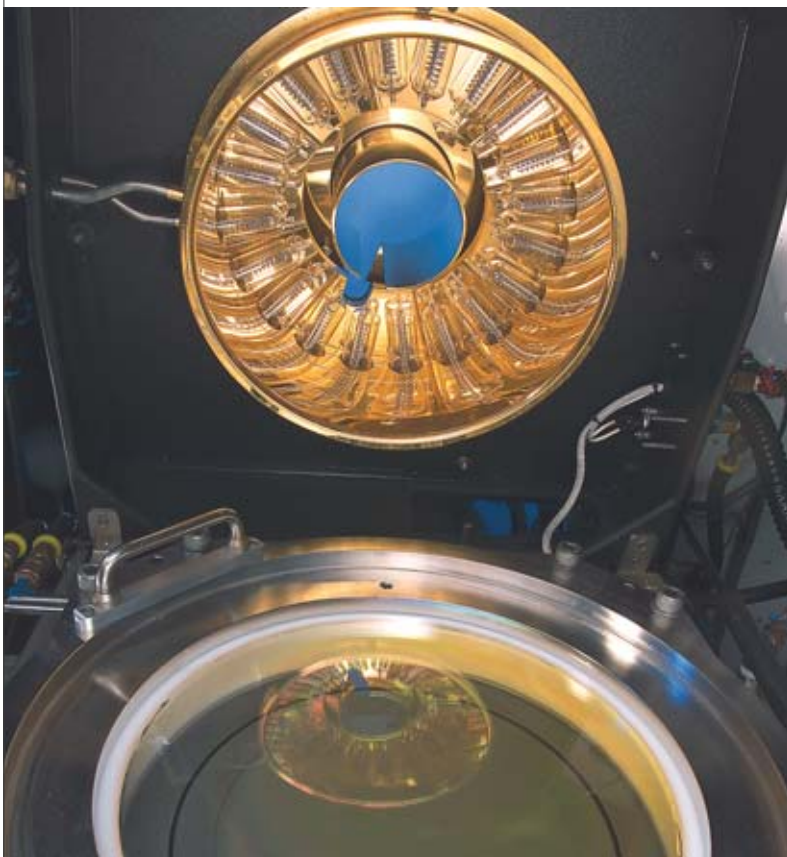


Nanotubes et matériaux bidimensionnels carbonés pour la microélectronique

L'enthousiasme de la communauté scientifique pour le carbone et les matériaux carbonés ne tient pas seulement à leur beauté structurelle mais plutôt à leurs extraordinaires propriétés physiques. **Le CEA détient une excellence à l'état de l'art mondial en matière de R & D sur les nanotubes de carbone et le graphène.**



Réacteur Centura ouvert sur le support du substrat de silicium où seront déposés les nanotubes de carbone.

Ces vingt dernières années ont été le théâtre d'une redécouverte majeure, celle d'un élément chimique que les scientifiques pensaient pourtant bien connaître : le **carbone**. Sixième **élément** du tableau périodique, quatrième élément le plus abondant dans l'Univers, présent dans toutes les formes de vies connues à ce jour, le carbone a néanmoins connu une éclipse d'intérêt dans la communauté des chercheurs. Mais, depuis une vingtaine d'années, le voilà revenu sur le devant de la scène scientifique avec un nouveau panache. Tout commence, en 1985, avec une publication originale qui valut à ses auteurs (Robert Curl, Harold Kroto et Richard Smalley) le Prix Nobel de chimie, en 1996. Cette publication traitait du buckminsterfullerène (C_{60}), une **molécule** de la famille des **fullerènes**, formée d'exactlyment soixante **atomes** de carbone et surnommée molécule

« football » en raison de sa configuration proche de celle d'un ballon (figure 1).

Mais ce qui mit le feu aux poudres, en 1990, ce fut la découverte de la première voie de **synthèse** massive du C_{60} , et plus généralement de toute la famille des fullerènes, par Donald Huffman et Wolfgang Krätschmer, respectivement post-doctorant et professeur au **Max Planck-Institut de physique nucléaire d'Heidelberg**. Grâce à leurs travaux, il fut possible d'obtenir, quasiment du jour au lendemain, une synthèse simple et reproductible d'une molécule dont l'importance scientifique et le potentiel applicatif, en chimie et en physique, semblaient comparables à ceux du **benzène**. Tous les ingrédients étaient donc réunis pour qu'en 1991, le physicien japonais Sumio Iijima puisse observer des **nanotubes de carbone** (figure 1), par **microscopie électronique**, dans les produits dérivés de la synthèse du C_{60} , et que cette observation reçoive une attention toute particulière même si, historiquement, elle ne fut pas la première. Le dernier pavé dans la mare fut lancé, en 2004, par André Geim, chercheur au Département de physique de l'**université de Manchester**, avec son étude consacrée à une couche unique d'atomes de carbone nommée **graphène** – l'empilement de plusieurs couches de graphène donnant le **graphite** (figure 1)⁽¹⁾.

