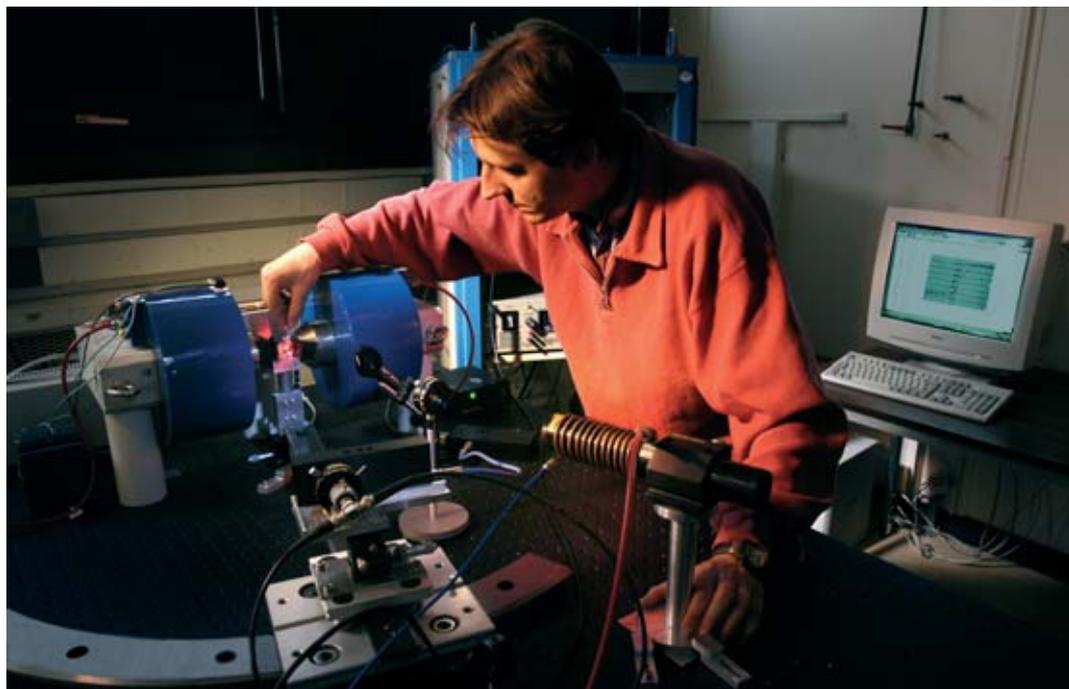


Exploiter les **propriétés** les plus **intimes** de la matière

Spintronique et nanomagnétisme repoussent les limites du stockage de l'information

Depuis l'introduction des disques durs en 1954, le magnétisme gouverne le stockage de l'information à haute densité dans les ordinateurs. La découverte de la magnétorésistance géante, en 1988, en a révolutionné le principe de lecture. Pour aller plus loin encore dans les performances, les chercheurs veulent utiliser un nouveau degré de liberté intrinsèque de l'électron, son spin.



Banc magnéto-optique au CEA/Grenoble pour mesurer l'aimantation de films minces : l'échantillon magnétique réfléchit le faisceau laser rouge envoyé sur lui en modifiant l'état de polarisation de sa lumière.

Le magnétisme détient une part dominante dans le stockage de masse de l'information, estimée en 2002 par l'Université de Berkeley à 92 % de l'information numérique nouvellement créée. Ses remarquables progrès permettent aujourd'hui de coder l'information dans les disques durs sous la forme de très petits domaines magnétiques d'environ 40×160 nanomètres (nm). Les capteurs qui les lisent exploitent la dépendance en champ de la **résistivité** électrique par le biais de phénomènes physiques comme la *magnétorésistance géante* (encadré 1). Aller plus loin dans les performances suscite un important effort de la recherche de base, tant du côté du média (support physique de l'information) que du côté des phénomènes en œuvre dans les capteurs magnétorésistifs. En particulier, il est nécessaire d'explorer de nouveaux matériaux et de nouvelles géométries de média pour éviter l'apparition du *superparamagnétisme* (encadré 2).

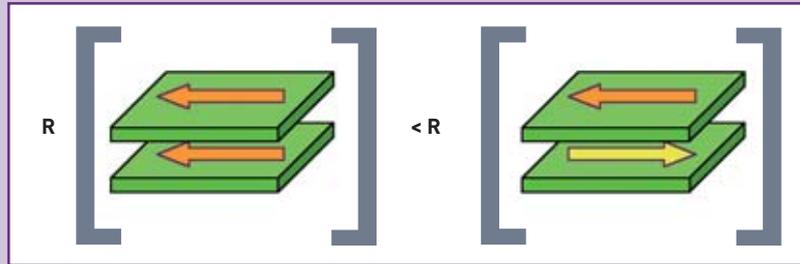
La magnétoélectronique est née en 1988 à Orsay avec la découverte du phénomène de magnétorésistance géante. Depuis quinze ans, le CEA est impliqué de façon très active dans la recherche de base sur ces nouveaux matériaux et sur ces phénomènes ainsi que dans leur valorisation dans un domaine qui s'est considérablement étendu et diversifié. Le magnétisme se trouve ainsi à la base d'une nouvelle discipline née du rapprochement avec l'électronique. Jusqu'à présent, cette dernière s'est entièrement construite sur la manipulation de la charge électrique des **électrons**. Par exemple, dans les mémoires vives des ordinateurs, l'information est stockée sous la forme de charges électriques localement piégées dans de petites **capacités** électriques. Or, les électrons, en plus de leur masse et de leur charge, possèdent une autre caractéristique intrinsèque : le **spin**. Il s'agit d'une grandeur typiquement **quantique** mais dont peut être donnée une image en se repré-

La magnétorésistance

1

La magnétorésistance traduit la dépendance de la **résistivité** électrique en fonction de l'aimantation d'un matériau, et donc en fonction d'un champ magnétique appliqué. Depuis très longtemps (1857) est connue la magnétorésistance **anisotrope** : la résistivité électrique varie d'environ 4% en fonction de l'angle entre le courant et l'aimantation de la couche et est minimale lorsque le courant se propage perpendiculairement à l'aimantation locale.

La magnétorésistance géante a été découverte en 1988, conjointement par Albert Fert (Orsay) et Peter Grunberg (Allemagne), dans des multicouches Fe/Cr. Ce phénomène est exploité dans les vanes de spin⁽¹⁾ où deux couches ferromagnétiques sont séparées par une fine couche non magnétique (par exemple du cuivre, non représenté sur la figure) : la résistance varie de 10 à 20% en fonction de l'orientation relative des aimantations des deux couches magnétiques et est minimale lorsque les aimantations des deux couches magnétiques sont parallèles. Si l'une des couches voit sa direction d'aimantation fixée, et si la seconde est très sensible au champ appliqué, ce



système est un capteur de champ très sensible, actuellement utilisé dans les têtes de lecture des disques durs.

Plus sensible encore est la magnétorésistance tunnel (variation de résistance de 20 à 60%) où les deux couches ferromagnétiques sont séparées par un très fin isolant électrique, franchi par les électrons par **effet tunnel**.

(1) Le nom "vane de spin" s'explique par analogie : en tournant l'aimantation d'une couche magnétique, comme une vanne, la diminution ou l'accroissement de la résistance électrique permet de laisser passer (plus ou moins) le courant électronique.

sentant l'électron comme une petite sphère chargée tournant sur elle-même dans un sens ou dans l'autre. Cette rotation de charge peut être assimilée à une boucle de courant et donc à un **moment** magnétique orienté suivant le sens de rotation de l'électron. Le but de la magnétoélectronique est de tirer parti du spin comme d'un nouveau degré de liberté afin de générer des effets originaux et d'utiliser ces derniers dans des composants innovants. Des composants qui associent en général des matériaux magnétiques qui servent de **polari- seur** ou **d'analyseur** en spin des électrons et des matériaux non magnétiques à travers lesquels le spin est transmis ou manipulé. La magnétoélectronique présente de nombreux atouts liés à la possibilité de mémoriser de façon non volatile une information dans les matériaux magnétiques et à la rapidité de commutation magnétique (subnanoseconde) d'une direction d'aimantation. Ses principaux domaines d'application concernent les mémoires magnétiques non volatiles à accès aléatoire (MRAM, *Magnetic Random Access Memory*), qui pourraient arriver rapidement sur le marché, les composants

pour le calcul logique, les composants radiofréquence et les composants magnéto-optoélectroniques.

Plus récemment encore a émergé la possibilité de manipuler le spin des électrons dans des **semi-conducteurs**, ce qui ouvrirait la voie à de très vastes et nouvelles applications. Il serait ainsi possible de concevoir des **transistors** aux fonctionnalités reprogrammables simplement en renversant la direction d'aimantation de l'une des électrodes. Dans ce domaine, encore très prospectif dans la mesure où les matériaux disponibles ne présentent pas encore toutes les performances nécessaires pour des applications, le CEA développe des programmes depuis la fin des années 1990.

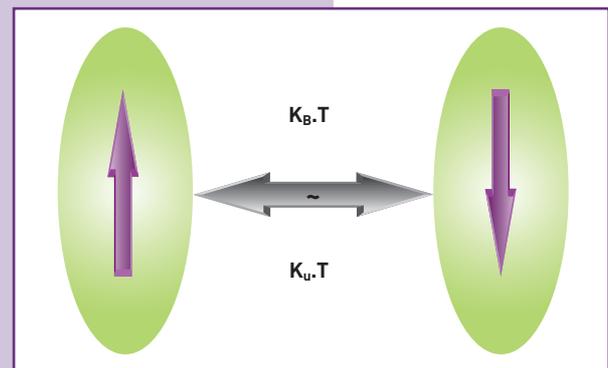
Les médias de demain : discrets et avec de nouveaux matériaux

Le disque dur offre la solution la plus efficace et la moins coûteuse pour l'archivage réversible de grandes quantités d'information. Aujourd'hui, l'information est stockée dans une couche continue constituée de

Le superparamagnétisme

2

Dans une particule de très petit volume v , l'aimantation ne peut généralement adopter que deux directions opposées, alignées suivant l'axe d'**anisotropie** de la particule auquel on peut associer une énergie volumique K_v . L'axe d'anisotropie est celui sur lequel l'aimantation s'aligne spontanément, avec deux orientations possibles. Aux très petites dimensions, la barrière d'énergie qui sépare ces deux états d'aimantation stable ($K_v \cdot v$) peut devenir de l'ordre des fluctuations thermiques aléatoires ($k_B \cdot T$, où k_B est la constante de Boltzmann). L'information magnétique supportée par la particule n'est alors plus stable ! Pour le cobalt, par exemple, ce phénomène est observé pour des particules de 8 nm de diamètre à température ambiante. En limitant la diminution de la taille des grains utilisés dans les médias magnétiques, le superparamagnétisme constitue l'une des limites les plus fortes à la continuation des progrès de la densité d'information supportée par les disques durs magnétiques.





