

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DJILLALI LIABES
SIDI BEL ABBES



FACULTE DES SCIENCES EXACTES
DEPARTEMENT DES MATERIAUX ET DEVELOPPEMENT DURABLE
THESE DE DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : **physique**
Option : **Science des matériaux**
Présentée par

ADDA BEDIA Wafaa

Sujet de thèse

**Contribution à l'étude des propriétés physiques
et optiques des nanowires et nanotubes**

Soutenu le.... devant le Jury composé de :

Mr. HEIRECHE houari	Professeur	UDL-SBA	Président
Mr. BENZAIER abdelnour	Professeur	UDL-SBA	directeur de thèse
Mr. TOUNSI abdelwahed	Professeur	UDL-SBA	Co-directeur de thèse
Mr. MAHMOUD Youcef mahmoud	MC A	CU.RELIZANE	Examineur
Mr. YEGHNEM reda	MC A	U.DE SAIDA	Examineur
Mr. MANSOUR omar	MCA	ZAD-djelfa	Examineur

Année universitaire 2015/2016

remerciment

Ce travail a été effectué au sein de deux laboratoires, Laboratoire de Modélisation et Simulation Multi-Echelle et Laboratoire des Matériaux et Hydrologie, de l'Université de Djillali Liabès de Sidi Bel Abbes.

Je tiens tout d'abord à adresser mes remerciements à mon directeur de thèse Monsieur **Benzair Abdounour**, professeur à l'université Djillali liabes de Sidi Bel Abbes, de m'avoir confié un sujet de recherche prestigieux et passionnant et Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

Je remercie infiniment le professeur **A.Tounsi**, qui a eu la lourde tâche de diriger cette thèse, pour sa patience et ses encouragements et pour l'intérêt continu porté à mon travail.

J'exprime également toute ma reconnaissance à Monsieur **ADDA BEDIA El-abbes**, professeur à l'université Djillali liabes de Sidi Bel Abbes, qui a apporté un soutien scientifique constant à mon travail de recherche. Sa disponibilité et ses conseils avisés ont permis d'aplanir bien des difficultés.

Je remercie vivement les personnes qui ont fait partie de mon Jury. Leurs suggestions et leurs remarques ont contribué à l'amélioration de la version finale de cette thèse.

Je voudrais également remercier tous les membres de l'équipe du laboratoire, de m'avoir fait partager leurs connaissances et leur savoir-faire.

Je voudrais remercier ma mère pour son amour et son sacrifice. J'exprime mes profonds remerciements à mon père qui ma encourager tout le temps.

Grand merci à mon mari pour sa patience et son encouragements et sans oublier ma belle petite fille Yasmine et mon cher fils Hicheme. Je tiens à remercier de tout mon cœur mon frère et sa femme, mes sœurs et mes beaux frères pour leurs encouragements, et Grand merci à ma grande famille.

Résumé

Dans ce travail, les caractéristiques thermiques du nanotube de carbone mono paroi (SWCNT) de type armchair introduit dans un milieu élastique à un paramètre sont analysées en utilisant la théorie non locale de déformation de premier ordre (NNFSDT).

Le modèle présent prend en considération l'effet d'échelle aussi bien que les effets de déformation transverse des nanotubes, l'effet non-local ($e_0 a$), le paramètre du module Winkler (K_w), le rapport (L/d) et le nombre de mode (m).

L'équivalent du module d'Young ainsi que le module de déformation SWCNT sont obtenu en employant le modèle équivalent d'énergie. Une solution de la température critique non-dimensionnelle de flambement est obtenue dans cette investigation.

Les résultats illustrés dans ce travail peuvent fournir des informations précieuses et significatives pour l'analyse et la conception de la nouvelle génération des nanotubes ainsi que les caractéristiques thermiques des nanotubes mono paroi « SWCNT ».

Mot clé : Nanotubes de carbone mono paroi(SWCNT), température critique non-dimensionnelle de flambement, effet d'échelle, la théorie non locale de déformation de premier ordre (NNFSDT), nanofils

Abstract

In this paper, the thermal buckling characteristics of armchair single-walled carbon nanotube (SWCNT) embedded in a one-parameter elastic medium are investigated using a new nonlocal first-order shear deformation theory (NNFSDT).

The model present as well as takes into account the scale effect the effects of transverse deformation of the nanotubes, the nonlocal effects (e_0a), the parameter of the modulus Winkler (k_w), the aspect ratio (L/d) and the number of mode(m).

The equivalent of the Young modulus as well as the modulus of deformation SWCNT is obtained by employing the equivalent model of energy. A solution of the non-dimensional critical temperature of buckling is obtained in this investigation.

The results illustrated in this work can provide invaluable and significant information for the analysis and the design of the new generation of the nanotubes as well as the thermal characteristics of the nanotubes mono wall “SWCNT”.

Keywords: Carbon nanotube , Critical buckling temperature, Scale effects, armchair single-walled carbon nanotube (SWCNT), new nonlocal first-order shear deformation theory (NNFSDT),nanowires.

ملخص

في هذه الورقة, الخصائص الحرارية رضوخهم المتقاعدة من انابيب الكربونية احادية الطبقة المتعرحة (SWCNT) المضمنة في المعامل مطاطة متوسطة التحقيق النهائي جديد من الدرجة الاولى NNFSDT تشوه القص النظرية)

. هذا النموذج وكذلك يراعى اثر من اثار الانابيب الكربونية المستعرضة تشويها في الاثار, تتم اضافة , المعلمة راديو ستريو وينكلر , نسبة الارتفاع الى العرض (L/d) وعدد من النمط)

الحصول علي معامل القص و معامل يونغ لنانو انابيب الكربونية احادية الطبقة المتعرحة باستخدام نموذج الطاقة المعادلة مع الاخذ الاعتبار كل من الشرايطي و تاثير السلم علي اساس نموذج غير محلي كل هذه المؤثرات اظهرت نتائج علي درجة الحرارة .)

وتوضح النتائج في هذا العمل يمكن ان توفر معلومات هامة التي تكون فيهة المعادن عنصر اساسي.

كلمات مفتاحيه انابيب الكربونية احادية الطبقة و درجة الحرارة و تاثير السلم و تشوه القص النظرية و انابيب خيطية

Résumé	2
Table de matières	5
Liste des figures	8
Liste des tableaux	11
Liste des abréviations	12
Liste des notations	14
Introduction générale	18
Chapitre I : généralité sur les nanotubes	
I.1 Introduction	20
I.2 Carbone	20
I.3 Les formes traditionnelles du carbone	20
I.3.I Le graphène	20
I.3.II Le diamant	22
I.3.III Les carbones mal organisés et dérivé	23
I.4 Les nouvelles formes du carbone	23
I.4.I Fullerènes et dérivés	23
I.4.II Du feuillet de graphite au nanotube de carbone	24
I.4.III Du (C 60) aux nanotubes monocouches	25
I.4.IV Nanotubes multi feuillets (ou multi parois)	26
I.4.V Les nanotubes mono feuille (mono paroi)	27
1.4. V.1 caractéristiques de SWCNT	29
I.5 Synthèse de nanotubes	32
I.5.I Méthode de l'arc électrique	33
I.5.II Méthode d'ablation laser	33
I.5.III Méthode de dépôt Chimique en Phase de Vapeur (CVD)	35
I.5.IV Décomposition catalytique : HiPCO	39
I.6 Purification des nanotubes	40
I.6.I Les méthodes chimiques	40
I.6.II Les méthodes physiques	40
I.6.III Ouverture des nanotubes	42
I.7 Propriétés des nanotubes de carbone	43
I.7.I Propriétés mécaniques	43
I.7.II Propriétés thermiques	43
I.7.III Propriétés optiques	44
I.7.IV Propriétés de capillarité	45
I.7.V Propriétés électroniques	46
I.7.VI Méthode de Simulation de Dynamique Moléculaire	47
I.8 Défauts des nanotubes de carbone	47
I.9 Applications des nanotubes de carbone	50
I.9.I Pointes AFM	50
I.9.II Fibres à base de (NTC	51
I.10 risques et préventions	52
I.11 Producteurs sur le marché	53
I.12 Conclusion	53
Chapitre II : les nanowires	

II.1 introduction	54
II.2.I Synthèse de blocs constitutifs	55
II.2.I.1 Croissance spontanée	56
II.2.I.2 Condensation d'évaporation	57
II.2.I.3 Condensation de dissolution	58
II.2.I.4 Croissance Vapeur-Liquide-solide (VLS)	58
II.2.I.5 Croissance Catalytique assisté de laser	58
II.2.II synthèse basée sur calibre	59
II.2.II.1 Dépôt électrochimique	59
II.2.II.2 Méthode négative de calibre	59
II.2.II.3 Méthode la déposition en phase de vapeur (CVD)	60
II.2.II.4. Le dépôt électrolytique	60
II.2.II.5 Dépôt électro-phorétique	62
II.2.II.6 Calibres extérieurs d'Étape-bord	62
II.2.III Electro-rotation	63
II.2.IV Lithographie	63
II.3 Différent Nanowires	63
II.4 Propriétés et application de Nanowires	64
II.5 Les propriétés magnétiques	64
II.6 les propriétés optiques	64
II.7 Applications de nanowire	64
II.8 Physique de nanowire	64
II.8.I Conductivité de nanowire	67
II.8.II Application de nanoélectronique	67
II.9 Dispositifs croisés de Nanowire	68
II.110 Conclusion	68
Chapitre III : formulation théorique pour l'analyse des nanotubes de carbone	
III.1 Introduction	69
III.2 Le modèle de la mécanique moléculaire	70
III.3 Les propriétés mécaniques	71
III.3.1 module de Young	72
III.3.II Le module de cisaillement	78
III.3.III Coefficient de poisson	81
III.4 L'effet de la température sur le module de Young d'un nanotube de carbone monocouche (SWCNT)	82
III.5 Le module de Young d'un nanotube de carbone multicouche (MWCNT)	82
III.6 Application du modèle des milieux continus pour étude de flambement thermique des CNTs	83
III.7 Premières hypothèses fondamentales de la théorie des poutres	85
III.7.I Principe de saint venant	85
III.7.2 Principe de Navier Bernoulli	85
III.7.3 Modèle d'Euler Bernoulli	86
III.7.4 Modèle de poutre de Timoshenko	87
III.8 La théorie d'élasticité non locale des poutres	88
III.9 Conclusion	92
Chapitre IV: résultats et discussions	

IV.1 Introduction	93
IV.2. l'effet de chiralité sur les propriétés mécanique de (SWCNT)	93
I V.2.1 L'effet de la température sur le module de Young d'un nanotube de carbone monocouche (SWCNT)	95
I V.2.2 Le module de Young d'un nanotube de carbone multicouche (MWCNT)	95
IV.3 Validité et applicabilité du modèle du milieu continue pour les CNTs	95
IV.4 L'analyse de la température critique des CNTs en appliquant le modèle du milieu continue	96
IV.4.I L'analyse de la température critique d'un SWCNT en appliquant le modèle non-local de déformation de premier ordre(NNFSDT) et non local de Timoshenko	96
IV.5 L'analyse de la température critique d'un SWCNT de type armchair en appliquant le modèle de winkler	98
IV.6 L'analyse de la température critique d'un SWCNT de type armchair en appliquant le modèle non local du premier ordre	100
IV.7Conclusion	101
Conclusion générale	102
Bibliographie	103

liste des figures

Liste des figures

Chapitre I : généralité sur les nanotubes

Figure I.1 structure du graphite hexagonal

Figure I.2 cliché par microscopie électronique à transmission (MET)

Figure I.3 structure de diamant

Figure I.4 Du C60 au C80 : les atomes ajoutés au C60 pour obtenir le C70 et le C80 sont représentés en bleu.

Figure I.5 Du feuillet de graphite au nanotube de carbone

Figure I.6 Représentation graphique d'un MWNT

Figure I.7 Nanotube multifeuillets observée en microscopie électronique en transmission (MET)

Figure I.8 structure poupée russe

Figure I.9 nanotubes mono feuille

Figure I.10 à gauche : Schéma d'un cristal de 7 nanotubes. À droite: Image MET de faisceaux de nanotubes monocouches (collerette brute produite par arc électrique).

Figure I.11 Structure d'un plan de graphite en deux dimensions. Le réseau hexagonal est décrit à partir des deux vecteurs de base \vec{a}_1 et \vec{a}_2

Figure I.12 Définition du vecteur chiral \vec{ch} et repliement de la feuille de graphène pour former un nanotube ; ici $n = 4$, $m = 2$.

Figure I.13 présentation schématique des différents types de nanotube mono paroi selon le type de d'enroulement

Figure I.14 fagots de CNT

Figure I.15 schéma simplifiés de deux méthodes

Figure I.16 Schéma d'un réacteur CVD pour la croissance des (NTC)

Figure I.17 Nanotubes synthétisés par CVD : a. (MWCNT) désorientés b. (SWCNT) orientés verticalement par soutien mutuel

Figure I.18 Schéma du dispositif expérimental utilisé pour la croissance des (SWNT) et des nanotubes bi parois par (HFCVD) avec un suivi optique in situ.

Figure I.19 à gauche : Schéma du Production de nanotubes par methode HiPCo, à droite: Image TEM de nanotubes (HiPCO).

Figure I.20 a. Fe encapsule dans un MWNT b. C82 encapsule dans un (SWNT).

Figure I.21 Propriétés électroniques des nanotubes de carbone monocouche en fonction de leurs indices de chiralité (n, m).

Figure I.22: Influence du type de cycle sur la courbure de la surface.

Figure I.23 Image MET des extrémités de deux nanotubes multicouches. On a indique quelques-uns des cycles non hexagonaux : (P) indique un pentagone et (H) un heptagone.

Figure I.24 Introduction d'une paire pentagone-heptagone provoquant une variation de diamètre et de chiralité : a- de (11,0) a (12,0) ; b- de (9,0) a (12,0).

Figure I.24 Défauts pentagonaux et heptagonaux se traduisant par des jonctions.

Figure I.26 Image (MET) d'un échantillon de nanotubes (collerette brute produite par arc électrique). On peut distinguer, en plus des (SWCNTs), des particules de catalyseur et deux formes de carbone amorphe.

Figure I.27 NTC a l'extrémité d'une pointe

Figure I.28 a. Fibres composites a base de (SWNT) b. (A~C) Fibres et tresses a partir de (MWNT).

Chapitre II : les nanowires

FigureII. 1: (a) Modèle d'un nanobel polaire t. (b) nanorings, (c) nanospirals, et (d) nanohelices de ZnO et de leurs processus Zhon Lin Wang,

FigureII. 2 : modèle de VLS croissance

Figure II.3 Modèle de la synthèse de base de calibre

Figure II.4 dissolution de la membrane et du matériel sacrificatoire

Figure II.5 L'ADN basent le calibre, (a) pont en ADN reliant deux électrodes, (b) sur le pont cha

La figure II.6 graphite extérieur d'étape-bord du calibre d'étape-bord (a), électro (b) dépôt d'oxyde de métal, (c) formation de nanowire aux bords

Figure II.7 (a) Image schématique 3D d'un VS-FET (Schmidt, 2006), (b) Image MEB d'interconnexion de nanofils InAs (Dick, 2006).

Figure II.8 : Schéma d'un virus unique dans 2 états lié et non lié à la surface d'un nanofil dans un dispositif avec des anticorps avec la variation temporelle de conductance correspondante à chaque état

Figure II.9 Une SEM image d'un fil de nickel de 15 micromètre.

Figure II.10 Deux SI ont croisé Nanowires dans la taille de 10 le nanomètre (supérieurs dessus)

Chapitre III : formulation théorique pour l'analyse des nanotubes de carbone

Figure III.1 Modélisation d'un nanotube de carbone à une poutre rectiligne

Figure III.2 L'énergie due à des interactions liées (c-c) et non-liées

Figure III.3 Schéma représente: (a) un nanotube armchair et (b) un nanotube zigzag.

Figure III.4 Schéma d'un nanotube de carbone type armchair: (a) hexagonale (b) distribution de la Force en liaison

Figure III.5 Schéma d'un nanotube de carbone type zigzag (n, 0): (a) l'hexagonale (b) répartition de la force en liaison

Figure III.6 Schéma présente la distribution des forces d'un nanotube type armchair

Figure III.8 Schéma présente la distribution des forces d'un nanotube type zigzag

Chapitre VI : résultats et discussions

Fig. IV.1 - La variation du module de Young

Fig. IV.2 - La variation du module de Cisaillement.

Figure IV.3 Comparaison de la température critique de flambement de SWCNT avec différentes valeurs de nombre de modes basé sur le modèle de NNFSDT et le modèle de poutre de Timoshenko ($e_0 = 1\text{nm}$, $K_w = 0$, $n = 15$).

Figure IV.4 La température critique de flambement de DWCNT avec différentes valeurs de nombre de chiralité pour différents valeurs de nombre de modes baser sur le modèle de NNFSDT ($d=20$, $e_0a = 1\text{nm}$, $K_w = 10$).

Figure I V.5 variation de la température critique de flambement de SWCNT de type armchair avec différentes valeurs de K_w pour différentes valeurs de chiralité ($L/d=20$, $e_0a = 2\text{nm}$, $m = 1$)

Figure IV.6 variation de la température critique de flambement de SWCNT de type armchair avec différentes valeurs de K_w pour différentes valeurs de paramètre non local e_0a ($L/d=20$, $n = 15$, $m = 1$)

Figure IV.7 Relation entre la température critique de flambement de SWCNT de type armchair,

Figure IV.8 rapport de la température critique de flambement par le modèle de poutre de Timoshenko au modèle de E.B par rapport au rapport L/d avec différentes valeur de mode ($e_0a = 2nm, m = 8, K_w = 10$)

liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1 *Des résultats de la synthèse de nanotubes de carbone réalisé par CVD*

Tableau IV.1 : Comparaison entre le flambement critique de contrainte d'un CNT (5,5) et un CNT (7,7) obtenu par MD (Dynamique Moléculaire), SST (la théorie des coques de Sanders) et NNFSDT (la théorie non-local de déformation du premier ordre).

liste des abréviations

Liste des abréviations

AFM: Microscopie à force atomique.

C-C: La liaison carbone-carbone.

C60: Fullerène C60.

C70: Fullerène C70.

C80: Fullerène C80.

HiPCo: High Pressure dismutation of CO.

HFCVD: Hot Filament Chemical Vapor Deposition

MD: La dynamique moléculaire.

CNT/ NTS: Carbone NanoTube.

E.B: Euler bernouli

TBT: Timoshenko beam theory

DWCNT : Nanotubes de carbone à double parois
DWNT

MWCNT : Nanotubes de carbone multi feuillets/parois
MWNT

SST: Sanders Shell theory

CMOS: complément Metal Oxide Silicon

CVD : Chemical Vapor Deposition

M : Métallique

SM: Semi-conducteur

LCD: Liquid crystal displays

FED: Field emmission display

SST Sanders Shell theory

NNFSDT : théorie non locale de déformation de premier ordre

STM Microscopie tunnel a balayage

1D : uni-dimensionnelle

NWs : nanowires

LED : Light Emitting Diode

VLS ou SLS : croissance liquide-solide

VS : vaporsolid

PVD : dépôt en phase vapeur

SiO₂ : dioxyde de silicium

TiO₂ : dioxyde de titane

Bi₂O₃: Bismuth (III) oxide

FET: Field-Effect Transistors

liste des notations

Liste des notations

$\{ \}$: Vecteur colonne.

$[]$: Matrice.

$\{\sigma_{ij}\}$: Tenseur de contrainte.

$\{\varepsilon_{ij}\}$: Tenseur de déformation.

$u(x,y,z,t)$: Le déplacement suivant l'axe des x.

$v(x,y,z,t)$: Le déplacement suivant l'axe des y

$w(x,y,z,t)$: Le déplacement suivant l'axe des z.

w_b : Le déplacement transversal de la flexion.

w_s : Le déplacement transversal du cisaillement.

A : La surface de la section d'un nanotube.

\vec{a}_1 et \vec{a}_2 : Les vecteurs de base du graphène.

a et b : Type de liaison carbone-carbone.

