

consomment peu d'énergie. Toutefois, les dispositifs à émission de champ qui existent restent fragiles : les nanotubes pourraient bientôt les remplacer.

Pour fabriquer un émetteur de champ avec des nanotubes, il suffit de les mélanger en une pâte composite avec des plastiques, de les étaler sur une électrode, et d'appliquer une ten-

sion. Certains des nanotubes de la couche s'orientent vers l'électrode opposée et émettent des électrons. Divers groupes de recherches ont déjà découvert plusieurs façons de faire croître des grappes de nanotubes verticaux en petites grilles régulières. Lorsque la densité est optimale, ces nanotubes émettent plus d'un ampère

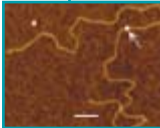
par centimètre carré, ce qui est suffisant pour faire scintiller le phosphore d'un écran et même pour actionner des relais à micro-ondes, et des commutateurs à haute fréquence dans des antennes de base utilisées pour la téléphonie cellulaire.

Deux sociétés ont déjà mis au point des produits utilisant des nanotubes

Indices de faisabilité

0 = science-fiction
2 = démontré
4 = prêt pour la commercialisation

D'autres utilisations pour les nanotubes

	LE PRINCIPE	LES OBSTACLES	LA FAISABILITÉ
 1. SONDES GÉNÉTIQUES ET CHIMIQUES Brin d'ADN marqué	Un microscope à force atomique dont la pointe se réduit à un nanotube détecte un brin d'ADN et identifie les marqueurs qui repèrent les différents variants d'un même gène.	C'est la seule méthode qui permet de repérer les constituants de la surface, mais, pour l'instant, elle n'a été utilisée que pour des fragments d'ADN relativement petits.	3
 2. MÉMOIRE MÉCANIQUE Mémoire non volatile	Des nanotubes alignés sur un support ont été testés comme dispositif de mémoire binaire : en appliquant une tension, certains tubes entrent en contact et conservent cette position «marche» ; d'autres se séparent, ce qui correspond à la position «arrêt».	La vitesse de commutation de ce dispositif n'a pas été mesurée, mais elle se limite probablement à un mégahertz, ce qui est beaucoup plus lent que les puces à mémoire classiques.	2
 3. NANOPINCES Pinces de cinq micromètres de long	Deux nanotubes, attachés à des électrodes sur une tige de verre, forment une pince, qui s'ouvre ou se ferme en fonction de la tension appliquée. Ces pinces sont utilisées pour saisir et déplacer des objets de quelque 500 nanomètres.	Les nanotubes sont si «collants» que la plupart des objets pincés ne peuvent plus être relâchés. Il existe des techniques plus simples pour déplacer ces nanoobjets.	2
 4. CAPTEURS SUPERSENSIBLES L'oxygène se fixe sur les tubes	La résistance électrique des nanotubes semi-conducteurs varie quand ils sont exposés à des alcalins, des halogènes et divers éléments des gaz à température ambiante. On pourrait exploiter cette propriété des nanotubes pour réaliser de nouveaux capteurs chimiques sensibles.	La sensibilité des nanotubes n'est pas spécifique à un élément. Ils pourraient être incapables de distinguer un élément chimique d'un autre.	3
 5. STOCKAGE D'HYDROGÈNE ET D'IONS Des atomes dans un cœur creux	Les nanotubes stockent de l'hydrogène ou des ions lithium dans leur cœur creux et pourraient être utilisés dans des batteries ayant une durée de vie supérieure à celles existantes.	Le stockage maximal de l'hydrogène obtenu jusqu'à présent n'excède pas 6,5 pour cent de l'espace disponible, ce qui est insuffisant pour que ces cellules soient rentables. Des tests préliminaires avec les ions lithium sont en cours.	1
 6. MICROSCOPES PLUS PUISSANTS Anticorps anti-immunoglobulines	Fixés à la pointe d'une sonde de microscope, des nanotubes améliorent la résolution latérale de l'instrument d'un facteur 10, ce qui facilite l'observation des protéines et d'autres molécules.	Bien que disponible dans le commerce, ce dispositif est fabriqué à l'unité. Les nanotubes n'améliorent pas la résolution verticale, mais ils détectent des reliefs auparavant invisibles dans des nanostructures.	4
 7. MATÉRIAUX SUPER-RÉSISTANTS Test de pression	Les nanotubes ont une élasticité et une résistance élevées. Un matériau composite contenant des nanotubes pourrait être utilisé dans les carrosseries de voitures qui «rebondiraient» sous un choc, ou des bâtiments qui oscilleraient sans s'écrouler lors d'un tremblement de terre.	Les nanotubes coûtent encore 10 à 1 000 fois plus cher que les fibres de carbone utilisées dans les composites. En outre, ils sont si fins qu'ils risquent de ne pas rester en place dans la matrice.	0