(1) On notera qu'un abus de langage courant tend à utiliser le terme « graphène » pour des matériaux graphitiques ayant un nombre très limité de feuillets alors qu'initialement, ce terme était réservé à un plan unique.

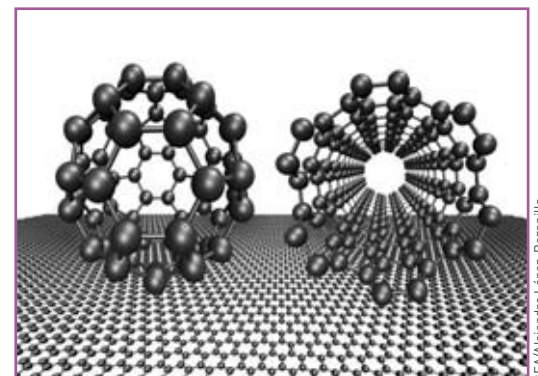


Figure 1. Modèle atomique de la molécule de buckminsterfullerène (C_{60}) d'un nanotube de carbone et d'un feuillet de graphène.

Une beauté structurale doublée d'extraordinaires propriétés physiques

De cette double spécificité vient la fascination suscitée par les matériaux à base de carbone dans la communauté scientifique – les nanotubes et le graphène notamment.

Les nanotubes de carbone, un produit industriel emblématique issu des nanotechnologies

Classiquement, ils se décrivent par le repliement, sous une forme tubulaire, d'un ou de plusieurs plans graphitiques. Mais, petite subtilité lourde de conséquences, la **chiralité** du tube varie selon l'orientation de l'axe autour duquel le feuillet est enroulé par rapport au réseau hexagonal du plan d'atomes de carbone. D'où l'existence d'une infinité de chiralités pour les nanotubes de carbone. À chacune d'entre elles correspond une structure de bandes spécifique dont les caractéristiques électriques diffèrent.

Statistiquement, les nanotubes entrent dans la catégorie des matériaux métalliques pour un tiers des chiralités, les autres induisent une nature **semi-conductrice**, avec des gaps variables selon la chiralité. L'intérêt des nanotubes métalliques réside dans leur capacité à supporter des **densités** de courant de $4 \times 10^9 \text{ A/cm}^2$, soit deux fois plus que le **cuivre**. Avec une **conductivité** de $3500 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ à la température ambiante contre $\sim 400 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ pour le cuivre, ils s'avèrent également d'excellents **conducteurs thermiques**. Enfin, les nanotubes de carbone offrent des propriétés mécaniques remarquables avec les plus grands modules élastiques, et donc les meilleures limites élastiques à la traction, connus pour un matériau.

Le graphène, un cristal dans un espace bidimensionnel

Avec la structure de bandes qui le caractérise, il entre dans la catégorie des semi-métaux. Sa spécificité réside en une mobilité des charges (trous et **électrons**) considérable à température ambiante avec des mesures à plus de $15\,000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ (soit plus de 10 fois celle mesurée pour le **silicium**) et une valeur théorique maximale de $40\,000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. De plus, ses propriétés magnétiques en font un matériau potentiel majeur pour la **spintronique** : des longueurs de relaxation de spin de plus d'un **micromètre** ont ainsi été rapportées (à basse température). Quant à ses propriétés optiques, il a été montré que l'absorbance d'un monofeuillet de graphène est d'environ 2,5 %, ce qui induit une diminution de la transparence du substrat sur lequel il a été déposé, lequel s'avère visible à l'œil nu, un fait rare pour une monocouche atomique.

Des matériaux miracles, dix fois plus rigides que l'acier

Trois méthodes prévalent aujourd'hui pour fabriquer nanotubes de carbone et graphène.

