'électronique nomade, baladeurs, appareils photographiques, etc. Les capteurs GMR ont aussi des applications dans l'industrie automobile et les technologies biomédicales.

La GMR en courant perpendiculaire aux couches

Pendant les premières années de recherche sur la GMR, les expériences sur les multicouches étaient effectuées avec un courant électrique orienté dans le plan des couches, dans la géométrie que l'on appelle maintenant CIP (*Current In Plane*). Les premières expériences en géométrie CPP (*Current Perpendicular to the layer Planes*) furent réalisées par l'équipe de Jack Bass *et al.* [17] à Michigan State University, en plaçant une multicouche en sandwich entre deux couches supraconductrices de niobium, qui établissent des plans équipotentiels sur les deux faces de la multicouche et permettent d'obtenir un courant perpendiculaire aux couches.

En CPP, la GMR est non seulement nettement plus grande qu'en CIP (la CPP-GMR sera d'ailleurs utilisée dans la prochaine génération de têtes de lecture de disques durs), mais aussi subsiste pour des couches relativement épaisses, jusqu'au voisinage du micron, comme on peut le voir sur la figure 4 pour des multicouches élaborées par électrodéposition dans des pores de membranes de polycarbonates [18]. Le modèle Valet-Fert [19] permet d'expliquer cette différence par les effets d'accumulation de *spin* spécifiques de la situation CPP. La longueur d'échelle des phénomènes de transport devient la longueur de diffusion de *spin*, nettement plus grande que le libre parcours moyen impliqué dans la géométrie usuelle.

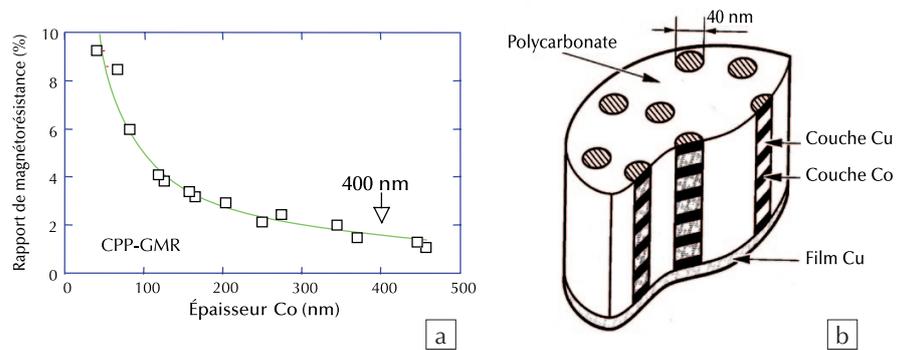
>>>

>>> Physique de l'accumulation de spin

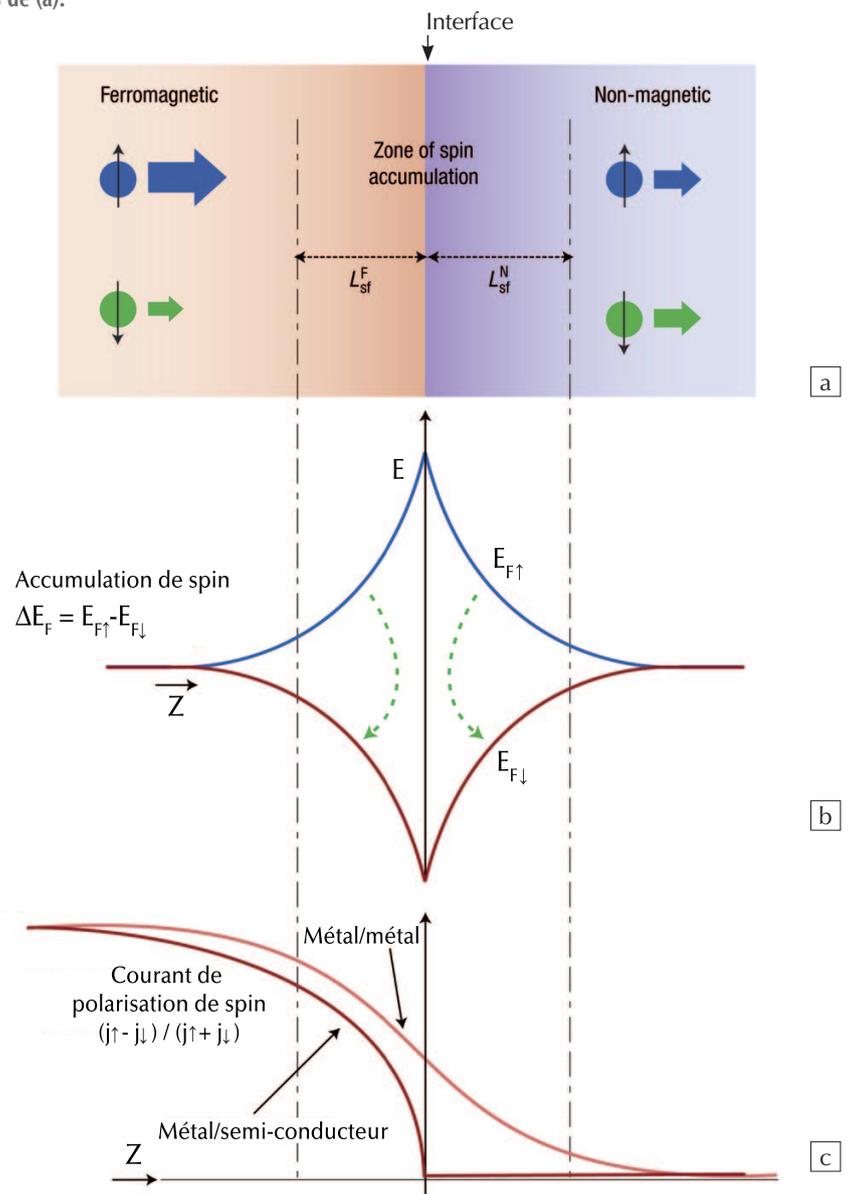
En fait, la CPP-GMR a permis de comprendre la physique de l'accumulation de *spin* qui gouverne de façon très générale la propagation d'un courant polarisé de *spin* dans une succession de conducteurs magnétiques et non magnétiques, et joue un rôle important dans tous les développements actuels de la spintronique. Le courant de diffusion généré par l'accumulation de *spin* est le mécanisme permettant à un courant polarisé en *spin* de se propager loin de l'interface entre un matériau magnétique et un matériau non magnétique, au-delà de la longueur balistique, jusqu'à une distance de l'ordre de grandeur de la longueur de diffusion de *spin*. On verra dans l'encadré (p. 13) que ce transport de *spin* à grande distance a permis d'étendre les études de GMR à des structures « latérales ». Dans des nanotubes de carbone, par exemple, la longueur de diffusion de *spin* excède 20 μm , et des courants polarisés peuvent être transportés d'un bout à l'autre de nanotubes de carbone relativement longs [20].

Comme expliqué sur la figure 5, une accumulation de *spin* se produit quand un flux d'électrons passe d'un matériau ferromagnétique à un conducteur non magnétique. Le flux incident est plus grand dans un des canaux (*spin* \uparrow sur la figure), alors que le flux sortant est également réparti (fig. 5a). Au voisinage de l'interface, il y a donc accumulation d'électrons d'une certaine direction de *spin* (*spin* \uparrow sur la figure) et, neutralité de charge oblige, déplétion de l'autre direction de *spin*, ou, en d'autres termes, décalage entre les niveaux de Fermi (potentiels chimiques) des deux directions de *spin* (fig. 5b). L'accumulation de *spin* diffuse des deux cotés de l'interface et décroît exponentiellement, pour s'étendre jusqu'à une distance de l'ordre de grandeur de la longueur de diffusion de *spin*. Cette distribution hors d'équilibre génère les renversements de *spin*, qui ajustent les flux entrant et sortant. Pour résumer, il y a au voisinage de l'interface une large zone d'accumulation de *spin*, dans laquelle le courant polarisé de *spin* venant du conducteur magnétique est progressivement dépolarisé par les renversements de *spin* générés par l'accumulation de *spin* (fig. 5c).

La figure 5 représente le cas de l'injection de *spin*, c'est-à-dire d'électrons allant du magnétique au non magnétique. Pour des électrons allant en direction opposée



4. (a) Variation de la GMR en courant perpendiculaire aux couches (CPP-GMR) de nanofils multicouches Co/Cu (8 nm), en fonction de l'épaisseur des couches de cobalt [19]. La GMR subsiste jusqu'à des épaisseurs de l'ordre de grandeur du micron. (b) Structure des nanofils multicouches utilisés pour les mesures de (a).



5. Représentation schématique de l'accumulation des spins, associée au passage d'un courant d'un conducteur ferromagnétique à un conducteur non magnétique.

- (a) : Flux respectifs d'électrons de *spin* \uparrow (flèches bleues) et de *spin* \downarrow (flèches vertes) loin de l'interface. L_{sf}^F et L_{sf}^N sont les longueurs de diffusion de *spin* dans les matériaux ferromagnétique et non magnétique, respectivement.
 (b) : Variation des niveaux de Fermi $E_{F\uparrow}$ et $E_{F\downarrow}$ au voisinage de l'interface ; les flèches vertes symbolisent les renversements de *spin* générés par l'accumulation.
 (c) : Variation de la polarisation en *spin* du courant en fonction de la distance Z à l'interface.

(extraction de *spin*), on a une situation semblable, mais avec accumulation de la direction de *spin* opposée et une polarisation progressive du courant par les renversements de *spin* qui en résultent. Dans les deux cas, injection ou extraction, la polarisation du courant subsiste ou commence loin de l'interface dans le matériau non magnétique.

Cette physique peut se décrire par des équations de transport [19], dans lesquelles le potentiel électrique est remplacé par un potentiel électrochimique dépendant du *spin*. La physique de l'accumulation de *spin* joue un rôle important dans la plupart des développements récents de la spintronique. Ses équations peuvent être appliquées non seulement au cas simple d'une interface isolée, mais aussi à la situation multi-interfaces avec interaction entre les accumulations de *spin* à des interfaces voisines. Elles peuvent aussi être généralisées à la situation des structures avec semi-conducteurs ou molécules, prendre en compte la courbure de bande à l'interface de semi-conducteurs, ou encore les configurations magnétiques non colinéaires des expériences de transfert de *spin* (cf. article de B. Diény, p. 14).

Conclusion

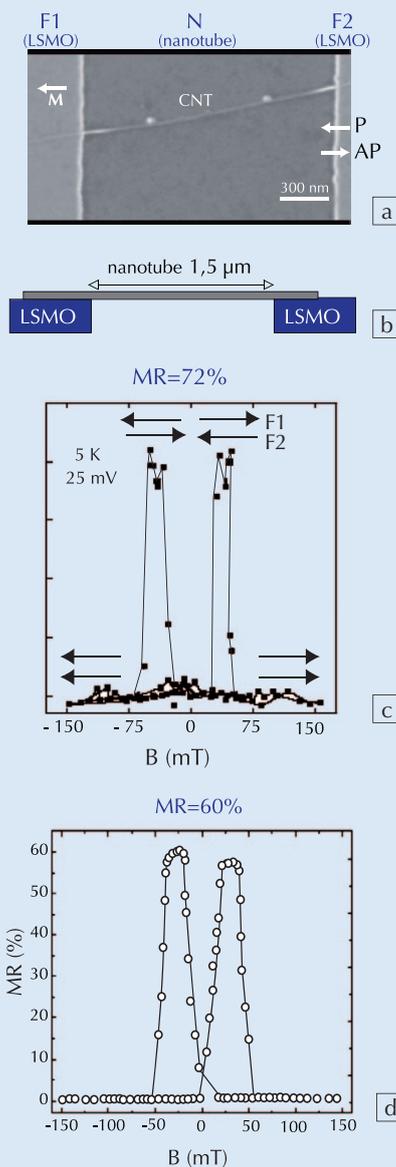
La découverte de la GMR résulte de la rencontre entre des progrès technologiques et une base de physique fondamentale, décrivant l'influence du *spin* sur le transport électronique dans les matériaux ferromagnétiques. On réalisa rapidement quelles applications importantes pouvaient être tirées de l'exploitation simultanée de la charge et du *spin* des électrons, et cela déclencha une recherche active, qui révéla d'autres phénomènes exploitant également l'influence du *spin* en électronique. La spintronique se développe maintenant sur de nombreux nouveaux axes et sera très certainement à la base d'applications technologiques dans de multiples domaines. ■

► La magnétorésistance géante dans des structures « latérales »

Le cas d'une structure « latérale » de type source/canal latéral/drain, composée d'un conducteur non magnétique N dont les extrémités sont contactées à des conducteurs ferromagnétiques source F1 et drain F2, dont les aimantations peuvent être parallèles ou antiparallèles (voir exemple de structure sur les figures a et b), est semblable à celui de la CPP-GMR. Le courant passe latéralement de F1 à N, puis à F2, de la même façon qu'il traverserait verticalement en CPP-GMR une tricouche, avec une couche non magnétique dont l'épaisseur serait égale à la longueur du canal et encadrée par deux couches magnétiques semi-infinies. La structure latérale a l'avantage de rendre possible l'installation d'une « grille » sur le canal.

Les résultats sur ces structures latérales s'interprètent avec le même type d'équations de transport que celles de la CPP-GMR. Dans une situation de CPP-GMR, avec une épaisseur de couche non magnétique égale à la longueur du canal latéral, donc en général supérieure à 100 nm, et avec les métaux habituels de la GMR, les performances en termes de variation de résistance ΔR entre configurations parallèle et antiparallèle ou de signal de sortie ΔV restent cependant très modestes : soit $\Delta R/R$ ou $\Delta V/V_{\text{bias}}$ de l'ordre de quelques pourcents ou dixièmes de pourcents, avec des contacts tunnel. Quand le canal latéral est un semi-conducteur, qui peut certes avoir un temps de relaxation de *spin* plus long qu'un métal, mais par contre une vitesse électronique beaucoup plus petite, les performances sont encore plus modestes [21].

Obtenir des performances élevées avec des structures latérales exige donc des matériaux combinant des temps de relaxation de *spin* longs, mais aussi des vitesses électroniques grandes, nanotubes de carbone ou graphène, par exemple. Un exemple est donné sur les figures c et d, avec des résultats de magnétorésistance supérieurs à 70% et des signaux de sortie V allant jusqu'à 50 mV, dans des expériences où le canal latéral est un nanotube de carbone [20].



(a) Image par microscopie électronique d'un nanotube de carbone (CNT) entre contacts (source et drain) de $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ (LSMO). L'aimantation M de la source F1 est fixe ; celle du drain F2 peut être parallèle (P) ou antiparallèle (AP) à M. (b) Schéma correspondant (vue latérale). (c) et (d) : Magnétorésistances de 72% et 60%, avec des structures du type (a) [20]. Sur la figure (c), les directions des aimantations des matériaux F1 et F2 sont indiquées par des flèches. On remarquera l'hystérésis en cyclage de champ, du au faible champ coercitif de la couche F2.

Références

- 1 • M.N. Baibich *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **61** (1988) 2472.
- 2 • G. Binash *et al.*, *Phys. Rev. B* **39** (1989) 4828.
- 3 • N.F. Mott, *Proc. Roy. Soc. A* **153** (1936) 699.
- 4 • A. Fert et I. A. Campbell, *Phys. Rev. Lett.* **21** (1968) 1190, *J. Physique* **32** (1971) C1-46, *J. Phys. F* **6** (1976) 849.
- 5 • B. Loegel et F. Gautier, *J. Phys. Chem. Sol.* **32** (1971) 2723.
- 6 • P. Grünberg *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **57** (1986) 2442.
- 7 • R. E. Camley et J. Barnas, *Phys. Rev. Lett.* **63** (1989) 664.
- 8 • P.M. Levy *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **65** (1990) 1643.
- 9 • S.S.P. Parkin *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **64** (1990) 2304.
- 10 • T. Shinjo *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **59** (1990) 3061.
- 11 • C. Dupas *et al.*, *J. Appl. Phys.* **67** (1990) 5680.
- 12 • D. H. Mosca *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.* **94** (1991) L1 ; S. S. P. Parkin *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **66** (1991) 2152.
- 13 • B. Diény *et al.*, *Phys. Rev. B* **43** (1991) 1297.
- 14 • S.S.P. Parkin, dans *Spin Dependent Transport in Magnetic nanostructures* (édité par S. Maekawa et T. Shinjo, Taylor and Francis 2002), p. 237.
- 15 • C. Chappert *et al.*, *Nature Materials*, **6** (2007) 813.
- 16 • T. Shinjo, *ibidem* ref. [14], p. 1 ; P. M. Levy et I. Mertig, *ibidem*, p. 47 ; A. Fert, A. Barthélémy et A. Fert dans *Nanomagnetism* (édité par D.L. Mills et J.A.C. Bland, Elsevier, 2006), p. 153.
- 17 • W. P. Pratt *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **66** (1991) 3060 ; J. Bass et W. P. Pratt, *J. Magn. Magn. Mater.* **200** (1999) 274.
- 18 • L. Piraux *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **65** (1994) 2484 ; A. Fert et L. Piraux, *J. Magn. Magn. Mater.* **200** (1999) 338.
- 19 • T. Valet et A. Fert, *Phys. Rev. B* **48** (1993) 7099.
- 20 • L.H. Hueso *et al.*, *Nature* **445** (2007) 410.
- 21 • B. T. Jonker et M. E. Flatté, dans *Nanomagnetism* (édité par D.L. Mills et J.A.C. Bland, Elsevier, 2006), p. 227.

Faits marquants en spintronique depuis la découverte de la magnétorésistance géante

Bernard Diény (bernard.dieny@cea.fr)

SPINTEC, UMR 8191 CEA/CNRS/UJF, Institut Nanosciences et Cryogénie, CEA/Grenoble, 38054 Grenoble Cedex 9

La découverte de la magnétorésistance géante (GMR) par Albert Fert et Peter Grünberg est considérée comme fondatrice de l'électronique de *spin*. Celle-ci réalise un mariage entre l'électronique et le magnétisme. Cette discipline a maintenant une vingtaine d'années. Depuis 1988, son essor a été stimulé par une série de découvertes marquantes relatées dans cet article : magnétorésistance tunnel (TMR), transfert de *spin*, dispositifs hybrides magnétiques/semi-conducteurs.

Ces découvertes ont permis divers développements applicatifs dans les domaines des mémoires non volatiles (MRAM), des composants pour la logique, des composants radiofréquences pour les télécommunications, et des capteurs de champs magnétiques hypersensibles.

L'article d'Albert Fert (p. 8) a parfaitement introduit la thématique de l'électronique de *spin* et le mécanisme de la magnétorésistance géante. De manière simple, on peut dire que les matériaux magnétiques peuvent servir de polariseurs ou d'analyseurs d'électrons polarisés en *spin*. La spintronique associe ainsi des matériaux magnétiques et non magnétiques, ces matériaux pouvant être métalliques, isolants ou semi-conducteurs. Les composants spintroniques ont souvent une structure de la forme couche ferromagnétique (F1)/couche non magnétique (NM)/couche ferromagnétique (F2), dans laquelle on peut changer l'orientation relative des aimantations des couches F1 et F2. Cette structure s'apparente à un couple polariseur/analyseur en optique ; il est en effet connu qu'en jouant sur l'angle entre les directions de polarisation du polariseur et de l'analyseur, on peut changer la transmission de la lumière à travers ce couple. En électronique de *spin*, lorsqu'un courant électrique traverse la structure F1/NM/F2 perpendiculairement aux interfaces (GMR en géométrie CPP, voir l'article d'A. Fert, p. 11), la première couche ferromagnétique (F1)

polarise en *spin* les électrons parallèlement à l'aimantation de cette couche. Cette polarisation est transmise à travers la couche non magnétique supposée suffisamment fine (typiquement quelques nanomètres). La capacité des électrons à pénétrer dans la couche F2 dépend alors de l'angle entre les aimantations de F1 et F2. Ceci se manifeste par un changement de la résistance électrique de la structure en fonction de cet angle.

Ce phénomène a été mis en évidence pour la première fois à Orsay en 1988 dans des multicouches constituées d'alternance de couches de fer de 2 nm et de chrome de 1 nm [1]. Il lui a été donné le nom de magnétorésistance géante, car le changement relatif de résistance observé sous champ magnétique, de l'ordre de 50% à température ambiante, était beaucoup plus grand que tous les phénomènes de magnétorésistance connus jusque-là dans les métaux. Cette découverte est considérée comme fondatrice de l'électronique de *spin*. Elle a stimulé une foison d'études sur ces phénomènes d'interaction entre magnétisme et transport de charge. En 1990, des matériaux présentant une magnétorésistance géante à champ

► Les vannes de *spin*

Très rapidement après la découverte de la magnétorésistance géante, les industriels de l'enregistrement magnétique ont perçu que ce nouveau phénomène pouvait être très utile pour la réalisation de capteurs de champ magnétique ultrasensibles, en particulier pour les têtes de lecture de disques durs d'ordinateurs.

Toutefois, dans les multicouches (Fe/Cr) étudiées par les équipes d'A. Fert et P. Grünberg, les champs nécessaires pour observer la magnétorésistance géante étaient très élevés, typiquement 2 teslas, du fait de l'existence d'un fort couplage antiferromagnétique entre les aimantations des couches de fer à travers les couches de chrome. Or, le champ magnétique que l'on cherche à relire à la surface des disques durs pour connaître l'information

écrite dans le disque est de l'ordre de 2 à 4 millitesla, soit 3 ordres de grandeur plus faible. Il fallait donc mettre au point des matériaux présentant les effets de magnétorésistance géante à champs beaucoup plus faibles. Ceci a été réalisé à IBM Almaden par l'équipe de V. Speriou [2], par le développement des « vannes de *spin* ».

