



Réception des Membres élus en 2004

le 14 juin 2005

Spintronique, le spin s'invite en électronique
Albert Fert

C'est un très grand honneur pour moi d'être ici aujourd'hui. Depuis mon élection je découvre la vie de l'Académie et j'apprécie ma chance de pouvoir y participer. De façon surprenante je me sens aussi rajeunir de retrouver un quartier où j'ai beaucoup vécu pendant ma vie d'étudiant, Saint Germain des Prés, les quais de la Seine, la passerelle des Arts.

Je suis physicien. La physique m'a beaucoup apporté et m'apporte toujours beaucoup. La recherche est une merveilleuse aventure. Je suis un physicien heureux de voir que les pures constructions de l'esprit de mes premiers travaux se sont concrétisées dans des réalités de notre vie quotidienne. Je suis émerveillé de réaliser que l'influence du spin sur la mobilité des électrons dans un conducteur, ce que j'avais décrit à la fin des années 60 pour interpréter mes expériences, est utilisé aujourd'hui à la lecture du disque dur de tous les ordinateurs que je vois, dans mon labo ou chez mon épicier. Je ne veux cependant pas dire que la satisfaction du chercheur vient essentiellement des applications de ses recherches. Non, la récompense principale c'est la découverte de paysages nouveaux dans le domaine de la connaissance, la surprise de voir soudain se révéler ces paysages et le plaisir d'en partager l'exploration avec toute une communauté. Ma plus grande satisfaction est d'avoir contribué à l'émergence d'un nouveau domaine de la physique, qui s'appelle maintenant la spintronique, et d'avoir partagé l'aventure avec mon équipe d'abord, avec une communauté de plus en plus large maintenant.

Je vais vous raconter quelques étapes de mon parcours, de mes débuts au Laboratoire de Physique des Solides d'Orsay jusqu'à mon activité actuelle en spintronique dans un laboratoire qui associe le CNRS, la société Thales et l'université Paris-Sud. Et d'abord qu'est cette spintronique ? C'est un nouveau domaine de la recherche à l'interface entre magnétisme et électronique, une électronique qui exploite une caractéristique quantique de l'électron, son spin. Le spin peut se décrire, en simplifiant, comme un vecteur porté par l'axe de rotation de l'électron sur lui même. L'électronique habituelle, pour créer des courants électriques, déplace les électrons en agissant sur leur charge électrique. La spintronique, au contraire, contrôle le mouvement des électrons en agissant sur leur spin. Comment ? En simplifiant beaucoup encore, je dirai que c'est en plaçant sur le trajet des électrons de très fines couches d'un métal ferromagnétique, un métal aimanté comme le fer ou le nickel. Le métal magnétique va filtrer les spins, c'est à dire laisser passer les électrons dont le spin est parallèle à leur aimantation et arrêter les autres, ou vice versa. Le premier phénomène de spintronique a été la Magnétorésistance Géante des multicouches

magnétiques que nous avons découvert en 1988. Une multicouche magnétique est un empilement alterné de couches ultrafines -quelques couches atomiques seulement- de métaux comme le fer et le chrome. Un petit champ magnétique, en alignant les aimantations de toutes les couches de fer, accorde tous les filtres et ouvre la porte au courant, phénomène que nous avons appelé Magnétorésistance Géante. Dans une tête de lecture de disque dur, le champ magnétique minuscule créé par une inscription magnétique sur le disque, ouvre la porte au courant dans une multicouche et l'inscription est ainsi détectée avec une grande sensibilité.

D'où vient la physique en jeu dans la spintronique ? Pour beaucoup, des progrès amenés par l'école Friedel à Orsay dans la compréhension de la structure électronique des métaux magnétiques. Les racines de la spintronique sont dans les travaux d'Orsay montrant l'influence du spin sur la mobilité des électrons dans les métaux ferromagnétiques. En fait, le sujet de ma thèse, sous la direction d'Ian Campbell, était d'étudier cette influence possible du spin qui avait été suggérée par le prix Nobel de Physique anglais, Neville Mott. Nous avons pu, à la fin des années 60, confirmer et quantifier cette influence, et l'expliquer dans le cadre des modèles théoriques développés par Friedel et ses collaborateurs, Blandin et Gautier. Le développement de la physique de la conduction électrique dans les matériaux magnétiques a ensuite été poursuivi dans quelques autres laboratoires, essentiellement à Strasbourg et à Eindhoven aux Pays-Bas. Cependant, à cette époque, il était impensable d'aller plus loin vers la spintronique, impensable de fabriquer, par exemple, des empilements de couches dont l'épaisseur n'excède pas quelques nanomètres, quelques distances atomiques. Dans les années 1970 et une bonne partie des années 1980, j'ai mis quelques idées au frigidaire et je me suis intéressé à beaucoup d'autres problèmes.

