

**6 | 11** la médaille d'or 

**14 | 29** les médailles d'argent 

**32 | 51** les médailles de bronze 



# Albert Fert

## Le spin s'invite dans l'électronique



Albert Fert  
Sciences physiques et mathématiques  
Unité mixte de physique CNRS/Thales  
CNRS - Thales  
• Orsay

© CNRS Photothèque. Photo C.Lébedinski.

Le CNRS a décerné cette année sa médaille d'or au physicien Albert Fert, professeur à l'Université Paris 11, directeur scientifique à l'Unité mixte de physique CNRS/Thales (associée à l'Université Paris 11), pour sa découverte de la magnétorésistance géante (Giant MagnetoResistance, GMR) et sa contribution

au développement de l'électronique de spin.

Ce domaine de recherche en nanosciences est actuellement en forte expansion. La GMR a déjà un impact important sur les technologies de l'information et de la communication. Elle est notamment à l'origine de l'élaboration de têtes de lecture magnétiques extrêmement sensibles qui équipent aujourd'hui tous les disques durs.

Ces têtes sont actuellement produites et commercialisées au rythme de 615 millions par an.

D'autres secteurs pourront bénéficier bientôt d'applications de l'électronique de spin, en particulier la téléphonie mobile, l'informatique portable ou encore l'électronique embarquée.

Albert Fert s'émerveille de beaucoup de choses : des paysages de ses Pyrénées catalanes bien sûr, de la musique de Thelonious Monk et des films d'Almodovar également, mais aussi parfois, bizarrement, du ronronnement du disque dur de son ordinateur. Ce qui le laisse rêveur, c'est de réaliser que l'énorme capacité des disques magnétiques actuels provient, en bonne partie, de ses élucubrations de jeune chercheur vers 1970 puis de sa découverte de la magnétorésistance géante en 1988. L'introduction de têtes de lecture à magnétorésistance géante est en effet à l'origine de l'augmentation considérable de la densité de stockage d'information sur disque dur. Qui plus est, cette découverte a donné le coup d'envoi à un nouveau domaine de la physique : l'électronique de spin (ou spintronique). Un domaine actuellement en pleine expansion dont Albert Fert est l'un des principaux acteurs. Aujourd'hui des phénomènes nouveaux continuent d'apparaître, d'autres applications se développent et l'impact de cette nouvelle science sur les technologies du 21<sup>e</sup> siècle s'annonce comme véritablement important.

### | L'électronique de spin, c'est quoi ?

« L'électronique de spin, explique Albert Fert, exploite une caractéristique quantique de l'électron : le spin, que l'on peut imaginer comme une minuscule aiguille de boussole portée par l'électron. Alors que l'électronique classique guide les électrons en exerçant une force sur leur charge électrique, l'électronique de spin les guide en agissant sur leur spin. Comment trouver une force agissant efficacement sur le spin des électrons ? Réponse : en faisant passer ces

électrons au travers de couches ultra-fines de matériaux ferromagnétiques comme le fer ou le cobalt, dans lesquels s'exerce une forte interaction entre le spin de l'électron et l'aimantation du matériau ferromagnétique. En orientant cette aimantation, il est donc possible d'agir sur le spin et de contrôler le mouvement des électrons. »

Au cours de ses recherches fondamentales sur les métaux ferromagnétiques au début de sa carrière, Albert Fert avait clarifié cette influence du spin sur le mouvement des électrons. « Cependant, pour l'exploitation de ces idées et l'écllosion de l'électronique de spin, précise-t-il, il a fallu attendre les progrès technologiques de la fin des années quatre-vingt qui ont permis l'élaboration de couches ultra-minces et de structures artificielles de toute petite échelle. »

#### Distinctions

- Docteur *honoris causa* de l'Université de Dublin, 2003
- Hewlett-Packard Europhysics Prize décerné par l'European Physical Society, 1997
- International Prize for New Materials décerné par l'American Physical Society, 1994
- Magnetism Award décerné par l'International Union for Pure and Applied Physics, 1994
- Grand prix de physique Jean Ricard décerné par la Société française de physique, 1994

