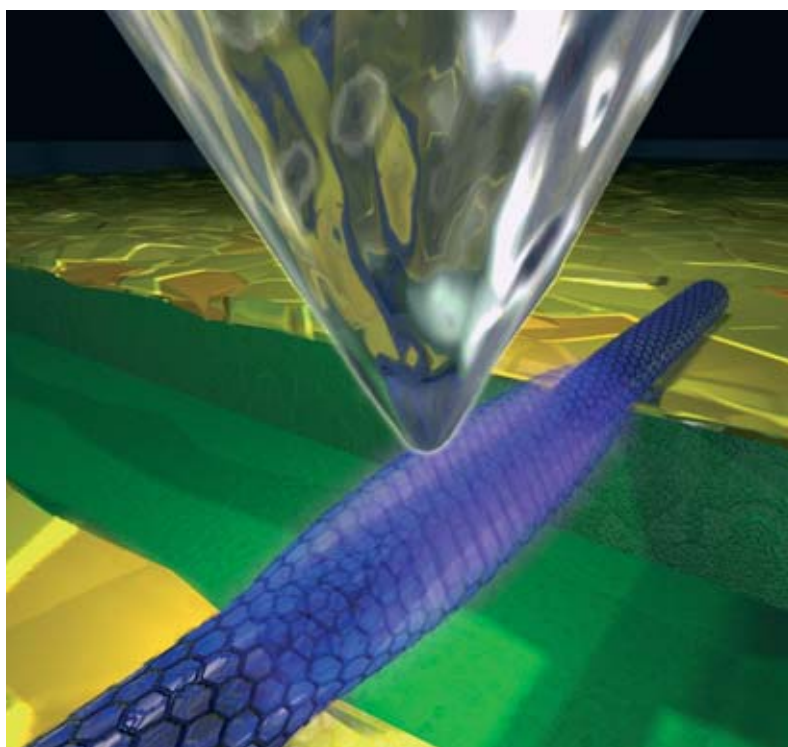


# Les microscopies à sonde locale : contact et manipulation

L'invention du microscope à effet tunnel a été une étape déterminante du développement des nanosciences. Cet instrument permet en effet non seulement d'observer mais aussi de déplacer un à un des atomes et de les assembler de façon dirigée. Le microscope à force atomique, qui en dérive, se révèle particulièrement bien adapté à l'exploration du nanomonde. Là aussi, la sonde de l'instrument constitue, dans des conditions particulières, un nano-outil qui permet l'élaboration de nanostructures superficielles artificielles.

Pour caractériser, voire élaborer les nano-objets, les microscopies électroniques conventionnelles (voir *Les microscopies électroniques conventionnelles: transmission et balayage*), bien appropriées à certaines problématiques, restent inopérantes dans de nombreux cas. Par exemple, des mesures précises du relief d'un échantillon à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB, en anglais SEM), nécessitent un traitement complexe du signal. Si des informations chimiques sont accessibles en analysant les photons générés lors de l'impact du faisceau d'électrons sur l'échantillon, la résolution latérale directement liée au diamètre du faisceau est, au mieux, de quelques nanomètres<sup>(1)</sup>. En conséquence, les MEB sont inadaptés dans de nombreux systèmes intéressant les nanosciences et les nanotechnologies. Par exemple, la structure de couches moléculaires auto-assemblées reste hors de portée pour deux raisons. La première est que la forte densité d'énergie déposée par le faisceau électronique risque de dégrader la couche. La seconde est liée à la taille des molécules, généralement bien inférieure au diamètre du faisceau. En microscopie électronique à transmission (MET, en anglais TEM), la résolution atomique est obtenue, mais elle correspond à la projection sur un écran de colonnes atomiques parallèles au faisceau.

Une avancée majeure dans le développement des nanosciences a été l'invention en 1981 de la microscopie à effet tunnel (*Scanning Tunneling Microscopy* ou STM) dans les laboratoires IBM à Zurich par Gerd Binnig et Heinrich Rohrer. À l'aide d'un tel microscope, ces chercheurs réussissent à dresser la cartographie, à l'échelle atomique, d'une surface d'or puis de silicium. Pour cette invention, ils partageront le prix Nobel de physique 1986 avec Ernst Ruska, à l'origine de la microscopie électronique conventionnelle dans les années 1930. C'est aussi en 1986 que Binnig propose un nouvel instrument qu'il nomme *Atomic Force Microscope* (AFM), microscope à force atomique, qui dérive du STM. Ce dispositif, qui met en jeu des forces très faibles ( $\sim 10^{-9}$  N), permet d'explorer la surface de tout type de solide. Particulièrement bien adapté à l'exploration du nanomonde, cet outil caractérise les propriétés superficielles locales, contrairement aux techniques de diffraction qui informent sur la symétrie et la distance moyenne entre les atomes ou les objets présents dans la zone analysée dont les dimensions sont typiquement millimétriques.



Vue d'artiste du sondage par STM d'un nanotube de carbone suspendu vibrant.