α et β : Les l'angle d'un hexagone.

C : La constante de la variation d'angle.

\vec{ch} : Le vecteur chiral.

C_{ijk} : Le tenseur de module d'élasticité.

c : Le coefficient d'interaction par unité de longueur.

dR_j : L'allongement de la liaison i .

$d\alpha$ et $d\beta$: La variation d'angles α et β .

d_{in} : Le diamètre du nanotube interne.

E_a : Le module de Young du nanotube type armchair.

E_z : Le module de Young du nanotube type zigzag.

E_g : Le module de Young du graphite.

E_N : Le module de Young du nanotube.

E_N^0 : Le module de Young du nanotube dans un environnement déterminé.

E_{MNWT} : Le module de Young du nanotube multicouche.

E_{SNWT} : Le module de Young du nanotube monocouche.

e_0 : Une constante appropriée à chaque matériel.

$e_0 a$: Le rapport de petite échelle.

F : Force de traction.

$f(x)$: Une charge répartie appliquée par le milieu élastique.

G : Le module de cisaillement.

h : L'espacement entre les couches d'un nanotube de carbone.

J : Le constant de torsion correspond au cylindre mince.

K : Constante d'allongement de la liaison.

k_w : Le module d'élasticité du ressort.

k_w^0 : Le module d'élasticité du ressort dans le cas de la température de référence.

m : Le nombre de mode.

l_0 : La longueur de la liaison carbone-carbone.

L : La longueur du nanotube de carbone.

L/d : Le rapport longueur/diamètre.

M : Le moment de flexion.

(n, m) Un couple de nombres entiers qui définit la structure du nanotube.

\bar{N} : Le nombre de couche.

N' : Le nombre des hexagonales le long de la direction axiale du nanotube.

N : Charge thermique.

$P(x)$: L'interaction d'inter-tube de Van der Waals.

R : Le rayon du nanotube.

t : L'épaisseur de la couche d'un nanotube.

T : Le moment de torsion.

U_p : Energies associées aux liaisons allongées.

U_θ : Energies associées à la variation des angles.

U_τ : Energies associées aux torsions.

U_w : Energies associées aux inversions.

U_{vdW} : L'énergie due à l'interaction non-liée de van der Waals.

U_j : Le vecteur de déplacement.

V : La force de cisaillement.

\bar{W}_1 : L'amplitude de déflexions des tubes intérieurs.

\bar{W}_2 : L'amplitude de déflexions des tubes externes.

\bar{W} : L'amplitude de déflexion du nanotube.

w : Le déplacement transversal.

x : L'axe des coordonnées axiales.

y : Coordonnée mesurée positive à mi-distance dans la direction transversale.

α : Le coefficient de dilatation thermique.

β : Le coefficient correcteur de cisaillement.

ε : La déformation axiale d'un nanotube de carbone.

ε' : La déformation circonférentielle d'un nanotube de carbone.

φ : L'angle de torsion entre le plan b-b et plan a-b d'un hexagone.

γ : La déformation tangentielle.

ν : Le coefficient de poisson.

θ : La variation de la température.

$\bar{\theta}$: L'angle chiral.

ρ : La masse volumique.

σ : La contrainte axiale.

σ_{ij} et ε_{ij} : Les tenseurs des contraintes et déformations.

τ : Contrainte tangentielle.

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$: La vitesse de rotation des rouleaux.

ω_{NE} : La fréquence d'un nanotube de carbone monocouche basée sur le modèle Non-local d'Euler-Bernoulli.

ω_{LE} : La fréquence d'un nanotube de carbone monocouche basée sur le modèle local d'Euler-Bernoulli.

ω_{NE}^0 : La fréquence d'un nanotube de carbone monocouche basée sur le modèle Non-local d'Euler-Bernoulli sans effet thermique.

ω_{LT} : La fréquence d'un nanotube de carbone monocouche basée sur le modèle local de Timoshenko.

ω_{NT}^0 : La fréquence d'un nanotube de carbone monocouche basée sur le modèle non-local de Timoshenko sans effet thermique.

Ψ : L'angle de rotation de la section d'une poutre.

INTRODUCTION Generale

Introduction générale

Dans ce travail, les caractéristiques thermiques du nanotube de carbone mono paroi (SWCNT) introduit dans un milieu élastique à un paramètre sont analysées en utilisant la théorie non locale de déformation de premier ordre (NNFSDT). Le modèle présent prend en considération l'effet d'échelle aussi bien que les effets de déformation transverse des nanotubes. L'équivalent du module d'Young ainsi que le module de déformation SWCNT est obtenu en employant le modèle équivalent d'énergie. Une solution de la température critique dimensionnelle est obtenue dans cette investigation. Les résultats illustrés dans ce travail peuvent fournir des informations précieuses et significatives pour l'analyse et la conception de la nouvelle génération des nanotubes ainsi que les caractéristiques thermiques des nanotubes mono paroi « SWCNT ».

Depuis le travail Iijima [Iijima 1993] sur les nanotubes de carbone, une nouvelle ère a été développée dans le domaine de la nanotechnologie. Les nanotubes de carbone sont parmi les plus intéressants des nanomatériaux qui sont devenus des sujets importants pour les chercheurs travaillant sur les nanotubes en raison de leurs caractéristiques mécaniques remarquables et des larges potentiels dans la nanotechnologie. En conséquence, l'importance des nanotubes en carbone est analysée et des travaux théoriques sont présents

Avec la difficulté pour les expériences contrôlées à l'échelle du nanomètre, la simulation numérique a été effectuée largement. Bien que la dynamique moléculaire (MD), la simulation est une façon efficace d'étudier les caractéristiques mécaniques des nanostructures, malgré le temps de calcul important ou même l'impossible d'exécuter la simulation MD. Alors la théorie de l'élasticité est devenue une méthode efficace pour le calcul. Cependant, dans le modèle élastique classique, on ne considère pas les petits effets d'échelle.

En raison des effets de taille inhérents, à l'échelle nano, les caractéristiques mécaniques des nanostructures sont souvent significativement différentes de leur comportement à l'échelle macroscopique. Eringen [Eringen 1983] a développé la théorie non locale continue pour les investigations de petites structures.

Selon cette théorie, l'état des contraintes à un point d'une nanostructure dépend non seulement de l'état de contraintes de ce point, mais aussi ceux d'autres points. Une telle dépendance est présentée dans les équations constitutives de la nanostructure par un paramètre à petite échelle prétendu, généralement présenté par le modèle atomique. En disparaissant ce paramètre, la théorie non locale est réduite à la théorie classique d'élasticité. Généralement, la théorie non locale est déterminée ; justifiant les courbes de dispersion prévues selon la théorie non locale avec ceux d'un modèle atomique.

En ce qui concerne les comportements de nanostructures, Sudak [Sudak 2003] a étudié le flambement d'une colonne de CNT en utilisant le modèle élastique non-local. En utilisant la poutre dans le domaine non-local et le modèle de coque, Wang et d'autres [Wang 2009]. Il a examiné le petit effet d'échelle en élasticité de CNT. Reddy a développé une formulation mathématique d'équations d'équilibre dans la statique, et la vibration des poutres à l'échelle nanométrique.

Basé sur la théorie non-locale de mécanique d'élasticité thermique, Amara [Amara 2010] et Al [Al-Hosani 1999] la colonne élastique multiple développée pose pour la linéarisation du flambement des nanotubes carbonés multi parois (MWNTs). Tounsi [Tounsi 2013] et Al [Al-Hosani 1999] a étudié les propriétés thermiques des nanotubes de carbone doubles-parois (DWCNTs) l'utilisation du modèle non-local de Timoshenko. Tounsi et Al a examiné le comportement thermique de nano-poutres en utilisant la théorie non-local à ordre élevé.

Berrabah [Berrabah 2013] et Al a proposé l'unification de la théorie de déformation non-locale pour étudier le flambement, la flexion et la vibration libre des nano-poutres.

Dans cette étude, on propose l'analyse du flambement thermique du modèle arm chair SWCNT incorporé dans le modèle élastique en utilisant la théorie de déformation non locale du premier ordre. Cette théorie a été développée récemment par Bouremana [Bouremana 2013] et Al basée sur la supposition que les déplacements transversaux dans le plan médian consistent à trouver la flexion et le cisaillement transversal, dans lesquels la flexion ne contribue pas avec les forces et les moments. Dans ce travail, cette théorie a étudié la température critique pour le modèle arm chair SWCNTs. Le modèle de Winkler est utilisé pour simula

Ce travail est composé de quatre chapitres: Dans le premier chapitre, nous décrirons les différents type de nanotubes de carbone en détaillant leurs propriétés et les différentes techniques de synthèse tel que la méthode d'ablation laser, l'arc électrique, dépôt chimique en phase vapeur et la méthode dite (*HiPCo*), en nous attachant à exposer les avantages et les inconvénients de chacun d'entre eux. De nombreuses applications seront ensuite présentées. Enfin, nous donnerons les défauts des nanotubes de carbone et nous s'intéressons à leurs applications et leurs risques

Le second chapitre présentera les nanowires qui ont tirés beaucoup d'intérêt de recherche à cause de leurs propriétés physiques uniques où nous décrivant les différentes propriétés, les différents types de nanowire et à la fin leurs applications

Le troisième chapitre se concentre sur des développements mathématiques, nous définirons les propriétés mécaniques des SWCNTs de type armchair et les températures non dimensionnelles critiques des DWCNTs et SWCNT armchair. Le quatrième chapitre sera consacré aux résultats et discussions.

chapitre I
généralité sur les nanotubes

1.1 Introduction:

Depuis leur découverte, les nanotubes de carbone font l'objet d'un grand intérêt de la part de la communauté scientifique, notamment du fait de leurs propriétés physiques remarquables. Ce premier chapitre, est consacré à une présentation générale des nanotubes de carbone. Nous commencerons par décrire les formes traditionnelles du carbone tel que le graphène, le diamant et les Carbones «mal organisés» ainsi que les nouvelles formes du carbone comme le fullerène, les nanotubes multi feuillets et mono feuillet. En second lieu nous nous focalisons sur les procédés de synthèse les plus répandus tel que la méthode d'ablation laser, l'arc électrique, dépôt chimique en phase vapeur et la méthode dite (*HiPCo*), en nous attachant à exposer les avantages et les inconvénients de chacun d'entre eux.. Enfin, nous s'intéressons à leurs applications et leurs risques.

1.2 Carbone:

Le carbone est un élément absolument nécessaire l'existence des êtres vivants ('échange constant de carbone (CO₂) avec leur milieu extérieur, composé de l'ADN) et à la synthèse de très nombreuses molécules dans l'industrie chimique.

Dans la classification de Mendeleïev, il se trouve sur la deuxième ligne, en sixième colonne, et porte le numéro atomique $z = 6$. Sa configuration électronique est donc $1s^2 2s^2 2p^2$. Ceci implique que 4 électrons non appariés peuvent créer des liaisons : le carbone est tétravalent. Sa masse molaire est de 12,0107g/mol. Dans la nature, le carbone existe sous trois formes allotropiques : amorphe (suie), graphite et diamant. Les scientifiques ont cependant réussi créer de nouveaux types de carbone, les fullerènes et les nanotubes, dont les propriétés diffèrent de celles du carbone naturel. Nous allons donc ici étudier en détails cet élément et ses différentes formes. Nous allons donc ici étudier en détails cet élément et ses différentes formes. Le carbone est un matériau présent à l'état naturel sous trois formes cristallines, telles que les graphites, diamants et les carbones mal organisés. Il continue par la présentation des nouvelles formes du carbone, récemment découvertes. Nous rencontrerons la famille des fullerènes, les nanotubes multicouches ainsi que les nanotubes monocouches. [Buchoux 2011], [Izard 2004].

1.3 Les formes traditionnelles du carbone :

1.3.1 Le graphite :

Le graphite, état le plus stable des composés carbonés, qui est un matériau lamellaire noir et friable, il est notamment utilisé depuis des siècles pour l'écriture. la forme cristalline stable est le graphite hexagonal [buchoux 2011] [izard 2004]. les plans de graphène sont empilés, comme montre la figure I.1 La distance entre ces plans d'hexagones est plus élevée: (0,34nm). Cette structure particulière fait du graphite un matériau anisotrope. [Marcoux 2002]

Chaque graphène est organisé en hexagone, structure dite en nid d'abeilles. Les atomes de carbone sont situés aux sommets des hexagones et chacun d'entre eux est relié à trois autres atomes, c'est une hybridation de type sp^2 , les liaisons inter-atomes sont fortes et de distance (0,142nm). Au contraire, les liaisons entre atomes de plans voisins sont plus faibles car ils n'interagissent entre eux que par des forces van der Waals. Comme ces forces sont

relativement faibles, les plans graphènes peuvent glisser les uns sur les autres, ce qui explique ses propriétés lubrifiantes.

L'autre forme cristalline possible du graphite est le graphite rhomboédrique, phase métastable du graphite hexagonal. [Buchoux 2011] [Izard 2004]

Le graphite peut être disponible naturellement ou synthétisé. Le graphite synthétique est fabriqué à partir de précurseurs organiques. Le précurseur est d'abord soumis à un processus de carbonisation, consistant en un chauffage progressif sous atmosphère inerte jusqu'à atteindre des températures de près de (1300°C). A ce stade, il subsiste du carbone amorphe et du graphite polycristallin. Un traitement thermique à (2500°C) permet ensuite une graphitisation de ce carbone pour donner le graphite. [Lassagne 2006]

De nombreux efforts [Novoselov 2004], [Berger 2004], [Zhang 2005] ont été engagés afin de produire une couche isolée de graphène à partir du graphite qui possède de faibles liaisons intercouches (de type van der Waals). En août 2006, une équipe a réussi à synthétiser pour la première fois une structure composée de 2 couches de graphène. [Ohta 2006]

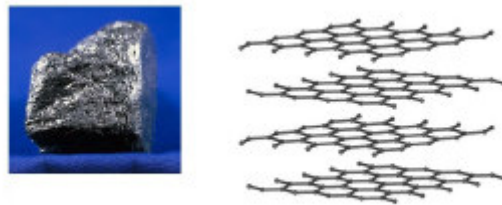
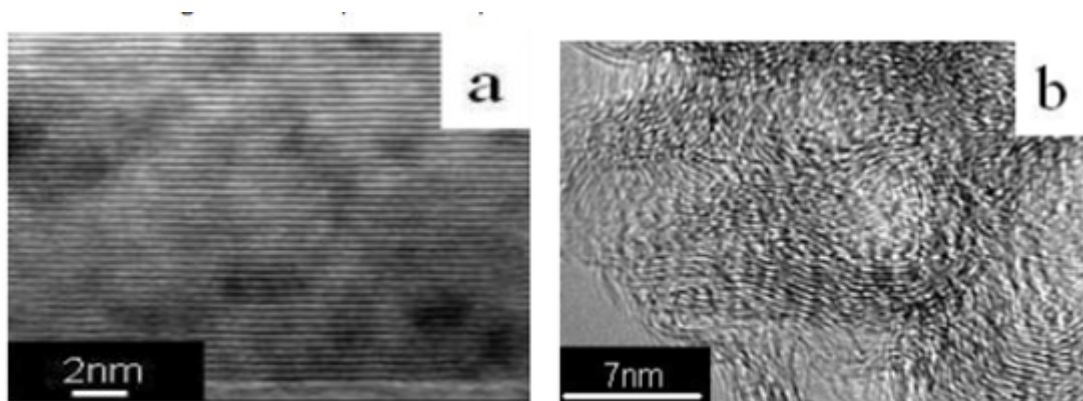


Figure I.1 structure du graphite hexagonal

Lorsque le carbone est constitué d'empilements de feuillets de carbone à caractère sp^2 de faibles dimensions, i.e. possédant une faible longueur de cohérence, il peut facilement s'onduler.



Carbone graphitique [web1]

carbone désordonné à caractère sp^2 obtenu au laboratoire

Figure I.2 cliché par microscopie électronique à transmission (MET)

1.3.II Le diamant :

Le diamant est une forme allotropique tridimensionnelle du carbone. Dans le diamant, les atomes de carbone sont en état d'hybridation sp^3 , et donc tétravalents. Il existe plusieurs structures

Cristallines du diamant [Buchoux 2011] [Lassagne 2006], comme le diamant hexagonal ou la lonsdaléite, mais la structure la plus courante est de loin le diamant cubique (figure 1.3). La maille de cette structure est de type cubique faces centrées, avec un paramètre de maille de 0,356 nm, et une distance interatomique de 0,154 nm. Il y a principalement trois sortes de diamant : naturel, synthétique et fabriqué par (CVD).

Comme le graphène, le diamant possède également une autre forme cristalline métastable. Notons que le diamant est beaucoup plus dense que le graphite.

Le diamant a trouvé de nombreuses applications en tant qu'abrasif haute performance. Il possède la plus haute conductivité thermique connue parmi les solides à température ambiante. C'est un excellent semi-conducteur lorsque son réseau est dopé avec de faibles quantités de lithium, bore, azote ou phosphore. Il a enfin un haut indice de réfraction et transmet la lumière depuis l'infrarouge lointain jusqu'à l'ultraviolet. [Saint-aubin 2010]



Figure 1.3 structure de diamant

1.3.III Les carbones mal organisés et dérivé :

Le carbone ne présente pas toujours une organisation cristalline. Des formes de carbone mal organisées peuvent exister. C'est notamment le cas du carbone amorphe. Il s'agit d'un réseau désordonné d'atomes de carbone présentant des états d'hybridation sp^2 et sp^3 . A l'état naturel, le carbone amorphe est rare. Il est présent dans les particules des couches extérieures de l'atmosphère des étoiles froides, appelées poussières d'étoiles. Plus proche de nous, le carbone amorphe est synthétisé sous forme de couches minces, obtenues généralement par dépôt plasma. Il sert de revêtement, apportant une tenue mécanique supplémentaire à des pièces industrielles. De plus, son caractère hydrophobe lui permet d'être utilisé en tant que couche de protection.

Le graphène peut également se rencontrer sous une forme partiellement organisée. Le désordre structural est créé par des défauts d'empilement des plans de graphite, ce qui éloigne la structure de ce graphite des formes ordonnées vues précédemment, en perdant l'ordre

orientationnel et en augmentant la distance inter-feuillets. Pour le différencier des graphites hexagonal et rhomboédrique, on parle de graphite turbostratique.

Le noir de carbone, utilisé notamment dans l'encre de chine, est une autre forme de carbone mal organisé [Izard 2004], [Bernard 2007]. Il est constitué de nanoparticules sphériques carbonées. Ces particules sont constituées de cristallites, de deux à trois plans réticulaires d'épaisseur, d'une structure similaire à celle du graphène. Les cristallites sont liées entre eux par des atomes de carbone non engagés dans les plans cristallins, et formant une phase amorphe. Notons que le carbone amorphe est souvent majoritaire.

1.4 Les nouvelles formes du carbone :

1.4.1 Fullerènes et dérivés :

L'élément principal du graphite qui est également le point de départ pour la construction de nouvelles nanostructures carbonées, qui est le plan de graphite, se représente comme une feuille plane pavée d'hexagones. Il est possible de briser virtuellement la planéité de la feuille de graphite en insérant des défauts dans la structure, de type pentagone ou heptagone. L'ajout d'un pentagone dans un plan d'hexagones crée une courbure positive. L'ajout d'un heptagone créera, dans le même plan, une courbure négative. La courbure créée par chaque type de défaut s'annule, et une feuille de graphène dans laquelle on aurait inséré un pentagone et un heptagone resterait globalement plan. [Izard 2004]

En 1985, H.Kroto et al [Kroto 1985], ils réussissent à isoler une forme majoritaire constituée de 60 atomes de carbone. Cette molécule, refermée sur elle-même comme une cage. On prédit alors de nombreuses propriétés et applications à cette nouvelle forme allotropique du carbone. Synthétisée par la méthode de l'arc électrique dans une cloche remplie d'hélium cette molécule a la particularité d'avoir une structure formée de cages moléculaires fermées. En effet, elle a la forme et la symétrie d'un ballon de football, chaque atome de carbone étant situé à l'un des 60 sommets d'un polyèdre inscrit dans une sphère (figure I.4). [Enouz 2003]

Avec 12 pentagones et 20 hexagones on forme le fameux (C60). Ce fullerène a deux types de liaisons (C-C) : celles qui sont communes à deux hexagones sont appelées liaisons 6-6, celles qui sont communes à un hexagone et un pentagone sont nommées liaisons 5-6.

