

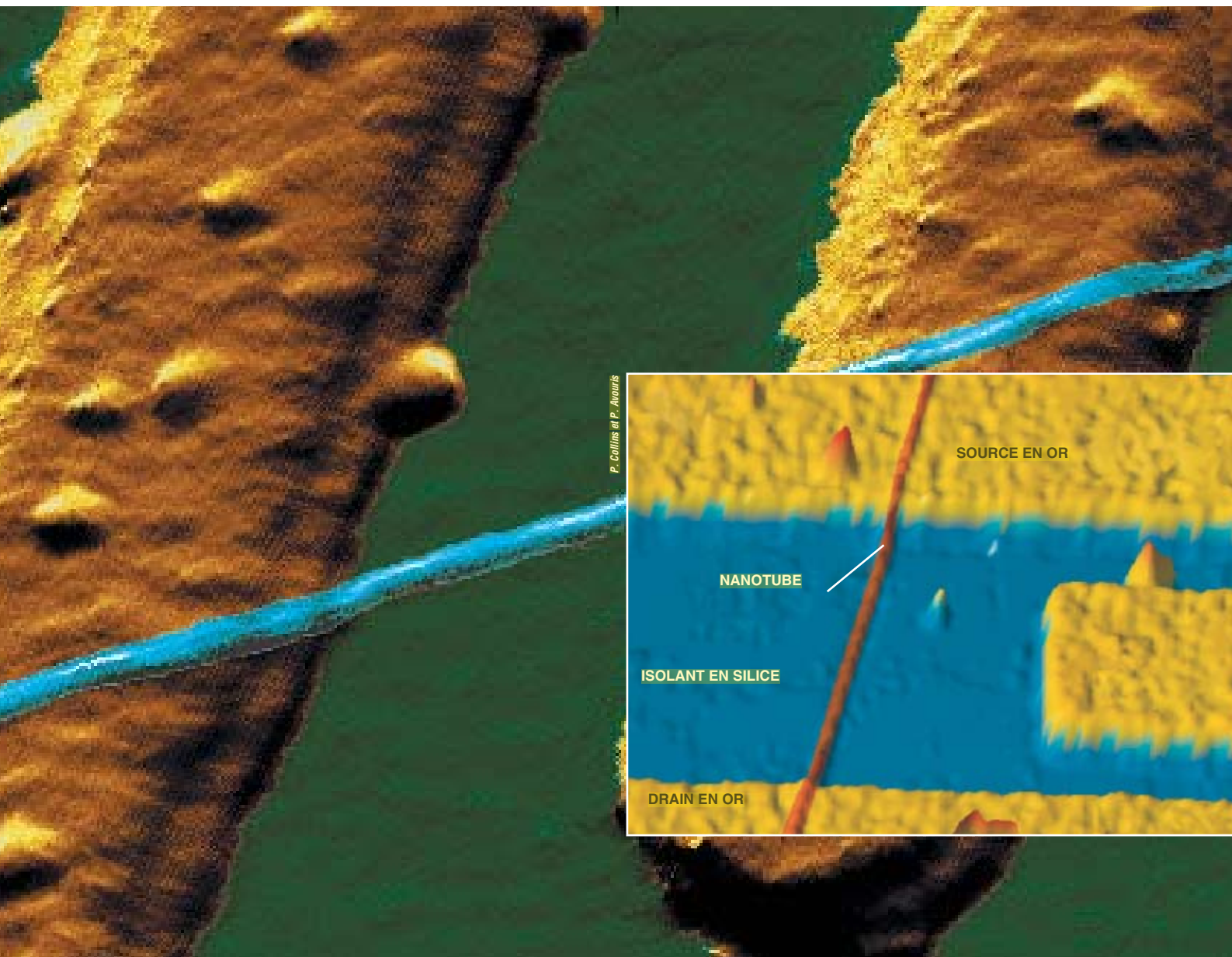
Pourtant, sous la pression économique, les ingénieurs cherchent à réduire toujours plus la taille des dispositifs micro-électroniques, car leur vitesse, leur densité et leur rendement augmentent lorsque leur taille diminue. Des filaments en nanotubes et des dispositifs de quelques dizaines de nanomètres contenant des nanotubes pourraient devenir les composants des circuits électroniques de demain, plus rapides et consommant moins d'énergie que ceux d'aujourd'hui.

