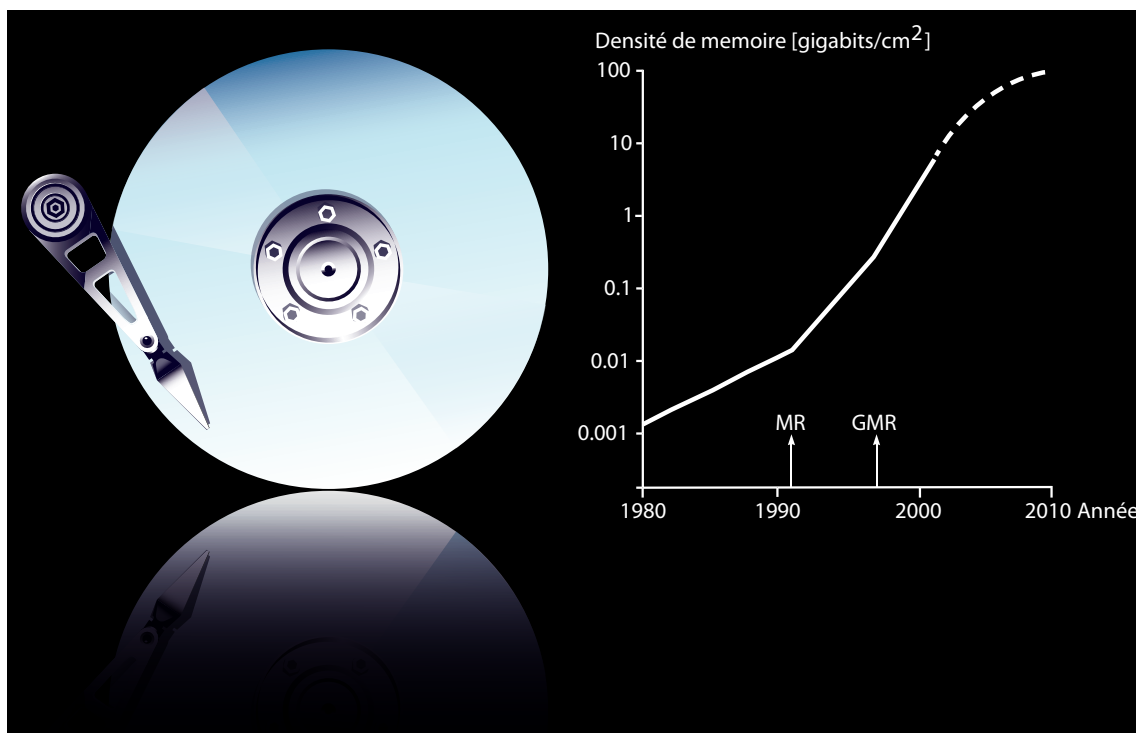


Le Prix Nobel de Physique 2007

*Le prix Nobel de physique 2007 est attribué conjointement à **ALBERT FERT** et **PETER GRÜNBERG** pour leur découverte de la magnétorésistance géante. Les applications de ce phénomène ont révolutionné les techniques permettant de lire l'information stockée sur disque dur. La découverte joue également un grand rôle pour les senseurs magnétiques ainsi que pour une nouvelle génération d'électronique. L'utilisation de la magnétorésistance géante peut être considérée comme une des premières applications importante de la nanotechnologie.*

Têtes de lecture pour une électronique de poche

Aujourd'hui, la miniaturisation toujours plus poussée de l'électronique est une évidence dans le monde des technologies de l'information. Le lancement chaque année de nouveaux ordinateurs plus puissants et moins encombrants ne nous étonne pratiquement plus. Les disques durs, entre autres, deviennent de plus en plus compacts. Le boîtier volumineux sous le bureau n'est bientôt plus qu'un souvenir, puisqu'on peut maintenant facilement stocker la quantité de données qu'il contenait dans un mince ordinateur portable. Et avec un lecteur de musique dans la poche de nombreux d'entre nous, personne ne se pose plus la question de savoir à combien de CD correspond la quantité de musique stockée sur ces disques durs miniatures. Depuis peu, on vient de lancer des disques durs d'un terabyte (mille milliards de bytes) pour les besoins domestiques du grand public.