## Un principe étonnamment simple

Le principe des microscopes à sonde locale est fondé sur le déplacement d'une sonde le long de la surface, à la manière du faisceau d'électrons dans un MEB. La sonde est une pointe solide fine, effilée de façon que son extrémité soit constituée de quelques atomes seulement. Placée au voisinage immédiat de la surface, elle est en interaction avec celle-ci. Pour une intensité de l'interaction dépendant strictement de la distance pointe-surface, la trajectoire de la sonde lors du balayage le long de la surface reflétera, si cette interaction est maintenue constante, le relief de l'échantillon. Cependant, lorsque des hétérogénéités physico-chimiques superficielles perturbent l'interaction pointe-surface, le profil s'écarte du relief (figure 1). Pratiquement, tous ces microscopes ont en commun de nombreux éléments (figure 2). Ainsi, la sonde est fixée à un ensemble de céramiques piézoélectriques. Ces céramiques qui s'allongent ou se contractent suivant le signe de la tension appliquée, assurent des déplacements aussi petits que le picomètre ( $10^{-12}$  m). Un dispositif électronique mesure en permanence

(1) Un faisceau de moins d'un nm serait possible sur un prototype Hitachi.

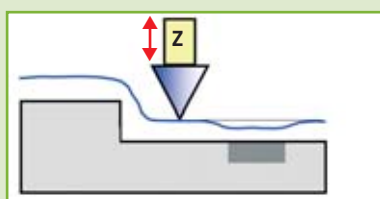
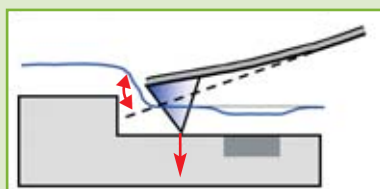
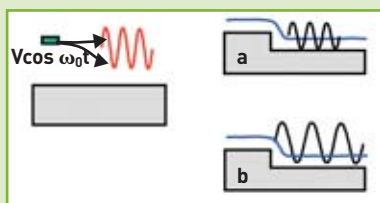


Figure 1. En haut, trajectoire de la position moyenne de la sonde d'un microscope à sonde le long d'une surface tandis qu'un système ajuste Z pour que l'interaction pointe-surface reste constante. Quand la surface est homogène, cette trajectoire reflète la topographie. Lorsqu'elle présente une hétérogénéité chimique (zone grise) qui modifie cette interaction, la trajectoire est modifiée.



Au centre, principe de l'AFM en mode contact. La pointe en contact répulsif avec la surface exerce une force perpendiculaire à la surface, égale au produit de la raideur du ressort par la déviation. La flèche verte repère cet écart entre la position loin de la surface (ligne tiretée) et le contact. La trajectoire de la pointe (en bleu) correspond à la topographie, sauf au-dessus d'une hétérogénéité où l'interaction pointe-surface change.



En bas, principe des AFM vibrants. Loin de la surface, le ressort vibre à sa fréquence de résonance  $f_0$  avec une amplitude  $A_0$ . Lorsque la pointe interagit avec la surface, la résonance du ressort est modifiée. La position moyenne de la sonde peut être ajustée de deux façons : en a), l'amplitude diminue d'une quantité donnée à fréquence fixe (modulation d'amplitude) ; en b) la fréquence est décalée d'un écart donné à amplitude constante (modulation de fréquence).

L'interaction pointe/surface et, grâce à un système d'asservissement, ajuste continuellement la tension appliquée à la céramique Z afin que l'interaction reste égale à une consigne fixée par l'opérateur. Dans ces conditions, la pointe ou sa position moyenne reste à une distance constante de la surface de l'échantillon. En déplaçant la sonde le long de la surface à l'aide des céramiques piézoélectriques X et Y par un balayage point par point, on obtient une série de profils d'iso-intensité de l'interaction pointe/surface. La juxtaposition de ces profils, visualisée sur un écran d'ordinateur, forme une nappe qui correspond à  $V_z = f(V_x, V_y)$  avec  $V_{x,y,z}$  les tensions appliquées aux céramiques X, Y et Z. Cette nappe représente généralement la topographie de la surface.

Pour obtenir des images topographiques de qualité indépendamment de la nature de l'interaction pointe-

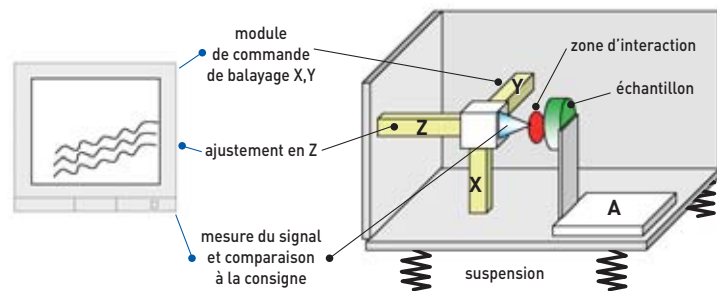


Figure 2.

Vue schématique d'un microscope à sonde locale, constitué de trois parties. L'ordinateur assure l'interface homme-machine, enregistre et visualise les données. L'électronique de commande pilote la mécanique et régule la tension  $V_z$  pour que le signal reste égal à la consigne. La mécanique, enfin, doit être bien isolée des vibrations du laboratoire.

La sonde est solidaire de céramiques qui la déplacent dans un volume maximum de  $100 \times 100 \times 10 \mu\text{m}^3$ , l'ensemble occupant typiquement un volume de  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ .

Le système d'approche de l'échantillon doit être extrêmement stable.

surface choisie, il faut surmonter une difficulté technique majeure : la suppression de toute vibration. En effet, une variation intempestive de la distance sonde-surface due à des vibrations provoque une réaction de la boucle d'asservissement et donc un "relief" dans l'image. L'élimination de ces vibrations devient très difficile quand on travaille à l'échelle atomique avec des amplitudes de relief mesurées aussi faibles que quelques picomètres. Deux systèmes sont mis en œuvre pour les supprimer : des suspensions qui permettent de s'affranchir de toutes les vibrations du laboratoire et une excellente stabilité des systèmes mécaniques qui déplacent l'échantillon en regard de la sonde lors de l'approche grossière. Ces systèmes de déplacement millimétrique sont utilisés pour que la surface parvienne à portée de la sonde car l'élongation de la céramique Z atteint au maximum 10 m.