Les progrès technologiques sont venus au milieu des années 1980 avec l'arrivée des premières nanotechnologies. En 1985, j'étais alors au laboratoire de Physique des Solides d'Orsay, Alain Friederich dirigeait un groupe du Laboratoire Central de Recherche de Thomson-CSF où l'on avait développé la technique dite d'Épitaxie par Jets Moléculaires (EJM) pour l'élaboration d'hétérostructures de semiconducteurs et, après une discussion sous les palmiers lors d'un congrès à San Diego en Californie, nous avons lancé une collaboration pour adapter la technique EJM aux métaux et étudier des multicouches magnétiques. Ce fut l'étape décisive, nous avons pu élaborer des multicouches de fer et de chrome dans lesquelles les épaisseurs de couches pouvaient être inférieures au nanomètre, c'est à dire au millionième de millimètre, la place pour trois atomes. C'est sur ces multicouches de fer et de chrome que nous avons découvert la Magnétorésistance Géante. Je dois associer à ces premiers travaux de spintronique Patrick Etienne, l'ingénieur de Thomson-CSF expert en Épitaxie par Jets Moléculaires, ainsi que trois remarquables jeunes chercheurs, Agnès Barthélémy, Frédéric Van Dau et Frédéric Petroff, qui préparaient un thèse avec moi à cette époque et qui ont par la suite constitué le cœur de mon/notre équipe. Notre article de 1988 décrivant la découverte de la Magnétorésistance Géante et son interprétation a été suivie peu après d'une publication présentant des résultats du même type obtenus par l'équipe de Peter Grünberg en Allemagne. Et de nombreux autres laboratoires se sont également mis à développer une activité intense dans le domaine des nanostructures magnétiques. Ce fut le début d'une période passionnante avec une grande effervescence de recherches. D'autres phénomènes liés à l'influence du spin sur la mobilité des électrons ont été découverts et ont rapidement confirmé le potentiel d'une électronique exploitant le spin de l'électron. Pour la théorie de la Magnétorésistance Géante et la modélisation d'autres concepts de spintronique, j'ai eu la chance de pouvoir collaborer avec de remarquables physiciens, Peter Levy à New York University, Jozef Barnas à l'Université de Poznan et Thierry Valet alors au LCR

Thomson-CSF avant son départ aux États Unis. Les applications de la spintronique ont rapidement suivi les travaux de laboratoire. La Magnétorésistance Géante a été utilisée pour des capteurs magnétiques dès 1993 et sert à la lecture des disques durs d'ordinateur depuis 1997. Sa sensibilité a été le facteur essentiel de l'augmentation considérable de la capacité des disques durs. Un autre phénomène de spintronique, la magnétorésistance tunnel est aujourd'hui à la base d'un nouveau type de mémoire d'accès aléatoire, qui s'appelle MRAM et qui va concurrencer le RAM actuelles à semiconducteurs. Les MRAM, développées par les principaux acteurs de l'industrie des composants électroniques, auront probablement un gros impact dans les technologies de l'information et de la communication.

Mes recherches en spintronique se poursuivent depuis dix ans à l'Unité Mixte de Physique CNRS-Thales qu'Alain Friederich et moi même avons fondé en 1995 et qui est aussi associée à l'université Paris-Sud. En fait le domaine de la spintronique s'est aujourd'hui considérablement développé, couplé au développement général des nanotechnologies. La spintronique occupe maintenant une grande place dans toutes les conférences de magnétisme ou d'électronique et la remarquable petite équipe de jeunes chercheurs de l'Unité Mixte CNRS/Thales a eu des contributions majeures à ce développement. Elle a été ainsi pionnière sur un nouvel axe du développement de la spintronique, les phénomènes de transfert de spin qui permettent de manipuler l'aimantation d'éléments magnétiques sans application d'aucun champ magnétique, seulement par une sorte de transfusion de spins transportés par un courant polarisé de spin. Ces phénomènes de spintronique vont probablement avoir des applications importantes, à la fois pour une commutation purement électronique de composants de spintronique comme les MRAM et également pour la génération d'ondes dans le domaine des hyperfréquences. Un autre axe prometteur de recherche est la fusion entre électronique classique et spintronique, ce qui passe par le contrôle de courants de spin dans des hétérostructures associant matériaux ferromagnétiques et semiconducteurs. Nous avançons aussi sur cet axe. C'est une grande chance pour moi de travailler avec cette équipe de chercheurs et de doctorants passionnés. Certains d'entre eux sont ici et cela me plaît de voir aujourd'hui, sous cette coupole, se côtoyer cette jeune garde et le guide de mes débuts, Jacques Friedel.