

La magnétorésistance géante

Introduction

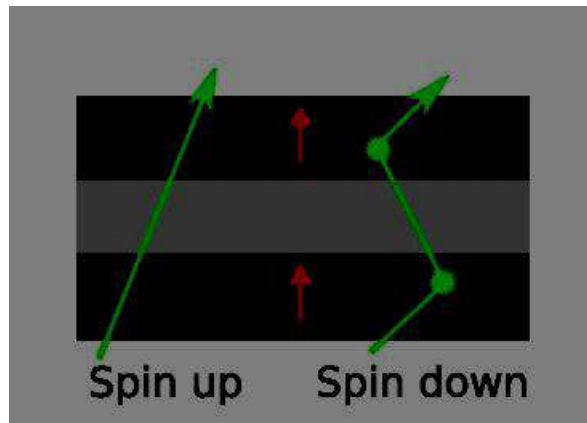
L'informatique fait aujourd'hui partie intégrante de notre mode de vie moderne. La possibilité d'y enregistrer une quantité gargantuesque de données y est sûrement pour beaucoup dans notre engouement pour les ordinateurs. Il est toutefois intéressant de noter que, derrière les capacités de stockage chaque année plus élevées (il n'est pas rare de trouver aujourd'hui des disques durs de plusieurs centaines de gigaoctets), la technologie utilisée, la magnétorésistance géante, n'est que très récente (à peine plus de 20 ans). La magnétorésistance géante est, également, un exemple parfait pour montrer à quel point les avancées de certains domaines physiques peuvent changer nos modes de vie et contribuer au développement des industries de pointe.

La magnétorésistance géante, son histoire, son principe

La Magnétorésistance Géante, ou Giant Magnetoresistance (abrégé en GMR), repose sur un principe physique qui, lui, est bien plus ancien, puisqu'il a été mis en évidence en 1857 par William Thomson, plus connu sous le nom de Lord Kelvin : la magnétorésistance. Ce phénomène est le changement de résistance d'un conducteur lorsqu'il est placé dans un champ magnétique extérieur [1] (il écrit : «...», ce principe est appelé ...). Grâce à cela, Lord Kelvin a pu modifier «à sa guise» la résistance d'un matériel, et donc de contrôler le nombre de charges électriques traversant un conducteur. L'intérêt principal était bien sûr de pouvoir détecter ces changements de magnétisation, et c'est sur ce principe que reposaient les premiers disques durs. Toutefois, cette découverte était relativement limitée puisqu'elle ne permettait qu'un changement de résistance de l'ordre de 5%. Afin d'augmenter la capacité des disques durs tout en augmentant pas leur taille, il était en effet nécessaire de réduire de manière drastique la taille des parties à magnétiser, ce qui avait pour effet de rendre la lecture extrêmement difficile, tant les différences devenaient minimes. Jusque dans les années 1980, il était considéré que peu de progrès pouvaient être effectués sur le domaine de la magnétorésistance.

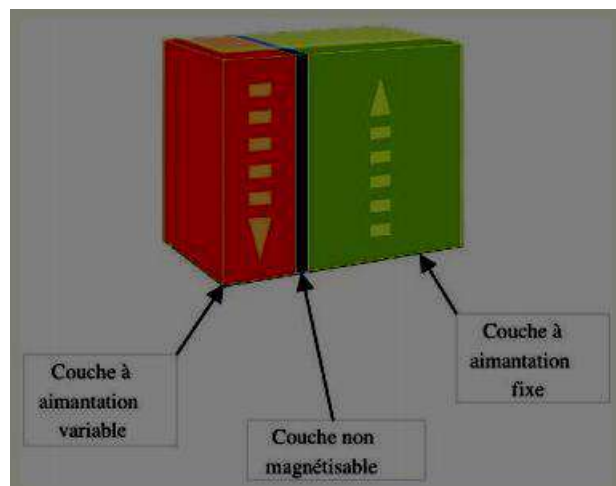
Mais c'était sans compter deux équipes de chercheurs, l'une dirigée par Albert Fert de l'université de Paris Sud-Orsay, et l'autre dirigée par Peter Grünberg du Centre de Recherche de Jülich (Allemagne) qui, conjointement (ils ont d'ailleurs décidé de se partager le Prix Nobel, qu'ils ont reçu en 2007 [1, 2]), découvrent en 1988 la magnétorésistance géante (car elle repose sur une «multicouche magnétique», nous en reparlerons plus loin). Cette nouvelle découverte permet surtout d'offrir une variation de résistance bien plus importante, de l'ordre de 50% (à comparer aux quelques pour cents de la magnétorésistance de Lord Kelvin !).

