

**TS3 - PHYSIQUE-CHIMIE - SPÉCIALITÉ  
MATERIAUX - SÉANCE 6/9**

*Domaine d'étude : nouveaux matériaux*

**Mots-clefs :** nanotubes, nanoparticules, matériaux nanostructurés

**LES NANOTUBES DE CARBONE : DES « FIBRES » D'AVENIR**

**CONTEXTE DU SUJET**

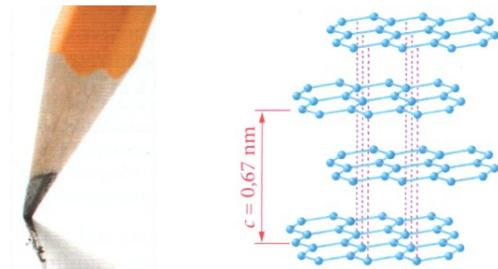
Les nanotubes de carbone constituent une nouvelle variété de carbone appartenant à la famille des fulérenes. Ils peuvent être utilisés pour synthétiser des nano-objets biocompatibles tels que les nanobagues pouvant servir, notamment, à vectoriser des médicaments dans le corps.

**PREMIÈRE PARTIE : DU CRAYON À PAPIER AUX NANOTUBES DE CARBONE**

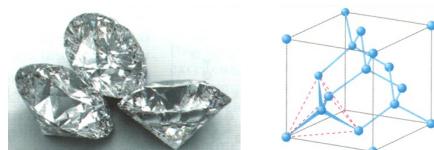
Le graphite est un matériau friable et glissant, le diamant est l'un des produits naturels les plus durs qui soient et les nanotubes de carbone sont plus résistants que l'acier mais ont une masse volumique six fois moindre.

Comment expliquer ces différences ? Par un arrangement différent des atomes de carbone dans l'espace : on dit que ces matériaux (graphite, diamant, nanotubes) sont trois formes allotropiques du carbone.

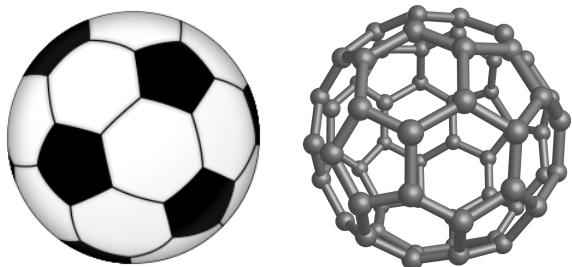
Dans le **graphite**, dont est composée la mine de crayon, les atomes de carbone sont liés entre eux par des liaisons covalentes ( $400 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) dans seulement deux dimensions. Les atomes de carbone forment des plans d'héxagones, appelés feuillets de graphène) qui ne sont liés entre eux que par des forces de Van der Waals attractives. Comme ces forces sont relativement faibles ( $10 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ), les feuillets peuvent facilement glisser les uns sur les autres.



Dans le **diamant**, chaque atome de carbone est lié par des liaisons de type covalentes à quatre autres atomes de carbone se plaçant aux sommets d'un tétraèdre régulier. Ceci crée un réseau à trois dimensions extrêmement solide.

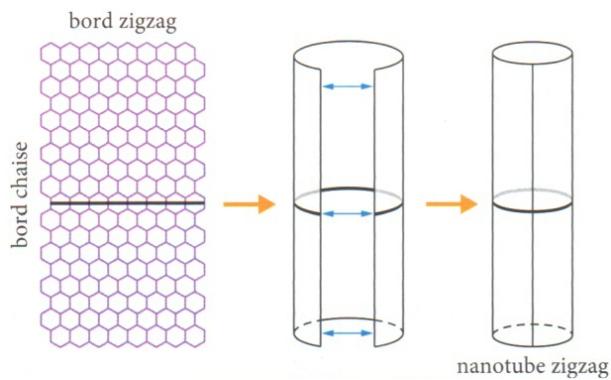
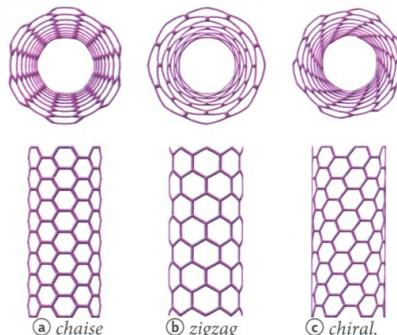
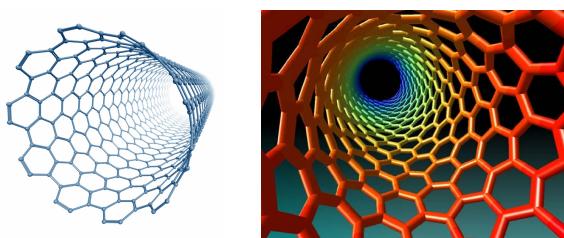


En 1996, H. KROTO, R. CURL et R. SMALLY reçoivent le prix Nobel de Chimie pour la découverte, en 1985, d'une molécule comportant 60 atomes de carbone. De forme polyédrique, son rayon est voisin de 0,6 nm, ce qui en fait une particule nanométrique. Cette molécule, nommée  $C_{60}$  ou « footballène », est synthétisée en grande quantité depuis 1990. D'autres **fullérènes**, ressemblant à des ballons de rugby, à des anneaux ou à des cônes ont été découverts et synthétisés depuis.