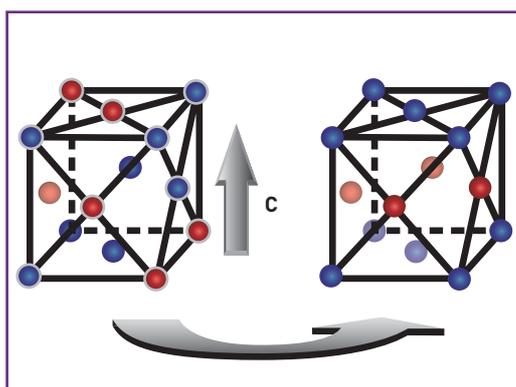
Artechnique/CEA

Banc de mesures électriques spectrales large bande (0-26 GHz) dédiés à l'étude de nanostructures magnétiques à courant polarisé en spin au CEA/Grenoble.

petits grains d'alliage ferromagnétique⁽¹⁾ à base de cobalt, de chrome et de platine (CoCrPt). Afin de préserver un rapport signal sur bruit acceptable en dépit de la dispersion des propriétés des grains, un nombre minimal de 100 grains par **bit** d'information est nécessaire. Aux densités de stockage actuelles (30 Gbit/cm²), la taille des grains est maintenant d'environ 7 nm et, dans le cadre des technologies actuelles, ne pourra plus être réduite fortement sans remettre en cause la stabilité de l'information en fonction de la température, la barrière d'énergie séparant deux directions de l'aimantation devenant trop faible pour éviter un comportement superparamagnétique. Face à cette difficulté, deux voies sont explorées, au niveau international et au CEA : l'utilisation de matériaux nouveaux présentant de très fortes **anisotropies** magnétocristallines et la mise en œuvre de nouvelles géométries de média. Parmi les nouveaux matériaux envisagés, le meilleur candidat est certainement l'alliage de fer et de platine (FePt), à l'anisotropie magnétocristalline gigantesque

sous sa phase chimiquement ordonnée (dite L1₀), qui peut être vue comme une alternance de plans atomiques purs de fer et de platine (figure 1). L'aimantation serait stable à température ambiante pour des grains de 3 nm ! Le problème est que cette phase particulière n'apparaît qu'à des températures de croissance de 500 °C environ, délicates à mettre en œuvre en fabrication. Aussi, en collaboration avec des équipes d'Orsay (CNRS) et du centre de recherche allemand de Rossendorf, le CEA/Grenoble a exploré une voie novatrice reposant sur l'utilisation d'**ions** hélium pour accélérer les processus de mise en ordre chimique à température modérée. En effet, à des énergies de 20 à 130 keV, l'interaction ion-matière est faible (un **atome** déplacé pour 100 plans atomiques traversés) et le transfert d'énergie limité : l'atome cible est déplacé de quelques distances interatomiques, dans une position **interstitielle**, laissant une **lacune** dans le réseau **cristallin**. Dans ces conditions particulières, il n'est pas introduit de désordre, et les lacunes créées – par le faisceau incident – diffusent au sein du matériau. Elles permettent aux atomes de changer de site sur le réseau dans des échanges hors équilibre, à basse température. En irradiant à une température de l'ordre de seulement 200 à 300 °C, elles offrent au système la possibilité de relaxer vers son état ordonné, plus stable. Le mécanisme repose sur le biais énergétique du mouvement de la lacune, piloté par les liaisons créées et rompues, qui favorise la mise en ordre chimique en reconstruisant la phase stable au fil des échanges successifs entre atomes voisins. À partir de conditions initiales particulières, un ordre chimique presque parfait est ainsi obtenu, démontrant ainsi une versatilité nouvelle des techniques d'irradiation, et rendant le matériau FePt synthétisable dans des conditions technologiquement acceptables. À plus long terme, l'avenir repose probablement sur l'abandon des médias continus au bénéfice de médias discrets. Dans les médias actuels, plusieurs dizaines de grains cristallographiques d'un alliage à base de CoCrPt sont utilisés pour supporter un seul bit d'information, afin de compenser par un effet de moyenne la dispersion des propriétés de ces grains. Dans des médias discrets, des plots magnétiques, tous identiques, sont physiquement isolés les uns des autres. Il est alors possible d'utiliser un seul grain par bit, ce qui permet d'accroître fortement les densités accessibles. Dans le laboratoire Spintec du CEA/Grenoble, associant la Direction des sciences de la matière du CEA, le **CNRS**, l'université Joseph Fourier et l'INPG (Institut national polytechnique de Grenoble), en collaboration avec le CEA-Leti (Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information), une solution originale est explorée. Elle consiste dans la gravure préalable du substrat (silicium, verre, aluminium) sous la forme d'un réseau de plots, avant le dépôt du matériau magnétique, qui vient alors recouvrir le sommet des plots et les tranchées qui les séparent. Cependant, du fait de la plus grande proximité avec la tête de lecture, la partie utile du dépôt magnétique est située au seul sommet des plots. La figure 2 montre l'exemple d'une image magnétique obtenue sur un tel média. Des densités de 40 Gbit/cm² ont été démontrées, et la voie semble

Figure 1. Schéma illustrant la transition obtenue par irradiation par des ions hélium, entre la phase chimiquement désordonnée (à gauche), et la phase chimiquement ordonnée (à droite), qui présente une direction facile d'aimantation, suivant l'axe C, perpendiculaire au plan des couches pures de fer (en rouge) et de platine (en bleu).



(1) Ferromagnétique : propriété qu'ont certains corps métalliques de présenter une aimantation forte, dans le même sens que le champ appliqué.

ouverte jusqu'au Tbit/cm². Pratiquement, le substrat initial peut être réalisé par une technologie de nano-impression (*nanoimprint*) utilisant un moule d'abord réalisé par lithographie électronique (étape coûteuse), puis utilisé un grand nombre de fois pour transférer le motif sur de nouveaux substrats par simple pressage de la résine lithographique.

Les phénomènes de magnétorésistance appliqués aux mémoires MRAM

Le lien entre propriétés de transport électronique et magnétisme est à la base de nombreux phénomènes de magnétorésistance (dépendance de la résistance électrique du champ magnétique appliqué), largement étudiés dans les laboratoires de la Direction des sciences de la matière du CEA, dans une perspective tant fondamentale qu'appliquée. Sur ce dernier plan, les efforts portent essentiellement sur le développement de nouvelles technologies pour les mémoires magnétiques à accès aléatoire (MRAM), qui sont l'un des champs d'application les plus importants de la spintronique. Elles utilisent comme éléments de stockage des **jonctions tunnel** constituées d'une fine barrière isolante (~ 1 nm) séparant deux couches magnétiques. Ces jonctions sont lithographiées et gravées sous la forme de piliers de dimension submicronique. Des électrodes conductrices, à la base et à leur sommet, permettent d'injecter un courant électrique au travers de la barrière. Une jonction tunnel magnétique se comporte avec le spin des électrons comme le fait un couple polariseur/analyseur en optique avec la **polarisation** des **photons**: on peut faire varier la transmission des électrons à travers la barrière tunnel en jouant sur l'angle entre les aimantations des deux couches magnétiques. Pour ce faire, la direction d'aimantation de l'une des deux couches est fixée, tandis que la seconde est réalisée de manière à tourner facilement sous l'action d'un champ magnétique. La couche émettrice polarise en spin les électrons, la couche réceptrice les analyse. La résistance de la jonction évolue d'environ 50 % entre les configurations parallèle et antiparallèle des aimantations. Ces deux niveaux de résistance permettent de stocker l'information (figure 3). Les jonctions tunnels sont disposées en un réseau carré interconnecté à la base et au sommet par deux réseaux perpendiculaires de lignes conductrices parallèles. La lecture consiste à faire passer un courant à travers le point mémoire et à mesurer son niveau de résistance. L'écriture se fait par envoi simultané de deux impulsions de courant dans les deux lignes conductrices qui se croisent au niveau du point mémoire à écrire. Ces courants génèrent deux champs magnétiques qui s'ajoutent localement et permettent de faire basculer la jonction tunnel dans la configuration magnétique désirée (aimantations parallèles ou antiparallèles). L'intensité des courants doit être ajustée pour que seul le point mémoire qui "ressent" la somme des deux champs commute. Cette technologie est actuellement la principale développée par plusieurs consortia internationaux dont Motorola/STMicroelectronics/Philips qui ont réalisé des démonstrateurs de 4 et 16 Mbit et annoncé la production pour 2005. Aux faibles densités d'intégration, cette technologie fonctionne bien, mais il est de plus en plus difficile de réaliser des points mémoires présentant le même champ de retour-

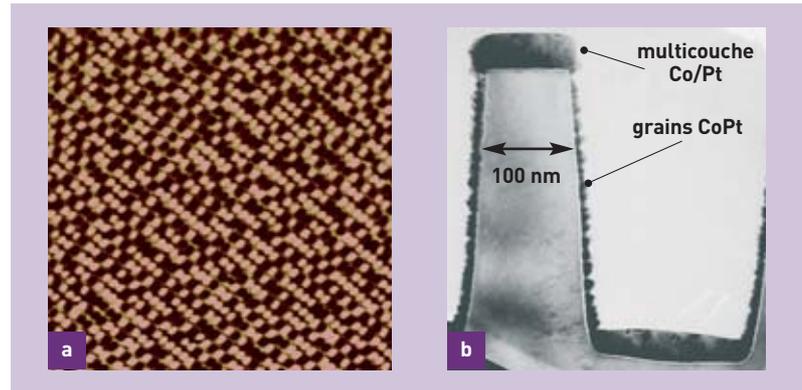


Figure 2. En (a), image obtenue par microscopie à force magnétique, de plots magnétiques de 100 × 200 nm constitués d'une multicouche (Pt/Co)_n, déposée sur un substrat de silicium prégravé. Chaque plot présente une aimantation pointant vers le haut, ou le bas, indépendamment de ses voisins, et peut donc supporter un bit d'information. Un tel système a été lu avec succès par une tête de lecture classique. En (b), image en coupe obtenue par microscopie électronique en transmission d'un plot de silicium recouvert d'une multicouche Co/Pt.

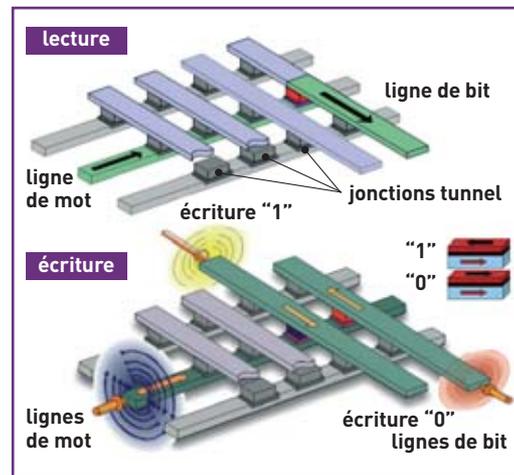


Figure 3. Principe de fonctionnement d'une MRAM de première génération. L'écriture est assurée par l'envoi simultané de deux impulsions de courant dans les deux lignes conductrices perpendiculaires (ligne de bit et ligne de mot qui se croisent au niveau du point à adresser).

nement de l'aimantation aux petites dimensions, ce qui va rapidement poser des problèmes d'erreurs d'écriture. Pour résoudre cette question, le CEA travaille sur deux nouvelles approches.

Écriture assistée thermiquement ou renversement d'aimantation par courant polarisé en spin

La première consiste en une écriture assistée thermiquement. Le principe consiste à faire passer un courant à travers le point mémoire pendant l'écriture, ce qui a pour effet de l'échauffer par **effet Joule**. Or, dans les matériaux magnétiques, d'une façon générale, le champ permettant le renversement de l'aimantation diminue avec l'accroissement de la température, car l'activation thermique assiste le retournement. Cet échauffement permet donc d'écrire le point adressé avec un champ plus faible et donc moins de risques de commutation accidentelle d'autres points mémoires. Cette technologie a fait l'objet de plusieurs brevets CEA et une jeune entreprise, Crocus Technology, a été créée pour la développer, se proposant à terme de produire des TAS-MRAM (*Thermally Assisted Switching-MRAM*).