Cette découverte repose notamment sur l'électronique du spin, et nous allons donc détailler ce principe. Dans le cas d'un électron, le spin est une propriété quantique, au même titre que sa masse et sa charge électrique. En présence d'un champ magnétique, on peut distinguer deux types de spins pour les électrons : les «spins parallèles» ou «spin-up» (c'est-à-dire les électrons dont le spin est dans «le même sens» que l'aimantation de la couche) et les «spins antiparallèles» ou «spin-down» (c'est-à-dire les électrons dont le spin est dans «le sens opposé» de l'aimantation de la couche). De manière imagée, dans les matériaux les électrons circulent «plus ou moins facilement» suivant le spin des électrons : un électron spin-down circulera facilement dans un matériel aimanté dans la même direction, alors qu'au contraire, il aura «plus de difficulté» à traverser un matériel aimanté dans la direction opposé. Voici une illustration tiré de [3] montrant une structure de deux matériaux magnétiques (en noir), séparés par un matériel non magnétique (en gris). Les flèches rouges indiquent la magnétisation des matériaux, qui est alignée avec la direction du spin-up :

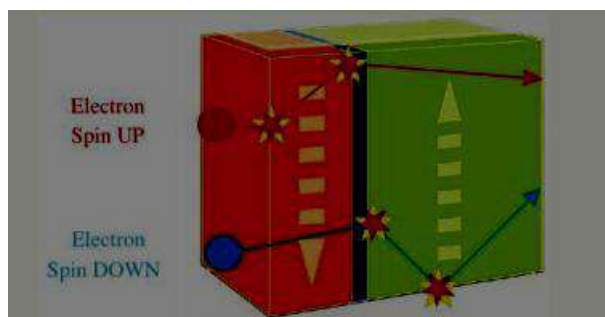


Comme nous pouvons le voir, l'électron qui possède un spin-up traverse la structure de manière très aisée, tandis que l'électron qui possède un spin-down est plus diffusé et aura donc plus de mal à traverser le matériel. L'intérêt est très vite clair : la résistance augmente si peu d'électrons passent, et elle diminue si les électrons passent facilement. La spintronique (électronique du spin) a donc pour but de contrôler le mouvement des particules en agissant sur leur spin, et donc de modifier la résistance électrique.

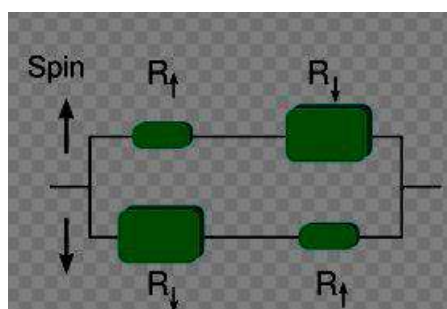
La magnétorésistance géante tire parti de ce principe fondamental. Elle est en effet composée d'un empilement de films très minces (à peine plus épaisses que quelques rangées d'atomes, soit de l'ordre du nanomètre), en alternant des couches ferromagnétiques (c'est-à-dire des matériaux qui ont la capacité de s'aimanter très fortement en présence dans un champ magnétique, comme le fer, le cobalt ou le nickel) et de couches non magnétiques (comme le chrome). Parmi ces couches ferromagnétiques, certaines sont à aimantation variable, tandis que d'autres sont à aimantation fixe, comme représenté sur le schéma ci-dessous (issu de [4]). À noter que tous les schémas utilisent ici deux couches ferromagnétiques, toutefois les recherches initiales concernaient un empilement de 10 couches et plus) :



