

Résumé de cours M2 Microélectronique
Module : Physique des composants semi-conducteurs 3

Prof. Abdelhamid BENHAYA

Directeur du Laboratoire d'Electronique Avancée
Responsable Salle Blanche

Département d'Electronique
Faculté de Technologie
Université Batna 2

Domaines d'intérêt:

Technologie des semi-conducteurs
(Matériaux et dispositifs photovoltaïques)

e-mail: a.benhaya@univ-batna2.dz
benhaya_abdelhamid@yahoo.fr

Tel: +213 (0)7 73 87 37 84



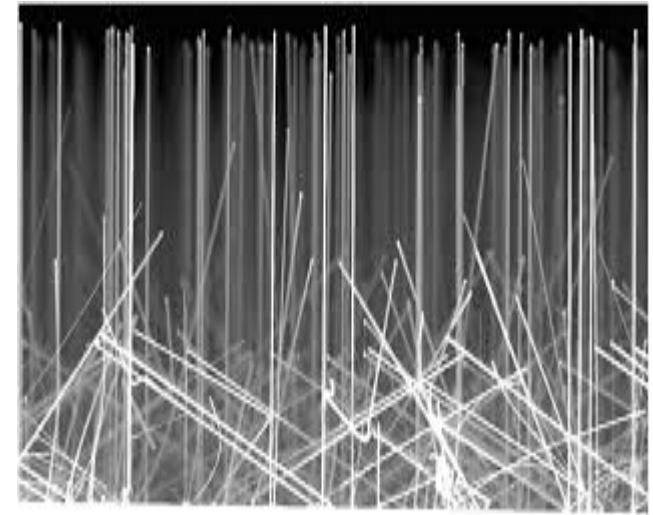
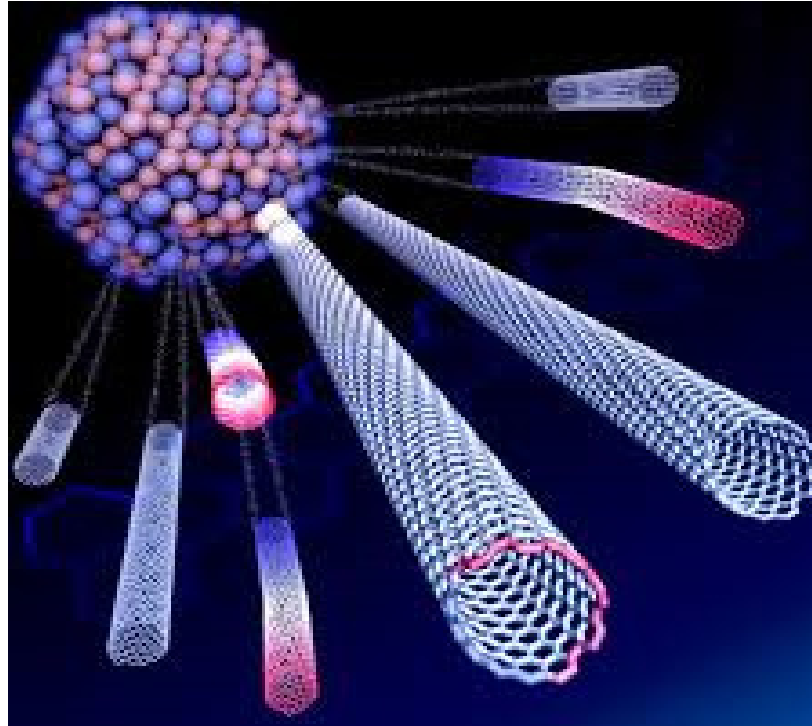
BIBLIOGRAPHIE

Langue Anglaise

1. Marius Grundmann, The Physics of Semiconductors (Chapter 13), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
2. <https://nanohub.org/resources/5346>
3. <https://nanohub.org/courses/FON2>

Langue Française

1. H. MATHIEU, physique des semi-conducteurs et des composants électroniques (Chapitres 10 et 12) , Dunod, 2001.
2. <https://www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/>



2.5. Nanotubes et Nanofils

2.5.0. Aperçu sur le graphène

APERÇU SUR LE GRAPHÈNE

Définition

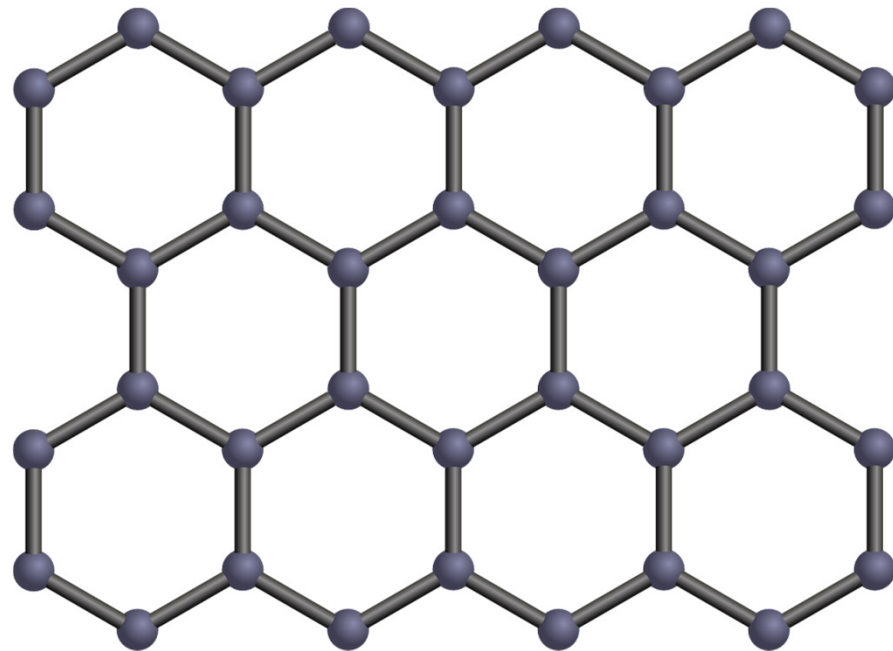
Le graphène est un matériau bidimensionnel cristallin, une des formes allotropiques du carbone, dont l'empilement à 3 dimensions donne le graphite.