La synthèse

La technique initiale de synthèse des nanotubes de carbone consistait à utiliser un arc électrique entre deux **électrodes** de graphite, sous atmosphère résiduelle de gaz neutre, en présence d'un **catalyseur**/promoteur métallique favorisant leurs croissances. Ce mode de fabrication fut abandonné en raison de ses



C. Dupont/CEA

Disposés en tapis superposés, les nanotubes de carbone offrent de nombreuses applications à l'industrie : écrans plats, membranes pour les piles à combustible, capteurs de polluants chimiques lorsque l'on y greffe des molécules.

multiples inconvénients : son faible rendement, sa gourmandise énergétique, la présence d'impuretés en grande quantité en fin de synthèse (par exemple, du carbone amorphe, des fullerènes, des particules métalliques) – d'où l'avènement de nouvelles méthodes de synthèse plus performantes.

À l'heure actuelle, la méthode privilégiée utilise la technique dite de la croissance en phase vapeur. Elle consiste à décomposer, dans un four, une source gazeuse de carbone (du **méthane**, par exemple) en présence d'un promoteur de croissance. Même si le procédé connaît de nouvelles variantes, celui-ci obéit toujours au même principe : une source de carbone pour saturer, à haute température, une **nanoparticule** métallique, généralement à l'état liquide, pour augmenter et accélérer la dissolution du carbone. Si toutes les conditions extérieures sont remplies, cette nanoparticule saturée en carbone continue à dissoudre du carbone puis en « relâche » une partie sous forme de nanotubes. Ceux-ci présentent une ou plusieurs parois en fonction des paramètres de synthèse ajustables, de la nature chimique et du diamètre de la particule. En raison du nombre important de ces paramètres, la nature des nanotubes varie d'une source à l'autre, voire d'une synthèse à l'autre. L'objectif final n'en demeure pas moins de contrôler le nombre de parois du nanotube et son diamètre, mais également le nombre de défauts topologiques du réseau d'atomes de carbone et surtout sa chiralité. Or, de cette chiralité dépendent les propriétés physiques et notamment électriques des nanotubes. En dix ans, d'énormes progrès ont été réalisés et de très bons rendements obtenus avec les nanotubes monofeuillets ou les nanotubes double-feuillets ayant un diamètre bien monodisperse mais ayant aussi une distribution en chiralité relativement faible et donc des propriétés électriques plus uniformes (cela, au lieu de la distribution classique de 33 % de matériaux métalliques pour 67 % de matériaux semi-conducteurs : on peut ainsi parvenir à un taux de 90 % de l'un ou de l'autre).

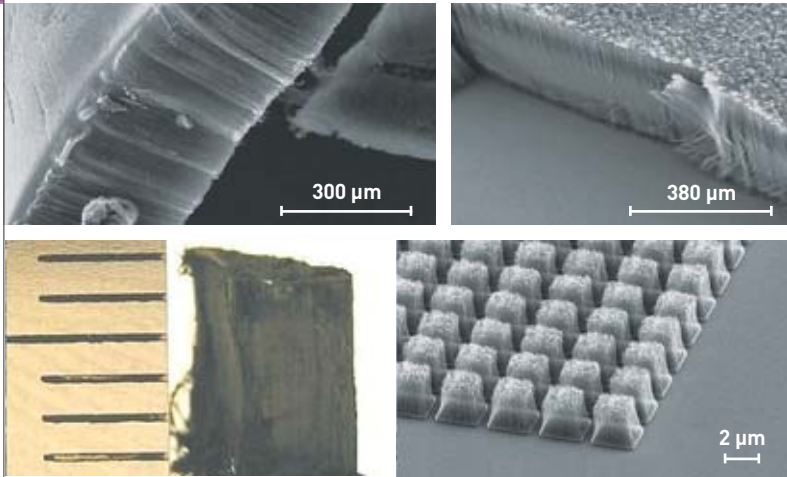


Figure 2. Forêts de nanotubes de carbone. En haut et à gauche : forêt monocouche ; en haut et à droite : forêt multicouche ; en bas à gauche : forêt à nanotubes ultralongs (supérieurs à 5 mm) ; en bas à droite : forêt à localisation de croissance contrôlée.

En la matière, le CEA détient une excellence à l'état de l'art mondial, notamment :

- Pour avoir réalisé la synthèse de nanotubes en forêts/pelouses de tubes très denses (figure 2). Dans de telles structures, les nanotubes croissent perpendiculairement au substrat et parallèlement les uns aux autres, tels les arbres d'une forêt ou les brins d'herbe d'une pelouse. Les nanotubes peuvent y atteindre plusieurs millimètres de longueur. Ces structures s'avèrent particulièrement utiles pour l'élaboration de fils électriques à hautes performances (aux échelles nano, micro ou macroscopiques) ou encore, une fois imbibées de polymères, pour la filtration de l'eau : les tubes (maintenant ouverts par le procédé de fabrication), jouent la fonction des pores d'une membrane classique. Il s'agit d'une coopération entre l'Institut nanosciences et cryogénie (Inac), l'Institut rayonnement matière de Saclay (Iramis) et de Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux (Liten).
- Pour faire croître les nanotubes de façon isolée et localisée dans un but applicatif : par exemple, celui des pointes d'émission dédiées aux dispositifs à effet de champ tels ceux utilisés dans les générateurs portatifs de rayons X.

