

Du fil de nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone, des cylindres graphitiques de un nanomètre de diamètre, ont été découverts il y a une dizaine d'années. Cette nouvelle forme de carbone pourrait avoir de nombreuses applications dans l'électronique, la robotique, les capteurs chimiques, l'émission d'électrons et le renfort de composites. Un objectif important à l'heure actuelle consiste à assembler les nanotubes sous des formes d'usage pratique, sans faire appel à des hautes températures pouvant les dégrader. La possibilité de disperser ou d'agréger des nanotubes dans des solutions de tensioactifs et de polymères a récemment permis de fabriquer du fil de nanotubes.

Les procédés de mise en forme du carbone impliquent souvent des traitements dans des conditions extrêmes de température. Par exemple, les fibres de carbone classiques sont obtenues par pyrolyse de fibres de polymères en atmosphère inerte. Les composites carbone-carbone utilisés dans l'aéronautique et les freins de forte puissance sont formés à partir de tissus de fibres de carbone qui sont densifiés par vaporisation et pyrolyse d'hydrocarbures à haute température. Les nouvelles formes de carbone, telles que les fullerènes et les nanotubes (encadré 1), ont été observées pour la première fois dans la suie produite par un arc électrique entre des électrodes de carbone. Ici encore, des énergies considérables sont mises en jeu pour rompre et créer des liaisons carbone-carbone. Les nanotubes obtenus dans ces conditions consistent en de longs cylindres graphitiques d'environ un nanomètre de diamètre et de plusieurs microns de long. Ces objets, découverts il y a seulement une dizaine d'années, sont considérés comme des matériaux très prometteurs pour de nombreuses applications. Leur caractère unidimensionnel et la force des liaisons carbone-carbone leur confèrent en effet des propriétés électroniques et mécaniques exceptionnelles.

Selon leur structure, les nanotubes peuvent être semi-conducteurs ou conducteurs et supporter des

densités de courant très importantes, plusieurs ordres de grandeur supérieures à celles admissibles pour le cuivre. Ces propriétés offrent de nouvelles opportunités dans le domaine de l'électronique. Leur conductivité électrique dépend aussi de façon très sensible de l'environnement chimique et de la présence d'espèces adsorbées. Cette particularité, couplée à la grande surface spécifique des nanotubes, permet d'envisager la réalisation de nouveaux capteurs chimiques ou biologiques. Les capacités d'adsorption des nanotubes laissent aussi entrevoir des applications dans le stockage de l'hydrogène.

D'un point de vue mécanique, les nanotubes de carbone figurent parmi les objets les plus résistants connus sur terre. Leur module d'Young est d'environ 1 TPa et leur résistance à la rupture est de l'ordre de 50 GPa. A titre de comparaison, la résistance de matériaux comme le kevlar, l'acier ou les fibres de carbone est inférieure à 5 GPa. Les nanotubes pourraient donc servir à la réalisation de câbles et de tissus résistants ainsi que dans le renfort des composites. Leur conductivité thermique, supérieure à celle du diamant, pourrait être mise à profit dans des composites destinés à évacuer de la chaleur. Enfin, la capacité qu'ont les nanotubes à se déformer par injection de charge permet de rêver à la réalisation d'actionneurs électromécaniques et des muscles artificiels de demain. Théoriquement, les performances de ces actionneurs devraient largement dépasser celles de

technologies actuelles comme les céramiques piézoélectriques, les matériaux magnétostrictifs ou les polymères fonctionnels.

Malheureusement, après leur synthèse, les nanotubes de carbone se présentent sous forme d'une suie peu dense, fragile et isotrope. Pour espérer les utiliser efficacement, il est donc critique de pouvoir transformer cette suie en des formes macroscopiques plus adaptées aux applications envisagées. Il n'est plus question maintenant de rompre ou de créer des liaisons carbone-carbone mais d'assembler les nanotubes sous des formes d'usage plus pratique. Il serait souhaitable de disposer de matériaux plus denses et dans lesquels l'orientation des nanotubes serait contrôlée. En effet, les propriétés exceptionnelles citées plus haut sont fortement anisotropes compte tenu de l'anisotropie intrinsèque des nanotubes. Pour mettre en forme de telles particules, un moyen simple consiste à passer par un état facilement déformable, en l'occurrence une dispersion liquide. Disperser, assembler ou encore orienter des particules en suspension sont en fait des problèmes que l'on rencontre classiquement dans la physico-chimie des suspensions colloïdales. C'est d'ailleurs à partir de telles dispersions qu'une des premières et des plus courantes transformations de suie de nanotubes a été réalisée. En effet, en séchant une dispersion de nanotubes sur une membrane filtre, on obtient une galette de nanotubes plus dense et résistante que la suie

Encadré 1

LES NANOTUBES DE CARBONE

Le carbone, sous ses formes cristallines (graphite et diamant) ou amorphes (noir de carbone, pyrocarbone...), tient une place de choix comme matériau technologique. Citons pour mémoire les propriétés abrasives du diamant, celles, lubrifiantes, du graphite sans oublier les performances des fibres de carbone utilisées dans de nombreuses applications en raison de leurs exceptionnelles propriétés mécaniques.

