

# Entretien avec Albert FERT

Prix NOBEL de Physique 2007

DOCUMENT SNES

**La spintronique se préoccupe d'une grandeur typiquement quantique, le spin, que l'on se représente souvent à l'aide d'une toupie : alors, toupie or not toupie ?**

La spintronique est une électronique qui exploite non seulement la charge électrique des électrons mais aussi le spin. Si l'on veut fournir une image de ce dernier, on peut dire que l'électron tourne sur lui-même comme une toupie, une toupie quantique dont la vitesse de rotation autour de son axe est quantifiée et ne peut prendre que deux valeurs possibles opposées. On parle alors de spin " vers le haut " et " vers le bas ". Cette rotation génère aussi le petit aimant qui est porté par chaque électron et est à l'origine de l'aimantation des matériaux magnétiques.

La démarche de base de la spintronique consiste à placer sur le parcours des électrons de très fines couches ferromagnétiques, genre fer, cobalt. Ma thèse avait permis de confirmer et de quantifier la suggestion par Neville Mott que, dans un matériau ferromagnétique conducteur tel le fer, la mobilité des électrons libres était très différente suivant que l'orientation de leur spin était identique ou opposée à celle de l'aimantation. On peut ainsi avoir des mobilités des électrons des deux directions de spin différentes par un facteur 20 : c'est un peu comme si, sur une autoroute, la circulation se faisait sur deux files de voitures dont l'une allait 20 fois plus vite que l'autre.

**Le freinage des plus lents est dû au champ électromagnétique local ?**

Non. Dans un métal ferromagnétique, les 2 types d'électrons ont des fonctions d'onde différentes, et donc des comportements dissemblables. On peut même accentuer l'asymétrie par introduction d'impuretés qui vont carrément arrêter les électrons d'une direction de spin et laisser passer les autres en jouant ainsi le rôle de " filtres à spin ". Le concept de magnétorésistance géante (GMR) existait déjà dans certaines expériences de ma thèse sur du nickel dopé avec deux types d'impuretés. Ce concept pouvait être mieux exploité dans des empilements de couches magnétiques d'épaisseur nanométriques mais l'élaboration de couches aussi fines était hors

de portée des technologies en 1970. J'ai travaillé sur d'autres problèmes dans les années 70 et, au milieu des années 80, il est apparu que les progrès de la fabrication de couches minces, par dépôt sous ultravide, ouvraient de nouvelles perspectives. J'ai alors noué une collaboration pour l'élaboration de multicouches par la méthode de jet moléculaire avec une équipe de Thomson-CSF dirigée par un de mes anciens doctorants. La combinaison de cette technologie de pointe et des idées de base sur l'influence du spin dans les propriétés de mobilité des électrons a alors conduit à la découverte de la GMR.

**En quoi consiste donc cette magnétorésistance géante(GMR) ?**

La GMR est la chute considérable de la résistance électrique d'une multicouche magnétique provoquée par un champ magnétique. La multicouche est, par exemple, un empilement de couches magnétiques de fer alternant avec de très fine couches de chrome ou de cuivre. Le concept est de filtrer les électrons par 2 couches ferromagnétiques successives, comme on filtre la lumière grâce à un polariseur et un analyseur. Si les 2 couches ont des aimantations d'orientations opposées, tous les électrons sont freinés, soit par la 1ère couche, soit par la 2ème, et la résistance électrique est grande ; si les 2 couches ont des aimantations de même orientation, les électrons qui peuvent traverser la 1ère traversent aussi la 2ème et la résistance est petite. Un champ magnétique, en alignant les aimantations, fait passer de la première à la deuxième situation et ouvre la porte au courant.

**En quelque sorte, un contrôle du courant par un autre courant ?**

Non, c'est une transformation d'information magnétique en signal électrique. Dans notre ordinateur, l'information magnétique inscrite sur le disque dur génère un champ (magnétique) qui aligne les aimantations de la multicouche magnétique de la tête de lecture. Le courant qui en résulte est alors en rapport direct avec l'information présente sur le disque dur et permet sa lecture.

