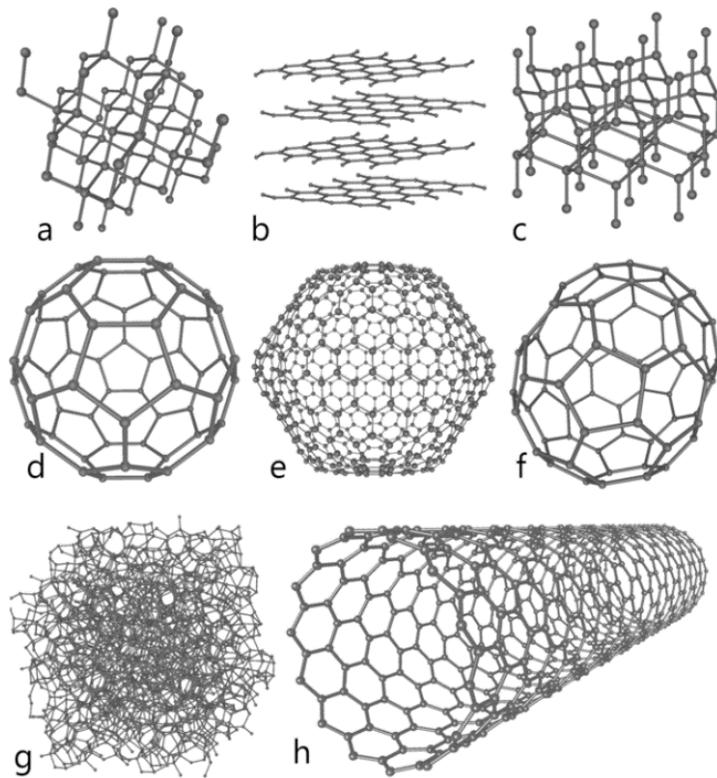


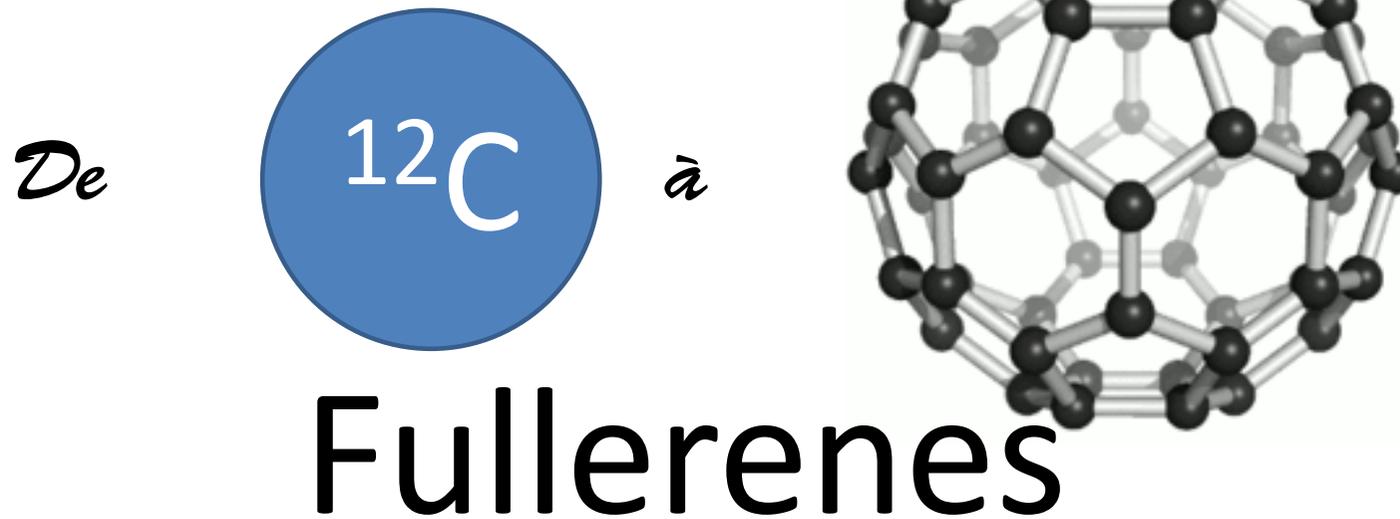


ALLOTROPES DU CARBONE: FULLERENES ET NANOTUBES

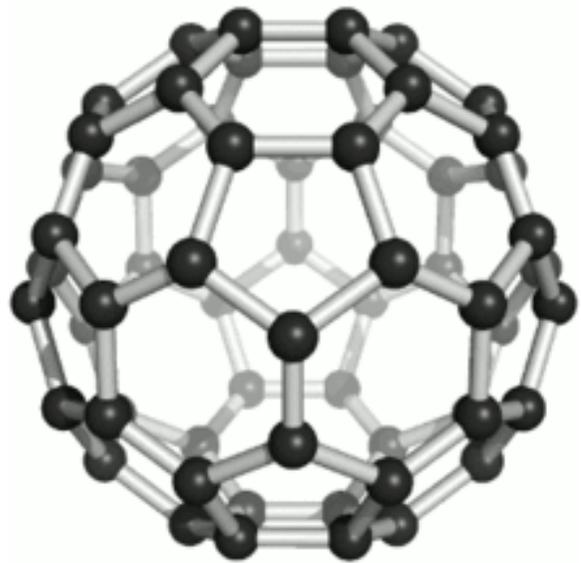
Équipe IoT de l'Université Valahia de
Targoviste, ROUMANIE



Nanomatériaux à base de carbone



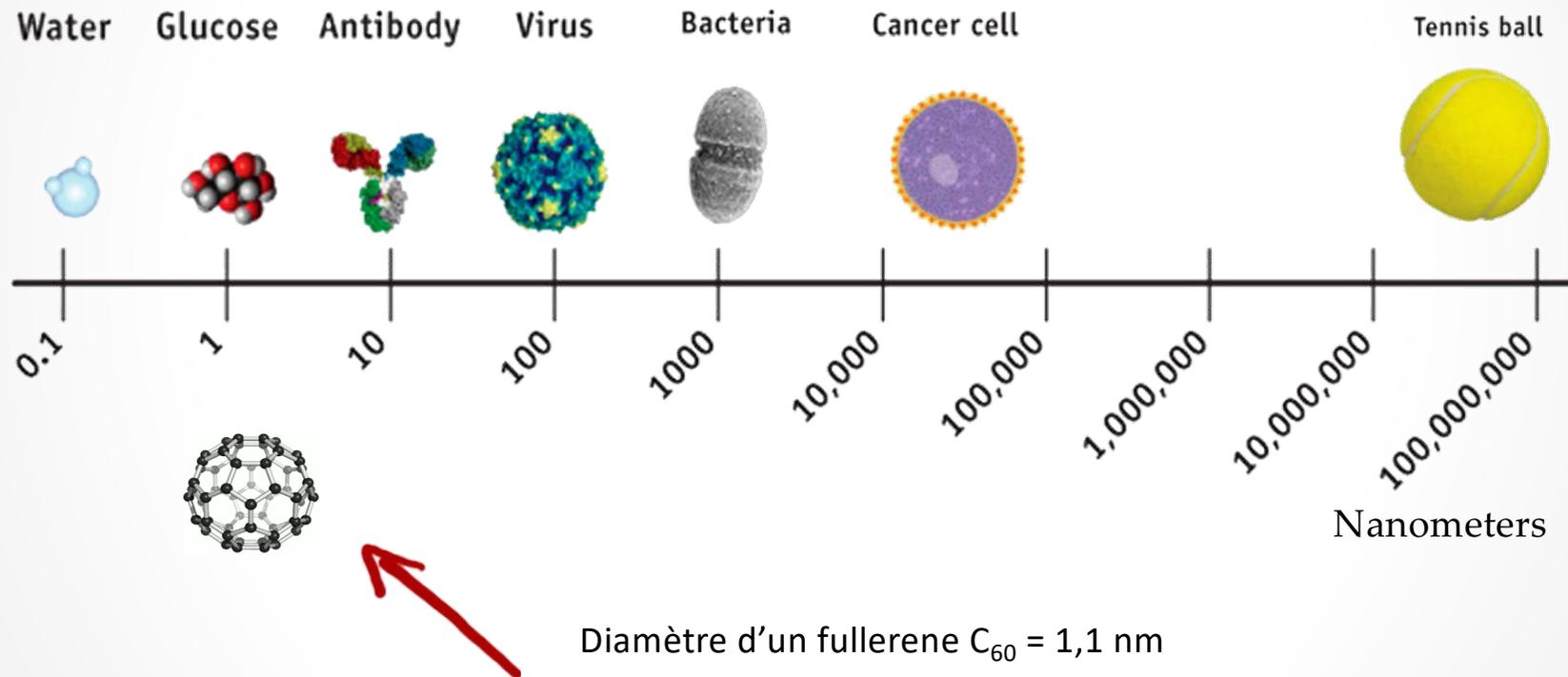
Que sont les fullerènes?



- Des composés moléculaires composés de carbone, une forme allotropique de carbone, qui ressemble à un ballon de football.

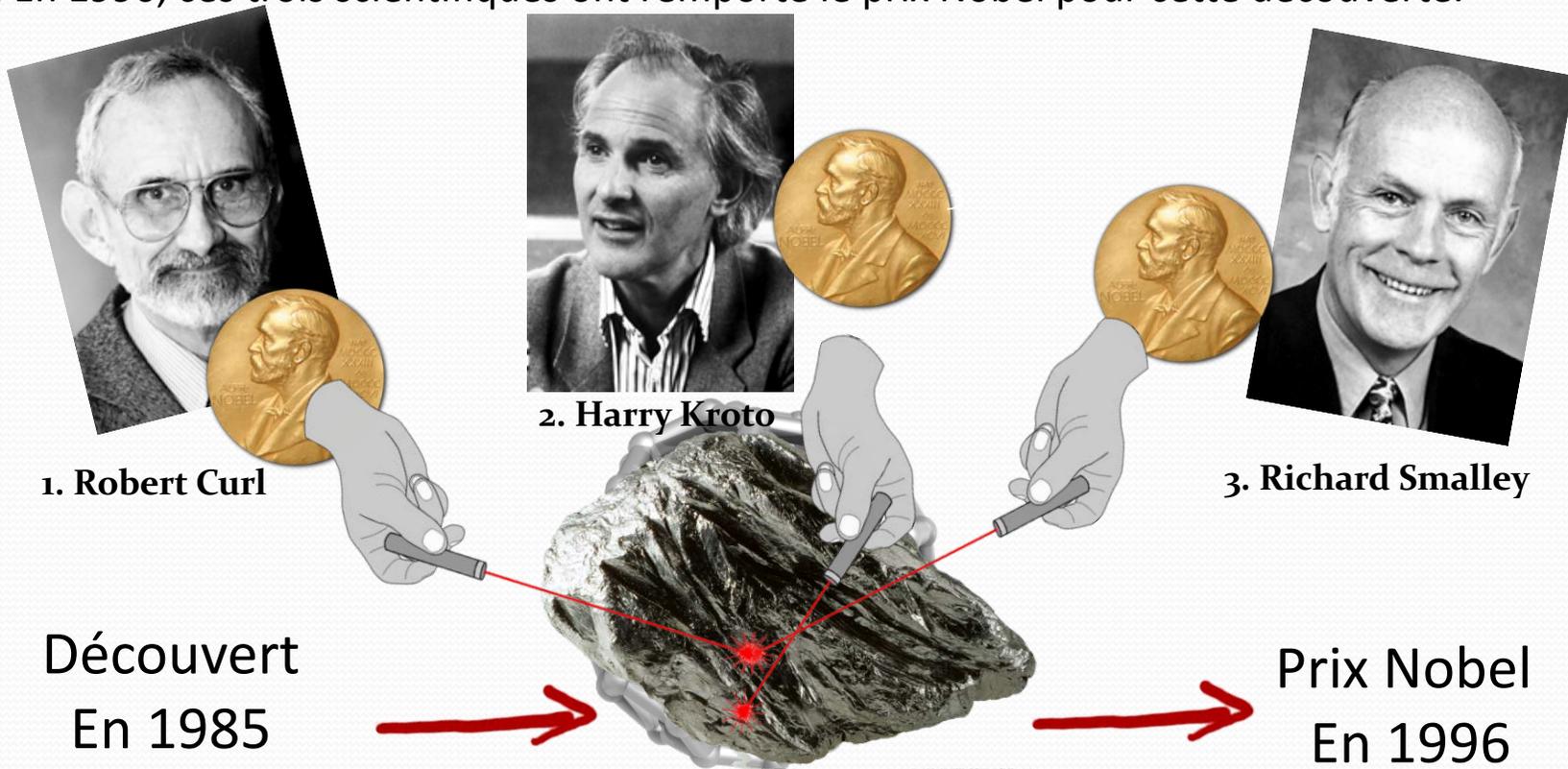
Dimension des fullerènes

Les fullerènes sont des molécules assez petites. En taille, le fullerène C₆₀ serait un peu plus grand que le glucose et légèrement plus petit qu'un anticorps.



L'histoire des fullerènes

La découverte de fullerènes a été accidentelle. Trois scientifiques Robert Curl, Harry Kroto et Richard Smalley en 1985 ont agi avec un laser sur du graphite. Dans le matériel obtenu selon les analyses, ils ont découvert des fullerènes. En 1996, ces trois scientifiques ont remporté le prix Nobel pour cette découverte.

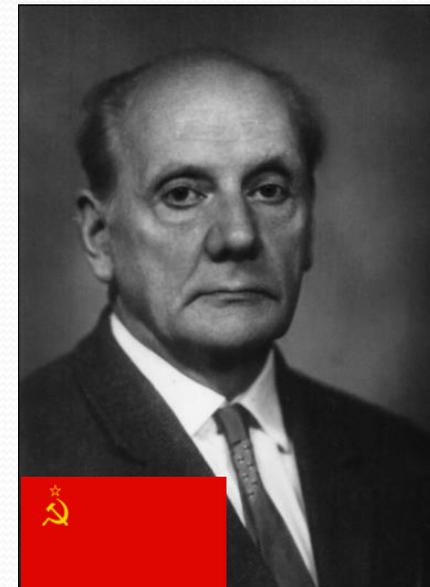


Les premières recherches sur les fullerènes

Même si les fullerènes ont été découverts en 1985, la recherche connexe a commencé beaucoup plus tôt, dans les années 1970.

E. Osawa

1971 – Prédiction sur l'occurrence de fullerènes



D.A. Bochvar

1973 - modèle mathématique des fullerènes

D'où vient le nom de fullerène?