Deux nouvelles formes du carbone ont été découvertes récemment : les fullerènes en 1985 par une équipe anglo-américaine et les nanotubes en 1991 par une équipe japonaise. Un nanotube est un cylindre graphitique, avec des hexagones, fermé aux deux extrémités par un chapeau de type fullerène, c'est-à-dire contenant des pentagones. Ces cylindres peuvent être longs de plusieurs microns pour un diamètre de l'ordre du nanomètre. Un nanotube constitué d'un seul cylindre graphitique est couramment appelé nanotube monoparoï. Il existe aussi des nanotubes constitués de plusieurs cylindres graphitiques coaxiaux. Ce sont les nanotubes multiparoï.

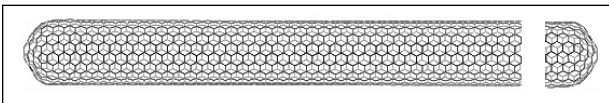


Figure 1 - Représentation schématique d'un nanotube de carbone.

Différentes méthodes de synthèse sont aujourd'hui utilisées pour obtenir des nanotubes. Parmi les principales, nous pouvons citer les techniques de type dépôts chimiques en phase vapeur, la synthèse par arc électrique ou par ablation laser et enfin la décomposition de monoxyde de carbone sous haute pression. Dans le premier cas, un hydrocarbure est décomposé dans des conditions particulières de pression et de température. La synthèse par arc électrique et par ablation laser consiste à fournir une grande énergie à du carbone qui est vaporisé puis recondensé sous forme de nanotubes. Quelle que soit la méthode de synthèse, des nanoparticules métalliques jouant le rôle de catalyseurs sont habituellement nécessaires pour obtenir des nanotubes.

Suivant le détail de leur structure (hélicité, diamètre), les nanotubes peuvent être conducteurs ou semi-conducteurs

électriques. Ces propriétés associées à leur taille permettent d'envisager de nouvelles applications en micro-électronique. La force des liaisons carbone-carbone confère une grande résistance mécanique aux nanotubes de carbone qui pourraient servir au renfort des composites. La longueur des liaisons carbone-carbone peut varier de quelques pour cents lorsque des charges sont injectées dans le nanotube (par exemple en utilisant les nanotubes comme électrode dans une solution d'électrolyte). Cette propriété, déjà connue dans le cas du graphite, devient exploitable avec les nanotubes pour la robotique et la réalisation de muscles artificiels. En effet, lorsque les liaisons entre atomes se contractent ou s'allongent, c'est tout le nanotube ou tout un assemblage de nanotubes qui peut s'allonger et se contracter. Enfin, dans un autre domaine, les nanotubes de carbone ont la géométrie idéale pour servir de pointes émettrices d'électrons. Cette propriété est déjà mise à profit par des grands groupes industriels qui ont réalisé des prototypes d'afficheurs à émission de champ.

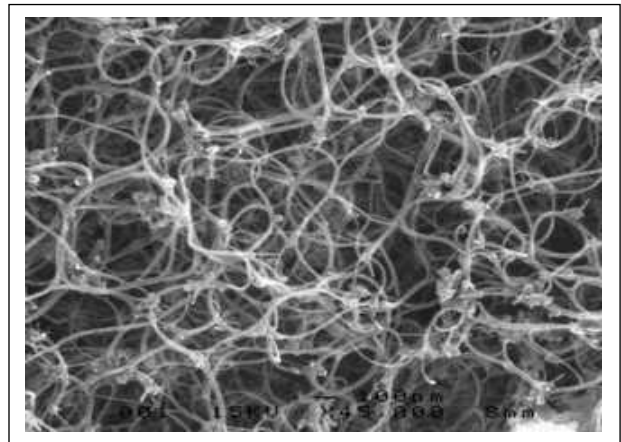


Figure 2 - Photographie en microscopie électronique à balayage de nanotubes de carbone bruts après synthèse. La dimension horizontale de l'image représente 5 microns. Les nanotubes sont clairement visibles car ils sont assemblés sous forme de fagots composés de plusieurs dizaines de nanotubes. Le diamètre de ces fagots varie entre quelques nanomètres et plusieurs dizaines de nanomètres. Ils sont ici enchevêtrés formant un matériau brut très peu dense, fragile et isotrope, c'est-à-dire bien loin d'être optimisé pour les applications auxquelles il pourrait servir.

initiale. Ce matériau est habituellement appelé « papier de nanotubes », par analogie avec le papier traditionnel obtenu en séchant des dispersions de cellulose. Le papier de nanotubes, encore peu dense et essentiellement isotrope, est cependant loin d'être une mise en forme optimale. C'est pourquoi de nombreux laboratoires fournissent à l'heure actuelle de gros efforts pour

optimiser et trouver de nouveaux procédés de mises en forme des nanotubes de carbone. Les chercheurs de l'université de Rice au Texas ont récemment montré qu'il était possible de réaliser des papiers de nanotubes orientés en séchant des suspensions sous de forts champs magnétiques de plusieurs Tesla. Des nanotubes ont aussi été orientés et assemblés à l'université de Floride

sous forme de fibres, longues de quelques centimètres, en utilisant une méthode électrophorétique. Les degrés d'orientation obtenus sont prometteurs mais le procédé est malheureusement trop lent pour espérer des développements importants à l'heure actuelle. Même si ces procédés sont encore relativement pointus, ils constituent des progrès très encourageants pour l'optimi-

sation et la caractérisation des propriétés des nanotubes.