En coupant en deux parties égales le (C60) et en ajoutant des atomes de carbone avant de refermer la structure, on peut construire le (C70) (25 hexagones, 12 pentagones) et le (C80) (30 hexagones, 12 pentagones). comme montre la figure I.4

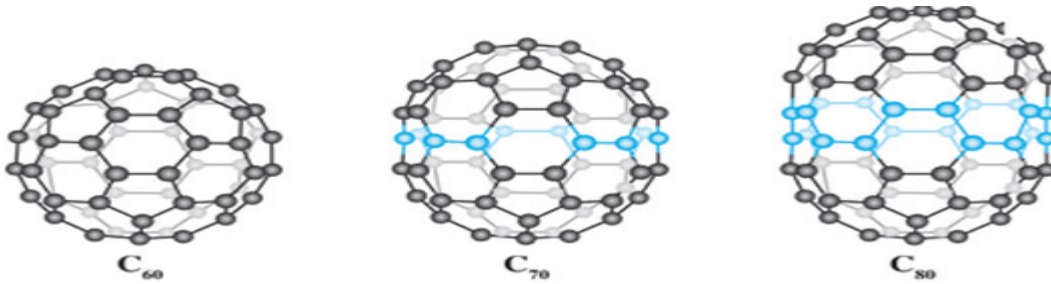
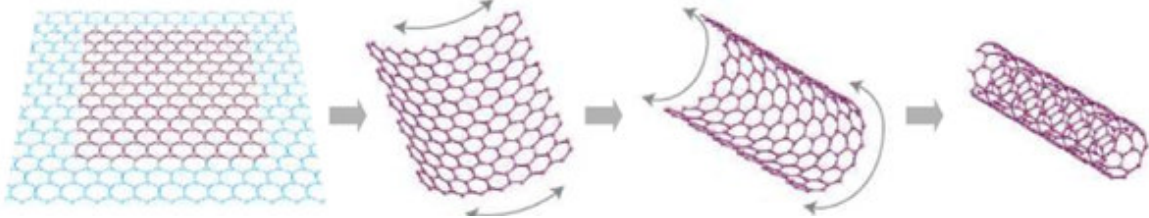


Figure I.4 Du C60 au C80 : les atomes ajoutés au C60 pour obtenir le C70 et le C80 sont représentés en bleu. [Marcoux 2002]

I.4.II Du feuillet de graphène au nanotube de carbone :

La structure du nanotube de carbone peut aussi être abordée en considérant un plan de graphite fini. Si on enrôle celui-ci sur lui-même en rejoignant ses côtés opposés on obtient un tube constitué de carbone à caractère sp^2 (Figure I.5). Cette super-molécule constitue alors une phase quasi-unidimensionnelle (1D) du carbone.



Graphène

nanotube

Figure I.5 Du feuillet de graphène au nanotube de carbone

I.4.III Du (C 60) aux nanotubes monocouches:

L'histoire des fullerènes démarre avec la découverte du (C60) à l'Université de Rice, publiée en 1985, [Kroto 1985] et récompensée par le Prix Nobel de Chimie en 1996. [Web 2] Le (C60) est produit à l'origine par la vaporisation laser d'une cible de graphite à basse pression. Un « nuage » de vapeurs de carbone se formait au-dessus de la cible. Une injection d'hélium entraînait ces vapeurs dans une tuyère jusqu'à des vitesses supersoniques. Puis le mélange des gaz était détendu et refroidi. C'est à ce moment que les molécules de (C60) se formaient. Elles étaient ensuite ionisées par un faisceau d'électrons et accélérées jusqu'à un spectromètre de masse. Le pic dominant, à (720 u.m.a.), était la seule preuve de la présence de (C60). Un pic considérablement plus faible, mais distinct, était observé à (840 u.m.a.) et attribué à la présence de (C70). Cette signature spectroscopique fut également découverte par une équipe d'Exxon mais ils l'attribuèrent à une espèce polyène. [Rohlfing 1984] Peu de temps après, des considérations théoriques confirmaient l'existence de telles molécules sphériques constituées uniquement de carbone. [Haymet 1986]

En outre, le groupe de Rice réalisa une expérience de vaporisation laser sur une cible de carbone dopée au La. [Heath 1985] Un fort pic apparaissait dans le spectre à (859 u.m.a.), attribué à un atome de (Lanthane) encapsulé dans une cage de (C60). Cela apportait une preuve supplémentaire de la nature sphérique du (C60) et constituait le premier exemple de fullerène rempli. En 1990 fut mise au point une méthode de synthèse de fabrication du (C60) en grosses quantités : il s'agissait d'une méthode d'arc électrique entre deux électrodes de carbone sous atmosphère inerte (100 torr). Le (C60) et le (C70) produits étaient isolés du carbone amorphe. [Krätschmer 1990].

Le développement des nanotubes de carbone:

- 1995 - Propriétés d'émission de champ. [Rinzler 1995]
- 1996 - Synthèse de fagots de nanotubes monocouches par ablation laser. [Thess 1996]
- 1997 - Conduction quantique dans les nanotubes de carbone. [Tans 1997]
- 1998 - Synthèse par dépôt chimique en phase vapeur de films de nanotubes multicouches alignés. [Ren 1998]
- 1998 - Insertion de (C60) dans des nanotubes monocouches (peapods). [Smith 1998]
- 1998 - Coupure et fonctionnalisation de nanotubes. [Liu 1998]
- 1999 - Stockage de l'hydrogène dans des nanotubes monocouches. [Liu 1999]
- 2000 - Les nanotubes en tant que conducteurs thermiques idéaux. [Berber 2000]
- 2000 - Alignement macroscopique de nanotubes monocouches. [Vigolo 2000]
- 2001 - Circuits logiques et nanotubes monocouches. [Collins 2001]
- 2001 - Supraconductivité intrinsèque de nanotubes de carbones monocouches. [Kociak 2001]
- 2008 - Dynamique des fullerènes (C60) dans les nanotubes de carbone: [Rols 2008]
- 2008 - Sound wave propagation in single-walled carbon nanotubes using nonlocal elasticity. [Heireche 2008]
- 2008 - The thermal effect on vibration of single-walled carbon nanotubes using nonlocal Timoshenko beam theory. [Benzair 2008]
- 2011 - Thermal buckling analysis of double-walled carbon nanotubes considering the small-scale Length effect. [Arani 2011]
- 2011 - A nonlocal Levinson beam model for free vibration analysis of zigzag single-walled carbon nanotubes including thermal effects. [Maachou 2011]
- 2011 - The thermal effect on vibration of zigzag single walled carbon nanotubes using nonlocal Timoshenko beam theory. [Zidour 2011]
- 2011 - Sound wave propagation in armchair single walled carbon nanotubes under thermal environment. [Naceri 2011]

I.4.IV Nanotubes multi feuillets (ou multi parois) :

La découverte des fullerènes en 1985 créa un véritable engouement pour la recherche et la caractérisation de nouvelles nanostructures carbonées. Les techniques de caractérisation, et notamment la microscopie électronique, ont permis à Sumio Iijima de mettre en évidence en 1991 [Iijima 1993 (2)], [Bethune 1993] dans le produit d'évaporation du graphite par arc électrique, des nanostructures graphitiques unidimensionnelles, baptisées nanotubes multi feuillets (MultiWall NanoTubes, MWNT), comme montre la figure I.6

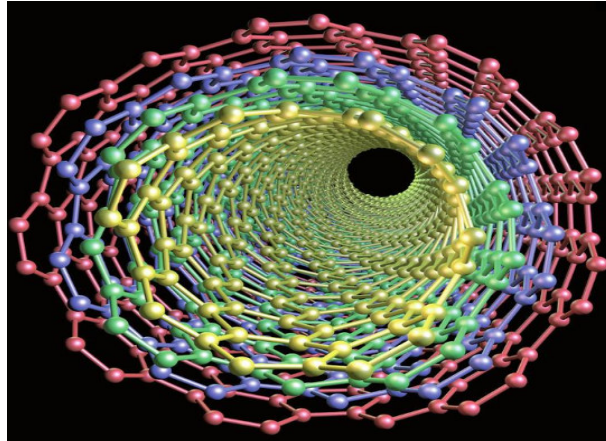


Figure I.6 Représentation graphique d'un MWNT

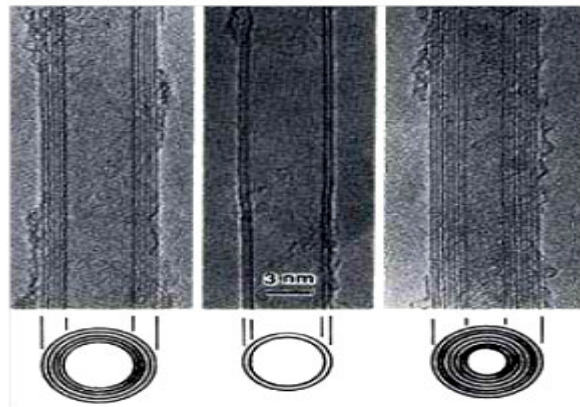


Figure I.7 Nanotube multifeuillets observée en microscopie électronique en transmission (MET) par [Iijima 1991]

Ces nanotubes multi feuillets sont constitués d'un arrangement concentrique de feuilles de graphène, repliées sur elles-mêmes de manière à former des cylindres (figure I.7). Cette structure est communément appelée poupée russe (figure I.8), par analogie avec le jeu de poupées qui s'emboîtent les unes dans les autres. Le diamètre du plus petit tube interne détermine la taille du canal central du nanotube. Le diamètre interne d'un nanotube multi feuillet est de l'ordre de deux nano mètres, tandis que le diamètre externe est de l'ordre d'une vingtaine de nanomètres. Cependant, les diamètres des nanotubes multi feuillets peuvent aller jusqu'à la centaine de nanomètres de diamètre.

La façon dont les différentes couches graphitiques des nanotubes multi feuillets s'empilent est a priori aléatoire. Il n'a pas été mis en évidence un empilement selon des règles préférentielles entre les différents feuillets. La distance moyenne inter-feuillets est de 0,344 nm, ce qui rapproche sa structure de celle du graphique turbostratique.

La structure des nanotubes multi feuillets de type poupée russe décrite précédemment est communément admise, mais ce n'est pas la seule structure possible. Ainsi, certaines études expérimentales laissent envisager que les nanotubes multi feuillets pourraient avoir une structure de type rouleau de parchemin. D'autres études suggèrent, surtout dans le cas des gros nanotubes, que les deux types de structure coexistent au sein des tubes multi feuillets,

les tubes de petit diamètre, au centre, présentant une structure de type poupée russe, tandis que les tubes extérieurs possèdent une structure plus défectueuse de type rouleau de parchemin. Enfin, une étude postérieure montre que la structure de type poupée russe est la plus fréquemment rencontrée. Les nanotubes ne croissent selon le type rouleau de parchemin que dans des conditions particulières.

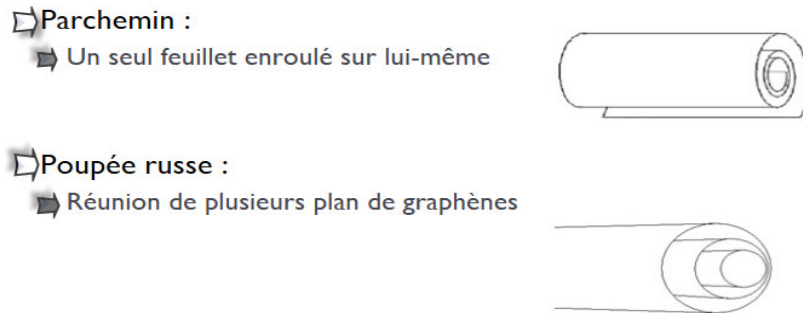


Figure I.8 structure poupée russe

I.4.V Les nanotubes mono feuille (mono paroi) :

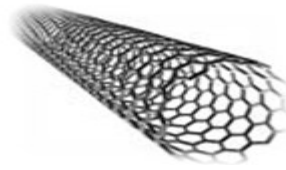
Les nanotubes de carbone monofeuillets (SingleWall NanoTubes, SWNT) ont été découverts en même temps par Béthune et Iijima en 1993. [Iijima 1993 (2)], [Bethune 1993] Comme son nom l'indique, un nanotube monocouche est constitué d'un seul feuillet de graphène enroulée sur elle-même comme présenté sur la (figure I.9) de manière à former un cylindre unique. Le nano-objet obtenu est alors unidimensionnel. Les atomes de carbone restent dans un état d'hybridation (sp^2). Les extrémités sont généralement fermées par deux dômes semblables à des demi fullerènes, mais pouvant comporter des défauts.

Le diamètre d'un nanotube monoparoi peut varier entre 1 et 2nm, la longueur est encore plus variable (100nm à quelques millimètres). [Buchoux 2011], [Bernard 2007]

Les différentes structures de nanotubes mono feuillets décrivent uniquement le nanotube sous forme isolée. Généralement Les nanotubes mono feuillets produits présentent un arrangement bidimensionnel hexagonal compact sous forme de nano cristaux couramment appelés fagot (figure I.10).

Le nombre de tubes dans un fagot est généralement d'une vingtaine à une centaine de tubes. [Journet 1997], [Stones 1986] La distance, centre à centre, entre deux tubes est égale à deux fois le rayon, plus l'espace inter-tubes. Les fagots sont constitués de nanotubes de même diamètre, comme représenté sur la (figure I.10). [Marcoux 2002]

SWNT



- Longueur : >10 nm
- Diamètre intérieur : de 0,4 à 5 nm
- Nombre de feuillets : 1

Figure I.9 nanotubes mono feuille

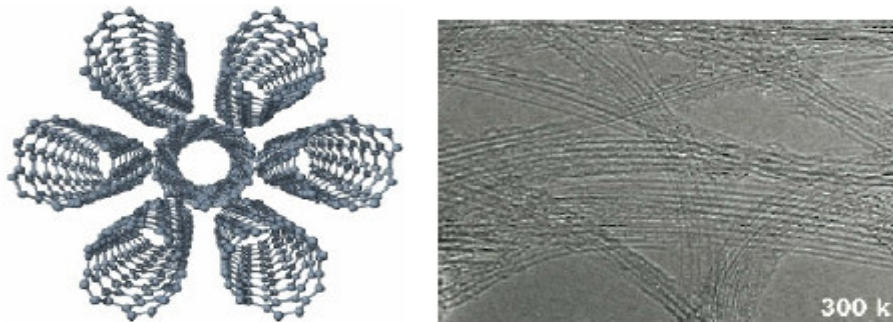


Figure I.10 à gauche : Schéma d'un cristal de 7 nanotubes [Izard 2004]. À droite: Image MET de faisceaux de nanotubes monocouches (collerette brute produite par arc électrique). [Marcoux 2002]

I.4.V.1 Caractéristique de SWNT

Le nanotube idéal ainsi formé présente deux extrémités, qui peuvent être fermées par deux dômes, comme des demi-fullerènes, mais pouvant comporter des défauts dans le cas d'un nanotube réel. L'enroulement de la feuille de graphite va définir la structure et les propriétés du nanotube formé.

Dans la réalité il faut cependant remarquer que les SWNT ne sont presque jamais parfaits car la présence d'entités pentagonales ou heptagonales dans la structure vient déformer le réseau des hexagones. Les dimensions des nanotubes mono-paroi sont comprises entre 0,4 e 5 nm en diamètre [H. Li, S.H. Tang2001] et peuvent avoir une longueur jusqu'à 105 supérieures (jusqu'à 20 cm [M.A. Ermakova2001]) ils sont ainsi assimilables à des macromolécules quasiment unidimensionnelles avec une énorme résistance dans la direction de croissance.

Outre leurs dimensions très différenciées, les SWNT sont caractérisés par leur hélicité qui indique la façon dont le feuillet de graphite est enroulé. Si l'on considère un plan de graphite et que l'on veuille construire un SWNT nous avons plusieurs possibilités pour l'enroulement. Pour bien définir le type de nanotube, il est nécessaire d'avoir recours au vecteur \mathbf{R} et à l'angle d'hélicité θ (Figure I.11).

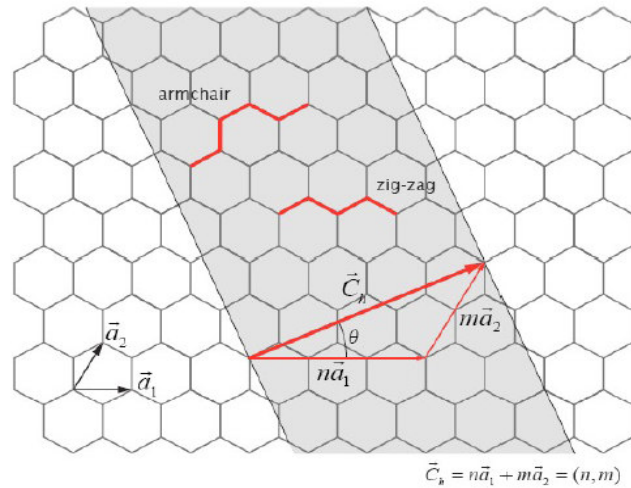


Figure I.11 Structure d'un plan de graphite en deux dimensions. Le réseau hexagonal est décrit à partir des deux vecteurs de base \vec{a}_1 et \vec{a}_2

Dans cette figure on a pris $n=4$ et $m=2$

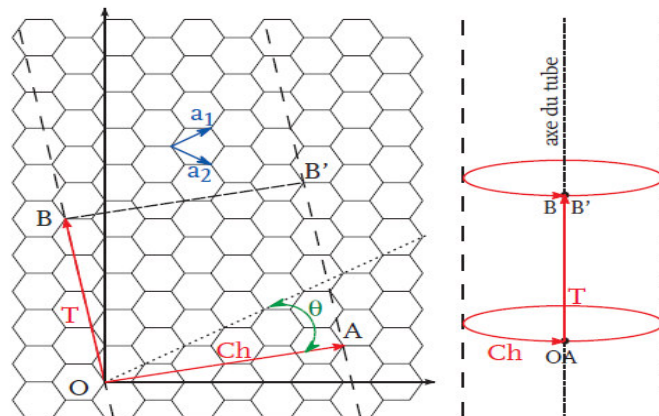


Figure I.12 – Définition du vecteur chiral \vec{ch} et repliement de la feuille de graphène pour former un nanotube ; ici $n = 4$, $m = 2$.

Une feuille de graphite est un pavage hexagonal à deux dimensions d'atomes de carbone de côté a C-C = 0.142nm (figure I.12).

Ce réseau hexagonal est défini par la base (\vec{a}_1, \vec{a}_2) . On note $a = \|\vec{a}_1\| = \|\vec{a}_2\| = \sqrt{3}ac-c=0.246$ nm. (I.1)

La feuille de graphène possède deux atomes par maille. Le nanotube est obtenu en repliant la feuille de graphène de façon à faire coïncider deux sites cristallographiques équivalents reliés par le vecteur chiral \vec{ch}

Le vecteur chiral est défini par :

Le vecteur chiral \vec{ch} est une combinaison linéaire des vecteurs de base du graphite \vec{a}_1 et \vec{a}_2 , où (n,m) est un couple de nombres entiers. Ce couple (n,m) définit entièrement la structure du nanotube, le rapport entre les nombres entiers (n,m) et le rayon est donné par [tokio1995]

$$R = l_0 \sqrt{3(n^2 + m^2 + nm)} / 2\pi \quad (I.2)$$

Où l_0 est la longueur de liaison c-c qui est égale à 1,42Å est n est le paramètre de chiralité (l'index de translation) qui définit la structure autour de la circonférence. On peut aussi définir de la même manière l'angle de chiralité (θ) qui est l'angle entre les vecteurs (\vec{ch}, \vec{a}_1)

$$\theta = \arctan \frac{\sqrt{3}m}{m+2n} = \arccos \frac{2n+m}{2\sqrt{(m^2+n^2+nm)}} \quad (I.3)$$

Il existe deux bases possibles pour définir des coordonnées sur un plan hexagonal comme le graphite. L'angle entre les vecteurs de base \vec{a}_1, \vec{a}_2 peut être de 60° ou de 120°. [Hamada1992] a utilisé une base de 120° pour définir les coordonnées des nanotubes, tandis que [Dunlap1992] a utilisé une base de 60°. La notation à deux indices retenue aujourd'hui utilise la base de 60° de Dunlap, mais est appelée, abusivement, relation de Hamada.