La deuxième approche repose sur un phénomène découvert très récemment : le renversement d'aimantation induit par un courant polarisé en spin. Un métal ferromagnétique constitue une source d'électrons



A. Gomin/CEA

Bâti de dépôt de couches minces, au CEA/Saclay, à l'intérieur duquel des éléments magnétiques, sous forme métallique, sont chauffés puis fondus sous un vide poussé pour éviter l'oxydation. Leur vapeur vient se condenser sur des substrats monocristallins pour former une couche mince d'épaisseur contrôlable avec une précision de l'ordre d'une couche atomique.

polarisés en spin lorsque ces électrons sont injectés dans un second matériau magnétique au travers d'une couche non magnétique. L'interaction entre les spins des électrons injectés et les spins responsables de l'aimantation locale se traduit par un couple qui tend à aligner l'aimantation locale parallèlement à la polarisation en spin du courant injecté. Si la densité de courant polarisé est suffisamment grande, il conduit au basculement de l'aimantation de la couche magnétique dans un sens ou dans l'autre suivant la direction du courant injecté. Les chercheurs du CEA ont validé cet effet sur un nanopillier métallique de 130 nm de diamètre comprenant deux couches magnétiques de cobalt de 4 nm d'épaisseur, l'une de référence, l'autre pouvant commuter, séparées par une couche métallique de cuivre de 5 nm. En faisant varier le courant à travers la structure, il est possible de changer l'état de résistance du sandwich et de la faire passer d'un état de faible résistance (correspondant à un alignement parallèle des aimantations des deux couches magnétiques) à un état antiparallèle. Comme dans le cas de l'écriture assistée thermiquement, la sélectivité à l'écriture est alors parfaite. Toutefois, pour l'instant, les densités de courant requises pour cette commuta-

tion par courant polarisé en spin sont de l'ordre de 10^7 A/cm². Ceci est acceptable pour des empilements tout métalliques, mais pas pour des jonctions tunnel susceptibles de claquage électrique lorsqu'exposées à des tensions supérieures à 1 V. Différentes pistes sont en cours d'études au CEA, visant à réduire ces densités de courant critiques pour les rendre compatibles avec l'utilisation de jonctions tunnel.

Une autre conséquence très intéressante de l'injection de courant polarisé en spin dans une nanostructure magnétique est la possibilité, dans certaines gammes de champ et de courant, d'exciter des modes de précession (rotation décrivant un cône) de l'aimantation. Dans ces modes, la précession s'auto-entretient en pompant de l'énergie au courant continu de spin. Les fréquences en jeu sont typiquement de 5 à 30 GHz. Si la couche dont l'aimantation "précesse" est associée à une couche magnétique de référence, la variation d'angle entre les aimantations des deux couches produit une variation temporelle de résistance, donc de tension, à des fréquences de plusieurs GHz. Ceci ouvre des perspectives d'applications très importantes dans le domaine des **composants radiofréquence** (télécommunications), notamment pour la réalisation d'oscillateurs RF.

Des surprises sur un plan fondamental

Sur un plan fondamental, les phénomènes de magnétorésistance offrent encore bien des surprises. Ainsi, des équipes de Saclay et Grenoble ont récemment apporté une réponse expérimentale claire au problème délicat de la contribution des parois magnétiques à la résistance électrique. Une paroi sépare deux régions d'aimantation opposées dans un matériau, et correspond à la région où l'angle de l'aimantation évolue rapidement (et de manière continue). La question posée est la suivante: lors du passage du courant, le spin des **porteurs de charge** (des électrons) suit, de manière plus ou moins fidèle, la rotation de l'aimantation. Toutefois, un petit angle apparaît qui favorise une plus grande diffusion des porteurs de charge et génère ainsi une faible résistance supplémentaire, qui n'avait pu être mise clairement en évidence jusqu'à ce jour. En isolant quelques parois magnétiques (chacune de 7 nm

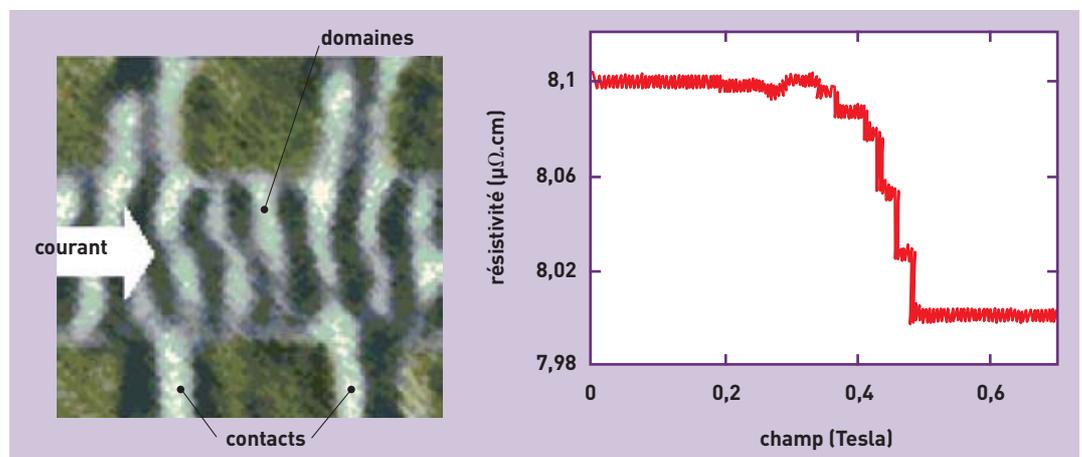


Figure 4. À gauche, image, obtenue en microscopie à force magnétique, de domaines dans une ligne de FePd de 400 nm de large. Les zones claires et sombres correspondent aux domaines magnétiques dont les aimantations respectives pointent vers le haut ou le bas de la couche mince (domaines dits "up" et "down"). Le courant électrique est injecté suivant la flèche. Les quatre lignes verticales sont des contacts permettant la mesure de la tension électrique. À droite, évolution de la résistivité électrique sous l'effet d'un champ externe, qui entraîne la disparition successive de domaines magnétiques, et donc des parois, dans des sauts discrets de résistivité.

de large) dans une nanostructure réalisée par **lithographie** électronique, puis en les faisant disparaître successivement sous l'action d'un champ magnétique externe, les chercheurs du CEA ont pu déterminer précisément leur contribution à la résistivité électrique (figure 4). Cette expérience a apporté un soutien décisif à l'une des théories auparavant proposées. Si l'effet est très faible, des voies peuvent être envisagées pour en tirer un meilleur parti en localisant la paroi magnétique dans une nanoconstriction, où quelques atomes seulement séparent deux régions d'aimantation opposées. Les résultats publiés dans des géométries adéquates sont encore sujets à controverse, mais des mesures très récentes ont montré que la magnéto-résistance de ces parois peut alors atteindre 30%. L'amplitude de l'effet obtenu est alors intéressante et permet d'imaginer à terme de nouvelles applications.

Des semi-conducteurs magnétiques

Bien au-delà des applications actuelles de la spintronique, un vaste champ de recherche est maintenant ouvert à la jonction des physiques du magnétisme et des semi-conducteurs. Celui-ci devrait aboutir à une nouvelle génération de composants électroniques (classiques et quantiques) basés sur la manipulation de la charge et du spin (degré de liberté intrinsèque de l'électron). Étape indispensable, l'injection contrôlée de spins dans un semi-conducteur peut être réalisée à partir d'un métal ferromagnétique au travers d'une forte résistance d'interface ou bien directement à partir d'un semi-conducteur ferromagnétique. Ces deux voies d'injection présentent des avantages et des difficultés particulières et sont explorées au CEA. Ainsi, les métaux ferromagnétiques sont des sources d'électrons polarisés bien maîtrisées et opérationnelles jusqu'à des températures élevées. Cependant, l'injection de

spin depuis ces métaux vers un semi-conducteur pose des problèmes délicats liés à la grande différence des résistivités électriques des deux matériaux. Pour la deuxième solution, des semi-conducteurs de type **IV** (Si, Ge), **III-V** (GaAs, InAs) ou **II-VI** (ZnTe, CdTe), intégrables à la micro ou l'opto-électronique, sont dopés par des ions magnétiques comme le manganèse. Ces ions en substitution peuvent interagir par l'intermédiaire des porteurs pour aboutir à un ordre ferromagnétique, mais les températures de mise en ordre restent très basses, et la recherche d'une phase semi-conductrice, ferromagnétique à température ambiante constitue l'un des défis actuels de l'électronique de spin. Le travail récemment réalisé au CEA/Grenoble (en collaboration avec le laboratoire de spectrométrie physique du CNRS) sur le contrôle du ferromagnétisme par l'injection de porteur dans un semi-conducteur permet d'illustrer les progrès actuels. Dans les semi-conducteurs magnétiques tels que GaMnN ou CdMnTe, le ferromagnétisme s'explique par l'alignement des spins portés par les atomes de manganèse sous l'effet d'une interaction d'échange *via* la polarisation des porteurs de charge (**trous**) du semi-conducteur (phénomène appelé interaction RKKY). De tels matériaux sont très intéressants car il est possible d'ajuster leurs propriétés magnétiques en jouant sur la concentration des porteurs par la simple application d'une tension électrique au dispositif. Pour ce faire, le semi-conducteur magnétique est inséré dans une diode, et ses propriétés magnétiques sont déduites de mesures de **photoluminescence** (figure 5) : sous tension nulle, le système est ferromagnétique avec une température de Curie⁽²⁾ de 3 K. Au-delà de cette

(2) Température de Curie : température (souvent improprement nommée point de Curie) spécifique de chaque substance, au-dessus de laquelle les matériaux ferromagnétiques deviennent paramagnétiques (qui s'aimantent faiblement dans ce même sens).



Première jonction tunnel magnétique submicronique pour mémoire MRAM réalisée par le laboratoire Spintec (largeur : environ 300 nm).