Nous avons récemment proposé un procédé particulièrement simple qui permet de réaliser du fil de nanotubes orientés. Il consiste à filer continûment des nanotubes en les coagulant dans une solution en écoulement. Les nanotubes sont initialement dispersés dans une solution aqueuse puis injectés dans l'écoulement de la solution coagulante. Au contact de cette dernière, les nanotubes se collent les uns aux autres pour former un ruban ou un fil qui est entraîné dans l'écoulement. La dispersion initiale et la coagulation, étapes clés du procédé, sont contrôlées par l'utilisation d'agents amphiphiles adsorbés sur les nanotubes. Ces espèces amphiphiles, des tensioactifs ou des polymères, permettent de rendre les interactions entre nanotubes répulsives ou attractives. Les premiers fils de nanotubes obtenus par ce procédé sont plus denses, plus facilement manipulables et déjà dix à 30 fois plus résistants que les meilleurs papiers de nanotubes. De plus, le procédé utilisé est suffisamment simple pour être amélioré sous de nombreux aspects et adapté à des productions continues à des vitesses de plusieurs dizaines de mètres par minute. Nous décrivons dans cet article les étapes clés du procédé qui font appel à des concepts classiques de physico-chimie des fluides complexes et des milieux dispersés.

Comme pour la synthèse du papier de nanotubes, la première étape du procédé consiste à disperser les nanotubes dans un solvant. L'eau est choisie comme solvant privilégié. Les nanotubes de nature hydrophobe y sont dispersés à l'aide de tensioactifs qui s'adsorbent sur les nanotubes. Les têtes polaires des tensioactifs permettent d'engendrer des interactions répulsives qui s'opposent aux interactions attractives de van der Waals entre les nanotubes qui peuvent ainsi être stabilisés en suspension. Des tensioactifs ioniques, dont la tête polaire chargée in-

duit des répulsions de nature électrostatique entre les nanotubes, ont été préférentiellement utilisés. Par analogie avec les suspensions de latex ou les émulsions de gouttelettes d'huile dans l'eau rencontrées dans les peintures, la cosmétique et l'agroalimentaire par exemple, la nature et la concentration des tensioactifs utilisés jouent un rôle critique sur le comportement de la suspension. Cette dernière doit être très homogène et relativement concentrée pour que les nanotubes puissent être filés. A trop basse concentration en tensioactif, les nanotubes ne se dispersent pas correctement car il n'y a pas suffisamment de tensioactifs pour compenser efficacement les attractions de van der Waals. A haute concentration en tensioactif, les nanotubes ne sont pas correctement stabilisés non plus. Ils s'agrègent du fait de faibles interactions attractives connues sous le nom d'interactions de déplétion (encadré 2). Il existe donc un domaine relativement étroit de conditions dans lequel on peut obtenir des suspensions concentrées et homogènes.

Si certains tensioactifs permettent de générer des répulsions, d'autres espèces amphiphiles comme les polymères adsorbants permettent au contraire de produire de très fortes attractions entre nanotubes. Lorsqu'une chaîne de polymères est adsorbée sur deux ou plusieurs nano-

tubes, elle les relie en produisant un phénomène de « pontage » (encadré 2). Ce type de coagulation est bien connu dans les technologies des milieux dispersés et largement employé pour la floculation de particules en suspension dans le traitement des eaux usées. Lorsque des nanotubes, initialement dispersés par des tensioactifs, rentrent en contact avec une solution de polymères adsorbants, ils s'agrègent très rapidement car les polymères déplacent partiellement les tensioactifs aux interfaces des nanotubes.

L'utilisation de tensioactifs ou de polymères permet donc de contrôler les interactions entre nanotubes en suspension. A partir de là, il devient possible d'imaginer différentes mises en forme des nanotubes. Les fils ou les fibres notamment constituent des formes d'usage très pratique pour de nombreuses applications et la réalisation de dispositifs ou de composites. De plus, quelle que soit la mise en forme choisie, il est souhaitable de pouvoir orienter les nanotubes pour mieux exploiter leurs propriétés physiques.

En injectant la solution de nanotubes dans l'écoulement d'une solution de polymères adsorbants, il est possible de réaliser un fil et d'orienter préférentiellement les nanotubes le long du fil, comme schématisé sur la figure 1.