Les premiers nanotubes de carbone observés par S. Iijima, en 1991, étaient des tubes à parois multiples : chacun contenait plusieurs cylindres creux imbriqués les uns dans les autres comme des poupées russes et constitués d'atomes de carbone. Deux ans plus tard, S. Iijima et Donald Bethune de la Société IBM créèrent, l'un et l'autre, des nanotubes à paroi unique, constitués d'une seule couche d'atomes de carbone. Ces deux types de tubes sont fabriqués de la même façon et ont des propriétés semblables ; ils sont notamment très longs et étroits. Les nanotubes à paroi unique, par exemple, ont un diamètre de un nanomètre environ sur une longueur de plusieurs milliers de nanomètres.

La stabilité de ces tubes résulte de la force avec laquelle les atomes de carbone sont liés les uns aux autres, force responsable de la dureté du diamant. Dans le diamant, les atomes de carbone sont disposés sur les sommets de tétraèdres à quatre faces, tandis que dans les nanotubes, les atomes sont arrangés en anneaux hexagonaux, comme dans le graphite ou dans un grillage en fil de fer. Un nanotube ressemble à une feuille de graphite dont on aurait fait un cylindre sans soudure. On ignore comment les atomes se condensent pour former des nanotubes (*voir l'encadré page 73*), mais il semble que les tubes grandissent par adjonction d'atomes aux extrémités, comme des mailles qui allongent la manche d'un pull-over tricoté à la main.

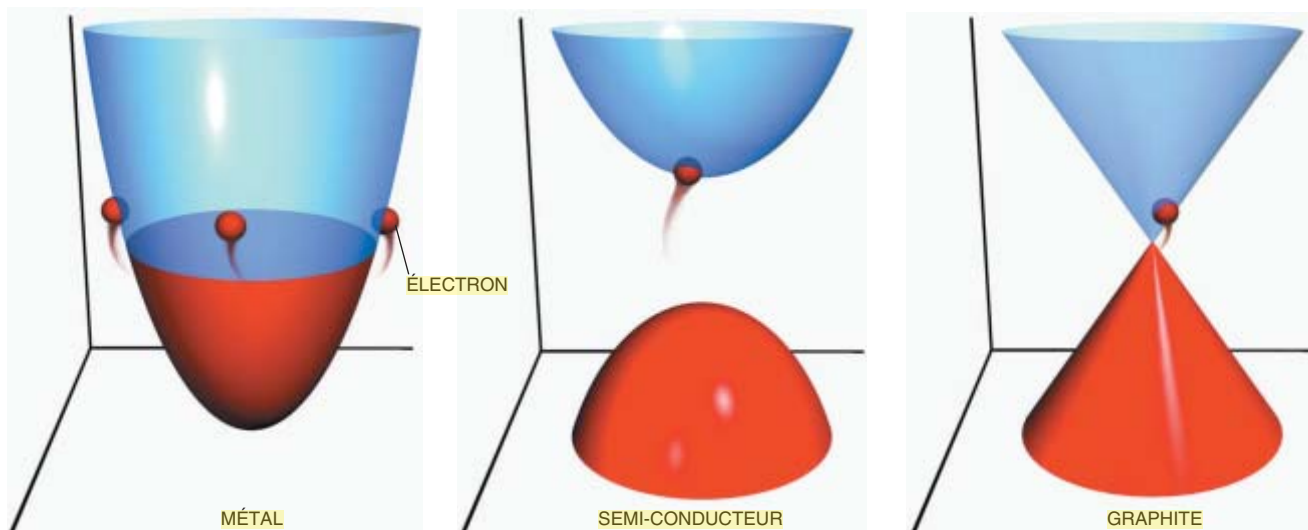
Un matériau exotique

Quel que soit leur mode de formation, les nanotubes ont une composition et une géométrie qui les rendent précieux en électronique. Le graphite lui-même est déjà un matériau insolite. Alors que la plupart des conducteurs