Au vu du diagramme ci-dessus, qui présente l'accélération du rythme de la miniaturisation comme si elle suivait une loi de la nature, cette évolution technique peut paraître simple. En réalité, elle repose sur une interaction complexe entre les progrès de la recherche fondamentale et les avancées technologiques. Le Prix Nobel de Physique 2007 illustre cette interaction.

Pour obtenir des disques durs plus compacts, nécessaires, par exemple, à la conception des lecteurs de musique et des ordinateurs portables, il faut pouvoir stocker les données de façon très dense. L'information inscrite sur un disque dur consiste de secteurs aimantés dans différentes directions. L'une des directions d'aimantation correspond à un zéro et l'autre correspond à un un. Pour accéder aux données stockées sur le disque, une tête de lecture le balaie et enregistre les différentes directions des champs magnétiques. Pour construire un disque dur plus compact, il faut aussi réduire la taille de chaque bit magnétique, ce qui affaiblit chacun des petits champs magnétiques. Donc plus le stockage de données sur un disque dur est dense, plus la technique de lecture doit être sensible.

À la fin des années 1990, l'industrie standardisa une toute nouvelle technique développée pour les têtes de lecture des disques durs. C'est la raison déterminante expliquant l'évolution rapide des disques durs de plus en plus compacts. Cette nouvelle technique de lecture est basée sur un effet physique que les deux lauréats du Prix Nobel de Physique de cette année ont observé pour la première fois il y a presque 20 ans. Le Français Albert Fert et l'Allemand Peter Grünberg découvrirent en 1988, chacun au sein de leur propre équipe et indépendamment l'un de l'autre, ce qu'on appelle la magnétorésistance géante – *giant magnetoresistance GMR*, en anglais. C'est pour cette découverte qu'ils reçoivent le Prix Nobel de Physique.

De Lord Kelvin à la nanotechnologie

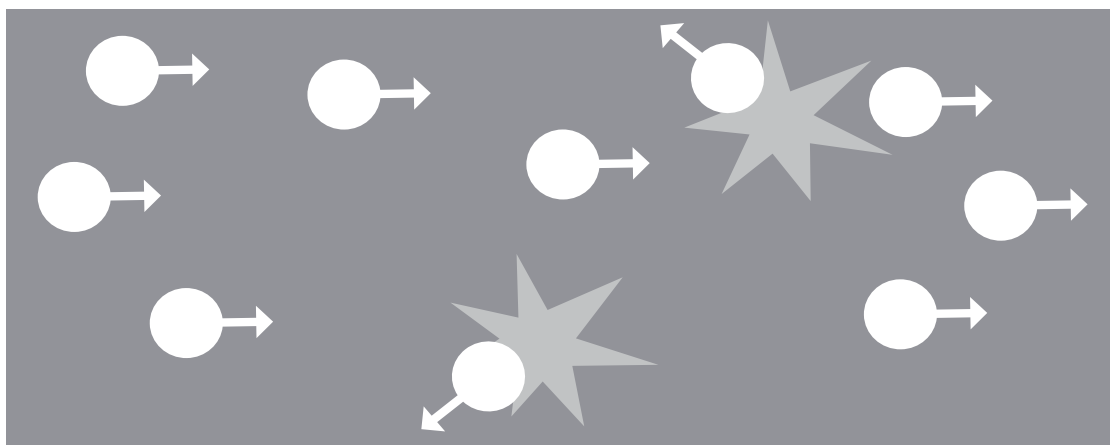
À l'origine, les têtes de lecture étaient équipées de bobines d'induction, pour tirer parti du fait qu'une altération du champ magnétique crée un courant par l'intermédiaire d'une bobine électrique. L'amélioration de cette technique ne se révéla cependant pas à la hauteur quand des disques durs toujours plus compacts nécessitèrent des têtes de lecture plus sensibles. On utilise néanmoins toujours des bobines d'induction pour inscrire l'information sur le disque dur.