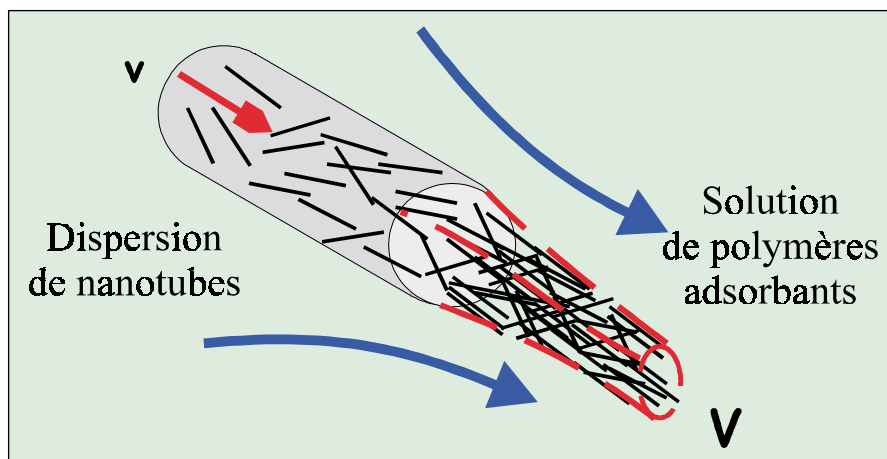


Figure 1 - Principe de filage des nanotubes de carbone. Une dispersion homogène de nanotubes est injectée dans l'écoulement d'une solution de polymères adsorbants. Ces derniers entraînent la coagulation des nanotubes en sortie de filière. La vitesse V de la solution coagulante étant plus grande que la vitesse v de la dispersion, les nanotubes tendent à s'orienter dans le sens de la vitesse d'écoulement.

Encadré 2

STABILISATION COLLOÏDALE PAR DES AGENTS TENSIOACTIFS ET PONTAGE DE PARTICULES EN SUSPENSION

Des particules colloïdales hydrophobes ou des gouttelettes d'émulsions d'huile dans l'eau peuvent être dispersées à l'aide de tensioactifs, des molécules amphiphiles (ayant une partie hydrophile et une partie hydrophobe) qui s'adsorbent aux interfaces des particules. Ces tensioactifs, s'ils sont en quantité suffisante, permettent de générer des répulsions qui s'opposent aux interactions attractives de van der Waals. A haute concentration cependant, les tensioactifs forment des agrégats, le plus souvent sphériques, appelés micelles. Les micelles de tensioactifs usuels mesurent quelques nanomètres. Elles peuvent créer des interactions faibles, connues sous le nom d'interactions de déplétion. Ce type d'interaction peut être compris intuitivement en considérant le volume exclu des micelles autour de chaque particule colloïdale. Ce volume correspond à la région dans laquelle le centre de gravité des micelles ne peut pas pénétrer. Si les particules et les micelles interagissent par des interactions de type cœur dur, c'est-à-dire qu'elles ne s'interpénètrent pas, le volume exclu est défini par une « couronne » dont l'épaisseur est le rayon des micelles. Le volume exclu limite

l'espace accessible aux micelles et a pour effet de diminuer l'entropie du système. Lorsque ces particules s'approchent d'une distance inférieure au diamètre d'une micelle, il y a un recouvrement des zones de volume exclu. Ainsi le volume exclu total des micelles, et par conséquent l'énergie libre du système, diminuent lorsque les particules s'approchent. Cet effet purement entropique entraîne une attraction effective entre les particules colloïdales. Il est d'autant plus prononcé que la concentration en micelles, et donc en tensioactifs, est grande. L'interaction attractive de déplétion peut être suffisamment forte pour provoquer l'agglomération des particules. Dans ce cas, le tensioactif ne joue plus le rôle attendu de stabilisation. C'est pourquoi il est critique de contrôler précisément les concentrations de tensioactifs lorsque l'on souhaite stabiliser des particules par ce genre de méthode. Ces comportements sont connus et bien identifiés depuis de nombreuses années dans les milieux dispersés traditionnels. Ils sont observés de la même façon dans les suspensions de nanotubes stabilisés dans l'eau par des tensioactifs.

Une chaîne de polymères s'adsorbant sur au moins deux particules colloïdales lie mécaniquement les particules. Ce phénomène, dit de pontage, est couramment utilisé dans l'industrie du traitement des eaux usées. Il permet en effet d'agglomérer, ou de flocculer, des particules en suspension pour les récupérer plus facilement. L'ajout de polymère adsorbant à des suspensions de nanotubes de carbone conduit au même phénomène, c'est-à-dire à leur agglomération.