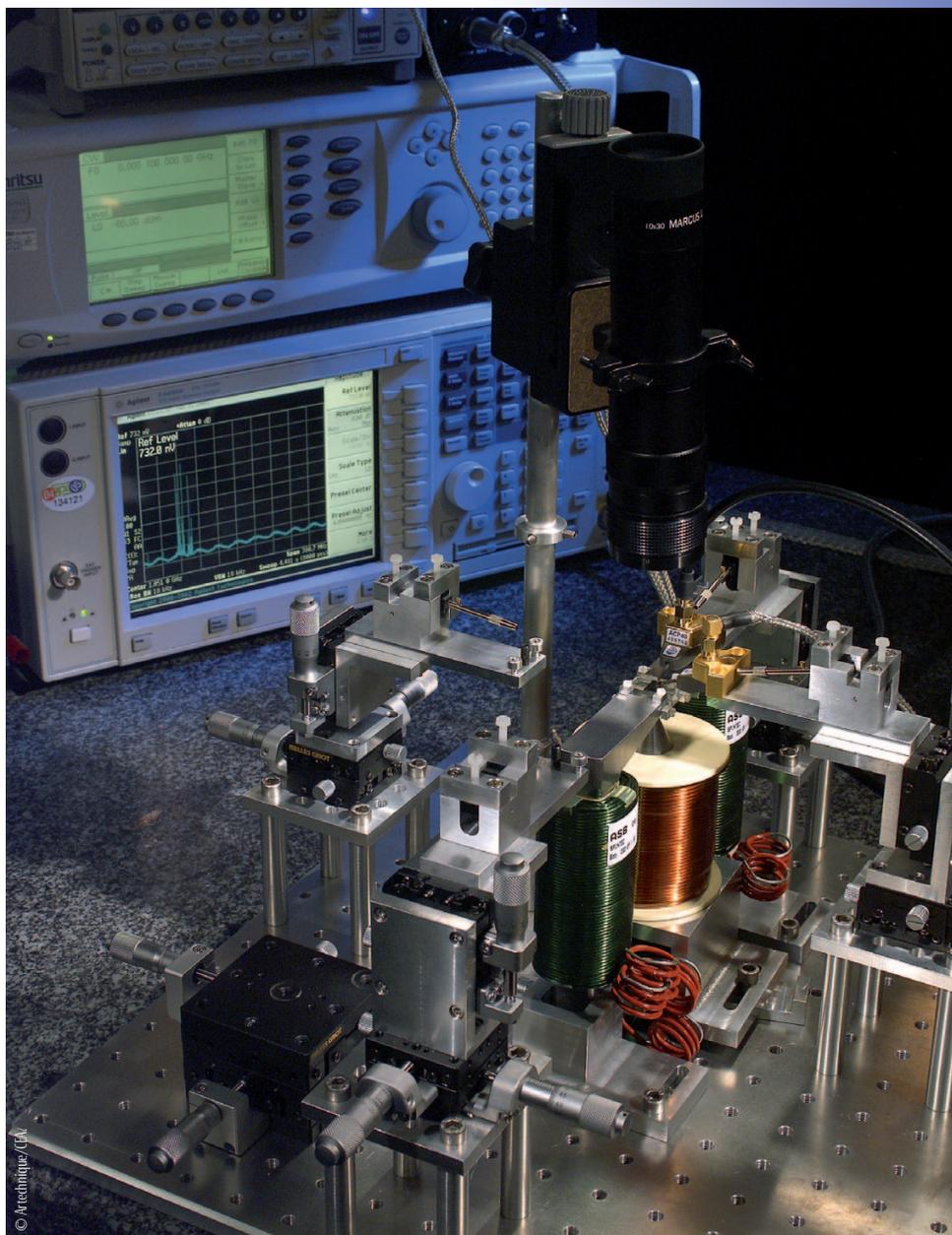
Les vannes de *spin* sont essentiellement constituées de deux couches magnétiques quasiment totalement découplées, séparées par une couche non magnétique, par exemple en cuivre, d'épaisseur supérieure à 2 nm (fig. A). Afin de pouvoir varier l'orientation relative des aimantations des deux couches ferromagnétiques, l'aimantation d'une de ces couches (dite piégée) est couplée par interaction d'échange avec une

faible, les « vannes de *spin* » (voir encadré, ci dessous), ont été mis au point pour réaliser des capteurs ultrasensibles de champs magnétiques [2]. Ces capteurs ont été introduits dans les têtes de lecture des disques durs d'ordinateurs en 1998. Ce fut la première application industrielle de composants spintroniques.

Depuis, l'électronique de *spin* a connu plusieurs découvertes marquantes, qui vont être décrites dans cet article :

- observation en 1995 de magnétorésistance tunnel dans des jonctions tunnel magnétiques à température ambiante, d'abord sur des jonctions amorphes (donnant des amplitudes de magnétorésistance de l'ordre de 50%), puis sur des jonctions cristallisées (barrière tunnel de MgO donnant des amplitudes de magnétorésistance jusqu'à 600%) ;
- prédiction (1996) puis observation expérimentale (1998, 2000) d'effets de transfert de *spin*, permettant de manipuler l'aimantation de nanostructures magnétiques par des courants polarisés en *spin* ;
- possibilité de modifier les propriétés magnétiques par tensions électriques (2000). Dans ce domaine, les semi-conducteurs

>>>

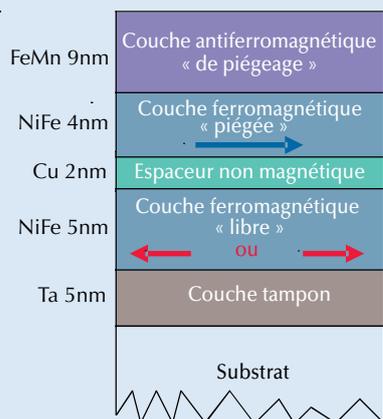


Banc de mesures électriques spectrales large bande (0-26 GHz) dédié à l'étude de nanostructures magnétiques à courant polarisé en *spin* au centre CEA de Grenoble.

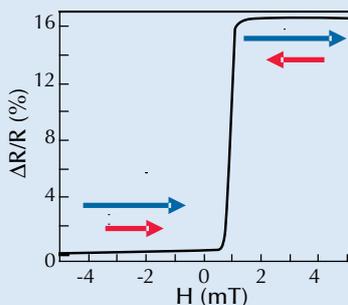
couche antiferromagnétique (dite de piégeage). L'interaction à travers l'interface entre ces deux couches a pour effet de bloquer l'aimantation de la couche piégée dans une direction fixe

sur une très large gamme de champ appliqué. Par contre, l'autre couche magnétique, dite « libre », est constituée d'un matériau magnétiquement doux, c'est-à-dire dont l'aimantation

s'oriente très facilement dans le champ appliqué, comme une aiguille de boussole. Un faible champ magnétique suffit alors à provoquer une variation d'orientation relative d'aimantation et donc l'effet de GMR (fig. B).

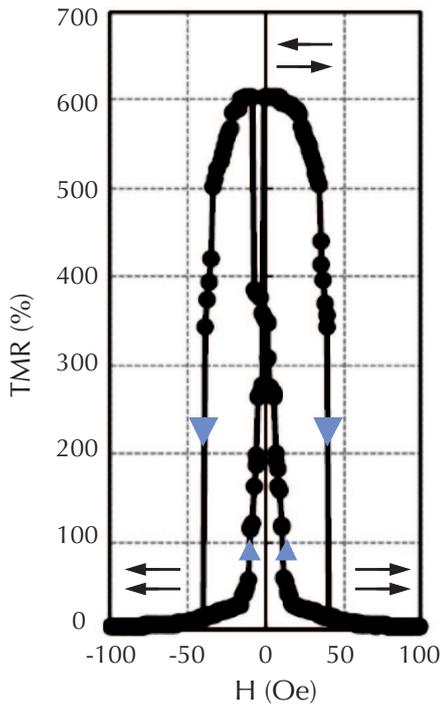


A. Structure de base d'une vanne de *spin*. Les flèches indiquent les directions de l'aimantation de la couche piégée (aimantation fixe) et de la couche libre (aimantation pouvant tourner suivant le champ appliqué).



B. Réponse magnétorésistive d'une vanne de *spin*. Les flèches indiquent les directions d'aimantation des couches libre (flèches rouges) et piégée (flèches bleues).

L'optimisation de ces vannes de *spin* entre 1990 et 1998, jusqu'à leur introduction dans les disques durs, a conduit à l'essor de toute une ingénierie de multicouches magnétiques pour la spintronique. Les structures optimisées comprennent aujourd'hui une vingtaine de couches, dont les épaisseurs sont contrôlées à l'angström près. La réponse, très linéaire et réversible, observée sur la figure B, montre que ces matériaux sont tout à fait adaptés pour la réalisation de capteurs de champs magnétiques très sensibles.



1. Magnétorésistance à température ambiante de jonctions tunnel à base de MgO, d'après Yuasa *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **89** (2006) 042505. La résistance de l'échantillon varie de 4 kΩ à 17 kΩ lorsque les aimantations des deux électrodes magnétiques passent d'un alignement parallèle à un alignement antiparallèle. Les flèches bleues indiquent le sens de parcours du cycle de magnétorésistance. L'amplitude de TMR est définie comme la variation relative de la résistance de la jonction tunnel entre les configurations magnétiques parallèle (R_p) et antiparallèle (R_{AP}): $TMR = (R_{AP} - R_p)/R_p$. L'hystérésis observée sur la magnétorésistance résulte de l'hystérésis dans le retournement de l'aimantation des deux électrodes magnétiques de la jonction.

>>>

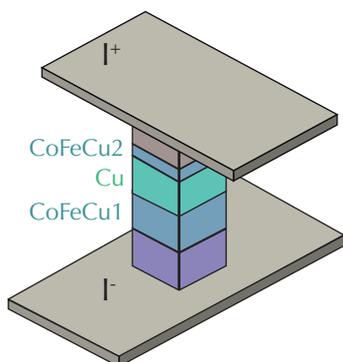
magnétiques jouent un rôle très important. Cette partie sera traitée plus en détail dans l'article d'Agnès Barthélémy *et al.* (p. 20).

Magnétorésistance tunnel

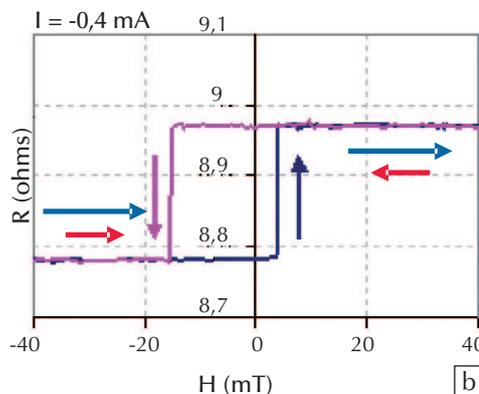
Les jonctions tunnel magnétiques se présentent aussi sous la forme de sandwiches F1/NM/F2 mais, à la différence des vannes de *spin* dans lesquelles la couche séparatrice NM est métallique (typiquement en cuivre), la couche séparatrice est ici une fine couche de matériau isolant (par exemple en alumine d'épaisseur 1,5 nm). Cette couche constitue une barrière d'énergie pour les électrons de conduction. Ceux-ci peuvent néanmoins traverser la barrière par effet tunnel. Lorsque les électrodes de part et d'autre de la barrière tunnel sont magnétiques, la probabilité de passage des électrons à travers cette barrière dépend de l'angle entre le *spin* des électrons et l'aimantation de l'électrode qui reçoit les électrons après passage de la barrière. De ce fait, lorsqu'une tension électrique est appliquée entre les deux électrodes de la jonction, le courant d'électrons à travers celle-ci dépend de l'angle entre les aimantations des deux électrodes. Cet effet avait été observé pour la première fois en 1975 par un Français, Michel Jullière, à basse température dans des jonctions magnétiques semi-conductrices à base de germanium [3]. Mais l'intérêt pour les jonctions tunnel n'a vraiment explosé qu'après l'observation en 1995 de

magnétorésistance tunnel à température ambiante dans des jonctions amorphes à base d'alumine [4]. Ces jonctions présentaient des amplitudes de magnétorésistance de 30 à 70%. Depuis, d'énormes progrès ont été réalisés dans la nature et la qualité des matériaux constituant les barrières tunnel. En particulier, des jonctions magnétiques cristallisées ont été mises au point, à base d'oxyde de magnésium (MgO), présentant des amplitudes de magnétorésistance supérieures à 600% à température ambiante (fig. 1), donc très supérieures à celles observées avec la magnétorésistance géante classique.

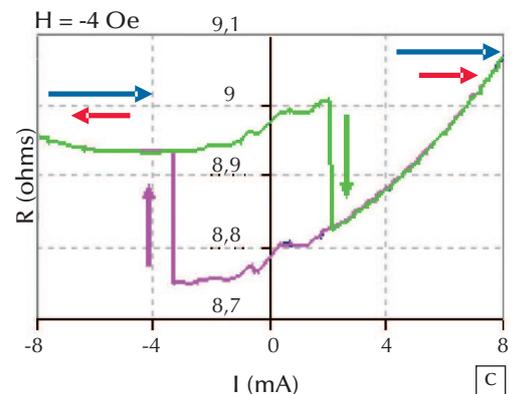
Cette augmentation considérable de l'amplitude de la magnétorésistance des jonctions à base de MgO par rapport aux jonctions amorphes à base d'alumine provient de la nature cristallisée des barrières de MgO. Dans les jonctions à barrières amorphes, la magnétorésistance provient uniquement de la différence de population en *spin* ↑ et ↓ dans l'électrode magnétique au voisinage immédiat de la barrière tunnel. Dans les jonctions tunnel cristallisées, un phénomène supplémentaire se produit : il s'agit d'un filtrage des électrons qui passent à travers la barrière tunnel, suivant la symétrie de leur fonction d'onde électronique. Seuls les électrons dont la fonction d'onde a une symétrie compatible avec celle du réseau cristallographique de MgO, arrivent à passer à travers la barrière tunnel. Or, si les électrodes sont en alliages riches en cobalt de structures cubiques comme le MgO, seuls les électrons de *spin* ↑ ont la symétrie adéquate pour passer à travers la



a



b



c

2. Exemples de commutation magnétique d'une structure vanne de *spin* de composition IrMn 7nm/CoFeCu 5nm/Cu 5nm/CoFeCu 2,5nm, gravée sous la forme d'un pilier de section 130 nm x 130 nm et traversée par un courant perpendiculairement au plan des couches (a). Dans la figure du centre (b), la commutation est provoquée par l'application d'un champ magnétique parallèle au plan des couches, qui fait commuter l'aimantation de la couche libre (CoFeCu 2,5nm, flèches rouges) de la vanne de *spin* de façon hystérique. Les flèches mauve et indigo indiquent le sens de parcours des cycles d'hystérésis. Le changement de résistance observé est dû à la magnétorésistance géante de la structure. Dans la figure de droite (c), la commutation est provoquée par le courant polarisé en *spin*, circulant à travers la structure (d'après [8]). La courbure asymétrique observée sur les courbes R(I) est liée à une combinaison d'effets Joule et thermoélectrique se produisant dans la nanostructure.

barrière tunnel. Il en résulte un filtrage quasi-parfait des électrons \uparrow , donc une polarisation des électrons tunnel proche de 100%, d'où de très fortes amplitudes de magnétorésistance.

Outre l'intérêt de ces phénomènes du point de vue fondamental, les jonctions tunnel suscitent un intérêt considérable pour différents types d'applications mémoires, composants logiques ou capteurs, qui sont décrits dans ce dossier.

Transfert de spin

Les phénomènes d'électronique de *spin* dont nous avons parlé jusqu'ici sont des phénomènes de magnétorésistance (géante GMR ou tunnel TMR), c'est-à-dire des variations de résistance électrique sous champ magnétique. Ces effets permettent d'agir sur un courant électrique polarisé en *spin* à partir de l'aimantation d'une nanostructure magnétique. Mais l'effet réciproque existe aussi. Il a été prédit en 1996 par deux théoriciens : J. Slonczewski et L. Berger [5], et a été observé expérimentalement peu de temps après [6,7]. Cet effet, appelé « transfert de *spin* », est une action qu'exerce un courant polarisé en *spin* sur l'aimantation d'une nanostructure. L'idée est la suivante : lorsque des électrons polarisés en *spin* sont injectés dans une nanostructure magnétique dont l'aimantation fait un angle avec la direction de polarisation en *spin* des électrons, cette dernière se réoriente très rapidement parallèlement à l'aimantation locale dans le premier nano-

mètre suivant la pénétration des électrons dans la nanostructure. En réaction, cette réorientation se traduit par un couple magnétique agissant sur l'aimantation de la nanostructure. Ce couple peut produire différents effets.

a) Il peut faire commuter l'aimantation de la nanostructure dans une direction ou la direction opposée, suivant le sens du courant. Ceci est illustré à titre d'exemple sur la figure 2. Les expériences ont d'abord été réalisées sur des structures de type vanes de *spin* métalliques, comme celles utilisées dans la figure 2. Les densités de courant critique nécessaires pour provoquer la commutation d'aimantation dans ces structures métalliques sont de quelques 10^7 A/cm².

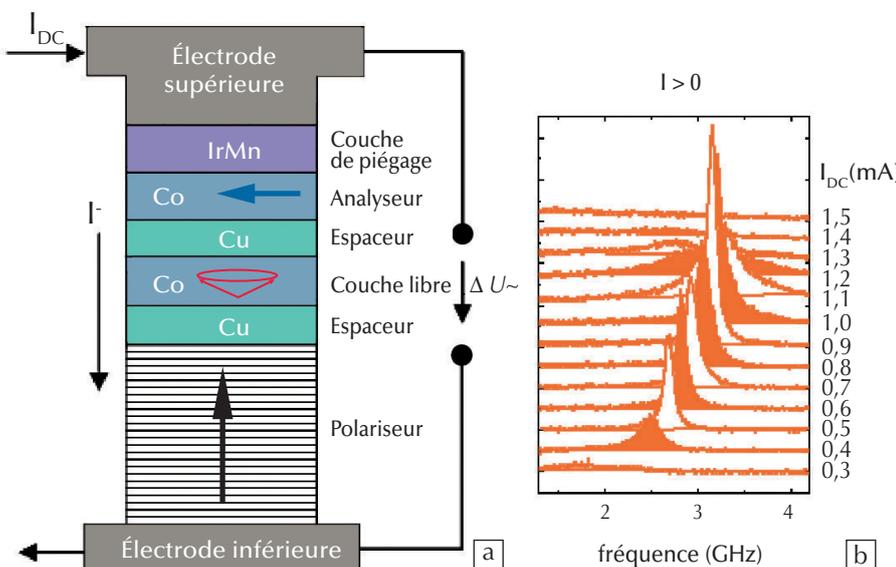
Ces fortes densités de courant interdisaient au départ d'observer ce type d'effet dans les jonctions tunnel magnétiques, car celles-ci sont sujettes au claquage électrique lorsque la tension qui leur est appliquée est trop importante (typiquement supérieure à ~ 1 V). Toutefois, grâce aux progrès réalisés dans la croissance des jonctions tunnel, il est devenu possible d'abaisser suffisamment l'épaisseur des barrières tunnel et donc leur transparence (mesurée par leur produit $RA = \text{résistance} \times \text{surface}$, la surface étant l'aire de la jonction), pour observer ces effets de commutation dans les jonctions tunnel [9].

b) Dans certaines géométries, le champ appliqué et le transfert de *spin* peuvent exercer des influences antagonistes sur l'aimantation d'une nanostructure. Dans

ce cas, le transfert de *spin* peut générer des excitations entretenues de l'aimantation. Le système pompe constamment de l'énergie au courant polarisé en *spin* pour compenser les mécanismes de dissipation *spin*-réseau. Par exemple, il a été montré que l'injection d'électrons polarisés en *spin* hors du plan dans une couche magnétique à aimantation planaire permet de générer un mouvement de précession entretenue de l'aimantation de cette couche sur un cône d'axe perpendiculaire au plan (fig. 3a). La fréquence de précession dépend de la densité du courant continu traversant la structure. Si on complète la structure par une couche de référence d'aimantation fixe, la variation oscillante d'angle entre l'aimantation excitée et l'aimantation fixe (analyseur) provoque une variation sinusoïdale de résistance, se traduisant elle-même par une oscillation de tension aux bornes du dispositif. La fréquence de ces oscillations se situe dans la gamme 2-30 GHz et peut être ajustée par le courant traversant la structure (fig. 3b).

c) Le transfert de *spin* peut également se manifester comme une action, provoquée par la circulation d'un courant électrique, sur les parois magnétiques existant dans un matériau magnétique homogène. Ce phénomène a été prédit initialement par Berger en 1984 [11] et observé une vingtaine d'années plus tard dans des nanofils magnétiques de différents types de matériaux, semi-conducteurs, métalliques ou oxydes. L'idée générale est la suivante. Si on considère par exemple une nano-

»»»



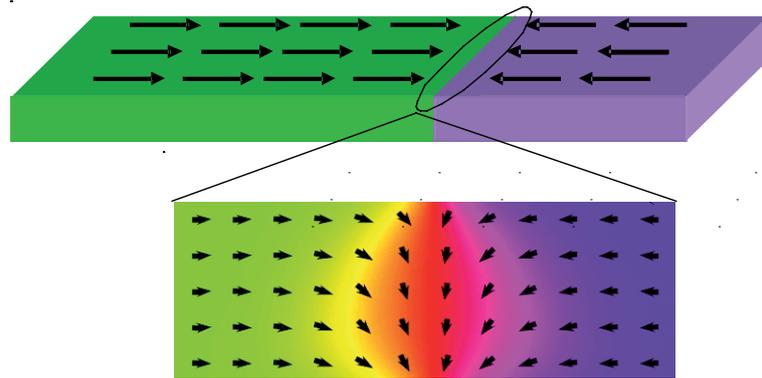
3. (a) Schéma d'un oscillateur spintronique à polariseur perpendiculaire au plan des couches. L'oscillateur est un pilier légèrement elliptique de dimension 60 nm x 70 nm et de composition Polariseur/Cu/Co/Cu/Co/IrMn, où le polariseur perpendiculaire est lui-même une multicouche à anisotropie hors du plan. Le courant continu traversant la structure entretient un mouvement de précession de l'aimantation de la couche dite « libre » (Co) sur un cône d'axe perpendiculaire au plan de la couche et parallèle à la direction de polarisation des spins du courant. L'analyseur est une couche de Co dont l'aimantation est piégée par interaction d'échange avec la couche antiferromagnétique IrMn (voir l'encadré sur les vanes de *spin*, pp. 14-15). Via l'effet de magnétorésistance lié à la variation d'angle entre les aimantations des couches libre et piégée (analyseur), une tension alternative ΔU_{\sim} apparaît entre les deux électrodes du dispositif.