On sait depuis très longtemps que la résistance électrique dans des matériaux tels que le fer peuvent être influencés par un champ magnétique. Le physicien britannique Lord Kelvin publia en 1857 un article dans lequel il démontrait que si un conducteur en fer est orienté le long d'un champ magnétique sa résistance électrique diminue, alors qu'elle augmente si le champ est placé perpendiculairement au conducteur. Cette magnétorésistance (MR – dite anisotrope) fut le plus proche précurseur de la magnétorésistance géante pour la lecture de l'information des disques durs. Mais peu à peu, les possibilités de développement s'épuisèrent aussi pour cette technique-là: il devint impossible d'améliorer suffisamment la sensibilité.

À partir des années 1970, des avancées technologiques permirent de créer des couches ultrafines de l'ordre du nanomètre. Ce fut la condition indispensable ouvrant la voie à la découverte de l'effet GMR. Un nanomètre est un milliardième de mètre et la nanotechnologie consiste à réaliser des matériaux d'épaisseur très fine, de typiquement quelques couches d'atomes. À ce niveau, la matière se comporte différemment et les chercheurs découvrent souvent des propriétés nouvelles. Cette observation n'est pas uniquement valable pour le magnétisme et la conduction électrique, elle peut aussi s'appliquer à la solidité ou aux propriétés chimiques et optiques du matériau en question. On peut considérer la technique GMR comme l'une des premières grandes applications de cette nanotechnique qui fait l'objet de discussions dans tant de contextes.

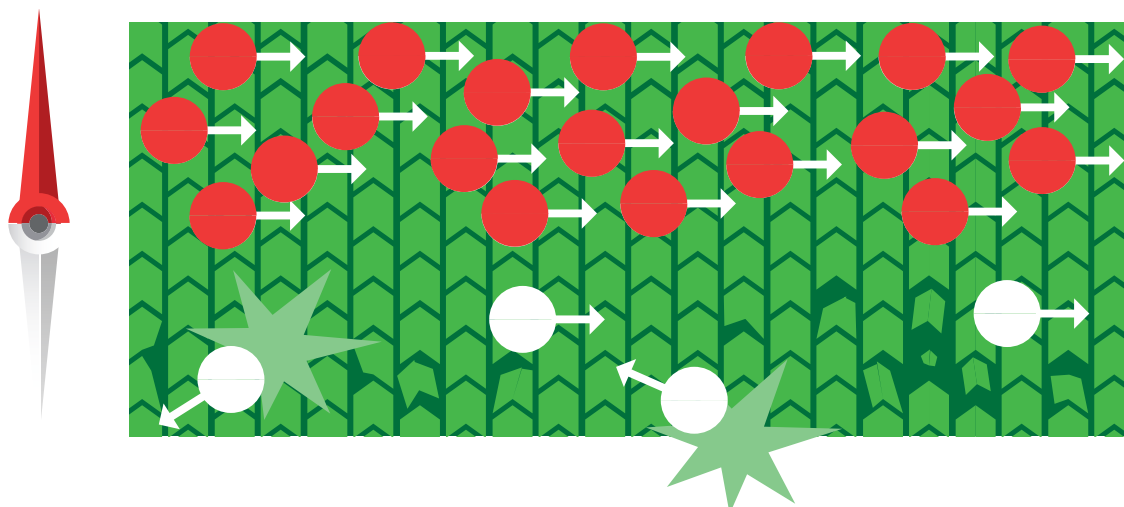
Résistance et aimantation

Dans un conducteur métallique, l'électricité est transportée sous forme d'électrons qui peuvent évoluer librement dans le matériau. Le courant vient du mouvement des électrons dans une certaine direction ; plus la voie est rectiligne, meilleure est la conduction. La résistance électrique se manifeste quand les électrons dévient de leur course rectiligne, à cause des irrégularités et des impuretés du matériau. Plus les électrons sont gênés dans leur trajectoire, plus la résistance est élevée.



La résistance électrique dans un conducteur est due aux collisions des électrons avec les irrégularités du matériau, les empêchant de se déplacer vers l'avant.

Dans des matériaux magnétiques, la propagation des électrons dépend aussi de l'orientation de l'aimantation. Dans le phénomène GMR, le fort couplage entre le champ magnétique et la résistance est due à la rotation intrinsèque de l'électron qui donne lieu à un moment magnétique – le spin, propriété quantique qui peut prendre deux orientations différentes. Dans un matériau magnétique, la plupart des spins des électrons pointent dans la même direction (parallèle), alors qu'un nombre minoritaire de spins pointent dans la direction opposée (antiparallèle). Ce déséquilibre donne lieu à l'aimantation et conduit à une résistance électrique qui dépend de l'orientation du spin des électrons.