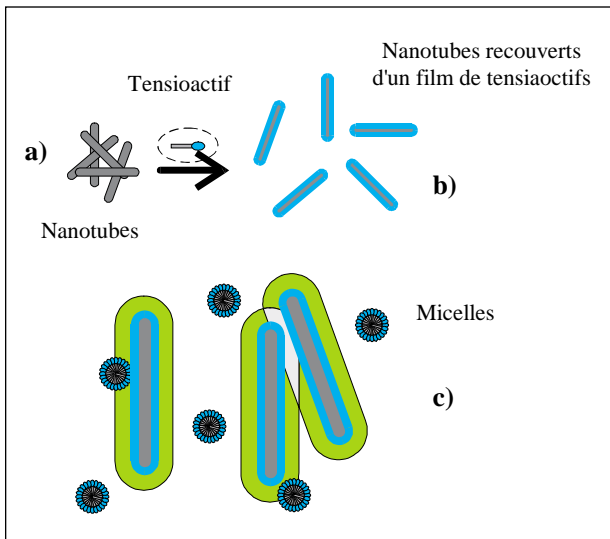


Figure 1 - a) Les nanotubes de carbone, schématisés par les bâtonnets gris, sont de nature hydrophobe. b) Ils peuvent être dispersés dans l'eau grâce à des molécules tensioactives qui s'adsorbent et rendent les interfaces hydrophiles (représentées en bleu). c) Les tensioactifs s'agrègent en solution pour former des agrégats appelés micelles. Pour des raisons stériques, le centre des micelles ne peut s'approcher de la paroi d'un nanotube d'une distance inférieure au rayon d'une micelle. Cela définit un volume exclu (en vert) autour des nanotubes. A haute concentration, les micelles engendrent des interactions attractives entre les nanotubes du fait du recouvrement (noté en blanc) du volume exclu des micelles autour des nanotubes.

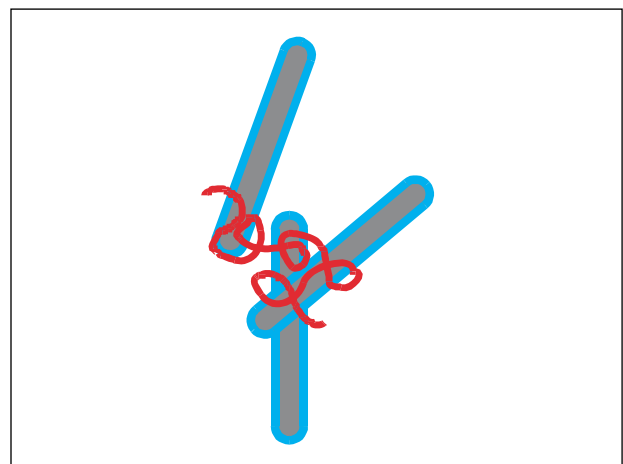


Figure 2 - Phénomène de pontage. Les nanotubes de carbone peuvent être assemblés par coagulation en utilisant des polymères qui s'adsorbent sur deux ou plusieurs nanotubes. La chaîne de polymères est ici représentée en rouge.

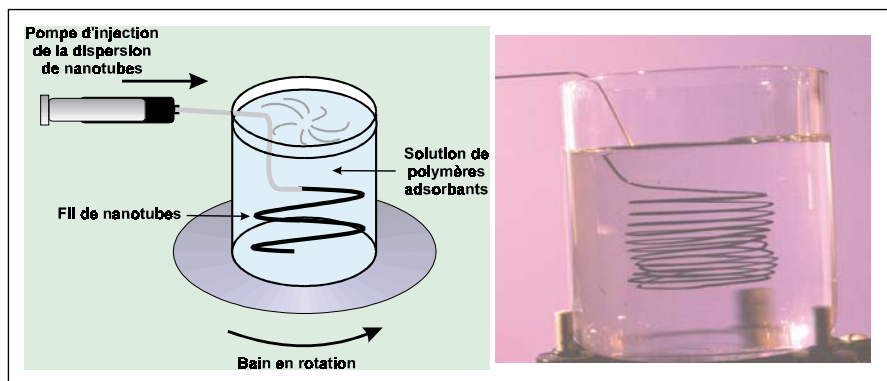


Figure 2 - Le schéma de gauche représente un montage très simple de filage de nanotubes. La photographie de droite illustre une réalisation expérimentale à l'échelle de la paillasse de laboratoire. Le diamètre de la spirale de fil de nanotubes est de l'ordre de 5 centimètres.

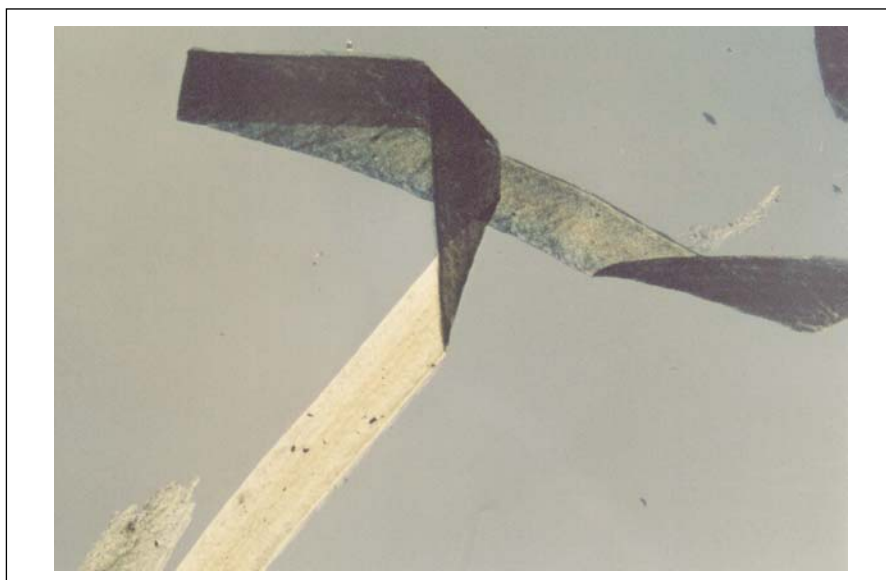


Figure 3 - Fil de nanotubes de carbone observé en microscopie polarisée. Les différences d'intensité lumineuse en fonction de l'inclinaison des segments de fil reflètent l'orientation préférentielle des nanotubes le long de l'axe du fil. La largeur du fil est d'environ 0,4 mm.