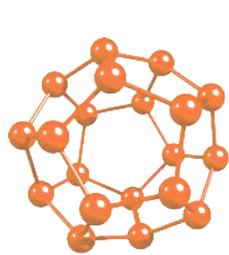
Richard Buckminster "Bucky" Fuller

Architecte américain, théoricien des systèmes, auteur, designer, inventeur et futuriste qui a travaillé sur des projets futuristes en forme de boule. Ainsi, en l'honneur de Fuller, ces molécules ont été nommées - fullerènes.

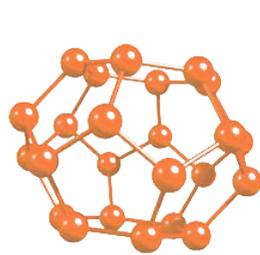


Types de fullerenes

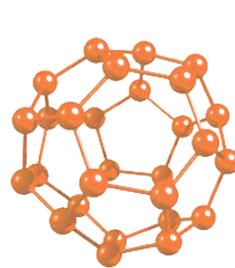
Nous connaissons maintenant plusieurs types de fullerènes. Certains ont 20 atomes de carbone dans la molécule, tandis que d'autres atteignent jusqu'à 540 atomes!



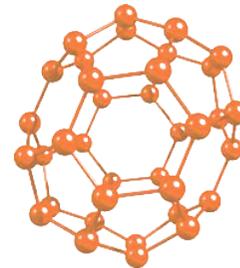
C₂₀



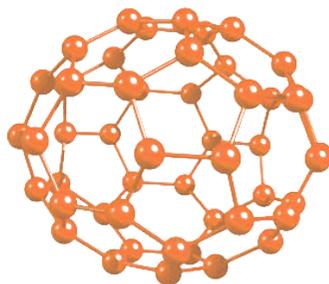
C₂₄



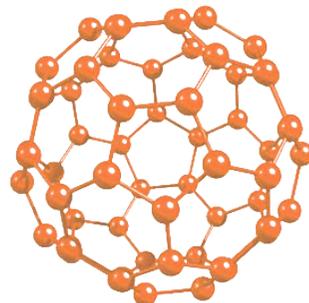
C₂₈



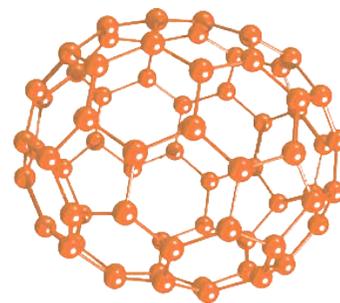
C₃₆



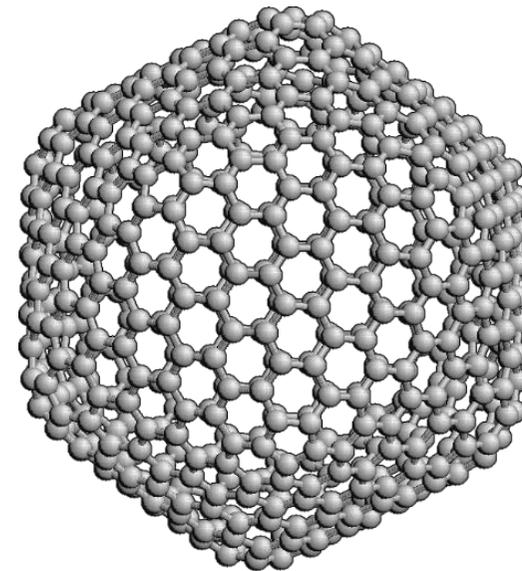
C₅₀



C₆₀

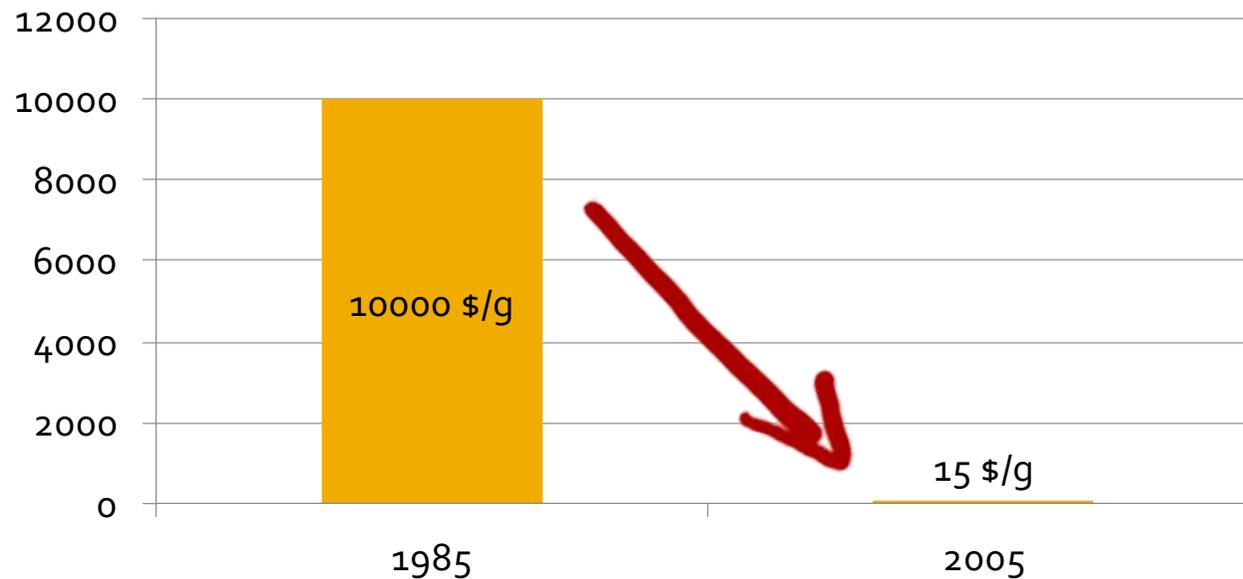


C₇₀



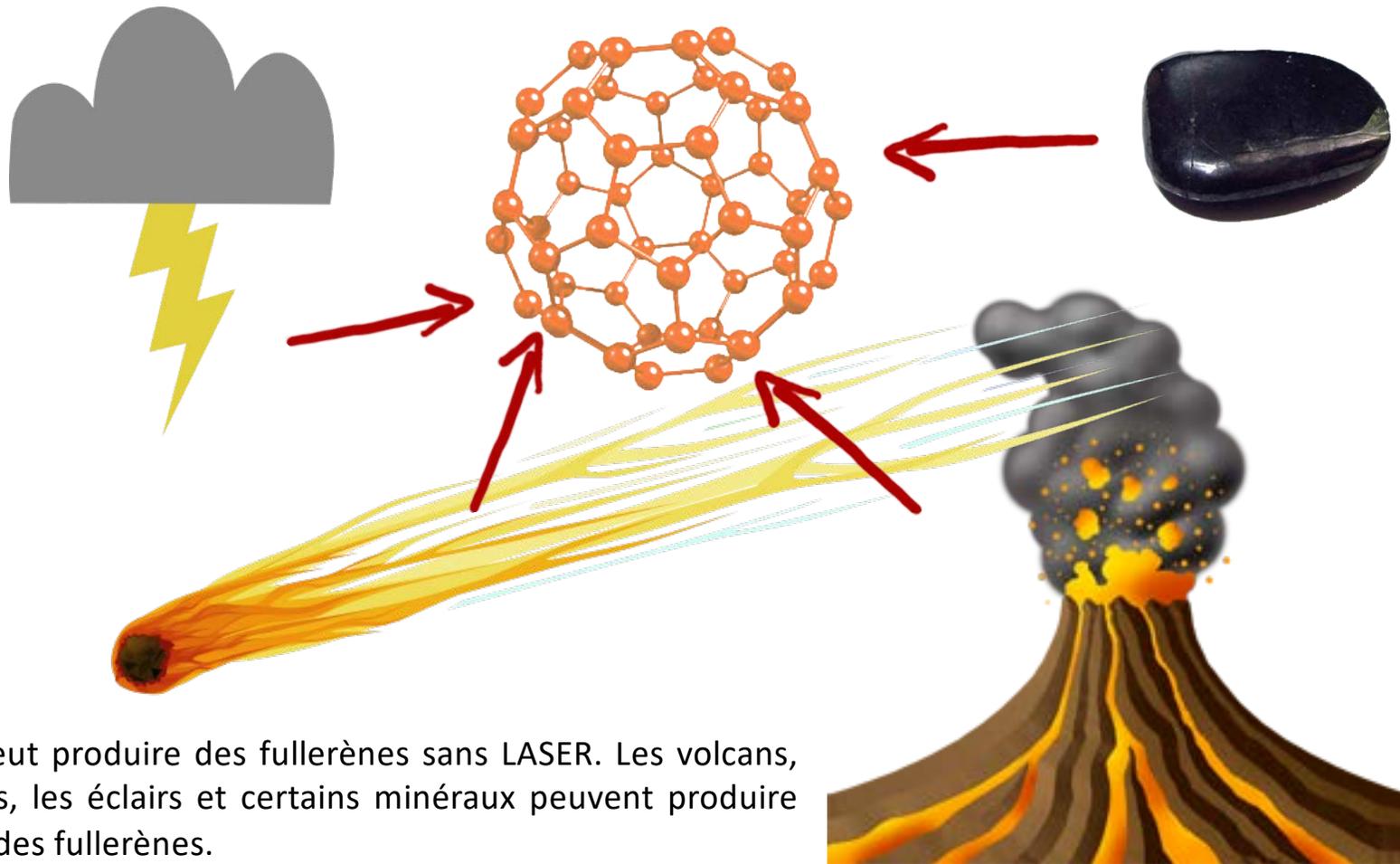
C₅₄₀

Le coût des fullerènes



Lorsque les fullerènes ont été découverts, le coût d'un gramme de ces composés était de 10 000 \$. En 2005, en raison de l'amélioration des méthodes de production, le coût est tombé à 15 \$ par gramme.

Les fullerenes dans la nature

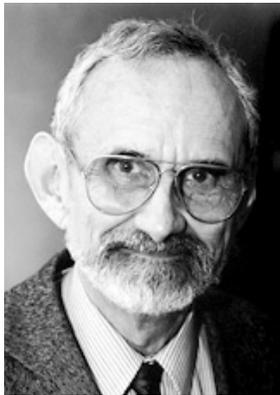


La nature peut produire des fullerènes sans LASER. Les volcans, les météores, les éclairs et certains minéraux peuvent produire ou contenir des fullerènes.

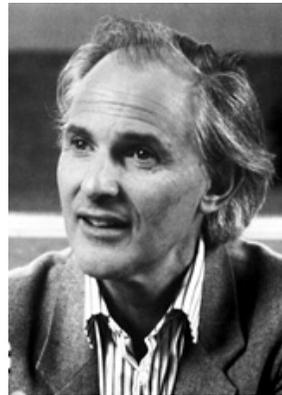
Synthèse des fullerènes

Évaporation du graphite avec un LASER

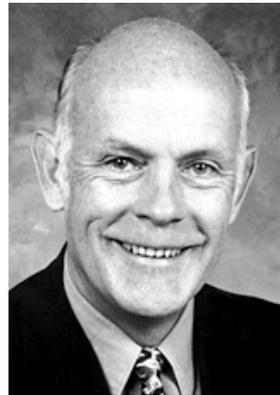
1985



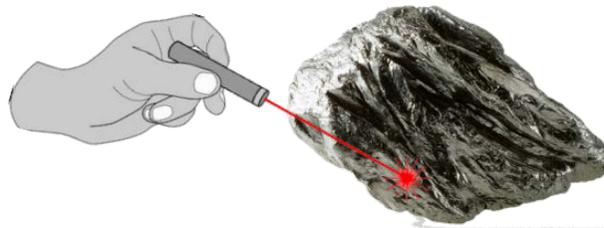
Robert Curl



Harry Kroto



Richard Smalley

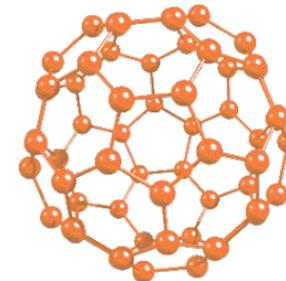


LASER

Graphite



traces de



C60

La première méthode de synthèse des fullerènes est basée sur l'action d'un LASER sur le graphite. Le résultat n'était pas très bon, car il ne produit que des traces de fullerènes.

Evaporation thermique du graphite

1990



Wolfgang
Krätschmer



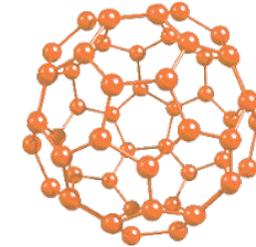
Lowell D. Lamb



Konstantinos
Fostiropoulos

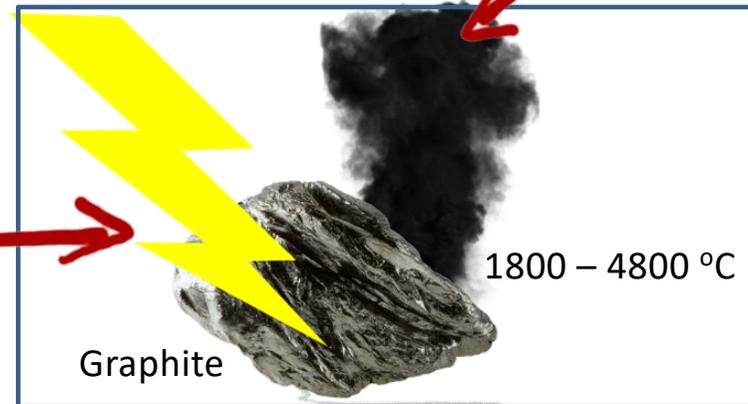


Donald Huffman



3-12 %

Atmosphère
d'hélium



Graphite

1800 – 4800 °C

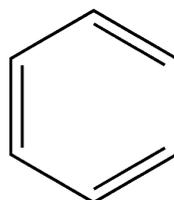
Dans les années 1990, une équipe de recherche dirigée par W. Kratschmer et D. Huffman a trouvé une meilleure méthode pour la synthèse des fullerènes. Ils ont mis du graphite dans une atmosphère d'hélium et ont conduit à des températures élevées ce matériau en utilisant l'électricité. 3-12% de la suie formée contenait des fullerènes.