Théorie du graphène

Mise en place par Philip R. Wallace dès 1947.

Préparation

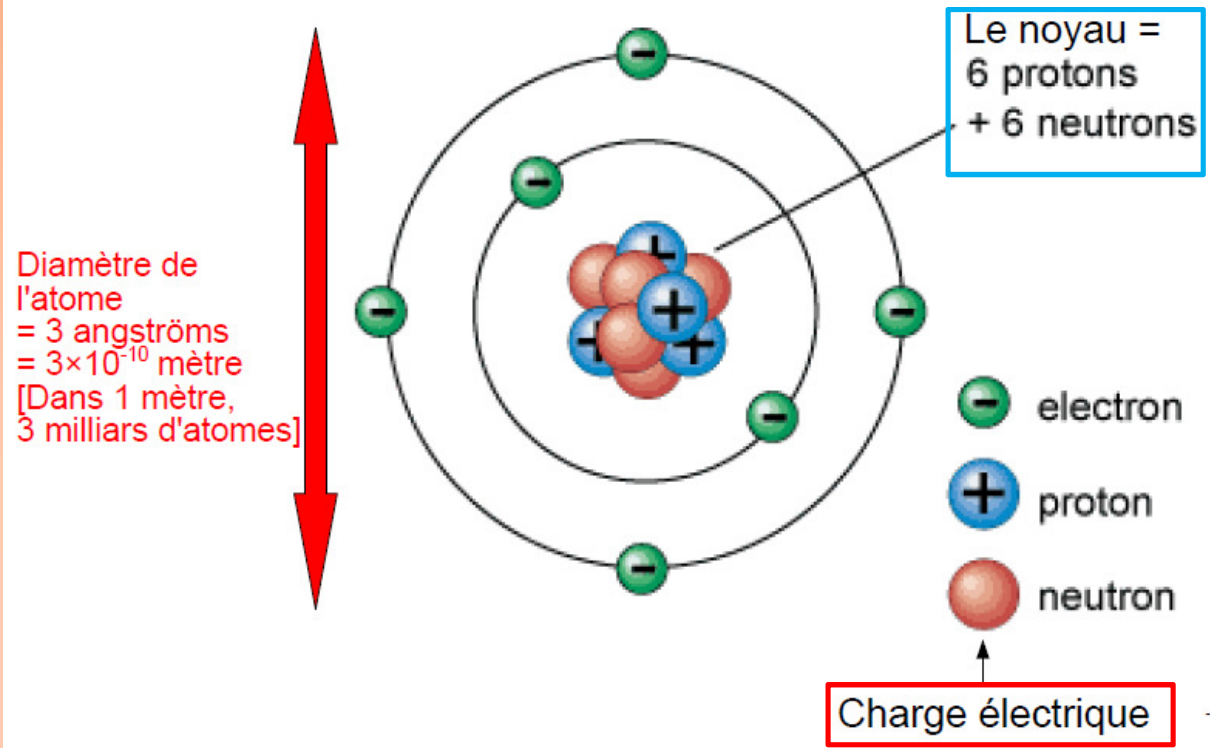
- Graphène exfolié:** extraction mécanique du graphite.
- Graphène épitaxié:** chauffage d'un cristal de SiC