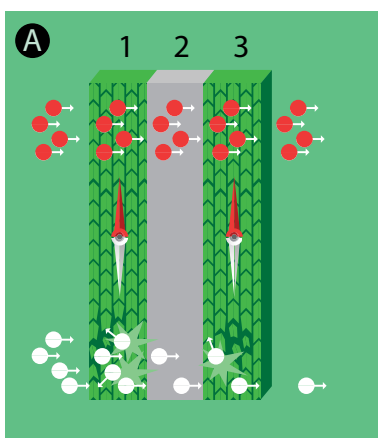


Dans un conducteur magnétique, le spin de la plupart des électrons (en rouge) est orienté parallèlement à la direction de l'aimantation. Une minorité des électrons (en blanc) ont un spin orienté dans la direction opposée. Dans cet exemple, les électrons dont le spin est orienté antiparalèlement à l'aimantation subissent le plus de collisions.

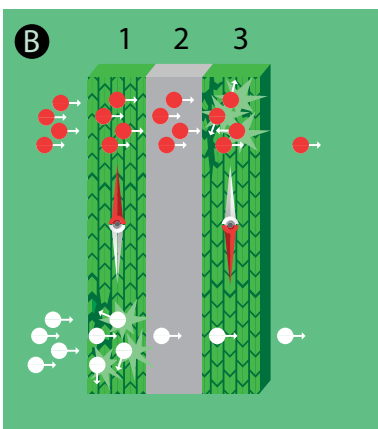
Magnétorésistance géante – GMR

Le système le plus simple mettant en évidence la magnétorésistance géante consiste en une couche de métal non magnétique placée entre deux couches de métal magnétique, comme indiqué sur la figure ci-dessous. Dans le matériau magnétique, ainsi qu'entre les matériaux magnétique et non magnétique, les électrons se propagent plus ou moins facilement suivant la direction de leur spin. Considérons le cas où les électrons de spin antiparallèle se propagent moins facilement que ceux avec un spin parallèle (1). La résistance est donc plus élevée pour les électrons de spin antiparallèle. Quand les électrons traversent ensuite le matériau non magnétique, ils se propagent tous aussi facilement, indépendamment du sens du spin (2). A l'interface et à l'intérieur de la couche magnétique suivante (3), les électrons avec un spin antiparallèle se propagent de nouveau moins facilement que ceux avec un spin parallèle.

Si l'aimantation des deux couches magnétiques est orientée dans la même direction, la plupart des électrons (avec un spin parallèle) les traversent facilement et la résistance totale est donc faible (A). Mais si l'aimantation des deux couches est opposée, les électrons auront un spin antiparallèle dans l'une des deux couches. Quelle que soit l'orientation du spin, peu d'électrons pourront traverser facilement la multicouche et la résistance sera donc élevée (B). Cet effet est utilisé dans une tête de lecture de la façon suivante: l'aimantation d'une des couches du système GMR situé dans la tête est fixe alors que celle de l'autre couche est influencée par les champs magnétiques inscrits sur le disque dur et balayés par la tête. Les directions des aimantations des deux couches seront donc alternativement parallèles et antiparallèles. En conséquence, la résistance, et donc le courant traversant la tête de lecture subiront des variations. Ce courant constitue le signal détecté par la tête: le courant fort peut correspondre à un un et le courant faible à un zéro.



Si la direction de l'aimantation est identique dans les deux couches magnétiques, les électrons de spin parallèle (rouges) peuvent se propager facilement sans subir beaucoup de collisions. Les électrons de spin antiparallèle (blancs), par contre, entrent en collisions. La résistance totale reste cependant peu élevée.



Si les directions d'aimantation dans les deux couches magnétiques sont opposées, les électrons vont tous être antiparallèles dans l'une des deux couches, subissant de nombreuses collisions. La résistance totale sera élevée.

