

Fibres de nanotubes de carbone

Intelligentes, musclées et sensibles

Philippe Poulin

Résumé

Il est bien établi aujourd'hui que les nanotubes de carbone présentent des propriétés physiques et chimiques remarquables. Des progrès considérables ont été effectués au niveau de leur synthèse, au point qu'aujourd'hui certains grands groupes industriels de chimie envisagent leur production en masse. Cependant, l'exploitation de leurs propriétés à une échelle macroscopique reste un verrou technologique pour certaines applications pourtant très attrayantes. Parmi celles-ci, nous pouvons citer les matériaux à hautes performances mécaniques, les microcapteurs pour des applications biologiques ou encore les actionneurs électromécaniques pour des applications robotiques ou médicales. Après synthèse, les nanotubes se présentent le plus souvent sous forme d'une suie légère et désorganisée, inutilisable directement. Selon les applications visées, les nanotubes doivent être dispersés dans une matrice, assemblés ou encore orientés pour exploiter une propriété donnée. Nous décrivons ici les travaux que nous menons au Centre de Recherche Paul Pascal sur ce thème en utilisant des concepts classiques de physico-chimie des fluides complexes pour optimiser des dispersions et des assemblages de nanotubes de carbone. Nous décrivons notamment un procédé simple de filage des nanotubes de carbone permettant de fabriquer de façon continue des structures macroscopiques de nanotubes orientés. Nous discutons les propriétés mécaniques, électromécaniques et électrochimiques des fibres de nanotubes en concluant qu'elles constituent une mise en forme prometteuse pour une exploitation efficace des propriétés des nanotubes de carbone.

Mots-clés

Nanotubes, carbone, fibres, composites, actionneurs.

Abstract

Carbon nanotube fibers: smart, strong and sensitive

It is today well established that carbon nanotubes exhibit remarkable chemical and physical properties. Significant progresses have been achieved at the level of their synthesis, and major industrial chemistry companies are planning their mass production in a near future. Nevertheless, the exploitation of nanotube properties remains a challenge for appealing technologies and applications. Among them, one can cite high-performances materials, micro-sensors for biological applications or electromechanical actuators for robotic and medical technologies. As synthesized nanotubes are under the form of a light and disordered soot. Depending on the targeted applications, carbon nanotubes have to be dispersed in a matrix, assembled or macroscopically oriented in order to efficiently exploit a given property. We describe here studies we conduct in this field at the Centre de Recherche Paul Pascal. We mainly use classical concepts of physical-chemistry of complex fluids to optimize dispersions and assemblies of carbon nanotubes. A particular emphasis is given to a simple wet-spinning process we have developed to produce continuous fibers of oriented nanotubes. We discuss the mechanical, electrochemical and electromechanical properties of the obtained fibers. We draw the conclusion that carbon nanotube fibers are particularly promising materials to efficiently exploit the properties of carbon nanotubes.

Keywords

Nanotubes, carbon, fibers, composites, actuators.

Les nanotubes de carbone, des cylindres graphitiques nanométriques découverts il y a une douzaine d'année, sont considérés comme des matériaux très prometteurs pour de nombreuses applications [1-2].

Leur caractère unidimensionnel, illustré sur la *figure 1*, et la force des liaisons carbone-carbone leur confèrent en effet des propriétés électroniques et mécaniques exceptionnelles.

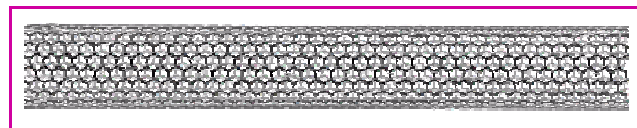


Figure 1 - Structure d'un nanotube de carbone.

