

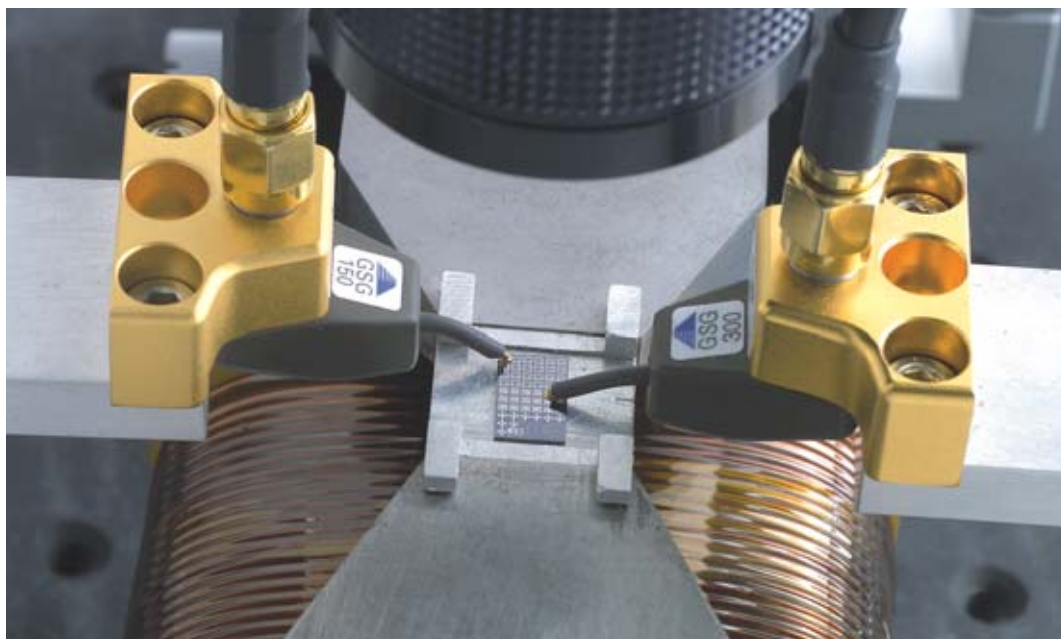
# Stockage de l'information : les acquis et les promesses du nanomagnétisme et de la spintronique

Depuis les débuts de l'informatique, les découvertes de la recherche fondamentale autour du magnétisme n'ont cessé de faire progresser à pas de géant les performances de stockage de l'information. Les progrès du nanomagnétisme et de la spintronique permettront d'aller plus loin encore.



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.

Le stockage de l'information est depuis plus d'un siècle l'un des grands domaines d'applications du magnétisme. Dans un matériau magnétique, une information peut être inscrite en orientant localement l'**aimantation** dans deux directions possibles, réalisant ainsi un stockage binaire. L'enregistrement est le domaine du magnétisme dans lequel les progrès technologiques ont été les plus spectaculaires au cours des 50 dernières années, et particulièrement depuis l'apparition du premier disque dur d'ordinateur, en 1956. Depuis, la capacité de stockage des disques durs n'a cessé de croître à un rythme moyen de 45 % par an, conduisant en un demi-siècle à une augmentation de la densité de stockage de 8 ordres de grandeur (300 **bits/cm<sup>2</sup>** en 1954 à 50 milliards de bits/cm<sup>2</sup> en 2007). Corrélativement, la taille de chaque bit d'information n'a cessé de décroître, passant de 0,3 mm × 1,2 mm en 1954 à 25 **nm** × 80 nm en 2007. Ainsi le magnétisme, comme beaucoup d'autres domaines de la physique, a rejoint l'échelle **nanométrique**. Ces progrès ont été rendus possibles par plusieurs facteurs. Tout d'abord, au niveau fondamental, une compréhension approfondie de certains phénomènes magnétiques spécifiques à cette échelle : instabilités d'aimantation liées aux fluctuations thermiques, évolution des propriétés magnétiques lorsque la dimension latérale du système devient comparable ou inférieure à certaines longueurs caractéristiques du magnétisme. D'immenses progrès ont également été réalisés dans le développement des matériaux magnétiques pour l'écriture comme pour la lecture de l'information. De nouveaux matériaux supports de l'information (média) ont été mis au point, d'autres sont en cours de développement. Ainsi dans quelques années, au lieu de stocker l'information sur des couches magnétiques continues, utilisera-t-on des médias constitués d'assemblées de plots magnétiques de dimension nanométrique dont chacun portera un ou plusieurs bits d'information. En ce qui concerne la lecture de l'information, des matériaux **magnétorésistifs** ont été élaborés. Ces derniers utilisent les propriétés associées au **spin** des **électrons**, c'est-à-dire à leur **moment magnétique** élémentaire. Ils permettent de réaliser des capteurs de **champ**



Artechnique/CEA

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 picosecondes et 100 nanosecondes sous champ magnétique.

**magnétique** ultrasensibles capables de relire le champ magnétique régnant à la surface des disques durs et d'en déduire l'information qui y est écrite.

D'autres champs de recherche et développement connexes à l'application "disques durs", sont apparus au cours des quinze dernières années, en particulier avec l'essor de l'**électronique de spin** ou **spintronique**. Cette discipline réalise un mariage entre l'électronique et le magnétisme. Elle utilise le spin des électrons pour obtenir des propriétés ou des fonctionnalités nouvelles. Ces développements concernent de nouveaux types de mémoires non-volatiles, c'est-à-dire pouvant conserver l'information même sans alimentation électrique, mais également des composants **radiofréquences** pour les télécommunications, des composants pour la logique, des capteurs de champs magnétiques hypersensibles pouvant être utilisés par exemple en biologie pour mesurer le champ magnétique généré par les courants électriques du cerveau (voir le chapitre II).

Le CEA est actif dans ces différents domaines dans ses centres de Grenoble (Isère), Saclay (Essonne) et du Ripault (Indre-et-Loire). Le service Spintec (Spintronique et technologie des composants) a été spécialement créé sur ces thèmes à l'Institut nanosciences et cryogénie (Inac, ex-DRFMC) à Grenoble afin de faciliter, dans le cadre d'une structure mixte avec le **CNRS**, l'université Joseph Fourier et l'Institut national polytechnique de Grenoble, la valorisation des efforts de recherche amont.

### Un mariage entre l'électronique et le magnétisme

Les électrons possèdent plusieurs caractéristiques élémentaires dont les plus connues sont la *masse* et la *charge électrique*. Toute l'électronique "conventionnelle" a été fondée sur la manipulation de la charge des électrons par des champs électriques. Or cette particule possède également un moment magné-

tique élémentaire, le spin, dont la représentation classique est celle d'un mouvement de rotation de l'électron sur lui-même. Tous les électrons ont un spin, qui de par sa nature **quantique**, ne peut se trouver que dans deux états, communément notés  $\uparrow$  ou  $\downarrow$ . Dans les matériaux non-magnétiques, les populations de spin  $\uparrow$  et  $\downarrow$  sont égales alors que dans les matériaux magnétiques il existe un déséquilibre entre ces deux populations de sorte que les électrons de spin  $\uparrow$  sont majoritaires (Mémo A, *Les différentes formes de magnétisme*, p. 10). Il en résulte que le courant électrique circulant dans un matériau magnétique possède une **polarisation** en spin. Si ce courant polarisé passe ensuite d'un matériau magnétique à un matériau non-magnétique comme le cuivre, cette polarisation en spin décroît progressivement à cause de phénomènes de *relaxation* du spin mais sur des distances relativement grandes, pouvant atteindre plusieurs centaines de nanomètres. Les matériaux magnétiques peuvent dès lors servir de **polariseurs** ou d'analyseurs<sup>(1)</sup> d'électrons polarisés en spin. Les composants spintroniques combinent ainsi des matériaux magnétiques et non-magnétiques, ces matériaux pouvant être métalliques, isolants ou **semiconducteurs**. Ils ont souvent une structure de la forme couche **ferromagnétique** (F1)/couche non-magnétique (NM)/couche ferromagnétique (F2) dans laquelle l'orientation relative des aimantations des couches F1 et F2 peut être changée. Cette structure s'apparente à un couple polariseur/analyseur en optique, discipline dans laquelle il est connu qu'en jouant sur l'angle entre la direction de polarisation du polariseur et de l'analyseur, il est possible de 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, la première couche (F1) polarise en spin les électrons parallèlement à son aimantation.

(1) analyseur : dispositif qui permet de mesurer la rotation du plan d'un rayonnement **polarisé** causée par la traversée d'un corps.

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 l'angle des aimantations.

## De la magnétorésistance géante aux vannes de spin

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. 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, qui a valu le prix Nobel de physique 2007 au Français Albert Fert et à l'Allemand Peter Grünberg, 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 faible, les **vannes de spin**, ont été mis au point pour réaliser des capteurs de champs magnétiques ultrasensibles. Ils ont été introduits dans les têtes de lecture des disques durs d'ordinateurs en 1998. Ce fut la première application industrielle de composants spintroniques. Dès 1991, le CEA a été très actif dans le développement, l'optimisation et la compréhension des propriétés de transport électrique de ces matériaux.