Ceci étant, la magnétorésistance géante n'est, pour moi, qu'une simple étape d'un long processus qui a commencé avec de la recherche fondamentale sur les effets du spin et s'est poursuivi avec la spintronique (exploitant d'autres effets du spin). La GMR est la plus médiatisée en raison de ses applications, immédiates et faciles à comprendre. L'amélioration de la sensibilité des têtes de lecture par la GMR a

permis de détecter des champs magnétiques de plus en plus petits, donc des inscriptions plus petites que l'on peut alors implanter en plus grand nombre : on est passé de 1 à 600 gigabit/pouce carré. Du coup, il est devenu possible de faire des disques durs de la taille d'une pièce de monnaie et d'appliquer cette technologie à l'électronique portable (Ipod, téléphones mobiles, appareils photo numériques,...). Les têtes de lecture actuelles utilisent la GMR avec un courant parallèle aux couches. Avec les futures têtes de lecture où le courant sera perpendiculaire aux couches, la capacité des disques devrait encore augmenter d'un ordre de grandeur, c'est-à-dire d'un facteur voisin de 10.

De façon plus générale, la GMR et les autres phénomènes de spintronique résultent du croisement entre des idées de base, concernant l'influence du spin sur la conduction électrique, et du progrès des nanotechnologies. Les nanotechnologies sont présentes dès les premières expériences de GMR réalisées avec le fer-chrome pour lesquelles le meilleur résultat était obtenu avec une épaisseur de couche de chrome de 0,9 nanomètre seulement. C'est la taille de la tête qui permet une telle capacité ?

Une telle capacité vient de la sensibilité de la détection de bits très petits par GMR. La taille de la tête est relativement accessoire ; bien sûr, elle doit être plus petite que la taille des bits qui ont des dimensions voisines de 40-50 nanomètres. Mais les dimensions réellement importantes correspondent aux épaisseurs des couches de quelques nanomètres dans la multicouche.

**Tous les électrons bloqués à cause de leur spin s'accumulent-ils indéfiniment ?** Non, ils ne s'accumulent pas. On a simplement des débits différents pour les deux catégories d'électrons, comme sur une autoroute où les débits de voitures seraient différents si la vitesse était fixée à 20 et 100 km/h dans deux voies parallèles. Les phénomènes d'accumulation de spin apparaissent dans d'autres phénomènes de spintronique mais pas dans la GMR classique.

**Quelles sont vos recherches actuelles ?**

Il y a d'abord la magnétorésistance par effet tunnel (TMR), qui ressemble à la GMR mais avec 2 couches magnétiques séparées par une fine couche isolante (au dessous d'un nanomètre). La TMR exploite un phénomène quantique appelé effet tunnel. Maintenant, nous travaillons beaucoup sur le transfert de spin : c'est un peu le contraire de la GMR en ce sens que l'on peut commander l'orientation

d'une couche aimantée grâce au courant de spin des électrons qui y sont injectés et y remplacent les spins d'orientation initiale ; le transfert de spin sera utilisé pour la prochaine génération de mémoire MRAM (mémoire vive magnétique). La GMR détectait, en lecture, une aimantation à l'aide d'un courant tandis que, là, on commande, en écriture, une aimantation avec un courant électrique. Dans un autre type d'expériences, on peut ainsi engendrer une précession de l'aimantation et des signaux radio de fréquence comprise entre 0,1 et 50 GHz : il y aura beaucoup d'applications dans les télécoms.