Selon leur structure, les nanotubes peuvent être semi-conducteurs ou conducteurs. Ces propriétés offrent de nouvelles opportunités dans le domaine de l'électronique. D'un point de vue mécanique, les nanotubes de carbone figurent parmi les objets les plus résistants connus. 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 la chaleur. Enfin, la capacité qu'ont les nanotubes à se déformer par

injection de charge permet d'envisager la réalisation de futurs actionneurs électromécaniques et muscles artificiels. Théoriquement, les performances de ces actionneurs devraient largement dépasser celles de technologies actuelles comme celles des céramiques piézoélectriques ou des polymères fonctionnels [3]. Plus simplement, les nanotubes fortement anisotropes peuvent servir de charges conductrices dans des composites et former des réseaux conducteurs percolés à des concentrations particulièrement basses. Ceci ouvre potentiellement l'immense marché des matériaux antistatiques et du blindage électromagnétique aux nanotubes de carbone.

Les nanotubes de carbone, bien qu'ayant des propriétés remarquables, restent encore des curiosités de laboratoire. Cependant, des progrès considérables ont été effectués ces dernières années, à tel point que la production en masse paraît aujourd'hui réaliste. Certains grands groupes industriels envisagent très sérieusement la production de nanotubes de carbone à des prix inférieurs à 10 €/kg avant 2010. Aux prix visés, il ne fait pas de doute que les nanotubes pourront devenir commercialement viables et conduire à de véritables révolutions technologiques dans certains domaines.

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 critique dans de nombreux cas de pouvoir transformer cette suie en des formes macroscopiques plus adaptées aux applications envisagées. Il serait souvent souhaitable de disposer de matériaux plus denses et dans lesquels l'orientation des nanotubes serait contrôlée. En effet, les propriétés 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 sur ces aspects que nous focalisons nos travaux au Centre de Recherche Paul Pascal, laboratoire où la physico-chimie des milieux dispersés est développée depuis de nombreuses années dans des domaines divers. Depuis 1998, nous nous intéressons aux diagrammes de phases de dispersions de nanotubes, à la recherche de dispersants adaptés, à la caractérisation des nanotubes en dispersions, ainsi qu'à leurs modifications chimiques. En 2000, nous avons proposé un procédé de filage particulièrement simple qui permet de réaliser du fil de nanotubes orientés [4]. Ce procédé consiste à filer continûment des nanotubes en les coagulant dans une solution de polymère en écoulement. 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. Nous discutons aussi les propriétés des fibres qui, bien qu'encore loin d'être optimales, sont déjà prometteuses pour leur ténacité mécanique ainsi que les applications électromécaniques et électrochimiques. Nous avons même la satisfaction de voir notre procédé repris par certains autres groupes qui ont obtenu des résultats spectaculaires, comme l'équipe de R. Baughman à l'Université de Dallas qui a pu réaliser en 2003 des fibres dont la ténacité est quatre fois supérieure au fil d'araignée (matériau réputé pour sa ténacité exceptionnelle) [5]. Ceci représente une ténacité 15 fois supérieure à celles de matériaux synthétiques comme le Kevlar, fibres

justement exploitées industriellement aujourd'hui pour leur ténacité déjà remarquable.

Filage et dispersions de nanotubes de carbone

La première étape du procédé de filage que nous avons proposé 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, comme schématisé sur la *figure 2*. 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 induit 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 [4].

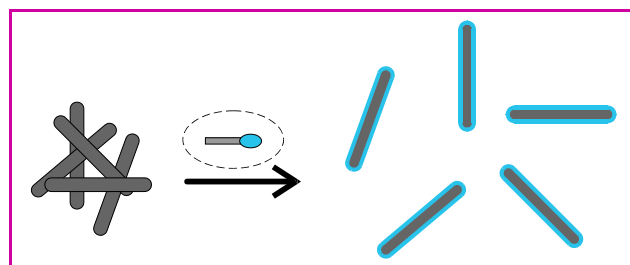


Figure 2 - Stabilisation des nanotubes de carbone dans l'eau par des molécules tensioactives qui s'adsorbent à l'interface des nanotubes.

Il existe donc un domaine relativement étroit de conditions dans lequel on peut obtenir des suspensions concentrées et homogènes. Un autre facteur est à prendre en compte dans la réalisation de dispersions de nanotubes : il est nécessaire d'apporter de l'énergie mécanique sous forme d'ultrasons ou de haut cisaillement *via* des homogénéisateurs adaptés. L'énergie mécanique apportée est critique car elle peut affecter la longueur et le diamètre des nanotubes. Nous avons récemment étudié cet effet par des expériences de diffusion de lumière [6]. Nous avons pu notamment montrer que des ultrasons de fortes puissances appliqués sur de longues périodes favorisent la dispersion des nanotubes mais ont tendance à les couper. Au final, les propriétés des matériaux réalisés peuvent être très différentes.