## L'essor des jonctions tunnel magnétiques

Une autre étape marquante en électronique de spin a été l'observation d'effets de **magnétorésistance tunnel** dans des **jonctions tunnel** magnétiques à température ambiante. 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), il s'agit ici d'une fine couche de matériaux isolants (par exemple d'alumine d'une épaisseur de 1,5 nm). Cette couche constitue une barrière d'énergie pour les **électrons de conduction**. Les électrons peuvent néanmoins la traverser par un effet purement quantique, l'**effet tunnel**. Lorsque les **électrodes** de part et d'autre de la barrière 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 l'électron après son passage. De ce fait, lorsqu'une tension électrique est appliquée entre les deux électrodes, le courant d'électrons à travers la jonction dépend de l'angle entre les aimantations des deux électrodes. Cet effet avait été observé pour la première fois par un Français, Michel Jullière, en 1975, à basse température dans des jonctions magnétiques semi-conductrices à base de germanium. 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, jonctions présentant des amplitudes de magnétorésistance de 30 à 70 %. Depuis, d'énormes progrès ont été réalisés dans les matériaux constituant les barrières tunnels. En particulier, des jonctions magnétiques cristallisées à base d'oxyde de magnésium (MgO) ont été mises au point, présentant des amplitudes de magnétorésistance supérieures à 400 % à température ambiante (figure 1). Cette augmentation considérable d'amplitude de 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  $\uparrow$  et  $\downarrow$  le long de l'interface entre l'électrode magnétique et la barrière tunnel. Dans les jonctions tunnel cristallisées, un phénomène supplémentaire se produit, 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 franchir la barrière tunnel. Or si les électrodes sont en alliages riches en cobalt de **structures cubiques centrées** (2) comme le MgO, seuls les électrons de spin  $\uparrow$  ont la symétrie adéquate pour passer à travers la barrière tunnel. Il en résulte un filtrage quasi-parfait des électrons  $\uparrow$ , donc une polarisation des électrons tunnels proche de 100 %, d'où de très fortes amplitudes de magnétorésistance.

Outre l'intérêt de ces phénomènes du point de vue fondamental, ces jonctions tunnel suscitent un intérêt considérable pour différents types d'applications. Elles permettent tout d'abord la réalisation de capteurs de champs magnétiques encore plus sensibles que les vannes de spin du fait de leur plus grande amplitude de magnétorésistance. Ces capteurs sont déjà utilisés dans la dernière génération de têtes de lecture de disques durs mais pourraient aussi être uti-



CNRS/C. Lebedevski

Albert Fert, co-prix Nobel de physique 2007.

Au cap 50 nm
Ir-Mn 10 nm
Fe(001) 10nm
Co(001) 0,57 nm
<b>MgO(001) 2,2 nm</b>
Co(001) 0,57 nm
Fe(001) 100 nm
MgO(001) 20 nm
MgO(001) sub.

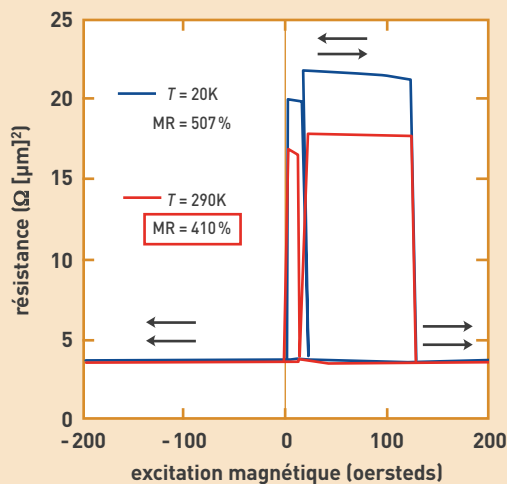


Figure 1. Magnétorésistance de jonctions tunnel à base de MgO d'après Yuasa *et al*, *Appl. Phys. Lett.* 89, 042505 (2006). La résistance de l'échantillon varie de 4 kΩ à 17 kΩ lorsque les aimantations des deux électrodes magnétiques passent d'un alignement parallèle à un alignement antiparallèle.

(2) Structure cubique centrée : structure cristalline dans laquelle les atomes occupent les huit coins ainsi que le centre d'un cube.

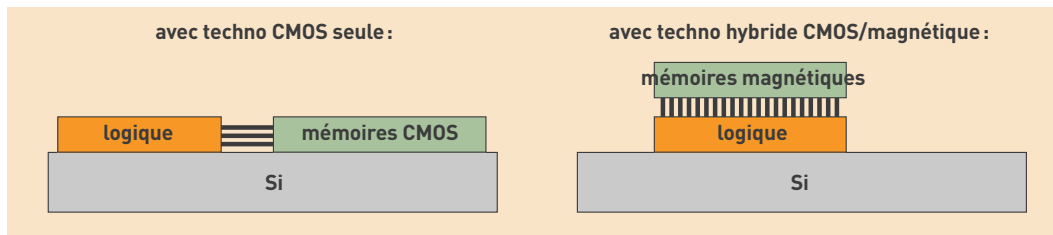


Figure 2. Imbrication de la logique et de la mémoire dans des circuits à substrat silicium (Si) tout semi-conducteurs (à gauche) et hybrides semi-conducteurs/magnétiques (à droite).

lisés dans des codeurs de position ou codeurs angulaires pour la robotique, l'automobile, ou comme boussoles électroniques.

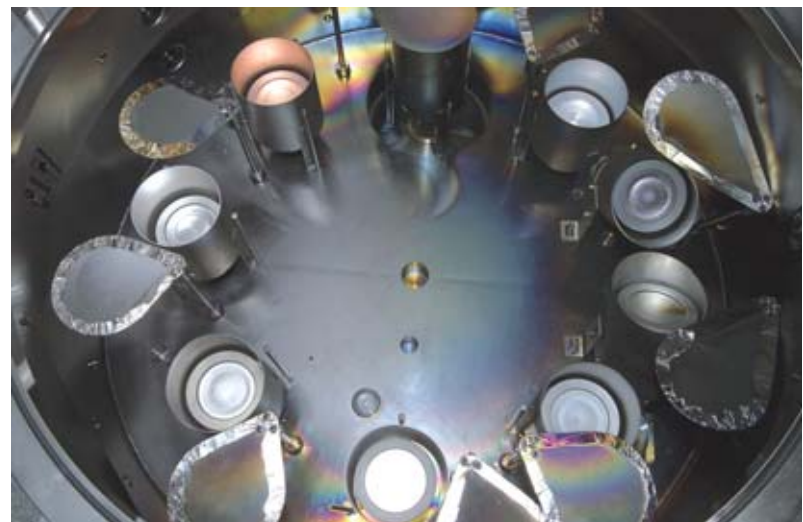
Un autre grand domaine d'applications des jonctions tunnel magnétiques est celui de mémoires magnétiques non-volatiles (voir *Stockage de l'information: la prééminence du disque dur contestée*, p.67). Dans cette application, chaque point mémoire est constitué d'une jonction tunnel magnétique. Un bit 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). L'information écrite sur le bit est relue en mesurant le niveau de résistance de la jonction tunnel. Le CEA est très impliqué dans les développements sur ces mémoires MRAMs (Magnetic Random Access Memories) et une jeune entreprise, **Crocus Technology**, a été créée en 2006 pour développer une nouvelle technologie de MRAMs utilisant une écriture de l'information assistée thermiquement (voir également p.67). À côté de l'application mémoires, les jonctions tunnel magnétiques peuvent être utilisées dans des circuits logiques pour traiter les informations, effectuer des calculs... Elles interviennent comme des résistances variables dont la valeur peut être modifiée en changeant la configuration magnétique. Le CEA travaille sur des composants logiques reprogrammables associant composants semi-conducteurs et jonctions tunnel magnétiques, la résistance de ces dernières déterminant le seuil de commutation des premiers. Sont ainsi réalisées des **portes logiques** dont la fonction change par modification de la configuration magnétique des jonctions tunnel (par exemple une **porte NOR** que l'on peut transformer en **porte NAND** en changeant juste la configuration magnétique d'une jonction tunnel magnétique). De tels composants reprogrammables existent déjà en semi-conducteurs: ce sont les FPGA (Field Programmable Gate Arrays). Les avantages apportés par la combinaison semi-conducteurs/jonctions tunnel magnétiques sont une surface de composants beaucoup plus petite, une vitesse de reprogrammation beaucoup plus grande et une non-volatilité apportée par les jonctions tunnel magnétiques.

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 (comme les jonctions tunnel magnétiques) peuvent être déposés sur quasiment n'importe quel support pourvu que celui-ci ne soit pas trop rugueux pour être compatible avec la croissance d'une barrière tunnel très fine. Dans les circuits "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, ce qui pénalise la vitesse de communication entre logique et mémoire. Cela constitue actuellement une limitation de la vitesse de fonctionnement des ordinateurs, limitation que la multiplication des microprocesseurs tente de lever partiellement. En combinant matériaux semi-conducteurs et magnétiques, il est possible de répartir beaucoup plus efficacement de la mémoire magnétique au-dessus de circuits logiques semi-conducteurs en faisant communiquer logique et mémoire par des vias conducteurs verticaux, nombreux et courts (figure 2). La communication entre logique et mémoire est alors beaucoup plus rapide, ce qui est particulièrement intéressant pour les applications multimédias dans lesquelles des opérations logiques relativement simples doivent être effectuées sur de grandes quantités de mémoires.