Si nous souhaitons augmenter la résistance, il devient clair qu'il faut avoir deux orientations différentes, afin de «filtrer» les deux types de spin :

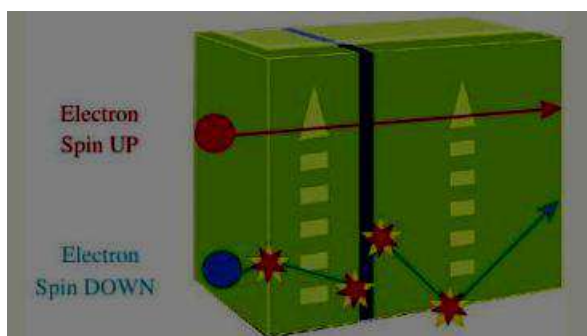


Cette orientation est appelée «magnétisation antiparallèle», et un diagramme du circuit peut se représenter ainsi :

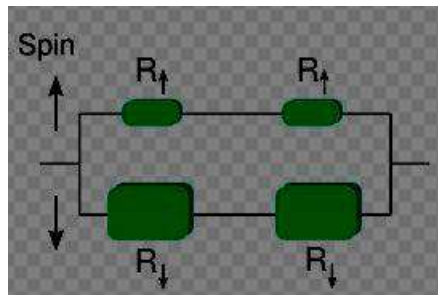


Le trajet du haut est celui emprunté par les électrons «spin-up», et celui du bas par les électrons «spin-down». De ce fait, si on pose $R \uparrow$ la résistance des électrons spin-up traversant les couches ferromagnétiques et $R \downarrow$ la résistance des électrons spin-down traversant les couches ferromagnétiques, on a, en additionnant les résistances, $R \uparrow + R \downarrow$ en haut et en bas. Puis, en utilisant les formules d'additions des résistances en parallèle ($\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$), on a $\frac{1}{R_{antiparallèle}} = \frac{1}{R \uparrow + R \downarrow} + \frac{1}{R \uparrow + R \downarrow} = \frac{2}{R \uparrow + R \downarrow}$ d'où $R_{antiparallèle} = \frac{1}{2} * (R \uparrow + R \downarrow)$.

Au contraire, si nous souhaitons diminuer la résistance, il suffit de faire en sorte que les matériaux soient tous aimantés de la même façon, afin de faire en sorte que tous les électrons d'un type de spin (up ou down) passent sans difficulté :



Cette orientation est appelée une magnétisation parallèle, et un diagramme du circuit peut se représenter ainsi :



En suivant les mêmes conventions que précédemment, on a, en haut : $2 * R \uparrow$ et en bas $2 * R \downarrow$. En additionnant ces deux résistances, on a $\frac{1}{R_{parallèle}} = \left(\frac{1}{2 * R \uparrow}\right) + \left(\frac{1}{2 * R \downarrow}\right) = \frac{2 * (R \uparrow + R \downarrow)}{4 * R \uparrow * R \downarrow} = \frac{R \uparrow + R \downarrow}{2 * R \uparrow * R \downarrow}$ d'où

$$R_{parallèle} = \frac{2 * R \uparrow * R \downarrow}{R \uparrow + R \downarrow}.$$

Si on calcule la différence de résistance, on a :

$$\Delta R = R_{parallèle} - R_{antiparallèle} = \frac{2 * R \uparrow * R \downarrow}{R \uparrow + R \downarrow} - \frac{R \uparrow + R \downarrow}{2} = \frac{4 * R \uparrow * R \downarrow - (R \uparrow + R \downarrow)^2}{2 * (R \uparrow + R \downarrow)}$$

$$\Delta R = \frac{4 * R \uparrow * R \downarrow - R \uparrow^2 - R \downarrow^2 - 2 * R \uparrow * R \downarrow}{2 * (R \uparrow + R \downarrow)} = \frac{2 * R \uparrow * R \downarrow - R \uparrow^2 - R \downarrow^2}{2 * (R \uparrow + R \downarrow)}$$

$$\Delta R = -\frac{1}{2} * \frac{(R \uparrow - R \downarrow)^2}{R \uparrow + R \downarrow}$$