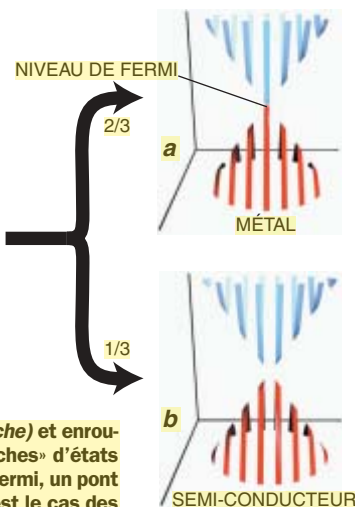
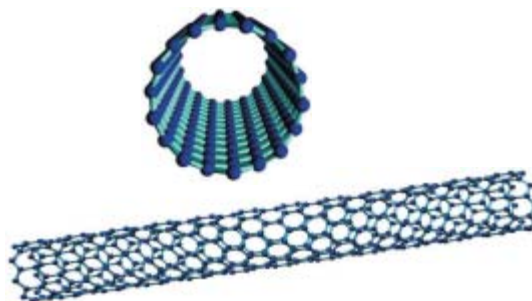
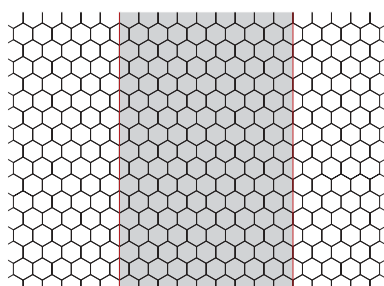
P. Collins et P. Avouris

2. LE COMPORTEMENT ÉLECTRIQUE DES NANOTUBES.

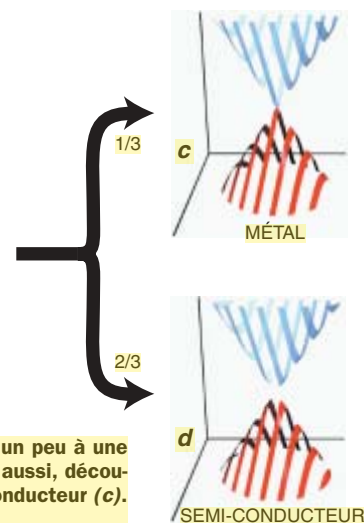
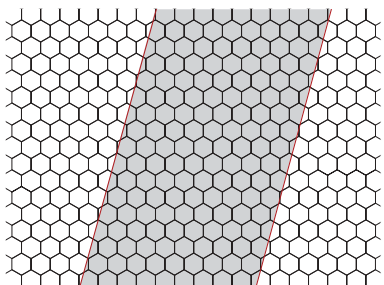


LES PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES d'un matériau dépendent de la séparation entre les états d'énergie remplis par des électrons (*en rouge*) et les états vides (*en bleu clair*). Les métaux conduisent facilement l'électricité, car de nombreux électrons sont susceptibles d'accéder facilement aux états de conduction supérieurs. Dans les semi-conducteurs, les électrons ont besoin d'un

apport supplémentaire d'énergie (de la lumière ou un champ électrique) pour franchir la bande d'énergie interdite qui les sépare du premier état de conduction disponible. Le graphite, une des formes du carbone, est un semi-métal qui conduit mal le courant, car, sans apport externe d'énergie, seul un petit nombre d'électrons peut accéder à un état de conduction.



LES NANOTUBES DROITS ressemblent à une bande rectiligne découpée dans une feuille de graphite (*à gauche*) et enroulée pour former un tube (*au centre*). La géométrie des nanotubes cantonne les électrons à quelques «tranches» d'états d'énergie du graphite (*à droite*). Selon le diamètre du tube, l'une de ces tranches peut inclure le niveau de Fermi, un pont étroit entre les états occupés et les états vides. Dans ce cas, les nanotubes sont métalliques (*a*), ce qui est le cas des deux tiers d'entre eux. Quand le niveau de Fermi n'est pas inclus, les nanotubes sont semi-conducteurs (*b*).



LES NANOTUBES TORSADÉS, coupés en oblique dans la feuille de graphite (*à gauche*) ressemblent un peu à une colonne torsadée (*au centre*). Les tranches d'états permises pour les électrons (*à droite*) sont, elles aussi, découpées en oblique, de sorte qu'un tiers seulement de ces nanotubes inclut le niveau de Fermi et est conducteur (*c*). Les deux tiers des nanotubes torsadés sont semi-conducteurs (*d*).

