

étant de quelques nanomètres, le spin reste inchangé – mais seulement à cette échelle de longueur. C'est pourquoi il ne peut être exploité qu'avec des dispositifs de taille nanométrique, ce qui n'est plus un obstacle avec le développement récent des nanotechnologies.

Pour avoir affaire à des électrons ayant des spins alignés, il suffit d'utiliser des matériaux magnétiques conducteurs. Dans la plupart des matériaux, les électrons sont orientés aléatoirement et l'on trouvera autant d'électrons $\uparrow$ que $\downarrow$. En revanche, dans les matériaux magnétiques, une fraction notable des spins électroniques pointent dans la même direction et il en résulte une aimantation macroscopique. Par ailleurs, dans les matériaux magnétiques conducteurs usuels, tels le fer, le cobalt, le nickel et leurs alliages, les électrons intervenant dans le magnétisme sont les mêmes que ceux en jeu dans la conduction électrique. Le courant électrique s'accompagne donc d'un « courant de spin », ou plutôt de deux courants, correspondant aux deux orientations du spin des électrons.

Lire des bits avec un sandwich magnétique

L'émergence de la spintronique, qui exploite les courants de spin, est entièrement reliée à la propriété d'origine quantique suivante : lorsqu'il y a dissymétrie entre les populations de spins $\uparrow$ et $\downarrow$, la fréquence des collisions de l'électron dépend de l'orientation de son spin. Pourquoi ?

Lors d'une collision, l'électron change de vitesse, d'énergie, etc. Comme l'impose le principe d'exclusion de Pauli, deux électrons ne peuvent pas se trouver dans un même état. Par conséquent, toute collision qui amènerait un électron dans un état déjà occupé par un autre électron est interdite. Or, dans un conducteur magnétique contenant par exemple plus d'électrons $\uparrow$ que $\downarrow$, il est beaucoup plus difficile pour un spin $\uparrow$ de trouver une place libre parmi les états non occupés par ses semblables que pour un spin $\downarrow$. Par conséquent, les électrons dont le moment magnétique est orienté dans le sens de l'aimantation macroscopique subis-

sent moins de collisions que ceux d'orientation opposée (jusqu'à 20 fois moins par exemple dans le nickel).

Ainsi, la résistance électrique n'est pas la même pour le courant des électrons $\uparrow$ et le courant des électrons $\downarrow$. Voyons comment cette propriété conduit à l'effet de magnétorésistance géante. Ce dernier fait appel à un sandwich de deux couches magnétiques (du fer) encadrant une couche non magnétique (du chrome), l'épaisseur des couches étant de quelques nanomètres.

Imaginons d'abord que les deux couches magnétiques soient aimantées dans le même sens, disons $\uparrow$ (voir la figure 1). Le courant $\uparrow$ qui parcourt le sandwich rencontre dans chacune des trois zones une faible résistance, qui court-circuite la forte résistance subie par le courant $\downarrow$: on mesure aux bornes du dispositif une résistance peu élevée.

Que se passe-t-il si les couches magnétiques sont aimantées dans des sens opposés ? Le courant $\uparrow$ rencontre une faible résistance dans la première couche magnétique, mais une forte résistance dans la seconde. C'est l'inverse pour le courant $\downarrow$. *In fine*, les deux courants subissent en circulant dans le sandwich une résistance élevée.