#### Publications

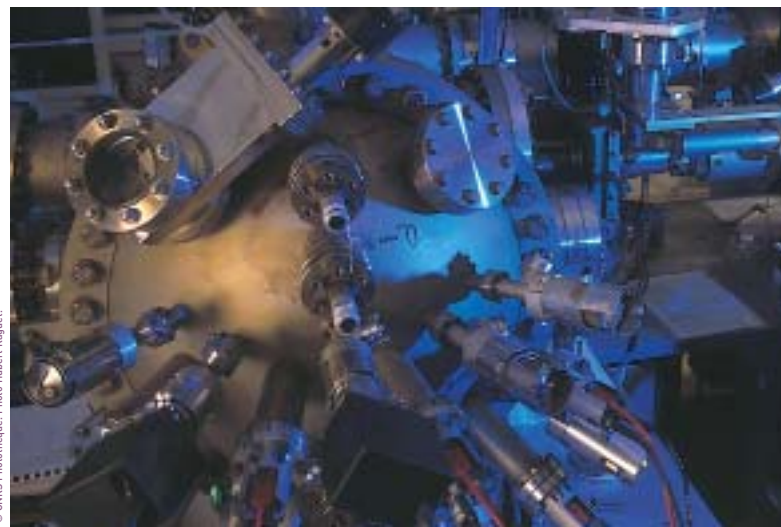
- Environ 270, dont une qui figure dans le « Top Ten » des 10 articles de *Physical Review Letters* les plus cités depuis la création de la revue en 1953

Les phénomènes intéressants d'électronique de spin sont en effet obtenus dans des « nanostructures magnétiques », des structures artificielles associant plusieurs matériaux dans une architecture à l'échelle du nanomètre (millionième de millimètre). Les premières « nanostructures magnétiques » ont été des multicouches empilant en alternance des strates d'un métal ferromagnétique et d'un métal non-magnétique. Par exemple, du fer peut alterner avec du chrome.

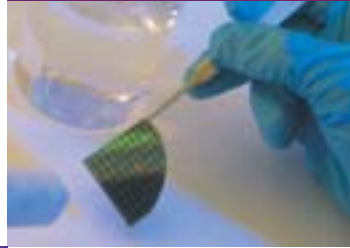
#### | Les débuts de la spintronique

La première manifestation d'électronique de spin a été la magnétorésistance géante des multicouches magnétiques.

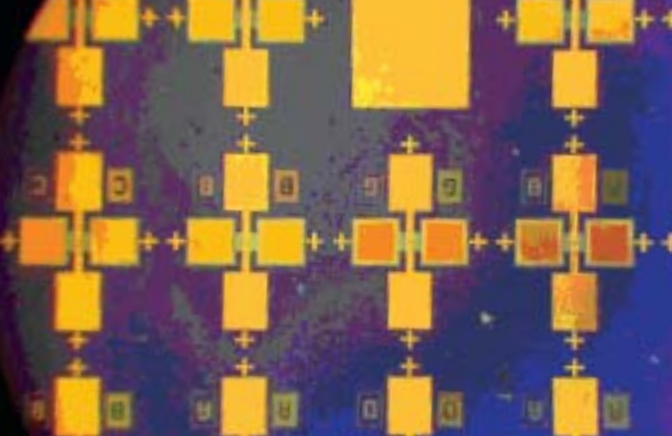
Vers le milieu des années quatre-vingt, Albert Fert, alors au Laboratoire de physique des solides d'Orsay, établit une collaboration pour l'étude de multicouches magnétiques avec Alain Friederich, directeur à Thomson-CSF d'un département de recherche qui maîtrisait la technique d'« épitaxie par jets moléculaires » (technique de croissance sous ultra-vide) pour le dépôt de couches ultra-minces. Albert Fert raconte : « Nous avons découvert la magnétorésistance géante en 1988 sur des multicouches de fer et de chrome. Pour certaines épaisseurs des couches de chrome, les aimantations de couches de fer successives s'orientent en sens opposé, dans une configuration dite antiparallèle. Dans l'expérience de 1988, nous avons aligné ces aimantations en appliquant un champ magnétique et