#### Le transfert de spin

Les phénomènes d'électronique de spin évoqués jusque-là sont des phénomènes de magnétorésistance (géante ou tunnel), 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.-C. Slonczewski et L. Berger, et observé expérimentalement peu après. 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



Intérieur d'un dispositif de dépôt de couches minces magnétiques par pulvérisation cathodique faisant apparaître les cibles des matériaux à déposer.

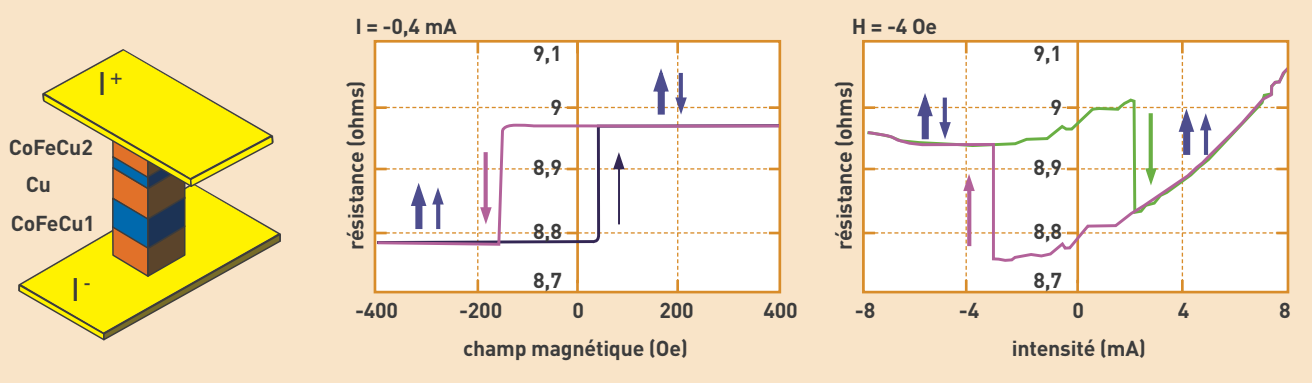


Figure 3. Exemples de commutation magnétique d'une structure vanne de spin traversée par un courant perpendiculairement au plan des couches. À gauche, la commutation est provoquée par l'application d'un champ magnétique

injectés dans une nanostructure magnétique dont l'aimantation fait un angle avec la direction de polarisation en spin des électrons, le spin des électrons se réoriente très rapidement, parallèlement à l'aimantation locale dans le premier nanomètre suivant la pénétration des électrons dans la nanostructure. Cette réorientation de la polarisation en spin est équivalente à un transfert de moment angulaire qui se traduit par un couple magnétique agissant sur l'aimantation de la nanostructure. Si la densité de courant polarisé pénétrant dans la nanostructure magnétique est suffisante, l'effet de ce couple peut être de faire commuter l'aimantation de la nanostructure ou, dans certaines géométries, de générer des excitations entretenues de l'aimantation. Ce phénomène suscite un intérêt considérable car il ouvre tout un nouveau champ d'études de la dynamique d'aimantation induite par un courant polarisé en spin.

Il ouvre par ailleurs une nouvelle voie de manipulation de l'aimantation de nanostructures magnétiques et en particulier d'écriture d'information dans des

cellules MRAMs. Dans des structures de type vanne de spin (figure 3), par exemple, il est possible de faire commuter la configuration magnétique de parallèle à antiparallèle aussi bien suivant la méthode "classique" (par application d'un champ magnétique) que par transfert de spin à partir du courant circulant à travers la structure. Pour les MRAMs, cette méthode d'écriture offre des avantages significatifs par rapport à une écriture par champ magnétique en termes de consommation d'énergie et de sélectivité des points mémoires.

Le CEA étudie également activement ce phénomène de transfert de spin en vue de la réalisation d'oscillateurs radiofréquences. Spintec a en effet breveté un concept d'oscillateurs RF basé sur l'injection d'électrons polarisés en spin hors du plan dans une couche magnétique à aimantation planaire. Il a été montré que dans cette géométrie, l'aimantation de la couche magnétique **précessionne** de façon entretenue sur un cône d'axe perpendiculaire au plan (figure 4). Si la structure est complétée par une jonction tunnel magnétique comprenant une couche de référence d'aimantation fixe, la variation continue d'angle entre l'aimantation excitée et l'aimantation fixe 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 la **densité de courant** traversant la structure.

Ce type de dispositifs accordables 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 (comportant une bobine et un condensateur), 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  $\mu\text{m}^2$  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). Les efforts actuels portent sur l'augmentation de la puissance émise par ces oscillateurs.

**> Bernard Diény et Ursula Ebels**  
 Institut nanosciences et cryogénie (Inac)  
 Spintec  
 Direction des sciences de la matière  
 CEA Centre de Grenoble

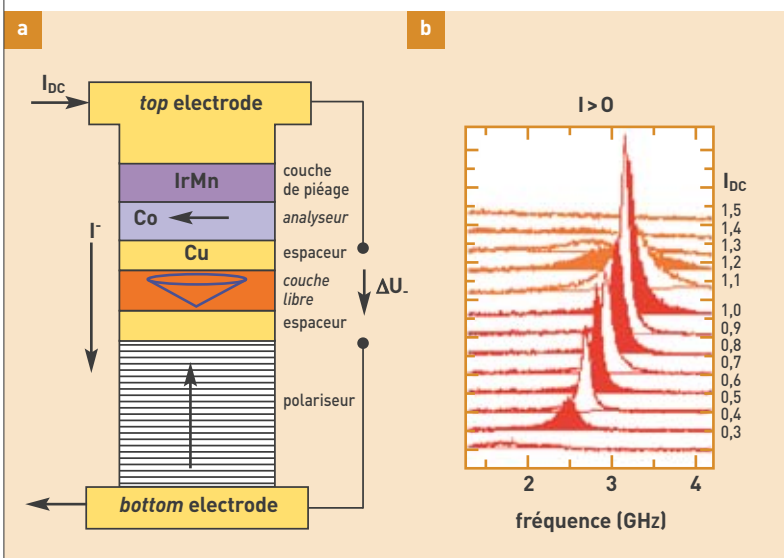
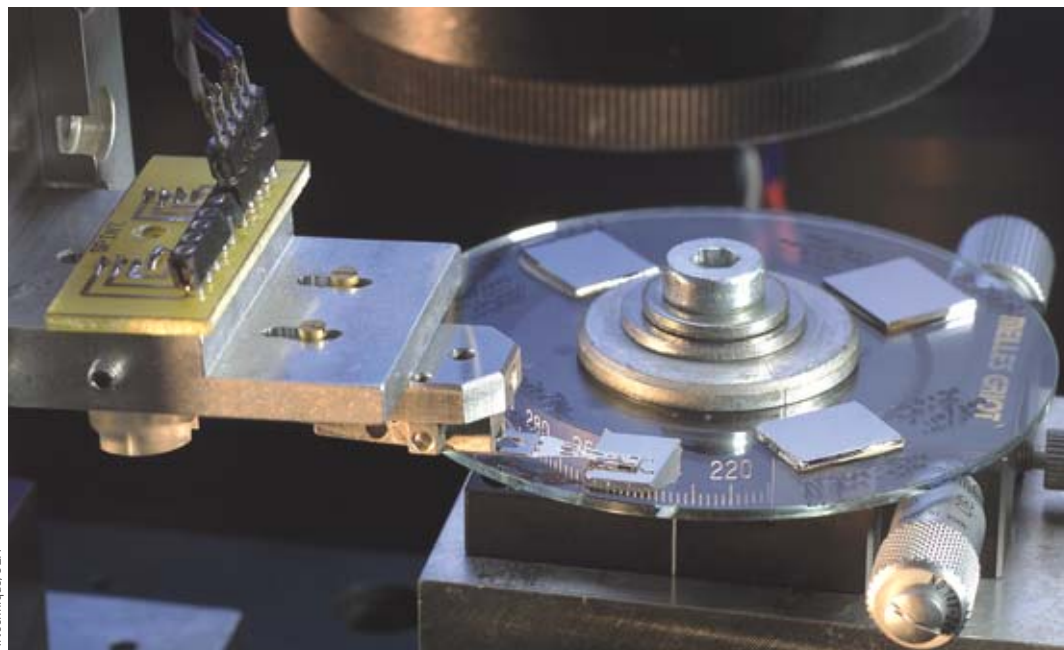


Figure 4. En (a), schéma d'un oscillateur spintronique à polariser perpendiculaire au plan des couches. Le courant continu traversant la structure entretient un mouvement de précession de l'aimantation de la couche dite "libre". Via l'effet de magnétorésistance lié à la variation d'angle entre l'aimantation de la couche libre et de référence (analyseur), une tension alternative  $\Delta U$  apparaît entre les deux électrodes du dispositif. En (b), spectres expérimentaux de la densité spectrale de la tension de sortie  $\Delta U$  pour différents courants variant entre 0,3 et 1,5 mA. La fréquence des oscillations augmente avec le courant.

# Stockage de l'information : la prééminence du disque dur contestée

Tandis que le disque dur continue de progresser en capacité et en performances de lecture et d'écriture, les mémoires solides magnétiques et le courant polarisé en spin ouvrent de nouvelles perspectives.



Artechnique/CEA

Banc testeur quasi statique, au CEA/Grenoble, permettant de lire et d'écrire sur des réseaux de plots magnétiques.