APERÇU SUR LE GRAPHÈNE

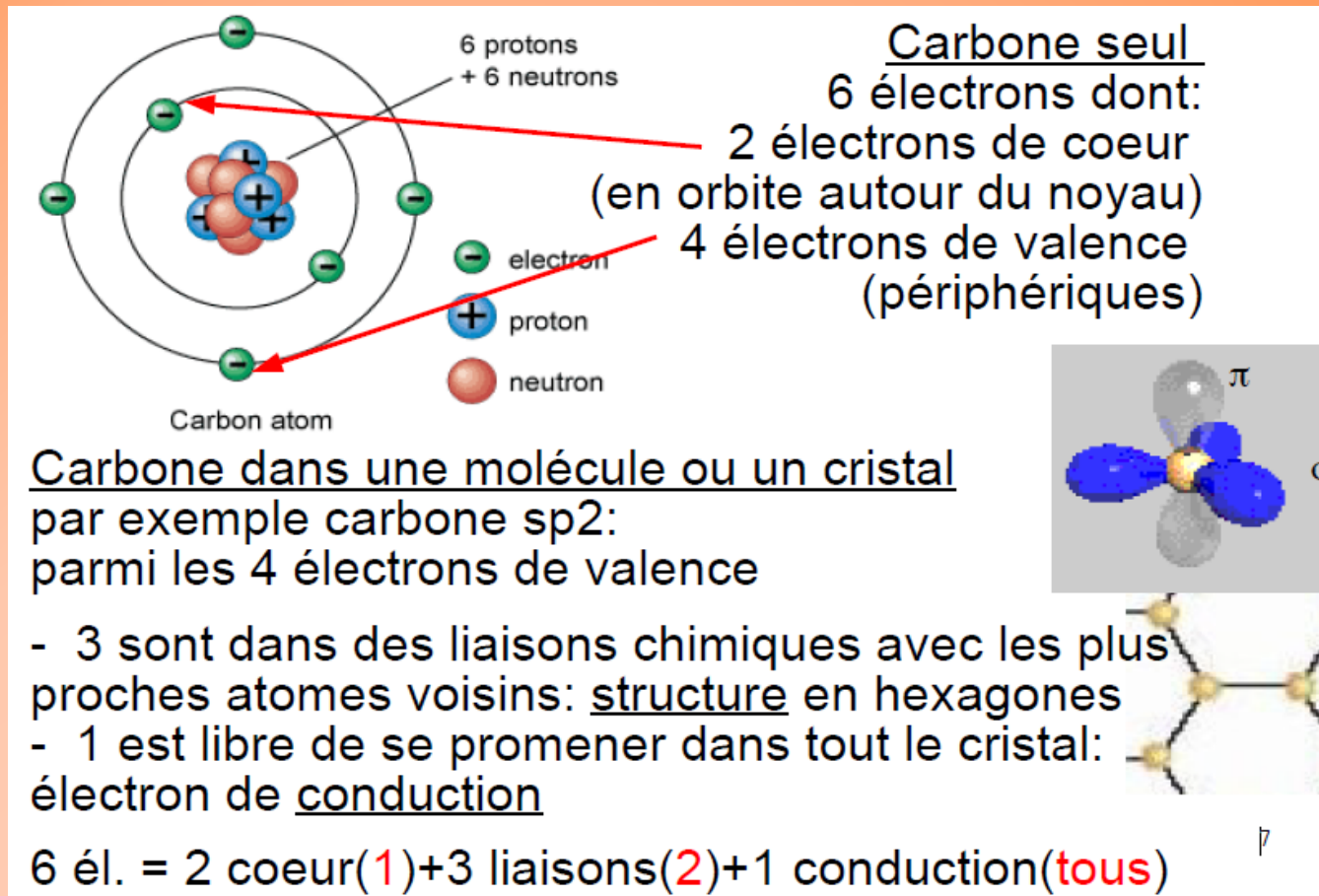
Atome de carbone

Carbone = l'atome à 6 électrons

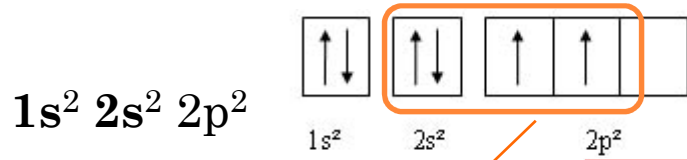


APERÇU SUR LE GRAPHÈNE

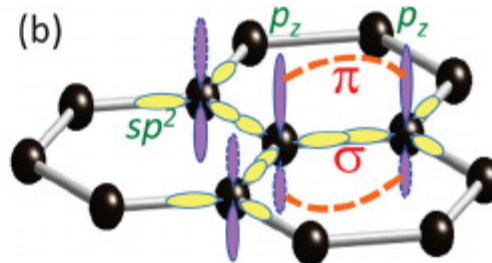
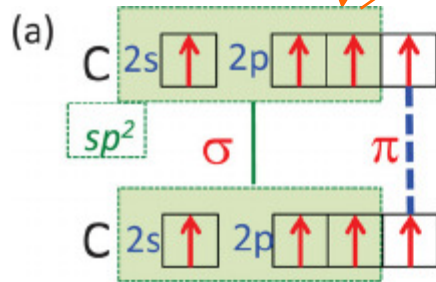
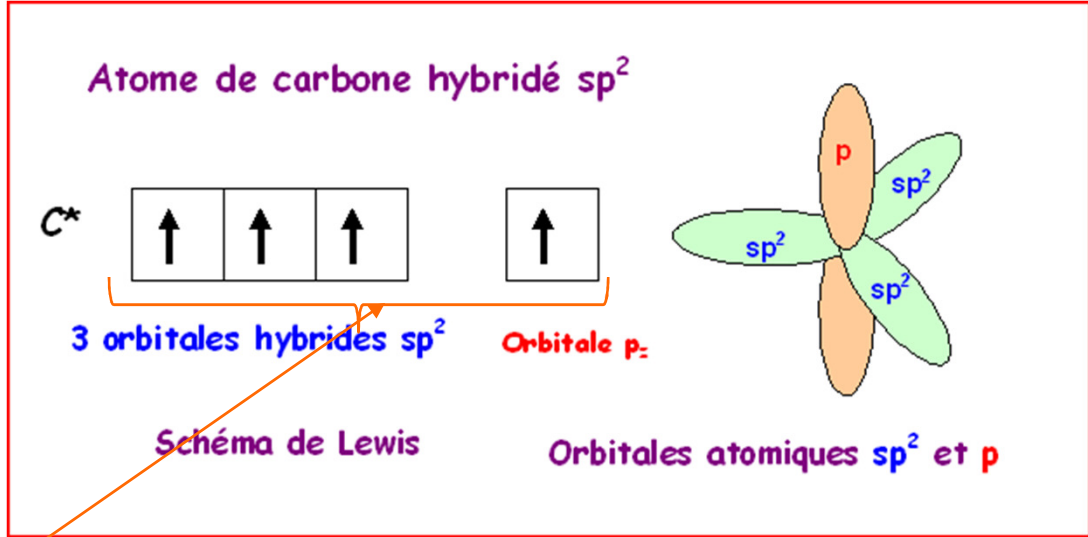
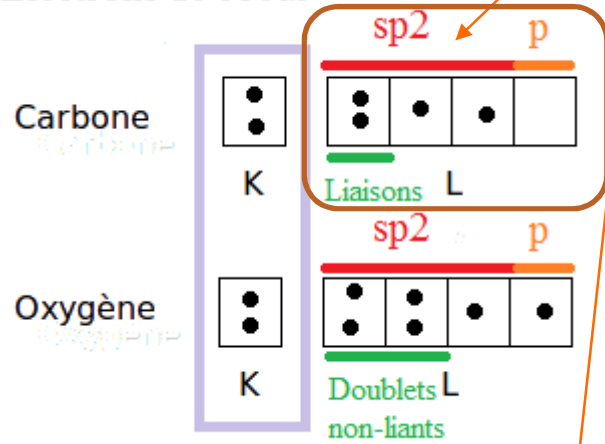
Atome de carbone