Système ultra-vide d'épitaxie par jets moléculaires (EJM). Ce dispositif permet le dépôt sur un substrat de couches métalliques ultra-minces de quelques plans atomiques d'épaisseur. L'empilement alterné de films minces magnétiques et non magnétiques permet d'obtenir des multicouches magnétiques dans lesquelles est produit l'effet de magnétorésistance géante (GMR). La GMR est notamment à l'origine de l'élaboration de têtes de lecture magnétiques extrêmement sensibles qui équipent aujourd'hui tous les disques durs.



© CNRS Photothèque - Photo Hubert Raguet.



© CNRS Photothèque



À la fin du procédé de microlithographie, la plaquette (substrat de silicium, zone bleue) contient un grand nombre de jonctions tunnel magnétiques submicroniques (croix jaunes). La magnétorésistance tunnel des jonctions d'un semblable réseau aura des applications importantes pour la réalisation de mémoires électroniques (technologies des ordinateurs).

provoqué ainsi une forte chute de la résistance électrique de la multicouche. L'amplitude de l'effet a dépassé toutes nos espérances ! » La variation de résistance d'un conducteur induite par un champ magnétique s'appelle magnétorésistance et l'effet observé en 1988, beaucoup plus important que dans les conducteurs classiques, a été appelé magnétorésistance géante. L'interprétation des effets observés s'appuyait sur les résultats antérieurs d'Albert Fert qui lui avaient permis d'analyser l'influence du spin sur la conduction dans les métaux ferromagnétiques. Les expériences révélant l'effet GMR et leur interprétation ont été publiées dans un article de la revue *Physical Review Letters* (*Phys. Rev. Lett.* 61, 2472, 1988) considéré comme l'article fondateur de l'électronique de spin. Il est cité près de 2 500 fois dans la littérature scientifique, ce qui l'a classé au 6<sup>e</sup> rang du « Top Ten » des articles de *Physical Review Letters* les plus cités depuis la création de cette prestigieuse revue, il y a cinquante ans. L'équipe de Peter Grünberg à Jülich en Allemagne a publié peu après (*Phys. Rev.* B39, 4828, 1989) des résultats expérimentaux similaires (quoique avec une magnétorésistance plus modeste). « Peter Grünberg et moi, raconte Albert Fert, avons toujours été d'accord pour considérer que nos expériences avaient été réalisées quasi-simultanément et que nous partagions la découverte de la GMR. »

### | Plus de 200 giga-octets dans un disque dur à magnétorésistance géante

La GMR, en particulier celle obtenue avec un très petit champ magnétique dans certaines multicouches, a immédiate-

ment attiré l'attention des industriels. Les premières applications, des capteurs de champ magnétique très sensibles, sont apparues dès 1993. « Les applications les plus importantes, explique Albert Fert, ont cependant été les têtes de lecture pour disque dur utilisant la variation de résistance d'une multicouche (c'est-à-dire l'effet GMR) pour détecter les petits champs magnétiques générés par les inscriptions sur le disque. » La sensibilité de la détection par GMR a permis de diminuer la taille des inscriptions et d'augmenter par un facteur d'environ 100 la densité d'information stockée sur le disque. Aujourd'hui la quasi-totalité des têtes pour disques durs (615 millions de têtes par an) utilise la GMR et la capacité de certains disques durs dépasse les 200 giga-octets. Avec des densités supérieures à 20 giga-bits par centimètre carré de disque (l'équivalent d'environ 2 500 romans par centimètre carré), on atteint cependant la limite de la GMR classique (celle avec le courant parallèle aux couches). « La prochaine génération utilisera sans doute d'autres effets d'électronique de spin comme la GMR en courant perpendiculaire aux couches ou la magnétorésistance tunnel », confie Albert Fert.