En 2006, le disque dur (DD) de nos ordinateurs fêtait son demi-siècle d'existence puisque le tout premier, baptisé RAMAC (Random Access Method of Accounting and Control), fut introduit en 1956 par IBM avec une capacité de 5 mégaoctets. Cette remarquable longévité est le fruit de continues innovations et ruptures technologiques, tant au niveau du média que des têtes de lecture/écriture. En comparaison, le Compact Disc (CD), autre support de stockage grand public, est déjà quasiment obsolète après seulement 25 années de service car il n'a pas su s'adapter face à l'inexorable percée des mémoires solides (c'est-à-dire sans pièces mobiles) qui ont inondé le marché des produits nomades. En 50 ans, la capacité des DD a augmenté de plus de 5 ordres de grandeur pour atteindre aujourd'hui le téraoctet dans les systèmes les plus performants à architecture parallèle. Cette croissance à un rythme plus rapide que la fameuse *loi de Moore*<sup>(1)</sup> permet au DD de résister face aux mémoires solides qui le concurrencent néanmoins dans de nombreuses applications. Les premiers ordinateurs portables avec des disques à mémoires solides (SSD pour Solid State Disc) sont apparus en 2006 et connaissent un succès grandissant grâce à de meilleures performances en termes de vitesse, de consommation, de robustesse et de poids. À moyenne échéance, le DD risque de se retrouver confiné aux applications les plus demandeuses en capacité de stockage, comme la vidéo haute défi-

inition ou l'archivage de masse. Si les mémoires solides de type Flash ont un bel avenir face au DD, elles ont cependant beaucoup à craindre des technologies émergentes à base de matériaux à changement de phase ou de matériaux magnétiques qui offrent des performances supérieures, principalement au niveau des vitesses de transfert. Ironie de l'histoire, la mémoire Flash pourrait être supplantée sur son propre terrain par une mémoire magnétique utilisant la même technologie que les DD d'aujourd'hui!

## Le stockage magnétique dans les disques durs

Les deux éléments essentiels d'un DD sont le média magnétique qui est le support de l'information, et la tête qui vient y écrire et détecter les bits d'information. L'un et l'autre ont connu en cinq décennies de nombreuses évolutions, voire des sauts technologiques qui ont permis d'accroître la densité de stockage, la sensibilité ou la vitesse de transfert des informations.

## Le transfert de spin

À l'heure actuelle les médias, formés sur des substrats en aluminium ou en verre choisis pour leur très faible rugosité, comportent une à deux couches magnétiques, une couche protectrice dure à base de carbone et une fine couche de lubrifiant pour éviter la détérioration de l'interface tête/média. Les couches magnétiques, généralement à base d'alliage de cobalt, chrome et platine sont constituées de petits grains magnétiques indépendants. Lors de l'écriture, le champ magnétique produit par la tête vient orienter l'aiman-

(1) La loi de Moore, du nom du co-fondateur d'Intel Corp., stipulait – à l'origine – que le nombre de transistors par unité de surface de circuit intégré double tous les dix-huit mois, à coût constant.

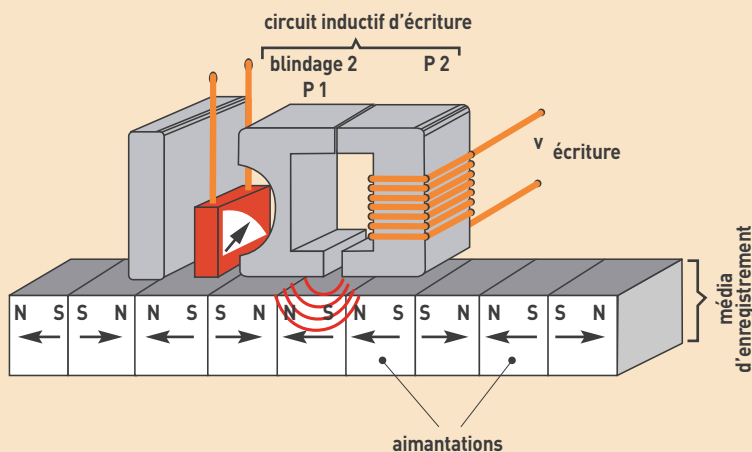


Figure 1. Principe de l'enregistrement longitudinal. Les bits sont enregistrés dans le plan des couches par une tête d'écriture constituée d'un minuscule électroaimant de dimension submicronique comportant un *gap* pour laisser sortir le champ magnétique généré par le bobinage d'écriture. La lecture s'effectue en mesurant le champ magnétique rayonné par le média, au niveau des transitions entre les bits, à quelques nanomètres au-dessus de sa surface. Cette mesure est faite en utilisant un élément magnétorésistif qui convertit les variations de champ magnétique en variation de tension électrique aux bornes de la tête de lecture. Une variation de tension apparaît lorsque l'aimantation de la couche sensible s'oriente lors du passage d'une transition car la résistance de la tête est proportionnelle à l'orientation relative entre l'aimantation de la couche sensible et celle de la couche de référence (Source : Hitachi Global Storage Technology).

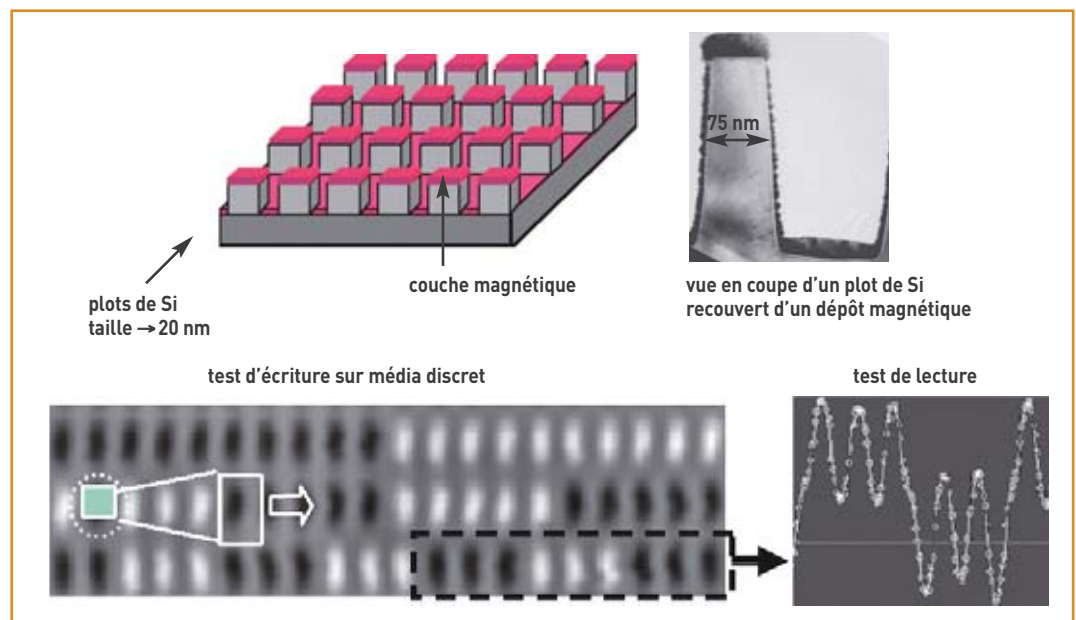
tation des grains d'un bit dans une direction ou dans l'autre (figure 1).

À l'interface entre deux bits apparaît une zone de transition dans laquelle l'aimantation se retourne et dont l'extension est directement liée à la taille des grains constitutifs du média (typiquement 10 nm). Afin de limiter le bruit magnétique introduit par cette transition qui perturbe la reconnaissance des données, il est indispensable d'avoir un nombre minimum de grains par bit (typiquement de 50 à 100 grains). Pour augmenter la densité d'information stockée sur ces médias, on cherche à réduire la taille de chaque

bit mais aussi et surtout cette largeur de transition entre bits adjacents. Ceci impose nécessairement de réduire la taille des grains du média. Cependant, lorsque celle-ci devient trop petite, leur stabilité magnétique, qui est le produit de l'anisotropie  $K_u$  par le volume  $v$ , décroît rapidement et il n'est plus possible de garantir un stockage pérenne des données : c'est la limite **superparamagnétique**. L'information a tendance à s'effacer sous le seul effet de l'**agitation thermique**. Il est possible de compenser cette réduction de volume par une augmentation de l'anisotropie mais le champ nécessaire pour écrire les données deviendrait alors trop important par rapport aux champs que l'on est capable de produire avec une tête d'écriture.