Brûlage et pyrolyse de composés carbonés

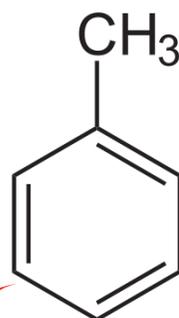
1999



Eiji Osawa



Benzène

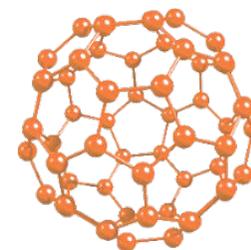


Toluène



Acétylène

6 %



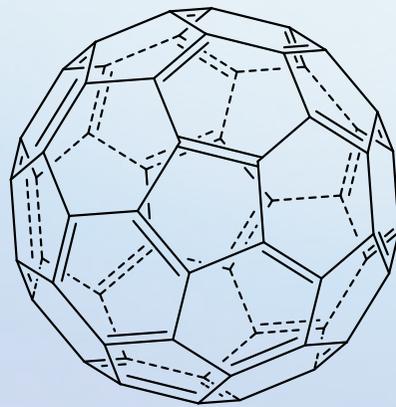
1600 – 4600 °C

Les scientifiques ont recherché d'autres moyens de produire des fullerènes. E. Osawa a constaté que la combustion contrôlée de composés tels que le benzène, le toluène et l'acétylène peut produire des fullerènes.

Fullerènes

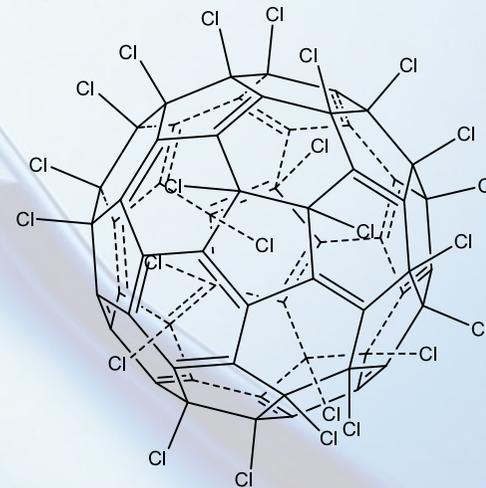
Réactions, propriétés, faits intéressants ...

Fullerènes + halogènes = ?



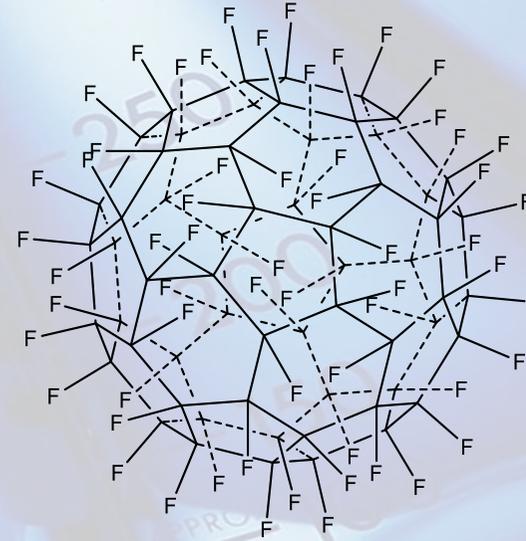
+ Cl_2

$C_{60}Cl_{24}$



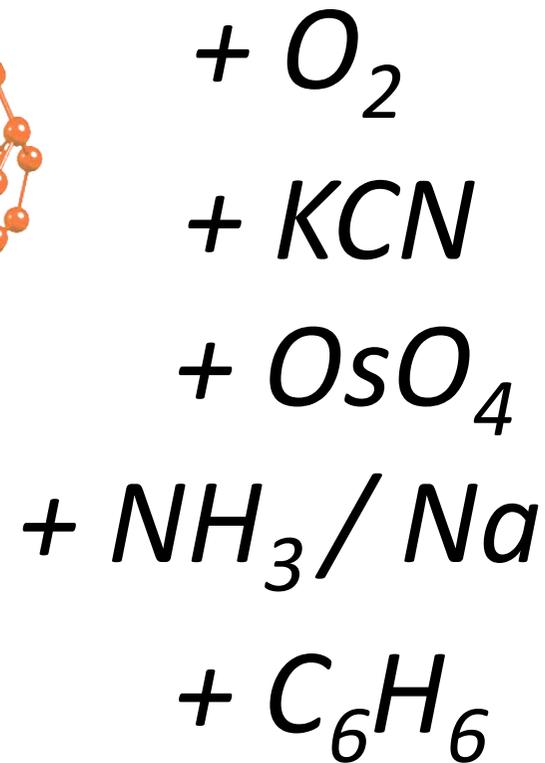
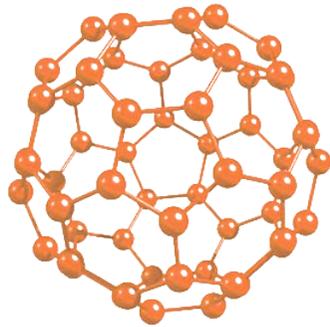
+ F_2

$C_{60}F_{60}$



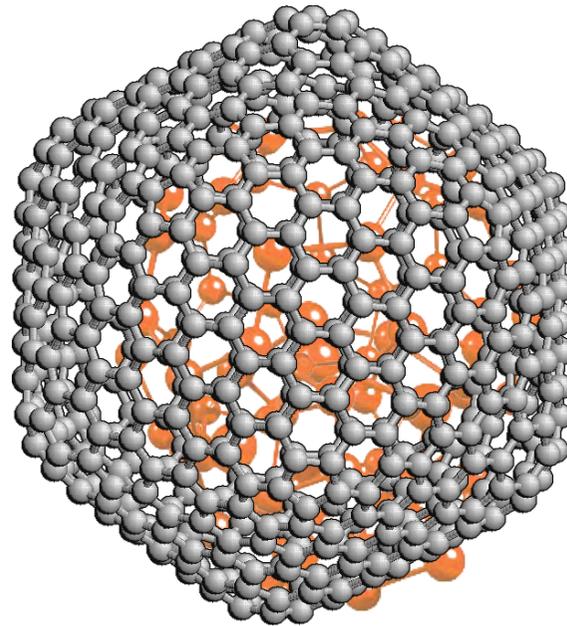
Bien que les fullerènes semblent des composés très bizarres, ils peuvent entrer en réaction avec divers composés. Les halogènes tels que le chlore et le fluor réagissent très bien, entraînant certains composés apparentés aux hérissons.

Propriétés chimiques des fullerènes



Les fullerènes peuvent réagir avec divers composés tels que l'oxygène, le cyanure de potassium, le tétraoxyde d'osmium, l'ammoniaque et le benzène.

Fullerènes dans des fullerènes



Les scientifiques ont proposé de créer des fullerènes dans des fullerènes qui pourraient avoir des propriétés spéciales. Il n'a pas encore été possible d'obtenir de telles structures.

Inception ? Déception. Pour l'instant.

Fullerènes dans l'espace



Bernard H. Foing



Pascale Ehrenfreund

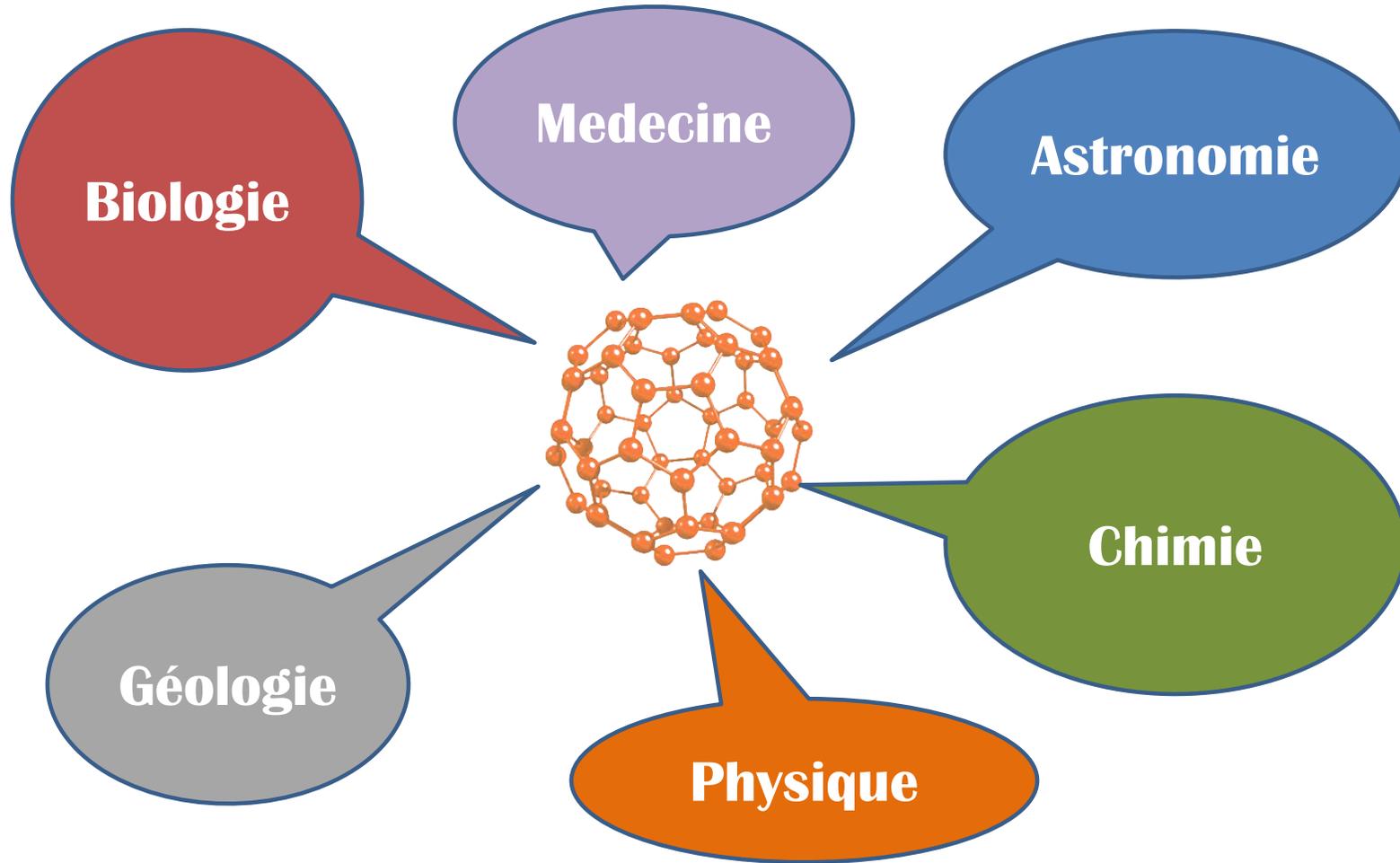
Les scientifiques Bernard Foing et Pascale Ehrenfreund avec le télescope Spitzer (NASA) ont fait une découverte inattendue pour beaucoup d'entre nous: les fullerènes existent dans l'espace!



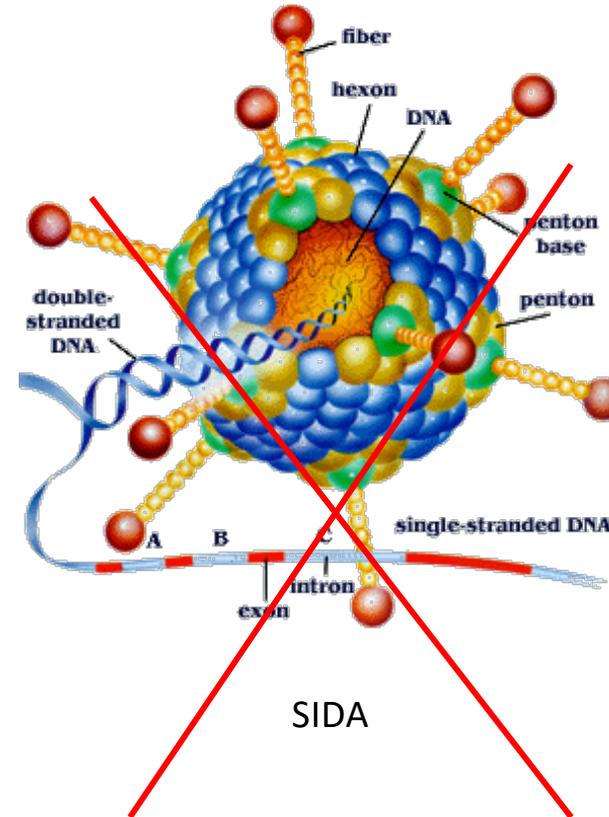
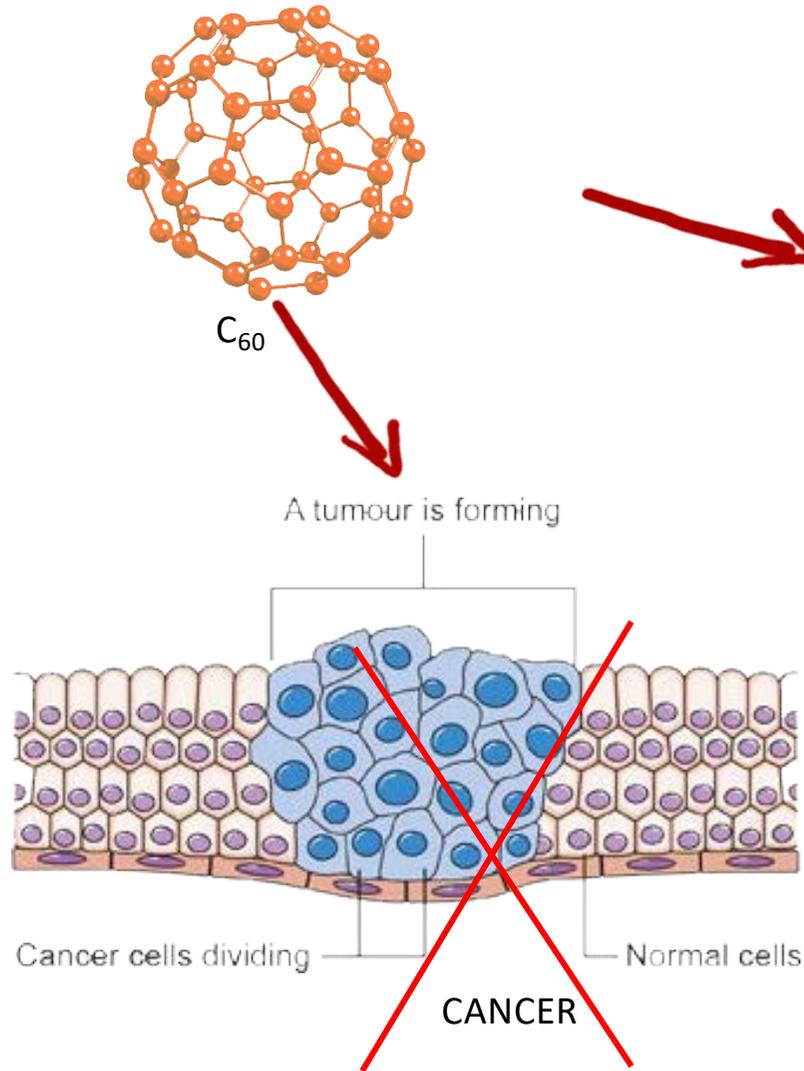
Nebula Tc1