L'angle θ entre \vec{ch} et le vecteur de base \vec{a}_1 est appelé angle chiral. Les nanotubes se divisent en deux familles : les nanotubes chiraux et les nanotubes non chiraux. Les nanotubes non chiraux possèdent une symétrie miroir, ce qui n'est pas le cas des nanotubes chiraux. Les hexagones dessinent une hélice sur la surface du nanotube.

Les nanotubes peuvent être classés selon leur élicité. Il existe trois élicités différentes : comme montre la figure I.13

- $\theta = 0^\circ$ ($n=0$ ou $m=0$) : le nanotube est de type zigzag
- $\theta = 30^\circ$ ($n=m$) : le nanotube est de type armchair
- $\theta \neq 0^\circ$ et $\theta \neq 30^\circ$ (n,m) le nanotube est chiral

Il existe un certain nombre de relations permettant de calculer le diamètre, l'élicité, etc. à partir de la seule connaissance du couple (n,m) [Izard 2004]: vecteur \vec{Ch}

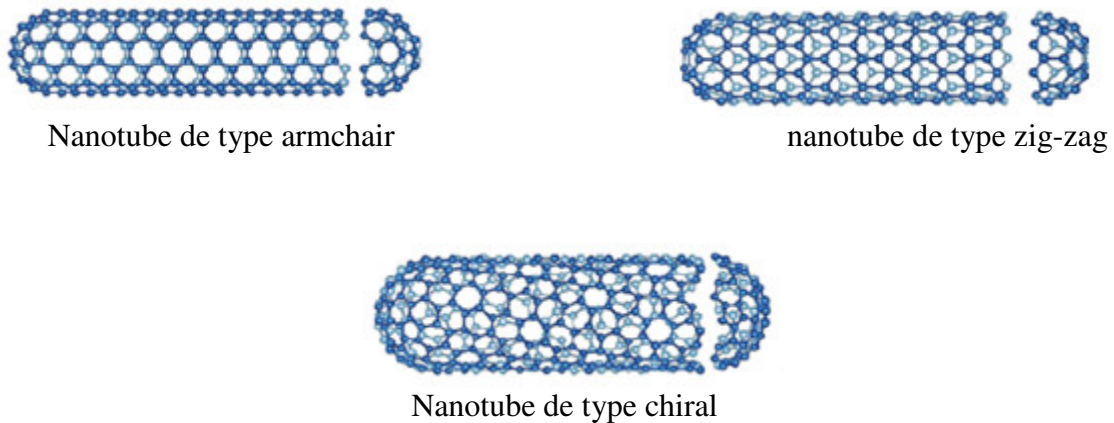


Figure I.13 présentation schématique des différents types de nanotube mono paroi selon le type de d'enroulement [Izard 2004].

Les SWNT se présentent de manière générale sous forme de « fagots » ou « bundle ». Ils s'assemblent par liaisons de Van der Waals suivant une structure triangulaire (*Figure I.14.a*). Il est ainsi difficile d'observer des SWNT de manière individuelle. Des fagots de multi-feuillets, en particulier de nanotubes possédant deux parois (Double-Wall Nanotube : DWCNT) peuvent être aussi observés (*Figure I.14.b*) [Endo 2005].

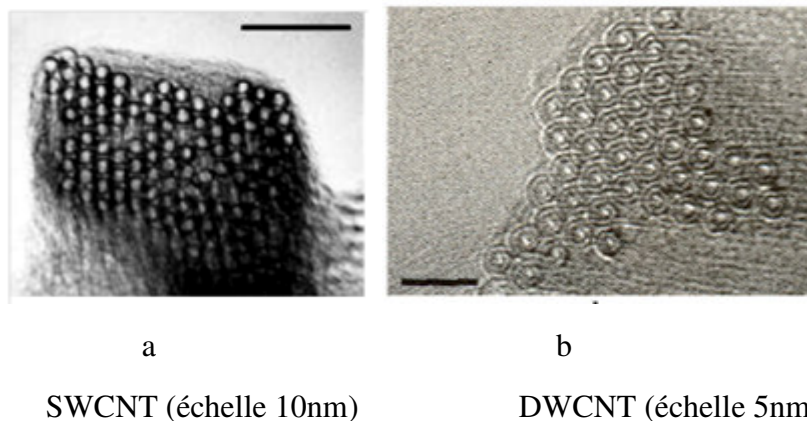


Figure I.14 fagots de CNT

Du point de vue mécanique moléculaire, un nanotube de carbone est considéré comme une grande molécule constituée par des atomes de carbone. Les noyaux des atomes sont considérés comme des points matériels. Leurs mouvements sont régis par un champ de force, qui est généralisé par l'interaction (électron-noyau) et (noyau-noyau). Habituellement, le champ de force est exprimé sous la forme d'énergie potentielle. Elle dépend uniquement sur les positions relatives des noyaux. L'expression générale de l'énergie potentielle totale, en omettant l'interaction électrostatique, est la somme d'énergies dues à des interactions liées (*c-c*) et nonliées (van der Waals). [Rappe 1992]

1.5 Synthèse de nanotubes :

Les premiers nanotubes de carbone ont été produits par une décharge électrique en utilisant des électrodes en graphite dans un environnement contenant un gaz inerte. Cependant, elle produit également des impuretés telles que du carbone amorphe, sans aucun contrôle précis de la longueur et du rayon des nanotubes. Les nanotubes de carbone peuvent également être synthétisés par une technique d'ablation laser produisant des nanotubes de haute qualité mais avec un rendement moins important.

Une méthode simple de synthèse des nanotubes de carbone est réalisée par un dépôt chimique en phase vapeur (CVD : Chemical Vapor Deposition) à une forte température, typiquement supérieure à 700°C . Nous présenterons ici les procédés de synthèse les plus répandus en exposant les avantages et les inconvénients de chacun d'eux. Nous allons examiner successivement la méthode de l'arc électrique, d'ablation laser, de dépôt chimique en phase vapeur et la méthode dite HiPCO .

1.5.1 Méthode de l'arc électrique :

La technique de l'arc électrique (figure 1.15a) est un procédé de synthèse haute température .cette technique a permis de synthétiser les fullerènes en grande quantité [ratshmer et al,1990], et pour produire les première nanotubes multi feuillets identifiés par [lijima(1991)]

Cette technique est basée sur l'évaporation du graphite par un arc électrique, amorcé entre deux électrodes en graphite .un plasma chaud est formé et maintenu entre deux électrode, l'anode étant régressivement sublimé.les espèces carbonées dans le plasma vont se recombinaer à l'extérieure les produits formés vont se déposer sur les parois des réacteur.les conditions de température à l'intérieure de l'enceinte sont très importantes pour la qualité et la quantité des nanotubes formés.la température est contrôlée en utilisant un gaz interne(He,Ar) à une certaine pression. Un collecteur refroidi par eau peut également être utilisé, suivant la géométrie du réacteur employé.

La synthèse des nanotubes de carbone mono feuillets nécessite l'emploi d'une anode en graphène.Contenant également des catalyseurs métallique.ces catalyseurs vont être sublimés avec le graphite lors de la réaction du plasma, et vont permettre aux fagots de nanotube de croître (Bethune et Al, 1993, lijima, 1993) .les catalyseurs les plus employés sont Ni,Fe,Co,Lu,La,... .À l'issue de la synthèse, la proportion la plus importante de nanotube mono feuillets se retrouve dans une zone appelée collerette, autour de la cathode, qui présente un aspect spongieux.

Notons qu'en 1997, Journet et Al. On améliorée la technique de l'arc électrique en employant un mélange a permis d'obtenir des rendements de synthèse élevés, ce qui a ouvert la voie à la production de masse des nanotubes mono feuillets en masse.Aujourd'hui, un certain nombre de sociétés (Nanoledge et Mer Inc entre autres commercialisent des nanotubes produits par cette technique [Kaci2012])

1.5.II Méthode d'ablation laser :

La technique de synthèse par ablation laser (figure I.15b) est la méthode qui a permis à Kroto et Smalley de découvrir les fullerènes en 1985 [Kroto 1985]. Cette technique repose sur l'évaporation d'un disque de graphite par irradiation laser, la cible étant placée dans un four à (1200 °C) [Thess 1996]. Le laser employé est un laser Nd-YAG impulsif nanoseconde. Pour assurer une sublimation homogène, la cible est en rotation à l'intérieur de l'enceinte, afin que le faisceau laser balaye sa surface. Deux impulsions lasers successives sont employées pour améliorer le rendement de synthèse. La première impulsion utilise l'harmonique du Nd-YAG (532 nm), tandis que la seconde utilise le fondamental (1064 nm).

La seconde impulsion permet d'augmenter la dissociation des agrégats de carbone formés par la première impulsion. Un flux de gaz inerte (Ar) permet d'évacuer les produits formés, qui sont récoltés sur un collecteur en cuivre refroidi à l'eau. Comme dans le cas de la synthèse par arc électrique, il est nécessaire d'utiliser un catalyseur métallique mélangé à la cible en graphène pour former des nanotubes mono feuillets. [Izard 2004]

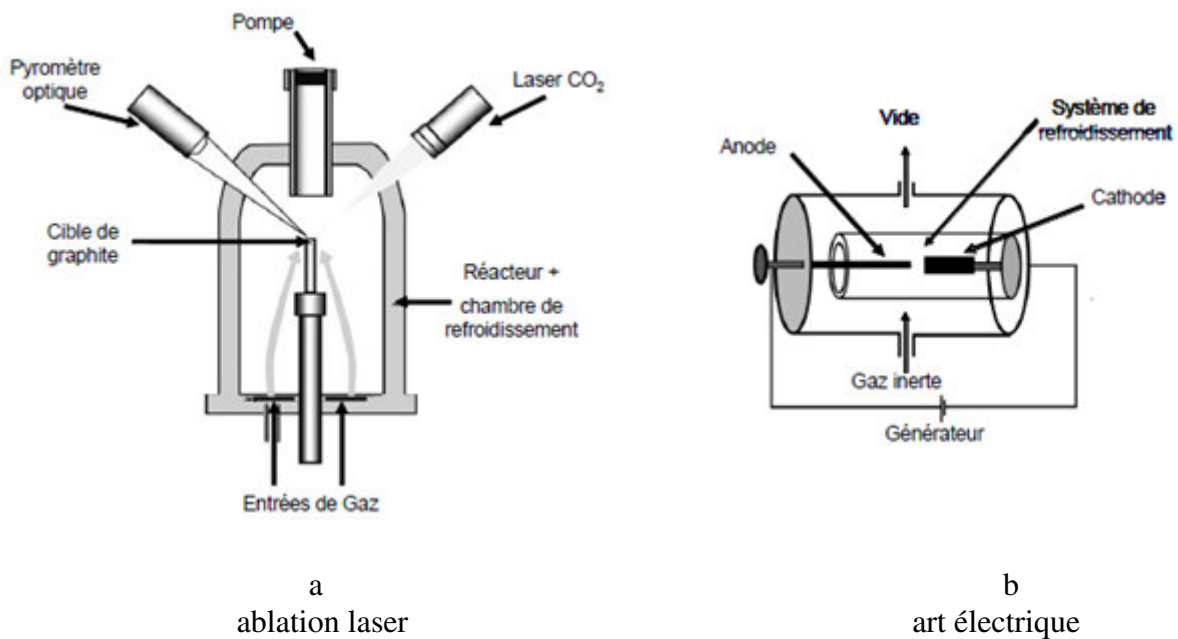


figure I.15 schéma simplifiés de deux méthodes

Cette technique est complexe dans sa mise en œuvre, car elle repose sur l'utilisation de deux impulsions lasers successives de fréquences différentes. Une autre méthode plus simple de synthèse par ablation laser utilise un faisceau laser qui est focalisé sur une cible obtenue en compactant de la poudre de graphite. Cette technique peut être couplée à des mesures in situ permettant ainsi l'étude et la modélisation des conditions de synthèse. ONERA (Laboratoire d'Etudes des Microstructures, Châtillon) où la forte puissance du laser continu

(CO₂) permet de fournir une énergie de (1500 W) suffisante pour vaporiser une quantité importante de matière par unité de temps. [Castignolles 2004]

Les nanotubes commerciaux sont synthétisés par une méthode d'ablation laser qui présente la particularité d'utiliser deux faisceaux lasers [Rinzler 1998], [Smalley 1997] Les deux lasers pulsés sont synchronisés de manière à ce que l'impulsion du second laser soit absorbée par les vapeurs créées par le premier laser. Ceci minimise la formation de sous produits en brisant les particules de taille importante arrachées à la première impulsion, ce qui augmente d'autant la quantité de carbone utilisable pour la production des nanotubes.

Un tube de quartz de 4" de diamètre interne est placé au centre d'un four à (1100°C). Il contient une cible cylindrique de graphite de 2" de longueur et 1" de diamètre, avec catalyseurs (Ni/Co) (composition molaire : (1 % Co / 1 % Ni / 98 % C). Cette cible tourne sur elle-même et les impulsions lasers la balayent verticalement, de manière à avoir une érosion homogène. Deux lasers pulsés (30 Hz, 1064 nm) fournissent des impulsions de (930 mJ), séparées l'une de l'autre de 40 ns. Avec en outre un débit d'argon de (750 cm) (sous une pression de 500 Torr), le système est capable dans ces conditions de produire en 48 heures (20 g) de matériau brut, contenant (40 a 50 %) en volume de nanotubes monocouches. Le constructeur assure une distribution relativement étroite de diamètres autour de (1,2 nm), avec un mélange de différentes chiralités. Les longueurs, quant à elles, sont pour la plupart comprises entre (0,2 et 2 µm). [Marcoux 2002]

Un des avantages de la méthode de synthèse par ablation laser est qu'elle permet de produire d'assez grandes quantités de nanotubes mono-paroi. Les rendements sont très élevés, (70% a 90%) de la masse de graphite de départ est convertie en nanotubes. Un autre avantage est qu'elle permet aujourd'hui un contrôle de la distribution en diamètre avec une précision de l'ordre de (5%) [Jost 1999]. L'un des gros inconvénients de cette méthode est qu'elle nécessite, pour l'instant, une purification du produit brut afin de disposer d'échantillons ne contenant que des nanotubes de carbone.

En effet, la suie issue de la synthèse ne contient pas seulement de nanotubes de carbone mono-paroi, mais aussi du carbone amorphe, des restes de catalyseurs et éventuellement des fullerènes. Les méthodes de purification les plus utilisées sont toutes à base de traitements acides et engendrent des défauts dans les nanotubes. Le travail actuel consiste toujours d'améliorer le contrôle de la distribution en diamètre et d'obtenir un produit brut plus "propre".

Ces deux méthodes permettent la production de nanotubes mono ou multiparois présentant très peu de défauts, mais la sélectivité est souvent faible (présence de particules encapsulées et de suies) et les productivités peu importantes. De plus, le passage à plus grande échelle est difficile et les coûts énergétiques souvent très importants.

I.5.II Méthode de dépôt Chimique en Phase de Vapeur (CVD) :

La synthèse de nanotubes de carbone par la méthode de dépôt chimique en phase vapeur (Abrégée en CVD pour Chemical Vapor Deposition) (figure I.16) a été effectuée pour la première fois par Endo et al. [endo 1995]. Dans cette méthode, des hydrocarbures (CH_4 , C_6H_6 ...) et de l'hydrogène sont mis en présence de catalyseurs métalliques (Fe, Co, Ni...), le tout dans un four porté à haute température ($> 700\text{C}$). Les nanotubes se forment alors sur les plots de catalyseurs. L'un des avantages de cette méthode est que les nanotubes se forment de façon continue (contrairement à la méthode d'ablation laser par exemple). Nous pouvons espérer trouver des conditions expérimentales permettant de fabriquer des nanotubes purs avec un contrôle parfait du diamètre et de la chiralité. Cependant, cela est encore loin d'être la réalité.

Un autre avantage de cette méthode est que l'on peut faire croître les nanotubes à des endroits prédéterminés. Cela peut s'avérer très intéressant pour toutes les applications en nano- électronique, par exemple, pour fabriquer des matrices de transistors à base de nanotubes de carbone.

Nous obtenons alors des pelouses de nanotubes. Cette propriété est très intéressante pour toutes les utilisations des propriétés d'émission de champ des nanotubes. En revanche, un inconvénient de cette méthode est qu'elle ne permet pas, pour le moment, de fabriquer de grandes quantités de nanotubes mono parois (figure I.17). En effet, si la production de nanotubes de carbone multi parois est relativement facile, celle de nanotubes de carbones mono parois est difficile.

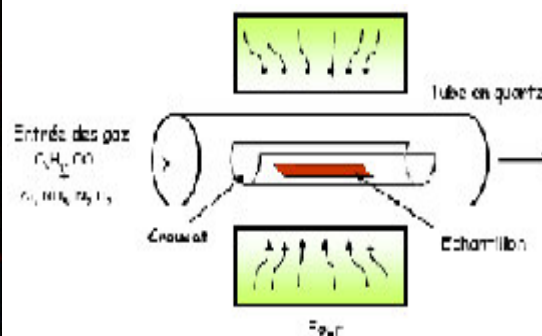


Figure I.16 Schéma d'un réacteur CVD pour la croissance des (NTC) [Gohier 2007]

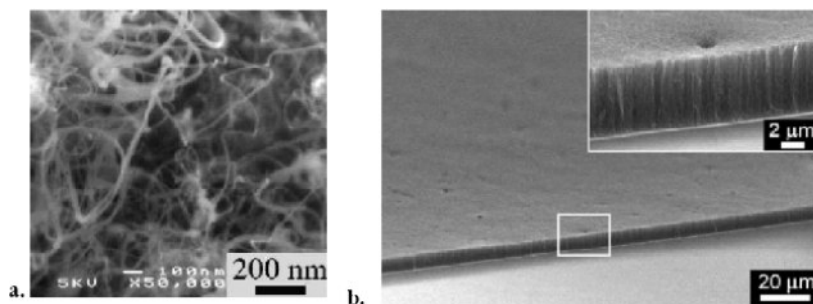


Figure I.17 Nanotubes synthétisés par CVD : a. (MWCNT) désorientés [Emmenegger 2003]
b. (SWCNT) orientés verticalement par soutien mutuel [Maruyama 2005]

Une autre technique de synthèse CVD assisté par filament chaud (*HFCVD*: *Hot Filament Chemical Vapor Deposition*) [Marty 2006] (figure I.18), mise au point par l'équipe d'Anne-Marie Bonnot à l'Institut Néel (Grenoble). Le groupe a mis à profit son procédé de synthèse de diamant en modifiant les paramètres de pression et de température ainsi qu'en ajoutant un catalyseur pour favoriser la croissance des nanotubes.

La méthode de synthèse CVD par un filament chaud conduit également à la croissance de (SWCNT), et permet de localiser et d'auto-assembler des (SWCNT) isolés et suspendus [Marty 2003].

L'appareil qui permet de faire la (*HFCVD*) a d'abord été construit pour la croissance de minces films de diamant [Bonnot 1993]. Pour la synthèse des (SWCNT), les substrats sont recouverts d'une couche de catalyseur de (0.5 à 8 nm) d'épaisseur déposée par des techniques standard d'évaporation. Les paramètres de synthèse sont alors ajustés par rapport à ceux utilisés dans le cas des films de diamant. La vapeur est composée d'environ (10%) de méthane et (90%) d'hydrogène.