(b) Spectres expérimentaux de la densité spectrale de la tension de sortie ΔU_{\sim} pour différents courants variant entre 0,3 et 1,5 mA. La fréquence des oscillations (abscisse des pics sur les courbes rouges) augmente avec le courant. (D'après [10]).

>>>

bande de NiFe dont l'aimantation est planaire, cette aimantation a tendance à s'aligner avec la longueur de la nanobande (fig. 4), pour des raisons d'énergie magnétostatique. Il se forme alors, le long de la bande, des domaines magnétiques, c'est-à-dire des régions d'aimantation quasi-uniforme, séparées les unes des autres par des parois. Les parois sont des zones de rotation d'aimantation, dont la forme résulte d'un compromis entre énergies d'échange, d'anisotropie et magnétostatique. Les parois peuvent avoir différentes configurations. Si la nanobande est étroite, la paroi sera plutôt de type transverse, comme représenté sur la figure 4.

Lorsqu'un courant circule le long de la nanobande, les électrons acquièrent une polarisation en *spin* en se propageant à l'intérieur d'un domaine. Lorsqu'un électron traverse la paroi, son *spin* peut se réorienter continûment au sein de la paroi et accompagner la rotation du champ dans la paroi (on parle de transmission adiabatique du *spin*) ou, à l'autre extrême, peut être transmis d'un domaine à l'autre à travers la paroi sans subir de réorientation (transmission non adiabatique). Il a été montré théoriquement et expérimentalement qu'une transmission purement adiabatique du *spin* conduit essentiellement à une déformation de la paroi, alors qu'une transmission non adiabatique exerce une pression sur la paroi qui peut la dépiéger d'un défaut et la mettre en mouvement. Les densités de courant



4. Représentation micromagnétique d'une paroi transverse dans une nanobande de NiFe. Le schéma agrandi du bas est une vue de dessus.

auxquelles ces effets sont observés sont de l'ordre de 10^8 A/cm^2 dans les systèmes magnétiques métalliques, mais seulement de l'ordre de 10^5 à 10^6 A/cm^2 dans les semi-conducteurs ou oxydes magnétiques.

Ces différents phénomènes de transfert de *spin* suscitent un intérêt considérable, car ils ouvrent tout un nouveau champ d'étude de la dynamique d'aimantation induite par un courant polarisé en *spin*. Ils ouvrent par ailleurs de nouvelles voies de manipulation de l'aimantation de nanostructures magnétiques, et en particulier d'écriture d'information dans des cellules mémoires ou de génération d'excitations entretenues d'aimantation pour des oscillateurs radiofréquence, ou encore de mouvements contrôlés de parois magnétiques pour la réalisation de mémoires de masse.

teur des électrons polarisés en *spin* au niveau d'une première électrode, on les manipule lors de leur propagation dans le semi-conducteur (par des champs magnétiques ou des champs électriques), et on les collecte de façon sélective en *spin* au niveau d'une deuxième électrode. Un transistor de *spin* fonctionnant sur ce principe a été proposé de façon conceptuelle par Datta et Das en 1990 [12].

- Par ailleurs, les semi-conducteurs (particulièrement les III-V et les II-VI) permettent de convertir des effets optiques en effets électroniques ou réciproquement. En irradiant un semi-conducteur par une lumière polarisée circulairement en *spin*, on peut générer (par le jeu des règles de sélection) des paires électrons-trous dans lesquelles les électrons sont polarisés en *spin*. Inversement, lors de la recombinaison radiative d'un électron polarisé en *spin* et d'un trou, on peut émettre un photon de polarisation circulaire. C'est d'ailleurs ainsi que l'efficacité de l'injection d'électrons polarisés en *spin* dans un semi-conducteur est souvent mesurée. Par exemple dans la référence [13], l'injecteur CoFe/MgO était déposé sur une diode photoluminescente (LED) à base de puits quantiques GaAs/AlGaAs/GaAs. La mesure de la polarisation circulaire de la lumière émise par la *spin*-LED renseigne directement sur la polarisation en *spin* des électrons injectés dans le semi-conducteur.
- Enfin, une des grandes caractéristiques des semi-conducteurs est de permettre de moduler la densité de porteurs de charge par l'application de tension électrique. Ceci offre des possibilités inédites de contrôle des propriétés magnétiques de

Bibliographie

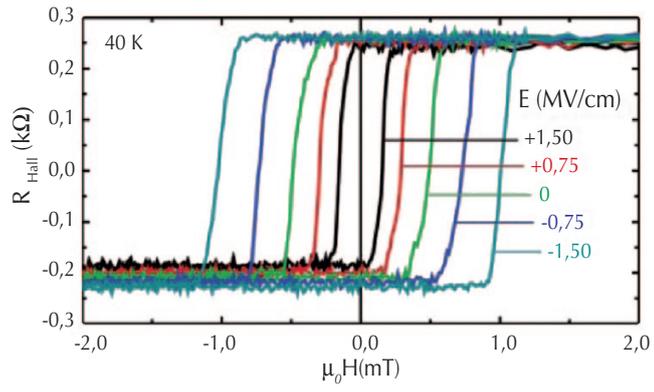
- 1 • M. Baibich *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **61** (1988) 2472.
- 2 • B. Dieny, V.S. Speriosu *et al.*, *Phys. Rev. B* **43** (1991) 1297-1300.
- 3 • M. Jullière, *Physics Letters A* **54** (1975) 225.
- 4 • J.S. Moodera *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **74** (1995) 3273-3276 ; T. Miyazaki et N. Tezuka, *J. Magn. Magn. Mater.* **139** (1995) 1231.
- 5 • J. Slonczewski, *J. Magn. Magn. Mater.* **159** (1996) 11 ; L. Berger, *Phys. Rev. B* **54** (1996) 9353.
- 6 • M. Tsoi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **80** (1998) 4281.
- 7 • J.A. Katine *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **84** (2000) 3149.
- 8 • A. Deac *et al.*, *Phys. Rev. B* **73** (2006) 064414.
- 9 • Y. Huai *et al.*, *Applied Physics Letters* **84** (2004) 3118.
- 10 • D. Houssameddine *et al.*, *Nature Materials* **6** (2007) 447.
- 11 • L. Berger, *Journ. Appl. Phys.* **55** (1984) 1954.
- 12 • S. Datta et B. Das, *Applied Phys. Lett.* **56** (1990) 665.
- 13 • X. Jiang *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **94** (2005) 056601.
- 14 • D. Chiba *et al.*, *Science* **301** (2003) 943.

Dispositifs hybrides magnétiques/semi-conducteurs

L'utilisation de semi-conducteurs en électronique de *spin* offre une très grande richesse de phénomènes, chacun faisant l'objet de nombreuses études. Les semi-conducteurs sont des matériaux de choix pour l'électronique de *spin* pour plusieurs raisons.

- Dans les semi-conducteurs de type IV (silicium, germanium), le couplage *spin*-orbite est faible (particulièrement pour le silicium), ce qui permet, si on polarise en *spin* les porteurs de charge à un certain endroit du semi-conducteur, de conserver cette polarisation en *spin* sur une longue distance (pouvant atteindre plusieurs microns dans le silicium). Ceci permet de concevoir des dispositifs dans lesquels on injecte dans le semi-conduc-

composants spintroniques par des tensions électriques (et non par le courant), ce qui a été montré par exemple dans $\text{In}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ par le groupe de H. Ohno à l'université de Tohoku (Japon) [14] (fig. 5). Dans ce type de semi-conducteur dopé avec des ions magnétiques de manganèse, le caractère ferromagnétique provient des interactions d'échange entre ions Mn. Ces interactions sont en fait transmises par les porteurs de charge qui se polarisent au voisinage d'un ion Mn, puis transportent cette polarisation aux ions Mn voisins. Mais on comprend aisément que dans ce mécanisme d'échange, l'intensité de l'interaction dépend directement de la densité de porteurs de charge. Ainsi, en contrôlant cette densité par une tension électrique, on modifie l'intensité des interactions d'échange et donc la température d'ordre ferromagnétique (la température de Curie T_c) du matériau. Dans les matériaux magnétiques, le rapport T/T_c joue un rôle très important, car il caractérise l'activation thermique de l'aimantation. En modifiant la tension appliquée, on change cette activation thermique comme si on variait la température du système. Ceci peut conduire à des transitions ferromagnétique/paramagnétique ou à des changements de coercitivité induits par tension (voir l'article d'Agnès Barthélémy *et al.*, p. 20).



5. Modification du champ coercitif du semi-conducteur magnétique $\text{In}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ par l'application de tension électrique à l'aide d'une électrode de grille placée au-dessus d'une croix de Hall (d'après [14]). La largeur du cycle d'hystérésis diminue quand on augmente le champ électrique E.

Conclusion

L'électronique de *spin* est une discipline en pleine croissance. Elle a été stimulée initialement par les développements dans le domaine de l'enregistrement magnétique à très haute densité (disques durs). Mais dans son essor, plusieurs découvertes marquantes ont ouvert de nouveaux champs d'investigation et d'applications. Parmi celles-ci, les effets de magnétorésistance tunnel à température ambiante et de transfert de *spin* ont été des étapes particulièrement significatives. Les perspectives d'applications se sont diversifiées : mémoires non volatiles (MRAM) (voir

l'article de Jean-Pierre Nozières, p. 34), logique non volatile, logique reprogrammable, composants radiofréquences...

La France est bien placée du point de vue recherche amont dans le domaine (Prix Nobel d'Albert Fert en 2007 !), des *start-up* françaises apparaissent sur ces thématiques. Il est fort possible qu'après avoir disparu du domaine de l'enregistrement magnétique, une industrie du magnétisme arrive à se reconstruire en France et en Europe autour de l'électronique de *spin*. ■

Pour en savoir plus sur la spintronique...

Consulter les articles réunis par Albert Fert et Jean-Pierre Nozières dans le tome 6, fascicule 9 (novembre 2005, pp. 917-1026) des Comptes Rendus Physique de l'Académie des sciences, Paris. (Publication Elsevier France).

- Magnetism in reduced dimensions
- Quantum nanomagnet
- Spin dependent transport : GMR & TMR
- Spin Transfer Torque: a new method to excite or reverse a magnetization
- Spintronics with semiconductors
- Development of new materials for spintronics
- Magnetic recording read head sensor technology
- Non-volatile magnetic random access memories (MRAM)
- Spin injection in semiconductors: towards a semiconductor-based spintronic device.

Achat en ligne

www.sciencedirect.com/science/journal/16310705/6/9

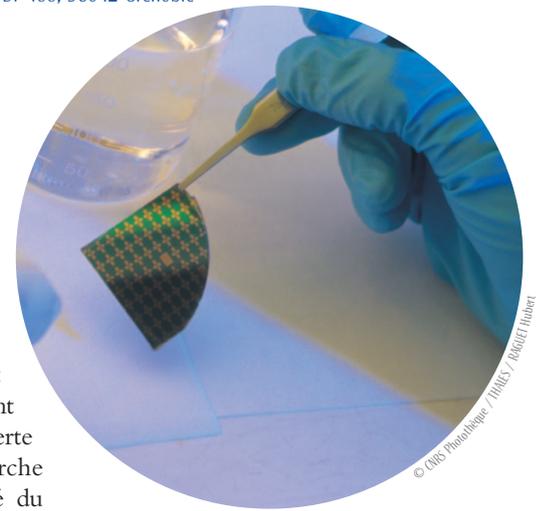
De nouveaux matériaux pour l'électronique de *spin*

Agnès Barthélémy¹, Martin Bowen², Joël Cibert³ (joel.cibert@grenoble.cnrs.fr)

1 - Unité Mixte de Physique CNRS/Thales, 91767 Palaiseau

2 - Institut de Physique et Chimie des Matériaux de Strasbourg, 23 rue du Loess, BP 43, 67034 Strasbourg Cedex 2

3 - Institut Néel, CNRS / Université Joseph Fourier, BP 166, 38042 Grenoble



Fabrication par lithographie optique de jonctions tunnel magnétiques sur substrat de silicium.

de l'information dans une « spintronique logique ». Mais aussi piloter les propriétés magnétiques en utilisant non pas un champ magnétique (créé par un courant, donc gros consommateur d'énergie), mais un champ électrique (vecteur de base de la microélectronique). Ou encore intégrer d'autres fonctions, par exemple celles de l'opto-électronique.

Dans tous les cas, et les théoriciens de l'informatique comme P. Jorrand le savent : « pas d'information sans état de la matière, pas de calcul sans processus physique ». De façon concrète, cela impose de développer des matériaux aux propriétés physiques bien maîtrisées, et d'associer ces matériaux dans des composants (avec des interfaces) qui permettront de manipuler ces propriétés pour assurer des fonctions nouvelles.

Cet article décrit l'apport de trois classes de matériaux à cet effort : les **semi-conducteurs magnétiques dilués** [1, 2] qui visent à conférer des propriétés magnétiques aux semi-conducteurs traditionnels, les **oxydes fonctionnels** [3] et notamment parmi eux les multiferroïques [4], et les **semi-conducteurs organiques** [5], dont les propriétés spintroniques émergentes ne cessent de surprendre.

La magnétorésistance géante a été mise en évidence sur des multicouches métalliques. Mais depuis quelques années, certains matériaux non métalliques ont révélé des potentialités spintroniques remarquables.

Cet article présente les principaux résultats obtenus et les perspectives offertes par trois classes de matériaux :

les semi-conducteurs magnétiques dilués, les oxydes fonctionnels et les semi-conducteurs organiques.

Parmi les possibilités offertes par ces matériaux, citons l'obtention de très longs temps de vie de *spin*, la conversion d'effets optiques en effets électroniques et réciproquement, et la modification de propriétés magnétiques de composants spintroniques par des champs électriques.

Les articles d'Albert Fert et de Bernard Dieny ont décrit l'essor de la spintronique à partir des propriétés physiques exceptionnelles observées sur des échantillons incorporant une alternance de couches magnétiques et non magnétiques. La propriété qui est exploitée dans des composants maintenant très répandus – après avoir été découverte et étudiée dans un contexte de recherche fondamentale – est la forte sensibilité du transport de courant électrique à la présence d'un champ magnétique : on parle de magnétorésistance géante (GMR) lorsque le courant circule dans l'ensemble formé par une couche métallique prise entre deux couches magnétiques dont on renverse l'aimantation relative ; on parle de magnétorésistance tunnel (TMR) lorsque le courant circule perpendiculairement entre deux couches magnétiques séparées par une barrière isolante. Dans les deux cas, les propriétés de l'interface sont évidemment essentielles.

La spintronique a ainsi participé pleinement à la miniaturisation accrue de l'électronique. Celle-ci utilise désormais des composants de dimensions nanométriques à la fois pour traiter (dans des composants à base de silicium) et stocker (dans des structures magnétiques avec une lecture utilisant la GMR ou la TMR) plus rapidement une quantité accrue d'information, avec un coût en énergie moindre. Cette contribution à une meilleure efficacité énergétique est sans doute moins visible, mais tout aussi importante.

On sait cependant que des limites physiques ont été identifiées dans la course aux dimensions nanométriques, et qu'on doit donc trouver de nouvelles pistes. Un exemple est donné par B. Dieny (p. 28) : intriquer étroitement le stockage et le traitement

© CNRS Photothèque / THALES / ARNOLD / Hubert

I. Les semi-conducteurs magnétiques dilués

Pourquoi ?

Rendre ferromagnétiques certains semi-conducteurs permettrait de construire une électronique de *spin* « tout semi-conducteur », et d'intégrer dans un même composant les fonctions de stockage de l'information, de traitement de celle-ci, voire différents capteurs et des émetteurs de lumière [6].

Le *point de départ* est donc un matériau semi-conducteur qui offre l'ensemble des possibilités qui ont permis le développement de la microélectronique : il est isolant lorsqu'il est pur, on sait le doper électriquement, et on sait manipuler les porteurs de charges en appliquant une configuration complexe de champ électrique (définie par des contacts électriques et des interfaces). En pratique, les contraintes industrielles requièrent en outre que ce semi-conducteur soit compatible avec les procédés technologiques et les matériaux actuellement utilisés en microélectronique ou opto-électronique : le silicium et le germanium, l'arséniure de gallium GaAs, le nitrure de gallium GaN.

Ce semi-conducteur devient un *semi-conducteur magnétique dilué* lorsqu'on y introduit une impureté magnétique comme le manganèse (Mn), qui porte un *spin* et donc un moment magnétique. Ce sont les porteurs de charges du semi-conducteur qui assurent le couplage ferromagnétique entre les moments magnétiques localisés sur les impuretés [1] : c'est un mécanisme qui existe dans les métaux magnétiques ; mais les densités de charges et les densités de moments magnétiques dans les semi-conducteurs magnétiques dilués sont beaucoup plus faibles et les températures critiques obtenues jusqu'à maintenant sont bien inférieures à la température ambiante.

Les recherches actuelles portent sur deux axes : d'une part, augmenter la température de Curie en améliorant la qualité d'un matériau donné, ou en cherchant des matériaux plus favorables ; d'autre part, apprendre à fabriquer des composants élémentaires de l'électronique de *spin* à partir des semi-conducteurs magnétiques dilués actuels.

Augmenter la température de Curie

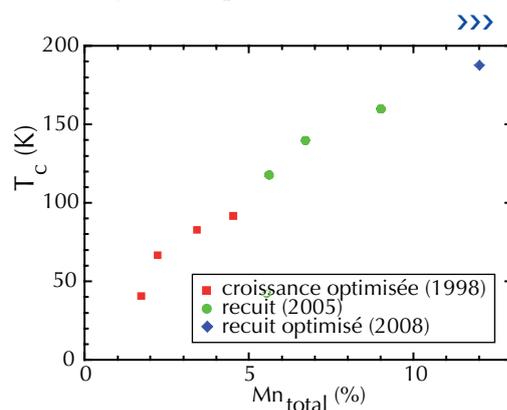
Le matériau le plus étudié est (Ga,Mn)As, ou plus exactement $Ga_{1-x}Mn_xAs$, dans lequel une proportion x des atomes Ga est remplacée aléatoirement par des atomes Mn. Ces atomes Mn jouent le double rôle de dopant électrique et de dopant magnétique. Les introduire en substitution de Ga est un défi redoutable, aussi bien pour l'élaboration que pour la compréhension des propriétés, car il s'agit de contrôler des proportions de l'ordre de 10%, une valeur bien supérieure aux dopages habituels de la microélectronique.

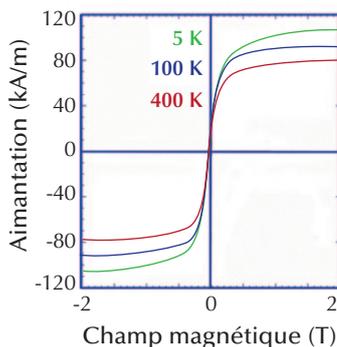
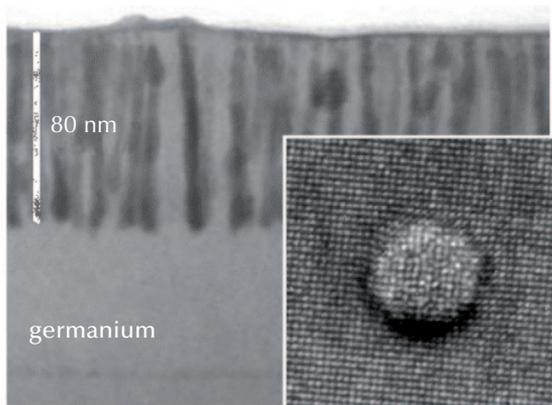
De gros progrès ont été faits dans l'élaboration de (Ga,Mn)As en épitaxie par jets moléculaires [7]. Les premiers matériaux, à la fin des années 1980, étaient élaborés dans des conditions trop proches des conditions optimisées pour GaAs pur, ils restaient isolants et paramagnétiques. Un meilleur contrôle de la température de croissance et du flux d'arsenic a permis dans les années 1990 d'observer un comportement ferromagnétique avec des températures de Curie supérieures à 60 K, et un record à 110 K longtemps singulier. Des études plus récentes ont montré que les atomes de Mn avaient tendance à s'incorporer sous forme d'interstitiels : des recuits bien choisis ont permis d'éliminer ces interstitiels et de monter la température de Curie à 170 K. On tend actuellement vers 190 K, avec un bon espoir que cette limite n'est pas intrinsèque et pourra donc être repoussée par un contrôle encore meilleur du matériau. En effet, la température critique augmente régulièrement avec la proportion de Mn correctement incorporée en substitution du Ga (fig. 1).