Concernant le graphène, les recherches sont moins avancées. Ici, la technique initiale de préparation consis-

taît à utiliser un simple ruban adhésif pour arracher des plans de graphène à un cristal de graphite afin d'en transférer une partie sur une surface plane – une plaque de silicium par exemple. La sélection du meilleur échantillon s'opérait alors par **microscopie électronique à transmission** ou à champ proche. Aujourd'hui, trois nouvelles méthodes rivalisent pour obtenir un plan de graphène bien cristallisé (le nombre de défauts influant directement sur la mobilité des **porteurs de charges**) et le plus étendu spatialement possible :

- Le traitement du **carbure** de silicium, à très haute température (supérieure à 1 200 °C) et sous vide, pour sublimer le silicium : cette technique présente l'avantage de laisser le carbone sous forme de graphène à la surface du substrat, ce qui permet, par la suite, de lui faire subir les traitements classiques de la microélectronique (lithographie, **dopage**...).
- L'introduction de métaux **alcalins**, ou de molécules organiques, intercalés entre les feuillets d'un bloc de graphite, qui permet son exfoliation en solution organique, puis sa déposition contrôlée sur une surface à partir des feuillets de graphène en suspension.
- La décomposition d'une source carbonée sur la surface d'un catalyseur métallique : les meilleurs résultats obtenus utilisent le **nickel**, voire des rubans de cuivre, et aboutissent à un graphène de plusieurs cm². Une expertise a été développée au Laboratoire d'électronique et des technologies de l'information (Leti), en collaboration avec l'Inac, pour la croissance de graphène sur des substrats en carbure de silicium (SiC), ainsi qu'une méthode catalytique basse température sur du nickel (Ni) et du cuivre (Cu), qui permet d'obtenir du graphène dans un cadre compatible avec les processus de la **microélectronique** classique (figure 3). Celle-ci est complétée par une approche chimique, mise en place par le Laboratoire de chimie des surfaces et interfaces (LCSI). Cette approche permet de greffer, simplement et efficacement, des feuillets de graphène sur des couches monomoléculaires, et de réaliser ainsi des jonctions de type « millefeuilles » : graphène/plan moléculaire/substrat métallique ; il s'agit d'une architecture prometteuse de l'électronique moléculaire.

La purification

C'est une étape qui a donné lieu à de nombreuses publications. Elle vise à éliminer les résidus de synthèse des nanotubes de carbone : carbone **amorphe**, particules métalliques, fullerènes... Le plus souvent, elle consiste à



Synthèse expérimentale des nanotubes de carbone par CVD (pour *Chemical Vapor Deposition*).

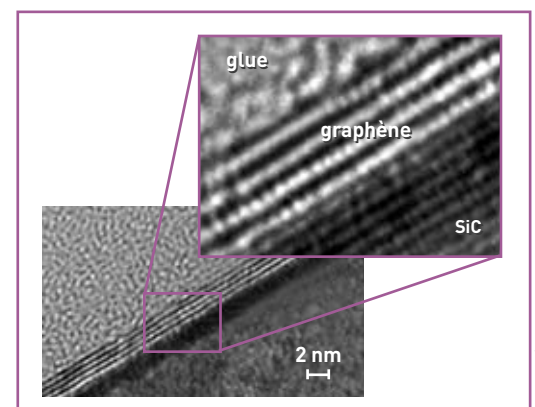


Figure 3. Étude, par microscopie électronique à transmission de plans, de graphènes réalisés par sublimation de silicium (SiC).

extraire des fullerènes en utilisant un solvant organique puis à faire alterner des traitements acides et des oxydations pour éliminer métal et carbone amorphe. Les chercheurs parviennent ainsi à des niveaux de pureté élevés, avec des niveaux de contaminants suffisamment faibles pour rester compatibles avec une utilisation par l'industrie des semi-conducteurs.