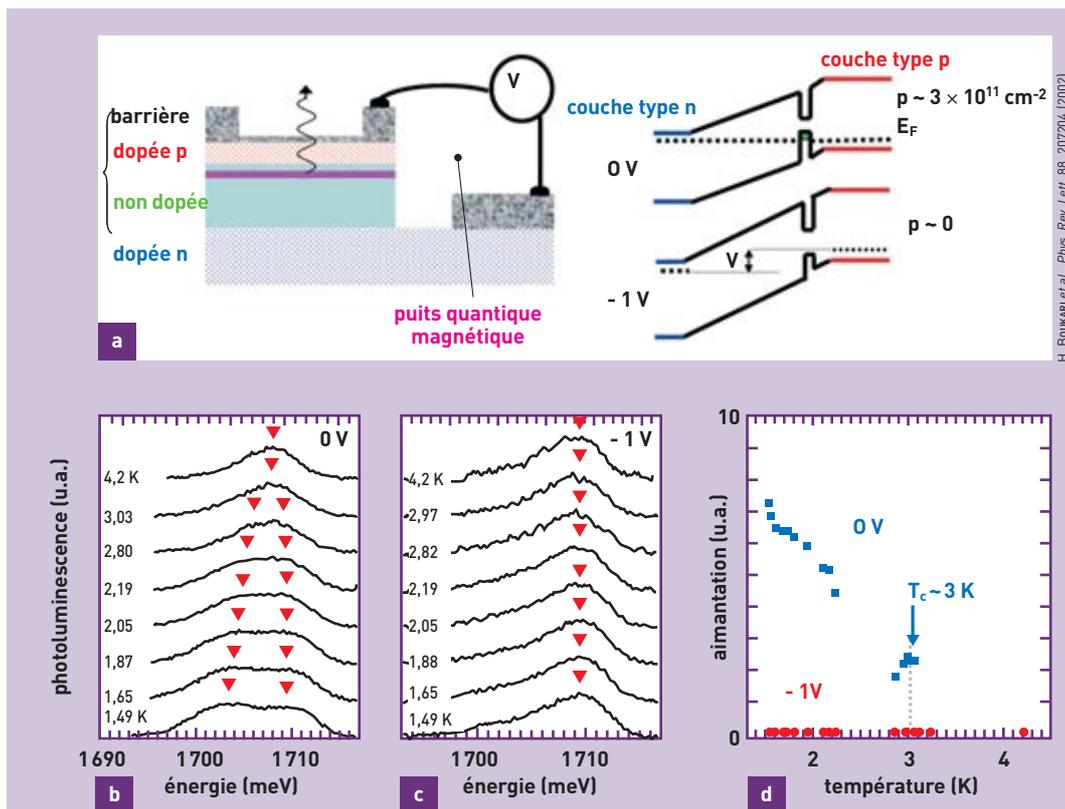
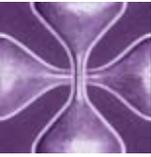


Figure 5. Contrôle des propriétés magnétiques d'un puits quantique de CdMnTe par ajustement des populations de porteurs. Les puits quantiques (a) est inséré dans une diode p-i-n, en référence au dopage des couches de semi-conducteur : p : positif, n : négatif, i : intrinsèque (absence de dopage) qui permet d'appliquer une tension et de modifier les concentrations de porteurs (trous). En b, la séparation de la raie de photoluminescence observée en champ nul révèle une aimantation spontanée qui apparaît à basse température, l'alignement des spins des atomes de manganèse étant permis par l'interaction transmise par les porteurs de charge. En c, le système dépourvu de ses porteurs par une tension de -1 V reste dans l'état paramagnétique. En d, l'aimantation en fonction de la température, sous tension nulle et sous 1 V.



température, l'agitation thermique détruit l'alignement local des spins qui caractérise un matériau ferromagnétique en créant une aimantation non nulle par unité de volume. Pour la première fois, les équipes du CEA ont montré que cette propriété essentielle peut être contrôlée électriquement : la température de Curie est abaissée à 1,5 K sous une tension modeste de 1 volt. Certes, le chemin est encore long vers des applications pratiques. Cependant, si cette propriété unique pouvait être obtenue à température ambiante, de

nombreuses d'entre elles deviendraient possibles, comme des mémoires magnétiques où le renversement d'aimantation serait assisté par l'application de tensions faibles.

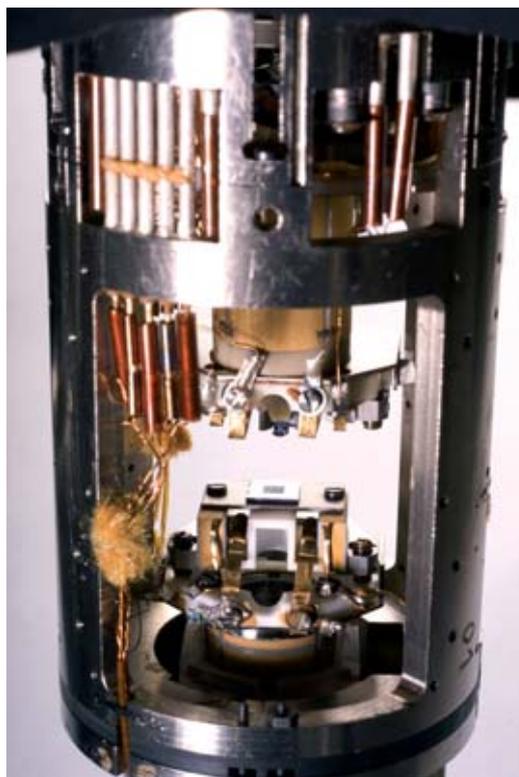
Un potentiel extraordinaire

Dans ces domaines du nanomagnétisme, de la magnétoélectronique et de la spintronique, en profonde mutation, le CEA poursuit ses programmes avec la double ambition de contribuer à l'avancée des connaissances et de les transférer vers les applications. Au-delà de l'avènement de générations de mémoires MRAM rendues plus compétitives par l'introduction de nouvelles technologies et du développement de nouveaux matériaux semi-conducteurs magnétiques, d'autres applications se dessinent dans le domaine du calcul logique et des composants radiofréquence.

En ce qui concerne les médias magnétiques, la recherche sur les médias discrets se poursuit, non seulement avec l'exploration de voies nouvelles mettant en œuvre des processus de lithographie décrits plus haut, mais aussi de processus d'auto-organisation de particules préparées par des synthèses dites de **chimie douce** (en solution). Ces efforts sont soutenus par des études à caractère plus fondamental sur les mécanismes de retournement de l'aimantation dans des particules de dimensions nanométriques. Discipline fortement implantée en France et plus particulièrement à Grenoble par Louis Néel, prix Nobel de physique et premier directeur du centre CEA de cette ville, le magnétisme ouvre ainsi aujourd'hui de nouvelles perspectives de découvertes et d'applications, nées de l'extraordinaire potentiel de découvertes très récentes.

> **Bernard Diény***, **Yves Samson***
et **Michel Viret****

Direction des sciences de la matière
CEA centres de Grenoble* et de Saclay**



A. Gemin/CEA

Figure 5. Gros plan sur le dispositif (le porte-échantillon a un diamètre de 4 cm) de mesure de résonance ferromagnétique dans un microscope en champ proche, au CEA/Saclay, avant sa mise en cryostat (4,2 K dans l'hélium liquide). La résonance ferromagnétique est observée lorsque l'aimantation d'un matériau se met à *précesser* sous l'effet d'un champ magnétique radiofréquence. Cet appareil permet de mesurer des signaux extrêmement petits qui proviennent de nanostructures magnétiques.

La nanoélectronique ne peut être que quantique

Ce n'est que dans le cadre quantique qu'une réponse a pu être apportée à la question de savoir pourquoi un matériau est isolant, conducteur ou semi-conducteur. C'est par une approche quantique fine que pourront être décrits et maîtrisés les phénomènes électroniques dans des conducteurs de taille nanométrique.

Notre compréhension de la **conduction** électrique dans les solides est aujourd'hui essentiellement **quantique**. Le courant est porté par les **électrons** qui sont des **fermions**. Pourquoi tel matériau est isolant, conducteur ou **semi-conducteur**, est une question qui n'a pu recevoir de réponse que dans ce cadre quantique, au milieu du siècle dernier.

Mais une fois les propriétés *microscopiques* posées, notre compréhension du transport électronique dans les conducteurs a longtemps reposé sur l'idée que les électrons réagissaient classiquement aux potentiels électriques. La phase de la **fonction d'onde** électronique ne joue pas de rôle particulier et la variable de charge électronique d'un ensemble d'électrons ne donne pas lieu à des manifestations de sa quantification, c'est-à-dire de son caractère quantique. Dans cette appro-

che, bien adaptée à la description de la plupart des conducteurs *macroscopiques*, il ne reste plus rien de la nature quantique des électrons, ni leur statistique fermionique, ni la quantification de la charge, ni donc la phase de l'onde associée. En revanche, la description des phénomènes de conduction dans des conducteurs de petite taille exige une approche quantique plus fine.

Conséquences de la quantification

Curieusement, si les bases théoriques étaient en place depuis longtemps, c'est seulement au cours des deux dernières décennies que les physiciens ont obtenu une description totalement quantique de la conduction, faisant le pont entre les échelles microscopique (atomique) et macroscopique. L'accès aux techniques de micro-

puis de nanotechnologie a en effet favorisé les progrès conceptuels, par de nombreux allers et retours entre **modélisation** et expérience. Inversement, les besoins expérimentaux pour observer et manipuler des objets toujours plus petits et élaborer des conducteurs toujours plus purs ont suscité de nouveaux outils d'observation et de nouveaux matériaux. Comme on pouvait s'y attendre, l'entrée des conducteurs dans l'ère quantique a apporté de nouvelles quantifications qui ont eu d'importants retentissements en métrologie : l'ohm a ainsi été détrôné au profit du **quantum** de résistance, le Klitzing⁽¹⁾, défini comme le rapport de la **constante de Planck** h au carré de la charge de l'électron e . La quantification de la charge d'un petit circuit autorisant la manipulation d'électrons uniques a permis de relier courant et fréquence. Mais le plus remarquable est l'universalité de la description quantique obtenue, qui s'applique aussi bien aux métaux, aux couches bidimensionnelles d'électrons utilisées dans les **transistors**, qu'à l'électronique de **spin** ou à l'électronique moléculaire. Ces matériaux, d'aujourd'hui ou de demain, peuvent voir leur **conductance** modulée par des effets d'interférences orbitaux ou de spin, ou par des effets de quantification de la charge. De plus, ils conduisent le courant de façon peu "bruyante" en temps en vertu du **principe de Pauli** qui régule le flot des électrons.

Trois briques de base des conducteurs quantiques

Trois briques de base des conducteurs quantiques seront passées en revue ici : le contact ponctuel, l'interféromètre électronique et la boîte quantique. Ils illustrent respectivement les concepts clés suivants : la quantification de la conductance, les interférences à un électron et la quantification des **états électroniques** et de la charge. La description d'un conducteur quantique est simple. À un électron est associée une **onde de probabilité**. Celle-ci est répartie entre plusieurs modes électroniques qui résultent du confinement de l'électron par le matériau qui agit comme un **guide d'onde**. La conductance est alors la somme des coefficients de transmission des modes électroniques multiplié par le quantum de conductance e^2/h (relation de Landauer). Pour décrire la conduction, les contacts sont dissociés du conducteur, pris en "sandwich" entre eux. Ils

comprennent un grand nombre d'électrons qu'ils absorbent ou émettent, comme le ferait en optique un **corps noir** avec des ondes lumineuses. Ce n'est jamais le même électron qui est absorbé puis réémis. La phase de l'électron émis est aléatoire. C'est l'image qu'on se fait d'un conducteur classique. Au contraire, dans le conducteur quantique, il n'y a pas de **relaxation** de la phase de l'onde électronique. Un électron émis par le contact de gauche dans un mode électronique sera absorbé dans le contact de droite avec une probabilité donnée par le coefficient de transmission du mode. Plus nombreux sont les modes électroniques et meilleure est leur transmission : plus le conducteur conduit. Le quantum de conductance s'obtient en remarquant que si le contact de gauche est porté à une énergie eV au-dessus de celui de droite, seuls les électrons dans cette tranche d'énergie trouveront des états libres à droite et participeront donc au courant. Par la relation d'incertitude temps-énergie, les électrons émis de la gauche ne peuvent se succéder qu'à la fréquence eV/h . Pour un mode de transmission unité, le courant est alors e^2V/h . Du rapport du courant sur la tension, on tire le quantum de conductance e^2/h .