Les paramètres typiques de déposition sont une température de substrat allant de (750 à 850°C) et une pression totale à l'intérieur de la chambre de (30 à 100 mbar). La particularité de cette technique de (*HFCVD*) est de tirer profit de ce filament chaud de tungstène pour décomposer la vapeur en espèces actives. Ce filament permet également de contrôler la formation des particules de catalyseur pendant la montée en température.

Le carbone commence à réagir avec le catalyseur lorsque le substrat atteint une température de (450 à 500°C). Les nanotubes créés à cette température présentent de nombreux défauts, mais ces derniers disparaissent progressivement en augmentant la température du substrat, et permettent ainsi d'obtenir des tubes sans défaut. L'épaisseur de la couche de catalyseur est un paramètre essentiel. Une couche de catalyseur d'épaisseur supérieure à (9 nm) conduit à une croissance de tubes trop nombreux, alors que pour une épaisseur trop faible (<0.5nm), le rendement de croissance des (SWCNT) devient négligeable [Marty 2006]. Avec une épaisseur optimale de catalyseur de l'ordre de (0.5 à 4 nm), le rendement de production d'un nanotube unique est d'environ (46%). La longueur des nanotubes est également liée à la quantité de catalyseur, pour une couche de catalyseur de 1nm d'épaisseur les nanotubes obtenus font en moyenne (300nm) de long. [Buchoux 2011]

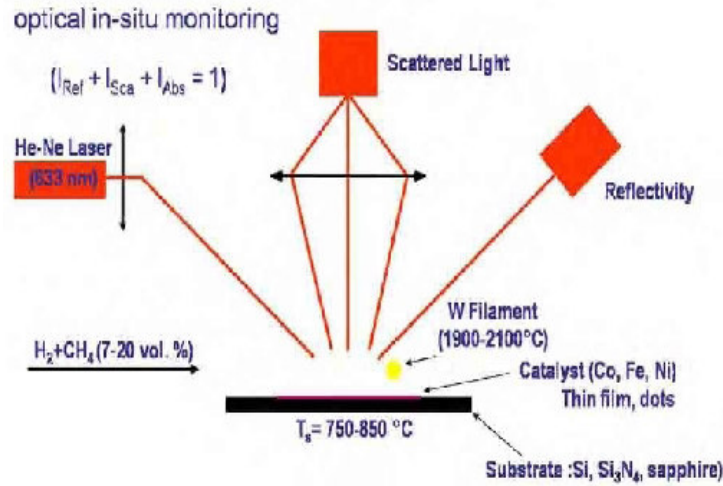


Figure I.18 Schéma du dispositif expérimental utilisé pour la croissance des (SWNT) et des nanotubes bi parois par (HFCVD) avec un suivi optique in situ. [Buchoux 2011]

Les résultats les plus marquants dans la synthèse de nanotubes de carbone réalisés par CVD sont résumés dans le tableau suivant (tableau I.1) :

Référence	Catalyseur/Support	Température	Gaz	Produit
[Yudaska 1995]	Ni(1-100nm)	700°C		MWCNT
[Dai 1996(1)]	Mo	1200°C	CO	SWCNT
[Fan 1999]	Fe(5nm)/Si	700°C	C ₂ H ₄	MWCNT
[Cassell 1999]	Fe-Mo/Al ₂ O ₃ -SiO ₂	900°C	CH ₄	SWCNT
[Nikolaev 1999]	Fe(Co) ₅	800° – 1200°C	CO	SWCNT
[Jung 2001]	Ni(2-7nm)	800°C	C ₂ H ₂ /NH ₃	Nano-fibre "bamboo"
[Hongo 2003]	Fe(2nm)/Al ₂ O ₃	650°C	CH ₄	SWCNT

[Flahaut 2003]	$Mg_xC_{oy}M_{oz}O$	1000°C	CH_4/H_2	MWCNT
[Hu 2004]	C_o-M_o	800°C	$C_2H_5OH/Ar/H_2$	SWCNT
[Hata 2004]	$Fe(1nm)/Al_2O_3$	750°C	$C_2H_4+\sim 100ppm(H_2O)$	SWCNT
[Zhang 2004]	C_o-M_o	750°C	CO	SWCNT
[Maruyama 2005]	C_o-M_o	800°C	C_2H_5OH	SWCNT
[Kim 2006]	$MgO:Fe:M_o$	850°C	CH_4+NH_3/Ar	MWCNT
[Cantoro 2006]	$Al/Fe(0,3nm)/Al(0,2nm)$	350°C	C_2H_2	SWCNT

Tableau I.1 Des résultats de la synthèse de nanotubes de carbone réalisé par CVD [Gohier2007]

1.5.II Décomposition catalytique : HiPCO

Le procédé HiPCO (High Pressure dismutation of CO : décomposition sous haute pression de CO) a été développé par le groupe de R. Smalley [Smalley 1997]. Ce procédé fait partie de la famille des procédés de décomposition catalytique à moyenne température (figure I.19).

Un flux continu de penta carbonyle de fer ($Fe(CO)_5$) et de monoxyde de carbone (CO) est introduit sous une pression de 10 atm dans une enceinte chauffée à 1200°C. L'originalité du procédé tient au fait que le catalyseur, nécessaire à la croissance des tubes mono feuillets, est formé in situ par la décomposition du gaz précurseur. De surcroît, le monoxyde de carbone utilisé comme source de carbone pour la croissance des tubes ne se pyrolyse pas à 1200°C, ce qui permet d'obtenir des nanotubes de carbone mono feuillets exempts de toute impureté graphitique.

Les nanotubes formés par cette technique sont assez originaux. Ils présentent une large distribution de longueurs (dont des nanotubes très petits), mais contiennent beaucoup de catalyseur résiduel. Cette technique permet la synthèse à grande échelle de nanotubes mono feuillets. Le procédé de fabrication est à continu, ce qui est très positif pour une industrialisation. Une société commerciale (Carbon Nanotech Inc) propose des nanotubes synthétisés par cette technique.

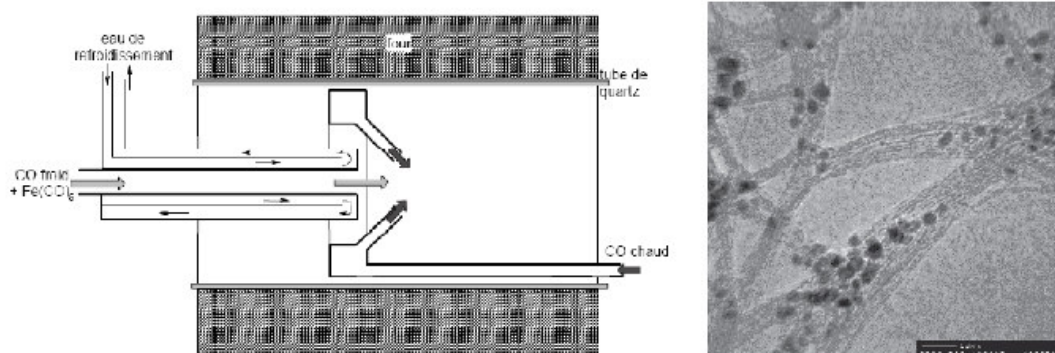


Figure I.19 à gauche : Schéma du Production de nanotubes par méthode HiPCo [Marcoux 2002], à droite: Image TEM de nanotubes (HiPCO). [Nikolaev 1999]

1.6 Purification des nanotubes:

Dans la plupart des cas, un mélange de nanotubes, de carbone amorphe et de résidus catalytiques est récupéré à l'issue de la synthèse. L'utilisation des nanotubes implique, quel que soit leur type et la méthode de synthèse, la mise en œuvre d'un processus de purification préalable pour éliminer les impuretés. On peut distinguer:

- Les impuretés solubles : des fullerènes (C_{60} , C_{70}), des hydrocarbures aromatiques polycycliques.
- Les impuretés insolubles : du carbone amorphe, des particules de graphite, des oignons de carbone, des particules métalliques de catalyseur (recouvertes de feuillets graphitiques).

Il est très facile de se séparer des impuretés solubles, un lavage au (CS_2) [Bandow 1997] ou au toluène permet d'y parvenir.

1.6.1 Les méthodes chimiques:

Elles reposent sur la différence de réactivité entre les nanotubes et les impuretés, le carbone amorphe et les espèces mal graphitées étant plus réactives. Les réactions mises en jeu sont des réactions d'oxydation, avec un oxydant liquide [Vaccarini 1999] (la plupart du temps) ou gazeux. [Zimmerman 2000], [Mizoguti 2000] Elles doivent dégrader les impuretés en produits solubles ou gazeux. Elles permettent de se séparer du carbone amorphe et des particules métalliques, bien que les feuillets graphitiques entourant le métal constituent souvent un obstacle à son oxydation.

1.6.II Les méthodes physiques :

Elles reposent sur la différence de forme entre les nanotubes, très longs et très anisotropes, et les nanoparticules d'impuretés, bien souvent de forme approximativement sphérique. Les techniques utilisées sont principalement la microfiltration, tangentielle [Rinzler

1998] ou directe, [Shelimov 1998] ou la chromatographie, d'exclusion stérique [Duesberg 1999], [Duesberg 1998].

Des séparations reposant sur la différence de densité existent également, il s'agit alors de purification par centrifugation. [Bonard 1997] Ces méthodes physiques permettent de se séparer des nanoparticules (catalyseur, graphite, oignons), le carbone amorphe étant trop divisé pour pouvoir être éliminé par ces méthodes. [Marcoux 2002]

Quasiment tous les protocoles de purification sont une combinaison de plusieurs types de méthodes. Par exemple, la purification des nanotubes commerciaux [Rinzler 1998] consiste en un traitement à l'acide pour oxyder le carbone amorphe (méthode chimique), suivi d'une microfiltration tangentielle pour séparer les nanoparticules des (SWCNTs) (méthode physique). Un autre exemple de purification de (SWCNTs) [Shi 1999] décrit l'oxydation du carbone amorphe sous flux d'air (350°C), suivie de l'oxydation du catalyseur dans une solution de (HCl) concentrée. Deux microfiltrations directes (une à $1\ \mu\text{m}$, l'autre à $0,2\ \mu\text{m}$), en phase aqueuse avec tensioactif, permettent enfin d'éliminer les nanoparticules. [Marcoux 2002]

Aucune de ces méthodes n'est sélective à (100%) et la purification reste aujourd'hui un problème tout aussi crucial que la synthèse. Les réactions d'oxydation n'attaquent pas entièrement le catalyseur et le carbone amorphe, alors même qu'elles oxydent partiellement les parois des nanotubes. Les processus de filtration sont souvent rendus difficiles par le colmatage des membranes et enfin l'efficacité des centrifugations est diminuée par l'agrégation entre les nanoparticules et les nanotubes. Nous allons dans la suite de ce paragraphe décrire brièvement quelques méthodes de purification de nanotubes monocouches. [Marcoux 2002]

La littérature permet de classer les méthodes de purification en deux grandes catégories: filtration et traitements acides. Ces méthodes peuvent être associées entre elles. D'un point de vue pratique, les (MWCNT) produits catalytiquement sont plus faciles à purifier car ils ne contiennent comme impureté que le catalyseur et son support, alors que les (SWCNT) produits par arc électrique ou ablation laser contiennent énormément de carbones amorphes de petites tailles.

Les (SWCNT) sont souvent purifiés à l'aide de techniques de filtration car la technique d'attaque acide peut entraîner leur destruction [Dujardin 1998]. On distingue deux types de filtration.

- Filtration directe : Le flux de liquide à filtrer est perpendiculaire à la membrane, dans la même direction que le filtrat. C'est la méthode classique de filtration.

- Filtration tangentielle : Le flux de liquide à filtrer est tangentiel à la membrane. C'est le cas lorsque la solution filtrée est remise en circulation. [Marcoux 2002]

Li et al. [Li 2000] ont mis au point une procédure de purification des (SWCNT), avec un rendement de (40%) et une pureté de (95%). Toujours en associant ultrasons et filtration, Bonard et al. [Bonard 1997] ont employé un surfactant pour agréger les particules et obtenu un rendement de purification de (90%). Bandow et al. [Bandow 1997] ont utilisé plusieurs filtrations avec des solvants différents, permettant d'éliminer successivement les carbones de type fullerènes et les nanoparticules catalytiques.

Shelimov et al. [Shelimov 1998], avec une méthode assez proche (la filtration a lieu dans ce cas en présence d'ultrasons) ont obtenu le même rendement de (90%) mais cette

variante permet de purifier une plus grande quantité de nanotubes en une seule fois. L'équipe de Bernier [Vacarini 1999] purifie des (SWCNT) produits par arc électrique par reflux dans (HNO_3), le résidu étant ensuite dispersé dans une solution contenant un surfactant puis filtré à partir d'un système de filtration tangentielle

La purification des (MWCNT) produits par voie catalytique est souvent effectuée à partir d'un traitement à l'acide fluorhydrique [Leroux 1999], destiné à éliminer le support, suivi d'un traitement à reflux avec (HNO_3) [Rinzler 1998] afin d'éliminer le catalyseur. Une étape supplémentaire de retraitement thermique à haute température ($> 2000\text{ }^\circ\text{C}$) peut être ajoutée afin d'évaporer les particules résiduelles de catalyseur et d'éliminer les éventuels défauts [Hamwi 1997]. Dillon et al. [Dillon 1997] ont décrit un processus conduisant à (98%) de (MWNT) purs. Ce dernier combine un reflux avec (HNO_3) à un traitement sous air à (550°C). Chiang [Chiang 2001] utilise un processus proche de celui de Dillon [Dillon 1997], les nanotubes étant traités avec (HCl) après oxydation sous air.

1.6.III Ouverture des nanotubes:

Dans la plupart des cas, les nanotubes sont fermés par des hémisphères de type ($C60$) ou, dans le cas de la synthèse par voie catalytique, par une particule de catalyseur. On distingue deux méthodes principales d'ouverture: Oxydation chimique et thermique.

Tsang et al. [Tsang 1994] ont développé une méthode chimique d'ouverture des nanotubes. Ceux-ci sont placés à reflux dans une solution d'acide nitrique pendant 24 heures, à (140°C). Environ (90%) des tubes sont ouverts. L'attaque acide se fait préférentiellement au niveau des points de courbure en bout de tube. De telles courbures sont engendrées par la présence de cycles à 5 atomes de carbone (à la place de cycles à 6 atomes) dont la tension inhérente fragilise l'extrémité du tube.

L'utilisation de (HCl) permet également d'ouvrir les (MWCNT) en employant un léger reflux [Sloan 1998]. Hwang [Hwang 1995] a testé divers oxydants, conduisant à des résultats assez différents. L'utilisation de ($K_2Cr_2O_7$) et (H_2O_2) en milieu acide ne conduit pas à l'ouverture. Les meilleurs résultats sont obtenus pour ($KMnO_4$) en présence de (MnO_2) (85% d'ouverture), ($OsCl_3$) en présence de ($NaIO_4$) (81 %) et ($RuCl_3$) en présence de ($NaIO_4$) (91%). L'oxydation s'effectue à (100°C), sur une durée comprise entre (30 et 60 minutes). Dans le cas de ($RuCl_3$ ($NaIO_4$)), l'augmentation du temps de réaction (90 min) conduit à la destruction des nanotubes.

L'ouverture par reflux dans l'acide nitrique (qui est la plus utilisée), comme l'utilisation d'autres oxydants présentent l'inconvénient de conduire à la fonctionnalisation des atomes de carbone en bout de tube (formation de liaison ($C=O$) et rupture de liaison ($C-C$) ainsi qu'à celle des parois du tube. [Ago 1999].

Une deuxième façon d'ouvrir les tubes consiste en une oxydation sous air. Selon Ajayan et al. [Ajayan 1993 (2)], les conditions optimales impliquent un chauffage à (700°C) pendant 15 minutes. Le rendement d'ouverture est alors d'environ (20%). L'ouverture se fait par écaillage feuillet par feuillet des extrémités des tubes. Il arrive que les débris carbonés provenant de l'ouverture forment un bouchon. Afin de remédier à ce problème, un recuit à haute température peut être effectué. [Ugarte 1998]

1.7 Propriétés des nanotubes de carbone :

Depuis leur découverte, les nanotubes de carbone ont attiré un intérêt très vif de la communauté scientifique et de nombreuses recherches ont été, et sont encore menées afin de mieux comprendre leur structure et appréhender leurs caractéristiques intrinsèques. Les résultats obtenus jusqu'à ce jour sont particulièrement intéressants et les nanotubes présentent des propriétés remarquables qu'elles soient mécaniques, électroniques ou chimiques, et souvent différentes de celles du graphite. De plus, les CNT sont de bons conducteurs thermiques.

Les nanotubes de carbone possèdent des propriétés physiques exceptionnelles.

- Très faible déformation sous charge : module d'Young axial ($270-950 \text{ GPa}$) pour (MWNT) et ($550-1060 \text{ GPa}$) pour (SWNT) contre 210 pour l'acier au carbone,
- Très forte résistance à la traction : (150 GPa), plus de 100 fois supérieure à l'acier ultra résistant.
- Très forte conductivité thermique : ($3000-6000 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$) contre 400 pour le cuivre,
- Conductivité électrique : même niveau que le cuivre.

Evident, la meilleure dispersion des nanotubes dans les matériaux composite permet d'atteindre les mêmes performances.

1.7.I Propriétés mécaniques:

La liaison (C-C) du graphite est une liaison chimique forte. C'est la raison pour laquelle les nanotubes ont des propriétés mécaniques uniques [Heath 1985].

Depuis leur découverte, de nombreux travaux théoriques ont prévu un module d'Young très élevé pour les nanotubes. Lu [Lu 2007], en utilisant un modèle empirique, prévoit un module de Young de (1.06 TPa) pour les nanotubes mono parois. Il montre aussi que le module de Young, ainsi que d'autres modules élastiques (cisaillement) sont dépendants des caractéristiques géométriques des tubes (chiralité, diamètre...), [Wu 2006]

1.7.II Propriétés thermiques:

De même que pour les propriétés électroniques, l'unidimensionnalité des nanotubes laisse espérer des propriétés thermiques originales. Le diamant présente la conductivité thermique la plus élevée de tous les matériaux connus à ce jour environ ($103 \text{ a } 300 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$). Le plan de graphène possède une conductivité comparable, mais le graphène présente des propriétés moindres dues à l'anisotropie. La structure particulière des nanotubes permet de penser que leur conductivité doit également être grande le long de l'axe du nanotube. [Lassagne 2006] La mesure des propriétés thermiques d'un nano-objet comme les nanotubes est délicate.

Cependant, quelques études expérimentales ont permis de mesurer la conductivité thermique de nanotubes multi feuillets. Leur conductivité est grande, mais significativement plus faible que celle du graphène

Ces résultats sont a priori décevants, mais ils peuvent s'expliquer en considérant le fait que tous les feuillets ont participé à la conduction thermique alors que seul le feuillet externe a été utilisé pour les mesures. Ces considérations permettent d'estimer la magnitude de la conduction d'un tube mono feuillet au même ordre de grandeur que celle du graphène. [Izard 2004]

L'étude des propriétés thermiques des nanotubes est un domaine assez peu exploré, en partie à cause des difficultés expérimentales. Des études sont encore nécessaires pour mieux comprendre les phénomènes, en particulier dans le domaine des hautes températures, où les données expérimentales sont quasiment inexistantes. [Izard 2004]

Les matériaux carbonés sont utilisés industriellement pour améliorer la conductivité thermique. C'est pourquoi la découverte des nanotubes en 1991 a rapidement conduit à prédire [Ruoff 1995] pour cette nouvelle forme allotropique unidimensionnelle de carbone une conductivité thermique égale ou supérieure à celle du diamant ou du graphite. Les propriétés thermiques de nanotubes, qu'ils soient multicouches ou monocouches, ont encore été relativement peu explorées.