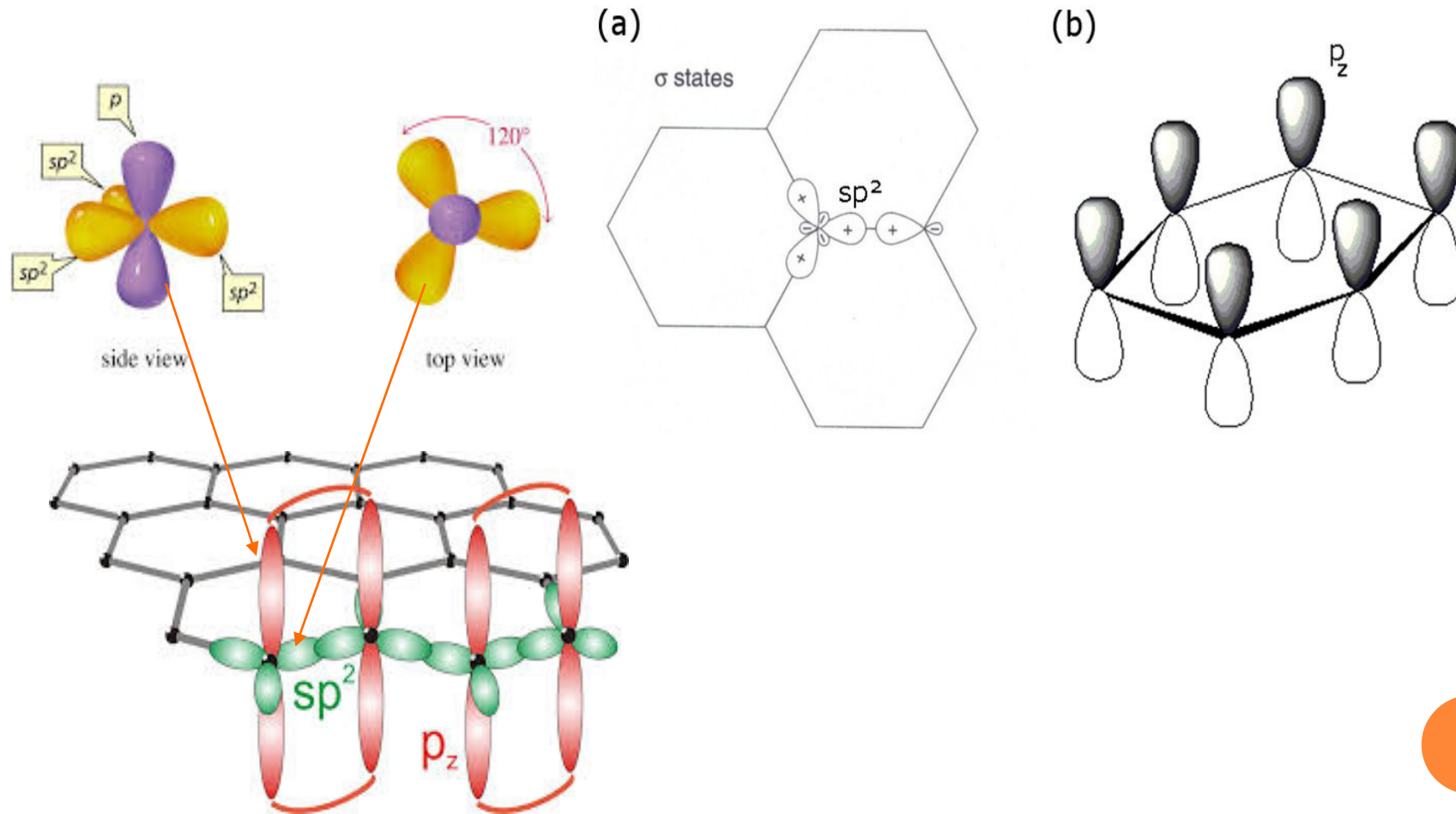
APERÇU SUR LE GRAPHÈNE



Électrons de coeur



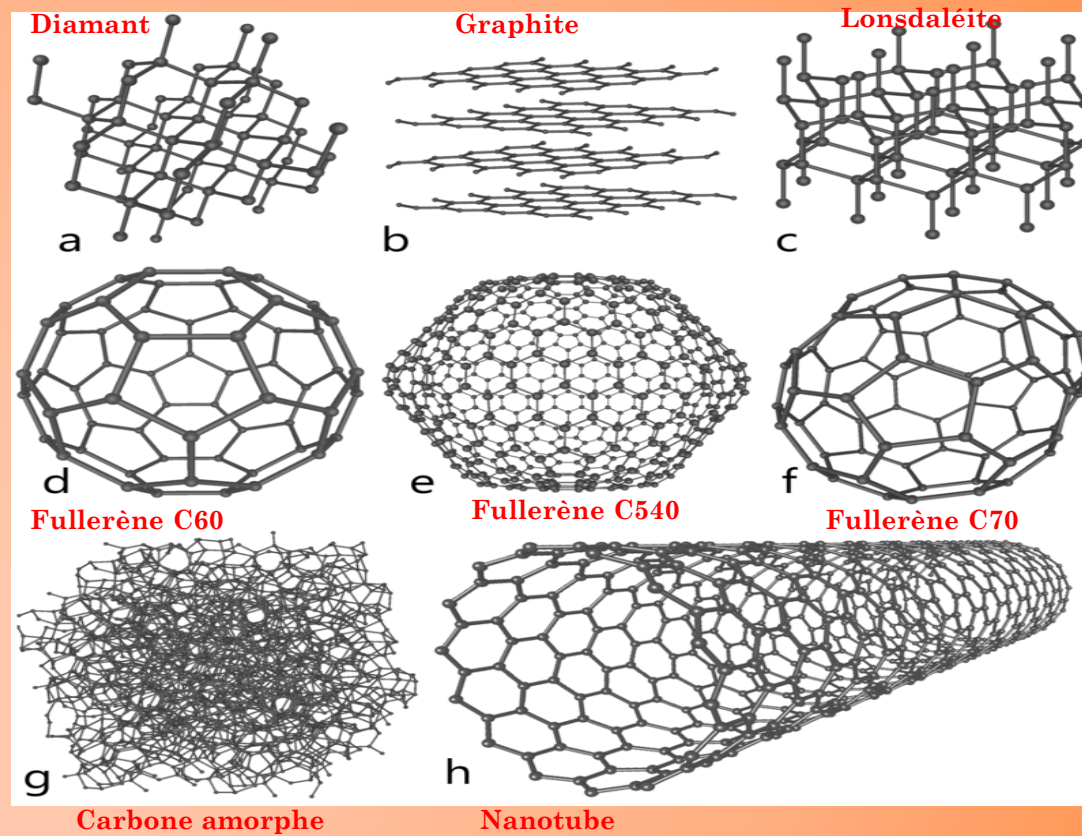
APERÇU SUR LE GRAPHÈNE



APERÇU SUR LE GRPHÈNE

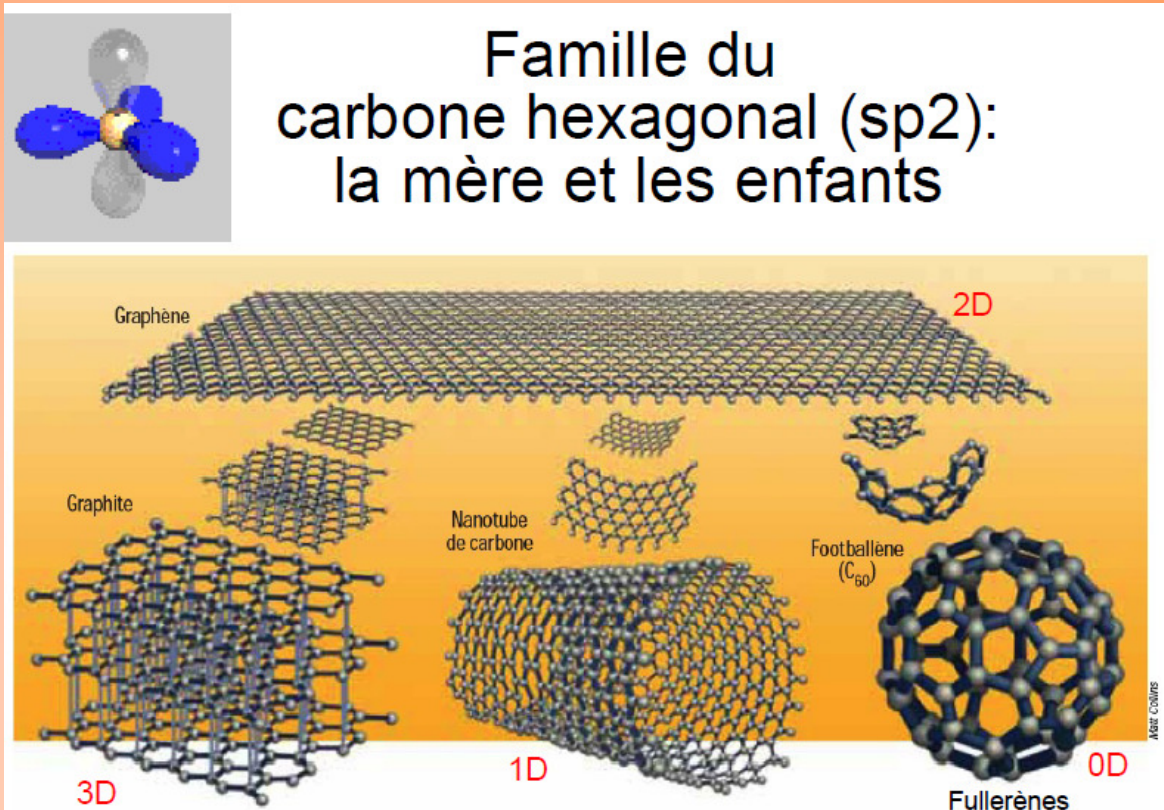
Allotropies du carbone

- a:** Diamant;
- b:** Graphite;
- c:** Lonsdaléite;
- d:** fullerène de Buckminster C60;
- e:** Fullerène C540;
- f:** Fullerène C70
- g:** Carbone amorphe
- h:** Nanotube



APERÇU SUR LE GRPHÈNE

Famille du graphène

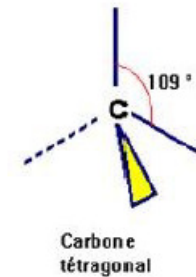
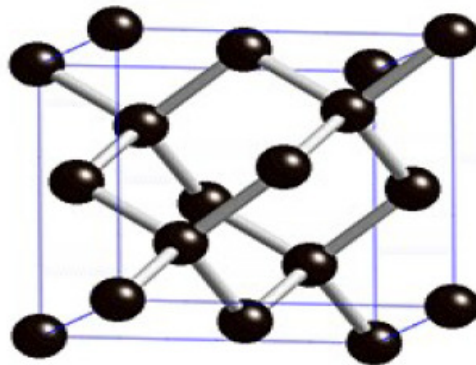
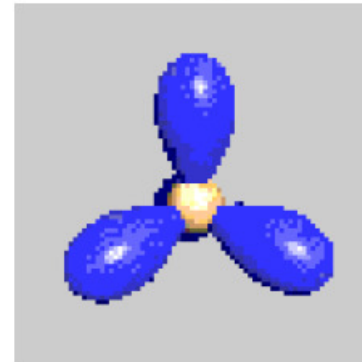


Différence entre graphène et diamant

Famille du carbone tétragonal (sp³): le diamant