**La quantité d'électrons nécessaires pour opérer un tel transfert doit être importante ?**

Oui, même si l'on travaille sur de petits échantillons, puisque, en simplifiant, il faut autant de nouveaux électrons (à spin d'orientation opposée) qu'il y avait d'anciens (à spin d'orientation initiale). On aboutit à des densités de courant importantes. Nos recherches actuelles concernent aussi la synchronisation d'oscillateurs à transfert de spin et à l'utilisation de semi-conducteurs en spintronique pour fabriquer des composants (dispositifs logiques, transistors, etc) exploitant aussi le potentiel des semi-conducteurs. Sans oublier la spintronique moléculaire, cousine de l'électronique moléculaire. Exemple d'application prévue des recherches actuelles : les MRAM de la prochaine génération (ST-RAM) qui utiliseront l'écriture d'informations par transfert de spin. J'explique brièvement l'amélioration que cela devrait apporter à l'informatique. Quant nous allumons aujourd'hui notre ordinateur, à cause de l'accès très lent (1 milliseconde) à la mémoire permanente du disque dur, une partie de cette mémoire est transférée sur des RAM (dites mémoires vives) d'accès plus rapide (1 nanoseconde) mais volatiles (elles ne conservent l'information que l'ordinateur allumé). Ce transfert de disque dur à RAM prend quelques minutes. Il faut aussi rafraîchir (réécrire) les RAM régulièrement. Les ST-RAM seront composées de très petites cellules mémoire, écrites par transfert de spin et lues par TMR, qui combineront accès rapide et mémoire permanente. Exemple d'avantage : un démarrage quasi-immédiat de l'ordinateur grâce à l'information permanente stockée dans les ST-RAM. Comme d'autres disciplines (biologie, chimie), la physique a reçu une forte impulsion des nouvelles nanotechnologies. Mais les nanotechnologies ne sont qu'un outil au service de la physique fondamentale.

**Pourquoi le magnétisme est-il omniprésent**

**dans le stockage de l'information, alors que la lumière est bien plus rapide ?**

En effet, même si la lumière polarisée peut détecter plus rapidement une aimantation, le phénomène de diffraction limite approximativement la taille minimale de la zone lue à celle de la longueur d'onde de la lumière, soit quelques centaines de nm ; cela a été un obstacle important à la miniaturisation, même si certaines techniques permettent d'aller un peu au delà de la limite de la longueur d'onde. Il y a 20 ans, les disques durs magnétiques et les disques magnéto-optiques (réinscriptibles) étaient en compétition : le disque magnétique l'a emporté car il a permis des dimensions plus petites des bits de stockage.

**En cette période de réforme, quelle est la situation de la recherche (en physique) ?**

Il y a de bons laboratoires en France. Aujourd'hui, les recherches de pointe s'effectuent aux Etats-Unis, en Europe, au Japon, avec l'arrivée prochaine prévue de pays émergents comme la Chine, l'Inde, la Corée du Sud, Taïwan. Que ce soit par le nombre de prix Nobel ou par celui de ses publications, l'Europe est bien placée ; en son sein, la France tient son rang. Dans le domaine que je connais, notre niveau est semblable à celui de pays comme l'Angleterre ou l'Allemagne.

**Le nombre de Nobel ne constitue-t-il pas une mesure réductrice et temporellement décalée de la recherche ?**

Le nombre de prix Nobel n'est pas le meilleur indice.

**Qu'en est-il du couplage entre recherche publique et industrie ?**

Il y a certes en France des difficultés dans la transmission des avancées de la recherche entre public et privé. Aux Etats-Unis, on a une plus grande proportion de cadres d'entreprises qui sont docteurs et ont donc passé un certain temps dans les laboratoires universitaires. Ils y conservent leurs relations et sont familiers du milieu universitaire. Dans beaucoup de secteurs de l'industrie française, la proportion de docteurs est plus faible. Le dialogue avec des universitaires est plus difficile à établir, même si la bonne volonté est présente de part et d'autre.

**Y a-t-il une méfiance des chercheurs pour aller vers l'entreprise ?**

Auparavant, dans les années 1970, oui. Ce n'est plus le cas, d'autant que les chercheurs sont intégrés dans une communauté internationale qui valorise un travail par ses applications.

**Les jeunes chercheurs ne peinent-ils pas à trouver des emplois ? C'est un peu inquiétant et**

surtout dramatique en biologie. En général, en physique, après 2 ou 3 ans de postdoc, les gens trouvent un emploi permanent, soit en France, soit à l'étranger.