La GMR est vite devenue une technologie standard

C'est dans le milieu des années 1980 que les physiciens se sont intéressés au potentiel des nanocouches magnétiques. Albert Fert et ses collègues élaborèrent une trentaine de couches, de quelques atomes d'épaisseur chacune, constituées alternativement de fer aimanté et de chrome. Pour réaliser cette expérience, il leur fallut travailler dans un environnement ultravide et maîtriser un gaz d'atomes de fer et d'atomes de chrome à très faible pression. Dans ces conditions, les atomes du jet moléculaire se fixent successivement à la surface qui se constitue couche par couche. L'approche de l'équipe de Peter Grünberg fut similaire. Dans leur cas la structure un peu plus simple n'était constituée que de deux ou trois couches de fer enserrant une ou deux couche de chrome.

En partie à cause du nombre de couches bien plus important dans le système de Fert, la magnétorésistance qu'il observa fut plus grande que celle observée par Grünberg. L'équipe française observa une variation de résistance liée au champ magnétique de 50 pour cent, alors que les chercheurs allemands constatèrent une différence d'au plus 10 pour cent. L'effet fondamental, ainsi que la physique sur lequel celui-ci se basait, étaient cependant les mêmes et les deux groupes comprirent qu'ils avaient mis en évidence un phénomène tout nouveau. Avec la magnétorésistance traditionnelle, les chercheurs n'auraient pas pu mesurer une différence supérieure à quelques pour cent dans la résistance électrique liée à l'orientation du champ magnétique. C'est à Albert Fert que l'on doit le terme *magnétorésistance géante*, *GMR*, pour décrire cet effet nouveau et il indiquait déjà dans son article d'origine que la découverte pourrait avoir une grande importance pour les applications. Peter Grünberg comprit lui aussi que le phénomène pouvait avoir des applications pratiques et il déposa un brevet en même temps qu'il soumit son premier article pour publication.

Pour exploiter cette technologie commercialement, il fallait cependant pouvoir fabriquer les couches industriellement. La méthode utilisée par Grünberg et Fert (nommée épitaxie) était coûteuse en temps et en argent, convenant donc mieux aux laboratoires de recherche que pour un processus technologique à grande échelle. L'Anglais Stuart Parkin, actif au Etats-Unis, franchit donc un grand pas quand il montra qu'il était possible d'atteindre le même effet à l'aide d'une technique de pulvérisation (en anglais sputtering) qui, entre autres, n'exigeait pas un ultravide si important et permettait une production en série des systèmes GMR. On s'aperçut tout simplement que l'effet GMR n'exigeait pas des couches aussi parfaites que l'on croyait à l'origine. Ce processus de fabrication relativement simple, combiné à la grande sensibilité des têtes GMR, explique leur rapide standardisation dans les disques durs dès le lancement de la première tête GMR en 1997.

Une nouvelle électronique – spintronique

La GMR ne fut pas seulement une percée technologique rendant possible la lecture d'informations stockées de façon très dense sur des disques durs. Ce fut la première étape de l'établissement d'une toute nouvelle discipline de l'électronique, parfois appelée spintronique. Ce qui la caractérise est l'exploitation du spin de l'électron, et non seulement de sa charge électrique, comme c'est le cas dans l'électronique traditionnelle. La spintronique est très dépendante des petites dimensions de la nanotechnique. Les électrons ne conservent notamment leur spin que sur des trajectoires très courtes. Dans des couches plus épaisses que quelques centaines de nanomètres, le spin change de direction avant que l'on ait le temps d'en tirer parti.

Un effet similaire à la magnétorésistance géante se produit lorsque le métal non magnétique des couches intermédiaires est remplacé par une couche fine de matériau isolant électrique. Le courant électrique n'est normalement pas transmis à travers la couche isolante, mais si elle est suffisamment mince, les électrons peuvent la traverser grâce à un effet quantique appelé effet tunnel. Ce phénomène est appelé TMR pour magnétorésistance tunnel. Cet effet conduit à des différences de résistance encore plus grandes pour des champs magnétiques très faibles. La nouvelle génération de têtes de lecture exploite cette technique.