Le contact ponctuel : quantification de la conductance

Il est possible de réaliser par **nanolithographie** électronique un guide d'onde à électrons sans défauts formant une constriction de longueur submicronique et de largeur comparable à la longueur d'onde des électrons (figure 1). Quand la largeur de ce contact ponctuel est bien inférieure à celle-ci, aucun mode électronique n'est transmis car les ondes sont évanescentes dans la constriction. On a une barrière **tunnel** de conductance très inférieure au quantum de conductance. Quand la largeur vaut une demi-longueur d'onde électronique, un premier mode est transmis, tandis que les autres sont encore réfléchis. La conductance présente alors un palier de valeur égale au quantum de conductance. Quand la constriction s'élargit encore, un second mode est transmis puis un troisième, etc., chacun signalé par un plateau multiple du quantum de conductance. L'effet peut être démontré avec des conducteurs bidimensionnels semblables à ceux utilisés pour les transistors à haute mobilité électronique. Par **effet de champ**, une **grille** fait varier continûment la constriction (figure 1). Le phénomène a été ensuite observé avec des contacts ponctuels atomiques. La relation de Landauer, qui relie conductance et transmission, est donc vérifiée à toute échelle.

(1) Klitzing : du nom du découvreur de l'effet Hall quantique qui apparaît dans les conducteurs bidimensionnels en fort champ magnétique.

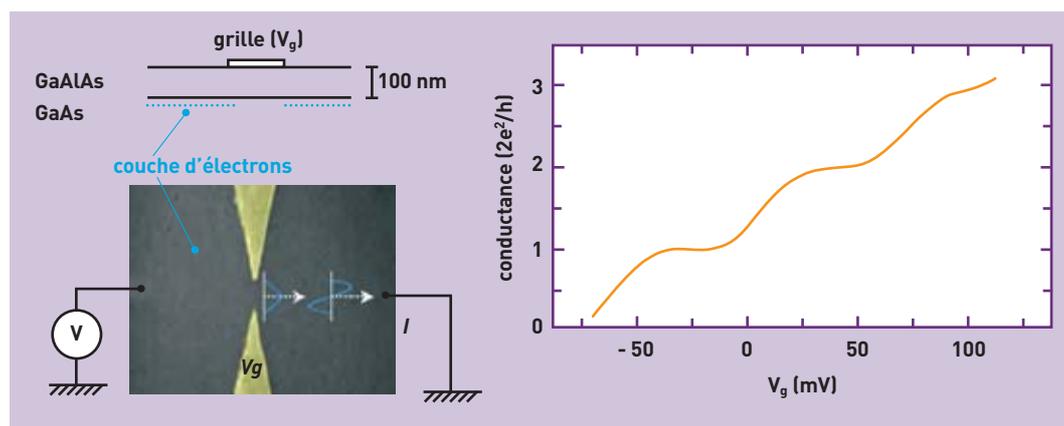


Figure 1. Contact ponctuel : l'effet de champ de deux grilles définies par nanolithographie et évaporées au-dessus de la surface d'un conducteur contenant une couche d'électrons permet de définir une constriction de largeur variable. La conductance mesure la transmission des modes électroniques, chacun avec deux orientations de spin. Ici, en variant la tension, de zéro à trois modes sont transmis. Leur transmission complète est signalée par un plateau de conductance, multiple entier du quantum de conductance $2e^2/h$ (dont la valeur est ici doublée par la dégénérescence de spin).

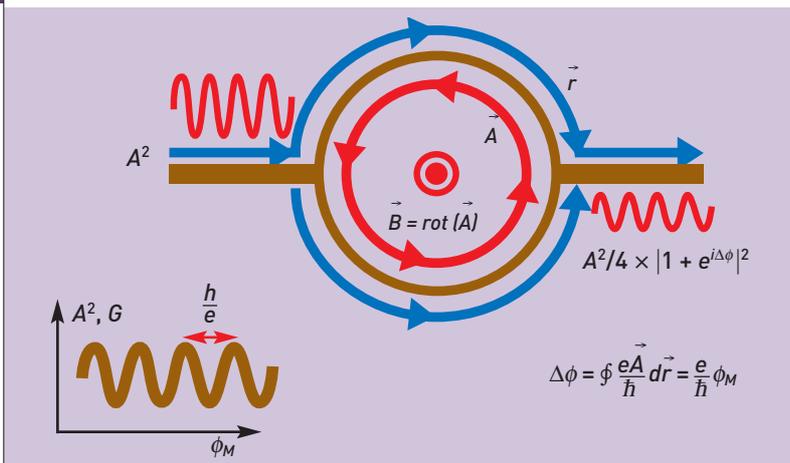


Figure 2. L'effet Aharonov-Bohm : en présence d'un champ magnétique B, donc du potentiel vecteur A, les fonctions d'ondes dans les deux bras de la boucle accumulent une différence de phase $\Delta\phi$. L'amplitude transmise et la conductance varient périodiquement avec le flux magnétique Φ_M .

L'effet Aharonov-Bohm : interférences à un électron

La conductance d'un conducteur peut être modulée par des effets d'interférence. Si l'onde électronique est divisée pour suivre deux chemins différents puis

recombinée, les amplitudes de probabilité des chemins s'ajoutent. Si les phases associées sont égales modulo 2π la transmission, qui est le carré de l'amplitude, est renforcée. Si elles diffèrent de π , elle s'annule. Un conducteur en forme d'anneau placé entre deux contacts réalise ainsi l'analogie des trous d'Young en optique. Un champ magnétique perpendiculaire est appliqué à l'anneau pour faire varier la différence de phases entre chemins. Celle-ci dépend du flux du champ magnétique à travers l'anneau (effet Aharonov-Bohm, figure 2). La conductance est alors modulée avec une période égale au quantum de flux magnétique h/e .

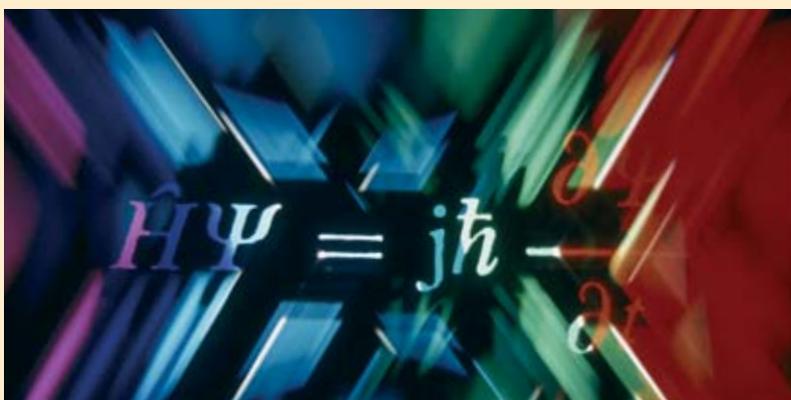
La boîte quantique : quantification de la charge

Les effets d'interférence pilotent aussi la conductance d'un petit îlot de quelques dizaines à quelques centaines d'électrons relié à deux contacts par des barrières tunnel (boîte quantique). Un électron injecté par un contact effectue dans l'îlot de multiples réflexions avant d'atteindre l'autre contact. Quand la phase accumulée entre deux réflexions est multiple de 2π , les amplitudes s'ajoutent : il y a résonance de transmission, comme dans un **interféromètre de Fabry-Pérot** optique. Autrement dit, l'observation des pics de conductance associés permet la *spectroscopie tunnel* des états électroniques. Comme dans un atome, le confinement

B Quelques repères de physique quantique

La **physique quantique** (historiquement dénommée mécanique quantique) est l'ensemble des lois physiques qui s'appliquent à l'échelle microscopique. Fondamentalement différentes de la plupart de celles qui semblent s'appliquer à notre propre échelle, elles n'en constituent pas moins le socle global de la physique à toutes ses échelles. Mais à l'échelle macroscopique, ses manifestations ne nous apparaissent pas étranges, à l'exception d'un certain nombre de phénomènes *a priori* curieux, comme la **supraconductivité** ou la **superfluidité**, qui justement ne s'expliquent que par les lois de la physique quantique. Au demeurant, le passage du domaine de validité des lois paradoxales de cette physique à celui des lois, plus simples à imaginer, de la physique classique peut s'expliquer d'une façon très générale, comme cela sera évoqué plus loin.

La physique quantique tire son nom d'une caractéristique essentielle des objets quantiques : des caractéristiques comme le moment angulaire (**spin**) des particules sont des quantités **discrètes** ou discontinues appelées **quanta**, qui ne peuvent prendre que des valeurs multiples d'un **quantum élémentaire**. Il existe de même un **quantum d'action** (produit d'une énergie par une durée)



"Vue d'artiste" de l'équation de Schrödinger.

appelé **constante de Planck** (h), dont la valeur est de $6,626 \cdot 10^{-34}$ joule-seconde. Alors que la physique classique distingue *ondes* et *corpuscules*, la physique quantique englobe en quelque sorte ces deux concepts dans un troisième, qui dépasse la simple dualité onde-corpuscule entrevue par Louis de Broglie, et qui, quand nous tentons de l'appréhender, semble tantôt proche du premier et tantôt du deuxième. L'objet quantique constitue une entité inséparable de ses conditions d'observation, sans attribut propre. Et cela, qu'il s'agisse d'une particule – en aucun cas assimilable à une bille minuscule qui suivrait une quelconque trajectoire – de lumière

(**photon**) ou de matière (**électron, proton, neutron, atome**...).

Cette caractéristique donne toute sa force au **principe d'incertitude d'Heisenberg**, autre base de la physique quantique. Selon ce principe (d'*indétermination* plutôt que d'*incertitude*), il est impossible de définir avec précision à un instant donné *à la fois* la position d'une particule et sa vitesse. La mesure, qui reste possible, n'aura jamais une précision meilleure que h , la constante de Planck. Ces grandeurs n'ayant pas de réalité intrinsèque en dehors du processus d'observation, cette détermination simultanée de la position et de la vitesse est simplement impossible.

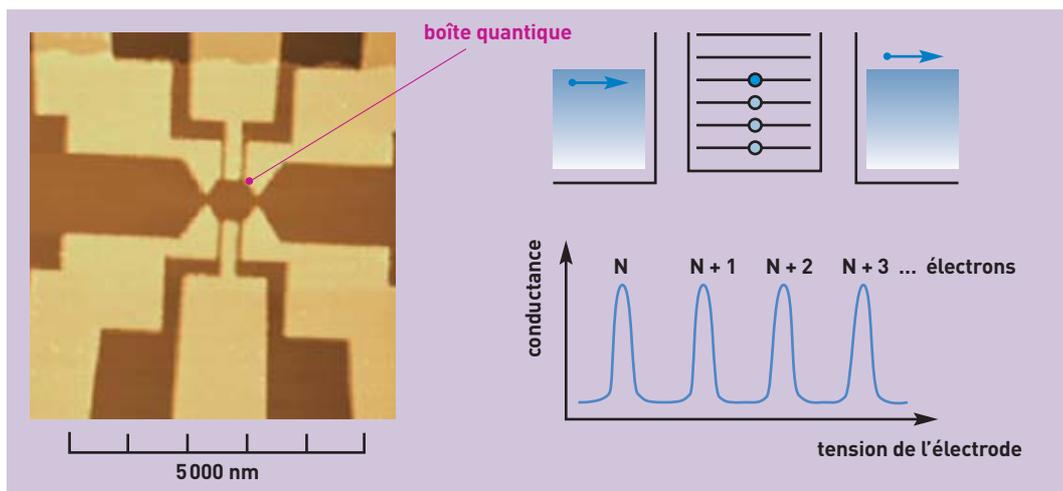


Figure 3. Une boîte quantique (au centre de l'image) est un petit îlot d'électrons de diamètre submicronique, séparé des contacts par une barrière tunnel. Sa conductance montre des pics en fonction de la tension d'une grille placée à proximité (ici la grille centrale) qui signale l'entrée d'un nouvel électron dans l'îlot.