Si certains tensioactifs permettent de générer des répulsions, d'autres espèces amphiphiles comme les polymères adsorbants permettent au contraire de produire de très

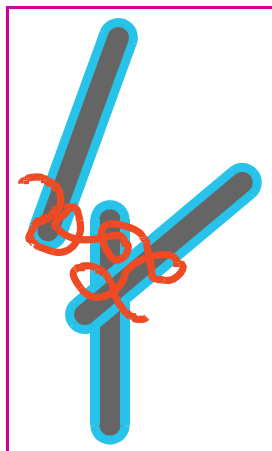


Figure 3 - Phénomène de pontage : adsorption d'une chaîne de polymère adsorbant sur des nanotubes de carbone couverts de tensioactifs. La forte adsorption du polymère permet la coagulation des nanotubes entre eux.

fortes attractions entre nanotubes. Lorsqu'une chaîne de polymère est adsorbée sur deux ou plusieurs nanotubes, elle les relie en produisant un phénomène connu sous le nom de « pontage » [4], comme schématisé sur la *figure 3*. 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 s'associent avec ou 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 fibres constituent des formes d'usage très pratique pour de nombreuses applications et la réalisation de dispositifs, de textiles ou de composites. De plus, comme dans le cas de certains polymères, elles permettent d'orienter les nanotubes et donc d'optimiser l'exploitation des propriétés des nanotubes qui sont fortement anisotropes.

La méthode de filage que nous avons proposée consiste à injecter une dispersion homogène de nanotubes dans l'écoulement d'une solution de polymères adsorbants. Il est ainsi possible de réaliser un fil et d'orienter préférentiellement les nanotubes le long de ce fil, selon le principe schématisé sur la *figure 4*.

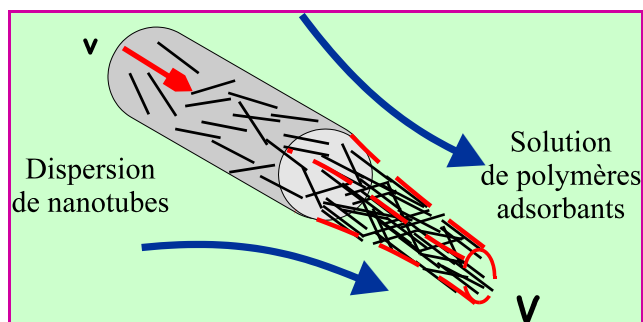


Figure 4 - Principe de filage des nanotubes de carbone.

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.

La *figure 5* représente une photographie d'une bobine et celle d'une fibre nouée obtenue par ce type de filage. Le diamètre des fils peut varier de quelques microns à plus de cent microns selon les conditions utilisées. Un fil de nanotubes observé en microscopie électronique à balayage est montré sur la *figure 6*.