Domaines connexes des fullerènes

Bien que notre connaissance des fullerènes soit très récente par rapport à d'autres structures chimiques, ils sont déjà utilisés dans différents domaines:



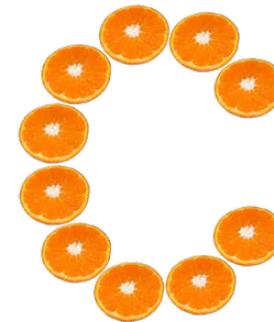
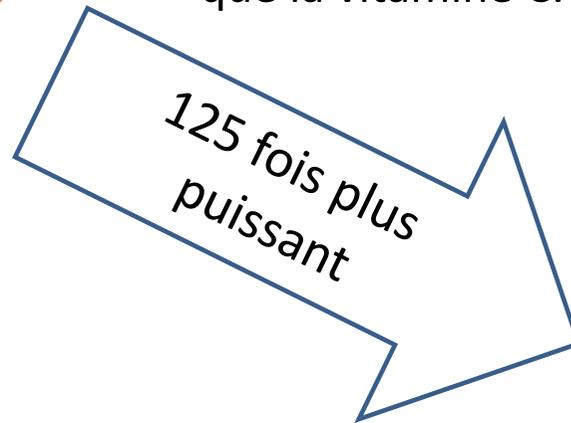
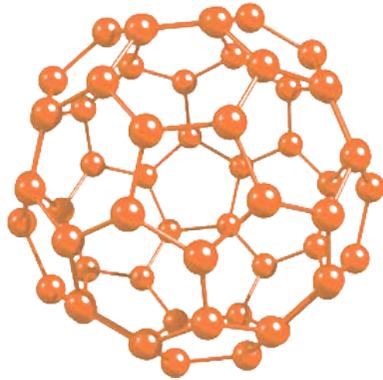
Fullerènes en médecine



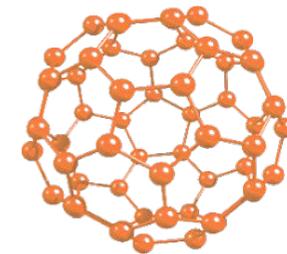
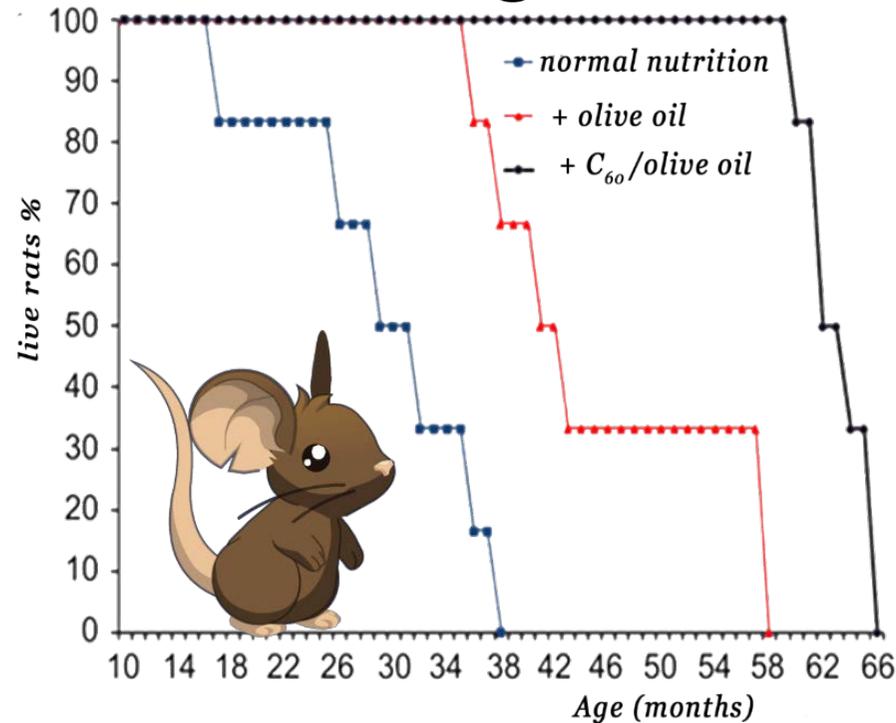
Les études sur les fullerènes ne s'arrêtent pas. Récemment, des chercheurs ont découvert que les fullerènes peuvent aider à guérir les patients atteints du cancer et du sida. Des tests sont en cours et il est possible qu'à l'avenir ces molécules merveilleuses permettent à l'humanité d'oublier ces maladies graves.

Fullerènes - antioxydants

Des études sur les fullerènes par rapport aux divers composés nécessaires à l'organisme, tels que les vitamines, montrent que les fullerènes ont une action antioxydante 125 fois plus forte que la vitamine C.



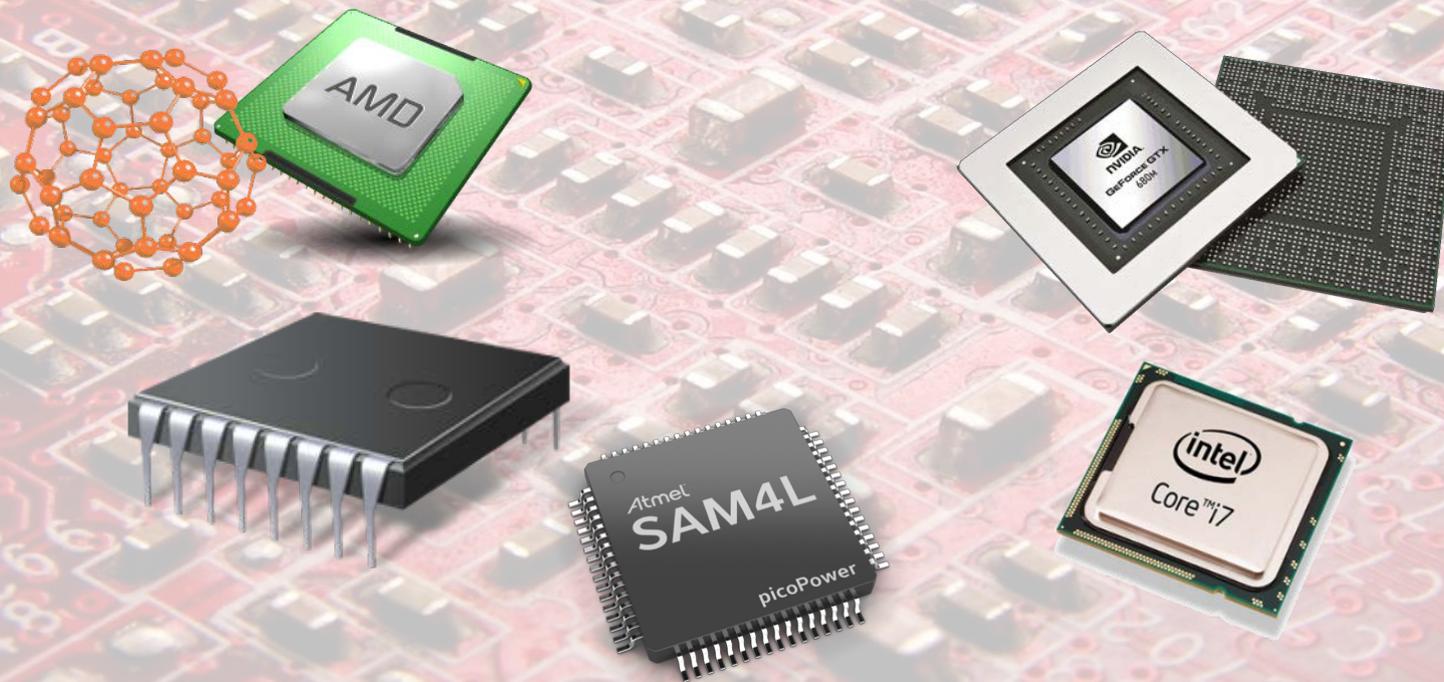
Les fullerènes allongent la durée de vie



Vitamin A?

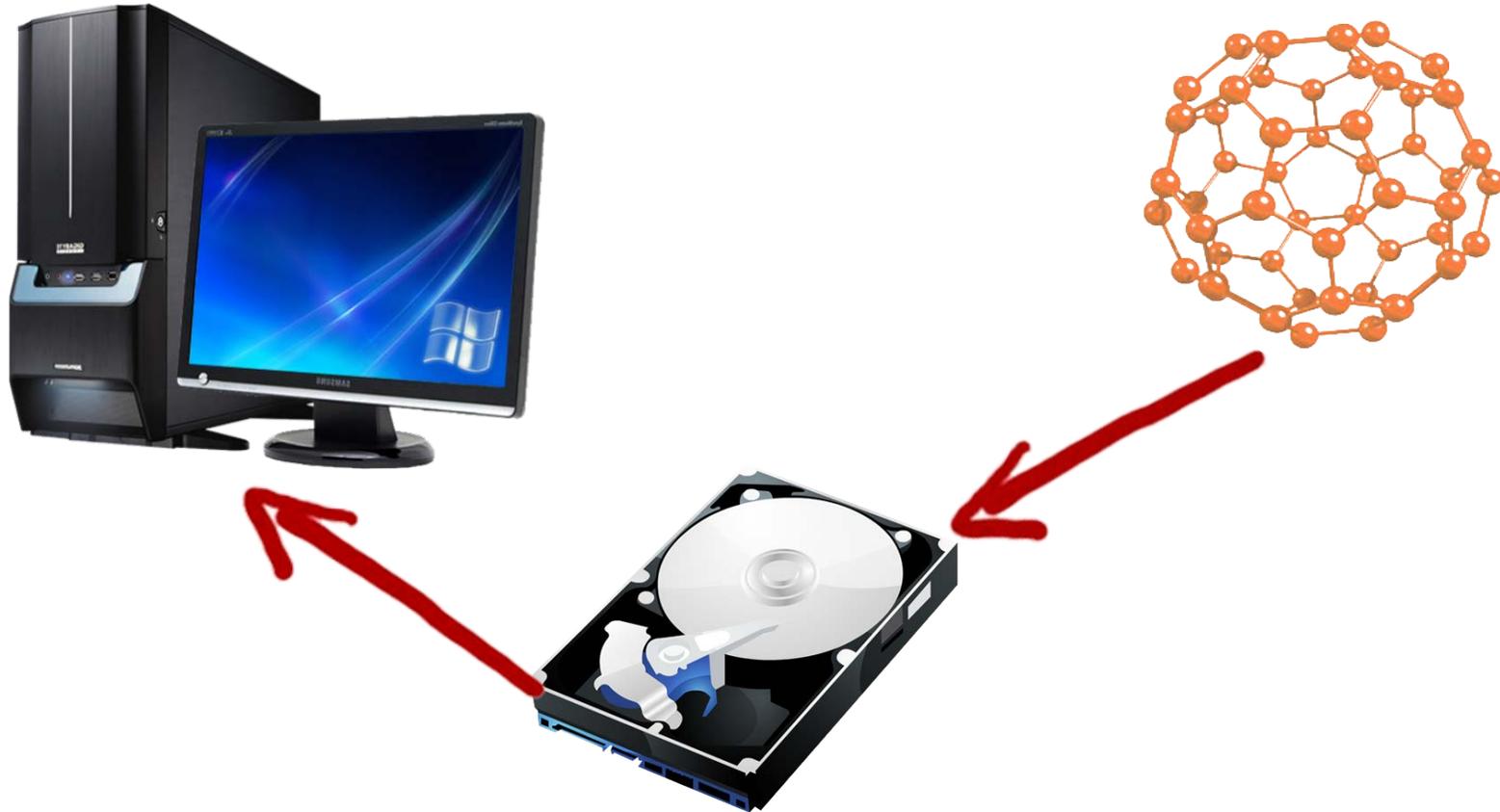
Les fullerènes peuvent prolonger la vie. Des expériences sur des souris ont montré que les souris qui avaient dans leur nourriture de l'huile d'olive dopée aux fullerènes vivaient presque 2 fois plus longtemps que les souris qui mangeaient normalement. Les scientifiques pensent qu'il est possible que les fullerènes puissent activer la vitamine A d'une manière inhabituelle.

