



R. Baker



C. Fisher et R. Wash

5. CETTE SOURCE DE PÉTROLE SOUS-MARINE est recouverte d'un monticule d'hydrate de méthane et entourée de nombreux organismes vivant à ces grandes profondeurs (*ci-dessus*). L'hydrate de méthane est une solution solide de méthane et d'eau, qui se forme aux fortes pressions et aux basses températures. Il héberge un animal microscopique, le ver de glace (*à gauche*) découvert en 1997.

rares vers vestimentifères, nous avons trouvé une faune luxuriante. D'innombrables moules étaient agglutinées autour des sources de gaz bouillonnantes, ainsi que des bactéries, qui formaient un tapis coloré. Des poissons, des crustacés et autres invertébrés, qui vivent normalement dans des eaux moins profondes, étaient massés autour des sources où ils se nourrissaient de ces espèces exotiques.

Depuis, d'autres communautés de ce type ont été découvertes dans le golfe. Elles sont parfois si florissantes qu'elles bouchent les sources d'hydrocarbures : les sous-produits métaboliques des microbes provoquent la précipitation de carbonate de calcium, qui forme des calottes étanches au-dessus des sources. Ces organismes produiraient aussi du méthane responsable de la formation d'hydrates de méthane, des substances qui ressemblent à de la glace et se forment lorsque des molécules de méthane sont piégées dans un réseau de molécules d'eau, à haute pression et à basse température. Ces solides, qui bouchent les gazoducs, ont obligé les exploitants des plates-formes offshore à chauffer et isoler ces canalisations sous-marines à grands frais. Plus récemment, les chercheurs se sont intéressés aux hydrates de méthane qui cristallisent au fond des mers.

Quelle est la quantité de pétrole qui se déverse naturellement dans le golfe du Mexique chaque année? En supposant qu'une seule nappe mesure

environ 100 mètres de largeur et 10 kilomètres de longueur, pour une épaisseur moyenne de 0,1 micromètre, elle contiendrait à peu près 100 litres de pétrole. La durée de vie maximale d'une telle nappe étant de 24 heures, chaque source libère 100 litres de pétrole par jour.

Une pollution naturelle?

On estime que 100 sources d'hydrocarbures sont simultanément en activité dans le golfe : près de quatre millions de litres s'y déverseraient chaque année. Rappelons que l'*Exxon Valdez* a déversé à peu près la même quantité de pétrole lors de son naufrage dans le détroit du prince William, en Alaska en 1989 (soit 40 000 tonnes environ). Pour mémoire, l'*Amoco Cadiz* et l'*Érika* en ont déversé respectivement 230 000 en 1978 et 10 000 en 1999. Heureusement, l'écosystème du golfe du Mexique, où les sources sont actives depuis plus

d'un million d'années, survit à cette «pollution» pétrolière.

Les marées noires naturelles ont produit autant de pétrole et de gaz que l'industrie pétrolière n'en a extrait des gisements sous-marins. La différence d'échelle de temps explique pourquoi une marée noire naturelle fait beaucoup moins de dégâts qu'un accident pétrolier. L'existence des épanchements naturels n'excuse en aucun cas la pollution accidentelle. Alors que l'océan supporte des centaines de tonnes de pétrole déversées chaque mois, si l'hydrocarbure est répandu sous forme de gouttelettes sur des milliers de kilomètres carrés, la même quantité déversée sur une aire de nidification d'oiseaux de mer détruit inévitablement la population locale. Après certaines marées noires accidentelles, l'écosystème met des années à guérir, et certains dommages sont irréversibles. Les marées noires naturelles ne semblent pas avoir de conséquences délétères sur l'environnement marin.

Ian MACDONALD est océanographe à l'Université du Texas.

K.A. KVENVOLDEN, *Reassessment of the Rates at Which Oil from Natural Sources Enters the Marine Environment*, in *Marine Environmental Research*, vol. 10, pp. 223-243, 1983.

I.R. MACDONALD et al., *Natural Oil Slicks in the Gulf of Mexico Visible from Space*, in *Journal of Geophysical Research*,

vol. 98, n° C9, pp.16351-16364, 15 septembre 1993.

I.R. MACDONALD et al., *Remote Sensing Inventory of Active Oil Seeps and Chemosynthetic Communities in the Northern Gulf of Mexico*, in *Hydrocarbon Migration and Its Near-Surface Expression*, sous la direction de D. Schumacher et M.A. Abrams, American Association of Petroleum Geologists Memoir 66, 1996.