6 électrons = 2 coeur
+ 4 liaisons.
pas d'él. conduction



APERÇU SUR LE GRPHÈNE

Caractéristiques

- Structure Cristalline: Hexagonal plan;
- Formule chimique: $(C)_n$;
- Apparence: Solide noir mat (graphite);
- Mobilité électronique: $200\ 000\text{--}250\ 000\ \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;
- Conductivité thermique $\approx 5\ 300\ \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;
- Résistance à la rupture 200 fois supérieure à l'acier, mais 6 fois plus léger.

Applications

- Electroniques (transistors ultrarapides);
- Sécurisation de certaines zones de la propagation radio (une couche de graphène absorbe $\approx 90\%$ de l'énergie électromagnétique);
- Stockage d'énergie (3 200 mAh/g contre 300 mAh/g pour les batteries lithium-ion).





CHAPITRE 2

COMPOSANTS QUANTIQUES

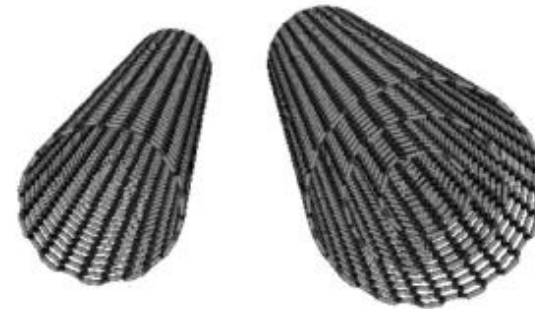
2.5. Nanotubes et Nanofils

NANOTUBES ET NANOFILS

Structure

Il existe deux types de nanotubes de carbone:

- Les nanotubes de carbone monofeuillets (*single-walled carbon nanotubes SWCN*);
- Les nanotubes de carbone multifeuillets (*multi-walled carbon nanotubes, MWCNT*);
- Les nanotubes de carbones double-feuillets (*double-walled carbon nanotubes, DWCNT*) aux propriétés à mi-chemin entre les deux types précédents.