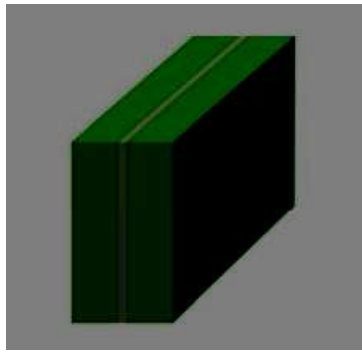
Il est donc évident que la résistance dans la magnétisation antiparallèle est supérieure à celle de la magnétisation parallèle : la magnétorésistance géante est née !

En d'autres termes, et afin de résumer le principe, on peut dire que, dans un modèle simplifié avec deux couches ferromagnétiques et une couche non-magnétique, si on utilise une magnétisation antiparallèle, la moitié des électrons (on peut en effet considérer pour simplifier que 50% des électrons ont un spin-up, et les 50% restants un spin-down) passeront sans problème la première couche, tandis qu'ils rencontreront une grande résistance lors de la traversée de la deuxième couche, et vice-versa pour l'autre type d'électrons. Donc, théoriquement, 100% des électrons rencontreront une grande résistance.

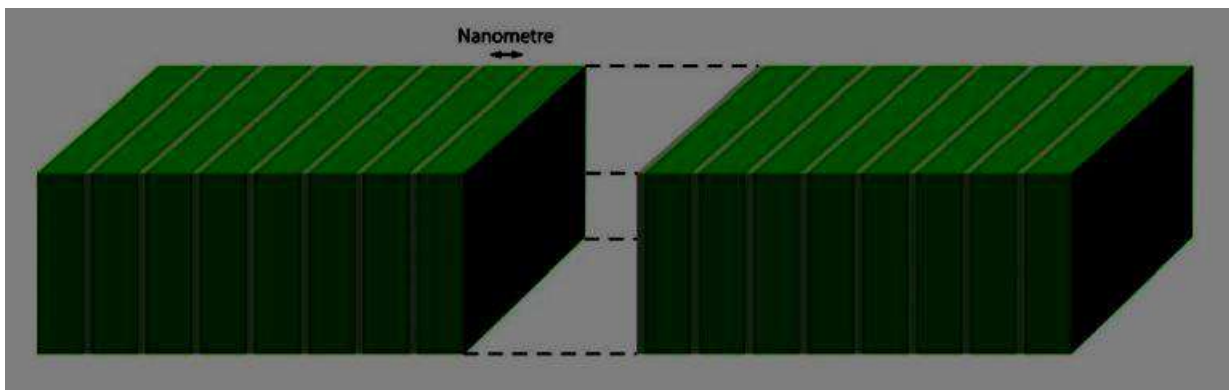
En appliquant un champ magnétique, même minime, à ce dispositif, les aimantations des couches vont s'aligner, du fait de leur ultra-finesse, ce qui laissera donc «le champ libre» à la moitié des électrons, et donc une augmentation du courant. Comme l'explique Albert Fert, l'un des deux inventeurs de ce principe, «La variation de la résistance électrique est plusieurs dizaines, voire centaines de fois plus importante que dans une couche de métal seule.» [5] Pour paraphraser son expression, il s'agit d'un «système de vannes à électrons actionné par un petit champ magnétique».

