

extrémités et constitués de carbone cristallisé. Leur diamètre est de l'ordre de 1 à 5 nanomètres, pour des longueurs atteignant parfois plusieurs dizaines de centimètres. Ce « rapport d'aspect » en fait des objets unidimensionnels (1D), par contraste avec les fullerènes qui sont des objets dépourvus de dimension (0D) aux échelles du micromètre et au-delà.

Comparés au graphite, les nanotubes ont une structure singulière. Le graphite est formé d'un empilement de plans, dont chacun constitue du « graphène » : un réseau plan et régulier d'hexagones dont les sommets sont occupés par un atome de carbone (comme pour les hexagones de la molécule C_{60}).

La filiation est encore plus évidente pour le nanotube de carbone, qui équivaut à une feuille de graphène enroulée sur elle-même. L'angle d'enroulement est une propriété capitale, qui détermine les propriétés des porteurs de charge et confère au nanotube un caractère métallique ou semi-conducteur. De ce fait, les nanotubes présentent une palette très large et très singulière de propriétés électroniques, optiques, thermiques, chimiques et mécaniques. Des propriétés qui découlent à la fois de la liaison carbone-carbone du graphite, de l'abaissement de dimensionnalité et de l'angle d'enroulement.

DIMENSIONNALITÉ 0, 1 OU 2

Plus globalement, les nanotubes de carbone sont la structure de basse dimensionnalité la plus étudiée et ont accompagné le développement des recherches fondamentales en nanosciences. Aujourd'hui, ils connaissent de nombreuses applications, mais souvent très spécialisées. La difficulté à contrôler lors de la synthèse la structure des tubes, qui conditionne leurs propriétés, reste aujourd'hui un frein au développement d'applications de grande échelle, en électronique notamment.

Quant au graphène, qui est un matériau bidimensionnel (2D), on pensait qu'il était physiquement impossible d'obtenir sous une forme stable un matériau de cette nature. Mais en 2004, à l'université de Manchester, Konstantin Novoselov et Andre Geim ont réussi à isoler du graphène de façon très simple, en exfoliant mécaniquement de façon répétée des fragments de graphite jusqu'à en obtenir un seul plan atomique (voir page 76). La simplicité de l'expérience ainsi que les connaissances acquises sur les nanotubes, tant sur le

plan théorique qu'expérimental et technologique, ont permis un essor très rapide des recherches sur le graphène. La mise en évidence de ses propriétés électroniques particulières, dues notamment à la bidimensionnalité, ont valu à Konstantin Novoselov et Andre Geim le prix Nobel de physique en 2010.

Le graphène est le premier représentant de la classe nouvelle de matériaux 2D qui s'obtiennent à partir de matériaux lamellaires tels que le nitrure de bore hexagonal, les dichalcogénures de métaux de transition, le « phosphore noir », le silicène, etc. Alors que le graphène est métallique, ces matériaux sont des semi-conducteurs dont les propriétés optiques dans le domaine visible-infrarouge sont attractives et singulières. De plus, il est techniquement possible de les combiner et obtenir ce qu'on appelle des hétérostructures, aux propriétés variées selon les composants choisis. Un champ de recherches qui explose littéralement depuis une petite dizaine d'années.

Ainsi, depuis 1985, le carbone ne finit pas de nous étonner. Dimensionnalité 0 avec les fullerènes, 1 avec les nanotubes, 2 avec le graphène... : les nanosciences et leurs applications ont largement de quoi se nourrir et grandir. ■

Le footballène (C_{60}) est une molécule en forme de cage sphérique constituée de 60 atomes de carbone. Les liaisons interatomiques dessinent 12 facettes pentagonales et 20 facettes hexagonales. Cette molécule a une taille d'environ 0,7 nanomètre.

BIBLIOGRAPHIE

R. B. Mathur et al., **Carbon nanomaterials**, CRC Press, 2017.

H. W. Kroto et al., **C_{60} : Buckminsterfullerene**, *Nature*, vol. 318, pp. 162-163, 1985.



- Mise en évidence de l'effet de **magnétorésistance géante**
- Création du **Giec** (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat)
- L'UICN (Union internationale pour la conservation de la nature) explicite une définition de la **biodiversité**

© Shutterstock.com

1988

1987

1989

1990

1991

- Débuts de l'**épigénétique**: le généticien Robin Holliday décrit les changements héréditaires des gènes qui ne modifient pas la séquence d'ADN **p. 40**
- Prix Nobel pour la découverte de **supraconducteurs à haute température** **p. 42**
- Alim Louis Benabib et ses collègues appliquent la **stimulation cérébrale profonde**, pour traiter des troubles du mouvement dus à la maladie de Parkinson

- Obtention de **souris knock-out**, chez lesquelles un ou plusieurs gènes ont été inactivés
- **Manipulation d'un atome unique** sur une surface à l'aide d'un microscope à effet tunnel
- Le **gène CFTR**, dont les mutations sont responsables de la **mucoviscidose**, est isolé

© Cynoclub/Shutterstock.com



- Développement de la technique de l'**IRM fonctionnelle** du cerveau **p. 44**
- Le télescope spatial **Hubble** est mis en orbite
- Démarrage du **Projet génome humain**
- Alain Connes publie son livre sur la **géométrie non commutative**