Des mesures aboutirent à des valeurs de conductivité thermique longitudinale allant de (1800 à 6000 $W.m^{-1}.K^{-1}$) pour un fagot isolé et à température ambiante. [Hone 1999] Des valeurs aussi élevées sont imputées à un libre parcours moyen particulièrement élevé pour les phonons (de l'ordre de 100 nm). Une valeur de (6600 $W.m^{-1}.K^{-1}$) fut obtenue pour un nanotube (10,10) isolé et à température ambiante, [Berber 2000] ce qui est comparable à la conductivité thermique d'un hypothétique feuillet de graphite isolé. [Marcoux 2002]

1.7.III Propriétés optiques :

Les nanotubes possèdent des propriétés de limitation optique dans une large gamme de longueurs d'onde, depuis le visible jusqu'au proche infrarouge. Des seuils faibles de non linéarité et de grandes densités optiques ont été obtenues lors de l'étude de dispersions aqueuses de nanotubes monocouches. [Vivien 1999] Ces performances égalent ou surpassent celles d'autres bons limiteurs optiques, comme le (C60) ou le noir de carbone, que ce soit dans le visible ou le proche infrarouge.

Les dispersions liquides de nanotubes monocouches apparaissent donc comme des systèmes prometteurs pour une limitation optique à bande large. D'autres solvants ont été essayés, comme l'éthylène glycol [Mishra 2000] ou le chloroforme. [Vivien 1999] Plusieurs phénomènes optiques non linéaires peuvent être à l'origine d'une limitation optique : réfraction, absorption, diffusion.

L'origine de la limitation dans le cas des nanotubes est essentiellement une forte diffusion non linéaire engendrée par la formation de bulles de solvant à la surface des nanotubes et par une sublimation des tubes à plus forte fluence. [Vivien 2000] Il est noté que des (MWNTs) dispersés dans un film de polymère, en l'occurrence du (PMMA), ont montré également des propriétés de limitation optique large bande. [Sun 1998]

Le développement des sources laser intenses a entraîné la nécessité de concevoir des systèmes de protection pour l'oeil et les détecteurs optiques. Les systèmes de protection actifs sont appelés limiteurs optiques. Idéalement, ils transmettent la lumière pour de faibles flux lumineux tandis que pour de forts flux ils limitent la transmission, de manière à maintenir l'intensité en dessous du seuil de dommage du détecteur. [Marcoux 2002]. Des études commencent à porter également sur l'utilisation de nanotubes comme détecteur infrarouge. [Xu 2001]

1.7.IV Propriétés de capillarité :

Le nanotube peut être considéré comme un « nanofil » qui va être bien détaillé dans le deuxième chapitre ; qu'il est possible de combler par capillarité. On peut ainsi encapsuler à l'intérieur du nanotube des métaux [Ajayan 1993 (1)], [Grobert 1999] (figure I.20a) ou bien des macromolécules comme des fullerènes [Suenaga 2000] (fig I.20b). Ces structures à base de fullerène appelées « peapods » ont été observées la première fois par Smith et al. [Smith 1998]

Des métallos fullerènes (un fullerène qui possède un ou quelques atomes métalliques emprisonnés dans sa structure cage carbonée) peuvent être aussi encapsulés dans les (SWNT) (fig I.20b). De nombreux métaux (le plus souvent des terres rares) peuvent être ainsi isolés à l'état atomique et arrangés sous la forme d'une chaîne [Suenaga 2001]. Il s'agit là d'une des très rares structures où des atomes peuvent être observés et analysés de manière isolée. [Gohier 2007]

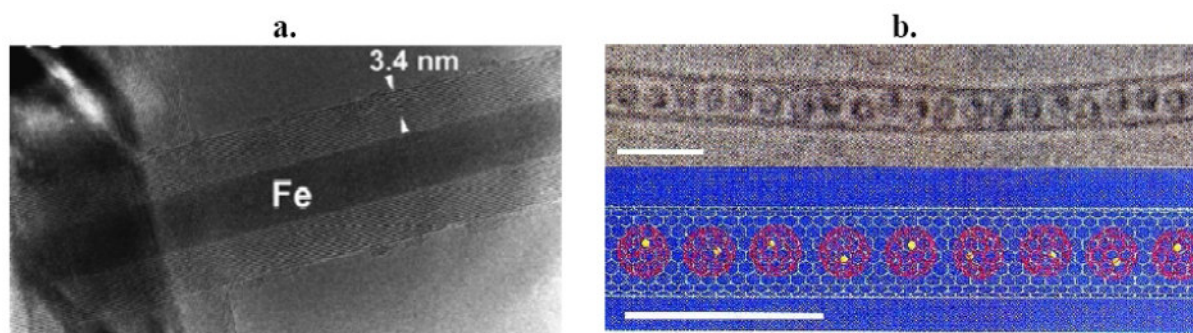


Figure I.20 a. Fe encapsule dans un MWNT [Grobert 1999] b. C82 encapsule dans un (SWNT). [Suenaga 2000]

I.7.V Propriétés électroniques:

Du fait de leur unidimensionnalité, la structure électronique des nanotubes mono feuillets présente plusieurs particularités. La structure de bandes d'un tube mono feuillet, dans le modèle des liaisons fortes de la structure de bandes du graphite [Saito 1998], [Ducastelle 2003], [Charlier 2003]. Les propriétés électroniques du nanotube sont calculées à partir de celles d'un feuillet de graphite bidimensionnel, mais en rajoutant des conditions périodiques selon leur vecteur de chiralité. [Izard 2004]

En ce qui concerne les nanotubes monocouches, les propriétés électroniques sont principalement liées aux deux nombres entiers n et m qui définissent l'hélicité du tube ainsi que son diamètre (figure I.21). Les calculs théoriques sur des tubes infinis permettent de recenser les trois cas suivants: [Mintmire 1993]

- Les nanotubes de configuration armchair (n, n) sont métalliques.
- Les tubes (n, m) avec $(n-m)$ multiple de 3 non nul sont des semi-conducteurs de faible gap.
- Les autres nanotubes sont des semi-conducteurs à gap large ou des isolants.

Plus généralement, on considère que les nanotubes de configuration (n, m) sont métalliques si $n-m$ est un multiple de 3. Dans le cas contraire, ils sont semi-conducteurs. La (fig I.20) résume ces résultats.

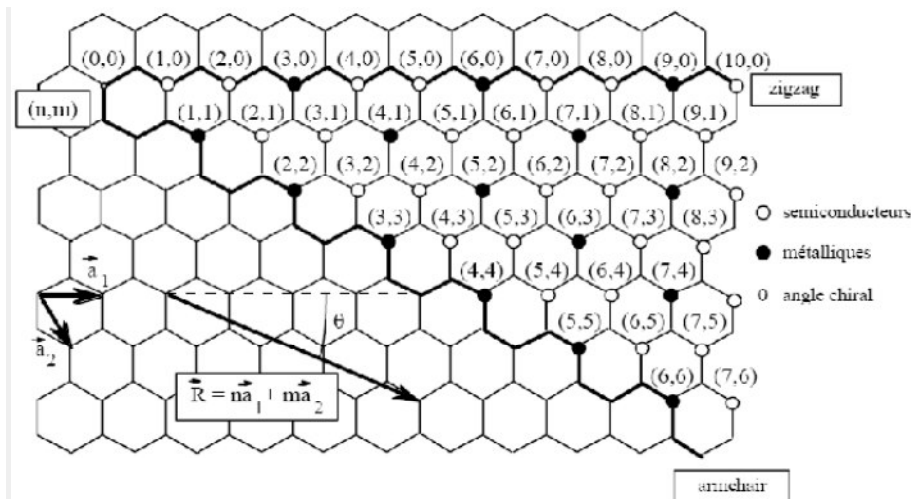


Figure I.21 Propriétés électroniques des nanotubes de carbone monocouche en fonction de leurs indices de chiralité (n, m).

Des mesures expérimentales récentes [Tans 1997] concernant des tubes mono feuillets. Elles montrent qu'ils se comportent comme des fils quantiques, dans lesquels la conduction semble se produire par sauts d'énergie quantifiés, en bon accord avec les prédictions théoriques [Wildöer 1998]. En ce qui concerne les (MWNT), Charlier et Michenaud [Charlier 1993] ont démontré qu'un nanotube placé à l'intérieur d'un autre effectue une rotation sur lui-même afin de trouver l'interaction inter-couche la plus énergétiquement favorable. Ils ont également prouvé que des tubes métalliques coaxiaux pouvaient devenir semi-conducteurs en raison des interactions inter couches [Lambin 1994]. Démontrant ainsi que dans un nanotube multi feuillet, les propriétés électroniques de chaque nanotube interne varient en fonction de leurs positions relatives.

Les nanotubes de carbone peuvent supporter une forte densité de courant de (100 MA.cm^{-2}) [Wei 2001] et ont une résistivité de l'ordre de ($10^{-4} \Omega.cm$) dans le cas des (MWNTs), en comparaison celle du cuivre est de ($10^{-6} \Omega.cm$). Ainsi, une des applications les plus prometteuses pour les nanotubes de carbone est l'apport de la conduction électrique dans les polymères en utilisant une très faible quantité de nanotubes tout en conservant les propriétés de la matrice polymère. [Saint-aubin 2010]

1.7.VI Méthode de Simulation de Dynamique Moléculaire :

La dynamique moléculaire (notée ci-après MD pour « moléculaire dynamics ») est une méthode de base de la physique moléculaire permettant de réaliser des « expériences virtuelles ». Elle consiste à faire évoluer les positions d'un groupe d'atomes ou de molécules en interaction, en utilisant la mécanique classique (2^{ème} lois de Newton). La MD permet de prendre en compte l'effet de la température et de reproduire de façon physiquement assez réaliste l'évolution temporelle d'un système initialement placé dans un état hors équilibre. De plus, il est possible de rajouter des effets extérieurs en cours de simulation.

1.8 Défauts des nanotubes de carbone:

Du fait d'interactions van der Waals attractives entre parois, les nanotubes monocouches ont la plupart du temps tendance à s'agglomérer en faisceaux de nanotubes appelés fagots. Du fait de la présence de cycles non hexagonaux, il existe des défauts dans le réseau graphite constitutif d'une paroi, qu'il s'agisse d'un (MWNT) ou d'un (SWNT). Un pentagone introduit une courbure positive tandis qu'un heptagone conduira à une courbure négative (fig 1.20): [Marcoux 2002]

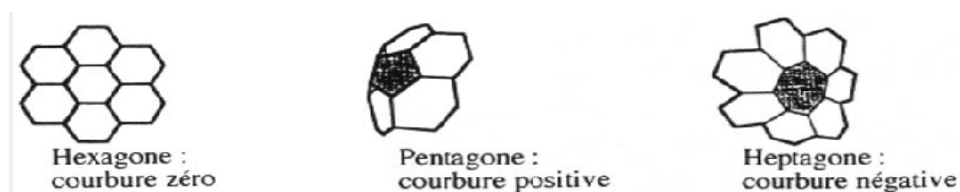


Figure 1.22: Influence du type de cycle sur la courbure de la surface.

Sur la (figure I.22) on peut voir l'influence des cycles non hexagonaux sur les feuillets de deux nanotubes multicouches:

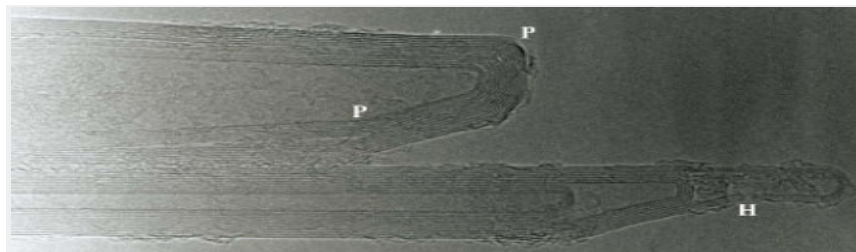


Figure I.23 Image MET des extrémités de deux nanotubes multicouches. On a indiqué quelques-uns des cycles non hexagonaux : (P) indique un pentagone et (H) un heptagone. (Image : Annick Loiseau, Jean- Michel Benoit).

La combinaison de plusieurs de ces défauts sur un tube peut induire un grand nombre de géométries particulières. Ainsi, du fait de l'annulation de leurs courbures respectives à un niveau global mais non à un niveau local, une paire heptagone-pentagone (appelé défaut de Stone-Wales [Stones 1986]) peut provoquer une variation de diamètre et de chiralité le long du tube (figure I.23).

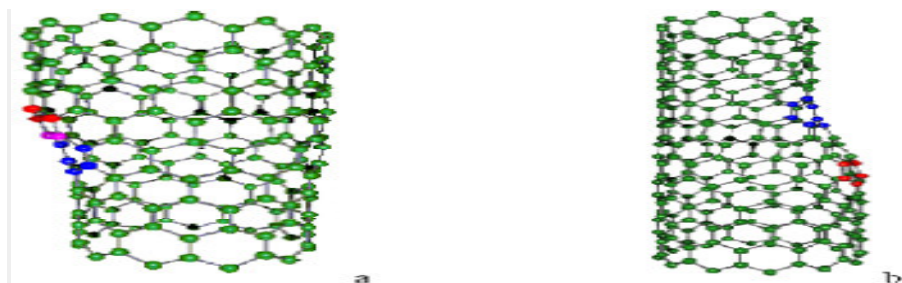


Figure I.24 Introduction d'une paire pentagone-heptagone provoquant une variation de diamètre et de chiralité : a- de (11,0) à (12,0) ; b- de (9,0) à (12,0)

De telles combinaisons peuvent expliquer la forme torsadée de certains nanotubes multicouches produits par décomposition catalytique d'hydrocarbures. En introduisant ces défauts en plus grand nombre dans le réseau graphitique, il est possible d'imaginer une grande quantité de structures variées (jonctions en Y, en T, etc.) (Figure I.24).

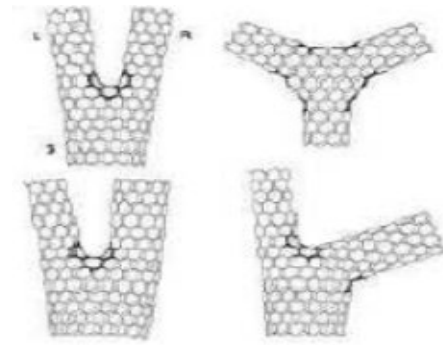


Figure I.25 Défauts pentagonaux et heptagonaux se traduisant par des jonctions.

En plus de ces défauts qu'on pourrait qualifier d'intrinsèques, il faut tenir compte d'impuretés, carbonées ou non, s'ajoutant aux nanotubes (figure I.25). La nature de ces impuretés dépend naturellement du mode de synthèse des nanotubes: [Marcoux 2002]

1. Lorsqu'un catalyseur métallique est employé dans la synthèse on le retrouve dans l'échantillon brut. Il est d'autant plus difficile de s'en séparer qu'il est le plus souvent sous forme de particules nanométriques (rendant difficile une séparation par filtration ou centrifugation) et recouvert de plusieurs feuillets graphitiques (rendant peu efficace une élimination par oxydation).

2. Tout le carbone présent dans un échantillon brut n'est malheureusement pas sous forme de nanotubes. On trouve des particules de graphite et du carbone amorphe plus ou moins structuré (fig I.24). Des molécules carbonées de faible masse peuvent également être présentes, comme du (C₆₀) ou des hydrocarbures polyaromatiques. [Marcoux 2002]

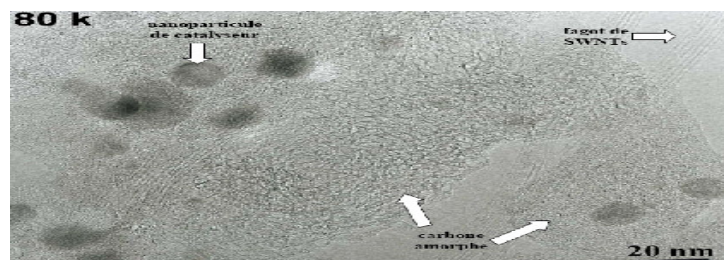


Figure I.26 Image (MET) d'un échantillon de nanotubes (collerette brute produite par arc électrique). On peut distinguer, en plus des (SWCNTs), des particules de catalyseur et deux formes de carbone amorphe.

I.9 Applications des nanotubes de carbone:

Les nanotubes de carbone et Grâce à Leur dimension nanométrique et leurs propriétés spécifiques sont des matériaux très intéressants du point de vue des applications. De par leur très important facteur de forme, ils sont d'excellents émetteurs d'électrons sous faible champ. Cela intéresse particulièrement l'industrie des écrans plats. Ils peuvent stocker une quantité importante d'hydrogène et intéressent donc l'industrie des batteries.

L'application la plus directe envisagée consiste à les utiliser comme additifs pour polymères (Thermoplastiques, thermodurcissables et élastomères) [Houdyp 2006]. Les propriétés spécifiques des nanotubes de carbone peuvent ainsi être transposées dans des matrices, à condition d'assurer une bonne dispersion de l'additif dans le composite.

Des matériaux composites haute performance ou des polymères conducteurs contenant des nanotubes peuvent ainsi trouver leurs applications dans l'automobile (peintures conductrices évitant l'emploi de solvants polaires), l'aéronautique (ailes d'avions, trains d'atterrissage des hélicoptères, etc.). Il existe d'ailleurs déjà des prototypes utilisés par des sportifs de haut niveau (cyclistes utilisant des vélos dont le cadre est un matériau composite contenant des nanotubes, joueurs de tennis utilisant des raquettes à base de nanotubes de carbone, joueurs de hockey utilisant des crosses dopées en nanotubes de carbone. .). Ils peuvent aussi être utilisés comme une peinture anti-fouling enrichie en nanotubes de carbone. [Bernard 2007]

Nous verrons par la suite que leur rigidité, leur grande flexibilité et leur très faible diamètre les nanotubes de carbone sont utilisés comme pointes dans les microscopies à force atomique, de plus, sous forme de fibres macroscopiques. [Bernard 2007]

1.9.1 Pointes AFM

La microscopie électronique projette une image en deux dimensions. Pour accéder à la troisième dimension, il faut utiliser les microscopies à effet tunnel et à force atomique. Le (NTC) semble être la structure idéale pour une utilisation comme pointe dans les microscopies à force atomique (AFM) et à effet tunnel (STM) (figure 1.26). Son premier atout est son facteur de forme (*longueur/rayon*) souvent supérieur à 100, son diamètre peut même être comparable dans le cas de (SWNT) à de simples molécules. D'autre part, ses propriétés mécaniques lui confèrent une bonne stabilité et la possibilité de se déformer élastiquement. Finalement, il peut être fonctionnalisé de manière covalente à son extrémité pour réaliser des mesures chimiques ou biochimiques. [Gohier 2007]

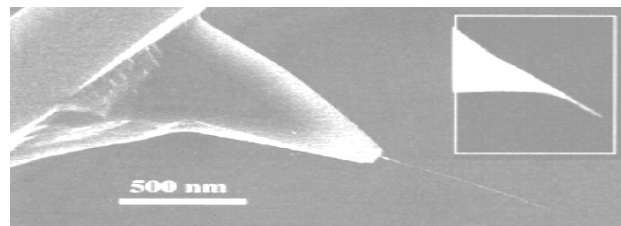


Figure 1.27 NTC à l'extrémité d'une pointe. [Gohier 2007]

Il existe plusieurs méthodes pour accrocher le (NTC) sur la pointe. Les premières réalisations ont été effectuées en « collant » sous un microscope optique un fagot de nanotube à l'aide d'un adhésif acrylique [Dai 1996 (2)]. Une autre approche consiste à appliquer un champ électrique entre la pointe et un substrat couvert de (NTC). Une dernière technique consiste à faire croître directement le nanotube sur la pointe par CVD. [Hafner 1999]

Les images obtenues à l'aide d'un (NTC) en guise de pointe affichent une meilleure résolution qu'avec une pointe conventionnelle à base de silicium [Guo 2004], [Stevens 2000]. De plus, la durée de vie de ce type de pointe est plus importante. Notons qu'il s'agit d'une des premières réalisations à base de nanotube à être commercialisée. [Gohier 2007]

1.9.II Fibres à base de (NTC):

La réalisation de fibres en (NTC) possédant des propriétés mécaniques se rapprochant au maximum de celle du (NTC) individuel intéresse au plus au point la communauté scientifique. Le premier défi dans ce domaine a été d'« assembler » les (NTC) sous forme de fibres macroscopiques. Une avancée majeure dans ce domaine a été effectuée en 2000 par Vigolo et al [Vigolo 2000] qui ont confectionné les premières fibres (d'un diamètre de $15\mu\text{m}$) de (SWNT) alignés et intégrés dans une matrice polymère (fig 1.28a). Le procédé utilisé par Vigolo et al, a été amélioré depuis et a permis de fabriquer des fibres composites de 100 mètres de longueur. [Dalton 2003]

Des fibres exclusivement constituées de (MWNT) ont aussi été réalisées. Pour ces dernières, la méthode consiste à « filer » des (NTC) orientés sur un substrat [Jiang 2002] ou bien directement les (NTC) produits pendant une synthèse par CVD (Chemical Vapor Deposition) [Li 2004]. Des « tresses » en (NTC) peuvent ainsi être produites par ces méthodes (fig 1.28b). [Zhang 2004]

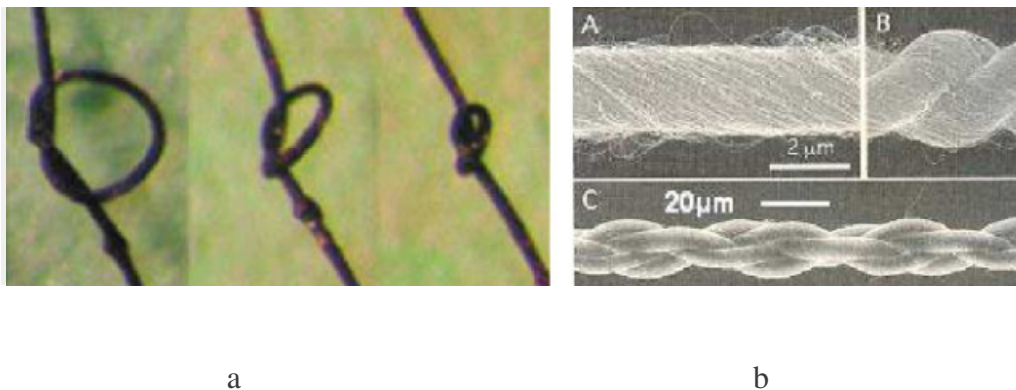


Figure 1.28 a. Fibres composites à base de (SWNT) [Vigolo 2000] b. (A~C) Fibres et tresses à partir de (MWNT). [Zhang 2004]

Les valeurs restent cependant un ordre de grandeur inférieure aux valeurs mesurées sur des (NTC) individuels ($4,2\text{ GPa}$ pour Kumar et al.) [Kumar 2002]. Les propriétés de conduction électrique sont néanmoins plus intéressantes pour les fibres constituées uniquement en (NTC).