### | Électronique de spin d'aujourd'hui et mémoires du futur

La découverte de la GMR a déclenché de nombreux travaux de recherche dans le monde entier et les résultats ont rapidement confirmé le potentiel d'une électronique exploitant le spin de l'électron. Ce nouveau domaine de la physique est aujourd'hui en pleine expansion et Albert Fert joue un rôle majeur dans son développement. Son équipe au sein de

l'Unité CNRS/Thales a ainsi été l'une des premières en Europe à réaliser des « jonctions tunnel magnétiques » (Magnetic Tunnel Junctions, MTJ) et à faire progresser la compréhension de leurs effets de magnétorésistance (Tunnel MagnetoResistance, TMR). Un exemple de contribution significative d'Albert Fert à la théorie de l'électronique de spin est aussi l'introduction du concept d'accumulation de spins, aujourd'hui utilisé dans de nombreux modèles.

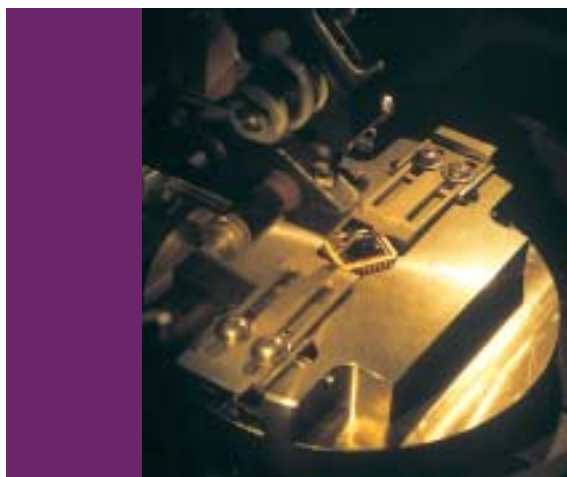
« La TMR des jonctions tunnel magnétiques, explique Albert Fert, aura sans doute des applications importantes. » Une MTJ est composée de deux couches ferromagnétiques séparées par une couche isolante d'environ un nanomètre d'épaisseur à travers laquelle les électrons ont une certaine probabilité de passer par un phénomène quantique appelé

effet tunnel. Comme pour la GMR, la résistance de la jonction est différente selon que les aimantations des couches ferromagnétiques sont orientées dans le même sens ou en sens opposé (parallèles ou antiparallèles). « Le phénomène avait en fait déjà été observé par Michel Jullière en France dans les années soixante-dix, puis oublié car difficilement reproductible. Ce sont des travaux de 1995 aux États-Unis qui ont permis de maîtriser la TMR et de relancer la recherche. La TMR aura bientôt des applications importantes pour la réalisation de mémoires électroniques, les MRAM (Magnetic Random Access Memory). L'impact sur la technologie des ordinateurs sera important », précise le médaillé d'or. Alors que les mémoires DRAM (Dynamic Random Access Memory) et SRAM (Static Random Access Memory) à base de semi-conducteurs des ordinateurs actuels ont un caractère « volatile » (l'information stockée meurt dès que l'on éteint l'ordinateur), la mémoire des MRAM est permanente. Grâce à cette permanence, il n'y aura plus à stocker les programmes et les données sur le disque dur à l'arrêt de l'ordinateur et à les recharger à la mise sous tension, ce qui éliminera la lenteur au démarrage et aussi les pertes accidentelles de données. De plus, contrairement aux mémoires à semi-conducteur qui consomment de l'énergie même en période de veille de l'ordinateur ou du téléphone mobile, les MRAM n'ont besoin d'énergie que pendant un travail effectif. Conséquence : un allongement significatif de la durée de vie de la batterie d'un ordinateur ou d'un téléphone portable. « C'est d'ailleurs dans ce créneau de l'électronique nomade que les MRAM s'intégreront sans doute le plus vite. La mise sur le marché de composants fonctionnels est annoncée pour 2004-2005. Il est intéressant de



© CNRS Photothèque, Photo Hubert Raguet.