## L'extraordinaire développement de la microscopie à effet tunnel

La microscopie à effet tunnel a connu depuis son invention un développement extraordinaire qui s'explique par sa simplicité et par la qualité des informations obtenues puisque la résolution atomique a été atteinte sur de nombreux systèmes. Dans un STM, l'interaction pointe-surface est mesurée par le nombre d'électrons qui circulent par effet tunnel entre la sonde métallique et la surface conductrice. Ce courant tunnel dû à la nature **quantique** des électrons (encadré G) n'apparaît que lorsque la distance sonde-surface est au plus égale au nanomètre et pour une faible tension appliquée à la jonction ( $V_t < 3 \text{ V}$ ). Dans une description très simplifiée de ce couple d'**électrodes** presque jointives, l'intensité du courant tunnel ( $I_t$ ) dépend exponentiellement de la distance pointe-échantillon<sup>(2)</sup>. Typiquement, un courant d'intensité de l'ordre du nanoampère ( $10^{-9} \text{ A}$ ) s'établit entre pointe et surface. C'est cette décroissance exponentielle du courant avec la distance qui explique l'extrême résolution spatiale de la STM. Ainsi, le courant tunnel est multiplié par 10 quand la pointe se rapproche de la surface de 0,1 nm ! Une autre conséquence de cette dépendance est que l'atome de la pointe le plus proche de la surface assure le transit de la majorité des électrons. De ce fait, les dimensions utiles de la sonde sont celles d'un seul atome.

Après préparation sous ultraviolet, la surface d'un monocristal de cuivre présente des zones planes appelées terrasses séparées par des marches de hauteur monoatomique (0,8 nm) (figure 3). Dans ce cas, l'amplitude mesurée du relief dû aux atomes est de 10 pm (0,01 nm). Le STM permet aussi d'étudier des surfaces plongées dans un liquide. Lorsque le liquide est un conducteur électrique, une protection isolant le corps de la pointe du liquide est nécessaire. Bien évidemment, l'extrême pointe doit rester découverte pour laisser le passage aux électrons qui transitent par effet tunnel. Des études *in situ* en cellules électrochimiques montrent la croissance atome par atome d'un dépôt métallique sur une surface d'or. Dans le cas de liquides isolants comme certains hydrocarbures, la pointe plonge dans le liquide et explore l'interface liquide-solide sans autre précaution. Par exemple, les chercheurs du CEA ont travaillé avec une solution diluée de fullerènes ( $C_{60}$ ) dans du tétra-

decane ( $C_{14}H_{30}$ ). Une couche moléculaire organisée de  $C_{60}$ , qui couvre partiellement une surface d'or, se forme spontanément à l'interface (figure 4). Les images STM de cette couche montrent que chaque molécule de  $C_{60}$  se présente sous la forme d'un protubérance séparée de sa voisine par 1 nm.

Au-delà de l'imagerie de la structure superficielle, des mesures spectroscopiques (on parle de STS, pour *Scanning Tunneling Spectroscopy*) peuvent être réalisées. Elles consistent, par exemple, en mesurant le courant tunnel en fonction de la tension de polarisation appliquée entre la pointe et le substrat à tracer des courbes  $I = f(V)$  pour une distance pointe-échantillon fixe. Ces mesures renseignent sur les densités électroniques de la surface avec une excellente résolution spatiale.

### Puissance et polyvalence de la microscopie à force atomique

La microscopie à force atomique, basée sur la mesure de la force ( $F$ ) ou du gradient de force ( $\partial F/\partial z$ ) entre une sonde et la surface, apparaît comme une technique extrêmement puissante et polyvalente. Contrairement à la STM, limitée aux échantillons conducteurs, elle permet l'exploration de la surface de tous les types de solides.

Le principe en est simple. L'extrémité libre d'une mince lame en silicium ou en nitrure de silicium (typiquement  $L = 300 \mu\text{m}$ ,  $l = 40 \mu\text{m}$ ;  $e = 5 \mu\text{m}$ ), qui joue le rôle de ressort, présente une pointe qui constitue la sonde. Quand la pointe est en interaction avec la surface, la force qui se développe fléchit cette lame par rapport à sa position loin de la surface. Cette flexion est souvent mesurée par la déviation d'un fin faisceau laser. Connaissant l'amplitude de cette déviation et la raideur du ressort, il est facile d'évaluer la force qui s'établit entre la pointe et la surface. Pour une pointe conductrice et la surface d'un métal non magnétique, plusieurs forces contribuent à l'interaction pointe-surface quand la distance entre pointe et échantillon diminue. Loin de la surface, des forces attractives dites de **Van der Waals** s'exercent puis, quand la pointe vient en contact avec la surface, ce sont des forces répulsives. Les forces se développant entre pointe et surface varient donc de façon non monotone avec la distance. Cette variation rend difficile la régulation de la position de la sonde par rapport à la surface puisque certaines intensités de forces correspondent à deux distances d'équilibre. L'autre difficulté résulte du fait que des forces interagissent à longue distance : le flanc de la pointe sonde contribue donc aux forces détectées par le ressort. C'est l'une des raisons pour lesquelles il est plus difficile d'obtenir la résolution atomique avec un AFM qu'avec un STM.