Pour atteindre des densités de stockage supérieures au téra-bit par pouce carré ( $6,45 \text{ cm}^2$ ) sans être limité par la taille des grains, l'utilisation de médias discrets et non plus continus a été proposée. Ces médias discrets sont constitués d'une assemblée de plots magnétiques nanométriques, physiquement séparés et indépendants les uns des autres. Chaque plot porte un bit d'information, son aimantation pouvant être orientée dans deux directions stables. Les largeurs de transitions entre bits sont ici définies par le procédé physique de structuration du média en plots et ne sont donc plus liées à la taille des grains constitutifs des couches magnétiques. En conséquence, les plots peuvent être constitués de grains plus gros que dans les médias continus tout en réalisant des bits de taille inférieure. Grâce à ces médias discrets, on estime que la densité de stockage pourra s'accroître de deux ordres de grandeur. Cependant, la principale difficulté pour industrialiser cette technologie est la capacité à produire des médias discrets rapidement et à faible coût (le coût de production d'un média de disque dur "classique" étant de l'ordre de 2 \$). La technologie actuellement retenue par les grands industriels du domaine (Seagate, Hitachi, Western Digital) a été initialement proposée par le laboratoire Spintec en collaboration avec le LÉTI et le laboratoire des technologies de microélectronique (LTM) du CNRS. Cette technologie consiste tout d'abord à pré-structurer un substrat de silicium, verre ou alumi-

Figure 2. Médias discrets développés au CEA/Grenoble. Configuration de la couche magnétique (en haut à gauche) et vue en coupe d'un plot de silicium recouvert d'un dépôt magnétique (en haut à droite). En bas, tests d'écriture (à gauche) et de lecture (à droite) sur média discret comportant des plots de  $100 \text{ nm} \times 200 \text{ nm}$ . Le signal est délivré par la tête de lecture magnétorésistive en balayant une piste comportant une alternance de 3 bits "0" et de 3 bits "1".





Tête de lecture-écriture du banc testeur quasi-statique.

nium en réseaux de plots nanométriques. Cette pré-structuration peut être réalisée par une technique rapide et peu coûteuse : la nano-implosion. Cette dernière consiste à presser une résine à l'aide d'un moule lui-même formé d'une assemblée de plots pour transférer dans la résine l'empreinte des plots.

La résine sert ensuite de masque pour la gravure du substrat. Puis une couche magnétique de stockage, qui couvre le sommet des plots et le fond des tranchées séparant les plots, est déposée sur le substrat pré-gravé (figure 2, haut). Le dépôt au sommet des plots sert alors de support de bits d'information par orientation de l'aimantation du matériau vers le haut ou vers le bas. Les tests d'écriture/lecture sur ce type de médias réalisés à Spintec sont concluants (figure 2 bas).

À plus long terme, les chercheurs de Spintec envisagent de stocker plusieurs bits d'information sur chaque plot en déposant sur les plots une multicouche constituée de plusieurs couches magnétiquement découplées possédant des champs d'écriture différents. En appliquant une séquence de champs d'écriture décroissants, il est alors possible d'orienter l'aimantation de chacune des couches en commençant par la plus dure à écrire pour terminer par la plus facile<sup>(2)</sup>. Cette approche permet de monter en densité d'information sans avoir à réduire la taille des bits d'information.

Tout média, même **discret**, se trouvera à un moment confronté à la limite superparamagnétique lorsque la taille des bits deviendra trop faible (~10 nm, ce qui correspond à des densités d'information de 5 téraoctets par pouce carré). L'unique solution sera à nouveau d'augmenter l'anisotropie magnétique des bits afin de compenser la réduction de volume. Pour contourner l'augmentation du champ d'écriture, les chercheurs proposent une écriture thermiquement assistée

(HAMR, pour Heat Assisted Magnetic Recording) où le bit est chauffé individuellement par une approche optique en champ proche, afin de réduire l'anisotropie magnétique juste au moment de la lecture. Une autre approche est aussi en cours d'étude, qui utilise une assistance non pas thermique mais par onde radiofréquence appliquée à l'échelle spatiale d'un bit.

#### L'évolution des têtes de lecture/écriture

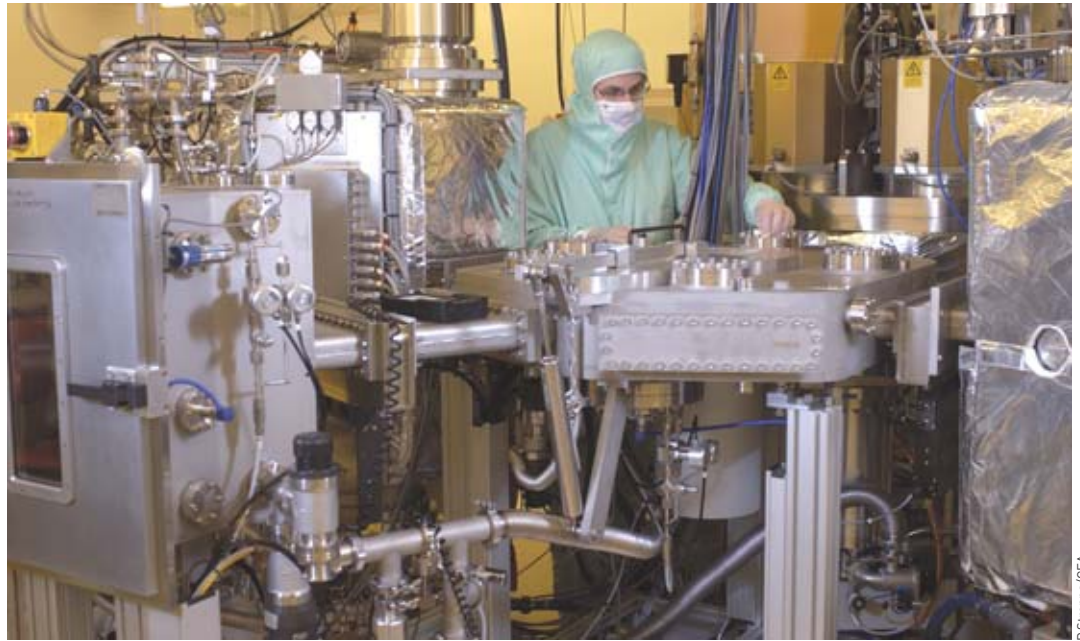
En cinquante ans, les têtes de lecture/écriture ont considérablement évolué, tant au niveau de leur miniaturisation que des technologies mises en œuvre. Au cours des seules 30 dernières années, le poids de l'ensemble têtes/patin de vol a été réduit d'un facteur 100, passant de 55 à 0,6 mg. Cinq générations de têtes, issues de sauts technologiques majeurs, ont permis d'accroître le taux de croissance de la densité d'enregistrement (TCDE) de 25 % par an à plus de 100 % par an !

Des années 50 aux années 70, c'est la *technologie inductive* qui domine avec un bobinage enroulé sur une pièce polaire en **ferrite** micro-machinée. Le *gap* de lecture/écriture est réalisé simplement par assemblage des pièces polaires. Dans cette technologie, le **bobinage** sert de source de champ magnétique en écriture et de détection en lecture en mesurant la tension électromotrice induite dans le bobinage lors de la lecture des transitions. Au cours des années 80, les premières technologies de type *couches minces* apparaissent. Les têtes inductives sont désormais fabriquées de manière collective sur des substrats en utilisant les procédés de la microélectronique. Les contrôles des tailles et des alignements s'améliorent grâce aux outils de caractérisation en ligne. Les pièces polaires en **permalloy** remplacent avantagusement la ferrite car elles permettent de produire des champs d'écriture plus forts.

Au cours de la décennie suivante, une rupture technologique intervient au niveau de la tête de lecture. La technologie à *magnétorésistance anisotrope* (AMR) vient supplanter la technologie inductive. Plus sensible, cette technologie permet d'accroître la TCDE à 60 % par an. Désormais, têtes de lecture et d'écriture sont dissociées et empilées l'une au-dessus de l'autre, ce qui complique sensiblement la réalisation.

(2) C'est-à-dire écrire en premier la couche dont le champ de renversement est le plus élevé (couche dure magnétiquement parlant) puis les autres couches par ordre décroissant des champs de renversement. Procéder autrement conduirait à effacer automatiquement les informations stockées dans les couches magnétiques les plus douces (celles à faible champ de renversement).





Machine de dépôt de couches minces magnétiques pour la fabrication de MRAM au CEA Grenoble.

P. Stroppa/CEA

La technologie AMR, proposée comme capteur de flux en 1971 par R. Hunt, aura mis moins de vingt ans pour être mise en œuvre dans un produit grand public. Mais cette technologie fera long feu, puisqu'en 1997 elle est détrônée par la technologie "vanne de spin" (magnétorésistance géante à champ faible) initiée en 1990 par Bernard Diény, alors chez IBM. Cette nouvelle tête de lecture plus sensible que l'AMR permet d'atteindre un TCDE supérieur à 100 % par an. Elle est toujours utilisée dans nombre de disques durs, même si on voit apparaître des têtes à magnétorésistance tunnel (TMR) qui sont une évolution des têtes GMR. Dans ces deux types de têtes, la variation de tension aux bornes du détecteur est proportionnelle à l'orientation relative des aimantations de deux couches magnétiques: l'une fixe, dite de référence, joue le rôle d'analyseur et l'autre, mobile, est la couche sensible. En l'absence de champ, ces deux aimantations sont orientées à 90° afin de "linéariser" la réponse du détecteur. Lorsque celui-ci passe devant une transition, l'aimantation de la couche sensible s'aligne selon la direction du champ magnétique qui en est issu, ce qui modifie l'orientation relative des couches sensible et de référence. Si leur angle relatif diminue, la tension fait de même, et inversement. La seule différence entre une tête GMR et une tête TMR est la direction du courant d'alimentation du détecteur. Il est parallèle au plan des couches magnétiques dans la première et perpendiculaire dans la seconde. Dans une tête TMR, la couche séparatrice entre les couches magnétiques est un isolant très fin (~1 nm d'épaisseur) que les électrons traversent par effet tunnel. La variation de résistance dans un détecteur TMR peut atteindre plus de 400 % avec des isolants de type MgO alors qu'elle plafonne à quelque 20 % dans les meilleures GMR.

