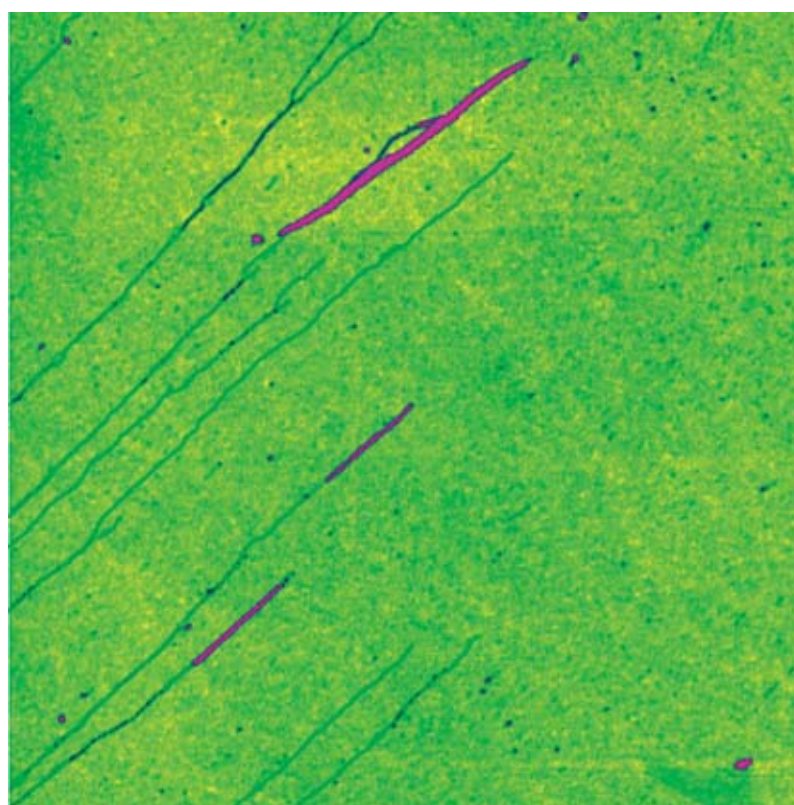


# De l'assemblage à la fonctionnalisation

**Pour que les nano-objets ne restent pas des curiosités de laboratoire, il faut les assembler et les intégrer dans des architectures optimisées.** L'électronique moléculaire a pour but de concevoir et de réaliser des circuits électroniques mettant en œuvre des molécules fonctionnalisées, des nanotubes de carbone ou des nanofils comme composants. Le vivant est à la fois une source d'inspiration et un vaste domaine d'applications des nanotechnologies. Les chimistes utilisent de l'ADN ou des virus comme gabarits pour assembler des nano-objets et élaborer des structures. Bénéficiant d'une large palette de fonctionnalisations qui leur



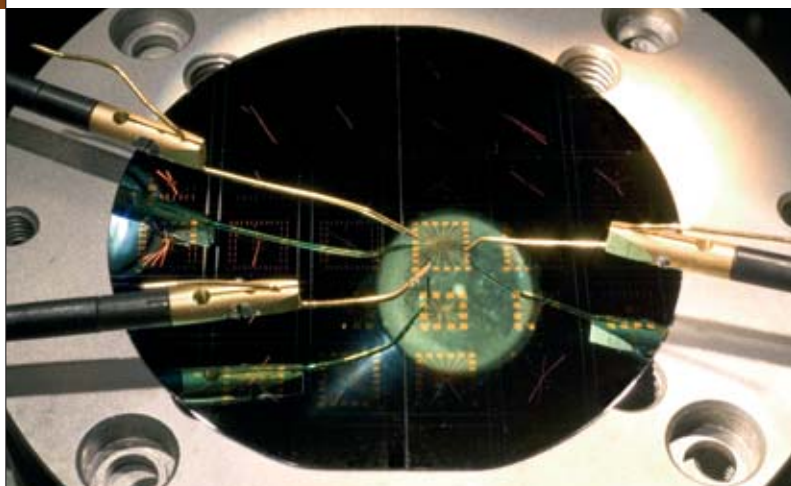
CEA/LEM/L. Goux Capes, A. Floramo et J.-P. Bourgoin

Nanotubes de carbone (en rose) liés à des brins d'ADN (en noir). Le peignage des brins d'ADN permet d'aligner les nanotubes de carbone.

confère de nouvelles propriétés, les nanotubes de carbone, les nanofils et les nanoparticules métalliques et semi-conductrices constituent, entre autres, d'excellents détecteurs de biomolécules. En outre, l'aptitude des biomolécules à se fixer et à s'auto-organiser à la surface des nanotubes de carbone est mise à profit, laissant entrevoir des applications séduisantes, dans le domaine de la vectorisation des médicaments notamment. Par ailleurs, des matériaux hybrides à base de nanoparticules obtenus par voie sol-gel trouvent des applications en optique. Une nouvelle génération de nanomatériaux hybrides à organisation hiérarchique, actuellement à l'étude, ouvre des perspectives prometteuses.

## L'électronique moléculaire, domaine au carrefour de la chimie, de la physique et de l'ingénierie

Au-delà du développement conventionnel des technologies actuelles de l'information, basées sur le silicium, se dessinent de nouveaux horizons émergeant de l'intégration de nano-objets moléculaires synthétisés par voie chimique. L'interfaçage entre des matériaux de nature totalement différente, la standardisation des procédés d'intégration ainsi que la compréhension avancée de l'électronique moléculaire se posent comme les nouveaux défis à surmonter pour l'avènement à terme d'une électronique post-CMOS capable de répondre aux limitations attendues des technologies CMOS à une échéance de quinze ans en termes de coût de production et de dissipation énergétique.



A. Gemin/CSEA

Mesures électriques sous pointes de nanocomposants. Grâce à des micromanipulateurs, des pointes en or viennent établir un contact électrique avec des nanoélectrodes par l'intermédiaire de carrés d'or de 100 µm de côté. Ces carrés sont connectés, par des motifs d'or de plus en plus fins, aux nanocomposants électroniques construits au centre du motif (la taille caractéristique des nanocomposants est cent mille fois plus petite que la taille du motif).