Les résultats de la magnétorésistance géante

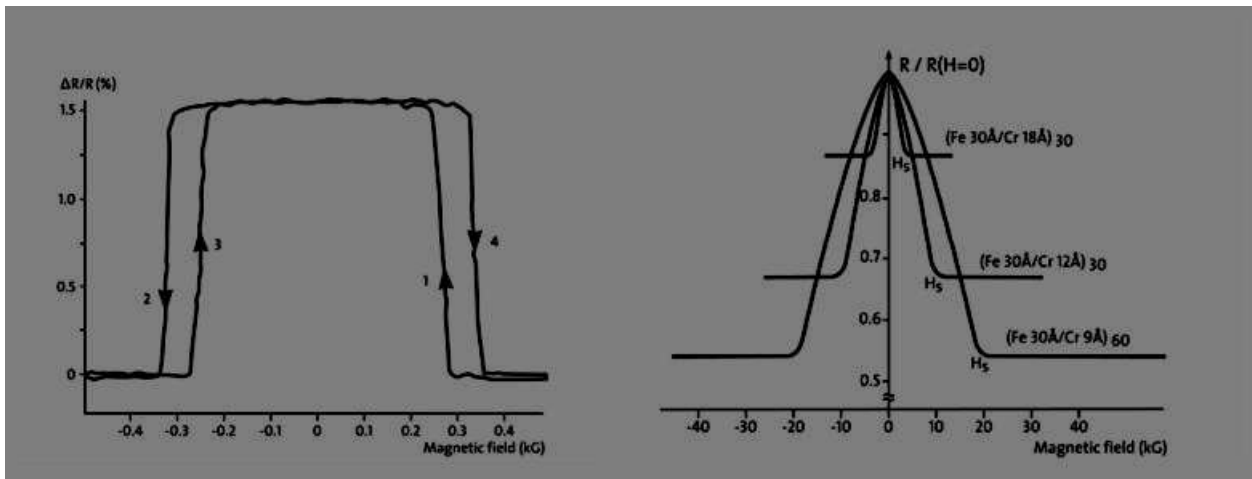
Après avoir parlé du principe de la magnétorésistance géante, nous allons à présent étudier les résultats obtenus. Les deux équipes de chercheurs ont en effet pris des chemins très légèrement différents : l'équipe de Peter Grünberg a utilisé un système similaire à ceux des schémas, constitué de trois couches : deux couches ferromagnétiques de fer, séparées par une couche de chrome [1] :



L'équipe d'Albert Fert a, elle, empilé plusieurs sous-couches composées d'une couche ferromagnétique de fer et une autre de chrome (jusqu'à 60 !) :



Voici les résultats rapportés par les deux équipes (en abscisse, nous avons le champs magnétique extérieur, et en ordonné le changement de résistance) :



Le graphique de gauche est celui de l'équipe de Grünberg, à température ambiante. On peut donc apercevoir une baisse de la résistance d'environ 1,5% à température ambiante, tandis qu'ils ont rapportés des baisses de 10% à une température de 4K.

Le graphique de droite est celui de l'équipe de Fert. Ces résultats ont été observés pour une température extérieure de 4K, et on peut apercevoir une diminution de la résistance de presque 50% !

Bref, autant dire que ces résultats étaient, à l'époque, particulièrement encourageants, ce qui n'a évidemment pas échappé aux oreilles de industriels qui se sont empressés d'exploiter cette technologie.

Les applications de la magnétorésistance

En effet, la découverte d'une nouvelle méthode permettant d'augmenter la capacité de stockage sans sacrifier la taille d'un disque dur a très vite séduit les industriels. Il convient dans un premier temps d'expliquer comment fonctionne un disque dur [3].

Certaines parties du disque sont d'abord magnétisées, puis, lorsque nous souhaitons y accéder, certaines directions de magnétisations sont interprétées comme un 1 binaire, et d'autres directions comme un 0 binaire, ce qui permet donc de sauvegarder des données.

A FAIRE

Une nouvelle technologie: l'effet tunnel

L'effet tunnel est un effet quantique qui permet à une particule de franchir un obstacle, même si cela lui demande plus d'énergie que ce dont elle dispose, ce qui est impossible dans le monde macroscopique. Les particules ont un comportement probabiliste : il y a toujours une petite probabilité qu'elles se retrouvent de l'autre côté, comme si elles passaient "à travers" la barrière ou au dessus d'une barrière moins grande.

Par exemple à notre échelle, si on prend une boule et que lui donne de l'élan pour franchir une petite bosse on obtient 2 cas de figure:

- le premier cas, l'élan est suffisant et la boule franchie la bosse (on note une diminution de sa vitesse pendant l'ascension puis une accélération à la descente).
- second cas l'élan n'est pas suffisant et donc la boule ne franchie pas la bosse.