Fullerènes en nanotechnologie



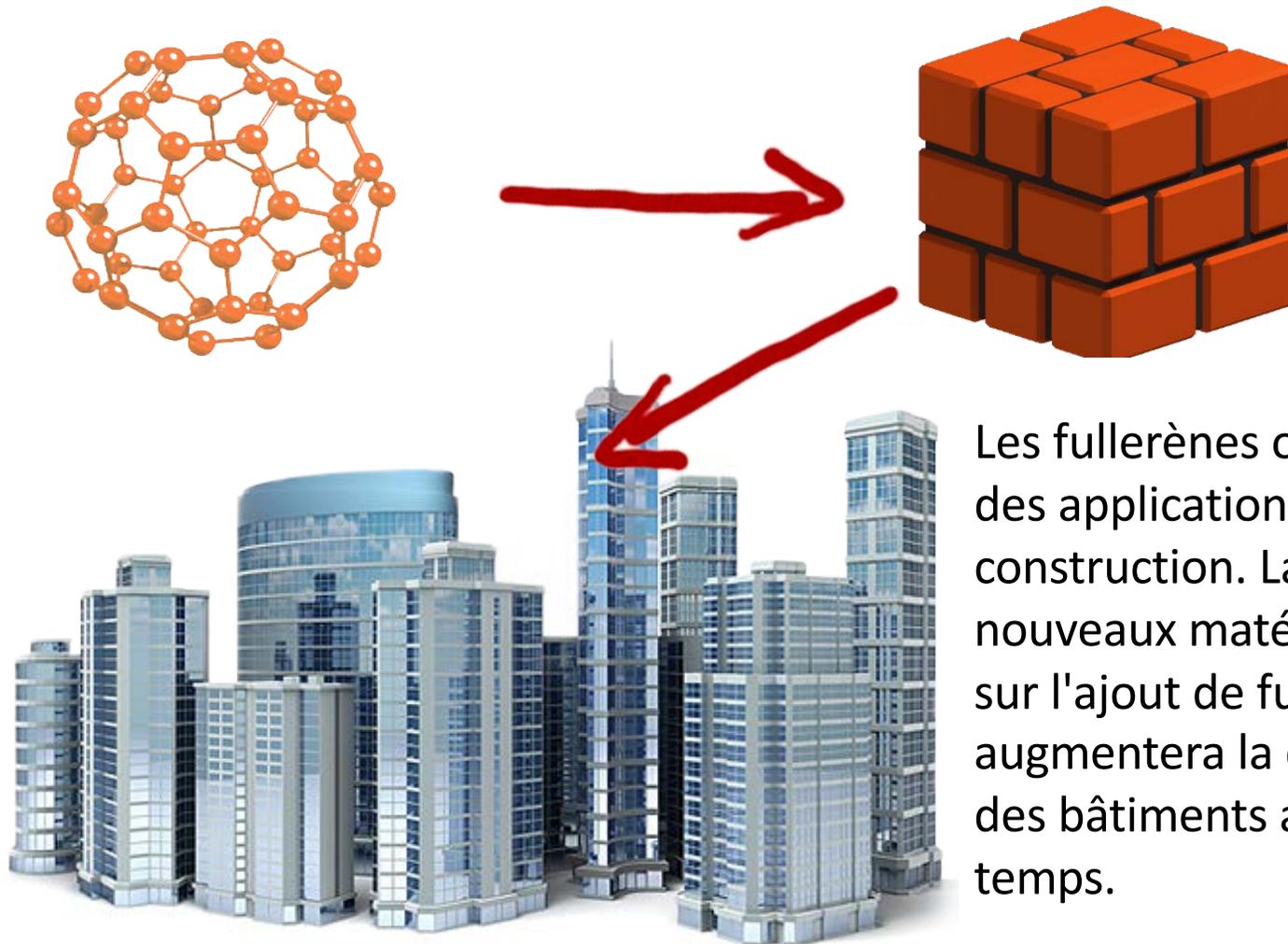
La nanotechnologie utilise des fullerènes dans la fabrication de diverses puces et microcircuits. Les grandes entreprises pourraient les utiliser pour créer des équipements de nouvelle génération.

Des dispositifs de stockage d'informations plus efficaces



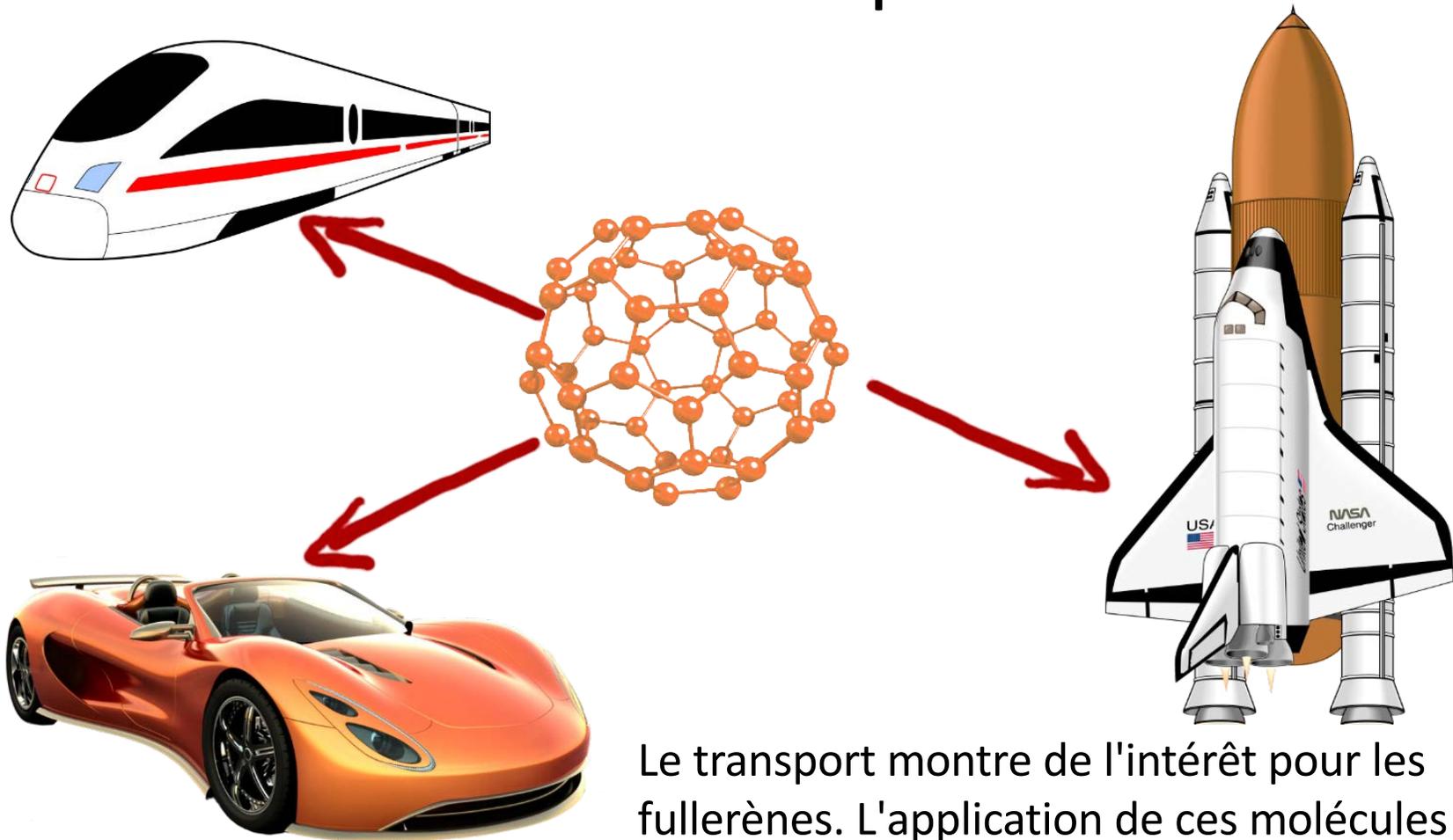
Les Fullerenes sont entrés dans le domaine de la technologie de l'information. On espère qu'ils permettront d'augmenter la densité de stockage des disques durs.

Matériaux modifiés par les fullerènes



Les fullerènes ont trouvé des applications dans la construction. La création de nouveaux matériaux basés sur l'ajout de fullerènes augmentera la durabilité des bâtiments au fil du temps.

Dans les transports



Le transport montre de l'intérêt pour les fullerènes. L'application de ces molécules dans divers alliages pourrait diminuer les processus de dégradation des matériaux.

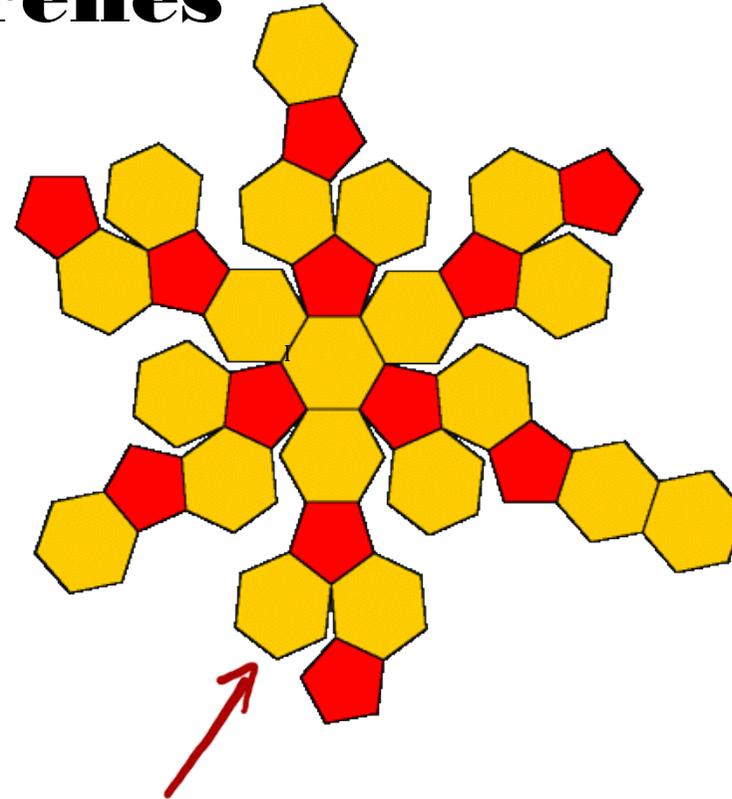
Matériaux optiques



Si vous avez des lunettes de soleil ou un télescope, il est possible qu'ils contiennent des fullerènes. Dans le cas des lunettes de soleil, les fullerènes servent à protéger les yeux.

Fullerènes

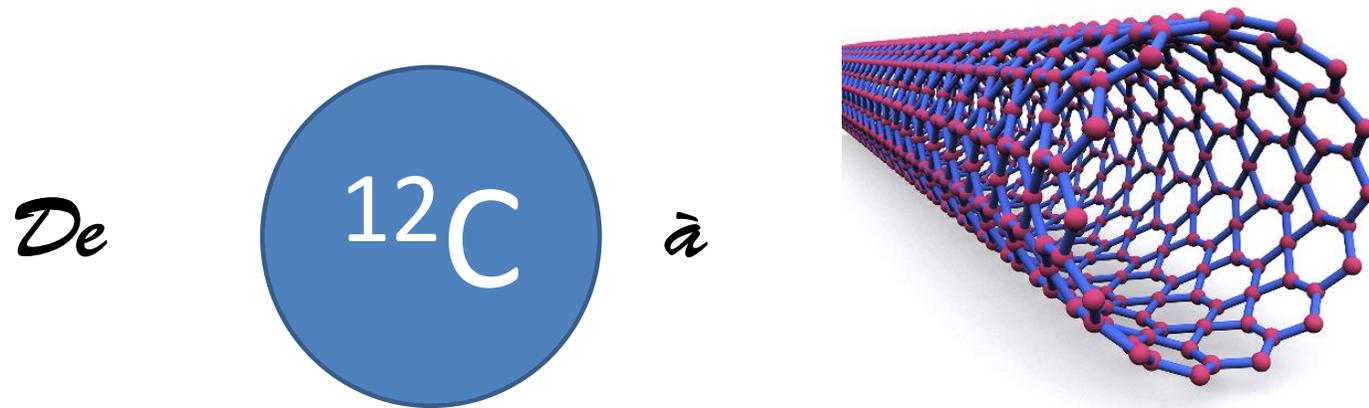
- Essayez de modéliser pour l'impression 3D la structure unitaire du buckyball C₆₀ fullerene, en utilisant ce que vous avez appris sur sa structure, jusqu'à présent.
- La structure fullerène C₆₀ contient 20 hexagones et 12 pentagones de carbone liés ensemble en coordination. Chaque pentagone de carbone est connecté à cinq hexagones de carbone. La structure dépliée est illustrée à droite.
- Si vous ne pouvez pas l'imprimer en 3D, imprimez-le en 2D sur du papier glacé, puis créez la structure 3D en pliant le papier.



Unité de structure de fullerène C₆₀

- Après avoir imprimé et obtenu le modèle 3D de la structure fullerène C₆₀, analysez les angles et les longueurs des liaisons et essayez d'observer la rigidité / flexibilité donnée par la structure du fullerène.

Nanomatériaux à base de carbone



Nanotubes

De la soie d'araignée aux nanotubes ?

La plupart d'entre nous n'aiment pas les araignées. Mais, nous savons tous qu'elles ont un talent incroyable: produire de la toile d'araignée.

Les araignées construisent leur toile en extrudant une soie d'araignée protéique hors de leurs filières.

La résistance à la traction de la soie d'araignée est supérieure au même poids que l'acier et a une élasticité beaucoup plus grande. La soie d'araignée est cinq fois plus résistante que l'acier! N'est-ce pas incroyable?

Certaines toiles d'araignées peuvent même résister à des vents de force ouragan!



Toile d'araignée



Rosée sur une
toile d'araignée

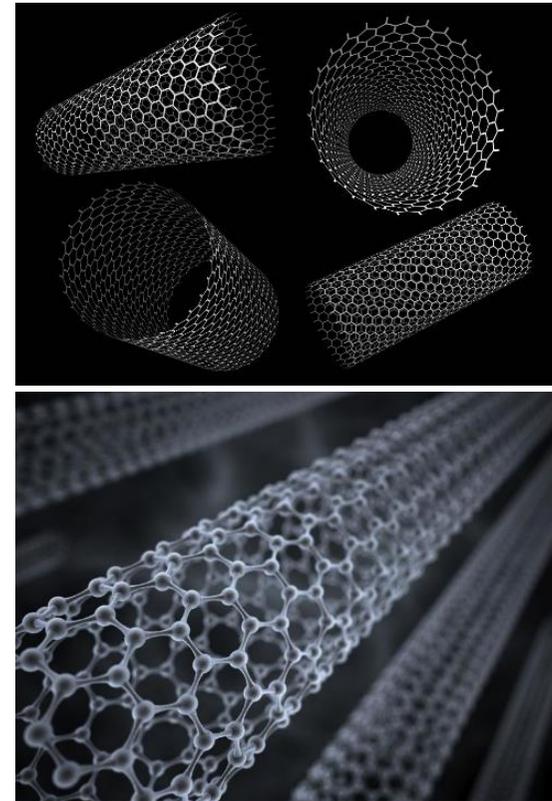
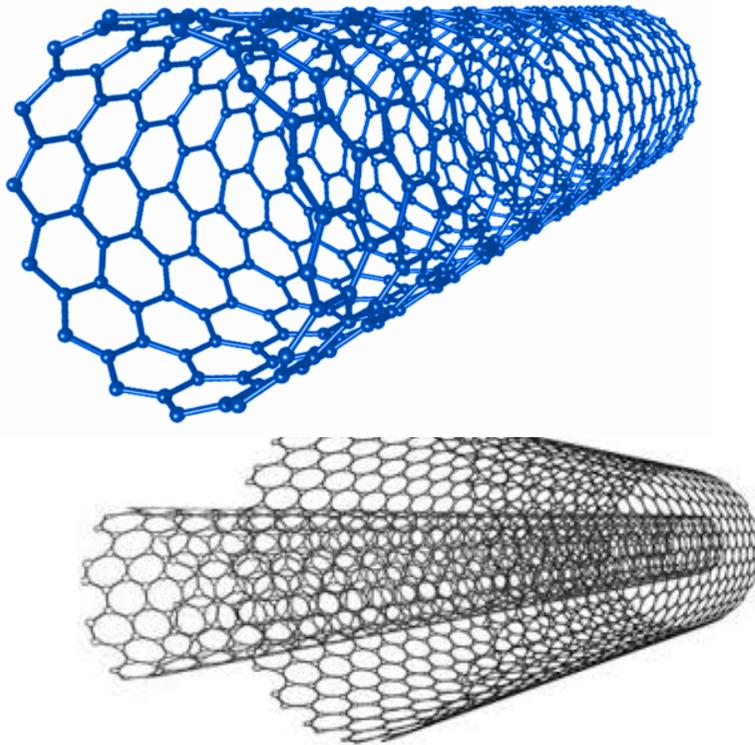
De la soie d'araignée aux nanotubes ?