Différents modes de fonctionnement de l'AFM sont possibles. En se limitant aux plus courants, on distingue le *mode contact* (où la pointe touche, au sens classique, la surface) et deux *modes vibrants* dans lesquels la lame du ressort vibre au voisinage immédiat de la surface à une fréquence proche de sa résonance mécanique.

(2) Comme le montre l'équation :  $I_t = I_0 \exp(-2\kappa d)$ , où  $d$  est la distance pointe-échantillon avec  $\kappa$  constant et égal à  $\sim 0,1 \text{ nm}^{-1}$  et  $I_0$  qui dépend de  $V$  et de la nature des matériaux constituant la pointe et la surface.

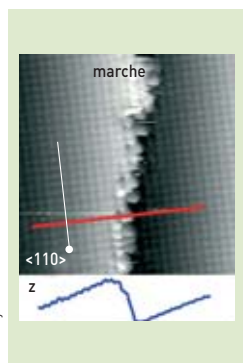


Figure 3.

Image STM d'une surface propre de cuivre [001] sous ultraviolet à température ambiante (aire  $6,3 \times 6,3 \text{ nm}$ , l'axe  $z$  est codé en nuances de gris). La surface est formée de terrasses planes où les atomes séparés par  $0,26 \text{ nm}$  présentent un arrangement en carré (relief associé aux atomes  $0,01 \text{ nm}$ ). La symétrie d'ordre 4 de l'arrangement des atomes est clairement visible sur ces terrasses. Une coupe suivant la ligne rouge montre le relief. La marche monoatomique a une hauteur égale à  $0,18 \text{ nm}$ . La disposition des atomes en bord de marche est mal définie pour deux raisons : les conditions d'imagerie sont localement perturbées car plusieurs atomes de la pointe contribuent au passage du courant et les atomes de cuivre bougent à la température ambiante. À noter qu'un STM est capable de positionner deux objets macroscopiques (la pointe et l'échantillon) avec une précision qui atteint  $10^{-12} \text{ m}$ !

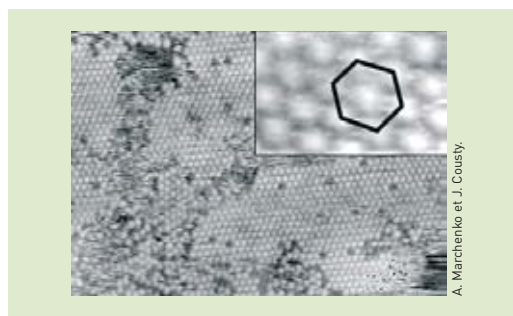


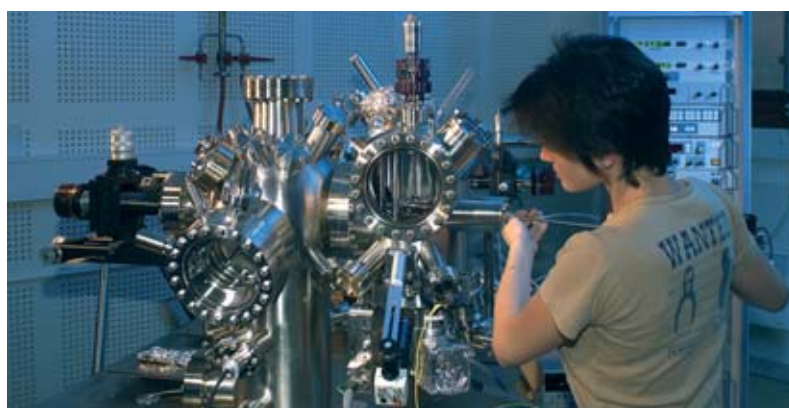
Figure 4.

Image STM obtenue à l'interface entre un liquide et une surface d'or (aire  $50 \times 36 \text{ nm}^2$ ). Le liquide contient des molécules de  $C_{60}$  (fullerène) qui s'adsorbent et s'auto-organisent à la surface du métal. Des îlots se forment avec un arrangement hexagonal compact de molécules séparées par  $1 \text{ nm}$  comme le montre l'agrandissement. Des lacunes et des défauts dans l'arrangement moléculaire sont clairement observables. Cette structure moléculaire est comparable à celle obtenue en déposant sous vide les mêmes molécules.

### Mode contact

Le principe de ce mode est illustré figure 1 (au centre), p. 92. La pointe est en contact répulsif avec la surface. L'intensité de la force appliquée par la pointe sur la surface supposée rigide dépend de la raideur du ressort et de la déviation de celui-ci par rapport à sa position au repos. En balayant la surface avec la pointe tout en gardant constante la flexion du ressort, la trajectoire de la pointe reproduit le relief de la surface. Cependant, du fait du contact et du balayage, une force de friction s'établit. L'expérience montre qu'une variation locale de cette force perturbe la mesure de la déviation du ressort. Par conséquent, l'image AFM altérée par des variations locales de la force de friction peut être différente du relief réel de l'échantillon. Lors de mesures à l'air, la force réellement développée entre la pointe et la surface dépend aussi de l'humidité ambiante. La couche hydratée recouvrant la surface forme un ménisque qui applique une force supplémentaire due à la capillarité. Malgré les limitations de la technique, des informations uniques deviennent accessibles avec un AFM en mode contact. C'est, en particulier, le cas de la topographie superficielle des matériaux diélectriques qui reste difficilement observable avec les microscopies électroniques conventionnelles, car ces matériaux accumulent les charges électriques dues à l'impact des

Couplage d'un microscope à effet tunnel et d'un microscope atomique, au CEA/Grenoble, dédié aux études d'électronique organique et moléculaire, principalement sur l'auto-organisation des systèmes moléculaires.