**Ci-dessus : Réalisation de contacts sur un échantillon contenant un grand nombre de jonctions tunnel magnétiques fabriquées par lithographie optique. L'échantillon est collé au centre de la puce (pièce dorée). Le fil d'or de 50 µm qui va assurer le contact passe au travers de la buse blanche et est soudé sur les contacts par ultrasons et chauffage.  
À gauche : vue d'ensemble de l'appareillage.**



© CNRS Photothèque, Photo Hubert Raguet.

noter que les premiers développements industriels de MRAM devraient être localisés en France, à Corbeil-Essonnes (consortium Altis associant IBM et la société allemande Infineon) et à Crolles, près de Grenoble (consortium, Motorola-ST Microelectronics-Philips) », remarque Albert Fert.

L'importance des MRAM dans les technologies du futur justifie l'effort de nombreux laboratoires pour améliorer la magnétorésistance des jonctions tunnel ou proposer des composants plus sophistiqués et plus performants.



Vue en coupe d'une jonction tunnel magnétique par microscopie électronique haute résolution. On distingue les deux électrodes magnétiques d'oxyde de manganèse séparées par une couche isolante de titanate de strontium, ainsi que les plans atomiques dans les deux matériaux. La magnétorésistance de cette jonction est de 1 800 % : il existe un facteur 19 entre les résistances des configurations d'aimantation antiparallèle et parallèle.



© CNRS Photothèque - J.-L. Maurice/THALES

Un résultat marquant de l'équipe CNRS/Thales a été la démonstration d'un effet de TMR record (facteur 20 entre résistances des configurations parallèle et antiparallèle) obtenu en utilisant certains oxydes magnétiques dits demi-métalliques. Cette magnétorésistance ne subsiste pas à température ambiante dans les oxydes étudiés jusqu'à présent, ce qui exclut des applications, mais une voie est ouverte pour la recherche d'autres matériaux de ce type. « Notre équipe, explique Albert Fert, étudie aussi aujourd'hui un phénomène nouveau qui pourrait avoir des applications intéressantes à l'écriture de dispositifs de type MRAM ou d'enregistrement magnétique. Dans la technologie actuelle, on écrit en orientant une aimantation par application d'un champ magnétique créé par une ligne de courant électrique. L'Unité CNRS/Thales a été l'un des tout premiers laboratoires à montrer que l'on pouvait aussi orienter l'aimantation d'un petit élément sans champ magnétique appliqué de l'extérieur mais seulement en injectant un courant de spins dans l'élément. On parle de commutation magnétique par transfert de spin et le phénomène promet de nombreuses applications. »

### | Vers une fusion de l'électronique classique et de l'électronique de spin

Une activité importante aujourd'hui à l'Unité CNRS/Thales concerne l'électronique de spin dans des structures dites hybrides associant matériaux ferromagnétiques et semi-conducteurs. Ce domaine de recherche, à l'interface entre électronique classique et électronique de spin, est en plein développement, en particulier aux États-Unis et au Japon. Divers concepts ont été proposés pour exploiter le spin de l'électron dans un semi-conducteur. On peut imaginer, par exemple, un composant combinant des fonctions de stockage permanent d'information, de traitement logique et de communication optique sur une même puce. De nombreux problèmes fondamentaux restent cependant à résoudre. Comment injecter des électrons d'une même direction de spin dans un semi-conducteur à partir d'un métal ferromagnétique ? Comment ensuite manipuler ces spins dans le semi-conducteur et les détecter ? Autant de problèmes qui passionnent aujourd'hui Albert Fert et son équipe.

Un objectif des chercheurs dans ce domaine est le contrôle

du spin d'un électron unique dans un tout petit objet appelé « boîte quantique ». C'est une direction de recherche prometteuse pour la réalisation à long terme d'un nouveau type d'ordinateur extrêmement rapide, l'ordinateur quantiques qui ne combinera plus des données binaires comme dans l'informatique d'aujourd'hui mais les fonctions d'onde de tels « objets quantiques ». « C'est aussi une des perspectives fascinantes de la recherche de la prochaine décennie », s'enthousiasme Albert Fert.