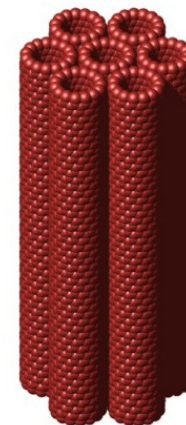


SWNT

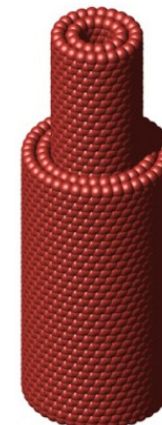
MWNT



Nanotube mono-paroi



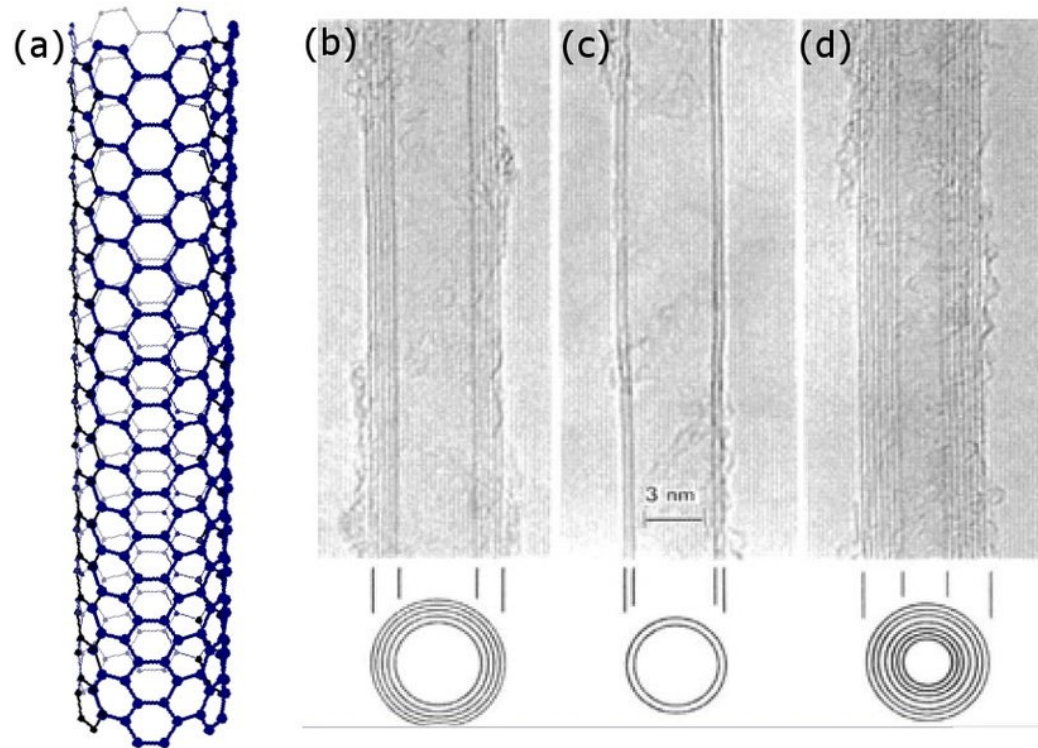
Corde de nanotubes mono-parois



Nanotube multi-parois



NANOTUBES ET NANOFILS



(a) Image d'art d'un nanotube mono-paroi.

(b-d) Image TEM de nanotubes multi-parois

(b) 5 parois

(c) 2 parois

(d) 7 parois.



NANOTUBES ET NANOFILS

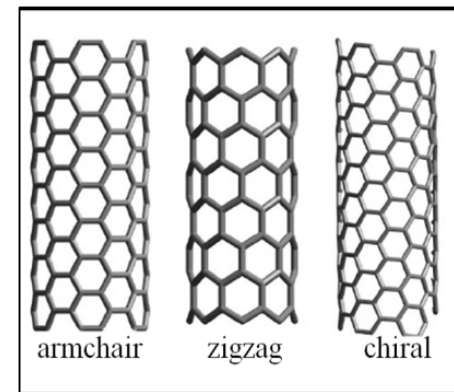
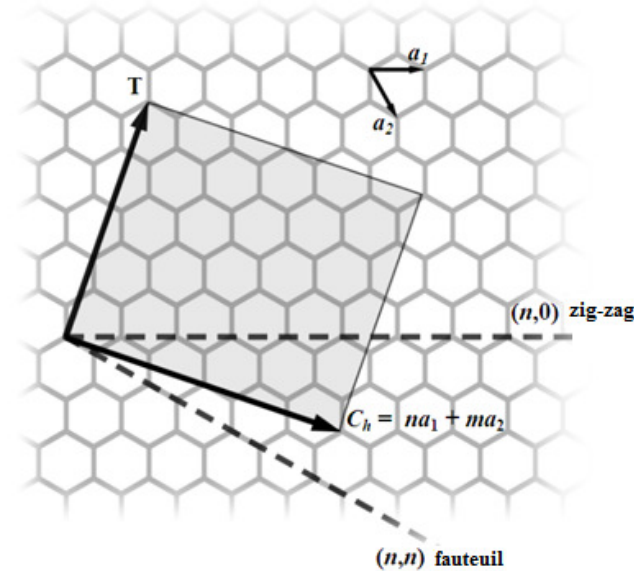
Types d'enroulement

Soit le vecteur de chiralité:

$$C_h = n a_1 + m a_2$$

Selon la valeur de ces 2 scalaires n et m , on peut avoir 3 types d'enroulements, donc trois types de nanotubes peuvent être décrits:

- Si $m = 0$, on dira que le nanotube a une structure de type « zig-zag »
- Si $m = n$, on dira que le nanotube a une structure de type « armchair »
- Dans tous les autres cas, on dira que le nanotube est « chiral ».