1. La maîtrise des matériaux (Ga,Mn)As croît année après année : température critique mesurée sur des couches optimisées, en fonction de la quantité d'impuretés manganèse correctement insérées sur le sous-réseau de gallium de la matrice GaAs. (Adapté des exposés de T. Jungwirth, téléchargeables sur [7]).

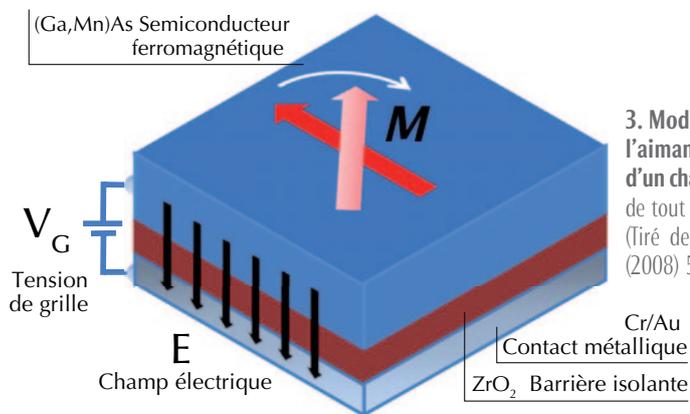
Une grande partie de la communauté explore d'autres matériaux. La température de Curie est proportionnelle au carré du couplage entre les porteurs et les impuretés magnétiques (puisque le couplage entre deux *spins* traduit l'action exercée sur le second *spin* par les porteurs qui ont été orientés par le premier *spin*) : on a donc étudié des semi-conducteurs où ce couplage est particulièrement fort, comme les *semi-conducteurs à large bande interdite* tels que le nitrure de gallium GaN ou l'oxyde de zinc ZnO. Malheureusement, aussi bien les calculs *ab initio* que les mesures sur des matériaux contenant peu d'atomes magnétiques ont montré que ce renforcement du couplage *spin*-porteur s'accompagne d'une localisation des porteurs, qui ne peuvent plus assurer l'interaction ferromagnétique entre les impuretés magnétiques.

Une autre piste concerne des *matériaux inhomogènes*, dans lesquels des zones de forte concentration en atomes magnétiques assurent une température de Curie élevée, tout en étant fortement couplées aux porteurs de charges de la matrice qui les contient. Un exemple est donné sur la figure 2 : la matrice est du germanium, les nanocolonnes visibles sur l'image de microscopie électronique ont une composition proche de Ge_2Mn et sont ferromagnétiques bien au-dessus de la température ambiante, comme le montrent les courbes d'aimantation ; surtout, les propriétés de transport démontrent un fort couplage avec les propriétés magnétiques. Il reste à maîtriser parfaitement croissance et morphologie, et à optimiser les propriétés magnétiques et de magnéto-transport.





2. Un système très hétérogène : nanocolonnes de Ge_2Mn dans une couche de Ge. À gauche, microscopie électronique en transmission (vue en section et vue de dessus) ; à droite, aimantation en fonction du champ magnétique appliqué à différentes températures, montrant un comportement ferromagnétique au-dessus de la température ambiante. (Adapté de S. Tardif et al., *SPIE Optics & Photonics Symposium*, preprint hal-00315739.)



3. Modification de la direction de l'aimantation M par l'application d'un champ électrique E , en l'absence de tout champ magnétique appliqué. (Tiré de D. Chiba et al., *Nature* 455 (2008) 515.)

>>> Réaliser des composants élémentaires

Même si dans les matériaux bien contrôlés la température de Curie reste plus basse que la température ambiante, et interdit toute application « grand public » à court terme, on peut tirer parti de la maîtrise des interfaces dans les semi-conducteurs usuels pour fabriquer des nanostructures réalisant des fonctions originales intéressantes pour l'électronique de spin. De nombreux dispositifs ont été réalisés. Nous décrirons à titre d'exemple le retournement de l'aimantation par application d'un champ électrique.

La structure « à effet de champ » est un classique de la microélectronique ; elle permet d'appliquer un champ électrique E qui module la densité de porteurs dans la couche (Ga,Mn)As. C'est un processus peu gourmand en énergie, car la structure présente une résistance élevée au passage du courant. Comme rappelé dans l'article de B. Dieny (p. 19), cette structure avait déjà été utilisée pour moduler la température critique d'une couche (In,Mn)As. Dans cette nouvelle structure (fig. 3), on utilise le fait que l'anisotropie magnétique dépend fortement de la densité de porteurs pour changer la direction d'aimantation en appliquant une tension, en l'absence de tout champ magnétique appliqué.

II. Oxydes pour l'électronique de spin

Les avancées dans la maîtrise de la croissance des couches minces d'oxydes ont rendu possible l'obtention de films minces de très grande qualité cristalline et leur insertion dans des hétérostructures pour l'électronique de spin (fig. 4).

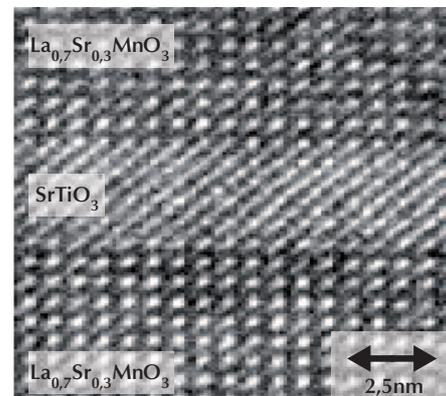
Intérêt des oxydes

Le rôle des oxydes dans l'électronique n'a cessé de croître ces dernières années. Ceci est dû à la grande diversité de propriétés physiques qu'ils présentent (ferro-électricité, magnétisme, caractère multiferroïque, comportement isolant / semi-conducteur / métallique, supraconductivité...) et à la possibilité de les moduler aisément par des facteurs extérieurs (contrainte, champs...). C'est donc tout naturellement que ces

matériaux ont trouvé leur place dans des hétérostructures pour l'électronique de spin, pour y apporter des fonctionnalités optimisées ou nouvelles [3].

Nous ne mentionnerons que brièvement deux domaines, pourtant très actifs.

(i) La recherche d'oxydes magnétiques semi-conducteurs dilués rejoint en l'élargissant le domaine des semi-conducteurs à large bande interdite, comme GaN ou ZnO. Des comportements ferromagnétiques à température ambiante ont été observés après incorporation d'impuretés magnétiques dans différents oxydes comme ZnO, TiO_2 , SnO_2 , In_2O_3 ou HfO_2 ... Les résultats sont ambigus, et les mécanismes (intrinsèques, ou extrinsèques : défauts, inhomogénéités) à l'origine du magnétisme de ces matériaux restent à élucider.



4. Image en microscopie électronique haute résolution d'une hétérostructure d'oxydes, réalisée par ablation laser pulsée, composée d'une couche mince de 2,4 nm d'épaisseur de SrTiO_3 prise en sandwich entre deux couches de LSMO. (Avec l'aimable autorisation de J.L. Maurice.)

(ii) La famille des oxydes comporte également des matériaux ferro- ou ferri-magnétiques isolants pouvant être utilisés comme barrière tunnel magnétique pour filtrer selon leur *spin* les électrons venant d'une électrode non magnétique [8]. De tels filtres en *spin* ont été obtenus en utilisant EuO , NiFe_2O_4 , CoFe_2O_4 , BiMnO_3 et $\text{La}_{0,1}\text{Bi}_{0,9}\text{MnO}_3$ (LBMO) comme barrière. Le devenir de cette thématique dépend de notre faculté à conserver dans des couches nanométriques le caractère ferromagnétique de ces matériaux complexes.

Oxydes demi-métalliques comme électrodes pour les jonctions tunnel magnétiques

C'est en 1994, avec la croissance de films minces de manganites ferromagnétiques, qu'a débuté l'incorporation des oxydes dans des hétérostructures pour l'électronique de *spin*. Ces matériaux prédits demi-métalliques, c'est-à-dire ne présentant une densité d'états non nulle au niveau de Fermi que pour une seule direction de *spin* et donc une polarisation en *spin* théoriquement égale à 100%, trouvèrent naturellement leur place en tant qu'électrodes dans des jonctions tunnel magnétiques. Leur utilisation a permis d'obtenir des records de magnétorésistance tunnel encore inégalés (1800%) ; malheureusement, ces records ne sont obtenus qu'à très basse température du fait des températures de Curie relativement faibles de ces matériaux : la température de Curie la plus élevée, observée pour le composé $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ (LSMO), n'est que de 350 K.

L'utilisation de ces demi-métaux a cependant permis d'aboutir à une meilleure compréhension de l'effet tunnel dépendant du *spin*, grâce à la simplicité de leur structure de bande. Utilisés comme électrode, ils constituent un analyseur de *spin* pour les électrons qui traversent la barrière par effet tunnel. L'étude de jonctions LSMO/SrTiO₃/Co a ainsi révélé le rôle prépondérant joué par le couplage des fonctions d'onde progressives dans l'électrode ferromagnétique avec les fonctions d'onde évanescentes dans la barrière tunnel. Une optimisation de ce couplage des fonctions d'onde à l'interface est aujourd'hui mise à profit pour obtenir de très forts effets de magnétorésistance tunnel à température ambiante avec des barrières de MgO pour la réalisation de mémoires magnétiques non volatiles (c.f. B. Dieny, p. 16).

Matériaux multiferroïques

Depuis 2000, de nombreuses équipes se sont également intéressées aux *matériaux multiferroïques*, dont la plupart sont des oxydes. Ces composés présentent au moins deux des trois types d'ordres ferroïques – ferro-élastique, ferroélectrique, ferromagnétique. Cette définition est généralement étendue pour inclure également les matériaux antiferroïques.

La multifonctionnalité de ces matériaux, en elle-même, en fait une classe de composés attrayants pour les applications. Par exemple, l'exploitation du caractère multifonctionnel d'un des seuls multiferroïques ferroélectrique et ferromagnétique, $\text{La}_{0,1}\text{Bi}_{0,9}\text{MnO}_3$ (LBMO), a permis de réaliser des jonctions tunnel à quatre états de résistance (fig. 5). Ces jonctions présentent une magnétorésistance tunnel *via* l'effet de filtrage de *spin* lié au caractère ferromagnétique de la barrière LBMO. De plus, le retournement de la polarisation électrique de LBMO modifie la hauteur de la barrière tunnel et la résistance du dispositif (effet d'électrorésistance tunnel, ou TER).

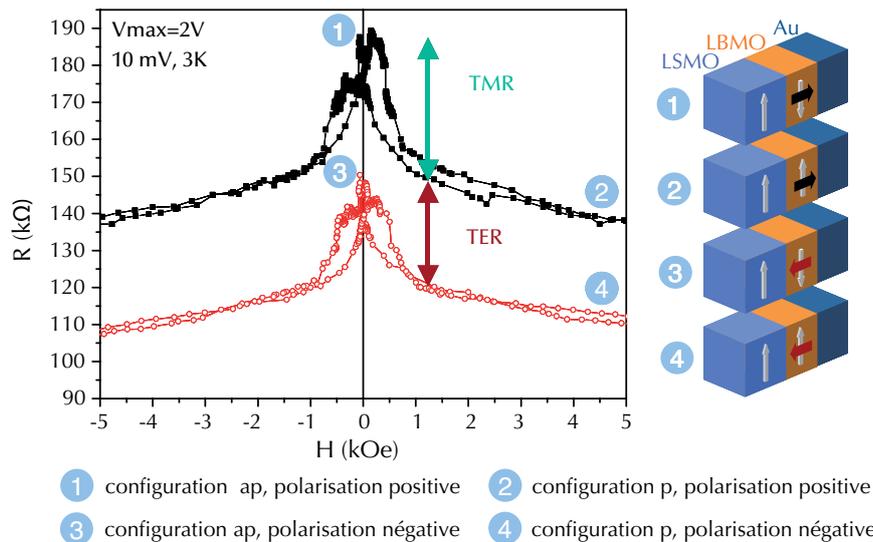
Dans certains matériaux, de nouvelles fonctionnalités proviennent des *couplages* pouvant exister entre ces différents ordres. Le couplage magnéto-électrique entre les ordres ferroélectrique et magnétique est

particulièrement intéressant pour la spintronique, car il rend théoriquement possible la manipulation d'une aimantation par un champ électrique. Des résultats en ce sens ont été obtenus avec des composés ferroélectriques/antiferromagnétiques présentant un couplage magnéto-électrique entre ces ordres, en les couplant par couplage d'échange à des couches minces ferro- ou ferrimagnétiques [3, 9]. Ces premiers résultats ouvrent la voie au contrôle de l'état de résistance d'une vanne de *spin* par un champ électrique. Ceci devrait permettre, notamment, la réalisation de mémoires non volatiles présentant les avantages des Fe-RAM (RAM ferroélectrique) et des MRAM, les MERAM, en combinant la non-volatilité du stockage magnétique à une écriture électrique de l'information, peu consommatrice de l'énergie et locale, et une lecture magnétique non destructive *via* la GMR.

Afin de pallier la rareté de composés à la fois ferro- ou ferrimagnétiques et ferroélectriques, des recherches sont actuellement menées sur des matériaux multiferroïques artificiels obtenus en combinant matériaux ferromagnétiques et matériaux ferroélectriques sous forme d'*hétérostructures* [4].

Les résultats prometteurs obtenus avec des barrières tunnel ferroélectriques [10] présagent des résultats intéressants pour la spintronique, en combinant ces barrières à des électrodes ferromagnétiques [11].

>>>



5. Variation de la résistance en champ magnétique d'une tricouche Au/LBMO 2 nm/LSMO après avoir appliqué un champ électrique positif ou négatif renversant la polarisation électrique du multiferroïque LBMO ($\text{La}_{0,1}\text{Bi}_{0,9}\text{MnO}_3$). Quatre états de résistance sont ainsi obtenus. Les transitions entre les états 1 et 2 et entre les états 3 et 4, résultent du retournement de l'aimantation (flèches blanches) du composé LBMO ; celles entre les états 1 et 3 et entre les états 2 et 4, sont liées au renversement de sa polarisation électrique (flèches rouges et noires). (Tiré de M. Gajek *et al.*, *Nature Materials* 6 (2007) 296).

III. La spintronique organique

Une convergence a lieu entre les domaines de l'électronique de *spin* [6] et de l'électronique organique [5], par la combinaison de matériaux magnétiques avec un espaceur organique qui va de la molécule unique au film mince. Certains avantages de ce mariage sont déjà identifiés, tandis que d'autres se révèlent progressivement et surprennent les deux communautés scientifiques explorant cette nouvelle frontière de la spintronique.

Pourquoi marier spintronique et matériaux organiques ?

Les *semi-conducteurs organiques* sont constitués de molécules assemblées à partir d'éléments atomiques très légers. Le faible couplage *spin-orbite* qui en résulte ouvrirait ainsi la possibilité d'un transport diffusif d'électrons au sein d'un tel matériau sur des distances de plusieurs microns, sans perdre l'information sur la polarisation en *spin* de ces porteurs [5]. Le mariage entre spintronique et semi-conducteurs organiques pourrait ainsi accomplir l'objectif d'une électronique où le *spin* est pris en compte dans la conception entière du circuit. De plus, un mariage réussi permettrait d'envisager des dispositifs spintroniques sur supports flexibles. Enfin, on peut espérer mettre à profit les propriétés intrinsèques des molécules, et leur sensibilité à des *stimuli* externes (lumière, champ magnétique), afin de réaliser des dispositifs aux fonctionnalités multiples.

L'interface ferromagnétique/organique

Notre compréhension actuelle du transfert de la polarisation de *spin* à travers une interface ferromagnétique/semi-conducteur met en jeu l'hybridation des fonctions d'onde de part et d'autre de l'interface [12] et la marche de potentiel à cette interface. Dans le cas d'un semi-conducteur inorganique, il se forme une barrière Schottky, avec une couche de désertion dont l'épaisseur est déterminée par l'écrantage de la charge des impuretés ionisées : elle peut atteindre le micron. En revanche, les états d'un semi-conducteur organique sont très localisés, permettant le transfert d'une forte densité de charge sur le premier plan

organique à l'interface. Cette modification brutale de la structure de bandes des matériaux à l'interface peut faire apparaître des propriétés intrinsèques, que l'on pourra façonner à volonté.

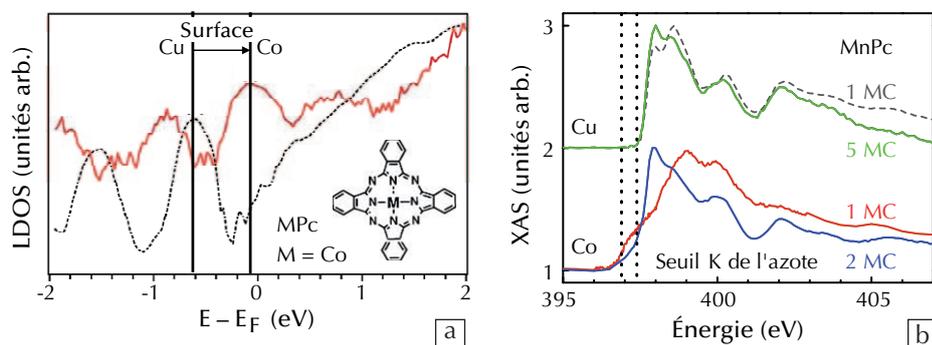
À titre d'exemple, il est possible de modifier la *conduction électronique* et le *magnétisme* de molécules de phthalocyanine (MPc = $MC_{32}H_{16}N_8$, où M = H₂, Co, Mn... ; voir l'encart de la figure 6a) en jouant sur la nature chimique ou l'orientation cristallographique de la surface sur laquelle elles sont déposées. La figure 6(a) représente la densité d'états, mesurée grâce à un microscope à effet tunnel, d'une telle molécule. Sur une surface de cuivre d'orientation (111), la faible interaction électronique laisse la molécule dans un état *semi-conducteur* (le niveau de Fermi E_F est entre deux orbitales moléculaires). En revanche, sur une surface de cobalt, un transfert de charge d'environ 0,6 eV de la molécule vers la surface du métal conduit au positionnement d'une orbitale moléculaire au niveau de Fermi – *la molécule acquiert donc un caractère métallique*.

Cette liaison forte entre une molécule organométallique et une surface ferromagnétique peut conduire à un *couplage ferromagnétique* entre la molécule et le substrat, dont le mécanisme peut être étudié par

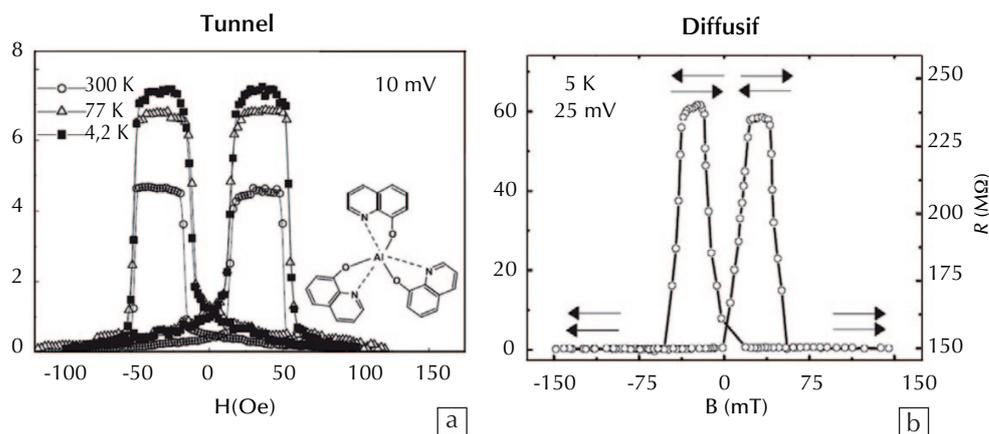
des expériences d'absorption de rayons X (XAS) réalisées auprès d'un synchrotron. La figure 6(b) montre des spectres acquis au seuil K de l'azote sur une couche de MnPc déposée sur une surface métallique d'orientation (100) : pour un substrat de cuivre, l'énergie de seuil ne dépend pas de l'épaisseur de molécules déposée. Par contre, pour un substrat de cobalt, un décalage d'environ 0,5 eV apparaît pour une monocouche moléculaire et disparaît déjà presque totalement dès la seconde monocouche. On démontre ainsi que ces propriétés de spintronique très intéressantes relèvent exclusivement de sites azote à l'interface.

Transport polarisé en *spin* au travers des matériaux organiques

Élucider la nature électronique de l'interface entre un matériau ferromagnétique et un semi-conducteur organique permettra de mieux comprendre le transport polarisé en *spin* à travers des couches *ultraminc*es et *minces* de cette classe de semi-conducteurs. Pour ce faire, on place de part et d'autre de la couche semi-conductrice des couches ferromagnétiques agissant comme injecteur et détecteur électrique de *spin*.



6. Modification de la structure électronique de la molécule de phthalocyanine lorsque celle-ci est déposée sur un substrat ferromagnétique. (a) Mesure par microscopie tunnel : la densité d'états d'une molécule de CoPc sur une surface de Co(111) (ligne rouge) est décalée de 0,6 eV par rapport à celle sur Cu(111) (ligne noire pointillée). (b) La sélectivité chimique de l'absorption de rayons X permet d'attribuer ce décalage aux sites d'azote de la molécule de phthalocyanine. Ce décalage n'affecte que la première monocouche (MC) de MnPc sur Co(100). La molécule de phthalocyanine est schématisée dans l'encart du panneau (a). (Tiré de (a) A.F. Takacs et al., *Phys. Rev. B*, **78** (2008) 233404, et (b) S. Javid et al., *Phys. Rev. Lett.* **105** (2010) 077201.)