L'électronique moléculaire, définie ici comme le domaine scientifique visant à développer des dispositifs et **circuits** électroniques basés sur des nano-objets tels que des (bio)molécules, des **agrégats**, des **nanofils** et des **nanotubes de carbone** (voir *Les briques élémentaires des matériaux du futur*), est aujourd'hui un concept qui fait rêver et réfléchir bon nombre de scientifiques et dans lequel se sont engagés plusieurs industriels majeurs (IBM, HP, Infineon, Philips, NEC, **Intel**, Samsung). Cet engouement actuel est dû à un positionnement particulier à la fois aux frontières de la connaissance et en amont de la micro- et nanoélectronique. L'électronique moléculaire n'est réellement accessible expérimentalement que depuis quelques années et apparaît comme un complément, voire une alternative possible, au traitement tout **silicium** de l'information, dont les scientifiques prédisent les limites de développement ultimes à un horizon de dix à quinze ans. L'électronique moléculaire pourrait ainsi introduire en micro- et nanoélectronique des méthodes

de fabrication à bas coût fondées sur l'**auto-assemblage** de composants. Elle offrirait également des possibilités de mieux gérer la complexité, de réduire le coût énergétique du calcul et d'introduire de nouvelles fonctions, à base de systèmes électromécaniques par exemple.

Ce domaine scientifique récent, par essence pluridisciplinaire, trouve tout naturellement sa place au carrefour entre la chimie, qui synthétise les nano-objets, la physique, qui en étudie les propriétés, et l'ingénierie, qui permet leur mise en œuvre. Cette variété est à elle seule un attrait et un atout. Elle explique également que de nombreux acteurs du CEA travaillant dans différentes disciplines soient concernés, de la Direction des sciences de la matière (DSM) à la Direction de la recherche technologique (DRT). L'électronique moléculaire implique une complexité que cet article va essayer de décoder en partant des briques de base, puis en décrivant comment elles peuvent être connectées pour réaliser des composants et, enfin, en présentant les méthodes employées pour assembler ces composants en circuits et quelques architectures possibles pour ces derniers.

## Les briques de base : choix, richesse, complexité

Les nano-objets principalement utilisés comme briques de base de l'électronique moléculaire sont les **molécules**, les nanofils et les nanotubes de carbone. Créées par les chimistes, les *molécules* sont adaptables à l'application visée et sont synthétisables à l'identique en grande quantité. Elles présentent des niveaux électroniques quantifiés, ce qui autorise l'observation d'effets **quantiques**. Elles peuvent être bistables, voire multistables, c'est-à-dire posséder deux ou plusieurs états stables à une température donnée, ce qui est fondamental pour la réalisation de composants. Enfin, elles montrent une excellente aptitude à l'auto-assemblage, particulièrement pour ce qui concerne les biomolécules qui peuvent servir de guides (**template**) pour diriger l'assemblage d'autres objets. Elles sont toutefois très sensibles à leur environnement, présentent en général une mauvaise tenue thermique et une **conduction électronique** limitée.

Objets de diamètre **nanométrique** et de longueur **micrométrique**, les *nanofils* et *nanotubes de carbone* sont dotés, selon leur structure, de propriétés **semi-conductrices** ou métalliques. Ils sont robustes et supportent des traitements thermiques. Ils montrent une aptitude à l'auto-assemblage limitée, essentiellement définie par les molécules qui peuvent être **adsorbées** sur leur surface externe.

## Des premiers composants très prometteurs

Ces quelques dernières années ont vu des développements expérimentaux remarquables aboutir à la réalisation de plusieurs types de composants.

### Les composants moléculaires

Depuis les premières propositions théoriques de diodes moléculaires<sup>(1)</sup> de Ari Aviram et Mark A. Ratner en 1974, le problème s'est longtemps posé quant à la

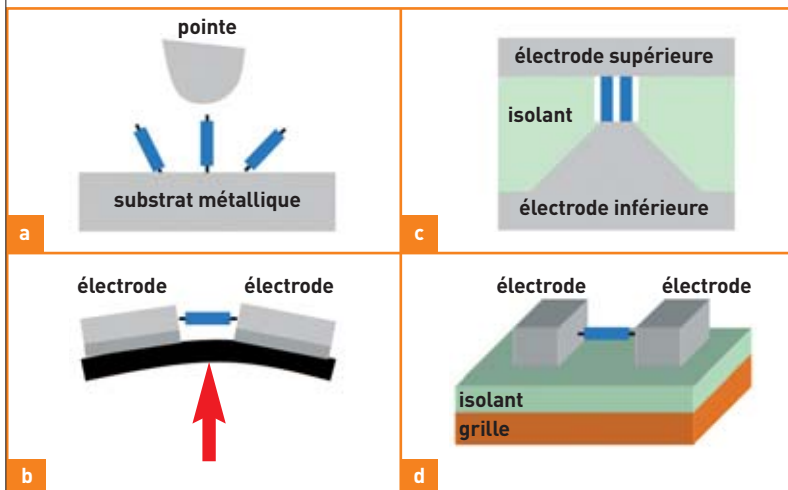
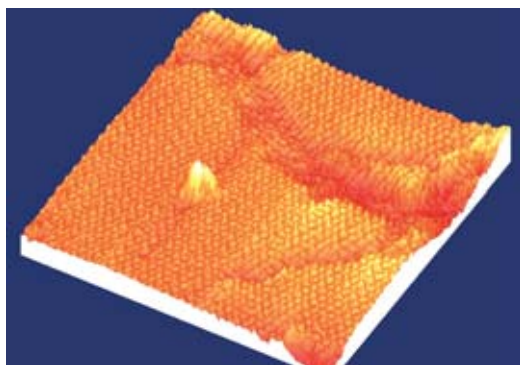


Figure 1. Différentes techniques expérimentales pour connecter une ou quelques molécules. En a, microscopie à effet tunnel; en b, technique des jonctions à cassure; en c, nanopores; en d, nanogaps planaires.