### | De la recherche fondamentale aux avancées technologiques

« Le premier enseignement que je tire de l'aventure est que les avancées technologiques ont en général des racines très anciennes en recherche fondamentale. La magnétorésistance géante et l'électronique de spin ne sont pas nées par génération spontanée en 1988 », explique Albert Fert. Dans les années trente, le prix Nobel de physique Sir Nevill Mott avait déjà proposé que le spin intervient dans la conduction électrique. La confirmation expérimentale et le développement de modèles datent d'environ 30-35 ans et viennent de quelques laboratoires européens (à Strasbourg autour de François Gautier, à Orsay avec les travaux de Ian Campbell et Albert Fert, aux Pays-Bas également dans le laboratoire d'Eindhoven). « Mais fabriquer des structures artificielles à l'échelle du nanomètre était impensable à l'époque. Le passage à la GMR et à l'électronique de spin est ensuite venu de la conjonction des idées de physique fondamentale que nous avons développées vers 1970 et des progrès des techniques d'élaboration de nanostructures

au milieu des années quatre-vingt. Par la suite également les développements de l'électronique de spin ont souvent été liés aux avancées des nanotechnologies. Le problème n'est d'ailleurs pas spécifique à l'électronique de spin, tant il est vrai que de nombreux domaines de la physique de la matière sont actuellement "boostés" de façon fantastique par l'arrivée des nanotechnologies », rapporte Albert Fert.

Pour le physicien, la découverte de la GMR et les développements ultérieurs ont aussi montré l'intérêt d'associer des laboratoires de recherche fondamentale du CNRS ou des universités et des laboratoires industriels. « C'est intéressant par la complémentarité de technologies différentes mais aussi pour que les chercheurs aient une certaine vision des enjeux industriels et que les ingénieurs perçoivent toutes les possibilités offertes par les avancées fondamentales. Dans notre domaine, cela a conduit à création du laboratoire qui est aujourd'hui l'Unité mixte de physique CNRS/Thales, également associée à l'Université Paris-Sud », souligne Albert Fert. Il constate : « La France et ses partenaires européens ne sont pas les pays les mieux placés dans les technologies de l'information et de la communication. Les prochaines années verront sans doute des avancées considérables dans ces secteurs et leur impact dans l'économie sera de plus en plus grand. Il est d'autant plus essentiel que la France et l'Europe puissent rattraper l'avance qu'ont pris les États-Unis et aussi le Japon dans ce domaine. »