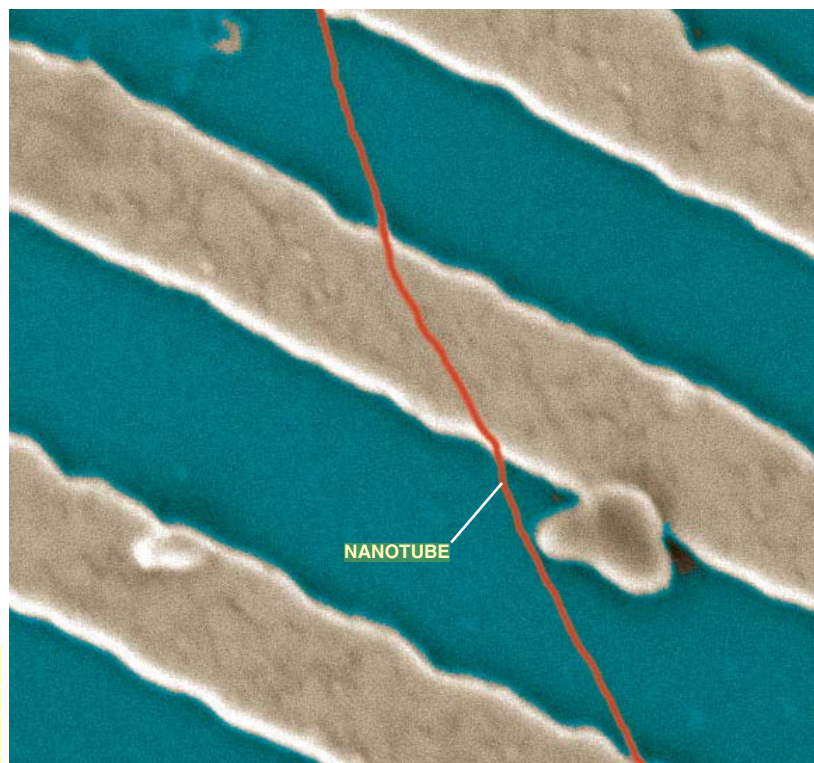
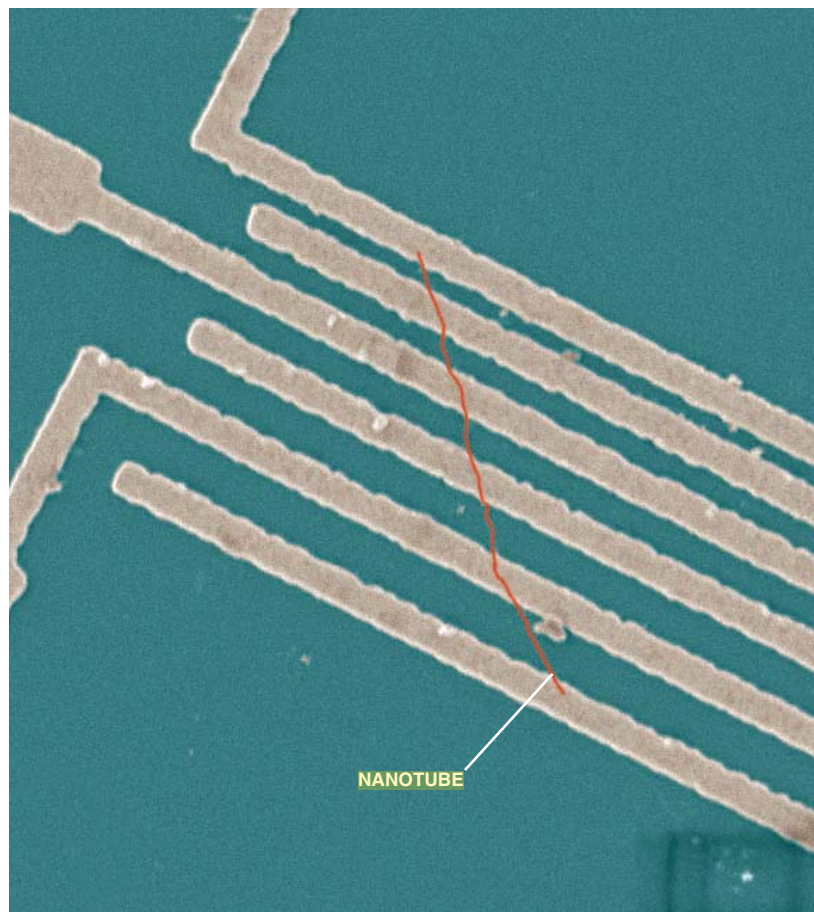
électriques sont classés, soit comme des métaux, soit comme des semi-conducteurs, le graphite est l'un des rares semi-métaux, intermédiaires entre les deux classes. Combinant les propriétés semi-métalliques du graphite et les comportements quantiques des matériaux de très petites dimensions, les nanotubes de carbone sont des conducteurs exotiques.