CEA/LEM

Couche monomoléculaire auto-assemblée de molécules de dodécane-thiol sur or monocristallin, observée par microscopie à effet tunnel. Chaque "bosse" du relief correspond à une molécule de dodécane-thiol. La protubérance brillante est une molécule de bisséniolterthiophène insérée dans la monocouche. Bien que de dimension géométrique comparable au dodécane-thiol, elle semble dépasser de la couche car la microscopie à effet tunnel met en évidence sa plus grande facilité à transporter l'électricité.

manière de connecter expérimentalement une seule molécule. Aujourd'hui, plusieurs expériences ont révélé qu'il est possible de préparer des jonctions métal-molécule-métal, voire métal-atome-métal. Il faut citer, par exemple, l'utilisation du microscope à effet tunnel (voir *Les microscopies à sonde locale: contact et manipulation*), la technique des jonctions à cassure développée de façon pionnière au CEA, les nanogaps planaires, les géométries "verticales" de type "nanopore" ou "crossbars", même si ces deux dernières mettent plutôt en jeu quelques centaines de molécules (figure 1). Ces expériences sont développées dans le cadre de deux problématiques complémentaires. Il est question, d'une part, de comprendre la nature du transport de charge dans une molécule. S'agit-il d'un transport *cohérent* – la molécule en quelque sorte habillant le vide pour former un guide d'ondes électroniques – ou *incohérent* – l'électron interagissant avec la molécule lors de son passage – ? Il ressort des expériences pionnières menées par les groupes de Mark A. Reed à l'Université de Yale, Paul S. Weiss à l'Université de l'État de Pennsylvanie, Ronald G. Reifenger et Supriyo Datta à l'Université de Purdue, aux États-Unis, Christian Joachim au Centre d'élaboration de matériaux et d'études structurales (Cemes/CNRS), le groupe du Département de recherche sur l'état condensé, les atomes et les molécules (CEA/Drecam) à Saclay et les équipes de Hongkun Park à l'Université de Harvard et Paul L. McEuen à l'Université de Cornell aux États-Unis que le transport porte la signature des orbitales moléculaires<sup>(2)</sup>. Ainsi, la compréhension du transport trouve une poursuite logique avec l'étude du lien entre la structure moléculaire et les propriétés de transport. À n'en pas douter, l'avenir de l'électronique moléculaire est fortement conditionné par la maîtrise intime de l'interface organique-minéral.

(1) Diode moléculaire: molécule présentant un effet redresseur du courant grâce à une partie bon *donneur* électronique et une partie bon *accepteur* électronique reliées par une chaîne *covalente* saturée, le courant passant préférentiellement du donneur vers l'accepteur.

(2) Orbitale moléculaire: orbitale résultant du recouvrement des orbitales atomiques de deux atomes ayant formé une liaison. Elle possède deux niveaux ne pouvant recevoir chacun que deux électrons au plus, un *liant* plus stable que les orbitales atomiques originelles et un *antiliant* moins stable.

Les chercheurs du Drecam ont, par exemple, montré que le simple remplacement d'un atome de soufre par un atome de sélénium au contact molécule-métal suffit à modifier de plus d'un ordre de grandeur la conduction au sein d'une jonction métal-molécule-métal.

La figure 2 présente un exemple de caractéristique courant-tension mesurée sur une molécule de bisthiolterthiophène par la technique des jonctions à cassure (figure 1), au Drecam. Un nanofil d'or suspendu entre deux plots métalliques est étiré puis cassé par torsion progressive du substrat qui le supporte. La distance entre les deux surfaces d'or ainsi libérées peut être contrôlée au picomètre près ( $1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$ ). Il est donc possible d'adsorber des molécules sur ces surfaces libres, puis de refermer la jonction jusqu'à ce que l'une d'elles fasse contact entre les deux portions du fil. Cette pince crocodile de taille nanométrique permet l'étude du comportement d'une ou de quelques molécules sous tension. Plus récemment, l'élaboration de nanogaps planaires (figure 1), en particulier par les groupes de Hongkun Park et Paul L. McEuen, a permis de rajouter une troisième **électrode** de commande pour influencer de façon **électrostatique** le transport au sein d'une molécule connectée à deux électrodes. Ces nanogaps de 1 à 3 nm sont obtenus par cassure contrôlée d'un petit fil métallique nanofabriqué. Ces expériences, conduites à très basse température, ont montré qu'il est possible de réaliser un transistor moléculaire à un électron.

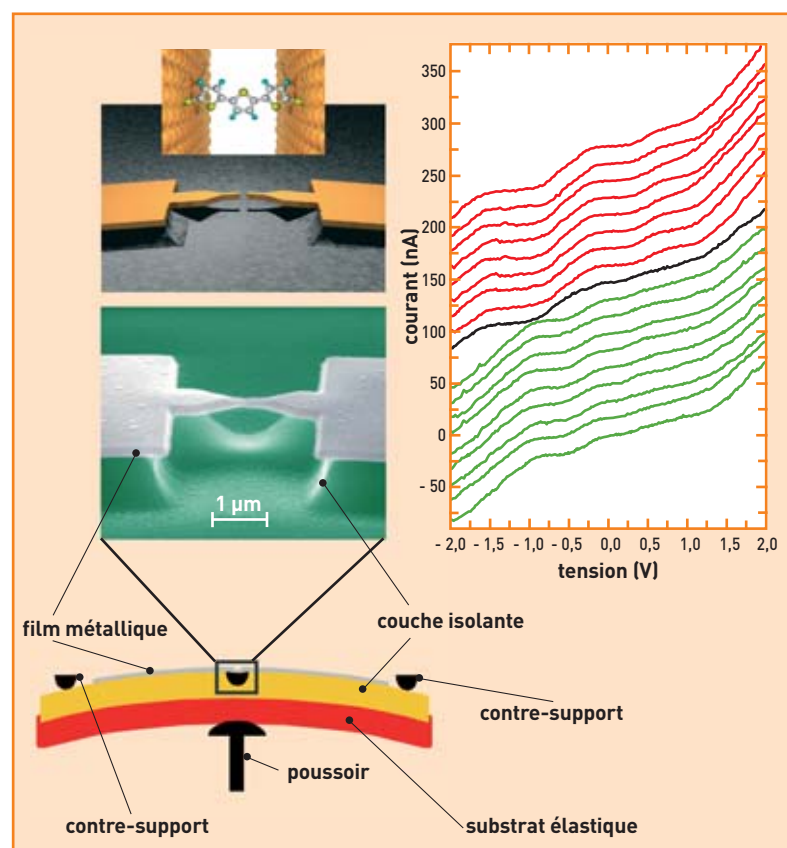
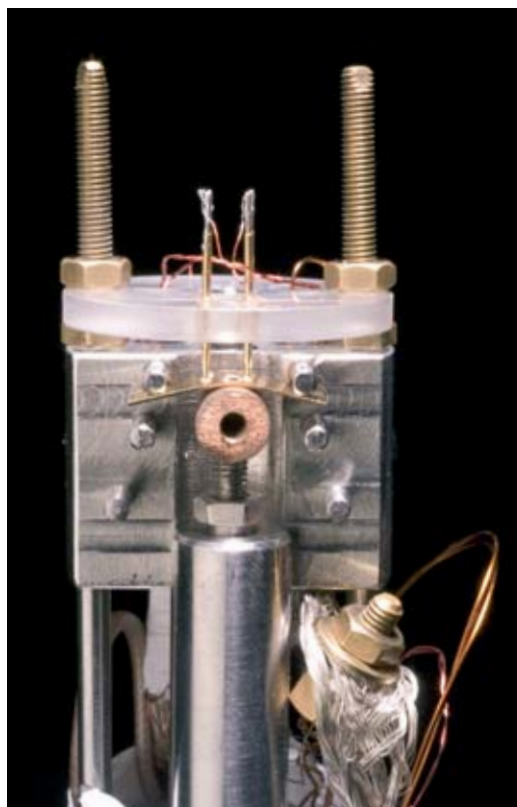