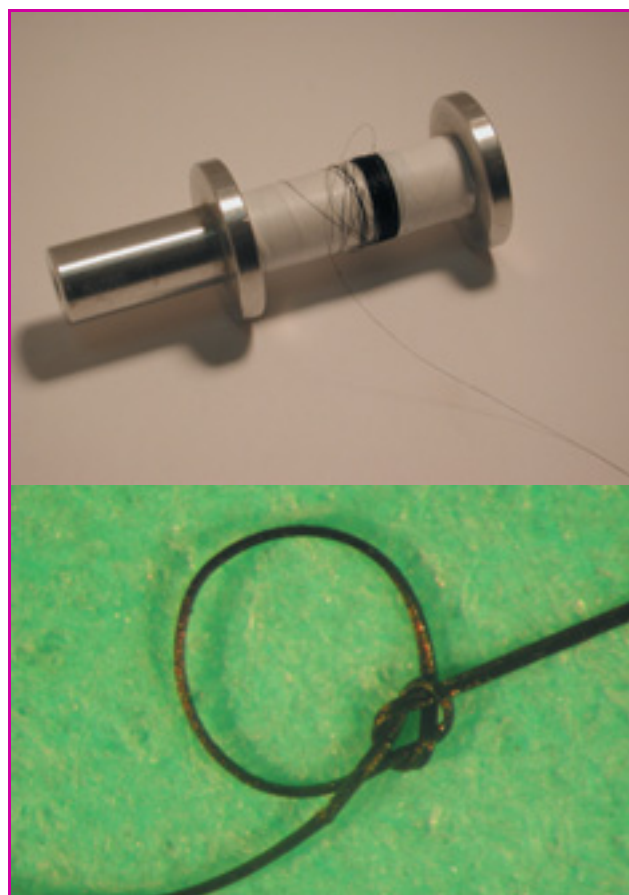


Figure 5 - Bobine et nœud réalisés avec un fil de nanotubes de carbone. Le diamètre du fil est d'environ 30 microns.

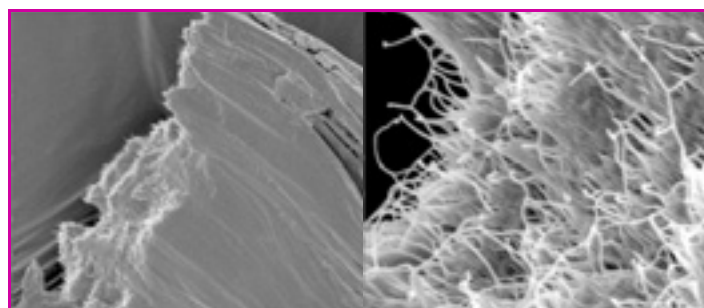


Figure 6 - Photographies de microscopie électronique à balayage d'une section de fil de nanotubes.

Dimension horizontale des images : à gauche, 10 microns et à droite, 1 micron.

Pascale Launois et ses collaborateurs au Laboratoire de physique des solides d'Orsay ont montré l'orientation préférentielle des nanotubes dans ces fils par des expériences de diffraction de rayons X [7-8]. Éric Anglaret et ses collaborateurs ont aussi confirmé l'alignement des nanotubes dans les fibres par spectroscopie Raman polarisée [9].

Traitements et propriétés de fibres de nanotubes

Les fibres brutes en sortie de filage présentent des propriétés structurales, mécaniques et électriques trop modestes pour rendre ces matériaux intéressants sur un plan

technologique. L'alignement des nanotubes est certes intéressant pour certaines études fondamentales, mais il n'est pas suffisant pour atteindre les hautes performances en principe attendues avec les nanotubes de carbone. La désorientation moyenne des nanotubes par rapport à l'axe de la fibre est d'environ $\pm 30^\circ$ pour une fibre brute. Or le module élastique ne commence à devenir fortement amélioré que sous la barre des $\pm 10^\circ$ [10]. Il est même nécessaire de viser des désorientations inférieures à $\pm 5^\circ$ pour espérer réaliser des fibres dont les modules élastiques égaleront celui des fibres haut module aujourd'hui développées industriellement avec les fibres de carbone traditionnelles. Cet objectif n'est donc pas forcément très attrayant dans la mesure où les meilleurs modules ne dépasseront pas, ou très faiblement et au prix de gros efforts, des modules de fibres déjà produites industriellement.

Cependant, nous verrons plus loin que le module élastique n'est pas la seule caractéristique mécanique à considérer dans l'utilisation des fibres hautes performances. La ténacité, c'est-à-dire l'énergie nécessaire pour rompre une fibre, est une propriété très importante pour les fibres destinées à absorber de l'énergie et à résister à des impacts (gilets pare-balles, ceintures de sécurité, vêtements de protection...). La ténacité des fibres de nanotubes de carbone est déjà très prometteuse mais demeure aussi une propriété qui doit être encore largement améliorable avec l'orientation des nanotubes de carbone.