Le tri

Aucune méthode de synthèse ne permet actuellement d'obtenir des nanotubes de carbone à monochiralité – d'où la pratique du tri en solution. Cette technique consiste à opérer la complexation sélective des nanotubes au moyen d'une molécule organique puis à procéder à leur séparation par centrifugation ou chromatographie. Les résultats les plus récents dans ce domaine utilisent une série de séquences d'ADN : chaque séquence ayant une spécificité particulière pour une chiralité donnée. Au final, cela permet une séparation des nanotubes de carbone par chiralité.

Au CEA, l'Institut de biologie et de technologie (iBiTec) a mis au point un procédé de greffage covalent de groupements sélectifs dédié aux nanotubes semi-conducteurs, permettant une différenciation chimique entre les nanotubes métalliques (non fonctionnalisés) et les semi-conducteurs (fonctionnalisés). Ces avancées laissent entrevoir la commercialisation de nanotubes par chiralité dans un avenir relativement proche. Il s'agira de la levée d'un verrou majeur dans les domaines applicatifs électroniques des nanotubes qui sont, pour la plupart, basés soit sur des tubes métalliques, soit sur des semi-conducteurs, voire sur une chiralité unique (par exemple, pour les transistors), cela pour obtenir une bonne reproductibilité des composants finaux.

Avec l'accès à ces types de nanotubes purifiés, une équipe mixte CEA/CNRS de l'Institut rayonnement matière de Saclay (Iramis), associée avec l'Institut d'électronique, de microélectronique et de microtechnologies (IEMN) de Villeneuve d'Ascq, a pu réaliser des dispositifs électroniques à base de nanotubes les plus performants du monde en matière de fréquence de coupure (voir ci-dessous). Ce résultat a été obtenu dans le cadre d'une collaboration internationale avec l'Université de Northwestern.

De la recherche à l'industrie

Des circuits électroniques simples, utilisant des transistors à effet de champ à base graphène ou de nanotubes de carbone, sont désormais réalisés en laboratoire. L'industrie des semi-conducteurs les considère donc comme des matériaux/composants émergents pouvant potentiellement s'intégrer dans la structure des systèmes électroniques du futur. Leurs multiples propriétés laissent entrevoir une utilisation possible à différents niveaux de l'architecture de ces systèmes :

- Comme canal semi-conducteur d'un transistor, en remplacement du silicium, cette application supposera de résoudre les problèmes du dépôt du matériau, au nanomètre près, de la reproductibilité des propriétés électroniques du canal et de la prise de contacts fiables. En effet, les nanotubes de carbone peuvent apparaître sous de nombreuses chiralités, chacune ayant des propriétés électriques légèrement ou profondément différentes. De façon similaire, pour le graphène, il faut pouvoir le rendre semi-conducteur (ce qui n'est pas

dans sa nature première) et lui donner la forme d'un ruban ayant une largeur inférieure à quelques nanomètres (ce qui correspond à la taille des canaux semi-conducteurs des transistors de la prochaine décennie) et des bords définis à l'atome près (car de cette structure dépendent les propriétés électroniques). Des rapports de conductance dépassant 10^5 (entre leurs états On/Off) ont ainsi été obtenus pour des transistors incluant des nanotubes ou des nanorubans ayant des largeurs inférieures à 10 nm, ce qui s'avère très prometteur mais insuffisant pour une possible application en électronique⁽²⁾. Enfin, un procédé reproductible de dopage « n » et « p » de ces canaux reste à élaborer⁽³⁾. Or, les simulations théoriques effectuées à l'Inac et au Leti, montrent que dans le cas de dopage d'un ruban de graphène par un alcalin, les propriétés du transistor diffèrent significativement selon la position de l'alcalin sur le canal, et ce à 0,1 nm près. Une précision à l'échelle atomique du dépôt s'avère donc nécessaire pour atteindre les niveaux requis de reproductibilité d'un transistor à l'autre.

- Une application de ce type de dispositif, peut-être à plus court terme, pourrait venir du domaine des applications radiofréquences, notamment comme composants analogiques à hautes performances tels qu'on les trouve dans les amplificateurs à faible bruit dédiés aux systèmes de transmission sans fil. En effet, en raison de leurs propriétés, on s'attend à des composants pouvant fonctionner à des fréquences très élevées. Dans ce domaine, les travaux réalisés à l'Iramis, en collaboration avec l'IEMN, ont atteint le meilleur niveau mondial (figure 4). De plus, la capacité de

(2) Notons que pour les nanorubans de graphène, le gap ouvert peut être décrit empiriquement en fonction de la largeur du ruban (W) par la relation E_g (eV) = $0,8/W$ (nm).