Figure 2. La technique des jonctions à cassure et une application à la mesure de caractéristiques courant-tension de la molécule de bisthiolterthiophène représentée. Les courbes sont décalées pour plus de clarté. Leur nombre élevé met en évidence la stabilité de la mesure et les "bosses", qui correspondent à la contribution des orbitales moléculaires, signalent le phénomène de transport moléculaire. Les courbes rouges sont obtenues après réductions de l'espace entre les deux électrodes en or d'un peu moins de 0,4 Å [d'après C. KERGUERIS et al., *Phys. Rev. B - Condensed Matter*, 59, 12505, 1999].

Mis en œuvre dans la technique des jonctions à cassure, ce système mécanique de flexion permet d'étirer jusqu'à la rupture un pont métallique suspendu fabriqué par lithographie électronique sur un substrat élastique. Il comporte deux points fixes et un poussoir contrôlé par une vis micrométrique. Grâce à l'énorme démultiplication intrinsèque du montage, la distance entre les deux électrodes résultantes est contrôlée avec une précision subatomique en jouant sur la flexion du substrat. Ces électrodes sont ensuite utilisées dans des expériences de transport électrique à travers un atome (C. Urbina/Drecam) ou une molécule (Laboratoire d'électronique moléculaire/Drecam).



A. Genin/CEA

Pour la seconde problématique, il s'agit, d'autre part, d'utiliser ces composants pour mettre en œuvre, à terme, un traitement moléculaire de l'information. Les transistors mentionnés plus haut sont de remarquables outils d'étude de la physique fondamentale mais ne sont pas exploitables dans ce but, comme d'ailleurs l'essentiel des autres composants unimoléculaires fabriqués à ce jour. En effet, ces composants sont intrinsèquement et extraordinairement sensibles à l'environnement immédiat de la molécule. L'approche d'aujourd'hui favorise plutôt des dispositifs mettant en jeu quelques milliers de molécules, comme les nanopores (figure 1) développés par le groupe de Yale, les dispositifs "crossbars" de

l'équipe James R. Heath (UCLA) – Stan Williams (HP) ou les composants à base de **porphyrines** greffées sur surface mis au point au CEA/Grenoble. Dans les trois cas, l'application la plus naturelle est le développement de mémoires.

## Les composants à base de nanotubes de carbone et de nanofils

Comme dans le cas des dispositifs moléculaires, il existe aujourd'hui pratiquement tous les composants d'une électronique à base de nanotubes de carbone ou de nanofils. Les travaux pionniers des équipes de Cees Dekker à l'Université de Delft aux Pays-Bas, de Phaedon Avouris à l'IBM T.J. Watson Center, de Paul L. McEuen à l'Université de Berkeley, de Hongjie Dai à l'Université de Stanford et de Charles M. Lieber à l'Université de Harvard aux États-Unis, par exemple, ont en effet contribué, au cours des cinq dernières années, à faire émerger un nouveau domaine riche en promesses d'applications. Les nano-objets qui y sont mis en œuvre, en particulier les nanotubes de carbone, présentent des propriétés de conduction électrique, de conduction thermique et de robustesse tout à fait remarquables, et restent néanmoins manipulables comme des molécules.

Il faut mentionner que l'échelle actuelle de ces composants est plus grande que celle des composants moléculaires, typiquement 1-10 nm de large pour 5-500 nm de long. Les nano-objets utilisés dans ces composants donnent lieu, selon les cas, soit à un transport quantique **cohérent** (transport **ballistique**), soit à des phénomènes spécifiques de transfert tunnel résonnant ou non, tel le mécanisme de **blocage de Coulomb**.

Sous l'impulsion des groupes d'IBM, de Delft et de Stanford/Cornell, le développement de transistors à nanotubes de carbone aux performances élevées a été extrêmement rapide (quatre ans environ en partant de rien). De façon notable, les performances de ces transistors, qui peuvent être préparés comme des **transistors p** ou **n**, sont tout à fait remarquables et meilleures, à géométrie comparable, que celles de "bons" **MOSFETs** silicium. Leurs caractéristiques

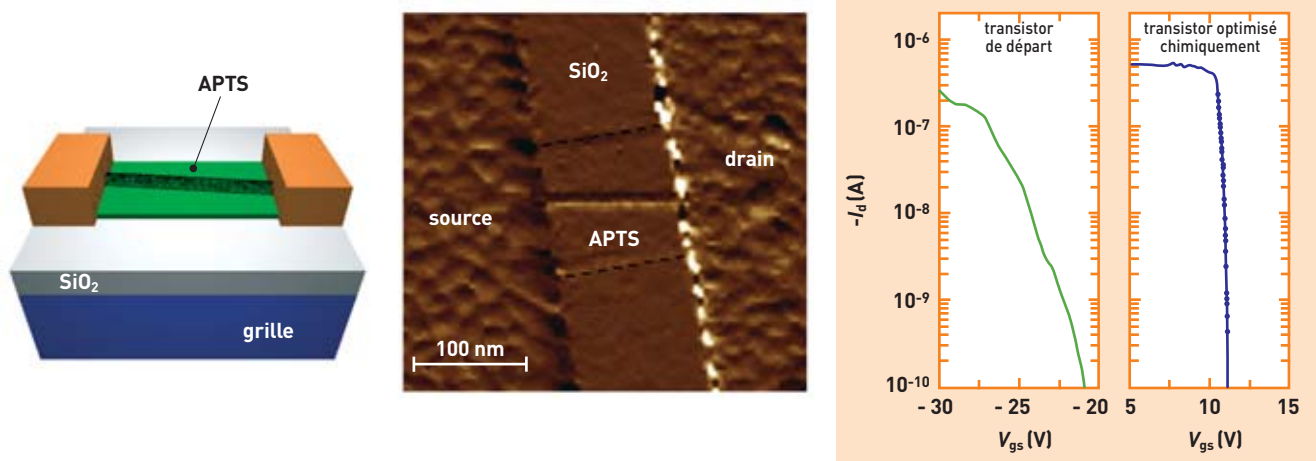
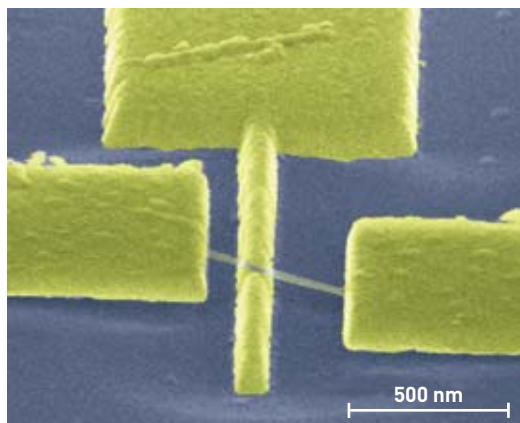