Ces fibres conductrices, possèdent une résistance cinq fois supérieure à celle de la soie d'araignée, cette résistance est une propriété recherchée dans les textiles de protection comme les casques, les gants, les vêtements, de manutention ou les gilets pare-balles. [Gohier 2007]

1.10 risques et préventions:

Il y a encore très peu d'études sur la toxicité des nanotubes de carbone pour l'homme néanmoins, l'Institut National de Recherche et de Sécurité recommande de prendre le plus de précautions possibles lors de leur manipulation.

La plupart des données toxicologiques proviennent d'études réalisées chez l'animal. Ces travaux sont de surcroît de portée limitée (expositions uniques de courte durée pour la détection rapide d'effets éventuels) et les caractéristiques physiques et chimiques des nanotubes utilisés y sont rarement précisées (types, granulométrie, présence de métaux, etc.). Or les propriétés toxicologiques des nanotubes de carbone sont directement corrélées à leurs caractéristiques physico-chimiques. [Ricaud 2008]

L'appareil respiratoire constitue la voie majeure de pénétration de nanotubes de carbone dans l'organisme humain. Leur finesse les rend volatiles et leur diamètre nanométrique leur permet de pénétrer dans les cellules du corps humain.

Toutes les étapes de la production allant de la réception et de l'entreposage des matières premières jusqu'au conditionnement et à l'expédition des produits finis, en passant par le transfert éventuel de produits intermédiaires peuvent risquer les salariés aux nanotubes de carbone. De même, leur utilisation et, plus précisément, leur manipulation, leur incorporation dans diverses matrices ainsi que l'usinage (découpe, polissage, nettoyage, perçage, etc.) de composites en contenant constituent des sources d'exposition supplémentaire.

Leur nature (Poudre, suspension dans un liquide, intégration dans une matrice polymère, etc.), les méthodes de synthèse utilisées, le degré de confinement des différentes étapes, la quantité de produits manipulée, les moyens de protection mis en place et la capacité des produits à se retrouver dans l'air ou sur les surfaces de travail constituent les principaux paramètres qui influent sur le degré de risque.

La zone de travail doit être signalisée, délimitée et restreinte aux seuls salariés directement concernés par la fabrication ou l'utilisation des nanotubes de carbone. Les zones susceptibles d'exposer aux nanotubes de carbone doivent être clairement identifiées et séparées des zones « propres ». Le passage des uns aux autres doit comporter les installations nécessaires au changement d'équipements de protection éventuels.

L'installation de vestiaires doubles permet d'éviter tout risque de contamination à l'extérieur des aires de travail. Les sols et les surfaces de travail (de préférence lisses avec des coins arrondis) doivent être régulièrement et soigneusement nettoyés à l'aide de linges humides et d'un aspirateur équipé de filtres à très haute efficacité afin de réduire la contamination des lieux et la remise en suspension dans l'air des nanotubes de carbone déjà déposés. Tout renversement doit être immédiatement nettoyé selon une procédure établie en fonction du risque. La présence sur les lieux de travail d'éviers et de douches est nécessaire pour la décontamination des régions cutanées exposées aux nanotubes de carbone

Si le captage est insuffisant dans les ateliers de production ou d'utilisation des nanotubes de carbone, il est recommandé de porter un appareil de protection respiratoire ; en

tenant compte du fait que les objets de taille nanométrique sont susceptibles de passer par la moindre fuite. Pour les travaux exposants (fabrication, manipulation, transfert de nanotubes de carbone, etc.), il est recommandé de porter un appareil isolant à apport d'air externe, à savoir un masque, une cagoule ou une combinaison complète à adduction d'air comprimé. [Hure 2002]

1.11 Producteurs sur le marché:

Déjà présent sur le marché du carbone, l'américain Hyperion Catalysis fait figure d'acteur historique. Il produit des nanotubes de carbone multi-feuillets (*Fibril*) vendus uniquement en pré-mélanges dans des résines thermoplastiques à une teneur voisine de (15 à 20%). Il ne divulgue pas ses capacités de production mais évoque plusieurs tonnes par an. Il vient de commercialiser des fluors polymères et des élastomères dans sa gamme très axée sur les propriétés de conductivité. En 2004, Thomas Swan (*Grande-Bretagne*) a lancé la production de nanotubes mono et multi-feuillets (*Elicarb*) pour des applications variées (composites, papier, stockage d'énergie, etc.).

Fin 2005, Bayer (*Allemagne*) a franchi le stade commercial avec le lancement des Baytubes (nanotubes multi-feuillets). Sa capacité de production est voisine de 30 tonnes par an et devait doubler d'ici la fin de l'année 2007. Raymor (*Canada*) s'est, quant à lui, spécialisé dans la production de nanotubes mono feuillet avec une capacité de production d'environ 4 tonnes par an. Celle ci devait tripler au cours de l'année 2007 et deux unités supplémentaires devaient être opérationnelles en 2008. Avec sa nouvelle unité de production d'une capacité de 10 tonnes par an inaugurée.

Début 2006, le groupe chimique français Arkema s'engage également dans la fabrication de nanotubes de carbones multi-feuillets (Graphistrength) à l'échelle industrielle. Il a pour objectif de se doter d'un pilote de production avec une capacité de 200 tonnes par an courant 2009 et de passer en 2015 à une étape d'industrialisation de masse. Sa gamme de produits comprend également deux pré-composites directement vendus sous forme de granulés (nanotubes multi feuillets mélangés à un polymère). Les autres acteurs sont principalement des petites entreprises essaimées de laboratoires universitaires telles que Nanocyl (*Belgique*), créée en 2002, qui produit environ 30 tonnes de nanotubes multi-feuillets par an.

1.12 Conclusion:

Ce chapitre, qui constitue une recherche bibliographique sur les nanotubes de carbone a montré l'importance de ces nano-objets tant dans le domaine des nanosciences que dans leur côté applicatif. Leurs dimensions particulières ainsi que leurs propriétés diverses ouvrent à l'industrie des perspectives d'innovations nombreuses et prometteuses.

Nous avons détaillé quelques exemples de méthodes de synthèse des nanotubes de carbone en nous attachant à faire ressortir les avantages et les inconvénients de chacune d'entre elles.

On notera également que la voie de synthèse par la méthode de dépôt chimique en phase vapeur CVD est plus prometteuse connaît un grand succès. Il permet de réaliser la croissance des (NTC) de manière localisée et orientée perpendiculaire au substrat.

Dans une seconde partie, nous avons vu les différentes propriétés d'un nanotube de carbone.

On notera également que la structure géométrique du nanotube a une grande influence sur ses propriétés électroniques. En effet, la propriété remarquable d'être métallique ou semi-conducteur suivant son élicite.

La toxicité, un inconvénient majeur des (NTC), est directement liée à leur taille nanométrique et surtout à leur grand facteur de forme. En effet, tout comme les fibres d'amiante, les (NTC) peuvent facilement infiltrer les cellules et provoquer à long terme des cancers.

En raison des propriétés physiques remarquables, Les nanotubes de carbone font l'objet d'une attention particulière. La combinaison de leurs propriétés mécaniques, thermiques et électriques renforcées avec des densités très faibles font penser que les (CNT) sont les candidats idéaux pour des matériaux composites polymères haute performance.

chapitrell
les nanowires

II.1 introduction :

Récemment, nanowires et nanorods de matériels métalliques (M) et semi-conducteurs (SM) ont tiré beaucoup d'intérêt de recherche à cause de leurs propriétés physiques uniques (Ratner et Ratner 2003 de ; façon (chemin) 2003), qui est intéressant du point de vue de d'applications de dispositif différentes. Nanowires ont deux dimensions enfermées de quantum et une dimension sans borne.

Les nouvelles propriétés découvertes des nanomatériaux se sont non seulement reflétées dans des transports électroniques mais également exhibé dans l'optique et le magnétisme. Nanoparticules (ou points de quantum) sont le premier candidat des nanomatériaux pour une telle étude.[Yang 2011]

L'étude des nanowires (NWs) stimule un grand intérêt dans leur scientifique fondamental recherche et des applications potentielles. Les effets de taille, ont généralement deux aspects : on est l'effet de taille de Quantum (QSE), qui provient de la variation des densité-de-états électroniques de nanostructure.QSE peut dériver ainsi un changement radical de transport et les propriétés thermodynamiques de ceux des volumes. [Yang 2011]

Donc, le comportement de conduction électrique de nanowires diffère de celui de leur volume similaire.). Dans les nanowires, la conduction électronique a lieu tant par la conduction en volume que par le mécanisme de tunnelage.. Les nanowires de métaux et le semi-conducteur exposent des propriétés électriques, magnétiques, optiques, thermoélectriques et chimiques uniques comparées à leurs volumes. [Yang 2011]

Par des exemples, la conductivité thermique et électrique des nanowires sont sensiblement réduites en raison de l'électron/ phonon de petite quantité se produisant aux joints de grain de la cristallisation de nano-échelle. Une des caractéristiques les plus importantes du nanowire est sa petite conduction thermique substantielle. Ainsi, des matériaux manœuvrés aux nanowires bas-dimensionnels, elle fournit une stratégie innovatrice pour améliorer l'efficacité de conversion de la chaleur-électricité pour les matériaux thermoélectriques. [Yang 2011]

Les applications potentielles les plus attrayantes de nanowire résident dans le support de stockage d'information magnétique. Des études ont montré que les baies périodiques de baies nanowire possèdent la magnétique capacité de stocker 1012 bits/in² d'informations par pouce carré de superficie. [Dindar, Shoeb2005]

Il existe deux approches de base à nanowire de synthèse: top-down et bottom-up. Une approche top-down réduit un grand morceau de matériau en petits morceaux, par divers moyens tels que la lithographie ou électrophorèse. La plupart des techniques de synthèse utilisent une approche bottom-up.

Les approches hiérarchisées (top-down) sont attrayantes en raison de leurs méthodes exigées relativement plus faciles. Les techniques standard de photolithographie et d'entretissage peuvent être intégrées d'une manière simple dans un processus de CMOS (**Complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS)**), tandis que les techniques basées sur masque diverses peuvent être plus chères et plus lentes que le niveau désiré pour la grande production, et les approches maskless peuvent exiger l'hybridation du processus avec les étapes non conventionnelles.

L'électronique assemblée de bas en haut (bottom-up) de nano-échelle pourrait fournir la vitesse, le stockage, et les réductions de la taille inégalés et tenir la promesse de faire fonctionner les dispositifs électroniques qui peuvent surpasser des dispositifs existants.

En outre, les nanostructures 1D peuvent également montrer la fonction critique de dispositif, et peuvent être exploités ainsi comme éléments de câblage et de dispositif dans de futures architectures pour les nano-systèmes fonctionnels. À cet égard, deux classes matérielles, nanowires de semi-conducteur (NWs) et carbonés NTS ont montré la promesse particulière. [Brian2002] --

les NTS monocouche ont été employés pour fabriquer des transistors à effet de champ, des diodes, et des circuits logiques

Le semi-conducteur NWs représente d'autres structures de fil d'échelle de nanomètre importantes et fortement polyvalentes. Par contraste avec NTS, le semi-conducteur NWs peut être rationnellement et d'une manière prévisible synthétisé en forme de cristal avec tous les paramètres clés, y compris la composition chimique, le diamètre et la longueur et des propriétés de dopage (Dans le domaine des semi-conducteurs, le dopage est l'action d'ajouter des impuretés en petites quantités à une substance pure afin de modifier ses propriétés de conductivité)/électronique, contrôlé. [Xing2002]

Par exemple, le semi-conducteur NWs ont été assemblés dans une série de dispositifs électroniques comprenant les diodes croisées du NWs P-N, les portes logiques de nano-échelle et les circuits de calcul, aussi bien que les dispositifs optoélectroniques comprenant les diodes à émission légère de nano-échelle (L light E emitting D diode) et les lasers. [Mark S.2001]

II.2 Synthèse de blocs constitutifs :

Le diamètre des nanowires varie d'un seul atome à quelques centaines de nm, la longueur varie même une gamme plus grande super, De quelques atomes à beaucoup de microns.

Les structures 1D s'étendant de plusieurs nanomètres à plusieurs centaines de microns sont pour les favoris et les fibres visés, tandis que les nanowires et les nanorods ont des

diamètres ne dépassant pas quelques centaines de nanomètres et les nanowires ont en général un aspect allongé que ceux des nanorods (par exemple >20)

Très courts nanorods qui sont reliés entre deux grandes électrodes sont souvent appelés nanocontacts. [Klaus 2000]

Beaucoup de techniques ont été développées dans la synthèse et la formation des matériaux unidimensionnels, comme des nanowires. Ces techniques peuvent être généralement groupées dans quatre catégories : [Guozhong2004]

II.2.I Croissance spontanée :

- a. Condensation d'évaporation
- b. Condensation de dissolution
- c. Vapeur (solution) - croissance liquide-solide (VLS ou SLS)
- d. Recristallisation provoquée par la tension

II.2.II synthèse basée sur calibre :

- a. Dépôt électrochimique
- b. Dépôt électro-phorétique
- c. Dispersion, fonte, ou remplissage colloïdale de solution
- d. Conversion avec la réaction chimique

II.2.III Electro-rotation

II.2.IV Lithographie

Des synthèses de croissance, basées sur calibre et d'électro-rotation spontanées sont considérées comme des approches de bas en haut, tandis que la lithographie est une technique hiérarchisée. La croissance spontanée a généralement comme conséquence la formation des nanowires de monocristal sur des nanorods le long d'une direction préférentielle de cristallogénèse selon les structures cristallines et les propriétés extérieures du matériel de nanowire.

La synthèse basée sur calibre fabrique en grande partie les produits poly-cristallins ou même amorphes. Concernant le point de vue électrochimique, nous n'entrons pas dans des étapes

profondes et l'équation chimiques détaillées pour illustrer ces différentes techniques. [Dindar, Shoeb2005]

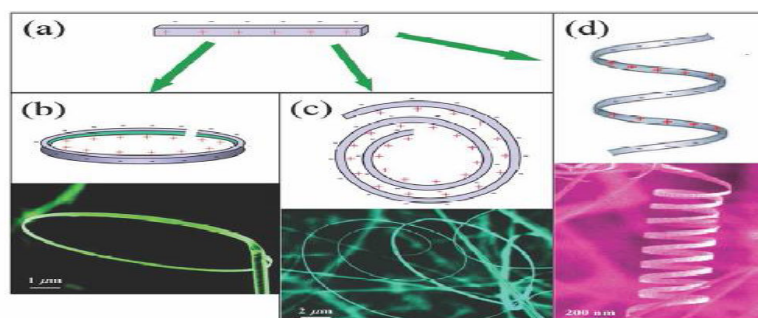
II.2.1.1 Croissance spontanée

La croissance spontanée est un processus conduit par la réduction d'énergie gratuite de Gibbs ou de potentiel chimique. La réduction d'énergie gratuite de Gibbs est généralement réalisée par transformation de phase ou réaction chimique. Pour la formation des nanowires ou des nanorods, la croissance anisotrope est exigée (c.-à-d. le cristal le long d'une certaine orientation plus rapidement que d'autres directions).

Les nanowires uniformément classés (c.-à-d. le même diamètre le long de la direction longitudinale d'un nanowire donné) peuvent être obtenus quand la cristallogenèse (La cristallogenèse est la formation d'un cristal (Un cristal est un solide dont les constituants sont assemblés de manière régulière par empilement périodique d'un grand nombre d'atomes, de molécules ou d'ions, par opposition au solide amorphe.), soit en milieu naturel, soit de façon synthétique.) procède le long d'une direction, où en tant que lui y a absence de croissance le long de l'autre direction. [Dindar, Shoeb2005]

II.2.1.2 Condensation d'évaporation :

Le processus d'Évaporation-condensation désigné également sous le nom des techniques de vaporsolid (VS). Nanowires et nanorods développés par cette méthode sont généralement les monocristaux avec moins imperfections. La formation des nanowires ou des nanorods est due à la croissance anisotrope. Plusieurs mécanismes sont connus pour avoir comme conséquence la croissance anisotrope, mais l'idée générale est que les différentes facettes dans un cristal ont différents nanowires de mercure de taux de par exemple sont développées par cette méthode, avec une température de condensation de -50 C sous vide et le taux de croissance axial est approximativement 1.5mm /sec dans une condition de saturation (figureII.1). Les produits de cette technique sont habituellement appelés des nanobelts (diamètre de ~200 nanomètre et la longueur de 1-2 millimètres). [Zhon Lin Wang2001]



FigureII. 1: (a) Modèle d'un nanobel polaire t. (b) nanorings, (c) nanospirals, et (d) nanohelices de ZnO et de leurs processus Zhon Lin Wang,

II.2.1.3 Condensation de dissolution :

Ce processus diffère de l'Évaporation-condensation dans le media de croissance. Dans cette méthode, les espèces de croissance se dissolvent d'abord dans un dissolvant ou une solution, et puis réparent par le dissolvant où la solution se dépose sur la surface ayant pour résultat la croissance des nanorods ou des nanowires. Les nanowires dans cette méthode peuvent avoir une longueur moyenne de <500 nanomètre et un diamètre moyen de ~60 nanomètre. [Dindar, Shoeb2005]

II.2.1.4 Croissance Vapeur-Liquide-solide (VLS) :

Dans la croissance de VLS, un deuxième matériel de phase, généralement désigné sous le nom du catalyseur, est présente exprès pour diriger et confiner la cristallogenèse sur une orientation spécifique et dans un secteur confiné. Le catalyseur forme une gouttelette liquide par lui-même ou par l'alliage avec le matériel de croissance pendant la croissance, qui agit en tant qu'un pont des espèces de croissance. Les espèces enrichies de croissance dans les précipités de gouttelettes de catalyseur plus tard à la croissance apprêtent ayant pour résultat la croissance un-directionnelle (figure II.2).