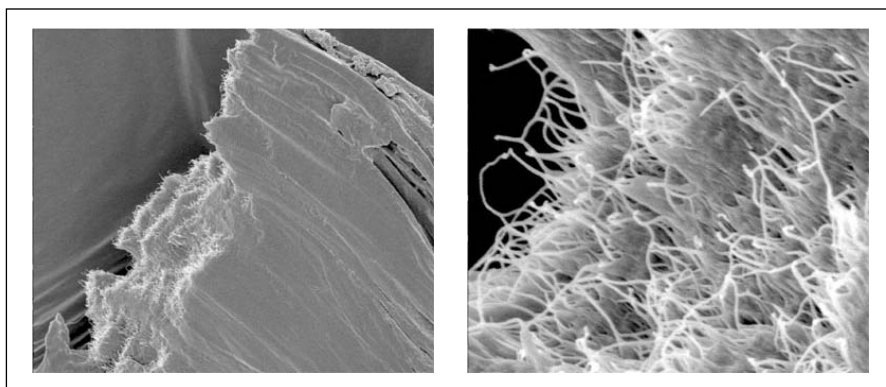


Figure 4 - Photographies de microscopie électronique à balayage d'une section de fil de nanotubes. La dimension horizontale des images est de 10 microns pour l'image de gauche et de 1 micron pour l'image de droite.

La coagulation des nanotubes assure le maintien du fil et les écoulements mis en jeu génèrent l'orientation préférentielle des nanotubes.

C'est principalement le cisaillement élongationnel de l'écoulement, c'est-à-dire la présence de gradients de vitesse parallèles à l'écoulement, qui

permet dans ce procédé d'orienter les nanotubes. Un montage simple permettant de réaliser jusqu'à un mètre de fil sur une paillasse de laboratoire est schématisé dans la figure 2. Le dispositif est constitué d'un tube d'injection placé dans un bain en rotation et contenant la solution de polymères. La dispersion initiale de nanotubes est injectée régulièrement par le tube dont le diamètre mesure typiquement moins d'un millimètre. Au contact de la solution de polymères, les nanotubes s'agrègent par pontage et forment un fil entraîné dans le bain en rotation. En variant les débits d'injection et la vitesse de rotation du bain, il est possible d'engendrer des gradients de vitesse d'écoulement plus ou moins importants à la sortie du tube. Cette méthode particulièrement simple est, à notre connaissance, la seule permettant d'orienter les nanotubes continûment sur des distances macroscopiques.

La figure 3 est une photographie de microscopie optique en lumière polarisée d'un ruban obtenu par ce type de montage. Les nanotubes utilisés sont des nanotubes monoparois. Les différences d'intensité lumineuse en fonction de l'orientation des segments du ruban attestent de l'orientation préférentielle des nanotubes le long du ruban.

La concentration de nanotubes dans ces premiers fils ou rubans est relativement faible, proche de la concentration de la dispersion initiale, c'est-à-dire typiquement de l'ordre du pour cent. Afin d'obtenir un matériau plus dense et plus résistant, le fil ou ruban peut être extrait de l'eau. Les forces capillaires, le drainage et l'évaporation de l'eau entraînent la compaction du fil en une fibre plus dense et très fine dont le diamètre peut varier selon les conditions utilisées de quelques microns à plus de 100 microns. Les espèces organiques comme les tensioactifs ou les polymères résiduels peuvent être simplement éliminées par des lavages ou des recuits ther-

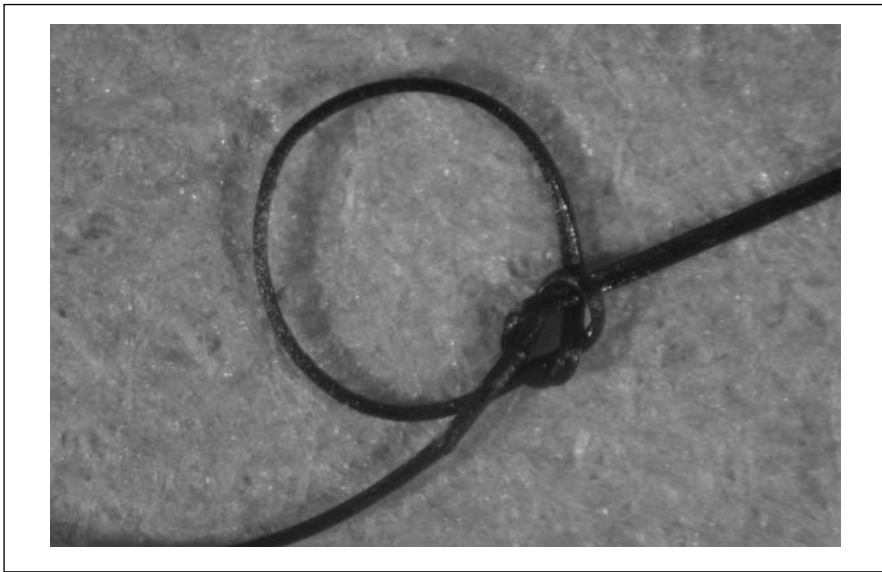


Figure 5 - Nœud réalisé avec un fil de nanotubes de carbone. Le diamètre du fil est d'environ 30 microns.