© CNRS Photothèque, J.-L. Maurice

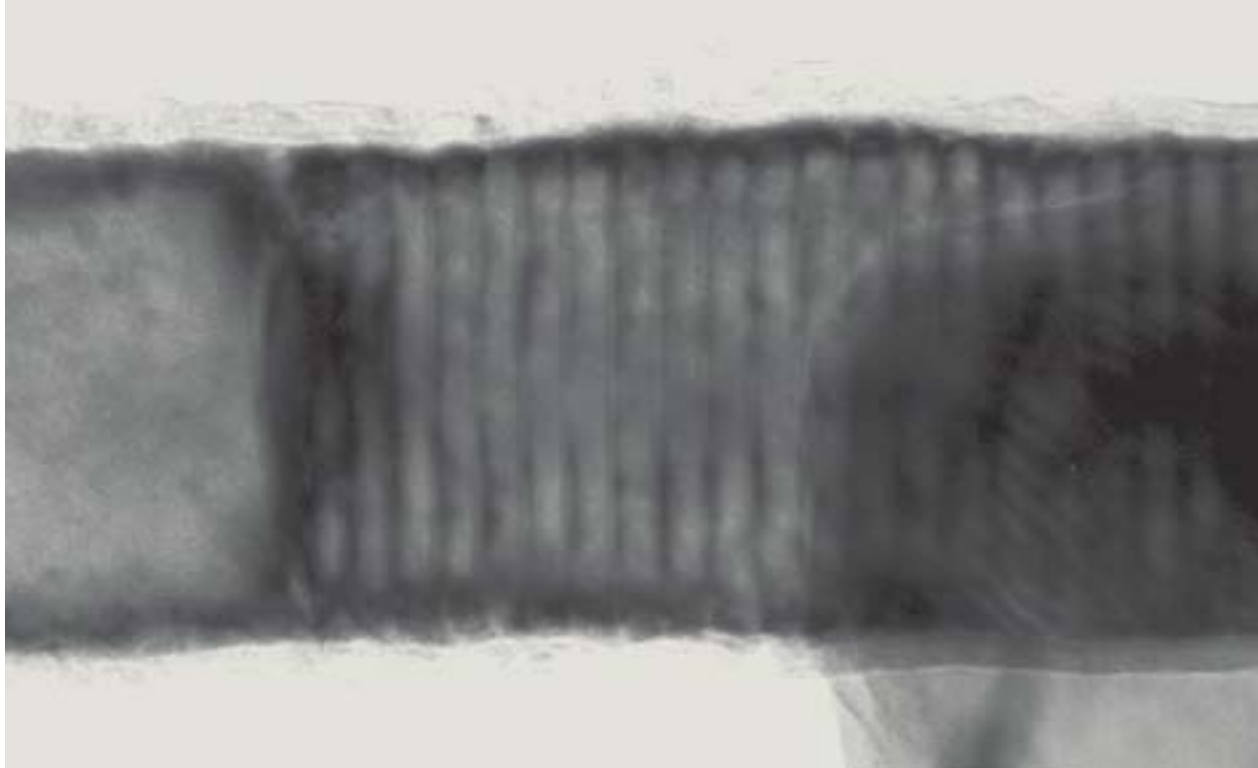
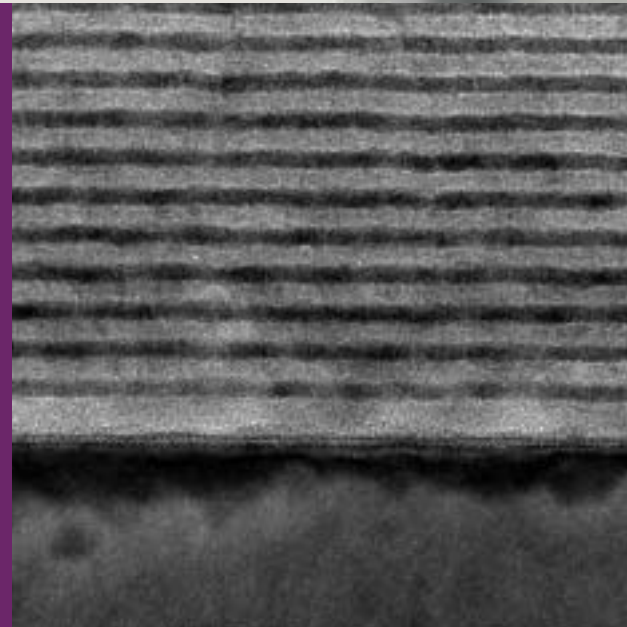


Image de microscopie électronique en transmission d'un nanofil de 90 nm de diamètre et 20 μm de long, réalisé en collaboration avec l'Université de Louvain La Neuve, Belgique. Le nanofil, élaboré par une technique d'électrodéposition, est composé par une alternance de couches de cuivre et d'un alliage de fer et de nickel. Ces couches sont épitaxiées et forment un réseau monocristallin. Ce type de nanofil stratifié est utilisé pour des expériences de magnétorésistance géante en courant perpendiculaire aux couches.

Image de microscopie électronique en transmission d'un empilement successif de couches de cobalt (noir) et de nitrure d'aluminium (gris). L'épaisseur des couches est de 0,7 nm et la périodicité de 3,7 nm. Cette structure est réalisée pour des études de magnétorésistance tunnel.



© CNRS Photothèque, J.-L. Maurice