De haut en bas : C. Lieber, T. Ruckes et al., © 2000 AAAS, C. Mirkin, © 1999 AAAS, J. Cumming et A. Zettl, Rüdiger R. Meyer et al., C. Lieber, MinFeng Yu et al.

Du fil en nanotubes

Des câbles d'une extrême résistance, des ascenseurs dans l'espace, des muscles artificiels... Ces quelques exemples figurent parmi les nombreuses réalisations auxquelles les nanotubes de carbone font rêver. Ils sont 100 fois plus résistants et six fois plus légers que l'acier, ce qui les rend intéressants pour la fabrication de câbles et de matériaux composites. Ils se déforment sous l'effet d'un champ électrique et, inversement, produisent de l'énergie électrique lorsqu'ils sont déformés. Des muscles artificiels en nanotubes seraient plus résistants que les muscles humains et plus rapides que les systèmes artificiels actuels. Il serait même possible de fabriquer des drapeaux de nanotubes qui, à la place des éoliennes, produiraient du courant en se déformant sous l'effet du vent.

Ainsi, les laboratoires du monde entier tentent de maîtriser cette nouvelle forme du carbone. Les principaux obstacles proviennent des impuretés et de la difficulté à mettre en forme le matériau brut issu de la synthèse, une suie fragile et délicate à manipuler. On mélange cette suie à des polymères pour faire des fibres ou des matériaux composites, plus pratiques. Cependant, ces matériaux bénéficient peu des propriétés des nanotubes, car les concentrations en nanotubes qui y sont incorporées sont faibles. On disperse alors la suie de départ dans un solvant, puis on la sèche sur une membrane de filtration ; on obtient des galettes qui ressemblent à du papier de nanotubes enchevêtrés. Ce papier, bien que peu dense et relativement fragile, a d'étonnantes capacités pour la réalisation de muscles artificiels. Récemment, des films de nanotubes alignés par de forts champs magnétiques et des fibres de nanotubes alignés par un procédé électrophorétique ont été réalisés. L'alignement des nanotubes est un progrès majeur pour les applications qui reposent sur les propriétés mécaniques ou les propriétés de transport électrique et thermique des nanotubes. Toutes ces techniques restent lentes et difficiles à reproduire à grande échelle. Au Centre de recherche Paul Pascal (CRPP/CNRS), à Bordeaux, nous avons mis au point une

nouvelle méthode, brevetée en février 2000, pour assembler et aligner les nanotubes sous forme de fibres très longues. Cette méthode n'a pas d'équivalent à l'heure actuelle, car elle permet de «filer» les nanotubes de façon simple et rapide en production continue. Les nanotubes sont hydrophobes (ils repoussent l'eau), de sorte

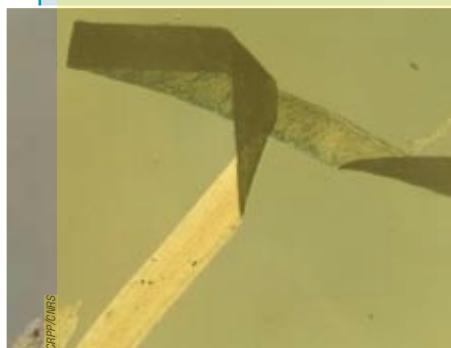


Nœud formé avec une fibre de nanotubes. Le rayon de la fibre mesure environ 15 micromètres.

que, placés dans l'eau, ils se dispersent en présence d'un tensio-actif (un détergent). La suspension obtenue est ensuite injectée en continu dans une solution visqueuse qui s'écoule et contient un polymère soluble dans l'eau. Ce polymère déstabilise la suspension et conduit à l'aggrégation des nanotubes sous forme de rubans fins qui croissent à des vitesses de plusieurs kilomètres par heure. Ces rubans, de quelques dixièmes de millimètres de largeur, sont constitués de nanotubes enchevêtrés qui ont une orientation préférentielle, due à l'écoulement de la suspension.