(3) Le dopage permet de modifier les propriétés de conduction des matériaux semi-conducteurs. Il consiste, généralement, à introduire, dans le réseau cristallin, une quantité infime d'atomes « perturbateurs ». Dans le cas du silicium, le dopage de type « n » s'effectue avec des atomes à 5 électrons de valence (phosphore), donc avec un électron supplémentaire libre de se déplacer par atome – d'où un surplus d'électrons. Le dopage de type « p » s'opère avec des atomes à 3 électrons de valence (bore). Ici, il manque un électron par atome de B – donc il y a un surplus de « trous ». Cette technique est largement utilisée dans la fabrication des composants électroniques. En effet, l'édifice est neutre, il n'y a pas, à proprement parler, de « charge » ni d'ion.

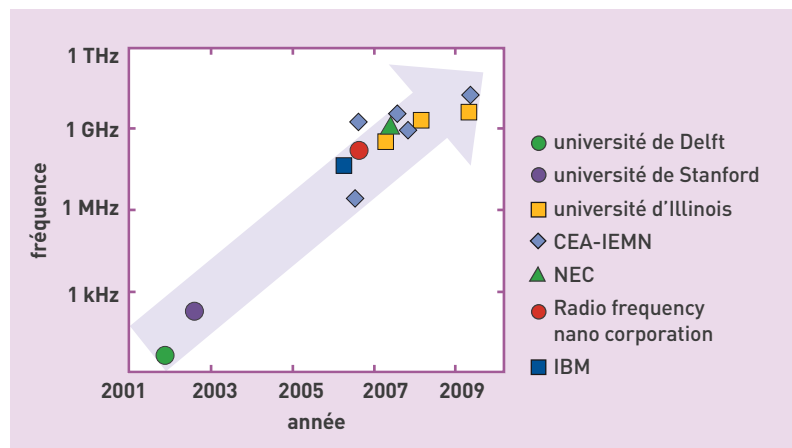


Figure 4. Fréquences maximales d'opération (échelle logarithmique), en fonction de leur date de publication, pour des transistors à effet de champ à base de nanotubes de carbone. Différents types de points sont utilisés en fonction des instituts ayant publié ces résultats.



C. Morel/CEA

Conception d'étiquettes RFID, étiquettes intelligentes à base de puces électroniques, de tags et de transporteurs avec un équipement radio capable d'identifier rapidement des articles en utilisant des signaux de fréquences radio.



Artechnique

Réalisation de dispositifs à base d'électronique organique : dépôt des différentes couches semi-conductrices, conductrices et isolantes par voie liquide.

réaliser ces transistors sur substrats souples va permettre l'intégration de ces **composants à l'électronique organique** et aux grandes surfaces.

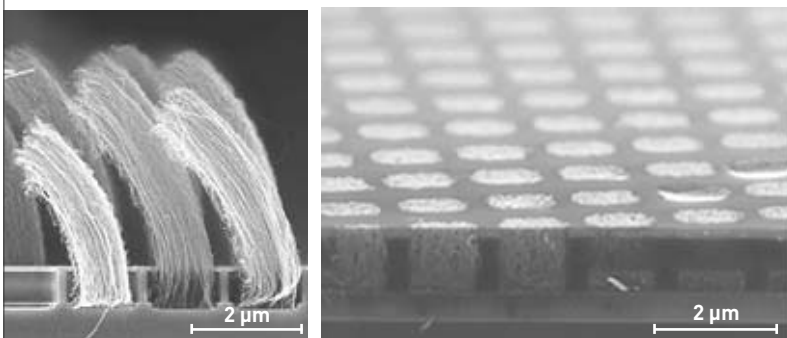
• Le Leti et le Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et des nanomatériaux (Liten) étudient également l'hypothèse d'utiliser ces matériaux pour les interconnexions ou pour l'évacuation de la chaleur, dans le cadre de projets nationaux et européens, notamment en collaboration avec

INTEL. Pour les interconnexions, le challenge consiste à favoriser la croissance d'une forêt de nanotubes métalliques, alignés perpendiculairement au substrat, avec une densité en nanotubes supérieure à 10^{13} nanotubes de carbone/cm² (dans le cas de nanotubes mono-paroi) et dans des perforations cylindriques du substrat (vias) de moins de quelques dizaines de nanomètres. Cette géométrie amène des densités de courant supérieures à 10^7 A/cm², comparables, voire meilleures que celles obtenues avec des nanofils de cuivre de dimensions identiques. Notons que le CEA détient le record du monde de la densité en nanotubes pour ses forêts avec $5 \cdot 10^{12}$ nanotubes de carbone/cm² intégrés dans les vias de 1 µm (figure 5). Concernant l'évacuation de la chaleur, l'utilisation de forêts de nanotubes, intégrées au **packaging** des puces électroniques, est d'ores et déjà annoncée par les industriels à une échéance de trois à cinq ans. Ceux-ci prévoient une augmentation des performances en dissipation de 20 %.