Vers une mémoire universelle

La mémoire de travail magnétique, appelée MRAM, est une autre application de la spintronique qui commence à voir le jour. En plus du disque dur où l'information est stockée de façon permanente, l'ordinateur possède une mémoire de travail rapidement accessible, généralement définie par le sigle RAM (*random access memory*). Ce dispositif stocke temporairement l'information dont l'ordinateur a besoin pour travailler. Les mémoires de travail standard actuelles ne peuvent pas stocker l'information de façon permanente. Le texte qu'on tape sur l'ordinateur n'est écrit que dans la mémoire de travail. S'il survient une panne de courant ou si on éteint l'ordinateur, le texte est perdu. Ce n'est que lorsque le texte est sauvegardé qu'il est inscrit et stocké sur le disque dur de façon permanente.

La technologie MRAM permet, en exploitant l'effet TMR à la fois pour inscrire et lire, de disposer d'une mémoire rapidement accessible, qui, à la différence du disque dur plus lent, peut servir de mémoire de travail. De plus, la mémoire MRAM est permanente, indépendante de l'alimentation en énergie puisque, comme le disque dur, elle est basée sur des variations stables de l'orientation de l'aimantation des bits. Il est possible qu'après développement ultérieur, la mémoire MRAM devienne une sorte de mémoire universelle susceptible de remplacer à la fois mémoire traditionnelle et disque dur. La mémoire MRAM peut, par sa faculté de réunir « tout en un », jouer un rôle particulièrement considérable dans les systèmes informatiques intégrés, allant des cuisinières programmables aux moteurs de voitures.

La découverte de la GMR a donc ouvert la porte à une nouvelle science technique appelée Spintronique, qui utilise à la fois la charge et le spin des électrons. La nanotechnologie alors naissante a été une condition nécessaire à la découverte de la GMR. La spintronique constitue maintenant une force importante derrière le développement rapide de la nanotechnologie. Ce sujet est un exemple frappant où la science fondamentale et une nouvelle technique ont progressé côte à côte, s'entraînant mutuellement.

LIENS ET CONSEILS DE LECTURE

Sur le site de l'Académie des Sciences Royale Suédoise, www.kva.se, ainsi que sur le site <http://nobelprize.org>, se trouvent des informations supplémentaires sur la prix de cette année. On peut y voir la conférence de presse en vidéo. Il y a aussi un article scientifique en anglais donnant le contexte avec références aux articles originaux. Des informations supplémentaires sur des activités et expositions autour des prix Nobel se trouvent sur la page www.nobelmuseum.se.

Articles de revue

« *Giant steps with tiny magnets* » d' Agnes Barthélémy, Albert Fert et collaborateurs, *Physics World* Nov. 1994 (anglais).

« *Spintronics* » de Dirk Grundler, *Physics World* Avril 2002 (anglais).

Articles scientifiques originaux

« *Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices* » de M.N. Baibich et collaborateurs, *Physical Review Letters* Vol. 61, No. 21 (1988). (Article original d'Albert Fert).

« *Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange* » de G. Binasch et collaborateurs, *Physical Review B*, Vol. 39, No. 7 (1989). (Article original de Peter Grünberg).

Lien

Présentation de la technique GMR sur le site d'IBM:

www.research.ibm.com/research/gmr.html

LAUREATS

ALBERT FERT

Unité Mixte de Physique CNRS/ THALES,
Université Paris-Sud
Domaine de Corbeville
FR-91404 Orsay
FRANCE
www2.cnrs.fr/en/338.htm

Citoyen Français. Né en 1938 à Carcas-
sonne, France. Doctorat en 1970, à
l'Université Paris-Sud, Orsay, France.
Professeur à l'Université Paris-Sud,
Orsay, France, depuis 1976. Directeur
scientifique de l'Unité Mixte de Physique
CNRS/Thales, Orsay, France, depuis 1995.

PETER GRÜNBERG

Forschungszentrum Jülich GmbH
Institut für Festkörperforschung
DE-52425 Jülich
ALLEMAGNE
www.fz-juelich.de/portal/gruenberg_e

Citoyen Allemand. Né en 1939 à Pilsen.
Doctorat en 1969, au Technische
Universität Darmstadt, Allemagne.
Professeur à l'Institut für Festkörper-
forschung, Forschungszentrum Jülich,
Allemagne, depuis 1972.