En plus des producteurs de films, les propriétés étonnantes de la soie et des toiles d'araignée sont également des merveilles pour les scientifiques.

Les scientifiques ont d'abord étudié les propriétés de la soie d'araignée et de la toile. Puis, comme d'habitude, ils ont décidé d'imiter la soie des araignées. Et, a découvert que le matériau le plus approprié pour imiter la soie des araignées est les «nanotubes de carbone».

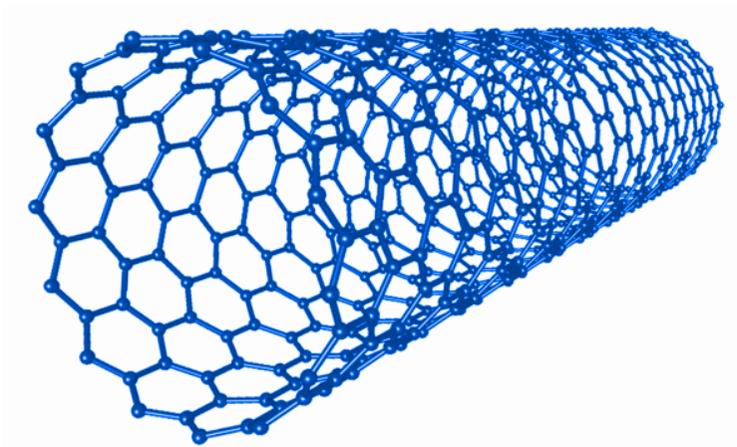


Que sont les nanotubes?



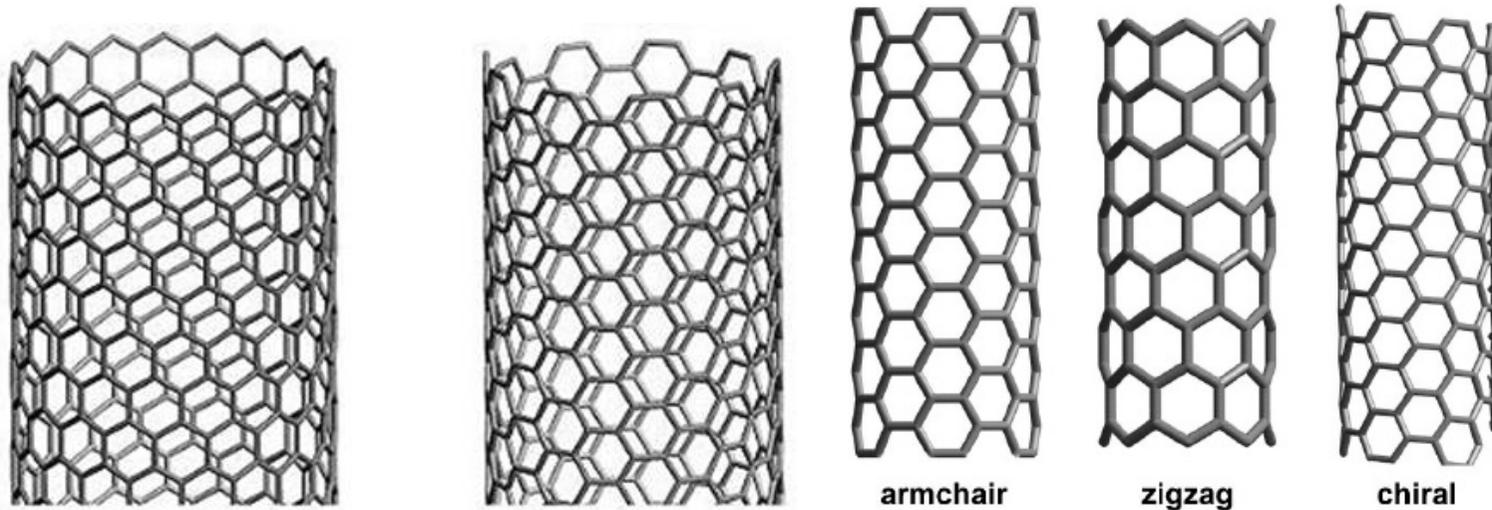
Les nanotubes de carbone sont des formes alternatives ou "allotropes" de carbone, tout comme le diamant et le graphène (mine de crayon), qui ont la forme de cylindres

Que sont les nanotubes?



Ils ont été découverts par le scientifique japonais Sumio Iijima en 1991.

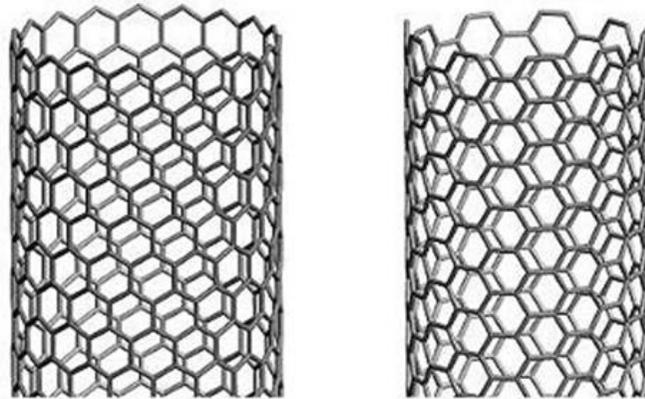
Structure des nanotubes



- La nature particulière du carbone se combine avec la perfection moléculaire des buckytubes (nanotubes de carbone à paroi unique) pour leur conférer des propriétés de matériau exceptionnellement élevées telles que la conductivité électrique et thermique, la résistance, la rigidité et la solidité.
- Aucun autre élément du tableau périodique ne se lie à lui-même dans un réseau étendu avec la force de la liaison carbone-carbone.
- Le pi-électron délocalisé donné par chaque atome est libre de se déplacer sur toute la structure, plutôt que de rester avec son atome donneur, donnant naissance à la première molécule à conductivité électrique de type métallique.
- Les vibrations de liaison carbone-carbone à haute fréquence fournissent une conductivité thermique intrinsèque supérieure à celle du diamant.

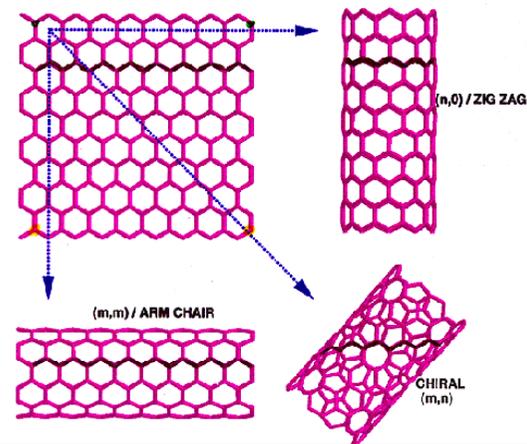
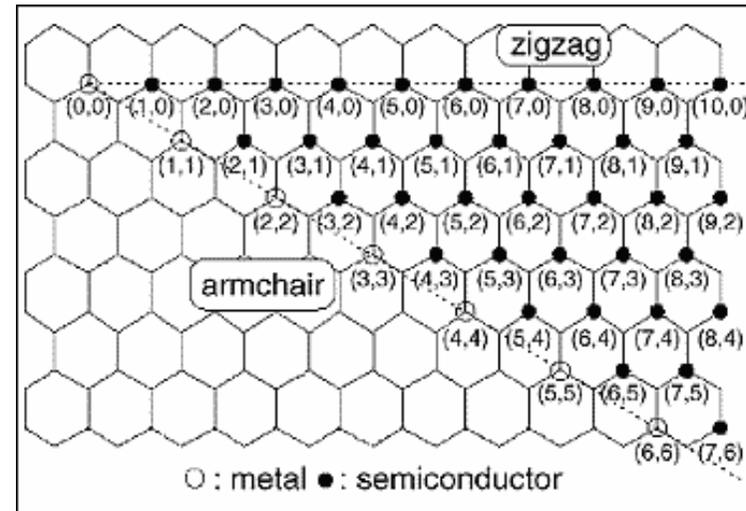
Structures des Buckytube

- Les buckytubes sont des nanotubes de carbone à paroi unique, dans lesquels une seule couche de graphite - graphène - est enroulée dans un tube sans soudure.
- Le graphène est constitué d'une structure hexagonale comme du grillage de poulailler. Si vous imaginez enrouler du graphène ou du grillage dans un tube sans soudure, cela peut être accompli de différentes manières.
- Par exemple, les liaisons carbone-carbone (les fils dans le grillage de poulailler) peuvent être parallèles ou perpendiculaires à l'axe du tube, résultant en un tube où les hexagones tournent autour du tube comme une ceinture, mais sont orientés différemment.
- Alternativement, les liaisons carbone-carbone n'ont pas besoin d'être parallèles ou perpendiculaires, auquel cas les hexagones s'enrouleront autour du tube avec un pas dépendant de la façon dont le tube est enveloppé. La figure ci-dessous illustre ces points:



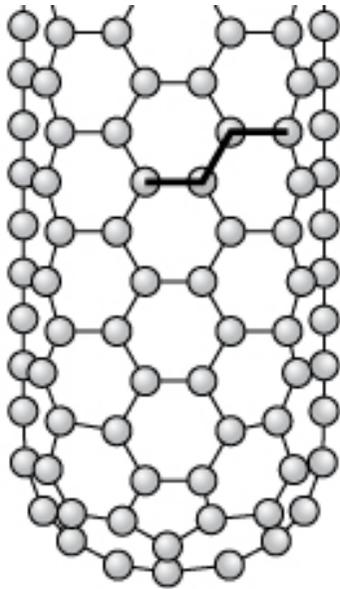
Convention de nom

- Il existe une convention d'étiquetage simple pour distinguer les tubes emballés différemment les uns des autres.
- La cartographie spécifie le nombre de vecteurs unitaires nécessaires pour connecter deux atomes dans le réseau hexagonal plan pour former un tube sans soudure.
- Ces nombres spécifient un "vecteur" pour la cartographie, communément exprimé par (m, n) , où m et n sont des entiers.
- Ces numéros constituent un "nom" unique pour un tube. Tout tube "nommé" $(n, 0)$ a des liaisons carbone-carbone qui sont parallèles à l'axe du tube et forment, à une extrémité ouverte, un motif en "zig-zag"; ces tubes sont appelés tubes "zig-zag".

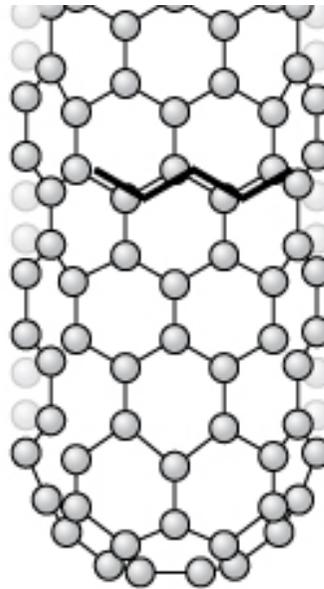


Convention de nom

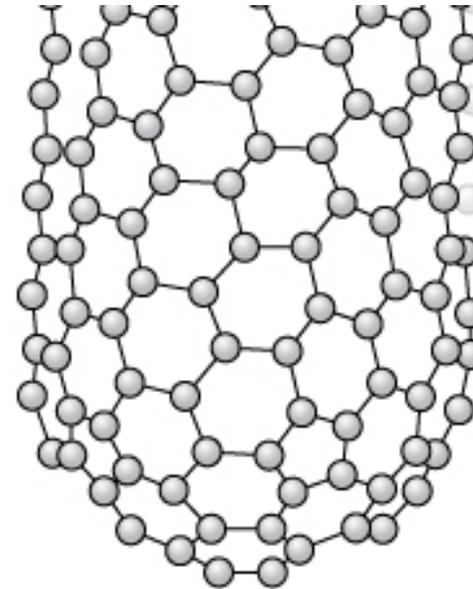
- Les tubes nommés (n, n) , où les deux nombres entiers sont égaux, ont des liaisons carbone-carbone qui sont perpendiculaires à l'axe du tube, et sont souvent appelés tubes "fauteuil". Ces deux types de base sont achiraux, ce qui signifie qu'ils n'ont pas d'image miroir distincte, comme les mains gauche et droite.
- Tous les autres tubes, nommés (m, n) , où m n'est pas égal à n et aucun n'est égal à 0, sont chiraux et ont des variantes pour gauchers et droitiers.



Armchair



Zigzag



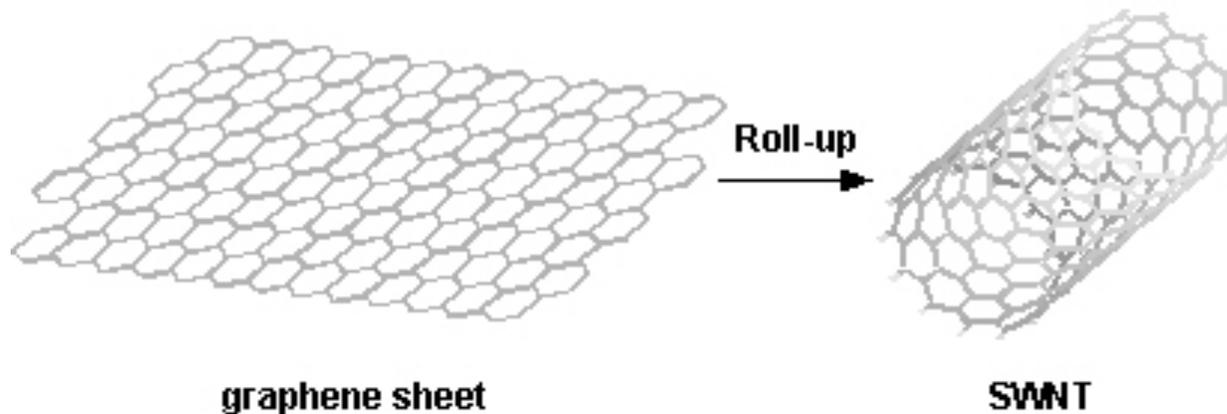
Chiral

Structures des nanotubes de carbone

- Les CNT sont classés en nanotubes à paroi simple (SWCNT) et en nanotubes à parois multiples (MWCNT).