Un autre aspect que les chercheurs du domaine étudient de près est le *bruit électronique* généré par le courant polarisé en spin. Comme expliqué dans l'article précédent, un courant polarisé en spin ayant une densité suffisante peut générer un couple de transfert de spin sur l'aimantation locale, capable de provoquer

des excitations d'aimantation, voire un renversement de l'aimantation. Dans les têtes actuelles, les dimensions du détecteur sont telles que l'on s'approche de ces densités de courant critiques (typiquement  $10^7 \text{ A/cm}^2$ ). Ces excitations magnétiques générées dans la couche sensible de la tête de lecture sont une source de bruit dans le signal délivré par la tête. Spintec étudie la dynamique de bruit dans des têtes d'un partenaire afin d'évaluer la criticité de ce parasitage et de proposer des structures permettant de s'en affranchir, voire d'utiliser le phénomène de transfert de spin pour réduire le bruit en dessous de son niveau naturel à la température de fonctionnement de la tête.

## Disques durs et mémoires solides

Outre les évolutions des deux éléments principaux du disque dur, un autre élément lié à l'encombrement est à considérer: le *facteur de forme*. Le disque RAMAC d'IBM comportait 50 disques de 60 cm de diamètre pour stocker 5 Mo de données et pesait pas moins d'une tonne! Aujourd'hui, grâce aux progrès technologiques de miniaturisation, le facteur de forme s'est réduit à moins de 2,5 cm avec un disque record de Toshiba de 2 cm permettant de stocker 4 Go dans 8,5 g de technologie (figure 3). En poussant la technologie à des facteurs de forme aussi petits, c'est tout le marché des composants nomades que visent les fabricants de disques durs.

## La concurrence entre DD et mémoires solides Flash

Les DD de nos ordinateurs de bureau utilisent un facteur de forme 9 cm, ce qui permet d'atteindre facilement des capacités de 400 Go avec plusieurs disques. Les portables utilisent des DD de format 6,3 cm voire 4,5 cm plus légers mais de capacité un peu moindre. Les DD les plus légers ne comportent qu'un plateau pour une capacité d'environ 160 Go. Le format 2,5 cm fut introduit en 1998 pour les premières applications nomades. Ainsi en 2004, l'*i-pod* mini d'Apple était vendu avec un DD de ce format et 6 Go de capacité.



Toshiba

Figure 3. Disque Toshiba de 2 cm de diamètre avec une capacité de 4 Go pour un poids plume de 8,5 g!

Mais dès 2005, ce mini-DD était remplacé par une mémoire solide de type Flash de plus faible capacité mais plus rapide et consommant moins. D'autres produits DD avec un facteur de forme de 2,5 cm ont été introduits par les divers fabricants pour concurrencer les clés USB ou les mémoires type Compact Flash pour la photo numérique. Cependant, le succès auprès des consommateurs est très mitigé car leurs performances sont moindres que celles des mémoires solides. Ce sont même ces dernières qui prennent des parts de marché aux DD dans les applications ordinateur portable haut de gamme. Ainsi, Dell fut le premier à introduire des portables avec un disque à mémoire solide (SSD) de 32 Go.

Aujourd'hui, l'explosion de la consommation de la musique téléchargée sur des systèmes nomades est une aubaine pour le marché des SSD. Cependant, les morceaux sont bien souvent téléchargés dans un premier temps sur un ordinateur fixe où ils sont stockés sur un DD classique de forte capacité. De même, les sites fournisseurs utilisent des serveurs à base de DD de très hautes capacités pour le stockage et l'archivage des données. En conclusion, l'émergence de ce nouveau mode de consommation nomade bénéficie aux deux technologies magnétiques et Flash mais à divers endroits de la chaîne de stockage.

### Les concurrents de la technologie Flash

La mémoire Flash se décline en deux technologies : les **mémoires NOR** permettent un accès aléatoire et rapide aux données enregistrées mais sont limitées en capacité ; elles sont utilisées principalement pour le stockage de programmes systèmes destinés à être exécutés fréquemment, les **mémoires NAND** offrent seulement un accès séquentiel aux données mais sont plus rapides en lecture/écriture et de bien plus grandes capacités ; elles servent donc de mémoires de stockage dans les applications type USB, MP3 ou SSD. Avec l'augmentation des densités, des barrières technologiques de plus en plus hautes se dressent devant les concepteurs. Les oxydes de grilles doivent être de plus en plus fins, ce qui pose des problèmes de fiabilité mais aussi de rétention et d'endurance. De nouvelles mémoires non-volatiles émergent et pourraient à court terme concurrencer les mémoires Flash.

La plus avancée est la mémoire à changement de phase (PC-RAM) dont le principe de stockage est basé sur la différence de **conductivité électrique** entre les phases cristallines et amorphes de matériaux chalcogénures<sup>(3)</sup> (type GeSbTe). Le changement de phase est provoqué par un courant de l'ordre de quelques centaines de micro-ampères ( $\mu\text{A}$ ) qui chauffe le point mémoire au-dessus de sa température de fusion ( $\sim 600\text{-}700\text{ }^\circ\text{C}$ ). Cette mémoire à accès aléatoire est bien plus rapide que les Flash (écriture en moins de 100 ns) et nécessite des tensions d'écriture bien plus

faibles ( $\sim 1\text{-}2\text{ V}$ ). Ces PC-RAMs sont en phase de pré-production chez Samsung, Intel et STM. Intel a échantillonné dès 2007 des composants de 128 Mo en technologie 90 nm chez des clients potentiels, mais l'introduction de ces mémoires ne devrait pas intervenir avant le nœud 45 nm<sup>(4)</sup>, soit vers 2009-2010.

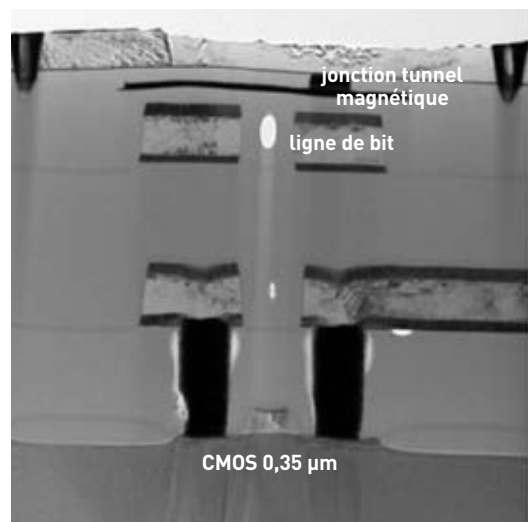
Les mémoires magnétiques (**MRAM**) sont un autre concurrent sérieux des Flash. Elles sont pour l'instant moins denses mais beaucoup plus rapides (cycle écriture/lecture  $< 50\text{ ns}$ ) et bien plus durables. Leur vitesse les positionne même comme concurrentes des mémoires DRAM (les plus utilisées comme mémoire système de nos ordinateurs) tout en offrant la non-volatilité. **Freescale** est le *leader* pour cette technologie et commercialise des composants MRAMs de 4 Mo pour des applications micro-contrôleurs ou en remplacement de mémoires type SRAM alimentées par batteries pour sauvegarder les données.

### Déjà trois technologies MRAM

À l'heure où les premiers composants MRAM sont commercialisés, il existe déjà trois générations de ce type de mémoire (figure 4) correspondant à trois stratégies d'écriture : l'écriture par champ magnétique local (MRAM), l'écriture thermiquement assistée (TA-MRAM pour Thermally Assisted MRAM) et l'écriture par courant polarisé (STT-RAM pour spin transfer torque RAM).

Dans les trois cas, les éléments de base dans lesquels l'information est stockée sont des jonctions tunnel magnétiques où la couche magnétique sensible ne doit prendre que deux orientations : parallèle ou anti-parallèle à la couche de référence, pour bien discriminer les niveaux de résistance associés aux valeurs numériques 0 et 1. La stratégie d'écriture classique utilise une combinaison de deux champs magnétiques orthogonaux permettant d'assurer la sélectivité entre bits du plan mémoire. Cette approche est cependant peu adaptée à la densification car les champs d'écriture sont inversement proportionnels à la taille du bit et la capacité de rétention du bit n'est plus assurée en dessous de 200 nm.

Partant de ce constat, le CEA a proposé en 2000 une technologie alternative basée sur l'assistance ther-



Coupe au microscope électronique à balayage (MEB) d'une cellule TA-MRAM sur un circuit CMOS gravé à 0,35 micromètre.

(3) chalcogénure : du grec khalkos (cuivre) ; ensemble des sulfures, séléniures et tellurures.

(4) nœud (45 nm) : génération technologique de la microélectronique correspondant à une dimension caractéristique de gravure des circuits de 45 nanomètres, selon la feuille de route ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors).