Artechnique/CEA

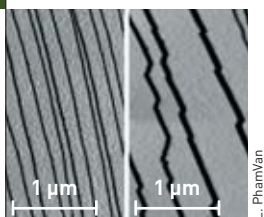


Figure 5. Image AFM mode contact de la surface d'un monocristal d'alumine illustrant son évolution morphologique à l'issue du refroidissement après un recuit à l'air. Après recuit à 1 200 °C, la surface présente des marches rectilignes ( $h \sim 1$  nm) et des terrasses. Un recuit à 1 500 °C de 4 h provoque la formation de facettes sur les marches dont le profil est en dents de scie.

électrons. Des observations par AFM à l'air montrent que la surface d'un cristal d'oxyde d'aluminium présente aussi des terrasses et des marches. Pendant un recuit à l'air à 1 500 °C, la densité de marches et leur forme évoluent (figure 5).

### Modes vibrants

Les AFM fonctionnant en mode vibrant permettent de s'affranchir de certaines limitations rencontrées en mode contact. En particulier, les difficultés associées aux forces de frictions sont minimisées. Dans ce mode, une tension  $V^{(3)}$  excite généralement une petite céramique piézoélectrique supportant le ressort. Celui-ci oscille alors à sa fréquence de résonance mécanique ( $f_0$ ) avec une amplitude  $A_0$  quand la pointe est loin de la surface. Quand elle interagit avec elle, l'amplitude et la fréquence du ressort vibrant sont altérées. Cela conduit à deux modes opératoires : l'un où l'amplitude est atténuée d'une quantité donnée et un second où la fréquence est décalée (figure 1, en bas).

Dans le mode "modulation d'amplitude" (en a), la position moyenne de la pointe par rapport à la surface est ajustée avec la céramique piézoélectrique Z pour que l'amplitude de vibration du ressort soit diminuée d'une quantité donnée par rapport à  $A_0$  à une fréquence fixée. Ce mode est très robuste en utilisation à l'air et conduit à des résultats reproductibles, car le film hydraté qui recouvre les échantillons devient moins gênant qu'en mode contact. Pour des atténuations importantes, la pointe touche à chaque cycle la surface, ce qui permet d'obtenir une bonne résolution selon l'axe z, comparable à celle obtenue en mode contact. Ce mode, parfois nommé *tapping mode*, est très utilisé pour les études à l'air et sur des échantillons fragiles (couches organiques ou objets biologiques). De plus, l'enregistrement simultané des conditions d'excitation du ressort informe sur la variation locale du couplage pointe-surface liée à des hétérogénéités chimiques.

Ainsi, on dispose de la topographie et d'informations sur la chimie locale de l'échantillon.

Dans le mode "modulation de fréquence" de la vibration du ressort (en b), la position moyenne de la pointe par rapport à la surface est ajustée avec la céramique piézoélectrique Z pour que le décalage en fréquence par rapport à  $f_0$  reste constant à amplitude donnée. C'est en utilisant ce mode sous vide que la résolution atomique a été obtenue sur différents matériaux comme le silicium, des cristaux ioniques ou l'alumine... Une analyse détaillée du mouvement de la pointe montre que le décalage en fréquence est proportionnel au gradient local de force pour de faibles amplitudes de vibration. L'origine du contraste de ces images à haute résolution est encore discutée (figure 6). Bien sûr, les images AFM et STM montrent la même structure atomique. Cependant, on observe de légères différences de contraste qui résultent de la nature différente des interactions entre sonde et surface entre les deux techniques.

Par ailleurs, la force ou le gradient de force utilisés pour cartographier des surfaces peuvent résulter de différents types d'interaction pointe-surface qui donnent accès à de nouvelles informations après un traitement adapté des données. Ainsi, pour des matériaux magnétiques ou diélectriques ayant piégé des charges électriques, des forces supplémentaires couplent la surface et une pointe adaptée à l'interaction. En séparant par des techniques spécifiques les différentes contributions dues à ces forces supplémentaires, il est possible d'établir la cartographie des propriétés magnétiques ou électriques de l'échantillon simultanément avec la simple topographie de la surface. Cette adaptabilité de l'AFM à de nouvelles problématiques engendre, aujourd'hui encore, un effort soutenu d'instrumentation.

■ (3) Où  $V = V_0 \sin(2\pi f_0 t + \varphi)$ .

## 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.

## Les microscopes à sonde locale comme nano-outils

La pointe des microscopes à sonde locale téléguidée par l'opérateur peut aussi localement façonner la surface. La séquence consiste à observer cette surface (état initial) puis à la modifier par une procédure particulière et enfin à observer les modifications réalisées. Plusieurs procédures ont été utilisées pour sculpter, à l'échelle nanométrique ou même atomique, une surface. Par exemple, la pointe déplace des atomes **adsorbés** aléatoirement sur la surface et les arrange en nanostructure artificielle. La pointe peut, grâce à un *pulse* de tension, décomposer des molécules organométalliques formant un dépôt local ou extraire des atomes de la surface. D'autres modes d'action ont été explorés conduisant à des altérations plus ou moins maîtrisées de l'échantillon. Ces procédures sont coûteuses en temps car la pointe doit parcourir chaque nano-objet que l'on veut créer.