• Graphène et nanotubes de carbone sont également pressentis comme matériaux de remplacement des **oxydes** métalliques transparent conducteurs actuellement utilisés dans les écrans plats (tactiles ou non). Y parvenir suppose l'obtention préalable d'une résistance de film suffisamment faible pour une transmission de la lumière maximale. Le Liten a mis en place une filière de déposition de tels matériaux, permettant le dépôt selon une variété de procédés et sur de nombreux types de substrats de grandes surfaces. Cette filière vise une **conductivité** meilleure que celle de l'oxyde utilisé à l'heure actuelle ($> 100 \Omega/\text{square}$ pour une transmission de la lumière $> 90 \%$).

Plusieurs équipes du CEA travaillent également sur l'utilisation des nanotubes de carbone et du graphène dans la conception de **transducteurs** mécaniques ou électroniques destinés à la réalisation de capteurs chimiques ou biochimiques (en gaz ou solution) dédiés à la santé et notamment au diagnostic. Ces matériaux servent alors de canal de conduction d'une résistance électrique simple ou d'un transistor à effet de champ. La faible dimensionnalité de ces matériaux leur confère une sensibilité potentielle extrême à tout changement de leur environnement. Par exemple, celle-ci est inférieure à la partie pour milliard – ppb – dans le cas de **dioxyde d'azote** (NO₂) dans l'air. Néanmoins, il s'agit d'un avantage qui peut se transformer en inconvénient. En effet, la sensibilité de ces composants à une large gamme de stimuli (température, humidité, autres gaz...) nécessite le développement de contre-mesures spécifiques aux applications visées et à leurs cahiers des charges. Les chercheurs de l'Iramis et du Liten travaillent au contournement de ces obstacles pour la réalisation de capteurs de gaz dans le domaine de la détection de traces de gaz toxiques ou d'explosifs.

Parmi les autres avancées réalisées au Leti et au Liten figure également l'intégration des forêts de nanotubes de carbone au sein de deux types de dispositifs. D'abord, en matière de **chromatographie en phase liquide** où ce matériau a permis d'accroître, de plusieurs ordres de grandeur, le pouvoir séparatif du système microfluidique. Il s'agit d'une avancée majeure dans le domaine des laboratoires sur puces (figure 6). La **biocompatibilité** des nanotubes de carbone a rendu possible un deuxième dispositif. Les nanotubes ont ainsi été intégrés dans des **électrodes**



CEA

Figure 5. Nanotubes de carbone dans des vias de 1 µm de diamètre, avec densité record d'environ $5 \cdot 10^{12}$ nanotubes de carbone/cm². Remplissage de l'espace en nanotubes de carbone de 64 % : après synthèse (à gauche) et en fin de procédé (à droite).

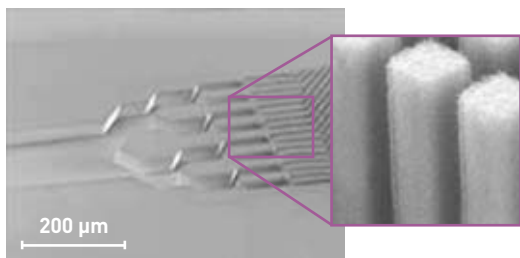
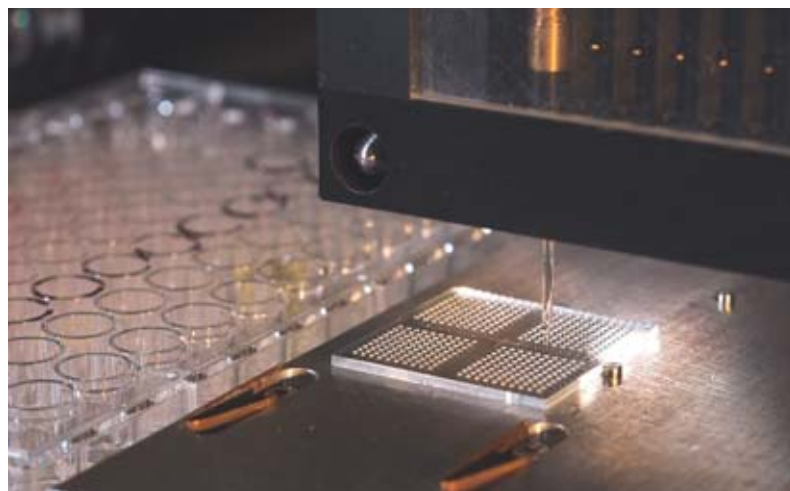