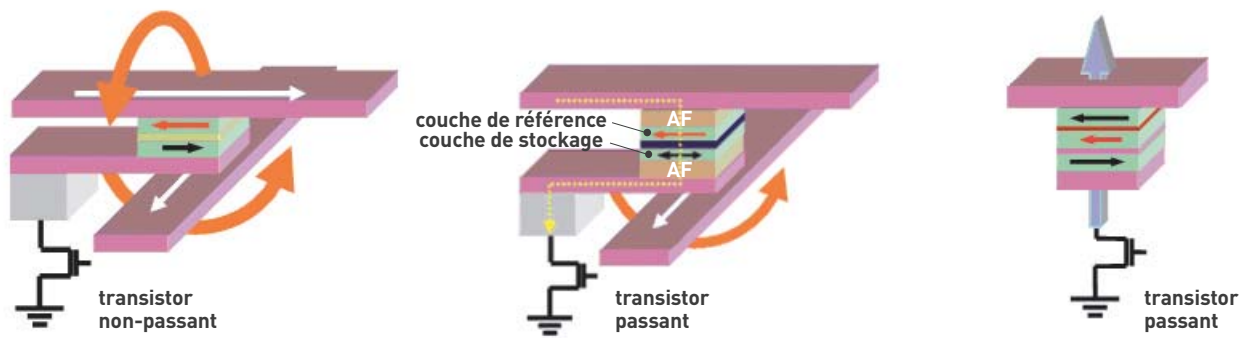
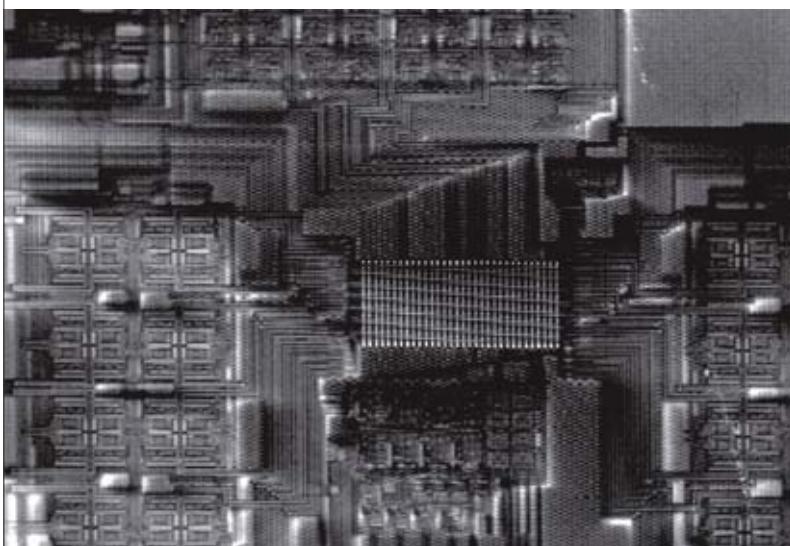


Figure 4. Trois générations de cellules MRAM. À gauche, MRM à écriture par champs magnétiques orthogonaux. Au centre, TA-MRAM avec combinaison d'un courant de chauffage (en pointillés jaunes) et d'un unique champ magnétique. À droite, STT-RAM où l'écriture s'effectue uniquement par un courant polarisé en spin.



Plan mémoire TA-MRAM de 1 Ko.

mique lors de l'écriture (TA-MRAM). Ce concept allie un chauffage local du bit à écrire, assurant à la fois la sélectivité et la réduction du champ d'écriture, et un renversement de l'aimantation par un champ magnétique unique de faible amplitude. Pour inhiber l'écriture des bits non "adressés" (dont on ne souhaite pas modifier l'information), l'aimantation de la couche magnétique sensible a été rigidifiée par un matériau **anti-ferromagnétique**. C'est seulement lorsqu'un courant circule dans la jonction tunnel que la température s'élève au-dessus de la température d'écriture (correspondant à la température de blocage du matériau anti-ferromagnétique) permettant la libération de l'aimantation de la couche sensible. Celle-ci peut être alors renversée par l'application du champ d'écriture local. Cette nouvelle approche bénéficie de nombreux avantages par rapport à la première génération, non seulement sur l'aspect consommation ou capacité de rétention aux plus petites tailles mais aussi parce qu'elle est intrinsèquement immunisée contre les perturbations électromagnétiques. Une première intégration sur technologie **CMOS** 0,35 µm a été réalisée dans le cadre du projet européen NEXT et a figuré parmi les finalistes du prix Descartes 2006. Cette approche TA-MRAM a d'ores et déjà séduit des investisseurs internationaux, permettant la création de la *start-up* Crocus Technology qui "échantillonnera" ses premiers prototypes début 2009.

### S'affranchir totalement des champs magnétiques

La prochaine génération de MRAM cherchera à s'affranchir complètement des champs magnétiques puisque l'écriture se fera uniquement par le biais du courant polarisé en spin. Comme indiqué plus haut, le couple produit sur une aimantation par un courant polarisé en spin peut, dans certaines conditions, mener au renversement de la direction de cette aimantation. À ce jour, les densités de courant nécessaires pour observer cet effet sont d'un ordre de grandeur plus faible que celles requises pour changer de phase dans les mémoires PC-RAM. La consommation sera donc fortement réduite et les densités devraient progresser rapidement. Hitachi, Renesas et Grandis sont les leaders dans cette technologie et une première démonstration de plan mémoire à 2 Mo a été publiée en 2006. Cette 3<sup>e</sup> génération est la plus prometteuse mais elle souffre du même mal que la première, à savoir que sa capacité de rétention va s'amoinrir rapidement lors de la miniaturisation. Le couplage des technologies TA-MRAM et STT-RAM est donc une solution que le CEA explore en partenariat avec Crocus Technology.

### Une seconde vie pour les disques durs magnétiques ?

Grâce aux formidables évolutions des DD magnétiques, cette technologie a réussi à perdurer plus de 50 ans et il lui reste encore de beaux jours devant elle puisque les perspectives de croissance sont bonnes avec l'explosion de la "consommation numérique", gourmande en capacité de stockage. L'arrivée sur le marché de produits SSD a modifié quelque peu la donne sur les produits nomades et sur les ordinateurs portables, puisqu'ils offrent des performances supérieures aux DD. Les DD à faible facteur de forme (<4,5 cm) ne trouveront donc pas ou peu de consommateurs et resteront marginaux. La technologie Flash NAND, à la base des SSD, pourrait être à moyen terme concurrencée voire remplacée par des technologies mémoires plus performantes comme les PC-RAM voire les MRAM. Il n'est pas interdit de rêver à un SSD en MRAM qui offrirait une seconde vie aux DD magnétiques pour les applications nomades.

> **Olivier Redon**

Institut Léti

Direction de la recherche technologique  
CEA Centre de Grenoble

# Les différentes formes de magnétisme

Le **magnétisme** trouve essentiellement son origine dans les propriétés des **électrons** telles qu'elles sont expliquées par la **physique quantique**. Leur état quantique de **spin** est responsable d'une première partie du magnétisme (*magnétisme de spin*). Une deuxième partie est imputable au mouvement orbital des électrons autour du noyau de l'**atome** (*magnétisme orbital*) et également au magnétisme du **noyau** lui-même (*magnétisme nucléaire*), notamment mis à profit dans les techniques d'imagerie médicale par **résonance magnétique nucléaire**. Le magnétisme est donc produit par des charges électriques en mouvement. La force agissant sur ces charges, dite **force de Lorentz**, traduit la présence d'un **champ magnétique**.

L'électron possède un **moment magnétique** élémentaire (le **quantum** magnétique étant le *magnéton* imaginé par Bohr) qui peut être associé à l'image de son mouvement de rotation du **spin** sur lui-même dans un sens ou dans l'autre, orienté vers le haut ou vers le bas. Le **nombre quantique de spin** (un des quatre nombres qui "quantifient" les propriétés de l'électron) est égal à  $1/2$  ( $+ 1/2$  ou  $- 1/2$ ). Une paire d'électrons ne peut occuper la même *orbitale* que si l'un et l'autre sont de moments magnétiques opposés.

Chaque atome peut être assimilé à un petit aimant porteur d'un moment magnétique élémentaire. Le spin du noyau (**neutron** et **proton** ont eux-mêmes un spin demi-entier) est demi-entier si le **nombre de masse** est impair ; nul si le nombre de masse et la charge sont pairs, et entier si le nombre de masse est pair et la charge impaire. De nombreux moments magnétiques peuvent, à une échelle plus importante, constituer des **domaines magnétiques** dans lesquels tous ces moments sont orientés

dans la même direction. Ces régions de l'espace sont séparées entre elles par des **parois**. Rassemblés, ces domaines peuvent eux-mêmes constituer un **aimant** à l'échelle macroscopique (figure E1).

De l'organisation de ces constituants élémentaires dépend la manifestation de différents types de magnétisme, associés traditionnellement à trois grandes familles de matériaux : *ferromagnétiques*, *paramagnétiques* et *diamagnétiques*.

Tous les matériaux qui ne sont pas diamagnétiques sont par définition paramagnétiques, dans la mesure où leur **susceptibilité magnétique** est positive, mais cette susceptibilité est particulièrement élevée dans les ferromagnétiques, qui constituent donc en eux-mêmes une famille.

1. Les matériaux **ferromagnétiques** sont constitués de petits domaines à l'intérieur desquels les atomes, présentant une **aimantation** parallèle, tendent à s'aligner comme autant de **dipôles** élémentaires dans la direction d'un **champ magnétique** extérieur. Les moments magnétiques de chaque atome peuvent s'aligner spontanément dans ces domaines, même en l'absence de champ extérieur. En présence d'un tel champ, les parois se déplacent et tendent à renforcer le champ appliqué. Si celui-ci dépasse une certaine valeur, le principal domaine orienté dans la direction du champ tendra à occuper tout le volume du matériau. Si le champ diminue, les parois se déplacent, mais pas de façon symétrique, une partie du mouvement "aller" des parois étant irréversible : il subsiste donc une **magnétisation rémanente**, importante dans les aimants proprement dits ou la magnétite naturelle.