7. Transport polarisé en spin.

Mesure de la magnétorésistance MR (a) en régime tunnel dans le système $\text{Co}/\text{Al}_2\text{O}_3(0,6\text{nm})/\text{tris}(8\text{-hydroxyquinolino})\text{aluminium} [\text{Alq}_3] (1,6\text{nm})/\text{FeNi}$ et (b) en régime diffusif dans le système $\text{LSMO}/\text{nanotube de carbone} (2000\text{ nm})/\text{LSMO}$. Encart du panneau (a) : molécule d'Alq3. (Tiré de (a) T. S. Santos *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **98**, (2007) 016601 et (b) L.E. Hueso *et al.*, *Nature* **445** (2007) 410.)

Dans une première configuration, le transport se fait par *effet tunnel* dans des couches isolantes ultraminces ($< 3\text{ nm}$) : les études les plus abouties utilisent une interface ferromagnétique/inorganique bien connue (par exemple $\text{Co}/\text{Al}_2\text{O}_3$) pour former un côté de la jonction [fig. 7(a)], mais le transport par effet tunnel à travers une jonction entièrement organique connaît quelques premiers succès.

La conservation de *spin* sur des distances plus grandes ouvrirait la voie à de nombreuses applications. Une démonstration de spintronique organique dans ce régime *diffusif* a été décrite en 2007 sur un dispositif comprenant un nanotube de carbone long de $2\ \mu\text{m}$ et intégrant des électrodes de $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ (LSMO) fortement pola-

risées en *spin*, fig. 7(b) [12]. Ce résultat, déjà signalé dans l'article d'Albert Fert (encadré, p. 13), témoigne de l'intérêt grandissant pour ce type de matériau organique, ainsi que pour le graphène en raison de ses propriétés originales et modulables.

De nombreux aspects du transport diffusif polarisé en *spin* à travers des couches minces organiques restent à comprendre, avec pour enjeu notable l'amélioration du rendement lumineux de diodes organiques. On le ressent bien : notre compréhension de la spintronique organique n'en est aujourd'hui qu'à ses débuts.

Par ailleurs, la versatilité du génie chimique permet de façonner des molécules présentant des propriétés intrinsèques nova-

trices pour la spintronique, que l'on peut adresser par des *stimuli* externes électriques, magnétiques ou encore optiques [13]. À titre d'exemples, citons la classe des *aimants moléculaires* tels que Mn_{12} , qui présentent une aimantation spontanée sans besoin d'ordre à longue distance ; ou encore celle des *molécules photocommutables*, telle que Fe-phénanthroline, qui présentent une transition d'un état paramagnétique haut-*spin* à un état paramagnétique bas-*spin*, que l'on peut activer optiquement ou thermiquement. L'intégration de telles molécules au sein de dispositifs spintroniques permettra de marier ces multifonctionnalités avec la spintronique en vue de débouchés industriels stratégiques.

Conclusion

Les recherches sur ces nouveaux matériaux pour l'électronique de *spin*, décrits au sein de cet article, n'en sont qu'à leur début. Elles ont d'ores et déjà abouti à l'obtention de matériaux présentant de très

fortes polarisations en *spin*, des propriétés magnétiques pouvant être modulées par un champ électrique, de très grands temps de vie de *spin*... Elles ouvrent de nouvelles voies fascinantes et prometteuses d'applications,

fournissant les briques élémentaires qui pourront être assemblées pour définir demain une électronique de *spin* encore plus performante ou présentant de nouvelles fonctionnalités. ■

En savoir plus

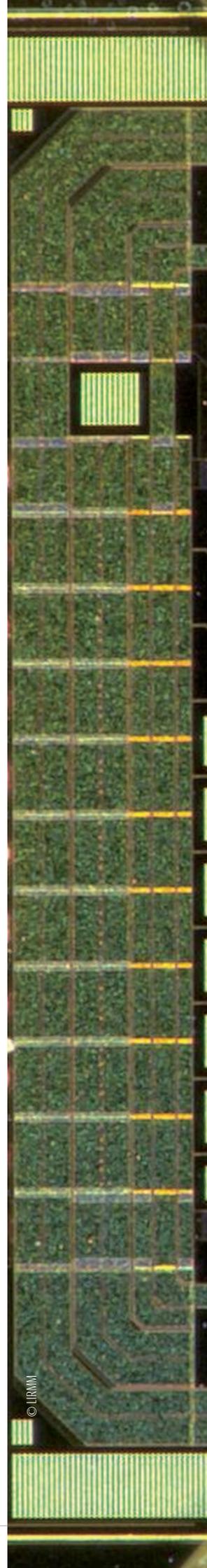
- 1 • J. Gibert et D. Ferrand, « Ferromagnétisme contrôlé par les porteurs dans les semi-conducteurs magnétiques dilués », *Images de la Physique* (2003-2004) 99.
- 2 • L. Besombes *et al.*, « Semi-conducteurs magnétiques dilués », *Bulletin de la SFP*, n°153 (2006) 5.
- 3 • M. Bibes et A. Barthélémy, « Oxide spintronics », *IEEE Trans. Electron. Devices* **54** (2007) 1003.
- 4 • W. Prellier *et al.*, « Les matériaux multiferroïques », *Reflète de la Physique* n°8 (2008) 14.
- 5 • V. A. Dediu *et al.*, « Spin routes in organic semi-conductors », *Nature Mater.* **8** (2009) 707.
- 6 • I. Zutic *et al.*, « Spintronics: Fundamentals and applications », *Rev. Mod. Phys.* **76** (2004) 323.
- 7 • Beaucoup d'information (exposés et articles) disponible sur le site que Tomas Jungwirth a consacré aux semi-conducteurs ferromagnétiques : http://unix12.fzu.cz/ms/navigate.php?cont=public_in
- 8 • J. S. Moodera *et al.*, « The phenomena of spin-filter tunnelling », *J. Phys.: Condens. Matter* **19** (2007) 165202.
- 9 • Y.H. Chu *et al.*, « Electric-field control of local ferromagnetism using a magnetoelectric multiferroic », *Nature Mater.* **7** (2008) 478.
- 10 • V. Garcia *et al.*, « Giant tunnel electroresistance for non-destructive readout of ferroelectric states », *Nature* **460** (2009) 81.
- 11 • C. G. Duan *et al.*, « Predicted magnetoelectric effect in Fe/BaTiO_3 multilayers: ferroelectric control of magnetism », *Phys. Rev. Lett.* **97** (2006) 07201.
- 12 • M. Bowen *et al.*, « Using half-metallic manganite interfaces to reveal insights into spintronics », *J. Phys: Condens. Matter* **19** (2007) 315208.
- 13 • O. Sato *et al.*, « Control of Magnetic Properties through External Stimuli », *Angew. Chem. Int. Ed.* **46** (2007) 2152.

► Applications

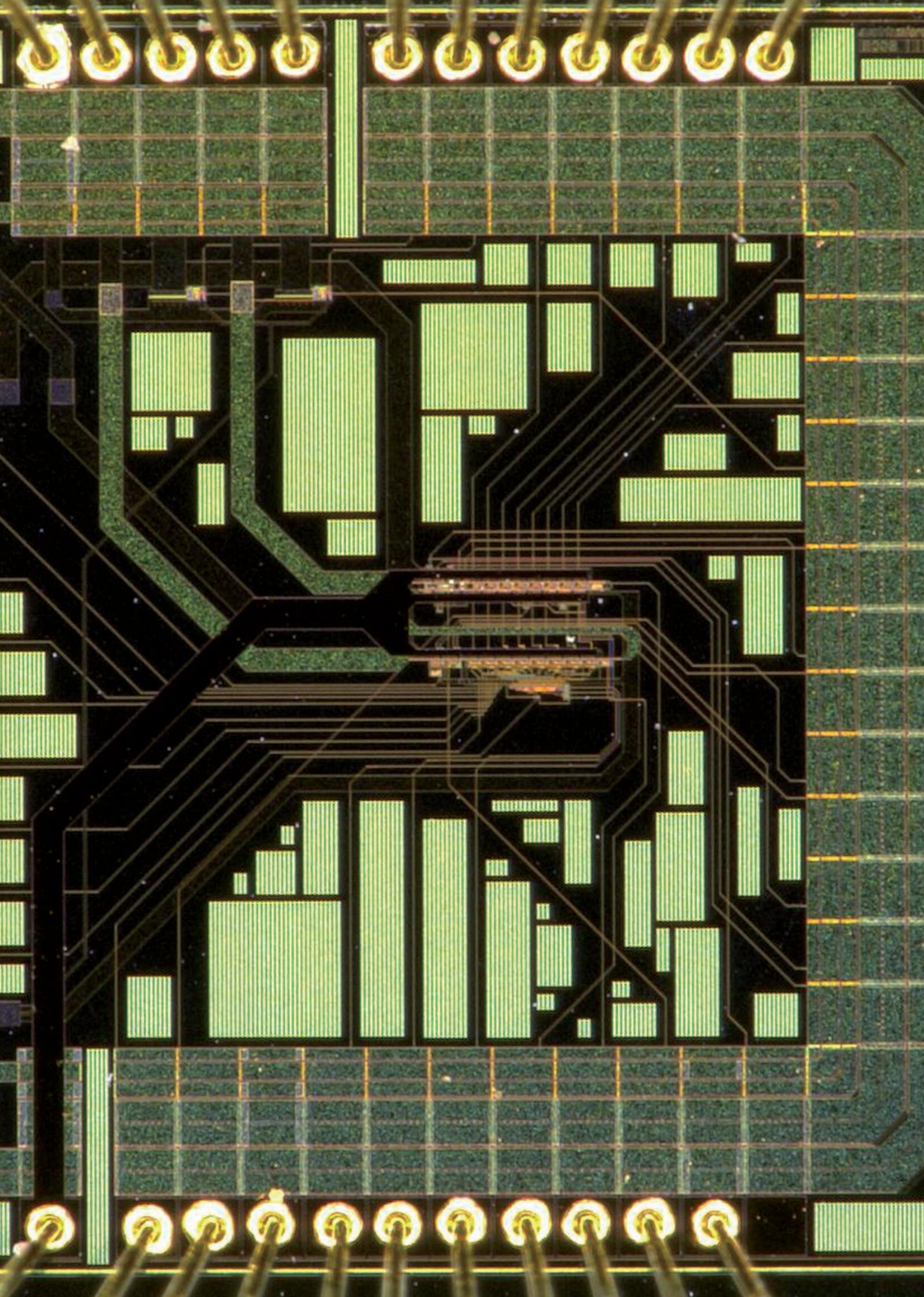
Le transfert de l'électronique de *spin* vers les applications a été très rapide. Cette seconde partie en donne un aperçu.

Dans un préambule, Bernard Dieny dresse un panorama général des applications existantes et prospectives de la spintronique. Puis, Claude Fermon et Myriam Pannetier-Lecœur décrivent plus en détail les capteurs ultrasensibles de champ ou de flux magnétique, utilisant le phénomène de magnétorésistance géante. Enfin, dans le dernier article, Jean-Pierre Nozières présente les progrès spectaculaires effectués par les têtes de lecture pour disques durs, et les nouvelles perspectives offertes par les mémoires magnétiques à accès aléatoire (MRAM).

Circuit électronique réalisé en technologie hybride CMOS/magnétique (Look up table), conçu et réalisé dans le cadre de l'ANR CILOMAG, en collaboration entre SPINTEC, IEF, LIRMM, CMP, LETI et Crocus Technology.



© LIRMM



Développements applicatifs de l'électronique de *spin*

Bernard Dieny (bernard.dieny@cea.fr), SPINTEC, UMR 8191 CEA/CNRS/UJF, INAC, CEA/Grenoble, 38054 Grenoble Cedex 9

L'électronique de *spin* connaît depuis une vingtaine d'années un essor considérable, car une grande synergie est très vite apparue entre recherche fondamentale et développements applicatifs dans plusieurs domaines.

Nous présentons ici une vue d'ensemble de ces applications actuelles et envisagées, dont certaines sont décrites plus en détail dans les articles de C. Fermon et M. Pannetier-Lecœur sur les capteurs magnétiques, et de J.P. Nozières sur les têtes de lecture et les mémoires magnétiques.

Dès la découverte de la magnétorésistance géante (GMR) en 1988, les industriels de l'enregistrement magnétique ont lancé des programmes de recherche très actifs pour voir s'il était possible d'utiliser ce nouveau phénomène dans les **têtes de lecture des disques durs d'ordinateur**. C'est ainsi que les vanes de *spin* ont été mises au point chez IBM en 1990 [1]. Les vanes de *spin* sont des multicouches GMR présentant une relativement forte variation de résistance (typiquement une dizaine de %) dans des champs magnétiques faibles (quelques mT, correspondant aux champs à relire à la surface des disques durs d'ordinateurs). Huit ans plus tard, les vanes de *spin* entraient dans les disques durs commerciaux. Avant les vanes de *spin*, les premières têtes de lecture magnétorésistives reposaient sur le phénomène d'anisotropie de la magnétorésistance, qui consiste en une variation de la résistivité électrique d'un matériau magnétique traversé par un courant en fonction de l'angle entre le courant et l'aimantation. Mais cet effet est seulement de l'ordre de 1 à 2%. Grâce à la sensibilité accrue des vanes de *spin* et, plus tard, des jonctions tunnel magnétiques, la capacité de stockage sur les disques durs d'ordinateurs a pu augmenter à un rythme soutenu de 60% par an depuis 1991 (voir l'article de J.P. Nozières, p. 34).

Ces vanes de *spin* et jonctions tunnel magnétiques constituent des **capteurs de champ magnétique** extrêmement sensibles, qui ont trouvé d'autres applications comme codeurs de position ou codeurs angulaires pour la robotique, les automatismes et l'automobile, comme capteurs de contraintes, comme réseaux de capteurs en biotechnologie pour la reconnaissance d'espèces biologiques, en magnéto-encéphalographie... Ces applications capteurs sont décrites plus en détail dans l'article de C. Fermon et M. Pannetier-Lecœur (p. 30).

Des **dispositifs mémoires non volatils** (c'est-à-dire conservant l'information, même lorsqu'on coupe leur alimentation électrique) ont également été conçus en utilisant les vanes de *spin*. Mais la faible résistance électrique de ces systèmes entièrement métalliques (typiquement dans la gamme de quelques centièmes d'ohms à quelques dizaines d'ohms suivant la géométrie) les rendait difficiles à utiliser en série avec des éléments de contrôle semi-conducteurs (typiquement des transistors de sélection dont la résistance en mode passant est d'au moins plusieurs k Ω).

De ce point de vue, la mise au point des jonctions tunnel magnétiques, présentant des effets importants de magnétorésistance à température ambiante, a ouvert de nouvelles perspectives d'applications très importantes dans divers composants intégrant technologies CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor technology) et magnétique : en premier lieu, dans le domaine des **mémoires magnétiques non volatiles** (MRAM pour Magnetic Random Access Memories). Dès 1996, soit quelques mois après les premières observations de magnétorésistance tunnel (TMR) importante à température ambiante, différentes industries (principalement Freescale et IBM au départ) et laboratoires académiques ont démarré des développements de puces mémoires, dans lesquelles chaque point mémoire est constitué d'une jonction tunnel magnétique. Un bit d'information est stocké en mettant la jonction tunnel soit dans la configuration magnétique parallèle (état de basse résistance représentant un « 0 » logique), soit dans la configuration magnétique antiparallèle (état de forte résistance représentant un « 1 » logique). Au départ, l'écriture était réalisée par des impulsions de champ magnétique générées par des impulsions de courant envoyées dans des lignes conductrices situées au-dessus et en dessous des points mémoire. Mais cette approche d'écriture s'est révélée consommatrice en

énergie et n'évoluant pas de façon favorable aux tailles décroissantes de dispositifs (erreurs d'adressage liées à la faible localisation spatiale du champ magnétique et densités de courant devenant excessives dans les lignes de génération de champ magnétique). Heureusement, la découverte des effets de transfert de *spin* et de la possibilité de faire commuter l'aimantation d'une des couches magnétiques de la jonction tunnel *directement* par le courant traversant la jonction a ouvert de nouveaux horizons, en offrant des perspectives d'évolution aux petites dimensions beaucoup plus favorables pour ces MRAMs. Comme la commutation par transfert de *spin* est déterminée par une densité de courant traversant la jonction, le courant nécessaire à l'écriture varie comme la section du point mémoire. C'est ce qui rend cette approche intéressante aux tailles décroissantes. À la relecture, l'information écrite sur le bit est relue en mesurant le niveau de résistance de la jonction tunnel. Les applications MRAM sont décrites plus en détail dans l'article de J.P. Nozières.

À côté de l'application mémoire, les jonctions tunnel magnétiques peuvent également être utilisées dans des **circuits logiques** pour traiter les informations, effectuer des calculs... Dans ces circuits, les jonctions tunnel sont interconnectées avec des transistors réalisés en technologie microélectronique (CMOS technology) et sont utilisées comme des résistances variables dont on peut modifier la valeur en changeant la configuration magnétique. Le changement de résis-

tance des jonctions tunnel permet de changer les seuils de commutation des transistors. On peut ainsi réaliser des portes logiques reprogrammables, c'est-à-dire dont la fonction change (par exemple une porte NOR devient une porte NAND) par simple modification de la configuration magnétique d'une jonction tunnel.

De nouvelles architectures, beaucoup plus performantes, de circuits électroniques complexes associant mémoire et logique peuvent également être envisagées **en combinant composants semi-conducteurs et magnétiques**. Ces nouvelles architectures tirent parti du fait que les composants magnétiques peuvent être déposés sur quasiment n'importe quel support, pourvu que ce support ne soit pas trop rugueux pour être compatible avec la croissance d'une barrière tunnel très fine. Dans les circuits semi-conducteurs « classiques », tous les composants semi-conducteurs utilisent les propriétés du silicium et sont donc réalisés au contact du substrat. En conséquence, les composants logiques et mémoires se trouvent côte à côte sur le silicium, reliés par des interconnexions peu nombreuses et souvent longues. Ceci pénalise la vitesse de communication entre logique et mémoire. C'est actuellement une limitation de la vitesse de fonctionnement dans les ordinateurs, que l'on essaye de résoudre partiellement par la multiplication des microprocesseurs. En combinant matériaux semi-conducteurs et magnétiques, on peut plus efficacement répartir de la mémoire magnétique au-dessus de circuits logiques semi-conducteurs, en faisant communiquer logique et mémoire par des conducteurs verticaux, nombreux et courts (fig. 1). La communication entre logique et mémoire est alors beaucoup plus rapide. Ceci est particulièrement intéressant pour les applications multimédia, dans lesquelles des opérations logiques relativement simples doivent être effectuées sur de grandes quantités de mémoires.

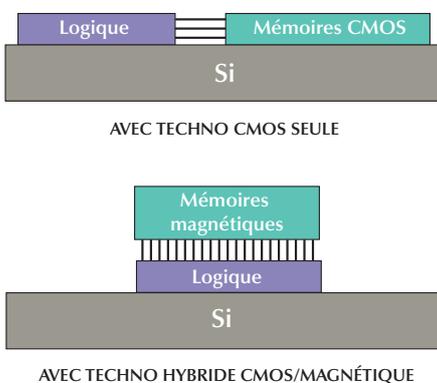
Par ailleurs, l'introduction de mémoires non volatiles dans les circuits logiques pourrait également permettre de réduire de façon notable la consommation électrique des circuits microélectroniques en diminuant significativement tous les courants de fuite, de plus en plus importants en technologie purement CMOS au fur et à mesure que la taille des composants décroît. Ces idées sont encore en cours de développement, mais pourraient avoir un impact très important en microélectronique dans les années à venir.

Un autre champ applicatif important de l'électronique de *spin* pourrait devenir celui des **composants radiofréquence** utilisant les excitations magnétiques entretenues générées par transfert de *spin* [2]. Ce type de dispositif, accordable en fréquence, est très intéressant pour les applications dans le domaine des télécommunications. Les oscillateurs existants de type VCO (Voltage Controlled Oscillators), basés sur des circuits LC, offrent typiquement des couvertures en fréquence de l'ordre de 200 MHz et occupent une grande surface sur le silicium, de l'ordre de 100 μm^2 par oscillateur. Par comparaison, les oscillateurs spintroniques décrits précédemment ont une agilité en fréquence bien supérieure (plusieurs GHz) et une taille bien moindre (sub-micronique). Actuellement, les efforts portent sur l'augmentation de la puissance émise par ces oscillateurs et la caractérisation de leur bruit de phase.

Des développements plus prospectifs concernent l'utilisation de **purs courants de *spin*** sans courants de charge. Par exemple, si dans un matériau semi-conducteur on crée à un certain point un excès d'électrons de *spin* « up » et à un autre point un excès d'électrons de *spin* « down », on va provoquer deux courants de diffusion d'électrons opposés qui vont se compenser du point de vue de la charge mais s'ajouter du point de vue des *spins*. Ces courants de *spin* devraient avoir une consommation électrique réduite.

Les composants spintroniques contrôlés en tension, en particulier ceux basés sur des **semi-conducteurs magnétiques**, suscitent beaucoup d'intérêt. Mais ici, la recherche porte surtout sur l'obtention de matériaux dont les températures d'ordre magnétique seraient bien supérieures à la température ambiante [3].