Figure 3.

Au centre, image en microscopie à force atomique d'un transistor à base de nanotubes de carbone auto-assemblés sur une couche monomoléculaire d'amino-propyl-triéthoxy-silane [APTS] servant d'adhésif moléculaire et, à gauche, schéma de la structure. À droite, optimisation par voie chimique (par de l'acide trifluoro-acétique, TFA) des performances d'un transistor à nanotubes de carbone. Le courant dans le nanotube ( $I_d$ , courant de drain) est modulé par la tension appliquée sur la grille ( $V_{gs}$ , tension grille-source). Après optimisation, la transition entre les modes passant et bloqué est beaucoup plus abrupte (d'après S. Auvray *et al.*, *Nanoletters*, 5, p. 451, 2005).



CEA/LEM/R. Letèvre, M. Goffman et J.-P. Bourgoin

Composant électromécanique formé d'un nanotube de carbone suspendu entre deux électrodes d'or.

approchent une **transconductance** de 6 000 S/m ou 12  $\mu\text{S}/\text{nanotube}$ , une mobilité effective des **porteurs de charge** de 3 000  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  ou une pente sous le seuil, qui est une mesure de l'énergie nécessaire pour faire transiter l'état du transistor du mode bloqué (*off*) au mode passant (*on*), de 70 mV/décade.

Il est important de préciser que ces transistors ne fonctionnent pas exactement comme des MOSFETs mais comme des **transistors à barrière Schottky**: la **grille** module en fait l'efficacité d'injection de porteurs au niveau de la **source** et non la densité de porteurs dans le **canal**. Ce point n'a été compris et démontré qu'au cours des trois dernières années et les premiers développements pour l'optimisation de ces composants commencent à apparaître. Il faut citer par exemple l'amélioration des géométries de transistors (optimisation de l'isolant et de la géométrie de grille, ou des contacts) par les groupes de Stanford et d'IBM, le "dopage"<sup>(3)</sup> de type *n* démontré par ces mêmes équipes, ainsi que le dopage de type *p* par le Drecam (figure 3). Ces transistors ont pu être combinés pour donner lieu à la réalisation de premiers circuits simples tels que des **portes logiques** ou des oscillateurs<sup>(4)</sup>.

Outre les transistors à base de nanotubes, d'autres types de composants utilisant des nanotubes de carbone ou des nanofils ont également été mis au point: résistances, diodes, diodes résonnantes, interrupteurs, transistors à un électron, dispositifs électromécaniques. Ces derniers sont particulièrement prometteurs pour des applications comme oscillateurs ou résonateurs haute fréquence, ou comme capteurs de force. Parallèlement à l'amélioration des performances de ces composants, il apparaît clairement aujourd'hui que le futur du domaine est directement conditionné par la mise au point de techniques permettant le positionnement contrôlé de ces dispositifs<sup>(5)</sup>.

(3) Il ne s'agit pas d'un dopage au sens propre mais d'une optimisation de performances par amélioration de l'efficacité d'injection à travers la barrière Schottky de la source.

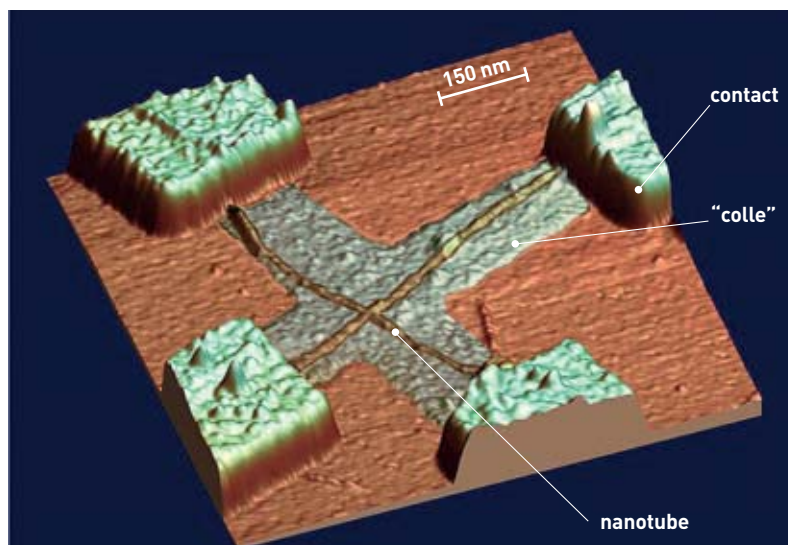
(4) Oscillateur: système dont l'évolution est une fonction périodique, par exemple sinusoïdale (sinus ou cosinus), du temps.

(5) Le domaine de l'électronique à base de nanotubes de carbone fait face à un deuxième problème majeur: la séparation des nanotubes semi-conducteurs et métalliques. Sur ce point, plusieurs études prometteuses sont en cours en France, en Europe et aux États-Unis.

## Des composants assemblés en circuits

Cet article se focalise essentiellement sur les circuits à base de nanotubes de carbone et de nanofils. L'auto-assemblage de ces nano-objets pour former des circuits est la voie la plus prometteuse aujourd'hui. Mettant à profit leurs propriétés intrinsèques, elle permet d'éviter d'avoir à pousser à leurs limites, ou au-delà, les techniques de **lithographie** (encadré E, **La lithographie, clé de la miniaturisation**, p. 37) pour manipuler les nano-objets. Elle présente aussi l'avantage potentiel d'une réduction des coûts de fabrication. Ce dernier point est important lorsque l'on sait que le prix d'une unité de fabrication de semi-conducteurs dépassera les 50 milliards de dollars en 2008.