L'ensemble du processus constitue un **cycle d'hystérésis**, la relation du champ induit au champ extérieur dessinant une *boucle*

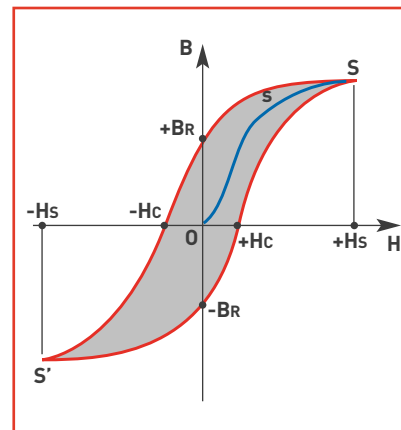


Figure E2. L'induction B d'un matériau magnétique par une bobine n'est pas proportionnelle à l'excitation magnétique (champ H). Si la première aimantation dessine une courbe de type OsS en bleu sur la figure, elle manifeste à partir de s une saturation. L'induction n'est conservée qu'en partie si le champ tend vers zéro ; cette induction rémanente ne peut être annulée que par une inversion du champ magnétique jusqu'à une valeur de champ "coercitif". Le cycle d'hystérésis traduit des pertes "par frottement" entre les domaines magnétiques. Ces pertes sont représentées par la surface que délimitent les courbes d'aimantation et de désaimantation.

ou *courbe d'hystérésis* dont la surface représente l'énergie perdue dans la partie irréversible de ce processus (figure E2). Pour annuler le champ induit, il faut appliquer un **champ coercitif** : les matériaux avec lesquels les aimants permanents artificiels sont réalisés présentent une valeur élevée de champ coercitif.

En général, le moment magnétique total des matériaux ferromagnétiques est nul, les différents domaines ayant des orientations différentes. Le ferromagnétisme disparaît si on dépasse une certaine température appelée **point de Curie**.

Le couplage collectif des spins entre centres métalliques du matériau ou d'un complexe de **métaux de transition** explique les propriétés magnétiques du matériau, les moments de tous les spins se trouvant tous orientés de manière identique.

Les matériaux dont les atomes sont éloignés les uns des autres dans leur structure **crystalline** favorisent un alignement de ces aimants élémentaires par couplage. Le fer, mais aussi le cobalt, le nickel et leurs **alliages**, en particulier les aciers, et certains de leurs composés appartiennent à cette catégorie caractérisée par une susceptibilité magnétique positive et très élevée, ainsi que,

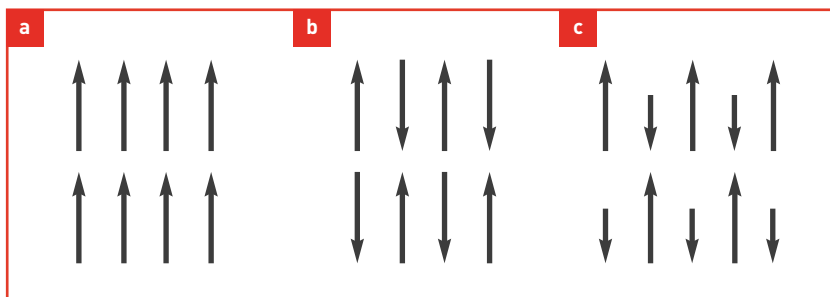


Figure E1. Les moments magnétiques élémentaires sont de même sens dans les substances ferromagnétiques (a), de sens opposés mais de somme nulle dans les antiferromagnétiques (b) et de sens opposé et de grandeur différente dans les ferrimagnétiques (c).



Stoiber Productions, München

Arrivée à la gare routière de Long Yang, à Shanghai (Chine), d'un train à sustentation magnétique du type Transrapid, d'origine allemande, mis en service en 2004 pour relier la ville à l'aéroport international de Pudong.

plus faiblement, certains métaux de la famille des **terres rares**, quelques alliages dont les mailles sont grandes et certaines combinaisons d'éléments n'appartenant pas eux-mêmes à cette famille.

Dans les matériaux **ferrimagnétiques**, les domaines magnétiques constituent des ensembles pouvant être alignés dans des sens opposés (anti-parallèles), mais leur moment magnétique résultant diffère de zéro alors que le champ extérieur est nul (exemples de la magnétite, de l'ilménite ou des oxydes de fer). Le ferrimagnétisme s'observe dans des matériaux comportant deux types d'atomes se comportant comme des aimants de force différente et orientés en sens contraire. Si la somme des moments parallèles et anti-parallèles est nulle, il s'agit d'**anti-ferromagnétisme** (exemple du chrome ou de l'hématite). En effet, si les atomes sont plus rapprochés, la disposition la plus stable est celle d'aimants antiparallèles, chacun compensant en quelque sorte son voisin (figure E1).

**2.** Les matériaux **paramagnétiques** présentent un comportement de même nature que les ferromagnétiques, bien que beaucoup moins intense (leur susceptibilité magnétique est positive mais très faible, de l'ordre de  $10^{-3}$ ). Chaque atome d'un tel matériau a un moment magnétique non-nul. Sous l'action d'un champ extérieur, les moments magnétiques s'orientent et augmentent ce champ, qui décroît cependant avec la température, l'agitation thermique désorientant les dipôles élémentaires. Les matériaux paramagnétiques perdent leur aimantation dès qu'ils ne sont plus soumis au champ magnétique. La plupart des métaux, y compris des alliages d'éléments ferromagnétiques, font partie de cette famille, ainsi que des minéraux comme la pegmatite.

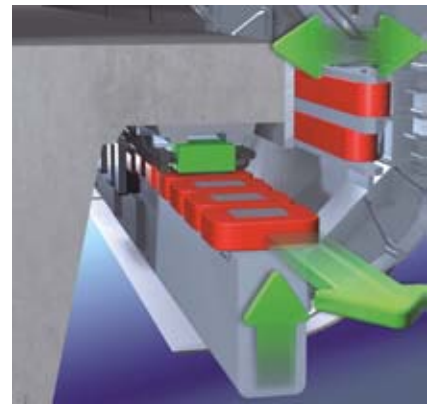
**3.** Les matériaux **diamagnétiques** présen-

tent une susceptibilité magnétique négative et extrêmement faible (de l'ordre de  $10^{-5}$ ). La magnétisation induite par un champ magnétique s'opère dans la direction opposée à ce dernier : ils ont donc tendance à s'éloigner le long de ses **lignes de champ** vers les zones de faible champ. Un diamagnétique parfait offrirait une résistance maximale au passage du champ magnétique et présenterait une **perméabilité** nulle. Les métaux comme l'argent, l'or, le cuivre, le mercure ou le plomb, le quartz, le graphite, les gaz rares ainsi qu'une grande majorité des composés organiques se rangent dans cette catégorie.

En fait, tous les corps présentent peu ou prou ce phénomène de diamagnétisme, imputable à la déformation des orbitales électroniques des atomes sous l'action d'un champ extérieur, phénomène réversible avec la disparition du champ extérieur. Comme Michael Faraday l'a montré en son temps, toute substance est donc plus ou moins "magnétisable" pour autant qu'elle soit placée dans un champ magnétique suffisamment intense.

### L'électromagnétisme

C'est le Danois Hans Christian Ørsted, professeur à l'Université de Copenhague qui, le premier, a fait autour de 1820 le lien entre les deux domaines jusqu'alors complètement séparés de l'**électricité** et du **magnétisme**. Il a mis en évidence la déviation de l'aiguille d'une boussole à proximité d'un fil parcouru par un courant électrique, avant que Faraday n'énonce la loi qui porte son nom : le champ magnétique produit est d'autant plus fort que l'intensité du courant est importante. La discipline qui étudie les champs magnétiques statiques (ne dépendant pas du temps) est la **magnétostatique**. Le **champ magnétique** forme, avec le **champ**



Vue de détail des aimants pour le guidage et la propulsion du train.

**électrique**, les deux composantes de l'**électromagnétisme**. Des ondes peuvent se propager librement dans l'espace, et dans la plupart des matériaux, dans tous les domaines de longueur d'onde (ondes radio, micro-ondes, infrarouge, visible, ultraviolet, rayons X et rayons gamma). Les **champs électromagnétiques** sont donc une combinaison de **champs de force** électriques et magnétiques naturelle (le champ magnétique terrestre) ou non (de basses fréquences comme les lignes et les câbles électriques, ou de haute fréquence comme les ondes radio (téléphone cellulaire compris) ou de télévision).

Mathématiquement, les lois de base de l'électromagnétisme sont résumées dans les quatre **équations de Maxwell** (ou **de Maxwell-Lorentz**) qui permettent de décrire l'ensemble des phénomènes électromagnétiques de manière cohérente, de l'électrostatique et la magnétostatique à la propagation des ondes. James Clerk Maxwell les a formulées en 1873, trente-deux ans avant qu'Albert Einstein ne place la théorie de l'électromagnétisme dans le cadre de la **relativité restreinte**, qui expliquait ses incompatibilités avec les lois de la physique classique.