Cependant, on a remarqué, en physique quantique, que certaines particules pouvaient franchir un obstacle nécessitant une énergie supérieur à la particule en question.

- on obtient donc un troisième cas ou la boule (dans un exemple à l'échelle macroscopique) franchie l'obstacle sans que l'on ai de force à exercer au départ.

La magnétorésistance à effet tunnel s'avère être l'une des techniques de demain, puisqu'elle est à la base de la mémoire magnétique (MRAM [7]) et des capteurs de disques durs. La mémoire MRAM (pour Magnetic Random Access Memory) est une mémoire non volatile, à l'inverse de la RAM, ce qui signifie que les données n'ont pas besoin d'énergie pour être conservées, ce qui permet notamment un démarrage plus rapide (tout comme les accès, qui seront bien plus rapides que ceux de la mémoire RAM actuelle).

La MRAM utilise donc le spin des électrons pour stocker l'information. L'avantage est que les spins des électrons n'ont pas besoin de courant et donc une mémoire non-volatile. Ensuite pour lire l'information, il suffit de soumettre à l'endroit désiré par un courant électrique et de mesurer l'intensité de sortie. En effet la magnétorésistance géante est avant tout une résistance. Il est donc facile de trouver l'orientation d'un électron quand on connaît l'intensité du courant de départ et celui de sortie. Seulement des problèmes persistent: le temps d'écriture est relativement long car l'orientation d'un spin influe sur d'autres spins, mais des études réduisent ce temps de façon significative (quelques dizaines de nanosecondes). Ensuite le coup élevé avec 25\$ pour 0,5Mb de MRAM alors que l'on obtient 256Mb de mémoire flash.

Conclusion

La magnétorésistance géante a donc, sans nul doute, été l'une des découvertes physiques qui a le plus contribué à l'évolution de l'informatique et des nouvelles technologies en général. Après de nombreuses années passées à ne plus croire à une réelle évolution de la magnétorésistance, les découvertes faites sur la magnétorésistance géante et, notamment, la spintronique, ont redonnées un nouveau souffle à ce domaine [6]. De nombreuses voies se sont ouvertes et s'annoncent particulièrement prometteuses : la magnétorésistance à effet tunnel, la magnétorésistance colossale, la magnétorésistance balistique ou, encore plus fort, la magnétorésistance extraordinaire !

Bibliographie

- [1] *Kungl. Vetenskapsakademien, The Royal Swedish Institute Of Science*, «The Discovery Of Giant Magnetoresistance» (http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2007/phyadv07.pdf)
- [2] *Kung. Vetenskapsakademien, The Royal Swedish Institute Of Science*, «The 2007 Nobel Prize In Physics 2007» (http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2007/press.html)
- [3] *University Of Tennessee, 2008, Zachary Barnett*, «Giant Magnetoresistance» (http://sces.phys.utk.edu/~dagotto/condensed/HW1_2008/GMR_1_FINAL.pdf).
- [4] *Printemps des Sciences 2006*, «Giant Magnetoresistance» (http://www.ulb.ac.be/infosciences/pdscd2006/docs/phys_disque4.pdf)
- [5] *Université de Genève*, entretien avec Albert Fert, co-inventeur de la Magnétorésistance Géante (<http://www.unige.ch/presse/Campus/campus89/Invite.html>)
- [6] *Sciences.gouv.fr*, «Le prix Nobel de Physique 2007 : la magnétorésistance géante» (<http://www.science.gouv.fr/fr/dossiers/bdd/res/2734/le-prix-nobel-de-physique-2007-la-magnetoresistance-geante/>)
- [7] *Wikipedia*, «Magnetic Random Access Memory» (<http://fr.wikipedia.org/wiki/MRAM>)
- [8] *Solid State Physics, 2001, Ehrenreich H. & Spaepen F.*, «Perspectives Of Giant Magnetoresistance»; (http://physics.unl.edu/~tsymbal/tsymbal_files/Published%20papers/GMR-review-preprint.pdf)