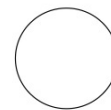
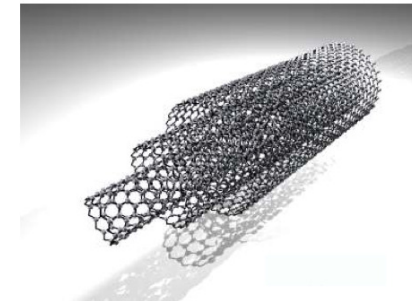
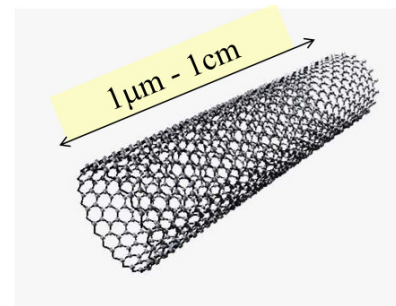
NANOTUBES ET NANOFILS

Dimension des nanotubes

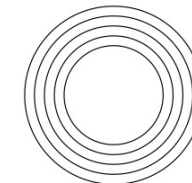
Les dimensions des nanotubes sont:

Diamètre: Quelques nm pour les nanotubes simple paroi à quelques dizaines pour les multi-parois.

Longueur: Elle varie de quelques μm jusqu'au cm.



1-3 nm



2 - 50 nm



NANOTUBES ET NANOFILS

Synthèse des nanotubes de carbone

Il existe plusieurs procédés de synthèse. Les deux grandes familles sont:

- Synthèses à haute température,
- Synthèses à moyenne température, ou CVD.

Principe des méthodes haute température

C'est la méthode qui **favorise** l'obtention des nanotubes **monofeuillets** en opérant sous des **conditions de température** et de **pression élevées** par évaporation du carbone, généralement du graphite, dans une **atmosphère de gaz rare** (hélium ou argon).



NANOTUBES ET NANOFILS

Quelques méthodes haute température

Ablation par arc électrique

Bien que c'est un procédé **peu coûteux** et **assez fiable**. Cependant le processus est tellement **complexe** qu'au final on n'a que **peu de contrôle sur le résultat** et ne permettait pas d'obtenir en grande quantité un matériau exploitable.

Ablation laser

La technique consiste à ablater une cible de graphite avec un rayonnement laser de forte énergie pulsé ou continu. Le système est relativement **couteux**, mais **plus facile à contrôler**, ce qui permet d'étudier la synthèse et de n'obtenir que les produits désirés.

Synthèse dans un four solaire

On concentre l'énergie solaire sur le graphite pour atteindre la température de vaporisation, Ce qui permet de synthétiser des nanotubes.



NANOTUBES ET NANOFILS

Avantages et inconvénients des méthode hautes températures

Avantages

- Ces méthodes permettent de synthétiser des **nanotubes monofeuillets** ;
- Elles permettent de former des **produits très purs**.

Inconvénients

- La synthèse à l'aide de ces techniques **ne permet aucun contrôle** sur la **longueur des nanotubes** ;
- Avec ces techniques, **on obtient de véritables amas** qu'il faut **dissocier** pour pouvoir faire des applications.



NANOTUBES ET NANOFILS

Techniques moyenne température

Méthode CVD

On utilise une **source de carbone liquide** (toluène ou benzène) ou **gazeuse** à laquelle il faut ajouter un précurseur métallique (Fe ou Ni). **La solution est transformé en aérosol** qu'on transporte par un gaz noble (généralement de l'argon) jusqu'à un four à une température comprise entre **750 °C et 900 °C** où les nanotubes poussent sur les **parois en verre** ou sur des **substrats en silicium**.

Ces tubes vont subir **un recuit**, sous une **atmosphère inerte**, qui permet aux nanotubes de s'ouvrir et permettre aux impuretés de s'échapper et aussi de bien s'aligner.



NANOTUBES ET NANOFILS

Propriétés physiques

- ❖ La **rigidité très élevée** et la **large déformabilité** des nanotubes leur confèrent des propriétés **d'absorption d'énergie** surpassant celles des matériaux existants;
- ❖ Les **densités de courant** remarquables, de l'ordre de 10^{10} A/cm^2 , qu'ils peuvent transporter fait des nanotubes les **meilleurs conducteurs** actuels et surpassent les bons conducteurs tel que le cuivre;
- ❖ Une **absorption de lumière** extraordinaire qui atteint les **99.955%**.



NANOTUBES ET NANOFILS

Applications des nanotubes

- Réaliser des **contacts de faible résistance** avec d'autres matériaux utilisés en micro-électronique;
- Utilisation comme **matériaux de protection** ultraperformants et légers (pare-chocs, gilets pare-balles...);
- **Stockage** de l'hydrogène;
- Construction de **canon électrique**;
- Construction d'un **ascenseur spatial**;
- **Séparation** de différents **gaz** ou **liquides**.



NANOTUBES ET NANOFILS

Nanofils

Définition

Ce sont des objets dont le rapport longueur sur largeur est supérieur à 10 avec une largeur de quelques dizaines de nanomètres.

Intérêt

Leur intérêt réside dans leur faible dimension.

Méthodes de fabrication

Il y a deux méthodes de fabrication:

- méthodes dites « **top-down** » empruntées à la micro-électronique (lithographie);
- Méthodes dites « **bottom-up** » inspirées des procédés chimiques.