Selon un grand principe de la mécanique quantique, les électrons se comportent à la fois comme des ondes et comme des particules, et les ondes électroniques peuvent se combiner ou s'annuler. Ainsi, un électron qui se propage sur la circonférence d'un nanotube peut «s'annuler» ; seuls subsistent les électrons qui ont une longueur d'onde adéquate. Parmi toutes les longueurs d'onde électroniques, c'est-à-dire parmi les états électroniques autorisés, seules quelques longueurs d'onde possibles dans une feuille de graphite sont conservées lorsque la feuille est enroulée pour former un nanotube. Ces dernières dépendent de la circonférence du nanotube et varient selon que le nanotube est torsadé ou non.

La suppression de quelques états électroniques dans un métal ou dans un semi-conducteur simple ne crée pas d'effets inattendus. En revanche, les semi-métaux sont des matériaux beaucoup plus sensibles et révèlent des propriétés étonnantes. Dans une feuille de graphite, un état électronique particulier, que les physiciens nomment le niveau de Fermi, confère au graphite sa conductivité : les électrons qui ne sont pas dans cet état restent immobiles. Un tiers seulement de tous les nanotubes torsadés par exemple ont un diamètre et un degré de torsion tels que le niveau de Fermi fait partie des états permis. Ce sont de vrais nanotubes métalliques. Les autres nanotubes sont des semi-conducteurs. Cela signifie que, comme le silicium, ils conduisent le courant, mais à condition qu'on leur confère de l'énergie. Excités par la lumière ou par une tension, les électrons des états de valence passent alors dans des états de conduction où ils se déplacent librement : le courant circule. La quantité d'énergie nécessaire dépend de l'écart entre le niveau le plus haut de la bande de valence et le niveau le plus bas de la bande de conduction ; cet écart est nommé bande d'énergie interdite ou «gap» du semi-conducteur.

Les nanotubes de carbone n'ont pas tous le même gap, car l'ensemble des états de valence et des états de conduction permis diffère pour chaque circonférence. Les nanotubes de petit diamètre ont très peu d'états d'énergie autorisés et leur gap est élevé. Lorsque le diamètre du nanotube augmente, les états permis sont de plus en plus nombreux et le gap diminue. Ainsi, selon leur diamètre, les nanotubes ont des gaps compris entre zéro (comme dans un métal) et celui du silicium (1,14 électronvolt). Aucun autre matériau ne permet d'ajuster ainsi le gap. Malheureusement, les techniques actuelles de fabrication des nanotubes ne garantissent pas encore la production de nanotubes de type et de diamètre contrôlés.

Dans les nanotubes à parois multiples, chaque couche a une géométrie légèrement différente de celles des autres. Si nous pouvions maîtriser la composition de chaque couche, nous fabriquerions des tubes à parois multiples auto-isolants qui transporteraient plusieurs signaux à la fois, comme des câbles coaxiaux nanoscopiques. Nous n'en sommes pas là, mais nous avons déjà incorporé des nanotubes dans des circuits et commencé à explorer leurs propriétés.



P. Collins et P. Avouris

3. ULTRAFINS, les nanotubes de carbone pourraient libérer de l'espace dans les microprocesseurs. Ils pourraient aussi éviter la surchauffe et l'instabilité engendrées lorsque l'on miniaturise les circuits par des procédés classiques. Ici, les lignes tracées par photolithographie (en gris) semblent gigantesques par rapport au nanotube (en rouge) dont le diamètre mesure à peine plus d'un nanomètre.



4. LES PREMIERS DISPOSITIFS ÉLECTRONIQUES qui utilisent des nanotubes sont des lampes à vide pour l'éclairage (à gauche) et un écran plat en couleurs (à droite). Ces produits exploitent la capacité des nanotubes d'émettre des électrons à des tensions relativement basses, ce qui se traduit par une économie d'énergie et une durée de vie supérieure.

Les nanocircuits

Plusieurs groupes de recherches, dont le nôtre, ont réussi à mettre au point des dispositifs électroniques qui contiennent des nanotubes de carbone. Dans le transistor à effet de champ que nous avons élaboré, des nanotubes semi-conducteurs à paroi unique constituent le canal où s'écoulent les électrons entre deux électrodes métalliques (voir la figure 1). Le courant circulant dans ce canal peut être activé ou interrompu au moyen d'une troisième électrode (c'est l'électrode de commande, nommée grille). Les dispositifs contenant des nanotubes fonctionnent à température ambiante et ont des caractéristiques électriques semblables à celles des dispositifs en silicium classiques. Nous avons mesuré, par exemple, que, selon la tension appliquée à la grille, la conductivité du nanotube-canal varie d'un facteur égal à un million, ce qui est comparable aux transistors en silicium : le transistor remplit le rôle d'un interrupteur. Toutefois, en raison de sa taille minuscule, le transistor à nanotube est un interrupteur plus rapide et qui utilise moins d'énergie qu'un dispositif en silicium. Un nanocommutateur pourrait fonctionner à une fréquence supérieure à un térahertz, soit 1 000 fois plus rapidement que les processeurs disponibles aujourd'hui.