Nanotubes de carbone à paroi simple (SWCNT):

Lorsqu'une feuille de graphène est enroulée, un CNT à paroi unique est formé.



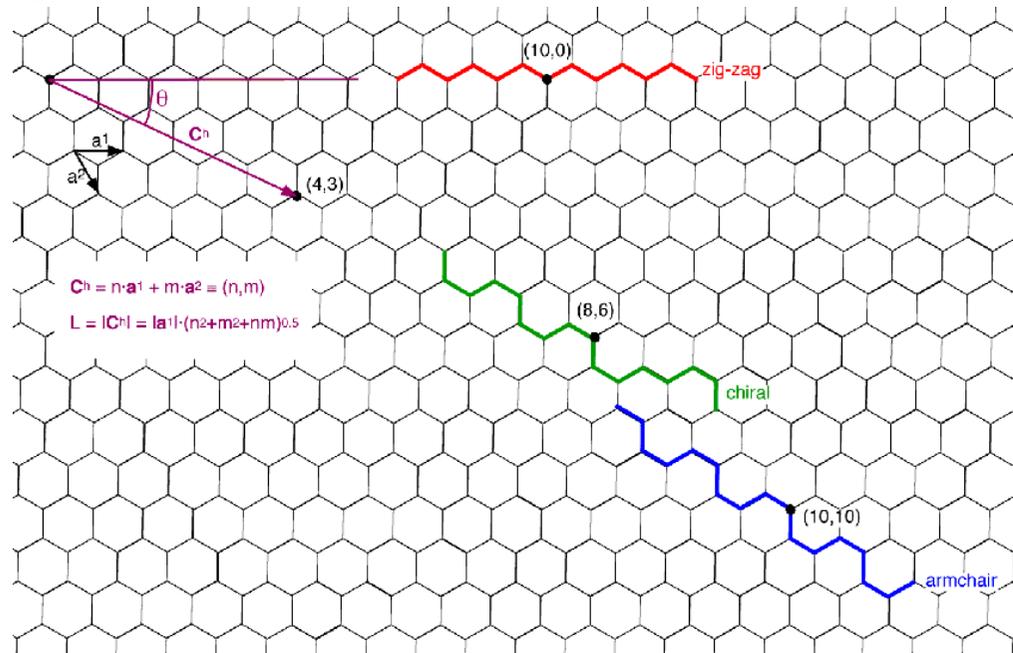
Nanotube à paroi simple. (Copyright Professor Charles M. Lieber Group)

Les feuilles de graphène sont laminées selon des angles spécifiques et discrets. La combinaison de l'angle de roulement et du rayon détermine les propriétés des CNT. Les produits sont regroupés en «Fauteuil», «Zigzag» et «Chiral».

Structures des nanotubes de carbone

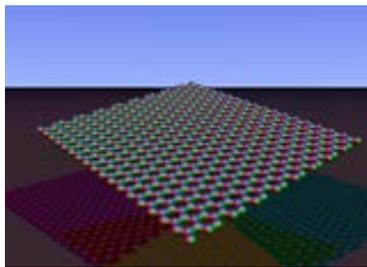
Fauteuil et Zigzag SWCNT:

Comme la feuille de graphène est enroulée le long d'un axe de symétrie, elle peut se terminer par des CNT en fauteuil ou en zigzag.

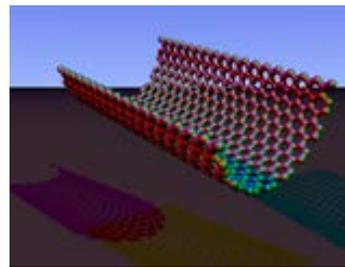


Axis to roll up the graphene sheet.⁽⁴⁾

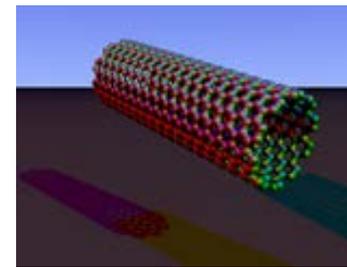
Structures des nanotubes de carbone



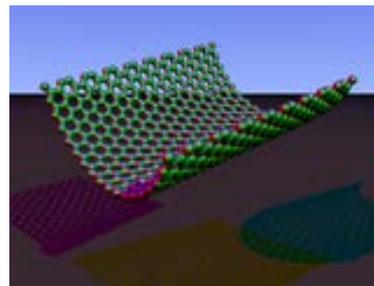
Nanoruban de graphène



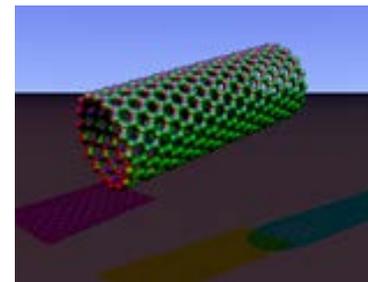
SWCNTs en fauteuil.⁽⁵⁾



Fauteuil



SWCNTs en zigzag⁽⁵⁾

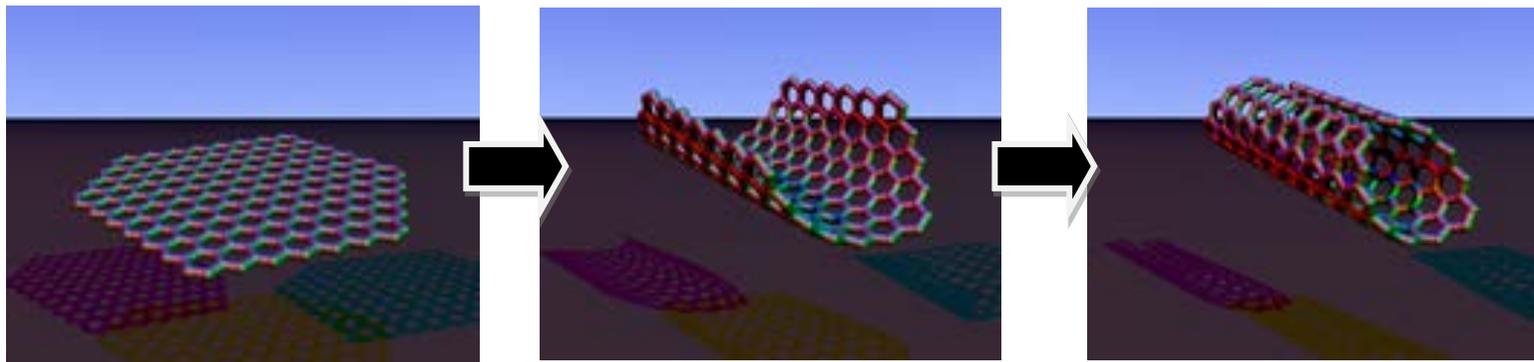


Zigzag

Structures des nanotubes de carbone

SWCNTs Chiraux:

Il est également possible d'enrouler la feuille dans une direction qui diffère d'un axe de symétrie: on obtient un nanotube chiral, dans lequel les atomes équivalents de chaque cellule élémentaire sont alignés sur une spirale.



Nanoruban de graphène

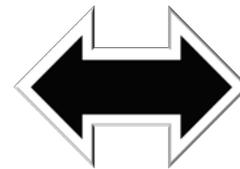
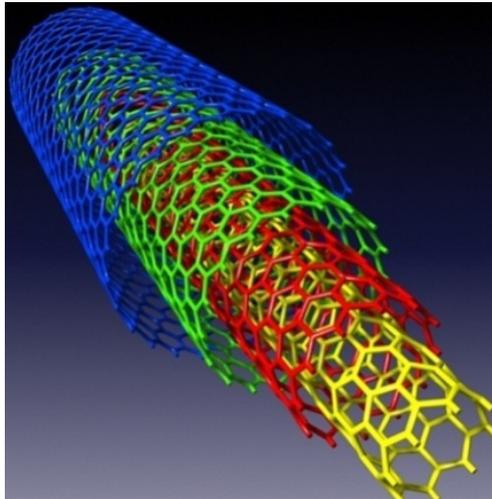
SWCNTs Chiraux.⁽⁵⁾

Chiral

Structures des nanotubes de carbone

CNTs à parois multiples:

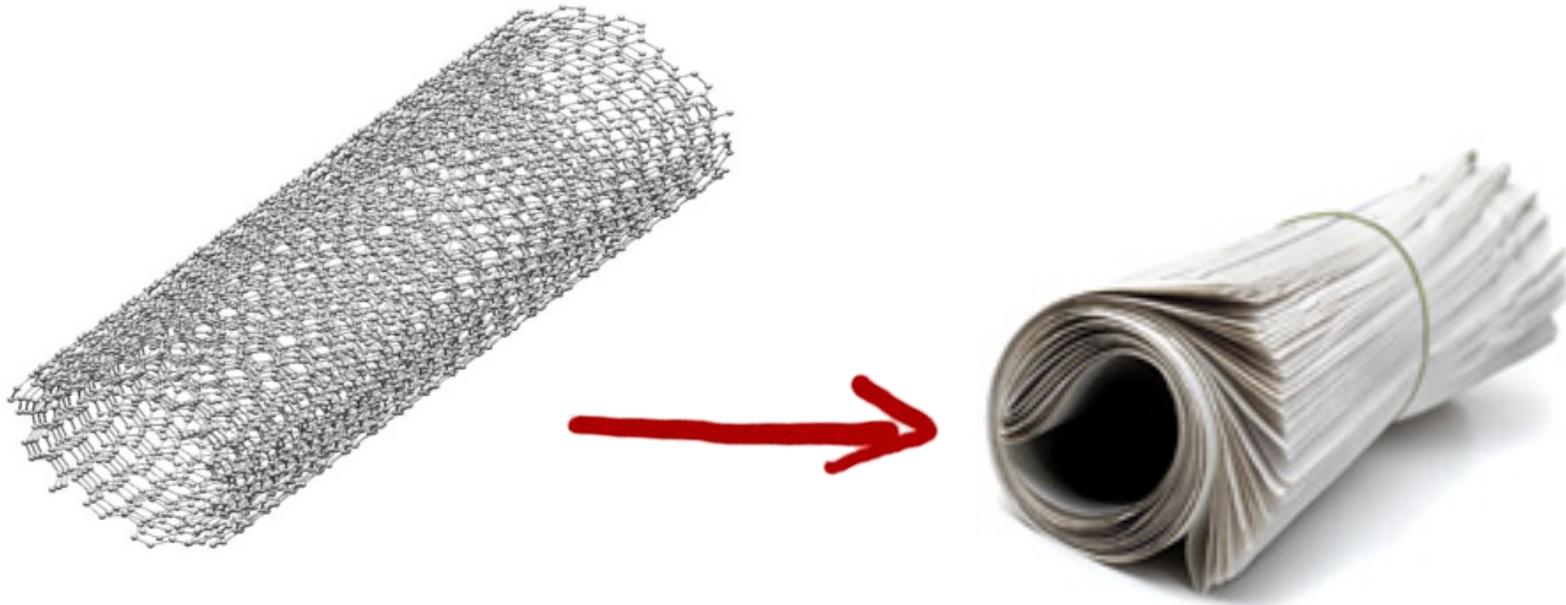
Les nanotubes à parois multiples (MWNT) sont constitués de plusieurs couches laminées (tubes concentriques) de graphène. Il existe deux modèles qui peuvent être utilisés pour décrire les structures de nanotubes à parois multiples. Dans le modèle de la poupée russe, les feuilles de graphite sont disposées en cylindres concentriques.



Nanotubes de carbone à parois multiples - modèle des poupée russe (MWCNT) (6)

Structures des nanotubes de carbone

Dans le modèle *Parchemin*, une seule feuille de graphite est enroulée autour d'elle-même, ressemblant à un rouleau de parchemin ou à un journal roulé.



Nanotubes de carbone à parois multiples - modèle parchemin.

Propriétés des différents types de tubes

La force de liaison entre les atomes de carbone confère aux nanotubes de carbone des propriétés mécaniques étonnantes.

Selon Young Modulus (une échelle de mesure de la rigidité), la rigidité des NTC est 5 fois plus élevée que celle de l'acier.

Les nanotubes peuvent être soit électriquement conducteurs soit semi-conducteurs, selon leur hélicité, conduisant à des fils et des composants électriques à l'échelle nanométrique. Ces fibres unidimensionnelles présentent une conductivité électrique aussi élevée que le cuivre, une conductivité thermique aussi élevée que le diamant, une résistance 100 fois supérieure à celle de l'acier à un sixième du poids et une contrainte élevée à la rupture. Tous les CNT en fauteuil présentent des propriétés métalliques et sont des semi-conducteurs d'électricité.