Les **matériaux multiferroïques** reçoivent également beaucoup d'attention. Ceux-ci permettent de coupler propriétés magnétiques, électriques et structurales. Ces couplages permettent de jouer sur différents paramètres (tension, contrainte, champ magnétique) pour agir sur les propriétés du matériau [3]. ■



1. Schéma qualitatif d'imbrication de la logique et de la mémoire dans des circuits tout semi-conducteurs (en haut) et hybrides semi-conducteurs/magnétiques (en bas).

Références

- 1 • B. Dieny *et al.*, *Phys. Rev. B* **43** (1991) 1297-1300.
- 2 • Voir la figure 3, p. 17.
- 3 • Voir l'article de A. Barthélémy, M. Bowen et J. Cibert dans ce dossier, pp. 20-25.

Électronique de *spin* et capteurs magnétiques

Claude Fermon (claude.fermon@cea.fr) et Myriam Pannetier-Lecœur
DSM/IRAMIS/SPEC, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

Les capteurs de champ magnétique ont de nombreuses applications : lecture de disques durs, contrôle de positionnement dans l'espace, codage de position et d'angle, mesure de courant électrique sans contact, imagerie magnétique, contrôle non destructif, imagerie médicale...

Parmi les différents types de capteurs magnétiques, ceux issus de l'électronique de *spin* offrent la possibilité d'une grande sensibilité sur une petite échelle spatiale. Utilisés systématiquement dans le domaine des têtes de lecture des disques durs (voir l'article de J.P. Nozières, p. 34), leur production en grande série pour d'autres applications vient de commencer.

Les capteurs magnétiques sont implantés dans un très grand nombre d'objets technologiques qui nous entourent. Par exemple, une voiture récente contiendra plus de trente capteurs magnétiques et vous en trouverez également dans un réfrigérateur, une machine à laver et même certaines chaussures de sport. Les capteurs magnétiques permettent en effet de détecter et mesurer un champ magnétique créé par un objet magnétique (aimant ou bobine) ou par un courant électrique (à travers son champ magnétique rayonné). Ils offrent donc de très nombreuses possibilités liées à la transmission d'information sans contact, à la détection à distance ou à la mesure d'un courant. Nous allons d'abord donner un aperçu des divers types de capteurs magnétiques, et voir comment ceux qui sont issus de l'électronique de *spin* se placent dans ce paysage ; puis nous allons illustrer leur intérêt à travers quelques exemples.

Les différents capteurs magnétiques

Il y a environ une quinzaine de types de capteurs magnétiques. Certains sont des capteurs de champ (c'est-à-dire des capteurs mesurant directement la valeur du champ magnétique selon un ou plusieurs axes), d'autres, des capteurs de flux (c'est-à-dire mesurant l'intégrale du champ passant à travers une surface). Le tableau p. 31 donne une liste des principaux types de capteurs utilisés.

Il est toujours difficile de comparer des capteurs magnétiques, dans la mesure où chacun possède des avantages particuliers. Par exemple, les capteurs à effet Hall ne sont pas très sensibles, mais présentent l'intérêt d'être absolus et linéaires sur une très grande plage de champ : ils sont donc incontournables dans les applications qui mesurent de fortes valeurs de champs. Un deuxième aspect déterminant est l'extension spatiale du champ magnétique à mesurer. Si elle est grande, comme pour l'imagerie terrestre, il faut utiliser des capteurs de

flux qui sont beaucoup plus sensibles que les capteurs de champ. Si, au contraire, l'extension spatiale devient petite, il faut utiliser des capteurs de champ. C'est pour cette raison que les capteurs à magnéto-résistance géante (GMR), issus de l'électronique de *spin*, se sont implantés dans les têtes de lecture à la place des bobines inductives : ils peuvent être miniaturisés à des tailles de quelques dizaines de microns et intégrés à des systèmes CMOS contenant une électronique de traitement de signal. Enfin, la fréquence du champ à détecter est aussi importante : à très haute fréquence, les capteurs inductifs (bobines) deviennent vraiment plus performants, car ils ont une sensibilité proportionnelle à la dérivée du flux en fonction du temps, et qui croît donc comme la fréquence.

Boussoles et mesure du champ terrestre

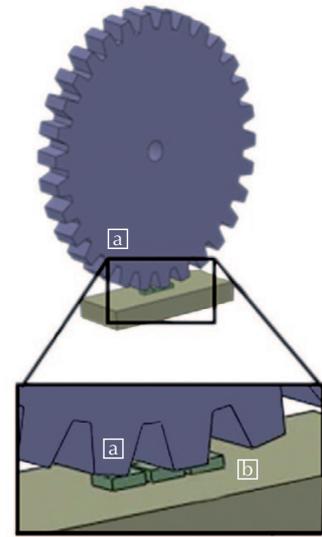
La boussole mécanique, inventée en Chine il y a 4500 ans, est le premier capteur magnétique utilisé par l'homme. Basée sur l'orientation d'une aiguille dans le champ magnétique terrestre, elle est de moins en moins utilisée de nos jours, surtout depuis la généralisation des systèmes GPS basés sur le positionnement par des références spatiales satellitaires. La boussole donne une mesure de la direction du champ magnétique et non de son intensité.

Les boussoles actuelles (électroniques) se trouvent associées à un GPS, ce qui permet d'orienter les cartes du GPS dans la bonne position dans le cas d'un système embarqué dans un véhicule, par exemple. Le contrôle du positionnement dans l'espace, en se servant du champ magnétique terrestre comme axe de référence, se développe aussi pour les applications de robotique, de jeux et d'enregistrement de mouvement (tel le stylo numérique). Une boussole électronique contient maintenant deux ou trois capteurs magnétiques axiaux (sensibles à une direction du champ) couplés à des mesures d'inclinaison et parfois à des

accéléromètres. Les principales technologies utilisées sont l'effet Hall, les microfluxgates et l'effet d'impédance magnétique géante (GMI) qui n'est pas un effet d'électronique de *spin*, mais qui utilise la très grande variation de l'absorption radiofréquence de certains matériaux magnétiques en fonction de leur configuration magnétique statique.

Capteurs de position et d'angle

Le principe du codage de position ou d'angle est d'avoir un cylindre ou une roue présentant des pôles magnétiques alternés dont le passage va être détecté par un capteur magnétique. Cela peut être réalisé avec des aimants inversés ou avec des roues magnétiques dentées (fig. 1).



1. Principe de codage angulaire. Une roue dentée (a) passe devant une barrette de capteurs (b). La position exacte de l'angle est obtenue par interpolation à partir du signal détecté sur les différents capteurs. La mesure est sans contact, et donc sans usure.

>>>

	Type	Fréquence (Hz)	Amplitude du champ (Tesla)	Sensibilité	Type de matériau	Détectivité ^(a)	Applications
Capteurs de champ	Capteurs à effet Hall	DC – 10 ⁵	10 ⁻⁵ – 1	B axial	Film mince	100 nT/√Hz	Contrôle de moteur, mesure de courant, capteurs de position, champs forts
	Magnétorésistance anisotrope (AMR)	DC – 10 ⁷	10 ⁻⁹ – 10 ⁻³	H axial	Film mince	1 nT/√Hz	Capteurs de courant, boussoles
	Magnétorésistance géante (GMR)	DC – 10 ⁸	10 ⁻⁹ – 10 ⁻³	H axial	Film mince	0,1 nT/√Hz ^(c)	Têtes de lecture, boussoles, capteurs de courant
	Magnétorésistance tunnel (TMR)	DC – 10 ⁸	10 ⁻⁹ – 10 ⁻³	H axial	Film mince	0,1 nT/√Hz ^(c)	Têtes de lecture
	Magnéto-impédance géante (GMI)	DC – 10 ⁴	10 ⁻⁹ – 10 ⁻³	H axial	Massif	1 nT/√Hz	Boussoles
	Magnéto-optique (MO)	DC – 10 ⁸	10 ⁻⁵ – 10 ²	M tri-axe	Discret	1 pT/√Hz	Imagerie
	Résonance Magnétique Nucléaire (RMN)	DC – 10 ²	10 ⁻¹⁰ – 10	H scalaire	Massif	1 nT/√Hz	Référence de champ, IRM
Capteurs de flux	Bobines à air	10 ⁻³ – 10 ⁹	10 ⁻¹⁰ – 10 ²	dΦ/dt axial	Massif	1 pT/√Hz ^(b)	Antennes, IRM haut champ, courants AC
	Fluxgates	DC – 10 ³	10 ⁻¹⁰ – 10 ⁻³	H axial	Massif	10 pT/√Hz	Magnétométrie terrestre
	SQUID (Bas Tc)	DC – 10 ⁹	10 ⁻¹⁵ – 10 ⁻²	Φ axial	Film mince	2 fT/√Hz	MEG, IRM très bas champ
	SQUID (Haut Tc)	DC – 10 ⁴	10 ⁻¹⁵ – 10 ⁻²	Φ axial	Film mince	30 fT/√Hz	Imagerie
	Capteurs mixtes	DC – 10 ⁹	10 ⁻¹⁵ – 10 ⁻⁶	Φ axial	Film mince	< 3 fT/√Hz ^(c)	MCG, MEG, IRM très bas champ
	Magnétomètres atomiques	DC – 10 ²	10 ⁻¹⁵ – 10 ⁻⁹	~ Φ	Massif	3 fT/√Hz	MCG, MEG, IRM très bas champ

Vue d'ensemble des différents types de capteurs magnétiques, leur détectivité et quelques applications clés.

(a) La détectivité est définie comme le niveau de champ magnétique pour lequel le rapport signal sur bruit est égal à 1, pour une bande de fréquence de mesure de 1 Hz. Le bruit est donné à 1 KHz et, dans le cas de capteurs de flux, pour une surface de 1 cm². Les valeurs données correspondent à ce qu'il est possible de réaliser de façon reproductible. 1 nT = 10⁻⁹ T ; 1 pT = 10⁻¹² T ; 1 fT = 10⁻¹⁵ T. Le facteur 1/√Hz dans la détectivité vient de ce que la puissance de bruit thermique (bruit blanc) est proportionnelle à la bande de fréquence de mesure ; le bruit lui-même et le champ de détection équivalent au bruit augmentent donc comme la racine carrée de cette largeur de bande.

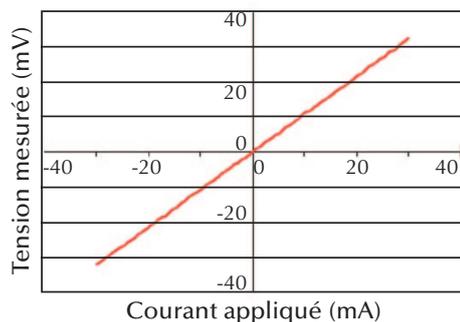
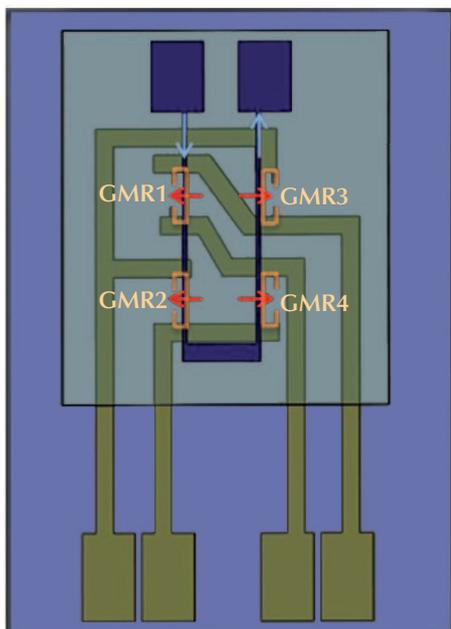
(b) La détectivité d'une bobine à air croît avec la fréquence : à 1 MHz sa détectivité devient meilleure que 1 fT/√Hz.

(c) Les GMRs, les TMRs et les capteurs mixtes présentent un bruit en 1/f à basse fréquence, qui limite leurs performances.

Fluxgate : magnétomètre constitué d'un cœur magnétique doux entouré d'une bobine excitatrice, qui permet de décrire un cycle d'hystérésis. La présence d'un champ magnétique extérieur déplace le cycle et est ainsi détectée. - **IRM** : Imagerie par résonance magnétique - **MCG** : Magnéto-cardiographie - **MEG** : Magnéto-encéphalographie - **SQUID** : Superconducting Quantum Interference Device - **Tc** : température critique - **TMR** : Magnétorésistance à effet tunnel.

Références

- 1 • www.NVE.com ; www.asi-sensor.com ; www.infineon.com ; www.sensitec.com .
- 2 • F. Hankard *et al.*, "Magnetic field microscopy of rock samples using a giant magnetoresistance-based scanning magnetometer", *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **10** (2009) Q10Y06.
- 3 • M. Pannetier, C. Fermon, G. Le Goff, J. Simola, E. Kerr, "Femtotesla magnetic field measurement with magnetoresistive sensors", *Science*, **304** (2004) 1648-1650.
M. Pannetier, C. Fermon, "Device for sensing RF fields", PCT/EP 0301517 (01/2003).
M. Pannetier, C. Fermon, J. Simola, "Device for sensing a magnetic field", PCT/EP 0301518 (01/2003).



2. Schéma d'un capteur de courant en pont pour la mesure de faibles courants (en haut) et réponse d'un tel élément (en bas). Sur la figure du haut, la ligne où passe le courant (en bleu foncé) est superposée à un pont de capteurs GMR (GMR 1, 2, 3, 4, représentées en orange). Lorsque le courant (flèches bleu clair) traverse la ligne, le champ magnétique local (flèches rouges) modifie la réponse en tension des quatre GMRs, avec un effet inverse sur les GMRs de gauche et celles de droite.

>>>

Lors du mouvement, le passage à zéro (renversement de la composante du champ magnétique suivant une direction donnée) permet de localiser la position physique du cran. Une roue, contenant par exemple 180 crans, permet d'obtenir avec un seul capteur magnétique une résolution de 2°. En utilisant plusieurs capteurs, il est possible d'augmenter fortement la résolution par interpolation.

La magnétorésistance géante permet d'avoir une sensibilité en champ faible meilleure d'au moins un ordre de grandeur que celle des capteurs à effet Hall. Pour cette raison, la détection d'un passage en champ nul peut être particulièrement précise avec des capteurs de type GMR. Il existe un certain nombre de produits commerciaux [1] présentant des résolutions angulaires pouvant atteindre 0,001° avec une barrette de 5 capteurs.

Les codeurs linéaires fonctionnent sur le même principe : une barrette magnétique est alternativement aimantée et un réseau de capteurs fixé à l'élément mobile compte le passage des alternances. Un positionnement de 1 µm est possible avec cette technologie.

Les applications principales sont dans l'automobile et dans l'équipement pour la mesure de vitesse, la mesure de l'angle de rotation de moteurs ou d'éléments tournants, et le positionnement.

Capteurs de courant

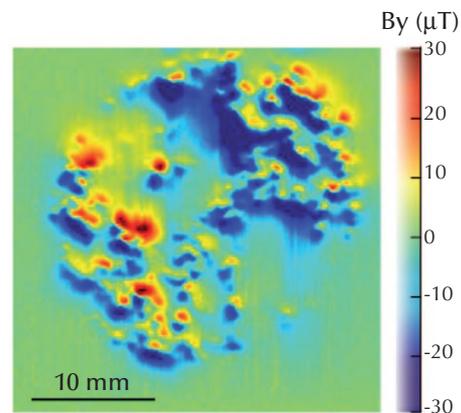
Une autre application essentielle des capteurs magnétiques est la mesure de courants sans contact. Un courant circulant dans un conducteur produit un champ magnétique orthoradial, le champ d'Oersted, qui peut être détecté sans contact, assurant ainsi

une isolation galvanique entre la mesure et le circuit. Ce principe est utilisé dans des compteurs électriques ou dans des systèmes industriels nécessitant une isolation galvanique. Pour donner un ordre de grandeur, un courant de 1 ampère à 1 mm de distance crée un champ de $6 \cdot 10^{-4}$ Tesla, c'est-à-dire 20 fois le champ terrestre.

Par exemple, la mesure de la consommation électrique des domiciles est réalisée par des capteurs de courant sans contacts. Dans ce cas, les courants à mesurer sont forts et la linéarité est très importante. Pour cette raison, on utilise des capteurs à effet Hall relativement optimisés.

La technologie de couches minces utilisée pour la fabrication d'éléments GMR permet d'intégrer un grand nombre de capteurs sur une petite surface de composants. Il est ainsi possible de développer des capteurs intégrés à base de magnétorésistance géante permettant de mesurer un courant faible sans contact, avec une isolation galvanique importante.

À titre d'exemple, nous développons dans notre laboratoire un capteur de courant à huit voies contenant chacune quatre GMRs montées en pont. On est ainsi insensible aux dérives de température ou de champ extérieur. La figure 2 montre le schéma d'un pont et un exemple de réponse. Lorsqu'un courant circule dans la ligne placée au-dessus des GMRs, un champ magnétique planaire est créé au niveau de ces dernières, proportionnellement au courant. La forme en U de la ligne permet d'avoir deux GMRs montées en réaction inverse et donc de réaliser un pont complet avec un maximum de sensibilité. La difficulté de ces montages est d'avoir une



3. Cartographie du champ magnétique généré par une roche (norite) de Norvège (d'après [2]). (a) Photographie, montrant des zones sombres (pyroxène et magnétite) et claires (feldspath). (b) Cartographie magnétique de la surface photographiée, présentant la composante horizontale B_y de l'aimantation rémanente naturelle. Le code couleur donne l'aimantation locale en valeurs positives et négatives de B_y . On notera le bon accord entre les deux images : la zone non magnétique en bas à droite de (b) correspond à une zone claire de (a).

isolation galvanique suffisante entre lignes de courant et capteurs ; ainsi, 1500 V sont requis pour les applications automobiles.

Imagerie magnétique et contrôle non destructif

L'imagerie magnétique se fait actuellement à toutes les tailles. Grâce à des "fluxgates" ou des SQUIDs, des imageries terrestres ou spatiales sont réalisées. À l'autre extrême, le microscope à force magnétique permet d'imager le magnétisme aux échelles nanométriques. Grâce à leur sensibilité et à leur taille, les capteurs à base de GMR peuvent être exploités pour la cartographie de champ magnétique sur des surfaces avec des résolutions spatiales de quelques microns.

Pour des champs magnétiques statiques, un déplacement du capteur à proximité de la surface à étudier donnera des informations sur des variations de champ, avec une résolution sur celui-ci de l'ordre de 10 nT et une résolution spatiale de quelques microns. Ce type de dispositif est développé pour l'étude du magnétisme de petits objets texturés, comme des micrométéorites. La figure 3 montre une image d'une surface de roche contenant de petites inclusions magnétiques.

L'imagerie de défauts par courants de Foucault est aussi largement développée pour le contrôle non destructif (CND). Une boucle d'excitation radiofréquence crée des courants de Foucault dans l'objet métallique à étudier, et une image du champ magnétique rayonné à cette fréquence permet de remonter aux lignes de courant circulant dans l'objet. La présence d'un défaut (fissure, trou) se traduit par une déformation des lignes de courant. De petites bobines ont longtemps

été utilisées pour cette cartographie, et les capteurs GMRs ont permis d'augmenter nettement la résolution spatiale et la sensibilité à de petits défauts.

Capteurs de champ ultrasensibles

Une application originale de la magnétorésistance est la mise au point de capteurs, appelés capteurs mixtes [3], permettant d'atteindre un niveau de sensibilité de l'ordre du fT/\sqrt{Hz} ($10^{-15}T/\sqrt{Hz}$), comparable aux meilleurs capteurs magnétiques existants, les SQUIDs. Ces capteurs mixtes sont basés sur l'association d'une boucle supraconductrice, agissant comme un transformateur flux-champ, et de capteurs GMRs qui permettent de mesurer un champ local amplifié. La figure 4 montre une vue de ce type de capteur, avec deux GMRs montées en demi-pont.

Dans la boucle supraconductrice (en rouge), un champ faible sur une large surface est transformé en un champ intense sur une toute petite surface. Les capteurs magnétorésistifs étant des capteurs de champ, leur sensibilité est indépendante de leur taille. Dans le cas d'une boucle supraconductrice à haute température critique, des gains de l'ordre de 1000 sont obtenus. En associant cette boucle avec des capteurs GMRs qui sont aussi à basse température, nous arrivons à des détectivités de $1 fT/\sqrt{Hz}$ à 4 K et $5 fT/\sqrt{Hz}$ à 77 K au-delà de 10 kHz. À basse fréquence, un bruit de résistance en $1/f$ apparaît dans les capteurs GMR en raison de leur petite taille, qui limite la sensibilité à environ $100 fT/\sqrt{Hz}$ à 1 Hz.

L'application principale de ces capteurs mixtes est la magnéto-encéphalographie

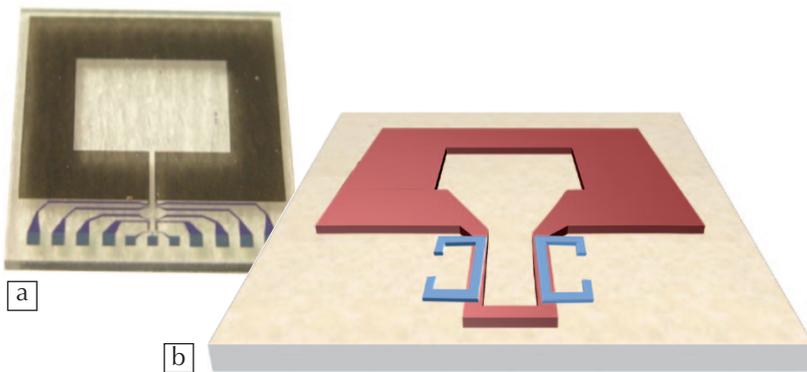
(MEG), qui permet de remonter à l'imagerie des courants neuronaux circulant dans le cerveau à travers le champ rayonné par ces courants.