des électrons donne des niveaux d'énergie **discrets** : quand l'énergie de l'électron injecté par les contacts coïncide avec l'un de ces niveaux, la conductance est maximale. Pratiquement, pour changer les niveaux d'énergie, un potentiel est appliqué sur une électrode voisine (figure 3). On pourrait s'attendre à ce que la charge de l'îlot varie continûment comme si l'électrode et l'îlot formaient les deux armatures d'une capacité

macroscopique. Mais, hors résonance, l'îlot échange difficilement un électron avec les contacts : sa charge est quantifiée. La charge varie alors par saut de e au passage de chaque résonance de transmission. Cela correspond à l'occupation d'un nouvel état accessible. La quantification de la charge est aussi renforcée par l'énergie de Coulomb (ou d'ionisation) qui est l'énergie capacitive à "payer" pour extraire ou additionner

C'est qu'à tout instant l'objet quantique présente la caractéristique de *superposer* plusieurs états, comme une onde peut être le résultat de l'*addition* de plusieurs autres. Dans le domaine quantique, la hauteur d'une onde (assimilable à celle d'une vague par exemple) a pour équivalent une **amplitude de probabilité** (ou onde de probabilité), nombre complexe associé à chacun des états possibles d'un système qualifié ainsi de quantique. Mathématiquement, un état physique d'un tel système est représenté par un **vecteur d'état**, fonction qui, en vertu du principe de superposition, peut s'ajouter à d'autres. Autrement dit, la somme de deux vecteurs d'état possibles d'un système est *aussi* un vecteur d'état possible du système. De plus, le produit de deux espaces vectoriels est aussi la somme de produits de vecteurs, ce qui traduit l'**intrication** : un vecteur d'état étant généralement étalé dans l'espace, l'idée de localité des objets ne va plus de soi. Dans une paire de particules intriquées, c'est-à-dire créées ensemble ou ayant déjà interagi l'une sur l'autre, décrite par le *produit* et non par la *somme* de deux vecteurs d'état individuels, le destin de chacune est lié à celui de l'autre, quelle que soit la distance qui pourra les séparer. Cette caractéristique, également appelée *l'enchevêtrement quantique d'états*, a

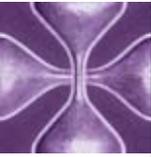
des implications vertigineuses, sans parler des applications imaginables, de la cryptographie quantique à – pourquoi ne pas rêver ? – la téléportation. Dès lors, la possibilité de prévoir le comportement d'un système quantique n'est qu'une prédictibilité probabiliste et statistique. L'objet quantique est en quelque sorte une "juxtaposition de possibles". Tant que la mesure sur lui n'est pas faite, la grandeur censée quantifier la propriété physique recherchée n'est pas strictement définie. Mais dès que cette mesure est engagée, elle détruit la **superposition quantique**, par *réduction du paquet d'ondes*, comme Werner Heisenberg l'énonçait en 1927. Toutes les propriétés d'un système quantique peuvent être déduites à partir de l'équation proposée l'année précédente par Erwin Schrödinger. La résolution de cette **équation de Schrödinger** permet de déterminer l'énergie du système ainsi que la **fonction d'onde**, notion qui a donc tendance à être remplacée par celle d'amplitude de probabilité. Selon un autre grand principe de la physique quantique, le **principe (d'exclusion) de Pauli**, deux particules identiques de spin $\frac{1}{2}$ (c'est-à-dire des **fermions**, en particulier les électrons) ne peuvent avoir à la fois la même position, le même spin et la même vitesse (dans les limites

posées par le principe d'incertitude), c'est-à-dire se trouver dans le même *état quantique*. Les **bosons** (en particulier les photons), ne suivent pas ce principe et peuvent se trouver dans le même état quantique.

La coexistence des **états superposés** donne sa **cohérence** au système quantique. Dès lors, la théorie de la **décohérence quantique** peut expliquer pourquoi les objets macroscopiques ont un comportement "classique" tandis que les objets microscopiques, atomes et autres particules, ont un comportement quantique. Plus sûrement encore qu'un dispositif de mesure pointu, "l'environnement" (l'air, le rayonnement ambiant, etc.) exerce son influence, éliminant radicalement toutes les *superpositions d'état* à cette échelle. Plus le système considéré est gros, plus il est en effet couplé à un grand nombre de degrés de liberté de cet environnement. Et donc moins il a de "chances" – pour rester dans la logique probabiliste – de sauvegarder une quelconque cohérence quantique.

POUR EN SAVOIR PLUS

Étienne KLEIN, *Petit voyage dans le monde des quanta*, Champs, Flammarion, 2004.



un électron. Ce dernier effet, plus robuste, subsiste même à haute température, quand l'espacement entre niveaux d'énergie devient plus petit que l'énergie associée aux transferts thermiques.

Des conducteurs sans bruit : le silence des électrons

Un bon conducteur doit transmettre un courant en y ajoutant le minimum de fluctuations. Or, la charge étant discrète et le nombre d'électrons traversant le conducteur pendant un temps défini une donnée probabiliste, il en résulte un incontournable "bruit de grenaille" du courant. Pour les conducteurs quantiques, ce bruit est très faible, voire nul (figure 4). En effet, un contact injecte les électrons régulièrement à la fréquence eV/h . Les fluctuations proviennent alors du seul caractère probabiliste quantique de passage des électrons. La loi de probabilité est binomiale: un électron est transmis ou réfléchi. La variance du courant est proportionnelle au produit de la transmission par la réflexion. Si la transmission est faible, le bruit est faible mais le courant I aussi: le bruit est donné par la *loi de Schottky* ($S_I = 2eI$ où S_I est la puissance de bruit par unité de fréquence et I la valeur moyenne de l'intensité) observée pour les barrières tunnel ou les **diodes** à semi-conducteurs. Si la transmission approche l'unité, le courant est important, mais le bruit s'annule comme la réflexion. L'annulation du bruit est observée dans un contact ponctuel. Pour un conducteur quelconque, on trouve que le bruit est trois à quatre fois plus petit que le *bruit de Schottky*.

Bien qu'observés au départ dans des systèmes modèles à basse température, les effets décrits plus haut sont observables maintenant à température ambiante sur des échelles atomiques. En effet, si l'échelle de longueur au-

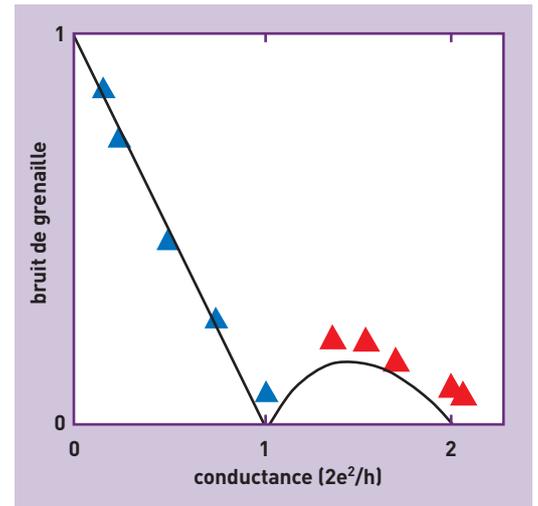


Figure 4. "Bruit de grenaille" du courant normalisé au bruit de Schottky pour différentes valeurs de la conductance d'un contact ponctuel. Le bruit, en général très réduit, va même jusqu'à s'annuler quand un nombre entier de modes est parfaitement transmis, c'est-à-dire quand la conductance est multiple du quantum de conductance (doublé par dégénérescence de spin).

dela de laquelle les électrons perdent leur **cohérence** quantique par interaction avec un environnement macroscopique est micrométrique à basse température, elle est encore de l'ordre de la dizaine de nanomètres pour la plupart des matériaux à température ambiante. À cette échelle nanométrique, désormais accessible à l'expérimentation, l'électronique ne peut être que quantique!

➤ Denis-Christian Glattli* et Marc Sanquer**

Direction des sciences de la matière
CEA centres de Saclay* et de Grenoble**

A Du monde macroscopique au nanomonde, ou l'inverse...

Afin de se représenter plus aisément les dimensions des objets micro et nanoscopiques*, il est pratique de procéder à des comparaisons et courant de faire correspondre différentes échelles, par exemple celle du monde du vivant, de la molécule à l'homme, et celle des objets manipulés ou fabriqués par lui (figure). Cette correspondance entre "artificiel" et "naturel" permet, par exemple, de voir que des **nanoparticules** fabriquées artificiellement sont plus petites que des globules rouges.

Un autre mérite de cette juxtaposition est d'illustrer les deux grandes façons

*Du grec *nano* qui signifie "tout petit" et est utilisé comme préfixe pour désigner le milliardième (10^{-9}) d'une unité. En l'occurrence, le **nanomètre** ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$, soit un milliardième de mètre) est l'unité reine du monde des nanosciences et des nanotechnologies.



Tranche de silicium de 300 mm réalisée par l'Alliance Crolles2, illustration de la démarche *top-down* actuelle de la microélectronique.

d'élaborer des objets ou des systèmes nanométriques : la voie descendante (*top-down*) et la voie ascendante (*bottom-up*). Deux chemins mènent en effet au nanomonde : la fabrication moléculaire, qui passe par la manipulation d'**atomes** individuels et la construction à partir de la base, et l'ultraminaturisation, qui produit des systèmes de plus en plus petits.

La voie descendante est celle du monde artificiel, qui part de matériaux macroscopiques, ciselés par la main de l'homme puis par ses instruments : c'est elle qu'a empruntée l'électronique depuis plusieurs dizaines d'années, principalement avec le **silicium** comme substrat, et ses "tranches" (*wafers*) comme entités manipulables. C'est d'ailleurs la microélectronique qui a largement contribué à donner à cette voie le nom anglais sous laquelle elle

est connue. Mais il ne s'agit plus seulement d'adapter la miniaturisation de la filière silicium actuelle, mais aussi de prendre en compte, pour s'en prémunir ou les utiliser, les phénomènes physiques, **quantiques** en particulier, qui apparaissent aux faibles dimensions.