Propriétés des différents types de tubes

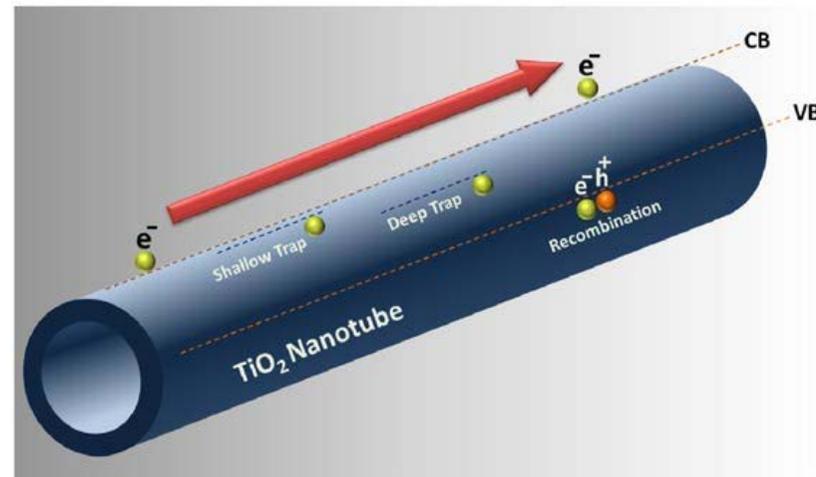
Les nanotubes de carbone présentent un certain nombre de propriétés extraordinaires, parmi lesquelles: conductivité électrique élevée, conductivité thermique élevée, résistance mécanique, résistivité / stabilité thermique

Taille	<ul style="list-style-type: none">• Diamètre SWNT 0.6-1.8 nm
Conductivité thermique	<ul style="list-style-type: none">• 6000 W/m K à température ambiante
Stabilité thermique	<ul style="list-style-type: none">• Dans le vide jusqu'à 28000C, dans l'air jusqu'à 10000C, selon la pureté
Densité	<ul style="list-style-type: none">• 1,33 – 1,4 g/cm³
Résistance à la traction	<ul style="list-style-type: none">• 45 Milliards de Pa
Flexibilité	<ul style="list-style-type: none">• Peut être largement déformé sans dommage et revient à la forme précédente. Les propriétés électriques changent.
Émissions de champ	<ul style="list-style-type: none">• Les matériaux émettant de la lumière peuvent être déjà activés à 1-3 V si la distance des électrodes est de 1 mm

Propriétés des différents types de tubes

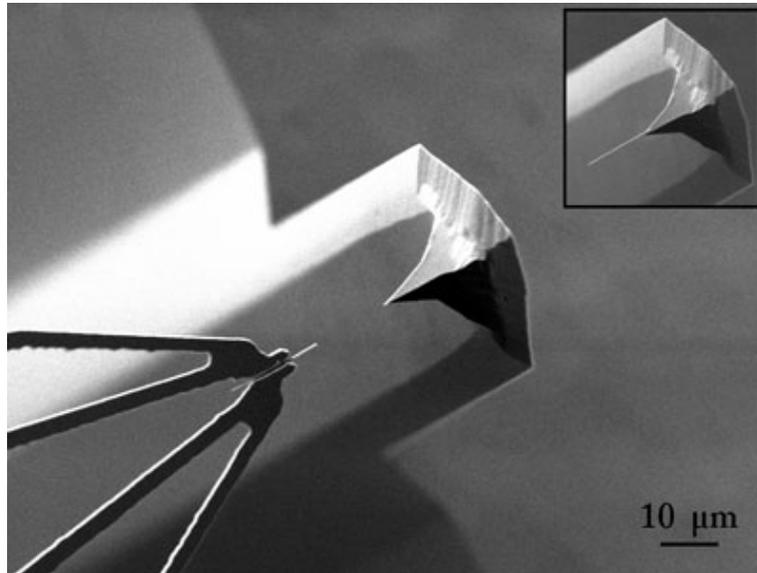
À bien des égards, les propriétés des tubes de différents types sont essentiellement les mêmes. L'exception à cela est dans leur conductivité électrique, où ces différences structurelles subtiles peuvent avoir des effets profonds. Par exemple, tous les tubes en fauteuil - c'est-à-dire où $m = n$ - ont une conductivité électrique vraiment métallique.

Ils transportent des électrons le long de l'axe du tube comme le font les métaux, sans un seul atome de métal dans leur structure! Ce comportement dans une molécule est sans précédent. En revanche, les autres tubes sont intrinsèquement semi-conducteurs, soit avec une très petite bande interdite de quelques meV, soit avec des bandes interdites modérées de l'ordre de 1 eV. La règle ici est que les tubes où $(n-m)$ est un multiple de 3 sont du type à petit espace, tandis que les autres ont des espaces moyens.

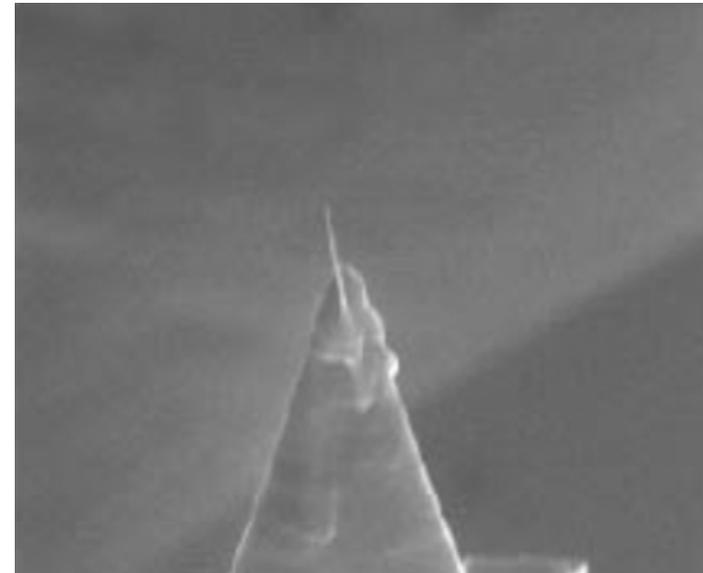


Domaines d'application des NTC:

Les nanotubes de carbone possèdent de nombreuses propriétés uniques qui en font des sondes AFM idéales. Leur rapport d'aspect élevé offre une imagerie fidèle des tranchées profondes, tandis qu'une bonne résolution est conservée en raison de leur diamètre à l'échelle nanométrique.



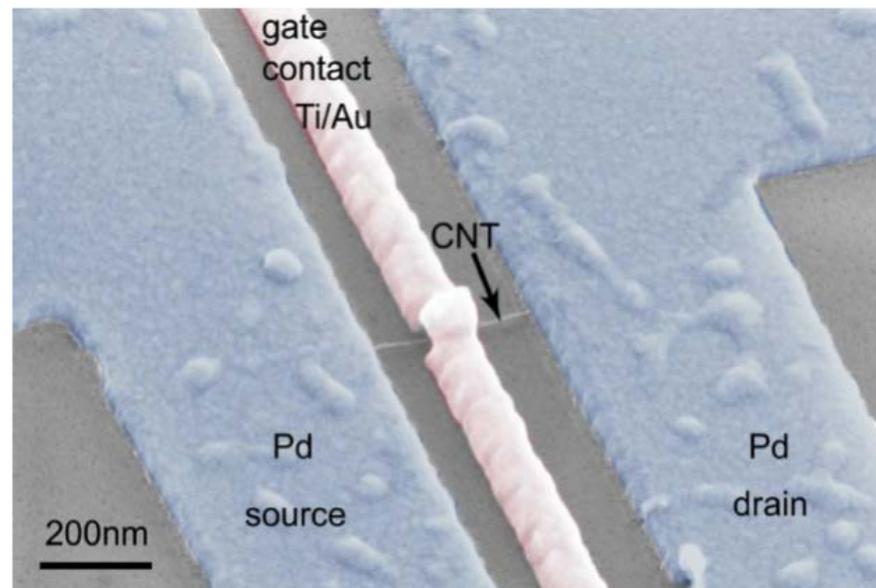
CNT-enhanced AFM super-tips
(Image: ÖzlemSardan, DTU).⁽⁷⁾



AFM Probe Tip.⁽⁸⁾

Domaines d'application des NTC:

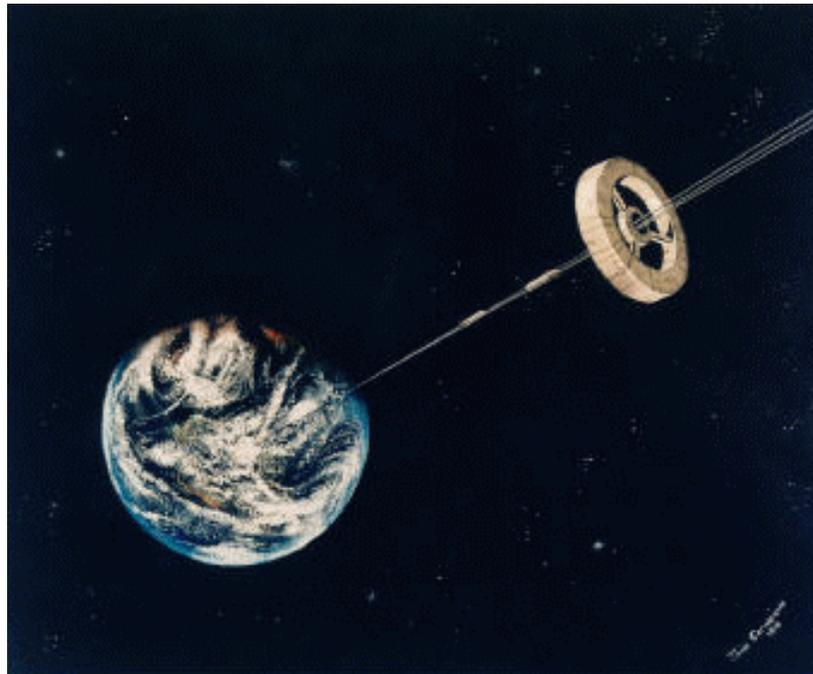
Les transistors à nanotubes de carbone exploitent le fait que les nanotubes à l'échelle nm (NT) sont des fils moléculaires prêts à l'emploi et peuvent être rendus dans un état conducteur, semi-conducteur ou isolant, ce qui les rend précieux pour la conception future de nanocomputer.



CNT utilisés dans les circuits. (9)

Domaines d'application des NTC:

Les nanotubes de carbone sont aujourd'hui très appréciés pour leurs futures applications électriques, thermiques et même sélectives en chimie. On pense que les NTC seront utilisés dans les ascenseurs spatiaux et comme matériau d'emballage de protection à utiliser autour des canalisations allant profondément sous la mer.



Ascenseur spatial⁽¹⁰⁾

Domaines d'application des NTC:

Les propriétés mécaniques et électriques fascinantes des nanotubes de carbone peuvent être exploitées dans de nombreuses applications, qui peuvent inclure des carrosseries de véhicules ou d'aéronefs légers et solides avec des propriétés de surveillance de la santé et d'auto-réparation in situ, des disques composites carbone-carbone supérieurs pour avions ou freins de voiture qui pourraient dissiper la chaleur plus efficacement, des pare-brise puissants et interactifs avec des propriétés de dégivrage.

Même une charge de quelques pour cent de nanotubes de carbone dans une matrice polymère pourrait permettre aux polymères non conducteurs de conduire l'électricité et de résoudre de nombreux problèmes d'électricité statique qui pourraient être une source d'incendie dans un véhicule.

Les nanotubes de carbone sont produits à l'aide de gaz d'hydrocarbures et de catalyseurs dans des conditions similaires à celles qui existent dans les systèmes d'échappement d'un véhicule. Il pourrait être possible de produire des nanotubes de carbone dans un échappement de véhicule en utilisant un catalyseur et en réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

Le corps intelligent en fibre de carbone / nanotube de carbone réduira le poids de la voiture et améliorera également les performances. Le corps pourrait également être imprégné d'époxy de nanotubes de carbone, ce qui donnera au corps des propriétés structurelles et de détection plus fortes.

Des matériaux composites de nanotubes de carbone pourraient être utilisés pour les fenêtres, les pare-brise, etc. Cela ajouterait de bonnes propriétés de conductivité électrique et permettrait au pare-brise et aux fenêtres d'être connectés à un chauffage et à la voiture de se dégivrer facilement et rapidement.

Les nanotubes de carbone utilisés dans le MMC pourraient réduire le poids d'un moteur et améliorer également les propriétés structurelles. Les nanomatériaux de carbone pourraient également être utilisés dans les piles à combustible et les batteries dans les voitures hybrides et propulsées par des énergies alternatives.

Des composites carbone-carbone nanotubes de carbone ont déjà été développés pour les applications de freinage dans l'industrie aérospatiale. Ces freins ajouteront une perte de poids supplémentaire et des performances améliorées.

Un manomètre à nanotubes pourrait être installé pour mesurer la pression d'air dans les pneus. La jauge pourrait être très précise en raison des propriétés électriques et mécaniques uniques des nanomatériaux.



Applications dans les transports

Domaines d'application des NTC:

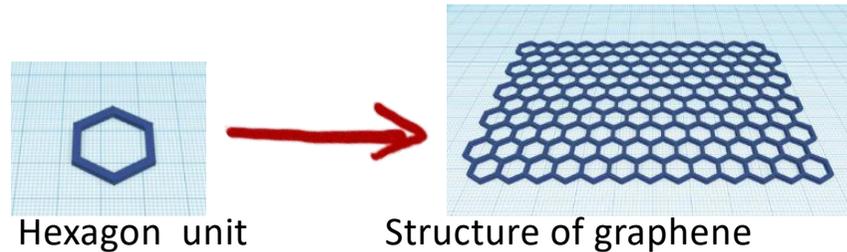
Dans une aile d'avion, la conductivité des nanotubes de carbone pourrait fournir une protection contre le dégivrage et l'éclairage avec une réduction de poids. Ils pourraient améliorer la résistance d'un corps dans un avion ou un véhicule, réduire le poids et rendre un véhicule militaire ou un avion militaire électromagnétiquement invisible. Des nanotubes de carbone et des nanofibres pourraient être ajoutés aux métaux afin d'améliorer les propriétés et rendre les moteurs plus légers, ils pourraient être utilisés dans les pneus au lieu du noir de carbone pour améliorer les propriétés d'usure et fournir une détection de la pression dans la ville.



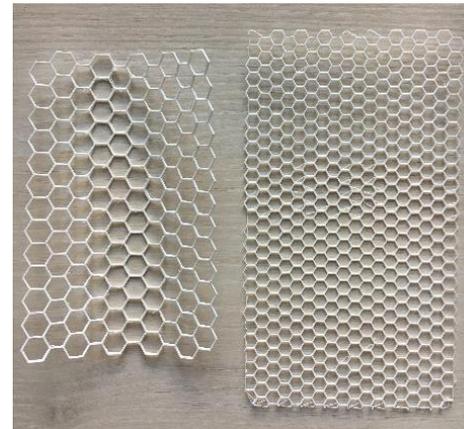
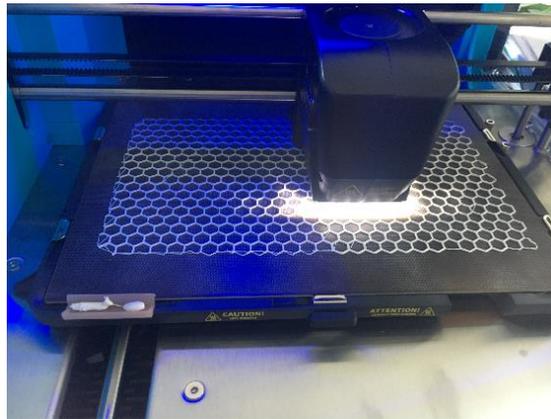
Applications dans les transports

Obtenir votre propre modèle de nanotubes:

- En partant de l'unité hexagonale, essayez de modéliser pour l'impression 3D la structure unitaire du graphène, en utilisant ce que vous avez appris sur les angles entre les atomes et les longueurs de liaison jusqu'à maintenant.



- Imprimez votre modèle de graphène à l'aide de l'imprimante 3D. Vous devriez obtenir des objets comme ceux des figures ci-dessous:



Obtenir votre propre modèle de nanotubes:

- Après l'impression, essayez de vérifier la flexibilité de la structure. Observez la grande différence entre cette structure et celle en diamant? Pensez aux liens entre la structure et les propriétés!