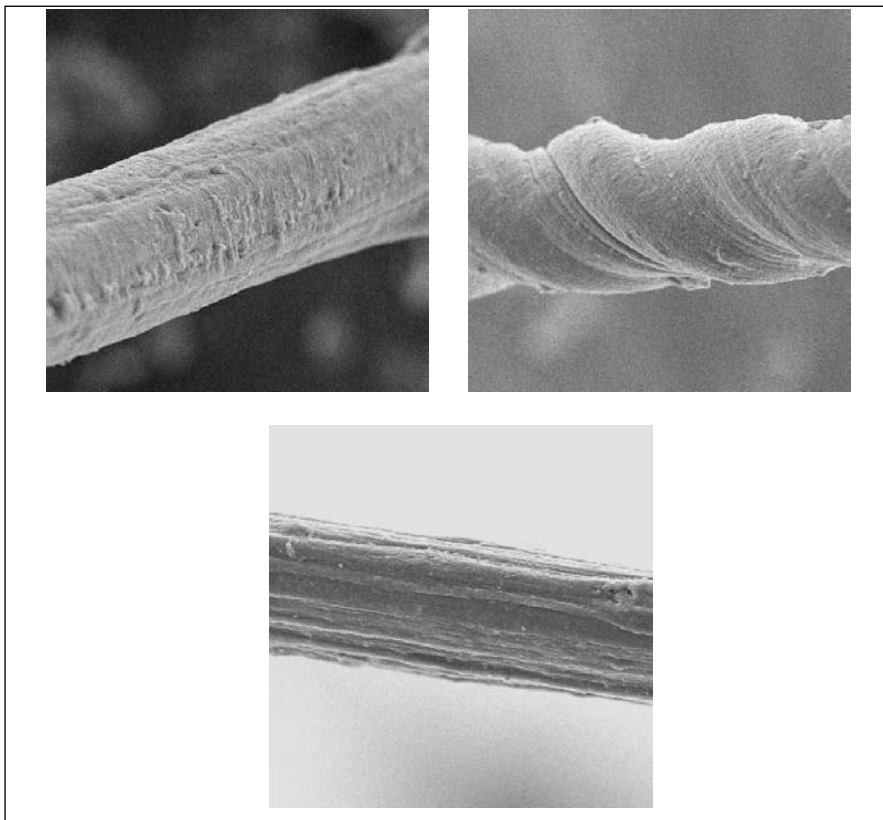


Figure 6 - Photographies de microscopie électronique à balayage de fils de nanotubes. De gauche à droite : fil brut, fil torsadé et fil étiré. Dans chaque cas, le diamètre du fil est d'environ 30 microns.

miques. Un fil de nanotubes observé en microscopie électronique à balayage est montré sur la figure 4.

L'orientation préférentielle des nanotubes dans ces fils a été montrée par des expériences de diffraction de rayons X. La souplesse des fils et

leur facilité d'utilisation sont illustrées figure 5, qui montre une fibre nouée.

Les modules d'Young des fils réalisés jusqu'à présent sont de quelques dizaines de GPa et leur résistance à la rupture ne dépasse pas

300 MPa. Ces performances sont loin des performances des nanotubes individuels, mais elles sont déjà supérieures d'un ordre de grandeur à celles des meilleurs papiers de nanotubes réalisés à ce jour. Dans les systèmes lavés et recuits, ce sont principalement les liaisons de van der Waals et les contacts entre tubes qui assurent la cohésion de la fibre. La meilleure résistance du fil par rapport au papier provient certainement d'un meilleur alignement des nanotubes ainsi que d'une plus grande densité. Des tests récents ont montré que les fibres de nanotubes présentaient aussi des propriétés très encourageantes pour la robotique et les muscles artificiels. Les chercheurs d'Honeywell aux États-Unis ont montré, il y a 2 ans, que de très bons papiers de nanotubes pouvaient s'allonger et se contracter par injection de charge lorsque le papier est soumis à un potentiel particulièrement bas, de l'ordre du volt, dans une solution salée. L'amplitude attendue des déformations est plus grande que dans le cas des cristaux piézoélectriques et les temps de réponse beaucoup plus courts que ceux des polymères fonctionnels. Un autre avantage des actionneurs de nanotubes est qu'ils peuvent fonctionner à très haute température, dans des sels fondus par exemple, contrairement à la plupart des technologies concurrentes. Les forces mesurées expérimentalement sur des papiers de nanotubes sont déjà deux fois supérieures aux forces produites par un muscle humain de même masse. Le fil de nanotubes, entre dix et 30 fois plus résistant que les meilleurs papiers, se positionne donc comme un matériau très compétitif pour la réalisation de dispositifs électromécaniques, la robotique et des applications biomédicales. Des forces 50 fois supérieures à celles d'un muscle humain de masse équivalente ont été récemment mesurées.