Figure 6. Microcolonne de chromatographie. À gauche, un canal d'entrée divisé en sous-canaux de plus en plus petits, lesquels débouchent sur une série de colonnes (à droite) fonctionnalisées avec des nanotubes en forêt.



Technicien en salle blanche intervenant sur un réacteur chimique dédié à la silanisation collective des wafers silicium ou des lames de verre pour la préparation des puces à ADN ou des laboratoires sur puces.

pour améliorer l'interface entre les neurones et les systèmes d'acquisition de bio-sinaux. Il s'agit d'un élément clé du dispositif utilisé pour le traitement de la maladie de Parkinson par la technique de stimulation cérébrale profonde. Ces relations entre les nanotubes de carbone et les cellules sont étudiées par le CEA en partenariat avec l'Institut des neurosciences de Grenoble (figure 7).



Biopuces pour le projet Canérodop. Les phénopuces permettent de développer une puce à cellules sur laquelle de nombreux phénotypes cellulaires peuvent être enregistrés dans des réactions réalisées en parallèle sur la puce. La nature et le traitement des substrats permettront de placer avec précision les nanogouttes et d'analyser leurs contenus par microscopie (gouttes de 50 nl sur la lame de verre de 4 cm²).

Perspectives

Les quelques exemples développés ci-dessus illustrent les potentialités des matériaux bidimensionnels carbonés ainsi que le savoir-faire du CEA dans la maîtrise de leur intégration. Bien sûr, cette liste d'applications n'est pas exhaustive – par exemple, les matériaux utilisant leurs propriétés mécaniques n'ont pas été évoqués. Aujourd'hui, le développement de produits à base de graphène reste moins avancé que celui des nanotubes de carbone pour lesquels la recherche a commencé une décennie plus tôt. Pourtant, moins de quatre ans après les premières publications sur le graphène, une technologie développée dans le groupe d'Alex Zettl, professeur à l'université de Californie (Berkeley), peut déjà faire l'objet d'un transfert vers l'industrie. Il s'agit de grilles porte échantillon à membrane en graphène, destinées à la microscopie électronique, qui atteignent déjà une résolution atomique d'une qualité inégalée.

Ces exemples démontrent comment, grâce à leur créativité, les chercheurs parviennent à estomper les frontières séparant la recherche fondamentale de la recherche appliquée, en s'interrogeant constructivement.

> **Jean-Christophe P. Gabriel**

Direction du programme transversal
nanosciences
CEA Centre de Grenoble

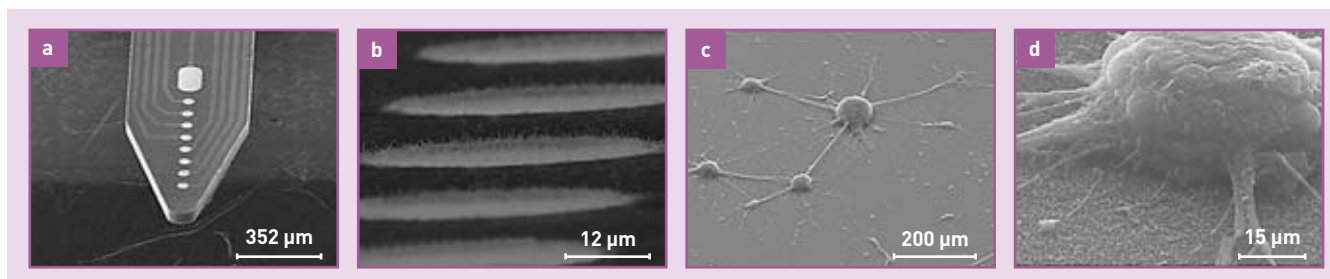


Figure 7. Photographie, en microscopie électronique à balayage, d'une microaiguille nanostructurée en silicium aminci possédant 10 zones de contact électrique circulaires (a) ; détail des zones de contact électrique à nanotubes de carbone (b) ; culture *in vitro* de neurones d'hippocampe à différents grossissements (c et d).