De même, les propriétés de conduction électrique ou thermique doivent aussi être améliorées avec l'alignement des nanotubes. Des traitements des fibres post-filage sont donc recherchés pour contrôler et optimiser ce facteur d'importance primordiale. La présence d'espèces organiques limite la porosité et la conductivité électrique des fibres, d'autres propriétés critiques pour réaliser des électrodes ou des actionneurs électromécaniques performants. Il est donc nécessaire ici aussi de rechercher des traitements permettant d'améliorer l'orientation des nanotubes et de contrôler le taux d'espèces organiques, voire de les éliminer tout en préservant une bonne tenue mécanique. Nous décrivons brièvement ci-après les principaux traitements sur lesquels nous travaillons.

Traitements chimiques

Le premier traitement et le plus simple qui puisse être réalisé consiste à laver les fibres dans l'eau pure pour réduire la proportion de polymère. Typiquement, par de simples lavages à l'eau pure, nous pouvons passer de fibres contenant 80 % de polymère en masse à des fibres n'en contenant que 40 %. Des lavages dans des bains chimiques dégradant le polymère permettent de diminuer encore ce taux jusqu'à environ 20 %. Les propriétés résultantes sont fortement affectées. Plus la quantité de polymère diminue et plus le module des fibres augmente, mais leur souplesse et leur seuil d'élongation à la rupture diminuent. La conductivité électrique varie fortement et est améliorée de presque deux ordres de grandeurs en passant de 80 % à 20 % de polymère.

Traitements thermiques et propriétés électrochimiques

Des recuits thermiques à haute température en atmosphère inerte permettent d'éliminer le polymère de façon quasi totale sans affecter les nanotubes de carbone. Les

fibres résultantes sont composées exclusivement de nanotubes de carbone tenus entre eux par des liaisons de van der Waals et des enchevêtrements. Ces fibres présentent une haute conductivité électrique, pouvant monter à 10^4 S/cm, associée à une grande porosité ($200 \text{ m}^2/\text{g}$). Ces deux propriétés font des fibres recuites des systèmes idéaux pour l'électrochimie et les applications électromécaniques. Nous avons montré que de telles fibres pouvaient servir de micro-électrodes bien plus efficaces que celles réalisées avec des fibres de carbone classiques [11].

Leur sensibilité pourrait donc permettre aux biologistes et aux électrochimistes de développer des recherches plus fines dans leurs domaines.

Sensibles, les fibres poreuses et conductrices de nanotubes sont néanmoins musclées. En effet, elles peuvent être utilisées comme actionneurs électromécaniques. Stimulées par une tension de seulement un volt dans une solution saline, elles se déforment en générant une force de 15 MPa, soit une force correspondant à 50 fois celle que générerait un muscle humain de même masse [3]. Malheureusement, les actionneurs en fibres de nanotubes de carbone, malgré leurs performances très attrayantes, ont encore une faiblesse qui les rend inaptes pour les applications robotiques ou médicales. Après une centaine de cycles, la force générée s'effondre. Ceci provient du manque de cohésion entre les nanotubes qui n'interagissent que par des interactions faibles. Nous travaillons activement pour corriger ce défaut, notamment en essayant de créer des liens covalents entre les nanotubes tout en préservant la haute conduction électrique et la porosité nécessaires aux bonnes performances électromécaniques.

Étirements et propriétés mécaniques

Il est bien établi dans l'industrie du filage que les propriétés des fibres sont fortement améliorées par des opérations d'étirement qui augmentent l'orientation des polymères dans les fibres. La même problématique se pose pour les fibres de nanotubes. Nous essayons donc d'accroître les alignements en étirant les fibres. Pour l'instant, nous avons travaillé essentiellement sur des étirements en voie humide, mais des étirements à chaud sont aussi envisageables. Ces efforts nous ont permis d'arriver aujourd'hui à des désorientations d'environ $\pm 13^\circ$. C'est un progrès important par rapport aux $\pm 30^\circ$ initiaux des fibres non traitées, mais encore insuffisant pour atteindre des modules élevés. Actuellement, les meilleurs modules que nous avons pu obtenir sont d'environ 50 GPa et les seuils de rupture de 1,7 GPa. En utilisant les mêmes procédures que nous, le groupe de R. Baughman de l'université du Texas à Dallas est parvenu à de meilleurs résultats avec un module de 80 GPa et un seuil de rupture de 1,8 GPa [5]. Ces modules et seuils de rupture restent encore inférieurs à ceux de fibres industrielles aujourd'hui disponibles. Par contre, la fibre de nanotubes orientés présente une propriété unique qui la distingue des fibres hautes performances traditionnelles : elle peut résister à des élongations de plusieurs dizaines de pour cents avant de rompre. En conséquence, l'énergie qu'il faut fournir pour la rompre, c'est-à-dire la ténacité, est très élevée. La ténacité des fibres de nanotubes orientés est supérieure à la ténacité de tous les matériaux connus actuellement sur Terre. Jusqu'à ces travaux, le matériau qui avait la plus haute ténacité était d'origine naturelle. Il s'agit du fil d'araignée dont la ténacité (environ 120 J/g) est 2 à 3 fois supérieure aux meilleures fibres synthétiques, telles que le Kevlar, produites