Au Laboratoire commun CEA-Motorola d'électronique moléculaire du Drecam au CEA/Saclay, une méthode, développée en 2002, a permis de positionner des nanotubes de carbone de façon contrôlée sur une surface. Cette dernière est préalablement **fonctionnalisée** chimiquement par une couche monomoléculaire aux endroits où il est souhaité que les nanotubes se déposent. Elle est ensuite trempée dans une solution de nanotubes qui s'auto-assemblent sur les zones fonctionnalisées. D'autres techniques sont basées sur le peignage, c'est-à-dire l'alignement des nanotubes par un flux de solvant qui les entraîne comme des troncs



CEA/LEM/E. Valentin et S. Auveray

d'arbres sur une rivière, ou sur leur alignement par un champ électrique alternatif. Une place particulière sera réservée aux méthodes s'appuyant sur la croissance localisée de nanotubes de carbone ou de nanofils. Elles impliquent l'utilisation d'un **catalyseur** de croissance, dont la localisation et la taille conditionnent directement la position et le diamètre du nanotube ou du nanofil. Ces techniques se développent rapidement et seront sans nul doute d'une grande importance dans le futur, si le contrôle de la taille des objets et de leur localisation peut être résolu. Le Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux du CEA (Liten) y travaille activement avec la mise au point d'un réacteur permettant la synthèse de nanotubes de carbone sur des substrats de 200 mm compatibles avec les standards de la microélectronique.

Ces méthodes de positionnement, une fois validées industriellement, rendraient possible la fabrication

Croisement de deux nanotubes de carbone déposés sur de la silice, illustrant la réalisation de circuits de nanotubes par auto-assemblage. Les bandes grises sont de l'adhésif moléculaire permettant aux nanotubes de se positionner (collaboration CEA-Motorola).



continue et massive de composants impliquant des nanotubes de carbone comme fils d'interconnexion ou comme éléments actifs. À plus long terme, il est important de noter que des techniques d'auto-assemblage évitant tout emploi de la lithographie, commencent à être étudiées dans les laboratoires autour de la combinaison des avantages des biomolécules (auto-assemblage, reconnaissance spécifique) et des nanotubes de carbone (propriétés électroniques).

## Développer des architectures adaptées

Plusieurs types de composants moléculaires élémentaires ont donc été récemment mis au point. Se pose évidemment la question de leur utilisation au sein de circuits à l'architecture adaptée. Deux types d'architecture sont distingués : hybride et intégrée.

L'architecture hybride est la plus simple du point de vue concept car la plus proche de ce que réalise aujourd'hui le CMOS et la plus à même d'être interfacée avec ce dernier. Il s'agit d'interconnecter par des fils métalliques les composants élémentaires. Ceci s'applique par exemple au cas des transistors à nanotubes de carbone ayant donné lieu à la fabrication de portes logiques et de petits circuits, mais aussi au cas d'une logique de type diode-transistor ou à celui des circuits utilisant les composants à un électron. Ces types d'architecture peuvent aujourd'hui être testés au niveau des laboratoires. Sont également classées dans cette catégorie les architectures programmables à base de réseaux de nanofils croisés par exemple, au croisement desquels est placé un interrupteur. Le grand avantage d'une architecture programmable réside en sa capacité à tolérer des imperfections lors de la fabrication. Cette technologie peut présenter un net avantage au niveau du coût de production, car elle met en œuvre des techniques d'auto-assemblage et de fabrication parallèle. Toutefois, elle présente deux inconvénients importants, que le CMOS ultime rencontrera d'ailleurs également, vis-à-vis d'une utilisation à grande échelle avec une miniaturisation poussée à l'extrême, sauf à envisager

(6) Soit  $kT \ln 2$ ,  $k$  représentant la constante de Boltzmann ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K) et  $T$  la température.

un changement de paradigme de calcul. D'une part, en dessous d'environ 10 nm entre composants élémentaires, il faut s'attendre à une perte de l'identité propre de chacun d'eux et à des effets d'interférence entre les différents chemins possibles pour aller d'un point à un autre du circuit, en particulier si le circuit est régulier comme dans le cas de réseaux croisés. D'autre part, même en supposant un fonctionnement en commutation parfait, c'est-à-dire où chaque opération nécessite une énergie de 17,3 meV à la température ambiante<sup>(6)</sup>, un circuit assemblant des composants fonctionnant à 10 GHz avec une densité de quelques  $10^{12}$  cm<sup>-2</sup> nécessitera une puissance de l'ordre de plusieurs dizaines de W/cm<sup>2</sup>, ce qui est la limite de la puissance pouvant être dissipée au point de vue de la technologie.

L'électronique moléculaire intégrée, dont le laboratoire du Cemes à Toulouse est un pionnier mondial, consistant à incorporer au sein même d'une molécule plusieurs fonctions pour effectuer un calcul, dont seul le résultat sera transmis au monde macroscopique, est *a priori* capable de pallier ces inconvénients. La difficulté technique pour la mise en œuvre de ce type d'architecture est toutefois considérable et sa réalisation n'est envisageable que sur le long terme. Il faut noter que l'approche de l'électronique moléculaire intégrée semble également pouvoir être bien couplée à celle du calcul quantique et que de premières études théoriques sont en cours.

## Les perspectives

Le remarquable essor de l'électronique moléculaire s'appuie aujourd'hui essentiellement sur une forte recherche fondamentale couplée à des moyens technologiques relativement modestes. Il laisse présager un scénario de développement sur deux échelles de temps distinctes : l'hybridation du CMOS et de l'électronique moléculaire à une échéance de huit-dix ans et la mise au point de solutions de traitement de l'information purement moléculaires dans vingt ans. Les fonctions envisageables sont de types mémoires et processeurs, associés à de nouveaux paradigmes de calcul. Il est également probable que les fonctions d'interface avec le monde réel (capteurs, transducteurs, actionneurs électromécaniques...) seront directement intégrées avec les fonctions processeurs et mémoires au sein de systèmes complexes, versions élaborées des *systems-on-chips* actuels.