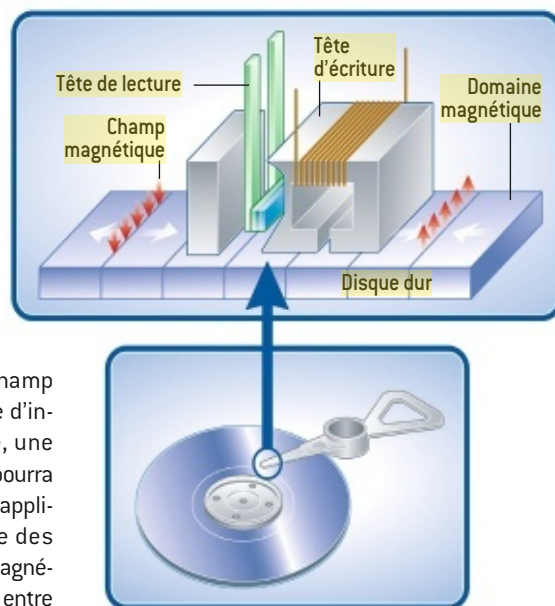
Ainsi, en jouant sur l'orientation relative des aimantations des deux couches magnétiques, on modifie la résistance du dispositif. Un champ magnétique extérieur étant capable d'inverser l'aimantation d'une couche, une mesure de la résistance du sandwich pourra renseigner sur le champ magnétique appliqué. C'est le principe de la lecture des disques durs modernes, où le champ magnétique est celui qui émerge à la frontière entre deux domaines du disque d'aimantations opposées (voir la figure 2).

Pour obtenir une haute sensibilité au champ, il faudrait multiplier le nombre de couches en sandwich si le courant est perpendiculaire. Mais un courant parallèle aux couches est une configuration plus favorable. Elles sont en effet assez minces pour que, lorsqu'un électron circule d'une borne à l'autre, il explore toutes les couches au gré de ses collisions : on a donc bien une

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>



2. DANS LES SYSTÈMES à disques durs d'aujourd'hui, la tête de lecture comporte un sandwich de couches magnétiques (en bleu). L'aimantation de l'une des couches est fixée, tandis que celle de l'autre couche est déterminée par le champ magnétique à la surface du disque. Ce champ magnétique est présent à la frontière entre deux domaines magnétiques d'aimantations opposées, et a deux sens possibles. La résistance électrique de la tête de lecture dépend donc du champ magnétique rencontré sur le disque, champ qui lui-même code l'information.

✓ BIBLIOGRAPHIE

C. Chappert, A. Fert et F. Nguyen Van Dau, *The emergence of spin electronics in data storage*, *Nature Materials*, vol. 6, pp. 813-823, novembre 2007.

J.-P. Nozières, *Électronique de spin-spintronique*, *Encyclopaedia Universalis*.

D. Awschalom et al., *La spintronique*, *Pour la Science*, n° 299, septembre 2002.

 Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr

différence de résistance selon le sens de l'aimantation des couches, qui exploite la longueur du dispositif plutôt que l'épaisseur des couches. Cette différence peut atteindre plusieurs dizaines de pour cent, soit un à deux ordres de grandeur de plus que pour la magnétorésistance classique.

C'est cette configuration d'un courant parallèle aux couches qu'utilisent les têtes de lecture des disques durs, avec une sensibilité bien meilleure que les anciens dispositifs (qui mesuraient le courant induit dans une petite bobine passant au-dessus des domaines magnétiques du disque).

Pour augmenter la densité d'informations, il a fallu réduire l'épaisseur de la couche d'enregistrement : avec une couche mince, il suffit d'un faible champ magnétique pour aimanter en écriture. Mais il faut être sensible à un champ magnétique très faible pour

la lecture, ce que peut réaliser le sandwich. L'une de ses deux couches magnétiques, plus épaisse, a son aimantation fixe ; l'aimantation de l'autre couche, plus mince, s'aligne avec le champ magnétique issu de la surface du disque. Ainsi, selon ce champ, les couches de la tête de lecture sont aimantées soit dans le même sens, soit en sens inverses : la résistance dans la tête varie et cette variation restitue l'information enregistrée.

La piste est si prometteuse que plusieurs équipes travaillent aujourd'hui sur l'extension de ce dispositif en intercalant un matériau semi-conducteur entre deux couches magnétiques : l'augmentation de la résistance est encore plus marquée. L'effet permet aussi d'envisager le développement de mémoires vives magnétiques... mais ces dernières n'ont pas encore dépassé le stade de prototypes.



france culture

VOYAGER DANS LE TEMPS

La marche des sciences
Aurélié Luneau
14h/15h - jeudi
En partenariat avec *Pour la science*

franceculture.fr

Photo : Marc Bourgeat - © Philippe Berruete - Courtesy galérie Vostok - ADAP Paris 2011