industriellement par l'Homme. Le fil d'araignée constitue un matériau d'une performance extraordinaire pour amortir des impacts très violents lors de la capture d'insectes. Pour donner un exemple ramené à notre échelle, une toile d'araignée de 1 kg pourrait stopper un véhicule de 300 kg, soit une grosse moto lancée à 100 km/h. La ténacité des fibres de nanotubes approche 600 J/g. Ceci signifie qu'une toile de 1 kg en fibre de nanotubes pourrait stopper un véhicule de 1 500 kg, soit une automobile lancée à 100 km/h.

Conclusion

Depuis leur découverte en 1991, les nanotubes de carbone suscitent un grand engouement dans la communauté scientifique et il est bien possible que des applications voient le jour avant 2010. L'augmentation de leur production associée à la baisse de leur prix va permettre de pousser les recherches et de valider des applications sur des matériaux de dimensions satisfaisantes pour évaluer leur réel potentiel. Parmi les nombreuses applications envisagées, il est probable que la mise sous forme de fibres soit une voie idéale car elle permet d'orienter de façon simple les nanotubes sur des échelles macroscopiques. Cela permet d'envisager la réalisation de textiles, de composites et de câbles présentant des performances ou des propriétés qui ne sont pas rencontrées actuellement dans les matériaux habituels. Cependant, il est aussi clair que des travaux de recherche importants doivent être poursuivis pour améliorer les traitements des fibres et éventuellement modifier les propriétés de surface des nanotubes par des fonctionnalisations covalentes ou non. Il s'agira de progresser en menant des travaux pluridisciplinaires associant chimistes, physiciens, mécaniciens et

ingénieurs des procédés pour véritablement explorer plus avant le potentiel des fibres de nanotubes de carbone.

Références

- [1] Saito R., Dresselhaus G., Dresselhaus M.S., *Physical Properties of Carbon Nanotubes*, Imperial College Press, 1998.
- [2] Baughman R.H., Zakhidov A.Z., de Heer W.A., *Science*, **2002**, 297, p. 787.
- [3] Baughman R.H., Cui C., Zakhidov A.A., Iqbal Z., Barisci J.N., Spinks G.M., Wallace G.G., Mazzoldi A., De Rossi D., Rinzler A.G., Jaschinski O., Roth S., Kertesz M., *Science*, **1999**, 284, p. 1340.
- [4] Vigolo B., Pénicaud A., Coulon C., Sauder C., Pailler R., Journet C., Bernier P., Poulin P., *Science*, **2000**, 290, p. 1331.
- [5] Dalton A.B., Collins S., Muñoz E., Razal J.M., Ebron V.H., Ferraris J.P., Coleman J.N., Kim B.G., Baughman R.H., *Nature*, **2003**, 423, p. 703.
- [6] Badaire S., Poulin P., Maugey M., Zakri C., *Langmuir*, **2004**, 20, p. 10367.
- [7] Launois P., Marucci A., Vigolo B., Bernier P., Derré A., Poulin P., *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **2001**, 1, p. 125.
- [8] Vigolo B., Poulin P., Lucas M., Launois P., Bernier P., *App. Phys. Lett.*, **2002**, 81, p. 1210.
- [9] Anglaret E., Righi A., Saujavol J.L., Bernier P., Vigolo B., Poulin P., *Phys. Rev. B*, **2002**, 65, p. 165426.
- [10] Liu T., Kumar S., *Nanoletters*, **2003**, 3, p. 647.
- [11] Wang J., Deo R., Poulin P., Maugey M., *J. Am. Chem. Soc.*, **2003**, 125, p. 14706.