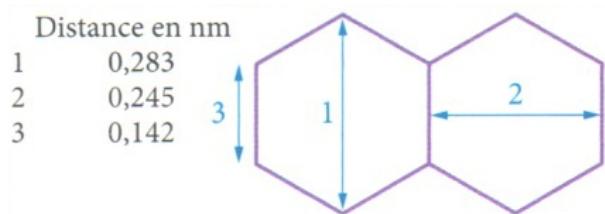


Un **nanotube de carbone** est un feutre d'atomes de carbone assemblés selon un réseau d'hexagones (feutre de graphène) enroulé sur lui-même. Il peut mesurer jusqu'à plusieurs millimètres de longueur. L'enroulement du feutre d'atomes de carbone peut se faire de différentes manières. Selon la direction d'enroulement du plan du feutre par rapport aux hexagones, on obtient différents types de nanotubes.

Les propriétés mécaniques (résistance, écrasement, allongement...) sont identiques quel que soit l'enroulement du feutre. En revanche, les propriétés électriques diffèrent selon le type de nanotubes : le type « **armchair** » est un très bon conducteur électrique alors que les types « **zigzag** » et « **chiral** » sont semi-conducteurs. Ils peuvent se révéler d'excellents conducteurs thermiques avec une conduction thermique à température ambiante pouvant atteindre  $6600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .



Enroulement d'un feutre de graphène pour former un nanotube de carbone



Quelques distances interatomiques dans les feutres graphitiques des nanotubes

### Donnée :

L'énergie molaire de liaison, notée  $E_m$ , est l'énergie qu'il faut fournir pour rompre une mole de liaisons chimiques selon le processus suivant :  $\text{A}-\text{B(g)} \longrightarrow \text{A(g)} + \text{B(g)}$

### EXTRAIRE ET EXPLOITER L'INFORMATION DE DOCUMENTS SCIENTIFIQUES :

1. Qu'est-ce qui différencie une liaison covalente d'une liaison de type Van der Waals ?
2. Pourquoi cela permet-il d'expliquer que le graphite est un matériau friable ?
3. Qu'est-ce qui permet d'expliquer la grande dureté du diamant ?
4. Qu'est-ce qui différencie les nanotubes zigzag des nanotubes chaise ?
5. Préciser la géométrie autour de l'atome de carbone dans chacune des structures présentées.
6. En déduire les propriétés électriques de certaines de ces structures.
7. En utilisant les données des documents sur la structure des nanotubes de carbone, calculer, en nanomètres, le périmètre du nanotube représenté sur la dernière figure et en déduire son rayon.

8. Calculer alors le volume de ce nanotube s'il a une longueur de 1,0 mm.
9. Montrer que ce nanotube comporte au total  $8,4 \cdot 10^7$  atomes de carbone.
10. On sait qu'un  $\text{cm}^3$  contient environ  $8 \cdot 10^{14}$  nanotubes. En déduire la masse volumique des nanotubes de carbone en  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .
11. La masse volumique de l'acier est de l'ordre de  $7500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . La première phrase du texte est-elle justifiée?
12. Le verre a une conductivité thermique de l'ordre de  $1,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , le bois  $0,16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  et le cuivre  $390 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . En déduire quelle propriété exceptionnelle possède un nanotube de carbone.
13. En quinze lignes maximum, citer les principales propriétés remarquables des nanotubes de carbone et imaginer quelles pourraient en être les applications pratiques.

## DEUXIÈME PARTIE : PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES NANOTUBES DE CARBONE

Les nanotubes de carbone sont des tubes creux constitués de cycles hexagonaux d'atomes de carbone. Leur diamètre est de l'ordre du nanomètre et leur longueur peut aller du micromètre au millimètre. Ces nanotubes existent probablement depuis toujours : en effet, sous l'effet de la chaleur, les atomes de carbone se combinent d'innombrables manières. Mais leur observation et leur synthèse systématique ne datent que des années 1990.

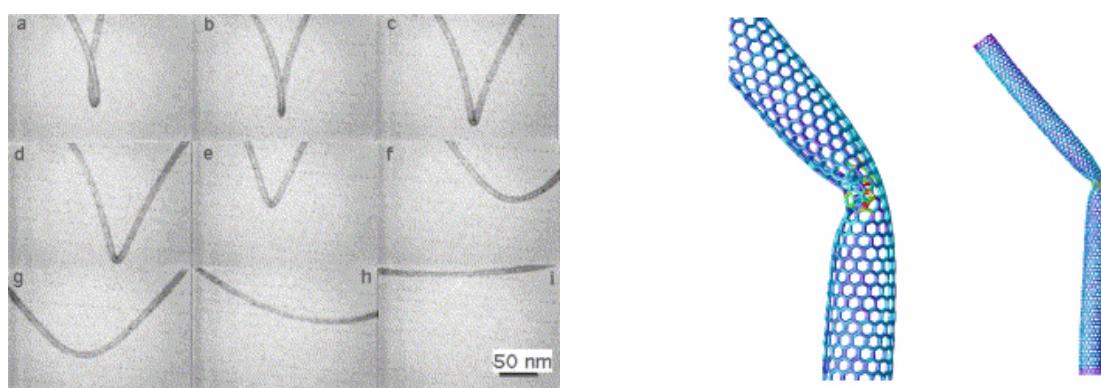
Les nanotubes de carbone suscitent un très fort engouement dans les domaines de la recherche, tant fondamentale qu'appliquée, car ils présentent des propriétés physiques remarquables, notamment mécaniques et électriques.