Les nanotubes en électronique

PHILIP COLLINS • PHAEDON AVOURIS

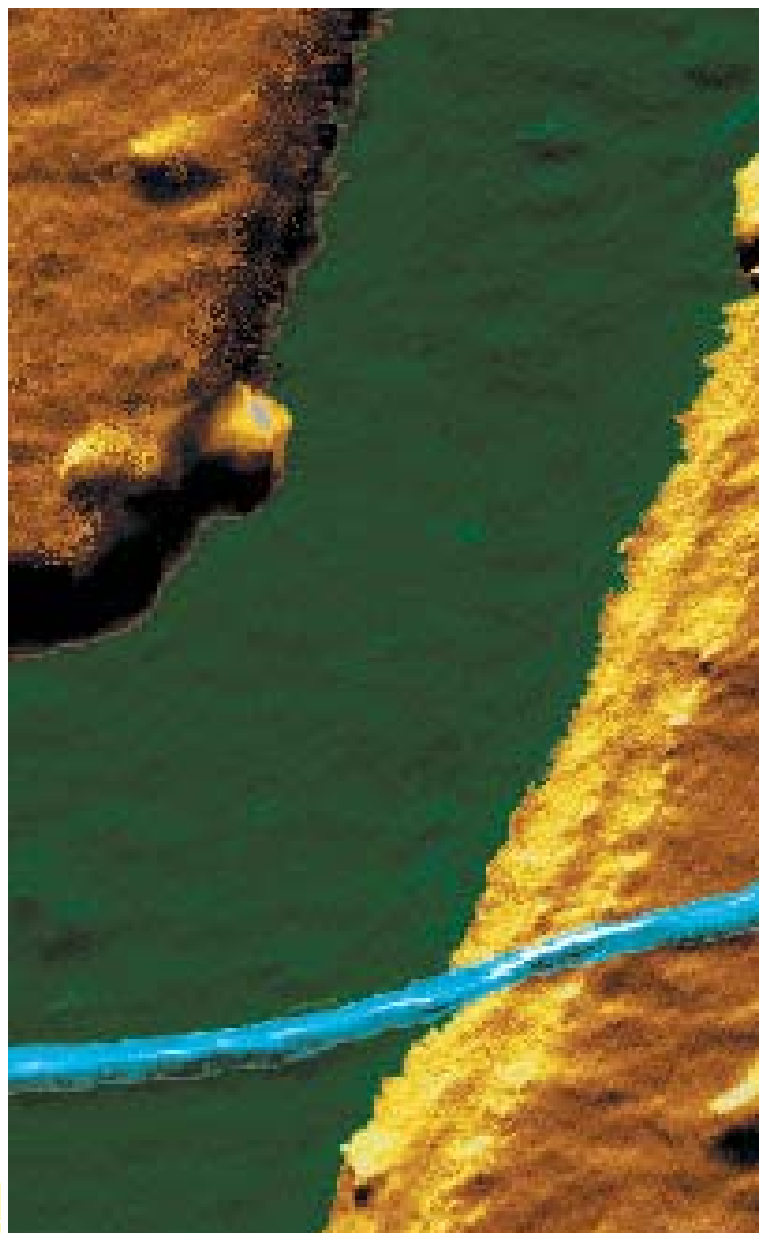
Plus résistants que l'acier, les nanotubes sont des macromolécules qui ressemblent à de longs filaments. Ils devraient améliorer la rapidité, l'efficacité et la longévité des composants électroniques.

Il y a une dizaine d'années, Sumio Iijima, du Laboratoire de recherche fondamentale de la Société NEC, à Tsukuba, au Japon, observa, à l'aide d'un microscope électronique, de curieux filaments «nanoscopiques» au sein de dépôts de suie. Ces macromolécules, observées pour la première fois, étaient extrêmement longues et fines, constituées de carbone pur et aussi ordonnées que des cristaux. Nommées «nanotubes», elles sont étudiées par de nombreuses équipes de recherche.

Les propriétés étonnantes des nanotubes, telles leur élasticité, leur résistance et leur stabilité thermique élevées, font aussi rêver les ingénieurs qui ont imaginé des projets – plus ou moins réalistes – de robots microscopiques, de carrosseries d'automobiles résistant aux chocs ou encore d'immeubles insensibles aux tremblements de terre. Les premières applications des nanotubes viennent d'apparaître et elles reposent sur une propriété différente de celles mentionnées : elles tirent parti des propriétés électriques des nanotubes. Les voitures de *General Motors* sont déjà équipées de pièces en plastique qui contiennent des nanotubes. Pendant l'opération de peinture, un courant électrique circule ainsi dans ces pièces, et la peinture y adhère plus facilement. Par ailleurs, des dispositifs d'éclairage et d'affichage contenant des nanotubes sont sur le point d'être commercialisés.

À long terme, ce seront peut-être les propriétés électroniques des nanotubes qui engendreront les applications les plus importantes. Les nanotubes de carbone pourraient remplacer le silicium dans les circuits électroniques à l'échelle moléculaire, où le silicium et les autres semi-conducteurs cessent de fonctionner. Aujourd'hui, les dimensions des transistors contenus dans les puces électroniques sont inférieures à 200 nanomètres (200 milliardièmes de mètre), soit environ la taille de 400 atomes accolés. Jusqu'où pourra-t-on miniaturiser ces composants ? Les techniques classiques se heurteront bientôt à des limites physiques incontournables.

1. LES MICROPUCES DU FUTUR nécessiteront des fils et des transistors plus petits que ceux produits aujourd'hui par photolithographie. Des macromolécules conductrices de carbone s'auto-assemblent et forment des nanotubes (en haut, à gauche). Elles sont actuellement testées comme fils ultrafins (au centre) et comme canaux dans des transistors à effet de champ (à droite).



C. Dekker

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

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

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

Un matériau exotique

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