Philippe Poulin

est chargé de recherche CNRS au Centre de Recherche Paul Pascal*.

Il a reçu le **prix 2003 de la division Chimie physique**, division commune à la SFC et à la SFP (voir *L'Act. Chim.*, **2004**, 273, p. 67).

* Centre de Recherche Paul Pascal, CNRS-UPR 8641, Avenue Schweitzer, 33600 Pessac.
Courriel : poulin@crpp-bordeaux.cnrs.fr

Quatre premiers lauréats pour le Prix La Recherche

Lancé en janvier 2004, le prix du magazine *La Recherche* est d'ores et déjà un succès car il a attiré pour sa première édition 487 candidats, 56 équipes, 28 nationalités sur les 5 continents... Il récompense des travaux de recherche fondamentale ou appliquée, pluridisciplinaires et francophones.

Sont ainsi invités à concourir les chercheurs francophones ou collaborant avec une institution francophone, quelle que soit la nature de cette structure (publique ou privée, académique, etc.) et la nationalité de chaque membre de l'équipe. Par cette initiative, *La Recherche*, qui depuis plus de 30 ans travaille à rendre accessible au plus grand nombre les travaux de recherche publiés à travers la planète, a voulu jouer pleinement son rôle de journal de référence.

Le *Prix La Recherche* est constitué de « mentions » dotées de 10 000 euros chacune par les partenaires officiels.

La proclamation du palmarès et la remise des prix 2004 ont eu lieu le 4 décembre dernier à la Bibliothèque nationale de France.

Pour la 1^{ère} édition du concours, quatre mentions ont été définies :

- Alain Olivier (Département de phytologie de l'université de Laval, Québec) a reçu la mention « Environnement », récompensée par Veolia Environnement, pour « L'agroforesterie des zones tropicales : la recherche d'alternatives à la culture itinérante sur brûlis et l'étude des contraintes à l'adoption de l'agroforesterie ». Le but de cette dernière est de « marier l'agriculture aux arbres. »

- L'équipe emmenée par Jérôme Wenger, composée de jeunes chercheurs issus du Laboratoire de photonique quantique et moléculaire de Cachan, du Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'optique d'Orsay et du service théorie de l'information de l'École polytechnique de Bruxelles, a reçu la mention « Mobilité », récompensée par Bouygues Télécom, pour « Nouveaux systèmes

expérimentaux pour la cryptographie quantique : l'incertitude au service de la confidentialité. »

- L'équipe de Francis Eustache de l'unité mixte de Caen Inserm/CNRS a reçu la mention « Santé humaine », récompensée par Sanofi-Aventis, pour « Neuropsychologie et neuroanatomie fonctionnelle de la mémoire humaine ». Comment appréhender la mémoire et ses troubles dans la maladie d'Alzheimer et dans d'autres démences ? En utilisant une méthode contraignante, mais fructueuse : corrélés les troubles avec l'imagerie cérébrale (TEP et IRM fonctionnelle). Grâce à cette technique, l'équipe de Francis Eustache a relié précisément les troubles de la mémoire épisodique à une petite région située à l'entrée de l'hippocampe.

- Enfin, l'équipe emmenée par

Philippe Poulin, formée de chercheurs du Centre Paul Pascal de Bordeaux et du Laboratoire de physique du solide d'Orsay (Stéphane Badaire, Alain Derré, Pascale Launois, Maryse Maugey, Vincent Pichot, Brigitte Vigolo et Cécile Zakri), a reçu la



mention « Prix du ministère », récompensée par le Ministre délégué à la recherche, pour

« Fibres de nanotubes de carbone : musclées, intelligentes et sensibles ». Pour en savoir plus, lire l'article publié ci-dessus.

• Pour plus de précisions sur les travaux des lauréats, voir *La Recherche*, décembre **2004**, 381, p. 42.