> Jean-Philippe Bourgoïn\* et Stephan Roche\*\*

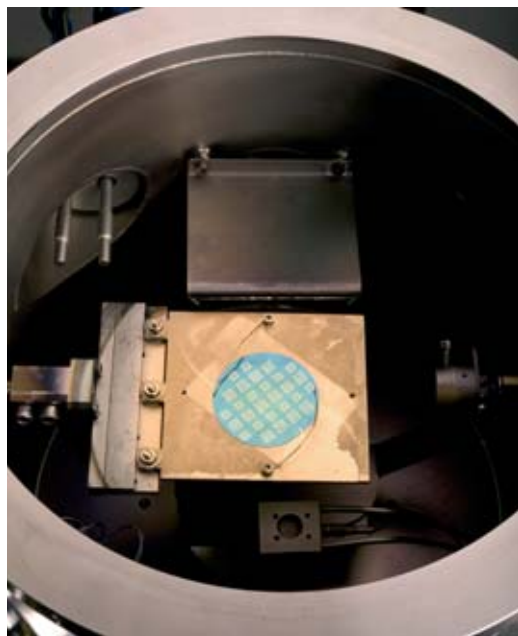
Direction des sciences de la matière

\*CEA centre de Saclay

\*\*CEA centre de Grenoble

Un wafer de silicium est placé dans l'évaporateur de métal pour le dépôt d'une fine couche d'or.

Certaines parties du wafer sont protégées par une résine qui est ensuite dissoute, emportant la couche métallique : c'est le *lift-off*. Après cette étape, seules les parties non protégées sont métallisées pour réaliser la structure souhaitée.



A. Gemin/CEA

## POUR EN SAVOIR PLUS

J.-P. BOURGOÏN, dans *Interacting electrons in nanostructures*, edited by H.S. Schoeller and R. Haug, Springer Verlag, Berlin, 2001.

Numéro spécial de *Pour la Science*, décembre 2001.

J.-P. BOURGOÏN et al., dans *Les Nanosciences : Nanotechnologies et Nanophysique*, Belin, Collection Échelles, 2004.

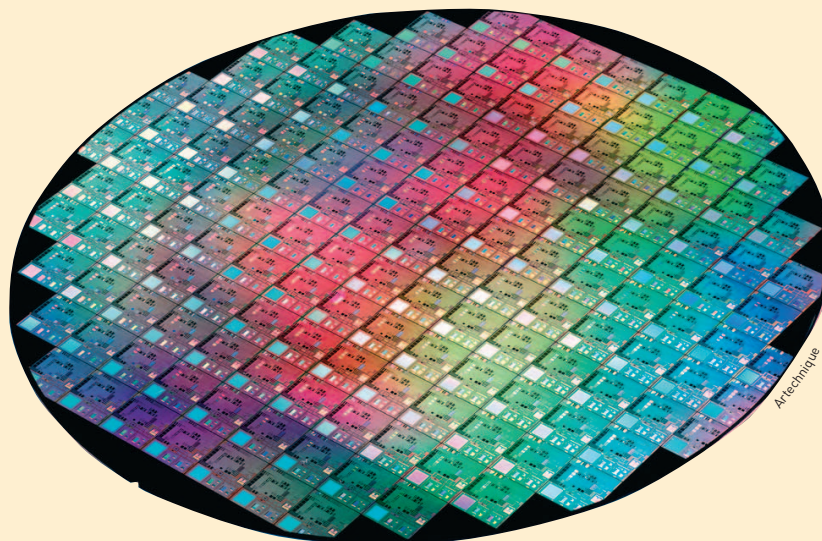
PH. AVOURIS, *Carbon nanotubes electronics and optoelectronics*, MRS Bulletin, p. 403, juin 2004.

# 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.

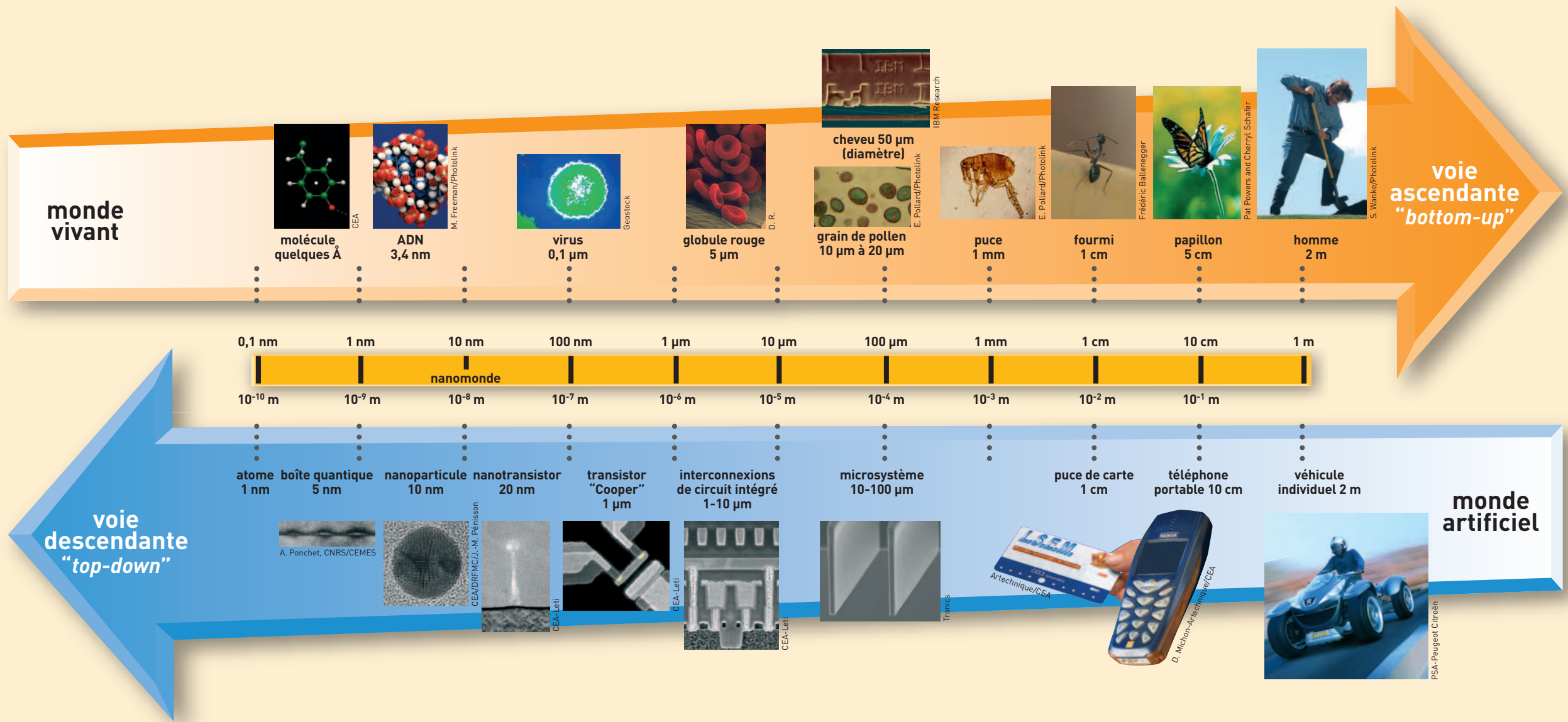
La voie ascendante peut permettre de passer outre ces limites physiques et aussi de réduire les coûts de fabrication, en utilisant notamment l'**auto-assemblage** des composants. C'est elle que suit la vie en pratiquant l'assemblage de molécules pour créer des **protéines**, enchaînement d'acides aminés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