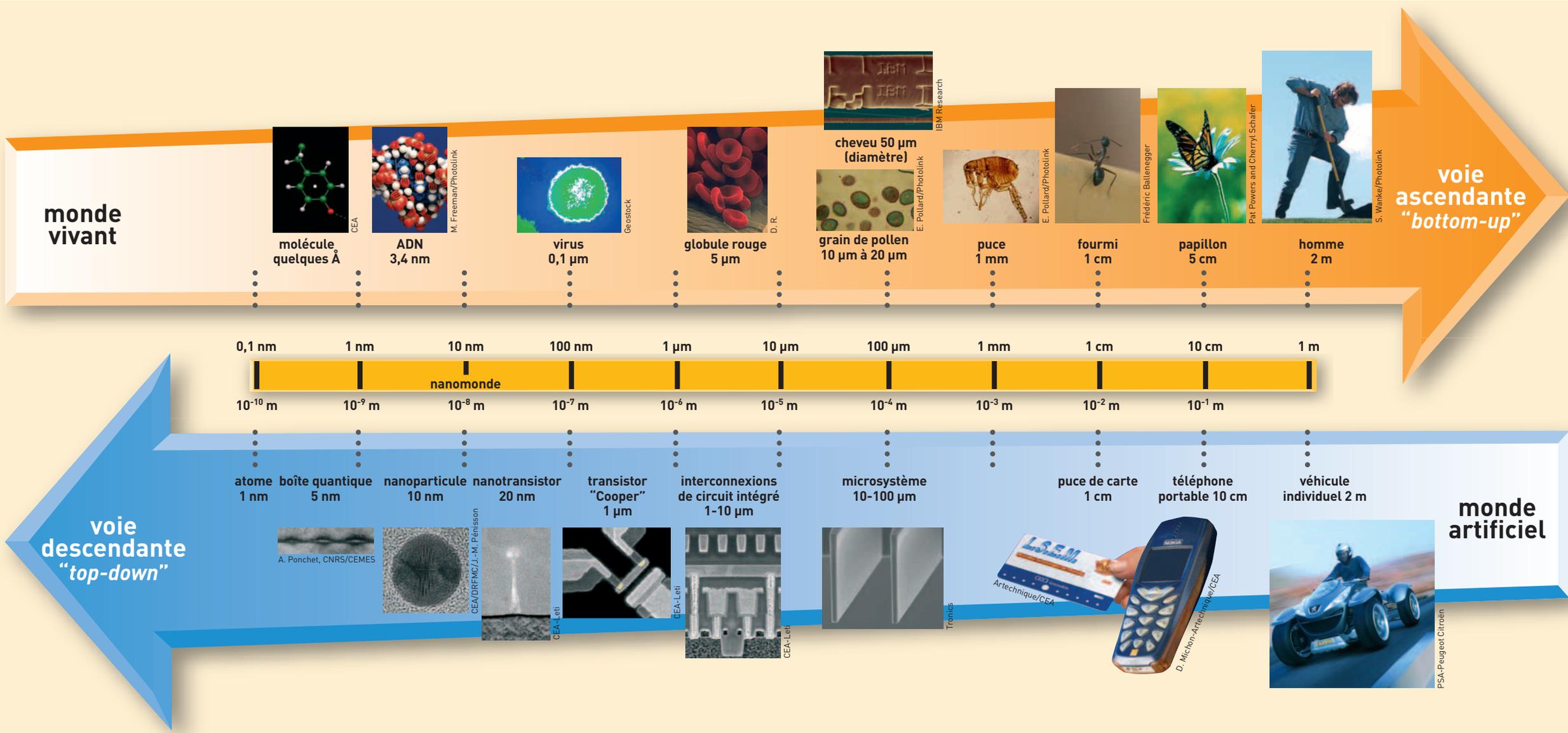
La voie ascendante peut permettre de passer outre ces limites physiques et aussi de réduire les coûts de fabrication, en utilisant notamment l'**auto-assemblage** des composants. C'est elle que suit la vie en pratiquant l'assemblage de molécules pour créer des **protéines**, enchaînement d'acides aminés que des super-molécules, les **acides nucléiques** (ADN, ARN), savent faire produire au sein de cellules pour former des organismes, les faire fonctionner et se reproduire tout en se complexifiant. Cette voie, dite "*bottom-up*", vise à orga-

niser la matière à partir de "briques de base", dont les atomes eux-mêmes sont les plus petits constituants, à l'instar du monde vivant. La nanoélectronique du futur cherche à emprunter cette voie d'assemblage pour aboutir à moindre coût à la fabrication d'éléments fonctionnels.

Les **nanosciences** peuvent ainsi être définies comme l'ensemble des recherches visant à la compréhension des propriétés (physiques, chimiques et biologiques) des nano-objets ainsi qu'à leur fabrication et à leur assemblage par auto-organisation.

Les **nanotechnologies** regroupent l'ensemble des savoir-faire qui permettent de travailler à l'échelle moléculaire pour organiser la matière afin de réaliser ces objets et matériaux, éventuellement jusqu'à l'échelle macroscopique.

A (Suite)



D Le transistor, composant de base des circuits intégrés

En décembre 1947, John Bardeen et Walter H. Brattain réalisaient le premier **transistor** en germanium. Avec William B. Shockley, aux Bell Laboratories, ils développaient l'année suivante le transistor à jonction et la théorie associée. Au milieu des années 1950, les transistors seront réalisés en **silicium** (Si), qui reste aujourd'hui le **semi-conducteur** généralement utilisé, vu la qualité inégalée de l'interface créée par le silicium et l'oxyde de silicium (SiO_2), qui sert d'isolant.

En 1958, Jack Kilby invente le **circuit intégré** en fabriquant cinq composants sur le même substrat. Les années 1970 verront le premier microprocesseur d'Intel (2250 transistors) et les premières mémoires. La complexité des circuits intégrés ne cessera de croître exponentiellement depuis (doublement tous les deux-trois ans, selon la "loi de Moore") grâce à la miniaturisation des transistors. Le transistor (de l'anglais *transfer resistor*, résistance de transfert), composant de base des **circuits intégrés** micro-

électroniques, le restera *mutatis mutandis* à l'échelle de la nanoélectronique : adapté également à l'amplification, entre autres fonctions, il assume en effet une fonction basique essentielle : laisser passer un courant ou l'interrompre à la demande, à la manière d'un commutateur (figure). Son principe de base s'applique donc directement au traitement du langage binaire (0, le courant ne passe pas ; 1, il passe) dans des circuits logiques (inverseurs, portes, additionneurs, cellules mémoire).

Le transistor, fondé sur le transport des électrons dans un solide et non plus dans le vide comme dans les tubes électroniques des anciennes **triodes**, est composé de trois **électrodes** (*anode, cathode et grille*) dont deux servent de réservoirs à **électrons** : la **source**, équivalent du filament *émetteur* du tube électronique, le **drain**, équivalent de la plaque *collectrice*, et la **grille**, le "contrôleur". Ces éléments ne fonctionnent pas de la même manière dans les deux principaux types de transistors utilisés aujourd'hui, les *transistors bipolaires à jonction*, qui ont été les premiers à être utilisés, et les *transistors à effet de champ* (en anglais FET, *Field Effect Transistor*). Les transistors bipolaires mettent en œuvre les deux types de porteurs de charge, les électrons (charges négatives) et les **trous** (charges positives), et se composent de deux parties de substrat semi-conducteur identiquement

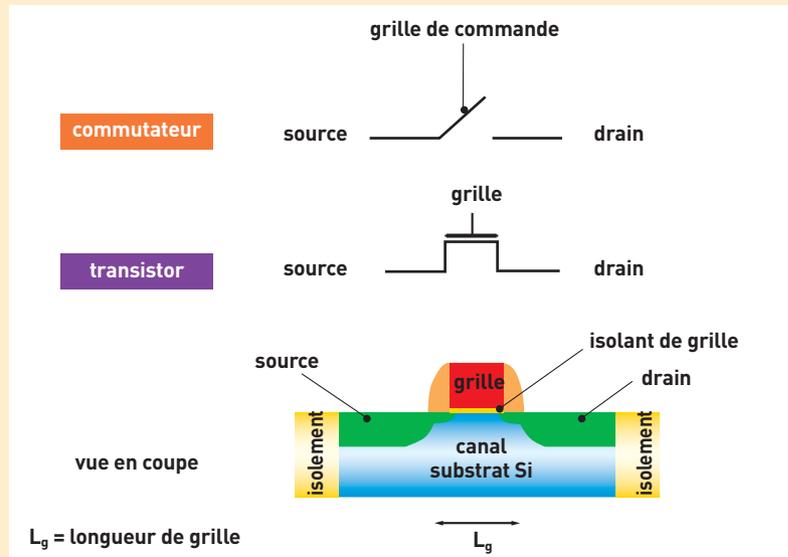


Figure. Un transistor MOS est un commutateur qui permet de commander le passage d'un courant électrique de la source (S) vers le drain (D) à l'aide d'une grille (G) isolée électriquement du canal de conduction. Le substrat en silicium est noté B (pour *Bulk*).

D (Suite)

dopées (p ou n), séparées par une mince couche de semi-conducteur inversement dopée. L'assemblage de deux semi-conducteurs de types opposés (jonction p-n) permet de ne faire passer le courant que dans un sens. Qu'ils soient de type n-p-n ou p-n-p, les transistors bipolaires sont fondamentalement des amplificateurs de courant, commandés par un courant de grille⁽¹⁾ : ainsi dans un transistor n-p-n, la tension appliquée à la partie p contrôle le passage du courant entre les deux régions n. Les circuits logiques utilisant des transistors bipolaires, appelés TTL (*Transistor Transistor Logic*), sont plus consommateurs de courant que les transistors à effet de champ, qui présentent un courant de grille nul en régime statique et sont commandés par l'application d'une tension.

Ce sont ces derniers, sous la forme **MOS** (Métal oxyde semi-conducteur), qui composent aujourd'hui la plupart des circuits logiques du type CMOS (C pour complémentaire)⁽²⁾. Sur un cristal de silicium de type p, deux régions de type n sont créées par dopage de la surface. Appelées là aussi **source** et **drain**, ces deux régions ne sont donc séparées que par un petit espace de type p, le **canal**. Sous l'effet d'une tension positive sur une électrode de commande placée

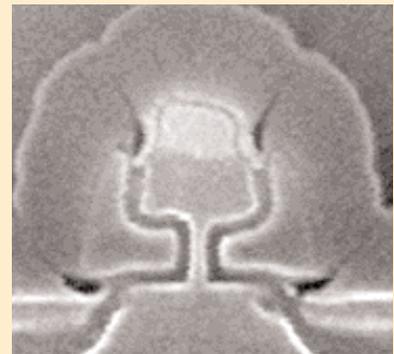
au-dessus du semi-conducteur et qui porte tout naturellement le nom de **grille**, les trous sont repoussés de sa surface où viennent s'accumuler les quelques électrons du semi-conducteur. Un petit canal de conduction peut ainsi se former entre la source et le drain (figure). Lorsqu'une tension négative est appliquée sur la grille, isolée électriquement par une couche d'oxyde, les électrons sont repoussés hors du canal. Plus la tension positive est élevée, plus la résistance du canal diminue et plus ce dernier laisse passer de courant. Dans un circuit intégré, les transistors et les autres composants (diodes, condensateurs, résistances) sont d'origine incorporés au sein d'une "puce" aux fonctions plus ou moins complexes. Le circuit est constitué d'un empilement de couches de matériaux conducteurs ou isolants délimitées par **lithographie** (encadré E, *La lithographie clé de la miniaturisation*, p. 37). L'exemple le plus emblématique est le microprocesseur placé au cœur des ordinateurs et qui regroupe plusieurs centaines de millions de transistors (dont la taille a été réduite par 10 000 depuis les années 1960) et bientôt un milliard, ce qui amène les industriels à fractionner le cœur des processeurs en plusieurs sous-unités travaillant en parallèle !

(1) Figurent dans cette catégorie les **transistors de type Schottky** ou à **barrière Schottky** qui sont des transistors à effet de champ comportant une grille de commande de type métal/semi-conducteur qui améliore la mobilité des porteurs de charge et le temps de réponse au prix d'une plus grande complexité.

(2) On parle alors de transistor **MOSFET** (*Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*).



Le tout premier transistor.



Transistor 8 nanomètres développé par l'Alliance Crolles2 réunissant STMicroelectronics, Philips et Freescale Semiconductor.