La figure 5 montre un signal de magnétocardiographie (signal magnétique cardiaque) enregistré à l'aide d'un capteur mixte à 77 K.

Les futurs développements de ces systèmes seront d'une part l'utilisation de capteurs de type TMR qui permettront un gain de sensibilité, et d'autre part l'emploi de techniques de modulation du courant supraconducteur pour éliminer la contribution du bruit basse fréquence des GMRs.

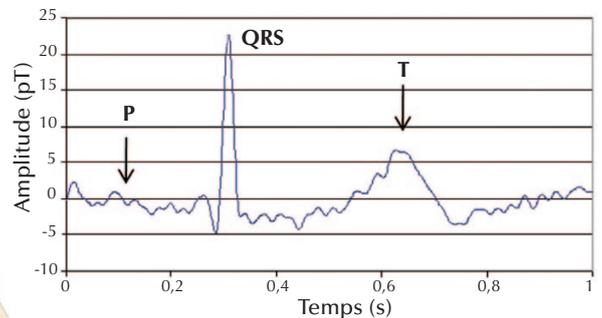
Conclusion

Les capteurs magnétiques sont donc un domaine où l'électronique de *spin* a permis d'apporter une nouvelle richesse, en amenant la possibilité d'une grande sensibilité sur une petite échelle spatiale. Si on exclut le domaine des têtes de lectures où maintenant seules des magnétorésistances géantes ou tunnel sont utilisées (voir l'article de J.P. Nozières, p. 34), la production en grande série de capteurs GMR vient seulement de commencer. Le paramètre clef est l'intégration totale des éléments sensibles dans le procédé de fabrication CMOS. Maintenant, la plupart des entreprises dominant le marché se sont lancées dans ce développement, et il est probable que dans 4 à 5 ans les capteurs magnétiques basés sur l'électronique de *spin* auront une place prépondérante dans cet ensemble, qui représente plus de 4 milliards d'unités par an. ■



4. Capteur mixte.

- (a) Photographie d'un capteur mixte.
 (b) Schéma d'un capteur mixte contenant une boucle supraconductrice d'YBCO (en rouge) et un demi-pont de deux magnétorésistances géantes (en bleu). Les contacts ne sont pas représentés.



5. Signal de magnétocardiographie mesuré à l'aide d'un capteur mixte à 77 K. On distingue les ondes P et T, ainsi que le complexe QRS, qui correspondent respectivement à la contraction des oreillettes, à la relaxation des ventricules et à la contraction des ventricules. Ces pics sont aussi détectés sur des électrocardiogrammes. Dans le cas de la magnétocardiographie, la technique est sans contact et ne nécessite pas la pose d'électrodes. Elle permet aussi de faire de l'imagerie du signal cardiaque, en utilisant un réseau de capteurs.

Têtes de lecture et mémoires magnétiques

Jean-Pierre Nozières (jpnnozieres@crocus-technology.com)

Crocus Technology, 5 place Robert Schuman, 38025 Grenoble Cedex

Adresse actuelle : SPINTEC, CEA/Grenoble, 38054 Grenoble Cedex 9

Cet article présente deux applications de l'électronique de *spin* qui ont ou vont révolutionner notre quotidien.

Les têtes de lecture pour disques durs, qui équipent maintenant tous les ordinateurs. C'est le composant clef qui a permis l'accroissement spectaculaire au cours des dix dernières années de la capacité de stockage informatique, à l'origine de la révolution numérique.

Les mémoires magnétiques à accès aléatoire (MRAM), qui pourraient permettre d'intégrer sur une même puce les fonctions logiques et une mémoire combinant vitesse, endurance et non-volatilité. Des efforts importants doivent cependant encore être menés pour résoudre les problèmes techniques auxquels se heurte toute nouvelle technologie avant de pouvoir être industrialisée en volume.

L'utilisation de phénomènes physiques nouveaux dans des dispositifs commerciaux est souvent longue à mettre en œuvre, en raison de l'inadéquation entre les performances « théoriques » revendiquées par les chercheurs, estimées dans des conditions idéales de fonctionnement, et les besoins « réels » des entreprises qui impliquent souvent des compromis liés aux conditions de fonctionnement et aux contraintes économiques. L'électronique de *spin*, c'est-à-dire la convergence du nanomagnétisme et de l'électronique silicium, a démontré au cours des vingt dernières années qu'avec un peu de chance et beaucoup d'efforts, le transfert pouvait être très rapide.

Les débuts : les têtes de lecture pour disques durs

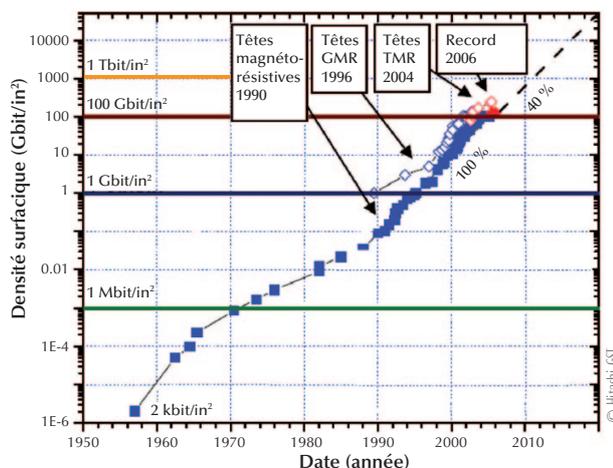
Historique

Depuis l'émergence des premiers disques durs au milieu des années 50, la technologie de lecture/écriture des données était restée immuable, basée sur le principe de

l'électro-aimant : un courant dans une bobine génère un champ magnétique (pour écrire), le champ magnétique rayonné par les domaines magnétiques écrits dans le support magnétique génère, dans une bobine, un courant induit (pour lire). Seule la technologie de fabrication de ces têtes de lecture dites « inductives » a évolué au cours du temps, passant d'électro-aimants patiemment bobinés à la main sur des noyaux macroscopiques de ferrite, aux têtes intégrées réalisées de manière massivement parallèle en technologie microélectronique.

Avec l'explosion du numérique et les besoins croissants en capacité de stockage, les têtes inductives ont rapidement atteint leurs limites : en effet, lorsque les dimensions des « bits » individuels deviennent trop petites, la quantité de flux magnétique issu du support d'enregistrement est trop faible pour pouvoir être captée efficacement par la bobine.

La découverte de la magnétorésistance géante en 1988, rapidement suivie de la mise au point des « vanes de *spin* » (voir p. 14), version utilisable à tempéra-

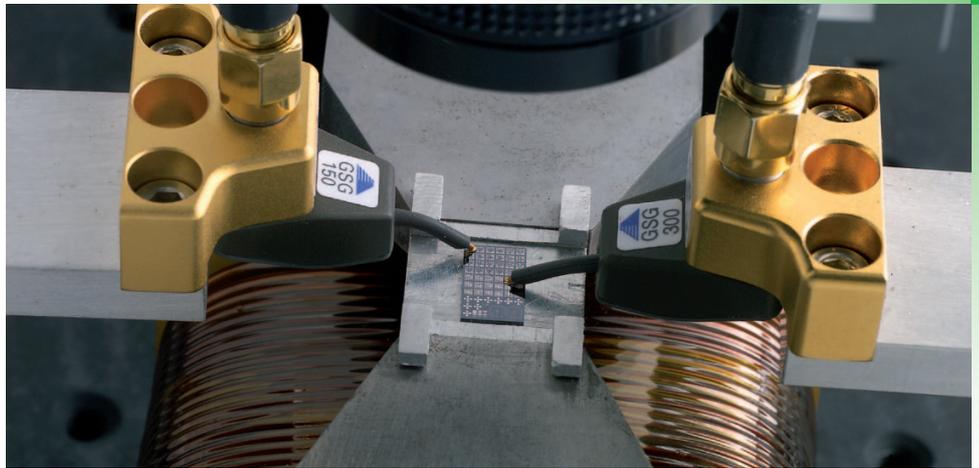


1. Évolution de la densité de stockage des disques durs avec le temps, mettant en évidence les ruptures technologiques.

◇, ◇ : démonstrations de laboratoire - ■, ■ : produits commerciaux.

En bleu : technologie traditionnelle « longitudinale », où l'aimantation des domaines magnétiques d'enregistrement des données est parallèle au plan du disque (fig. 2b). En rouge : technologie PMR, commercialisée en 2006, où l'aimantation des domaines est perpendiculaire au plan du disque, ce qui permet d'augmenter la densité de stockage.

Banc de mesure, au centre CEA de Grenoble, pour la caractérisation de la variation de résistance électrique de composants spintroniques soumis à des pulses de courant de durée entre 70 ps et 100 ns sous champ magnétique.



ture ambiante et présentant une réponse linéaire en champ faible, a complètement redistribué les cartes. La GMR promettait en effet simultanément un gain immédiat en performances (sensibilité à la lecture et fréquence d'opération très supérieures aux meilleures têtes inductives), une miniaturisation possible jusqu'aux dimensions nanométriques (l'effet de magnétorésistance géante étant *a priori* indépendant de la taille du capteur) et une intégration facilitée par l'accord d'impédance avec les préamplificateurs des circuits de lecture existants.

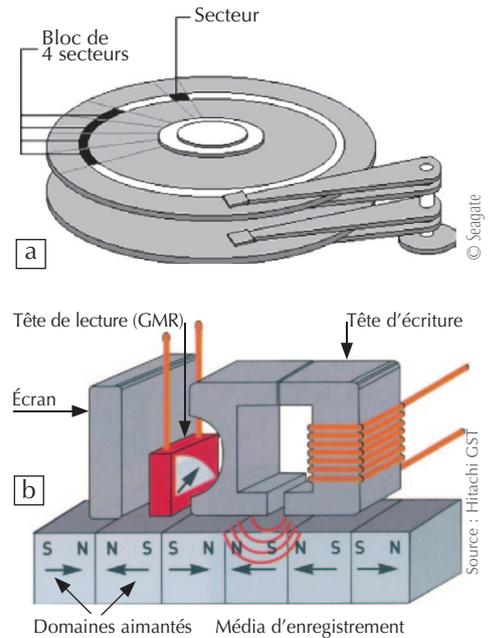
Moins de dix ans après la découverte de l'effet physique dans un laboratoire de recherche fondamentale, les premiers produits commerciaux étaient vendus au grand public et, en quelques années seulement, 100% des disques durs étaient équipés de têtes de lecture GMR, soit un marché annuel de ~ 5 milliards de \$. Aujourd'hui, la technologie GMR est progressivement remplacée par la technologie TMR à base de jonctions tunnel (voir p. 16), qui présente une magnétorésistance plus élevée et donc *in fine* une sensibilité supérieure (fig. 1).

Ce virage technologique a eu une conséquence économique indirecte. Bien que la technologie de fabrication et le mode opératoire au niveau système soient sensiblement identiques, la physique sous-jacente et donc les problèmes à résoudre sont fondamentalement différents de ceux rencontrés dans les têtes inductives. En conséquence, seules les premières entreprises ayant réussi le virage technologique de la GMR ont réussi à capturer le marché ; d'où une consolidation spectaculaire du secteur avec, à ce jour, seulement quatre fabricants de têtes de lecture de par le monde – aucun en Europe – dont trois sont verticalement intégrés, fabricant le disque dur complet (Seagate, Hitachi, WD) et un seul encore indépendant (TDK/Headway).

Fonctionnement d'une tête de lecture/écriture magnétorésistive

Une tête GMR est formée d'une tête d'écriture et d'une tête de lecture indépendantes dans leur fonctionnement, mais accolées l'une à l'autre et fabriquées simultanément sur le même substrat qui forme le patin de vol. L'ensemble est monté sur un bras connecté au système de positionnement (fig. 2a). En fonctionnement, le disque tourne à environ 10 000 tours/min, ce qui fait voler la tête par effet aérodynamique à ~ 10 nm de la surface du disque (dont la rugosité est de l'ordre du nm) pendant que les bits de données, dont les dimensions actuelles sont de l'ordre de $25 \times 100 \text{ nm}^2$, sont écrits et lus à des fréquences proches du GHz. L'analogie frappante de cet ensemble est qu'en redimensionnant le tout à des dimensions macroscopiques, le système dimension-vitesse est équivalent à un Boeing 747 volant à 1 mètre du sol !!

La tête d'écriture est toujours une tête inductive, c'est-à-dire un électro-aimant, même si sa géométrie est très différente de son ancêtre bobinée. La tête de lecture, pour sa part, intègre soit un élément GMR, soit un élément TMR, placé perpendiculairement à la surface du disque de façon à capter le flux magnétique émis par les bits de données (fig. 2b). L'élément magnétorésistif est placé entre deux écrans magnétiques (blindages) permettant d'écranter le flux issu des bits adjacents dans la direction longitudinale (le long des pistes de données). La résolution transverse (de piste à piste) est simplement définie par la largeur de l'élément magnétorésistif, d'où la nécessité de séparer les pistes par une bande sans données ("guard-band"). L'élément magnétorésistif est un petit cube, dont la structure en domaines doit être stabilisée à ses extrémités pour éviter le bruit de Barkhausen (mouvements brutaux de l'aimantation autour de



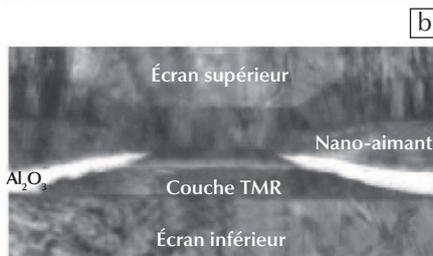
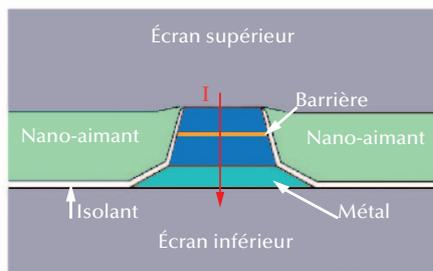
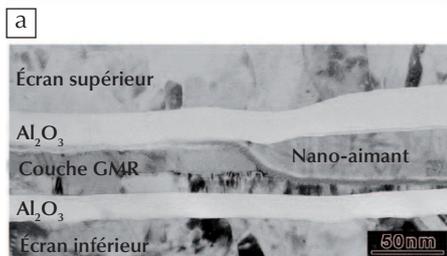
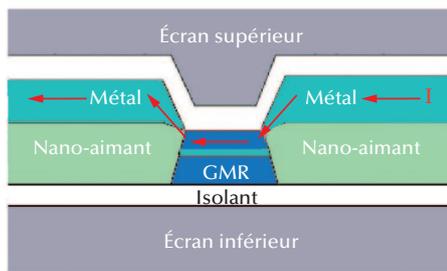
2. Schémas de principe d'un disque dur (a) et d'une tête de lecture/écriture magnétorésistive (b).

pièges que sont les défauts de surface). La stabilisation est effectuée par couplage magnétostatique avec des nano-aimants ("hard bias") adjacents, mais isolés électriquement de l'élément actif.

Dans sa version GMR, le courant de lecture passe dans le plan du capteur (fig. 3a). Des contacts sont pris sur les côtés de l'élément qui doit être isolé électriquement des blindages, d'où des difficultés de fabrication lorsque la densité longitudinale de bits de données est importante, puisque l'espacement entre le blindage et l'élément GMR devient très faible et que des risques de claquage électrique de l'oxyde d'isolation apparaissent. La GMR maximale « théorique » est de l'ordre de $\Delta R/R = 20\%$, sachant que la partie « réelle » utilisable, dans laquelle la réponse est linéaire en champ, est d'environ un tiers de cette valeur.

Dans sa version TMR, le courant de lecture circule perpendiculairement au plan du capteur, ce qui permet d'utiliser les blindages comme amenées de courant





3. Schéma et photo d'une tête GMR (a) et d'une tête TMR (b). Le courant de lecture (I) est indiqué par des flèches rouges.

>>> (fig. 3b). Bien que la TMR maximale reportée à ce jour en laboratoire soit de $\sim 1000\%$, la valeur pratique est limitée à $\Delta R/R = 100\text{--}200\%$, ce qui est déjà un ordre de grandeur supérieur à la GMR. Ainsi, il est possible aujourd'hui d'atteindre des densités surfaciques de données $> 200 \text{ Gbit/in}^2$, soit un accroissement de trois ordres de grandeur depuis l'introduction de la GMR il y a 10 ans (fig. 1).

On estime la limite théorique de la technologie actuelle des disques durs aux environs du Tbit/in^2 , à la suite de quoi un changement de paradigme sera nécessaire. Mais le même argument ayant été avancé dans le passé pour des densités de 1, 10 et 100 Gbit/in^2 , il est possible que la technologie évolue par petites touches, comme c'est le cas, par exemple, pour les mémoires semi-conductrices, dont on annonce régulièrement la mort aux nœuds technologiques « plus » avancés !

Les mémoires magnétiques à accès aléatoire (MRAM)

Les mémoires RAM actuelles

Aujourd'hui, la mémoire est partout, avec des capacités allant de quelques kbits dans les appareils électroménagers ou les cartes à puces, aux multi-Gbits dans les baladeurs, les téléphones et les appareils photos. Contrairement aux disques durs qui servent à stocker (archiver) les données et dans lesquels l'accès à celles-ci est séquentiel le long de pistes écrites à la surface du média, les mémoires RAM (Random Access Memories) offrent un accès aléatoire à

des bits de données individuels disposés au sein d'un réseau bidimensionnel à l'état solide, c'est-à-dire sans pièces mobiles.

Trois technologies de mémoires RAM semi-conductrices se partagent actuellement le marché, en fonction des principaux paramètres fonctionnels que sont :

- la vitesse d'écriture/lecture ;
- l'endurance, c'est-à-dire le nombre de cycles de lecture/écriture possibles ;
- le caractère volatil ou non volatil, c'est-à-dire la capacité à conserver l'information en l'absence d'alimentation électrique ;
- la capacité, exprimée en valeur absolue (kbits, Mbits, Gbits, ...), pour l'utilisateur, ou la densité, exprimée en taille de la cellule mémoire élémentaire, pour le concepteur. Cette dernière est souvent normalisée par le carré de la dimension F du nœud technologique de microfabrication utilisé pour sa réalisation (la dimension la plus petite qu'il est possible de fabriquer) ; ceci permet de pouvoir comparer les différentes technologies entre elles indépendamment des contraintes de fabrication. Ainsi, au lieu d'indiquer une dimension de cellule de $90 \times 90 \text{ nm}^2$, on dira qu'elle fait 1F^2 en technologie 90 nm, 4F^2 en technologie 45 nm, etc ;
- la puissance consommée par cycle de lecture/écriture et en mode "standby" ;
- le coût de fabrication.

Ainsi, chaque type de mémoire s'est spécialisé, en fonction de ses performances et de ses attributs, à certaines applications spécifiques :

- les SRAM, formées dans leur configuration la plus simple de 4 à 6 transistors CMOS montés en bascule, c'est-à-dire

présentant deux états stables, sont très rapides ($\sim 1 \text{ ns}$) et infiniment durantes ($> 10^{16}$ cycles), mais volatiles, peu denses ($\sim 100\text{F}^2$) et chères. Ce sont donc les mémoires de choix pour les premiers niveaux de cache (de faible capacité) s'interfaçant directement avec les microprocesseurs ;

- les DRAM, dans lesquelles l'information est stockée sous la forme d'une charge électrique dans une capacité, sont relativement rapides ($\sim 10 \text{ ns}$), denses ($\sim 6\text{F}^2$), durantes ($> 10^{16}$ cycles) et de coût raisonnable, mais volatiles. Elles sont donc parfaitement adaptées pour le stockage de données temporaires, dans un ordinateur en aval d'une SRAM et en amont du disque dur. Ce sont aujourd'hui les mémoires les plus répandues, qui représentent $\sim 50\%$ du marché total en volume ;
- les mémoires Flash, dans lesquelles des charges sont stockées dans une grille flottante localisée au dessus du canal d'un transistor CMOS, sont intrinsèquement non volatiles et de capacité très élevée ($< 3\text{F}^2$), mais très lentes ($\sim 100 \mu\text{s}$) et d'endurance limitée ($\sim 10^5$ cycles en raison du vieillissement de l'oxyde de grille). Elles sont principalement utilisées pour le stockage de code ou de données.

Le marché des mémoires est un marché énorme (~ 50 milliards \$ / an), dominé par des grosses entreprises comme Samsung et Hynix (Corée), Micron (USA), Toshiba (Japon)..., parmi lesquelles figurent les européens Infineon (Allemagne) et Numonyx, la *joint venture* récemment créée entre STMicroelectronics et Intel. Mais, contrairement au marché fortement consolidé des disques durs, une multitude d'entreprises coexistent, de la *start-up* au grand groupe industriel, chacune avec ses spécificités en termes de technologie, d'applications ou de marché (fig. 4).

Les potentialités des mémoires magnétiques

L'utilisation de cellules magnétiques pour la réalisation de mémoires RAM est une idée ancienne, chaque décennie ayant vu surgir un nouveau concept : les mémoires à base de ferrite dès les années 60, puis les mémoires à bulles dans les années 80, enfin les mémoires AMR et GMR encore commercialisées par Honeywell, historiquement d'ailleurs les premières MRAM telles qu'on les entend aujourd'hui. Cependant, jusqu'à présent, aucune de ces technologies n'a réussi à percer, en raison de limites physiques de la technologie, de

la lenteur du développement et surtout de l'essor parallèle spectaculaire des mémoires semi-conductrices.