**monde vivant**

voie ascendante "bottom-up"

voie descendante "top-down"

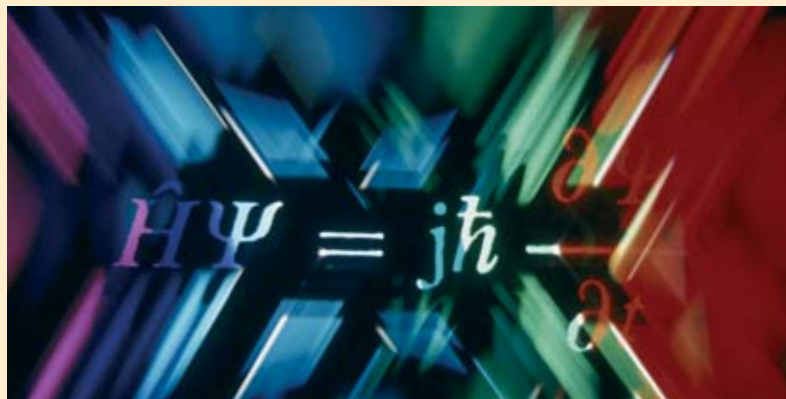
**monde artificiel**



## 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 **cristalline** 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 épitaxial. Il est ainsi possible de fabriquer des empilements de couches aussi fines que le millionième 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

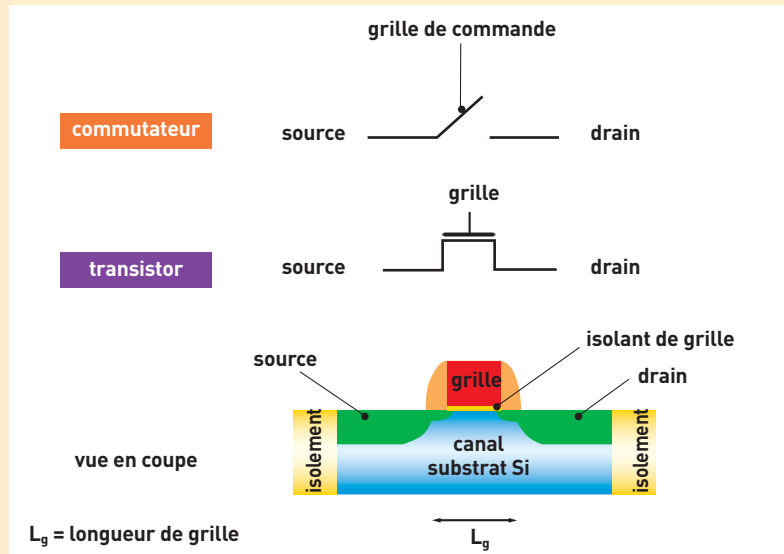


Figure. Un transistor MOS est un commutateur qui permet de commander le passage d'un courant électrique de la source (S) vers le drain (D) à l'aide d'une grille (G) isolée électriquement du canal de conduction. Le substrat en silicium est noté B (pour *Bulk*).

## 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

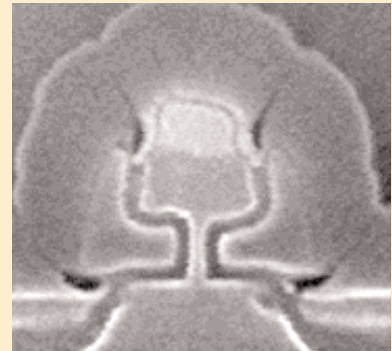
au-dessus du semi-conducteur et qui porte tout naturellement le nom de **grille**, les trous sont repoussés de sa surface où viennent s'accumuler les quelques électrons du semi-conducteur. Un petit canal de conduction peut ainsi se former entre la source et le drain (figure). Lorsqu'une tension négative 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 (*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 ( $\mu\text{m}$ ). 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".

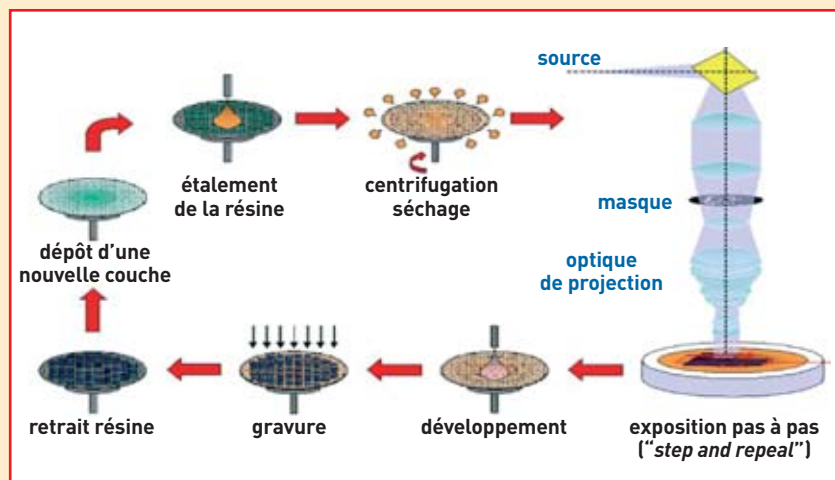


Figure. Les différentes phases du processus de lithographie dont le but est de délimiter les couches de matériaux conducteurs ou isolants qui constituent un circuit intégré. Cette opération est l'enchaînement d'un étalement de résine photosensible, de la projection du dessin d'un masque par une optique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