Les nanotubes de carbone pourraient trouver de nombreuses applications qui mettent à profit leurs propriétés mécaniques : matériel sportif, gilet pare-balles, casques, vêtements de protection, ceintures de sécurité...

Les propriétés mécaniques des nanotubes que l'on cherche à exploiter sont leur grande solidité, leur extrême flexibilité, leur énorme capacité à absorber l'énergie et leur faible densité.

### Comment quantifier les propriétés mécaniques des nanotubes de carbone ?

À l'aide des documents présentés ci-dessous et de votre culture scientifique, vous proposerez une démarche expérimentale (une série d'expériences) permettant de répondre à ce problème. On pourra utiliser des analogies avec des dispositifs macroscopiques rencontrés couramment au laboratoire de physique.



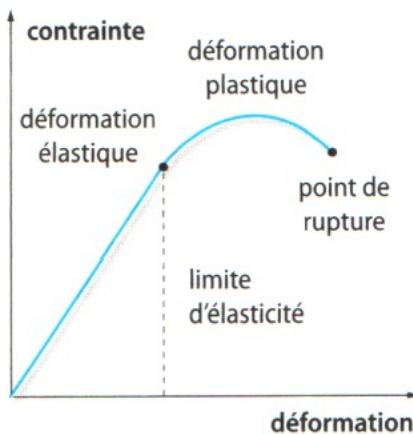
Pour étudier la résistance d'un matériau, on le soumet à des essais de traction où on lui applique une force croissante et l'on mesure son élongation,  $\Delta\ell$  (différence entre sa longueur après déformation et sa longueur initiale).

Tous les échantillons n'ayant pas la même section, la force appliquée est rapportée à la section de l'échantillon. On parle alors de **contrainte**,  $\sigma$ , qui s'exprime en pascals. On a donc  $\sigma = \frac{F}{S} = \frac{\text{Force}}{\text{Section}}$

De même, la longueur initiale de tous les échantillons n'étant pas nécessairement la même, on mesure la **déformation**,  $\epsilon$ , c'est-à-dire le rapport (sans dimension) de l'élongation de l'échantillon sur sa longueur initiale.

$$\text{On a donc } \epsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell_0} = \frac{\text{élongation}}{\text{longueur initiale}}$$

On trace alors la courbe de la contrainte appliquée en fonction de la déformation observée (voir figure ci-dessous). La première partie de la courbe, linéaire, correspond à une situation où, si la contrainte est retirée, le matériau reprend sa forme initiale : c'est la zone de déformation élastique. La seconde zone, non linéaire, correspond à une situation où, si la contrainte est retirée, le matériau ne reprend pas sa forme initiale et garde une déformation définitive : c'est la zone de déformation plastique. Arrive enfin le point de rupture où l'échantillon est rompu.



Dans la partie linéaire, la contrainte  $\sigma$  est proportionnelle à la déformation  $\epsilon$ . Le coefficient de proportionnalité, noté  $E$ , est appelé **module d'élasticité** ou **module d'Young** du matériau. On a donc, dans cette zone d'élasticité :  $\sigma = E \cdot \epsilon$ .

La capacité à absorber les chocs est caractérisée par l'**énergie de rupture** ou **ténacité** qui est une énergie volumique. Elle correspond à l'aire sous la courbe contrainte-déformation.

Matériau	Densité
Acier	7,5 à 8,0
Aluminium	2,7
Nanotubes de carbone	1,3 à 1,4

Matériau	Module d'Young (GPa)	Contrainte à la rupture (GPa)
Acier	200	2
Kevlar	34,5	3,5
Nanotubes de carbone	1100	45

#### QUESTIONNEMENT INDICATIF :

- Quelles sont les deux principales propriétés que doit avoir un matériau pour avoir une bonne résistance mécanique ?
- Comment peut-on mesurer la flexibilité d'un matériau ?
- À quoi correspond le module d'Young ? Quelle est sa dimension ?
- Que signifie le terme « contrainte à la rupture » ?
- Quelles propriétés doit présenter un matériau pour avoir une grande ténacité ?
- Quelle propriété de l'atome de carbone confère aux nanotubes autant de qualités mécaniques ?
- Quelles grandeurs physiques permettent de quantifier les performances mécaniques des nanotubes de carbone ? Préciser la signification de chacune d'elles.