## De nouvelles évolutions attendues

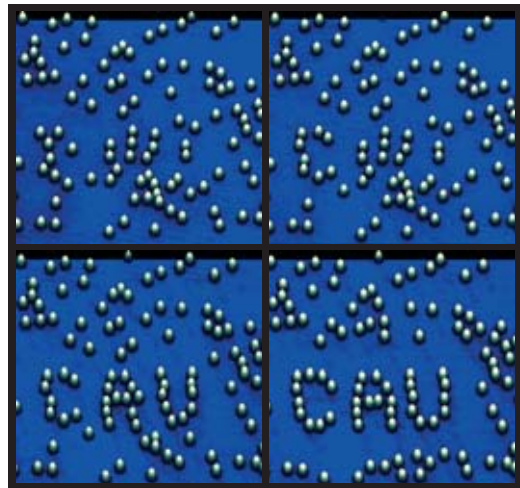
Les nanosciences et les nanotechnologies nécessitent des investigations structurales et physico-chimiques aux échelles comprises entre l'atome et le micromètre. Parmi les microscopes à champ proche, le STM reste l'instrument privilégié pour des investigations à l'échelle atomique de la surface d'échantillons conducteurs ou de couches ultra-minces isolantes déposées sur un substrat conducteur.

La microscopie AFM s'avère très polyvalente en donnant accès à une grande variété d'informations. Au-delà de la topographie superficielle de tous types de matériaux, des cartographies de la variation de forces magnétique, électrostatique ou chimique ont déjà été réalisées. L'AFM devrait encore évoluer, car de nouvelles sondes supprimant la détection optique de la déviation du ressort sont actuellement testées. Les microscopes à sonde locale comme outils pour générer des nano-objets ou des nanostructures souffrent d'une limitation liée à leur principe. La pointe, le nano-outil, se déplace lentement le long de la surface ce qui conduit à un temps "d'usinage" très long. Différentes solutions ont été proposées pour réduire cette durée. Par exemple, un peigne comprenant plusieurs centaines de ressorts actionnés individuellement permet le travail en parallèle des nano-outils réduisant ainsi la durée totale d'usinage.

### > Jacques Cousty\*

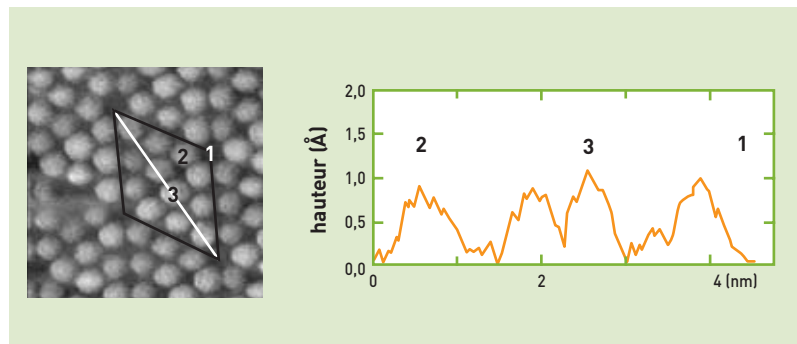
Direction des sciences de la matière  
CEA centre de Saclay

\* Assisté de Laurent PhamVan,  
Christophe Lubin, François Thoyer  
et Aldo Vittiglio



Bernot et al.

Série d'images STM présentant quelques étapes de l'arrangement d'atomes de manganèse sur une surface d'argent, refroidie à 4,6 K, sur laquelle des atomes de manganèse ont été déposés (aire  $32 \times 32 \text{ nm}^2$ ). Dans l'image 1, les points blancs correspondent aux atomes de manganèse (Mn) répartis aléatoirement sur la surface. Dans les images suivantes, l'opérateur se sert de la pointe du STM de deux façons : 1) comme sonde, afin d'*imager* le relief ; 2) comme outil, pour déplacer certains atomes. Cette fonction est obtenue en rapprochant délicatement la pointe de la surface par rapport à sa position dans le mode image. Ainsi, l'interaction entre un atome adsorbé et la pointe augmente et l'atome accroché à la pointe suit la pointe quand elle est déplacée. L'atome de Mn "glisse" ainsi le long de la surface. Une fois celui-ci arrivé à l'emplacement choisi, la pointe est éloignée de la surface, laissant l'atome sur place. Cette séquence très délicate doit être répétée pour chaque atome. Finalement, les lettres CAU (pour Christian-Albrecht Universität) ont été dessinées à l'aide de quelques dizaines d'atomes en environ une heure.



Repris de la fig. 1b de Lantz et al., Science 291 : 2590-2593 (2001), avec la permission de l'auteur © 2005 AAAS.

Figure 6.