Lorsque ces rubans sont sortis de l'eau, ils se contractent et sèchent pour former des fibres denses, assimilables à du fil, de plusieurs micromètres de diamètre. Les fils réalisés dans notre laboratoire n'ont une longueur que de quelques dizaines de centimètres, mais ils pourraient, en principe, être obtenus sur des kilomètres avec des dispositifs proches des dispositifs industriels de filage de fibres plastiques ou textiles. Les propriétés mécaniques du fil de nanotubes sont en cours d'optimisation. Nous faisons notamment varier le degré d'enchevêtrement, l'alignement et l'adhésion des nanotubes. D'ores et déjà, ce fil présente une grande résistance à la torsion : quand on y fait un nœud et qu'on tire sur ses deux extrémités, les fibres de nanotubes résistent bien, tandis que la majorité des fibres de carbone se rompent dans ces conditions. Elles pourraient bientôt concurrencer les fibres de carbone, de polymères ou de métaux. D'ores et déjà, nous collaborons avec la Société américaine *Honeywell* pour fabriquer des muscles artificiels à partir de ces nouvelles fibres. Les performances que nous avons déjà obtenues dépassent celles du papier de nanotubes. Par ailleurs, la Société *Nanoleedge* a été récemment créée à Montpellier pour valoriser la technique de synthèse par arc électrique des nanotubes de carbone maîtrisée par le Groupe de dynamique des phases condensées (CNRS-Université Montpellier 2) ; cette société va acquérir une licence de notre brevet pour commercialiser des fibres de nanotubes.

Philippe POULIN, Centre de recherche Paul Pascal et
Brigitte VIGOLO, Université Bordeaux I



Un ruban de nanotubes de carbone a été plié. On l'a observé entre polariseurs et analyseurs optiques croisés. Les couleurs varient en fonction de l'orientation du ruban ; cette variation reflète une structure organisée : les nanotubes ont une orientation préférentielle au sein du ruban.

Les propriétés des nanotubes de carbone

PROPRIÉTÉ	NANOTUBES À PAROI UNIQUE	POUR MÉMOIRE
 TAILLE	0,6 à 1,8 nanomètre de diamètre.	La lithographie par faisceau électronique peut créer des lignes de 50 nanomètres de large et de quelques nanomètres d'épaisseur.
 DENSITÉ	1,33 à 1,40 gramme par centimètre cube.	L'aluminium a une densité de 2,7 grammes par centimètre cube.
 RÉSISTANCE	45 milliards de pascals.	Les alliages en acier les plus résistants se brisent à environ deux milliards de pascals.
 ÉLASTICITÉ	Ils peuvent être fortement courbés sans déformation irréversible.	Les métaux et les fibres de carbone se fracturent au niveau des limites entre les grains.
 CAPACITÉ DE TRANSPORT DU COURANT	Estimée à un milliard d'ampères par centimètre carré.	Les fils de cuivre grillent à environ un million d'ampères par centimètre carré.
 ÉMISSION DE CHAMP	Ils peuvent activer le phosphore à une tension comprise entre 1 à 3 volts quand les électrodes sont éloignées de un micromètre.	Des pointes de molybdène requièrent des champs électriques de 50 à 100 volts par micromètre et ont des durées de vie très limitées.
 TRANSMISSION DE LA CHALEUR	Elle serait de 6 000 watts par mètre et par kelvin à température ambiante.	Un diamant quasi pur transmet 3 320 watts par mètre et par kelvin.
 STABILITÉ THERMIQUE	Stables jusqu'à 2 800 °C dans le vide, 750 °C dans l'air.	Les fils métalliques des microprocesseurs fondent entre 600 et 1 000 °C.
 COÛT	5 000 francs par gramme.	L'or valait 70 francs le gramme en octobre 2000.