La grande variété de gaps et de conductivités des nanotubes ouvre la voie à d'autres nanodispositifs. Par exemple, nous avons récemment étudié des jonctions entre nanotubes métalliques et semi-conducteurs. Nous avons montré que ces jonctions se comportent comme des diodes, en ne laissant passer le courant que dans un seul sens. Par ailleurs, des combinaisons de nanotubes de gaps différents pour-

raient se comporter comme des diodes électroluminescentes et peut-être même comme des lasers nanoscopiques. Finalement, il est aujourd'hui possible de fabriquer un nanocircuit qui a des fils, des commutateurs et des éléments de stockage entièrement constitués de nanotubes et d'autres molécules. Les nanotechnologies fournissent des versions minuscules de dispositifs classiques, mais aussi de nouveaux dispositifs fondés sur des effets quantiques, comme nous l'expliquerons plus loin.

Aujourd'hui, les nanocircuits sont des pièces uniques, difficiles à fabriquer. La «recette» pour connecter un nanotube à des électrodes métalliques varie selon les groupes de recherche. Elle combine la lithographie traditionnelle pour la fabrication des électrodes, et des outils de plus haute résolution, tels des microscopes à force atomique, qui permettent de localiser et même de positionner les nanotubes. Nous sommes loin de la production automatisée et rapide des micropuces de silicium utilisées dans toute l'électronique. Avant d'élaborer des circuits plus complexes contenant des nanotubes, nous devons trouver comment maîtriser la croissance des nanotubes, leur forme, leur taille ou encore leur orientation. Des équipes de recherche fabriquent des nanotubes là où elles le souhaitent, en déposant de petites quantités de nickel, de fer ou de catalyseurs sur un substrat. D'autres obtiennent la fusion des nanotubes avec des nanofils de silicium, réalisant ainsi des connexions avec des circuits classiques.

En électronique, les connexions sont un des nerfs de la guerre. Les ingénieurs cherchent en effet à réduire le diamètre des fils de connexion, pour optimiser la surface des puces. Les

fils de connexion classiques sont métalliques et ont un diamètre d'environ 250 nanomètres, mais deux obstacles empêchent de les miniaturiser davantage. D'abord, on ne connaît aucun moyen efficace pour dissiper la chaleur dégagée par les dispositifs, et si on les entasse, ils surchauffent rapidement. Enfin, à mesure que les fils métalliques s'amincissent, les paquets d'électrons qui s'y propagent deviennent assez énergétiques pour heurter les atomes métalliques, et les fils «grillent».

En théorie, les nanotubes pourraient éviter l'un et l'autre obstacle. Des expériences préliminaires ont montré que des nanotubes de carbone conduiraient la chaleur presque aussi bien que le diamant ou le saphir. Ainsi, des nanotubes pourraient refroidir des réseaux très denses de dispositifs électroniques. Comme les liaisons entre les atomes de carbone sont beaucoup plus fortes que dans un métal, les nanotubes pourraient transporter d'énormes quantités de courant électrique. Les mesures les plus récentes montrent qu'un milliard d'ampères pourrait circuler dans un faisceau de nanotubes de un centimètre carré de section. Avec de telles intensités de courant, des fils de cuivre ou d'or de la même section seraient vaporisés!

Quand les nanotubes scintillent

Les nanotubes de carbone ont une autre propriété que les ingénieurs commencent à exploiter. Les nanotubes, dressés sur leur extrémité et électrifiés, réagissent en effet comme des mini-paratonnerres, concentrant le champ électrique sur leur pointe. Toutefois, tandis qu'un paratonnerre conduit un arc électrique du ciel vers le sol, un nanotube émet des électrons par sa pointe à une vitesse prodigieuse. Ce comportement est nommé l'émission de champ. Comme ils sont très pointus, les nanotubes émettent des électrons à des tensions inférieures à celles des électrodes classiques, ils fonctionnent longtemps sans dommage, parce que les atomes de carbone sont solidement liés.

Les écrans plats à émission de champ pourraient remplacer les moniteurs de télévisions et d'ordinateurs à tubes cathodiques, et pourraient concurrencer les écrans à cristaux liquides : ils sont lumineux, minces et