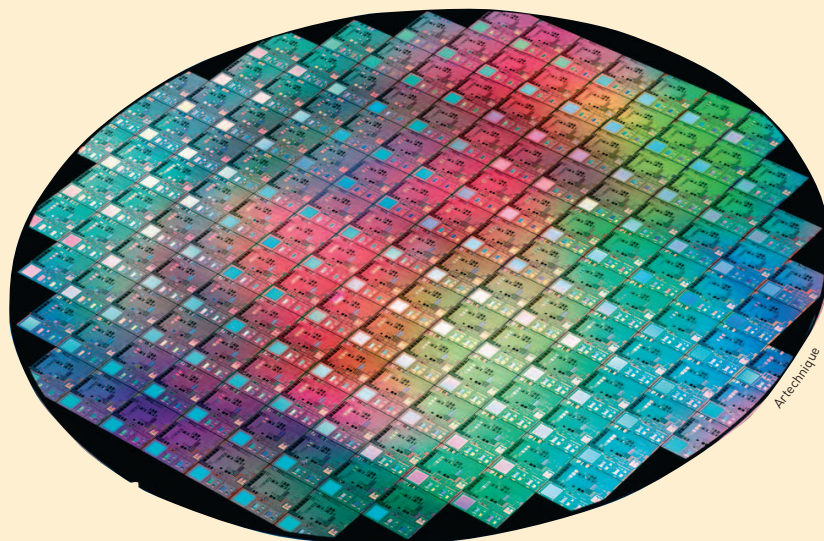
Image à résolution atomique d'une surface (111) de silicium par AFM en mode modulation de fréquence obtenue sous vide à température ambiante. Chaque bosse correspond à un atome de silicium. Ces atomes superficiels se réorganisent suivant un nouveau réseau décrit par une grande maille à cause des liaisons pendantes dues à la présence de la surface. Cette maille (trait noir) correspond à celle obtenue par STM. La coupe suivant la ligne blanche montre le relief. Toutefois, il existe des différences dans les hauteurs relatives des atomes mesurées dans les images STM et AFM.

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

**A**fin 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.

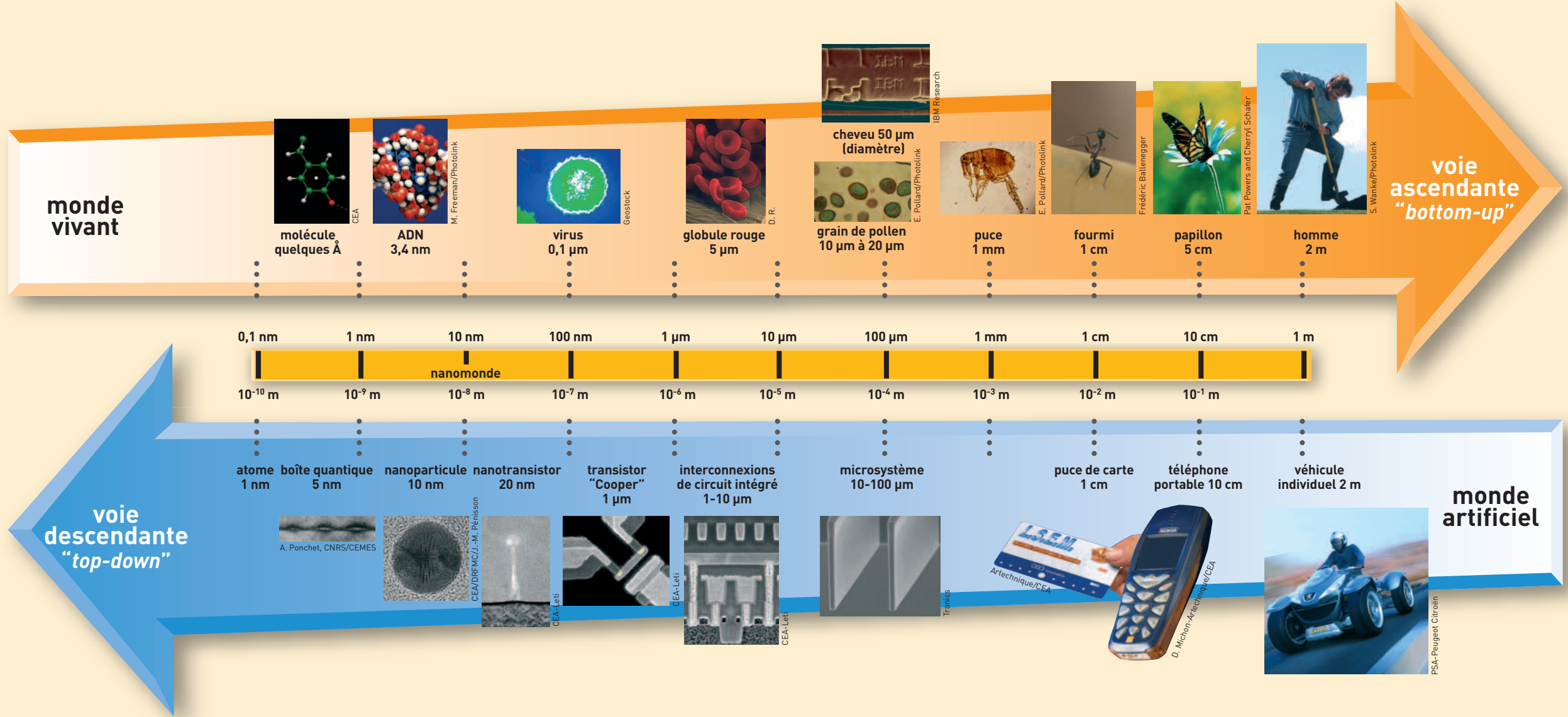
La voie ascendante peut permettre de passer outre ces limites physiques et aussi de réduire les coûts de fabrication, en utilisant notamment l'**auto-assemblage** des composants. C'est elle que suit la vie en pratiquant l'assemblage de molécules pour créer des **protéines**, enchaînement d'acides aminés 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.