**Avec un certain gaspillage puisque l'étranger va profiter de gens formés longtemps chez nous ?**

Ce n'est pas vrai que pour nous. Si l'on considère le flux entre l'Europe et les Etats-Unis, il est plus fourni dans un sens que dans l'autre : peu d'Américains viennent chez nous. Beaucoup d'Anglais, d'Allemands, plus encore que de Français, vont et restent aux Etats-Unis, qui profitent énormément de la matière grise étrangère, venant d'Asie et aussi d'Europe. C'est une forme d'exploitation des autres pays. En France, nous embauchons certes beaucoup d'étrangers (près de 25 % d'étrangers sont recrutés chaque année au CNRS) ; d'ailleurs, les échanges intra-européens tendent à se banaliser car les conditions de travail sont devenues très voisines.

**Depuis quelque temps, le CNRS est dans l'oeil du cyclone ?**

La réforme du système de recherche français est plus globale. Elle a commencé il y a 2 ans par la création de 2 agences nationales, l'une de recherche, l'autre d'évaluation et s'est poursuivie par le vote récent de la loi Liberté-Responsabilité (dite d'autonomie) des Universités. Le CNRS se transforme aussi. Il faut repenser son articulation avec les nouvelles universités autonomes. On va également vers plus de mixité entre les métiers de chercheurs et d'enseignant-chercheurs. La recherche se fait actuellement dans des laboratoires mixtes CNRS-université, mais, dans des universités appauvries, avec des jeunes enseignants-chercheurs surchargés d'enseignement, le moteur de la recherche des laboratoires mixtes est souvent le CNRS. Le nombre d'heures d'enseignement est 3 fois supérieur à ce que j'avais à mes débuts, deux à trois fois supérieur à celui des enseignants des très bonnes universités américaines. La loi LRU permettra peut être de moduler les horaires d'enseignement en fonction de l'âge, de la discipline et de l'activité de recherche. D'autre part, le CNRS proposera sans doute des chaires CNRS, postes d'accueil sur projet pour 5 ou 10 ans : des jeunes enseignants-chercheurs pourront alors s'investir dans le démarrage de leur projet de recherche. Les chercheurs du CNRS font de l'enseignement ?

30% environ font de l'enseignement. Le CNRS est bien intégré à la vie universitaire. A condition de

recruter des universitaires, surtout si l'on veut augmenter le nombre d'étudiants ?

C'est ce que dit la Ministre, on va voir comment vont évoluer les budgets.

**Vos étudiants ont-ils suivi la filière universitaire depuis le bac ?**

Dans mon M2 (ex-DEA), le recrutement était assez équilibré : il y avait une moitié d'étudiants venants de l'université l'autre moitié venant de grandes écoles : les étudiants de grande école font une 2ème année de master, qui, dans un petit nombre de cas, est orientée vers la recherche.

**Et l'enseignement ?**

Placé en position de professeur émérite, je n'enseigne plus depuis l'an dernier. J'ai enseigné à tous les niveaux, même si, depuis un certain temps, j'enseignais en master (M1, M2) ; auparavant, il y a 20 ans, j'avais enseigné en 1er cycle. C'était un métier difficile, car on accueille des étudiants sans sélection après écrémage par les filières sélectives, et on passe beaucoup de temps à orienter les étudiants. En 1er cycle, je me souviens m'être occupé d'une section où l'on reprenait les programmes de lycée pour des étudiants qui ne maîtrisaient visiblement pas les bases nécessaires ; on reprenait au niveau 3ème, 2ème, 1ère, terminale : le rendement de cette remise à niveau était malheureusement faible.

Il serait souhaitable que les universités se spécialisent. Il me semble que les universités américaines sont fortes parce que certaines, délestées de 1er cycle, peuvent mettre le paquet sur une formation d'excellence pour des étudiants qui ont effectué leurs premières années universitaires dans des universités moins cotées et ont été sélectionnés d'après les notes qu'ils y ont obtenues.

**Comment finissent les étudiants non retenus ?**

Il y a une grande variété d'universités aux Etats Unis : il y en a une trentaine de très bon niveau, avec recherche de pointe, qui attirent les meilleurs étudiants. Les autres sont moins cotées et délivrent des diplômes moins prestigieux.

Propos recueillis par Gérard HATAB,  
Avec la participation de Marc HAZART et Geneviève BRICHET.