E La lithographie, clé de la miniaturisation

La **lithographie** optique (ou photolithographie), application majeure de l'interaction particules/matière, est le procédé traditionnel de fabrication des **circuits intégrés**. Étape clé de la définition des motifs de ces circuits, elle reste le verrou de leur développement. La résolution étant en première approximation directement proportionnelle à la longueur d'onde, la finesse des motifs a d'abord progressé avec la diminution, qui s'est effectuée par sauts, de la longueur d'onde λ du rayonnement utilisé.

L'opération consiste en l'*exposition* via une optique réductrice d'une résine photosensible à des particules énergétiques, depuis les **photons ultraviolet (UV)** actuellement utilisés jusqu'aux **électrons** en passant par les photons **X** et les **ions**, au travers d'un masque représentant le dessin d'un circuit. Le but ? Transférer cette image sur l'empilement de couches isolantes ou conductrices qui le constitueront, déposées précédemment (phase de *couchage*) sur une plaquette (*wafer*) de matériau **semi-conducteur**, en général de **silicium**. Ce processus est suivi de la dissolution de la résine exposée à la lumière (*développement*). Les parties exposées de la couche initiale peuvent être alors gravées sélectivement, puis la résine est retirée chimiquement avant le dépôt de la couche suivante. Cette étape de lithographie peut intervenir plus d'une vingtaine de fois au cours de la fabrication d'un circuit intégré (figure).

Dans les années 1980, l'industrie de la microélectronique utilisait des lampes à mercure délivrant dans l'**UV proche** (raies g, h, i), à travers des optiques en quartz, un rayonnement d'une longueur d'onde de 436 nanomètres (nm). Elle gravait ainsi des structures d'une largeur de trait de 3 microns (μm). Employées jusqu'au milieu des années 1990, ces lampes ont été remplacées par des **lasers à excimères** émettant dans l'**UV lointain** (krypton-fluor KrF à 248 nm, puis argon-fluor ArF à 193 nm, les photons créés ayant une énergie de quelques **électronvolts**), permettant d'atteindre des résolutions de 110 nm, et même inférieures à 90 nm avec de nouveaux procédés.

Le Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information (Leti) du CEA a été un des pionniers, dans les années 1980, dans l'utilisation des lasers en



Zone de photolithographie en salle blanche dans l'usine STMicroelectronics de Crolles (Isère).

lithographie et dans la réalisation des circuits intégrés par les lasers à excimères, qui constituent aujourd'hui les sources employées pour la production des circuits intégrés les plus avancés. Pour l'industrie, l'étape suivante devait être le laser F₂ ($\lambda = 157 \text{ nm}$), mais cette lithographie a été quasiment abandonnée face à la difficulté de réaliser des optiques en CaF₂, matériau transparent à cette longueur d'onde.

Si la diminution de la longueur d'onde des outils d'exposition a été le premier facteur à permettre le gain en résolution considérable déjà obtenu, deux autres ont été déterminants. Le premier a été la mise au point de résines photosensibles basées sur des matrices de **polymères** peu absorbantes aux longueurs d'onde utilisées et mettant en œuvre des mécanismes de

propagation de l'énergie reçue toujours plus innovants. Le second a consisté en l'amélioration des optiques avec une diminution des phénomènes parasites liés à la diffraction (meilleure qualité de surface, augmentation de l'**ouverture numérique**).

Au fil des années, la complexité accrue des systèmes optiques a ainsi permis d'obtenir des résolutions *inférieures* à la longueur d'onde de la source. Cette évolution ne pourra se poursuivre sans une rupture technologique majeure, un saut important en longueur d'onde. Pour les gé-

érations des circuits intégrés dont la résolution minimale est comprise entre 80 et 50 nm (le prochain "nœud" se situant à 65 nm), différentes voies basées sur la projection de particules à la longueur d'onde de plus en plus courte ont été mises en concurrence. Elles mettent respectivement en œuvre des rayons X "mous", en extrême ultraviolet (dans la gamme des 10 nm), des rayons X "durs" (à la longueur d'onde inférieure à 1 nm), des ions ou des électrons.

L'étape consistant à atteindre des résolutions inférieures à 50 nm conduira à s'orienter plutôt vers la nanolithographie à l'aide d'électrons de basse énergie (10 eV) et d'outils plus adaptés comme le microscope à **effet tunnel** ou l'**épitaxie par jets moléculaires** (encadré C) pour la réalisation de "super-réseaux".

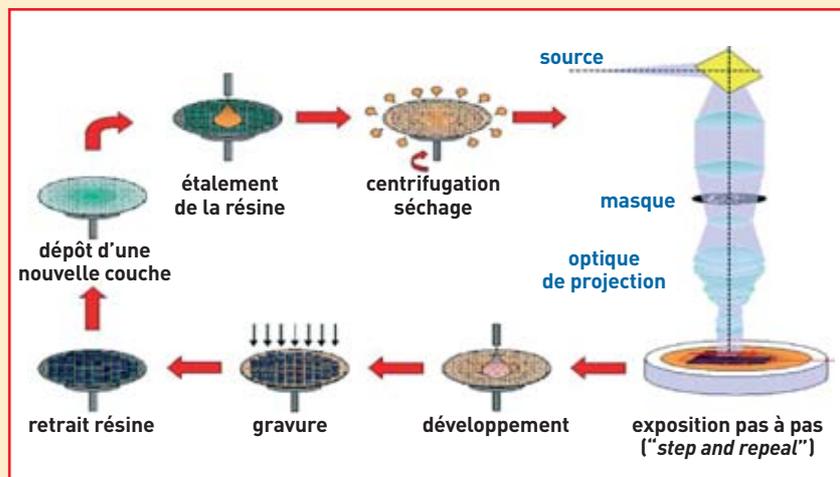


Figure. Les différentes phases du processus de lithographie dont le but est de délimiter les couches de matériaux conducteurs ou isolants qui constituent un circuit intégré. Cette opération est l'enchaînement d'un étalage de résine photosensible, de la projection du dessin d'un masque par une optique réductrice, suivis de la dissolution de la résine exposée à la lumière (développement). Les parties exposées de la couche initiale peuvent être alors gravées sélectivement, puis la résine est retirée avant le dépôt de la couche suivante.

G

L'effet tunnel, un phénomène quantique

La **physique quantique** prédit des comportements inhabituels et difficiles à accepter par notre intuition immédiate, comme l'**effet tunnel**. Prenons le cas d'une bille devant franchir une bosse. En physique classique, si l'énergie communiquée à la bille est insuffisante, elle ne peut pas franchir la bosse et retombe vers son point de départ. En physique quantique, une particule (**proton, électron**) peut franchir la bosse, même si son énergie initiale est insuffisante : elle peut passer de l'autre côté comme par un petit tunnel. L'effet tunnel peut ainsi permettre à deux protons de surmonter leur répulsion électrique à des vitesses relatives plus basses que celles qu'indique le calcul classique. La microscopie à effet tunnel est basée sur le fait qu'il y a une probabilité non nulle qu'une particule d'énergie inférieure à la hauteur d'une barrière de potentiel (la

bosse) puisse la franchir. Les particules sont des électrons traversant l'espace séparant deux **électrodes**, une fine pointe métallique terminée par un **atome** unique et la surface métallique ou **semi-conductrice** de l'échantillon. La physique classique donne d'une surface l'image d'une frontière étanche, les électrons étant strictement confinés à l'intérieur du solide. Par contre, la physique quantique enseigne que chaque électron a un comportement ondulatoire : sa position est "floue". En particulier, au voisinage de la surface existe un nuage d'électrons dont la densité décroît très rapidement, de façon exponentielle, lorsque l'on s'éloigne du solide. L'électron a une certaine probabilité de se trouver "en dehors" du solide. Quand la fine pointe métallique est approchée de la surface, à une distance inférieure au **nanomètre**, la **fonction d'onde** associée à l'électron n'est

pas nulle de l'autre côté de la barrière de potentiel, et les électrons passent de la surface à la pointe, et réciproquement, par effet tunnel. La barrière de potentiel franchie par les électrons est appelée **barrière tunnel**. Lorsqu'une faible tension est appliquée entre la pointe et la surface, un **courant tunnel** peut être détecté. La pointe et la surface étudiée forment localement une **jonction tunnel**. L'effet tunnel se manifeste également dans les **jonctions Josephson** où un courant continu peut passer à travers une étroite discontinuité entre deux éléments **supraconducteurs**. Dans un **transistor**, l'effet tunnel peut se révéler de manière parasite quand l'isolant de **grille** devient très mince (de l'ordre du nanomètre). Il est par contre mis à profit dans de nouvelles architectures, tels les **transistors à barrière tunnel Schottky** ou à base de **nanotubes de carbone**.

C L'épitaxie par jets moléculaires

La fabrication des **puits quantiques** utilise la technique d'**épitaxie** (du grec *taxi* (ordre) et *epi* (dessus) par jets moléculaires (en anglais MBE, pour *Molecular Beam Epitaxy*). Le principe de cette technique de dépôt physique, développée initialement pour la croissance **crystalline** des **semi-conducteurs** de la famille III-V, est fondé sur l'évaporation des différents constituants purs du matériau à élaborer dans une enceinte où est maintenu un vide poussé (pression pouvant être de l'ordre de $5 \cdot 10^{-11}$ mbar) afin d'éviter toute pollution de la surface. Un ou des jets thermiques d'**atomes** ou de **molécules** réagissent sur la surface propre d'un substrat monocristallin, placé sur un support maintenu à haute température (quelques centaines de °C), qui sert de trame pour former un film dit épitaxique. Il est ainsi possible de fabriquer des empilements de couches aussi fines que le milliardième de millimètre, c'est-à-dire composées de seulement quelques plans d'atomes.

Les éléments sont évaporés ou sublimés à partir d'une source de haute pureté, placée dans une **cellule à effusion** (chambre dans laquelle un flux moléculaire passe d'une région où règne une pression donnée à une région de plus basse pression) chauffée par **effet Joule**.

La croissance du film peut être suivie *in situ* et en temps réel en utilisant diverses sondes structurales et analytiques, en particulier des techniques d'étude de la qualité des surfaces et de leurs transitions de phase par diffraction électronique en incidence rasante, LEED (pour *Low energy electron diffraction*) ou RHEED (pour *Reflection high-energy electron diffraction*) et diverses méthodes **spectroscopiques** (spectroscopie d'**électrons** Auger, SIMS (spectrométrie de masse d'**ions** secondaires), spectrométrie de photoélectrons XPS par **rayons X** et UPS (*Ultraviolet photoelectron spectroscopy*).

La technique d'épitaxie par jets moléculaires s'est étendue à d'autres semi-

conducteurs que les III-V, à des métaux et à des isolants, se développant avec les progrès des techniques d'*ultravide*. Le vide régnant dans la chambre de croissance, dont la conception varie en fonction de la nature du matériau à déposer, doit en effet être meilleure que 10^{-11} mbar pour permettre la croissance d'un film de haute pureté et d'excellente qualité cristalline à des températures de substrat relativement basses. Il s'agit de qualité de vide lorsque le bâti est au repos. Pour la croissance d'arséniures, par exemple, le vide résiduel est de l'ordre de 10^{-8} mbar dès que la cellule d'arsenic est portée à sa température de consigne pour la croissance. Le pompage pour atteindre ces performances fait appel à plusieurs techniques (pompage ionique, cryopompage, sublimation de titane, pompes à diffusion ou turbomoléculaires). Les principales impuretés (H_2 , H_2O , CO et CO_2) peuvent présenter des pressions partielles inférieures à 10^{-13} mbar.