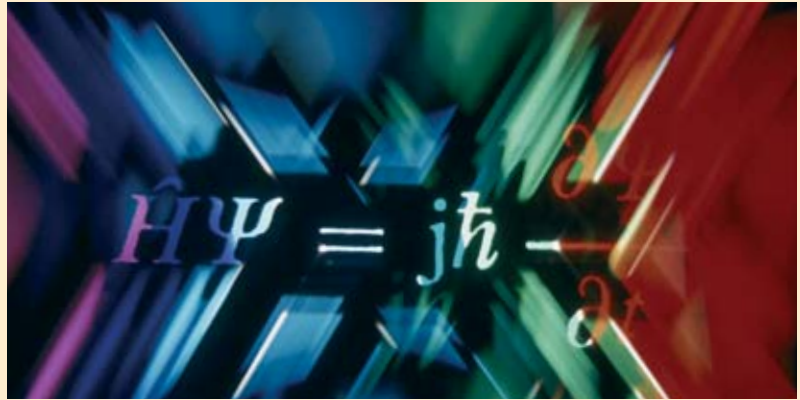
**A** (Suite)



## 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)



D. Sarrault/CEA

“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.

## B (Suite)

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.

## 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.

## 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 ( $\text{SiO}_2$ ), 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

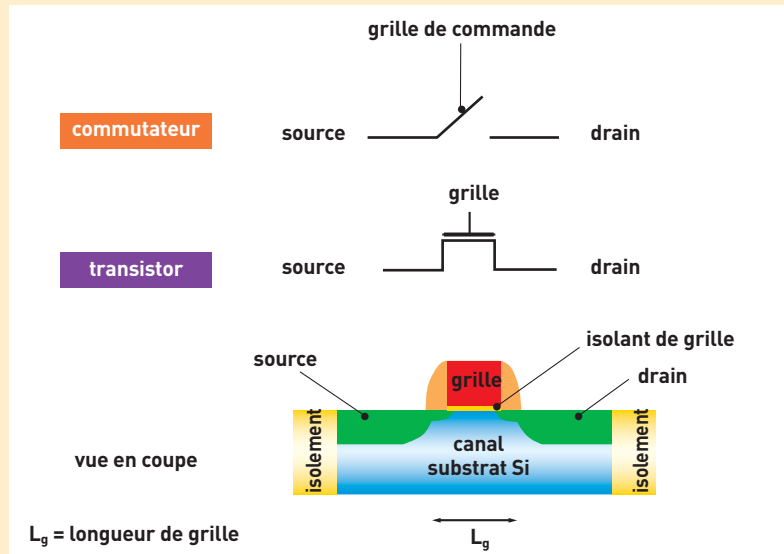


Figure. Un transistor MOS est un commutateur qui permet de commander le passage d'un courant électrique de la source (S) vers le drain (D) à l'aide d'une grille (G) isolée électriquement du canal de conduction. Le substrat en silicium est noté B (pour *Bulk*).

## 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<sup>(1)</sup> : 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)<sup>(2)</sup>. 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

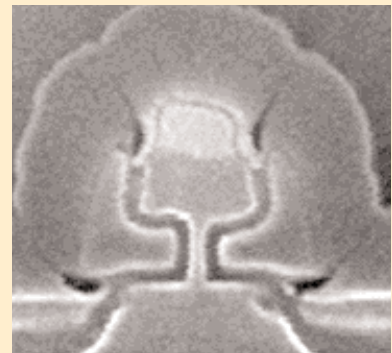
au-dessus du semi-conducteur et qui porte tout naturellement le nom de **grille**, les trous sont repoussés de sa surface où viennent s'accumuler les quelques électrons du semi-conducteur. Un petit canal de conduction peut ainsi se former entre la source et le drain (figure). Lorsqu'une tension négative 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  $\lambda$  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 (*wafers*) 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 ( $\mu\text{m}$ ). 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 F<sub>2</sub> ( $\lambda = 157 \text{ nm}$ ), mais cette lithographie a été quasiment abandonnée face à la difficulté de réaliser des optiques en CaF<sub>2</sub>, 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".

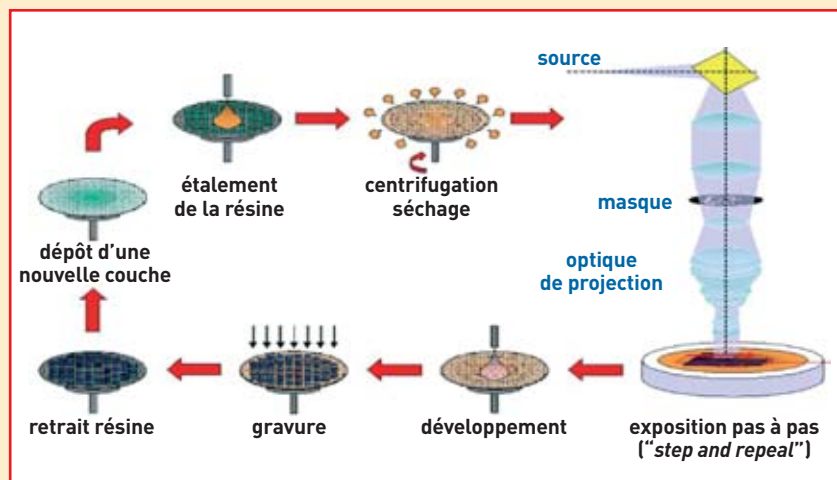


Figure. Les différentes phases du processus de lithographie dont le but est de délimiter les couches de matériaux conducteurs ou isolants qui constituent un circuit intégré. Cette opération est l'enchaînement d'un étalement de résine photosensible, de la projection du dessin d'un masque par une optique 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**.