Le renouveau d'intérêt pour les MRAM provient de la convergence de deux facteurs, l'un technique, l'autre économique :

- intrinsèquement non volatile et infiniment endurante par la nature même du magnétisme, potentiellement rapide (~ 10 ns, le temps caractéristique pour faire basculer une aimantation) et miniaturisable jusqu'à des dimensions fortement sub-microniques, la technologie MRAM utilisant des jonctions tunnel magnétiques associe les caractéristiques principales de la SRAM et de la DRAM (vitesse, endurance) avec la non-volatilité de la Flash.
- À cela se rajoutent des propriétés, telles que l'insensibilité aux rayonnements ionisants, cruciale pour les applications spatiales et militaires, le pilotage par des tensions faibles (contrairement à la Flash) et la miniaturisation théoriquement possible jusqu'aux nœuds technologiques avancés, difficile avec les technologies actuelles ;
- l'explosion des besoins, dans des applications de plus en plus spécifiques nécessitant des caractéristiques « à façon », est actuellement satisfaite par l'association de plusieurs types de circuits logiques et de mémoires, assemblés en composants discrets dans un boîtier unique ou sur une puce unique. Dans ces systèmes complexes et coûteux, une MRAM pourrait ainsi remplacer plusieurs mémoires (généralement SRAM et Flash pour combiner vitesse et non-volatilité), diminuant par là même le coût des puces, voire créant des fonctionnalités nouvelles tirant bénéfice de ses caractéristiques uniques.

Les trois générations de MRAM

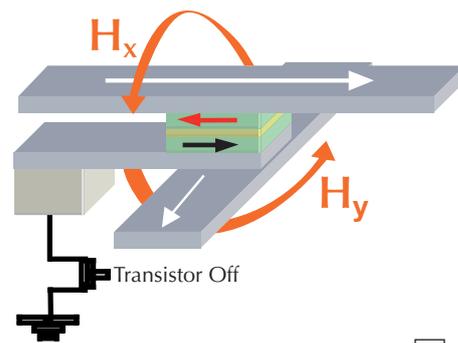
Dans sa version actuelle, la cellule élémentaire d'une MRAM est une jonction TMR, couplée à un transistor de sélection permettant l'adressage aléatoire d'une cellule unique. Les cellules sont assemblées en blocs comprenant un grand nombre de cellules (par exemple 256 K), entourés d'une électronique périphérique. La mémoire est complétée par les blocs d'alimentation et les plots de connexion avec le monde extérieur.

1 - Dans la première génération de MRAM, l'écriture utilise le champ magnétique généré par des matrices de lignes de courant placées à proximité des cellules magnétiques TMR. Afin de sélectionner une seule cellule, on utilise deux conducteurs croisés, l'un au-dessus, l'autre au-dessous de la cellule (fig. 5a). En tirant parti de la dépendance angulaire du champ de renversement de l'aimantation dans une nanostructure magnétique, seule la cellule se trouvant à l'intersection des deux lignes peut commuter.

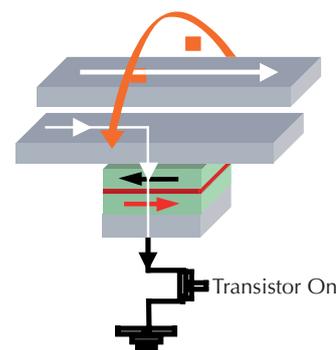
Cette technique souffre malheureusement de problèmes intrinsèques :

- courant d'écriture élevé, empirant avec la miniaturisation ;
- erreurs d'écriture, c'est-à-dire commutation de cellules non sélectionnées et/ou absence de commutation de cellules sélectionnées ;
- perte aléatoire et/ou irréversible de données, associée à une stabilité thermique (rétention dans le temps) insuffisante de l'aimantation.

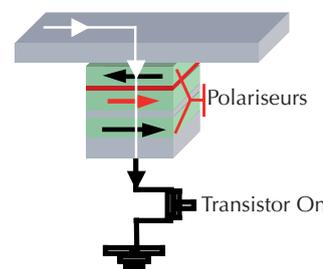
Seul Everspin (ex-Freescale) continue dans cette voie, en proposant une technologie améliorée.



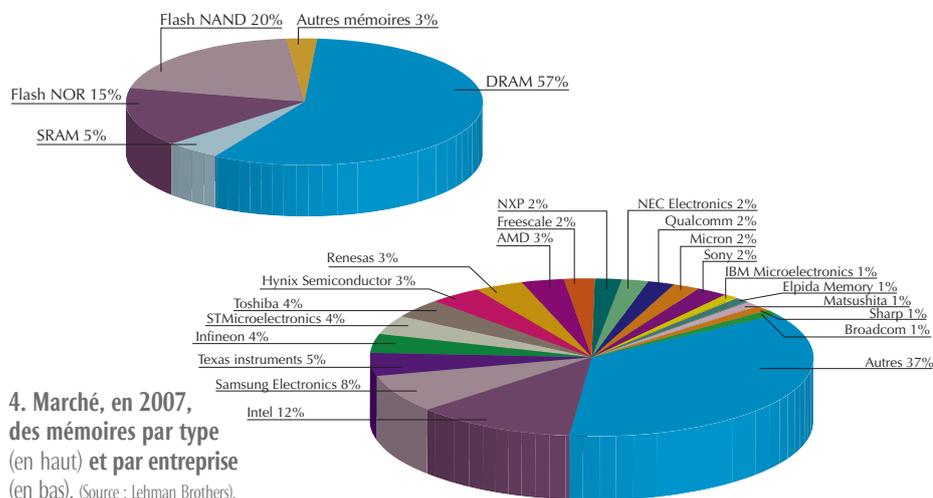
MRAM de première génération



MRAM - TAS



MRAM - STT



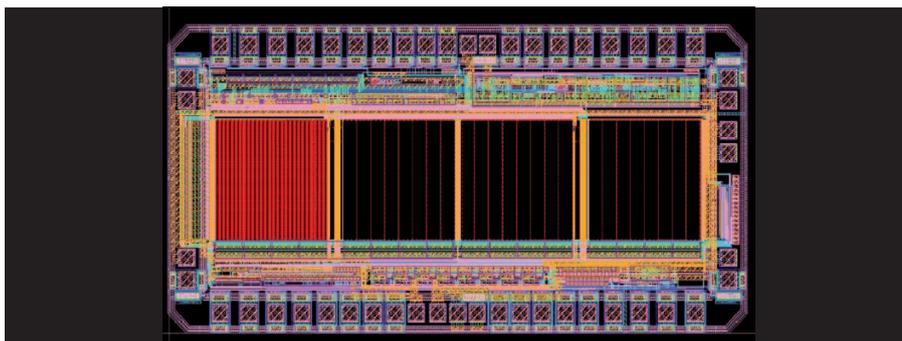
4. Marché, en 2007, des mémoires par type (en haut) et par entreprise (en bas). (Source : Lehman Brothers).

5. Principe de fonctionnement des trois générations de cellules MRAM.

(a) Les MRAM de première génération. L'écriture est assurée par l'envoi simultané de deux impulsions de courant (flèches blanches) dans deux lignes conductrices perpendiculaires, qui se croisent au niveau du point à adresser ; les champs magnétiques créés (H_x et H_y , flèches oranges) vont renverser l'aimantation d'une couche magnétique.

(b) Les MRAM-TAS. Un courant de chauffage (ligne blanche fine) permet d'obtenir le renversement de l'aimantation par un champ magnétique généré par un conducteur unique.

(c) Les MRAM-STT. Un courant polarisé en spin (ligne blanche fine) fait commuter l'aimantation d'une des couches magnétiques par un effet de transfert de spin, en l'absence de tout champ magnétique appliqué.



6. Technologie MRAM-TAS : mémoire 1 Mb.

>>>

2 - Dans une variante améliorée, **l'écriture est assistée par la température** (TAS – Thermally Assisted Switching) : simultanément à l'impulsion de champ magnétique, un courant est envoyé au travers du point mémoire *via* le transistor de sélection utilisé à la lecture (fig. 5b). Le chauffage induit au passage de la barrière tunnel (l'élément de plus forte résistance) permet d'abaisser le champ magnétique de renversement, facilitant ainsi l'écriture. Cette technique permet d'améliorer la sélectivité à l'écriture, tout en consommant une puissance réduite.

Dans la technologie développée par Crocus Technology (fig. 6), la couche de stockage est une bicouche ferromagnétique/antiferromagnétique couplée par échange, avec une température critique T_b à laquelle le couplage d'échange disparaît. Dans ce cas, la cellule est chauffée au-dessus de T_b , température à laquelle il est possible de renverser l'aimantation, puis refroidie sous un champ magnétique d'écriture qui stabilise (« gèle ») l'aimantation dans la direction choisie.

Contrairement à la technologie Freescale, on découple dans cette approche la stabilité thermique (rétention) des données, pilotée par le couplage d'échange en dessous de T_b , de la puissance consommée à l'écriture au-dessus de T_b . Il est ainsi possible d'optimiser indépendamment les deux paramètres tout en obtenant une sélectivité parfaite, puisque seuls les bits sélectionnés sont chauffés et peuvent se renverser, quelle que soit l'amplitude du champ magnétique appliqué.

3 - L'effort de recherche dans le domaine des MRAM porte actuellement sur **la technologie de transfert de spin** (STT-*Spin* Transfer Torque – voir p. 17). Dans cette approche, l'écriture se fait uniquement par un courant polarisé en *spin* traversant le point mémoire *via* le transistor de sélection, sans champ magnétique appliqué (fig. 5c).

L'intérêt est évident : le paramètre pertinent pour le renversement de l'aimantation étant une densité de courant, le courant d'écriture décroît avec la taille de la cellule mémoire, facilitant la miniaturisation.

De plus, l'absence de ligne de génération de champ permet de superposer le point mémoire sur le transistor de sélection : la densité surfacique est alors potentiellement limitée seulement par la surface du transistor de sélection. Cette technologie est donc particulièrement attractive pour les applications envisagées aux nœuds technologiques avancés ($F = 45 \text{ nm}, 32 \text{ nm} \dots$).

Malheureusement, pour être industrialisée cette technologie se heurte encore à deux problèmes fondamentaux :

- tout d'abord, le courant d'écriture est encore trop élevé, et sa valeur augmente fortement pour des impulsions de courant courtes ($< 10^{-8} \text{ s}$). Il en résulte une dimension du transistor de sélection importante (pour pouvoir générer le courant requis) et donc, *in fine*, une densité de la mémoire limitée ;
- la seconde difficulté est d'assurer la stabilité thermique, donc la rétention de l'information, aux nœuds technologiques avancés. Une approche consiste à utiliser des jonctions tunnel magnétiques, dont l'aimantation est perpendiculaire au plan des couches. Cette configuration est plus favorable, puisqu'il est possible à courant d'écriture constant d'utiliser un matériau plus « dur » magnétiquement, donc plus stable. Malheureusement, les jonctions tunnel perpendiculaires ne sont pas encore au point, et il est difficile de combiner courant d'écriture faible et TMR élevée. Des progrès significatifs ont néanmoins été réalisés ces dernières années, et cette approche reste prometteuse.

La solution pourrait venir d'une combinaison de l'approche TAS (assistance thermique) avec l'écriture par transfert de *spin*

(STT). Que ce soit en géométrie planaire ou perpendiculaire, cette approche est la seule permettant d'atteindre les nœuds technologiques sub-32 nm puisque, comme en TAS « classique » (avec champ magnétique), la stabilité thermique est obtenue par le couplage d'échange et découplée du courant d'écriture. Le calcul donne avec les matériaux actuels utilisés dans la mémoire TAS « classique » une limite de stabilité théorique autour de 20 nm. Les premiers résultats obtenus par Crocus Technology sont très prometteurs.

Conclusion

Le marché des têtes de lecture pour disque dur est toujours en croissance, avec l'explosion du numérique et les besoins de stockage associés. Cependant, une tête de lecture, fondamentalement un capteur de champ (voir article de C. Fermon, p. 30), reste *in fine* un composant élémentaire. C'est d'ailleurs ce qui a permis l'essor industriel rapide, puisqu'il est possible de « trier » sur un même substrat les bons et les mauvais éléments, permettant ainsi d'obtenir immédiatement des produits (et donc des revenus !) malgré des rendements de fabrication médiocres.

Il est encore trop tôt pour savoir si la MRAM sera un succès commercial ou simplement une technologie prometteuse confinée à des marchés de niche. Au regard des annonces de produits et d'applications qui paraissent de plus en plus régulièrement dans la presse, de la maturité de la technologie et de l'intérêt suscité par les concepteurs de circuits et systèmes, il semble cependant que la MRAM soit en train de trouver son public. En composant discret dans des applications de type « SRAM non volatile », en mémoire embarquée dans des circuits logiques en remplacement des Flash ou des SRAM, voire purement et simplement en substitution possible aux DRAM, la MRAM devrait dans les années à venir gagner des parts de marché significatives.

Pour l'électronique de *spin*, l'étape suivante consistera alors à intégrer des points mémoires magnétiques au cœur même des circuits logiques, pour aboutir au concept de circuit logique magnétique reprogrammable. Les chercheurs travaillent sur ces objectifs et des premiers circuits simples intégrant des cellules magnétiques ont déjà vu le jour. ■

Accumulation de spin

Effet qui apparaît lorsqu'un courant est injecté d'une couche magnétique vers une couche non magnétique (ou vice-versa), en géométrie perpendiculaire aux couches. Il se forme au voisinage de l'interface une zone de transition, dans laquelle la polarisation en *spin* du courant décroît progressivement sur une distance de l'ordre de grandeur de la longueur de diffusion de *spin*.

Capteur

Dispositif transformant l'état d'une grandeur physique en une grandeur utilisable. Par exemple, un capteur magnétique détecte ou mesure un champ ou un flux magnétique, et peut être utilisé pour déterminer une position, un angle, un courant électrique..., ou faire de l'imagerie ou du contrôle non destructif.

Disque dur

Mémoire de masse (qui sert à conserver les données de manière permanente) magnétique, utilisée dans les ordinateurs. Un disque dur est constitué de plateaux rigides en rotation, recouverts d'une couche mince magnétique, sur laquelle sont stockées les données. Celles-ci sont écrites en code binaire (0 ou 1) grâce à une tête d'écriture, et lues par une tête de lecture.

Magnétorésistance géante (GMR)

Baisse importante de la résistance électrique, observée dans des multicouches composées d'une alternance de couches minces ferromagnétiques et non magnétiques, lorsqu'on leur applique un champ magnétique extérieur.

Magnétorésistance tunnel (TMR)

Phénomène de magnétorésistance géante observé quand la couche séparatrice non magnétique est isolante. Les électrons peuvent traverser cette couche par effet tunnel. Le courant d'électrons dépend de l'angle entre les aimantations des deux électrodes. Des jonctions tunnel présentant des amplitudes de magnétorésistance supérieures à 600% ont été mises au point.

MRAM

(mémoire magnétique à accès aléatoire) Mémoire informatique dans laquelle les données sont stockées sous forme de l'aimantation des nœuds d'un réseau plan bidimensionnel à l'état solide. Ces mémoires, en cours de développement, combinent de nombreux avantages potentiels : vitesse, endurance et non-volatilité.

Multiferroïques

Matériaux présentant au moins deux des trois types d'ordre ferromagnétique, ferroélectrique et/ou ferroélastique. Le couplage magnéto-électrique entre les ordres ferroélectrique et magnétique rend théoriquement possible la manipulation d'une aimantation par un champ électrique.

Spin

Moment magnétique intrinsèque des particules quantiques. Le *spin* de l'électron (un fermion) est demi-entier et vaut 1/2. Il est responsable du moment magnétique de *spin*, qui peut prendre deux orientations en présence d'un champ magnétique, et est largement responsable des propriétés magnétiques des matériaux solides.

Spintronique (ou électronique de spin)

Technique qui place des matériaux ferromagnétiques sur le trajet des électrons. Elle exploite l'influence du *spin* sur la conduction électrique, comme un degré de liberté supplémentaire par rapport à l'électronique classique, dans le but de stocker ou de traiter des informations. Deux spécificités de la spintronique sont l'action à distance et l'hystérésis.

Têtes de lecture/écriture

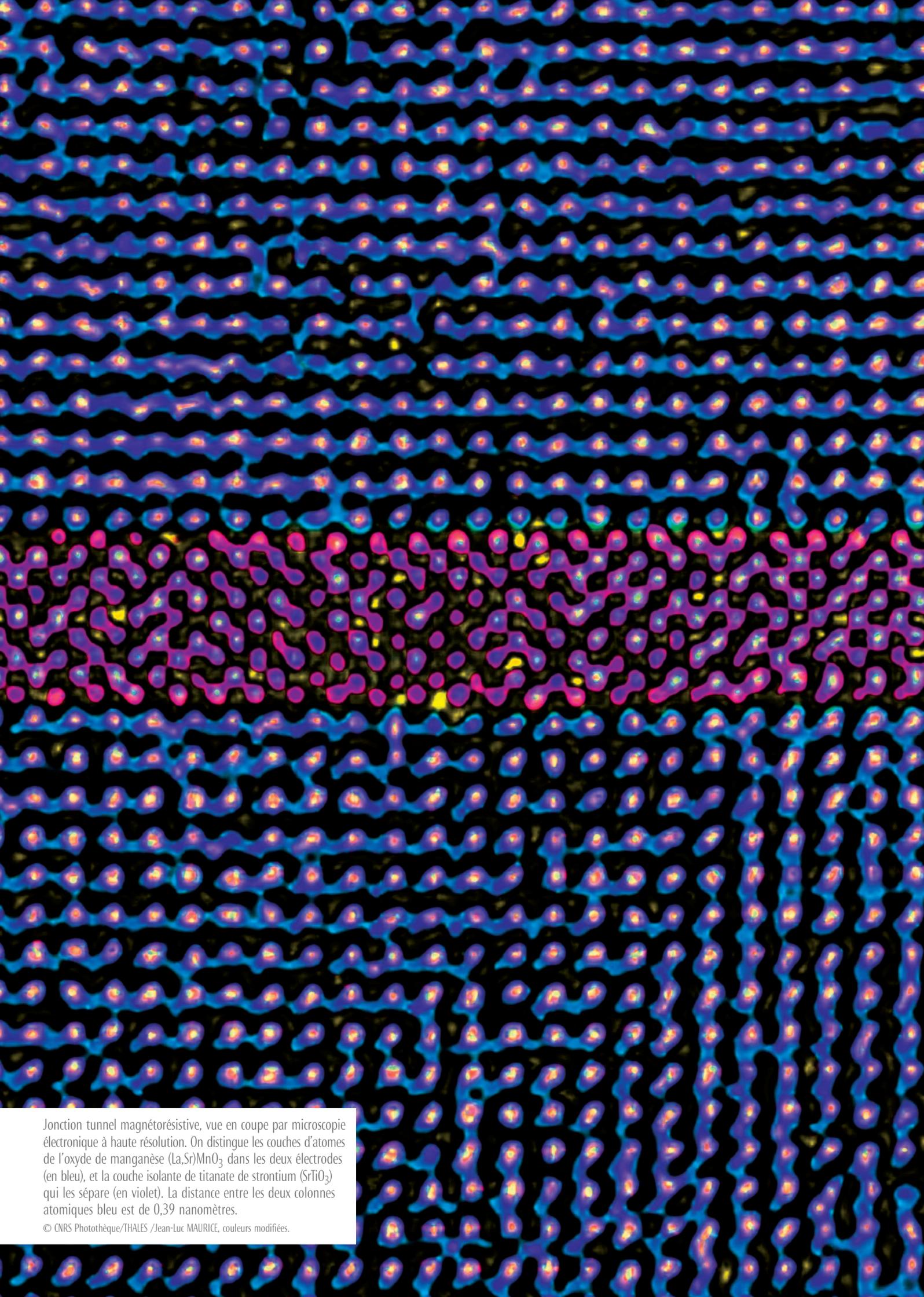
Montées sur un bras connecté au système de positionnement, elles permettent de lire ou écrire des informations stockées sur un disque dur d'ordinateur. Actuellement, elles sont indépendantes dans leur fonctionnement, mais accolées l'une à l'autre : la tête d'écriture est une tête inductive, c'est-à-dire un électro-aimant ; la tête de lecture intègre soit un élément GMR soit un élément TMR, placé perpendiculairement à la surface du disque.

Transfert de spin

Phénomène qui survient lorsqu'un courant polarisé en *spin* traverse une nanostructure magnétique dont l'aimantation fait un angle avec la direction de polarisation en *spin* des électrons. Il apparaît alors un couple s'exerçant sur l'aimantation de la nanostructure. De cette manière, il est possible d'agir sur l'aimantation sans utiliser de champ magnétique.

Vanne de spin

Empilement de deux couches magnétiques quasiment totalement découplées, séparées par une couche non magnétique. L'orientation d'une des deux couches ferromagnétiques, dite piégée, est bloquée dans une direction fixe sur une large gamme de champ appliqué. Par contre, l'autre couche magnétique, dite libre, est constituée d'un matériau magnétiquement doux : un faible champ magnétique suffit à provoquer une variation d'orientation relative d'aimantation et donc l'effet de GMR.



Jonction tunnel magnétorésistive, vue en coupe par microscopie électronique à haute résolution. On distingue les couches d'atomes de l'oxyde de manganèse (La,Sr)MnO₃ dans les deux électrodes (en bleu), et la couche isolante de titanate de strontium (SrTiO₃) qui les sépare (en violet). La distance entre les deux colonnes atomiques bleu est de 0,39 nanomètres.

© CNRS Photothèque/THALES /Jean-Luc MAURICE, couleurs modifiées.