D'autres propriétés du fil que nous avons produit au laboratoire, comme les propriétés de transport de

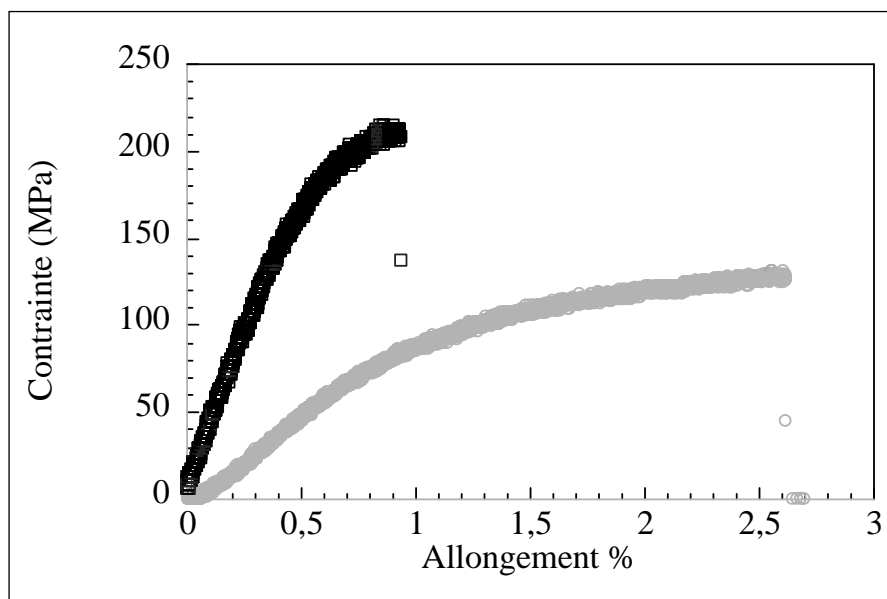


Figure 7 - Test de traction mécanique sur des fils de nanotubes de carbone. La courbe noire montre la contrainte et l'allongement correspondant sur un fil brut de nanotubes de carbone. Le module d'Young déduit du comportement linéaire aux faibles déformations est d'environ 10 GPa. Le seuil de rupture intervient pour un allongement de 2,5% et une contrainte de 130 MPa. Des traitements préalables de la fibre, et notamment des étirements en présence de polymères, permettent d'améliorer la résistance mécanique du fil. La courbe grise correspond aux propriétés d'un fil préalablement étiré. Le module d'Young est d'environ 38 GPa et la contrainte à la rupture supérieure à 200 MPa.

chaleur et d'électricité, sont actuellement à l'étude. Le procédé de filage très simple est lui en cours d'optimisation pour améliorer les performances du fil et augmenter le taux de production. A l'heure actuelle, il faut environ une heure pour filer un kilomètre de fil, sans compter le temps de séchage. Ce taux est largement suffisant pour des tests de laboratoire mais trop lent pour une exploitation industrielle à grande échelle. Différents traitements ther-

miques, chimiques et mécaniques sont aussi en cours d'étude dans plusieurs laboratoires pour optimiser les propriétés du fil de nanotubes. Nous savons par exemple que les torsions et tractions mécaniques permettent de modifier les structures, mais aussi les propriétés du fil de nanotubes, comme illustré sur les figures 6 et 7.

Les nombreux travaux en cours aboutiront très certainement à des matériaux potentiellement utiles

dans divers domaines d'applications. Il restera cependant un obstacle important à contourner avant de voir un jour le fil de nanotube dans des applications courantes. En effet, les nanotubes sont des objets difficiles à synthétiser et toujours relativement chers, coûtant plusieurs centaines de francs le gramme. Il est donc crucial de développer des procédés de synthèse plus performants et plus rapides pour que les taux de production dépassent les quelques grammes obtenus quotidiennement dans les laboratoires de recherche. Des progrès importants sont régulièrement réalisés et nous pouvons être optimistes même si le but final est encore loin.

POUR EN SAVOIR PLUS

Saito (R.), Dresselhaus (G.) et Dresselhaus (M.S.), « Physical Properties of Carbon Nanotubes », *Imperial College Press*, 1998.

Journet (C.) et al., *Nature* **388**, 756, 1997.

Baughman (R.H.) et al., *Science* **284**, 1340, 1999.

Vigolo (B.) et al., *Science* **290**, 1331, 2000.

Launois (P.), Marucci (A.), Vigolo (B.), Bernier (P.), Derré (A.) et Poulin (P.), *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* **1**, 125, 2001.

Article proposé par :

Brigitte Vigolo, tél. 05 56 84 56 36, vigolo@crpp.u-bordeaux.fr

Philippe Poulin, tél. 05 56 84 56 22, poulin@crpp.u-bordeaux.fr

Ces résultats ont été obtenus en collaboration avec les groupes de Patrick Bernier au Groupe de dynamique des phases condensées, Montpellier, et de Pascale Launois au Laboratoire de physique des solides d'Orsay.