Laurie Grace

de carbone comme émetteurs de champ. La Société *Ise Electronics*, à Ise au Japon, utilise des composites de nanotubes pour fabriquer des lampes à vide. Elles existent en six couleurs, sont deux fois plus lumineuses, ont une durée de vie supérieure et consomment dix fois moins d'énergie que les ampoules classiques. Le premier prototype a fonctionné pendant plus de 10 000 heures et fonctionne toujours. Par ailleurs, des ingénieurs de la Société *Samsung*, à Séoul, ont appliqué un mince film de nanotubes sur un circuit électronique de contrôle et l'on recouvre d'un verre enduit de phosphore. Ils ont ainsi réalisé un prototype d'écran plat. Ils espèrent commencer à produire cette année cet écran plat, aussi lumi-

neux qu'un tube cathodique, mais consommant dix fois moins d'énergie.

Les nanotubes de carbone, objets extrêmement petits, présentent des propriétés électroniques particulières liées à leur taille. À cette petite échelle, le concept de résistance électrique d'un fil n'a plus de sens et doit être remplacé

Philip COLLINS travaille au Centre de recherche Thomas Watson d'IBM. Phaedon AVOURIS dirige le groupe «nanoscience et nanotechnologie» d'IBM.

B. VIGOLO, A. PÉNICAUD, C. COULON, C. SAUDER, R. PAILLER, C. JOURNET, P. BERNIER et P. POULIN, *Macroscopic Fibers and Ribbons of Oriented Carbon Nanotubes*, in *Science*, n° 290, pp. 1331-1334, 2000.

par un modèle quantique. Aujourd'hui, les physiciens étudient comment les électrons se déplacent le long d'un nanotube. Il semble que dans les nanotubes sans défauts, les électrons se déplacent de façon «balistique», c'est-à-dire sans collision, mécanisme qui confère leur résistance aux fils métalliques. Quand des électrons se propagent sur de longues distances sans collision, ils restent dans le même état quantique, ce qui est indispensable pour que les ondes associées interfèrent. L'absence de collision expliquerait pourquoi les électrons conservent leur état de spin (une propriété quantique de l'électron) lorsqu'ils se propagent le long des nanotubes. Des physiciens essaient de tirer parti de ce comportement inhabituel pour fabriquer des dispositifs «spintroniques» qui commutent selon l'état de spin des électrons, et non simplement en fonction de leur charge, comme le font les dispositifs électroniques.

Dans un nanotube, le flux des électrons peut être contrôlé avec une précision presque parfaite. Un phénomène, nommé blocage de Coulomb, a récemment été mis en évidence dans les nanotubes : les électrons «s'opposent» à ce que l'on introduise plus d'un électron à la fois dans un nanotube. Ce phénomène pourrait faciliter la construction de transistors à électron unique, l'idéal de l'électronique ultra-sensible.

Avant de réaliser de nouveaux dispositifs quantiques, il reste des problèmes à résoudre. Tous les dispositifs moléculaires, y compris les nanotubes, sont par exemple très sensibles aux fluctuations électriques, thermiques et chimiques. Des agents contaminants, tel l'oxygène, perturbent aussi leurs propriétés électriques. Cela pourrait être utile pour des détecteurs chimiques extrêmement sensibles, mais c'est un obstacle pour la fabrication de circuits à molécule unique. Aujourd'hui, la question n'est plus de savoir si les nanotubes deviendront des composants de l'électronique du futur, mais simplement comment et quand.

Cees DEKKER, *Carbon Nanotubes as Molecular Quantum Wires*, in *Physics Today*, vol. 52, n° 5, pp. 22-28, mai 1999.

Carbon Nanotubes, in *Physics World*, vol. 13, n° 6, pp. 29-53, juin 2000.

Mildred. DRESSELHAUS, Gene. DRESSELHAUS et Phaedon. AVOURIS, *Carbon Nanotubes*, Springer-Verlag, 2000.