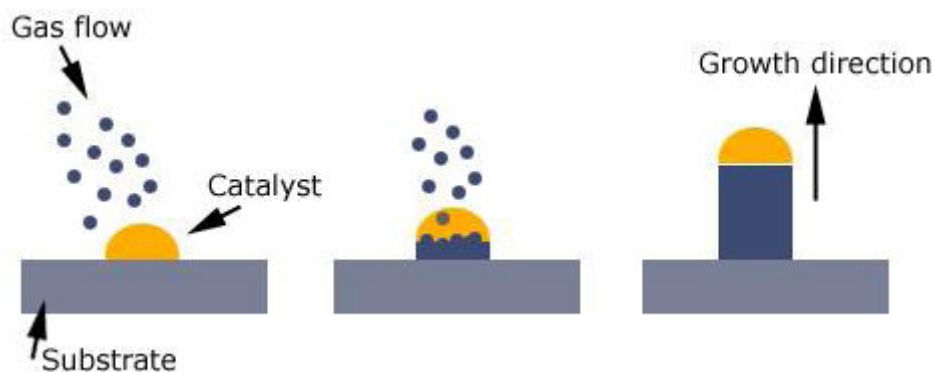


Figure II. 2: modèle de VLS croissance

Le processus de VLS tient compte du contrôle de la croissance de diamètre et de direction de nanowire en optimisant la taille et la composition des graines catalytiques et des conditions de croissance, y compris la composition en température, en pression et en gaz dans la chambre.

II.2.1.5 Croissance Catalytique assisté de laser

Une technique relative à VLS est la croissance catalytique assisté de laser (**Laser-Assisted Catalytic Growth**). Haute puissance, les impulsions courtes de laser irradient un substrat de la matière à employé pour la croissance de nanowire. Puis, les particules sont transférées sur le substrat contenant le catalyseur, où elles peuvent se développer dans des

nanowires. Depuis les impulsions de laser localement chauffé le substrat produit des particules pour la croissance de nanowire. [Cui 2000]

Dans [Cui 2000] la croissance catalytique laser a été utilisée pour contrôler le bore et le dopage de phosphore pendant la croissance de phase de vapeur de silicium nanowires. Une autre option plus avancée offerte par les approches de bas en haut consiste à alterner les régions de dopage ou les matériaux le long de l'axe de nanowire,

II.2.II synthèse basée sur calibre :

C'est la méthode très générale et peut être employée dans la fabrication des nanorods, des nanowires, et des nanotubes des polymères, des métaux, des semi-conducteurs, et des oxydes. De divers calibres avec des canaux de nano-taille ont été explorés pour la croissance de calibre des nanorods et des nanotubes. Les membranes poreuses sont fabriquées avec différentes méthodes.. [Dindar, Shoeb2005]

II.2.II.1 Dépôt électrochimique :

Cette méthode peut être comprise comme électrolyse spéciale ayant pour résultat le dépôt du matériel solide sur une électrode. Cette méthode s'applique seulement aux matériaux électriquement conducteurs tels que des métaux, des alliages, des semi-conducteurs, et des polymères conducteurs électriques. C'est un procédé d'auto-propagation. C'est une approche très utilisée pour fabriquer les nanowires qui ont basé sur de divers calibres [Dindar, Shoeb2005]

II.2.II.2 Méthode négative de calibre :

Par cette méthode on fabrique les nanopores cylindrique dans un matériel solide comme calibres. En déposant des métaux dans les nanopores, des nanowires avec un diamètre prédéterminé par le diamètre des nanopores sont fabriqués. Il y a plusieurs manières de remplir nanopores avec des métaux ou d'autres matériaux pour former des nanowires, mais la méthode électrochimique est une méthode générale et souple (figure II.3). Évidemment, le diamètre des nanowires est déterminé par la contrainte géométrique des pores. Cependant, il est l'une des méthodes les plus réussies pour fabriquer les divers nanowires il est difficile former que par le processus lithographique conventionnel. La fabrication des calibres appropriés est clairement une première étape critique. Jusqu'à présent, de diverses méthodes ont été développées pour fabriquer de divers calibres négatifs. Tous ces matériaux contiennent un grand nombre de nanopores cylindrique droits avec une distribution étroite en diamètre des nanopores. [Dindar, Shoeb2005]

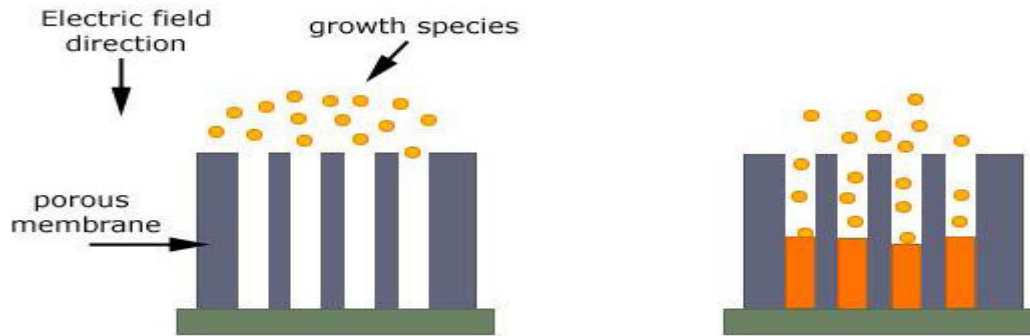


Figure II.3 Modèle de la synthèse de base de calibre

Utilisant les calibres de membrane précédemment, des nanowires de différents types ont été fabriqués. Ces nanostructures peuvent être déposés dans les pores par le dépôt électrochimique ou d'autres méthodes, telles que la déposition en phase vapeur (CVD), la polymérisation chimique, dépôt au bain chaud, ou par chimie sol-gel

II.2.II.3 Méthode la déposition en phase de vapeur (CVD) :

La méthode de la déposition en phase vapeur (CVD) s'est avéré une intéressante technique utilisée avec les matériaux qui peuvent être évaporés aux températures modérées. Dans un procédé typique de CVD, le substrat est exposé aux précurseurs volatils, ce qui réagissent sur la surface de substrat produisant les nanowires désirés. La méthode de CVD a été appliquée pour fabriquer des nanowires basés sur différents matériaux ou combinaisons des matériaux, y compris le SI, GE de SiO₂ and.v [Endo1995].

II.2.II.4. Le dépôt électrolytique :

Est l'une des méthodes les plus utilisées pour remplir les matériaux de conduction dans les nanopores pour former les nanowires continus avec de grands allongements. Un des grands avantages de la méthode de dépôt électrolytique est la capacité de créer les nanowires fortement conducteurs. C'est parce que le dépôt électrolytique est basé sur le transfert d'électron, qui est le plus rapide le long du plus haut chemin conducteur. Un autre avantage important de la méthode de dépôt électrolytique est la capacité de commander l'allongement des nanowires en métal en surveillant le tau total de la charge passée. C'est très important pour beaucoup d'applications. Par exemple, les propriétés optiques des nanowires dépendent en critique de l'allongement. Les anowires avec des segments multiples de différents métaux dans un ordre d'exécution des instructions peuvent également être fabriqué en commandant le potentiel dans une solution contenant différents ions en métal. [Dindar, Shoeb2005]

Le dépôt électrolytique exige souvent le dépôt du de film métallique d'un côté de la membrane libre pour servir le fonctionnement d'électrode sur laquelle le dépôt électrolytique a lieu. Le bord opposé de la membrane est exposé à une solution de dépôt électrolytique, qui remplit les pores qui permet à des ions en métal d'atteindre le de film métallique. C'est une forme d'appui qui empêche également une forme cassant la membrane fragile pendant la manipulation.

Il y a trois étapes typiques dans le procédé de dépôt électrolytique :

L'étape I correspond au dépôt électrolytique du métal dans les pores jusqu'à ce qu'elles soient remplies jusqu'à la surface supérieure de la membrane.

Dans cette étape, le courant équilibré à un potentiel fixe est directement proportionnel au secteur de film métallique qui est en contact avec la solution.

Après que les pores soient remplis de métal déposé, se développe hors des pores. Cette région s'appelle l'étape II. Parce que, le courant de dépôt électrolytique augmente rapidement.

L'étape III commence quand les nanowires désirés, on doit enlever les centres serveurs de calibre après la formation des nanowires dans les calibres.

Cette tâche est habituellement accomplie en dissolvant loin les matériaux de calibre dans un dissolvant approprié. Si on veut également séparer également les nanowires des films en métal sur lesquels le nanowire sont développés, une méthode commune est à d'abord déposent un matériel sacrificatoire (figureII.4)

Par exemple pour fabriquer librement la position « Au » nanowires, on peut déposer une couche mince d' « Ag » sur le film métallique couvert sur un côté de la membrane de gabarit avant le remplissage des pores avec « Au ». La couche « Ag » peut être gravée loin plus tard dans l'acide nitrique concentré, qui se sépare l'« Au » nanowires forme le film métallique.

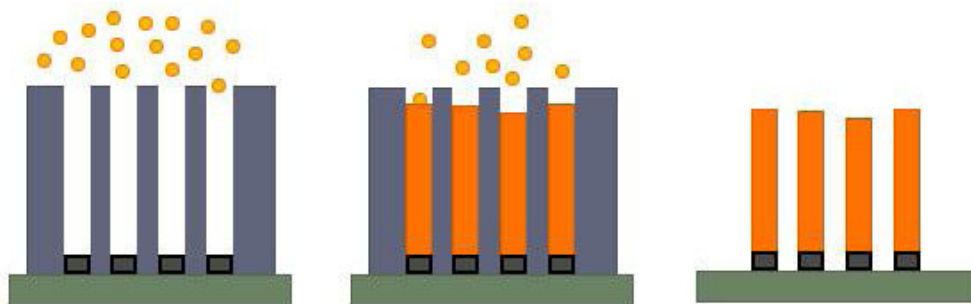


Figure II.4 dissolution de la membrane et du matériel sacrificatoire

La méthode calibre positive emploie des nanostructures comme un fil, tels que des nanotubes d'ADN et de carbone comme calibres (figureII.5), et des nanowires sont formés sur la surface externe des calibres. À la différence des calibres négatifs, le diamètre des nanowires n'est pas limité par les tailles de calibre et peut être commandé en ajustant la quantité de matériaux déposés sur les calibres. En enlevant les calibres après dépôt, des structures comme un fil et comme un tube peuvent être formées.

La méthode positive de calibre emploie des nanostructures comme un fil, tels que des nanotubes d'ADN et de carbone comme calibres, et des nanowires sont formés sur la surface externe des calibres. À la différence des calibres négatifs, le

diamètre des nanowires n'est pas limité par les tailles de calibre et peut être commandé en ajustant la quantité de matériaux déposés sur les calibres. En enlevant les calibres après dépôt, des structures comme un fil et comme un tube peuvent être formées.

L'ADN est un excellent choix comme calibre pour fabriquer des nanowires parce que son diamètre est ~ 2 nanomètre et sa longueur et ordre peut être avec précision commandé. La procédure générale est première pour fixer un brin d'ADN entre deux contacts électriques. L'ADN alors est exposé à une solution contenant quelques ions. Dans la dernière étape, les nanoparticules sont encore développés en nanowire utilisant une technique photographique standard d'amélioration. [Dindar, Shoeb2005]

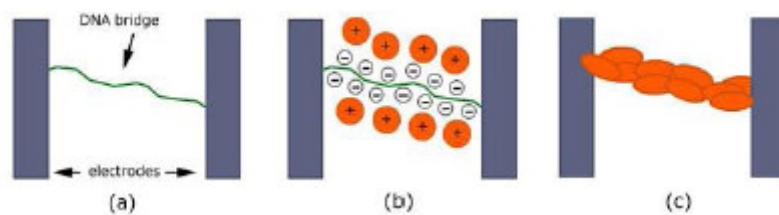


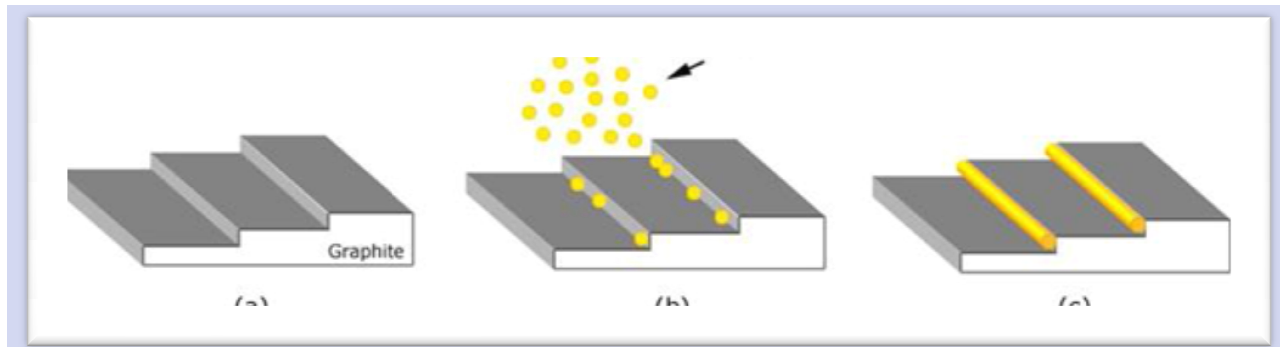
Figure II.5 L'ADN basent le calibre, (a) pont en ADN reliant deux électrodes, (b) sur le pont chargé en ADN, (c) fil en pleine maturité sur l'ADN

II.2.II.5 Dépôt électro-phorétique :

Cette méthode diffère du dépôt électrochimique dans plusieurs aspects. Dans cette méthode, le dépôt n'a pas besoin d'être électriquement conducteur, ainsi cette méthode est particulièrement utile pour l'oxyde des nanowires les dispersions in-colloïdal tels que de SiO₂, de TiO₂, de Bi₂O₃, etc. la taille des nanoparticules sont typiquement stabilisés par des électrons. En fait au-dessus de la surface des nanoparticules développent une charge électrique par l'intermédiaire de quelques techniques chimiques. Cette combinaison s'appelle typiquement Compteur-Ion. Ce type de mouvement désigné sous le nom de l'électrophorèse. Le reste de cette technique est identique que le dépôt électrochimique. [Klaus2000]

II.2.II.6 Calibres extérieurs d'Étape-bord :

Des étapes à l'échelle atomique sur une surface en cristal peuvent être employées comme calibres pour élever des nanowires. Pour ceci, la méthode s'appelle parfois « étape de bord. » Utilisant étape de bord du graphite fortement orienté comme calibre (figure II.6), fabrique des nanowires par le dépôt électrolytique. D'autres techniques telles que la méthode physique du dépôt en phase vapeur (PVD) également utilisée. Mais le problème est que ces nanowires ne peuvent pas être facilement enlevés de la surface sur laquelle ils sont déposés, qui peuvent être une limite sérieuse pour quelques applications. [Dindar, Shoeb2005]



La figure II.6 graphite extérieur d'étape-bord du calibre d'étape-bord (a), électro (b) dépôt d'oxyde de métal, (c) formation de nanowire aux bords

II.2.III Électro-rotation :

L'Électro-rotation se produit quand les forces électriques sur la surface d'une solution ou d'une fonte de polymère surmontent la tension superficielle et causent un jet électriquement chargé d'être éjecté. Quand le jet sèche des restes de fibre électriquement chargés se produit. Cette fibre peut être dirigée ou accélérée par des forces électriques et rassemblée ensuite dans des feuilles ou d'autres formes géométriques utiles. [Dindar, Shoeb2005]

II.2.IV Lithographie :

De diverses techniques de lithographie ont été explorées dans la fabrication des nanowires, tels que la lithographie de faisceau d'électrons, lithographie de faisceau d'ions, lithographie de rayon X. [Dindar, Shoeb2005]

II.3 Different Nanowires :

Nous pouvons classer différents types par catégorie de nanowires considérant aux matériels comme suit :

- 1- Nanowires en métal
- 2- Nanowires de semi-conducteur (nanowires de silicium)
- 3- Nanowires d'oxyde
- 4- Nanowires de Multi-segment
- 5- Fils de quantum de semi-conducteur

II.4 Propriétés et application de Nanowires :

Nanowires sont les matériaux prometteurs pour beaucoup d'applications nouvelles. C'est non seulement en raison de leur géométrie unique, mais également parce qu'elles possèdent beaucoup de propriétés physiques uniques, y compris les propriétés électriques, magnétiques, optiques, aussi bien que mécaniques. Des motivations intéressantes dans les nanostructures 1D avec la caractéristique électronique fonctionnelle sont les changements des propriétés, cela résultent de l'emprisonnement de quantum et de l'application de potentiel des nanowires dans l'optoélectronique et dispositifs de détection. [Guozhong2004]

II.5 Les propriétés magnétiques :

Les propriétés magnétiques des nanowires dépendent du diamètre de fil et de l'allongement, qui prouve qu'il est possible de commander les propriétés magnétiques des nanowires en commandant les paramètres de fabrication. Pour les nanowires magnétiques (Fe, Co, et Ni) avec le grand allongement relatif (e.g.>50), elles montrent un axe facile le long des fils. Un paramètre important qui décrit les propriétés magnétiques des matériaux est rapport de rémanence, qui mesure la magnétisation de rémanence après le changement outre du champ magnétique externe. La rémanence est les rapports des nanowires de Fe, de Co, et de Ni peuvent être plus grands que 0.9nm. Un autre paramètre important est le coercivité, qui est le champ coercitif exigé pour démagnétiser l'aimant après complètement magnétisation. Les nanowires magnétiques montrent le coercivité magnétique considérablement augmenté.

II.6 les propriétés optiques :

Les expériences suggèrent qu'on puisse lancer et commander le flux d'information optiquement codée avec exactitude à l'échelle du nanometre

En outre, les nanowires de silicium enduits du Sic montrent la stabilité photoluminescence à la température ambiante

II.7 Applications de nanowire :

Les propriétés uniques des nanofils en font des objets intéressants pour différentes applications dans les domaines suivants :

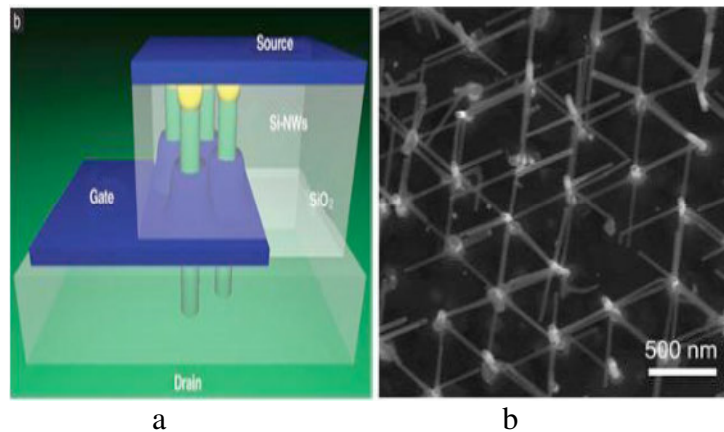
- **Microélectronique:**

En général, les nanofils peuvent être intégrés en tant que canaux de conduction dans des dispositifs électroniques. La petite section d'un nanofil estimée à quelques nm² implique que ses propriétés électroniques sont différentes de celles du matériau massif. Parmi les propriétés qui changent ou apparaissent, on retrouve la structure de bande, les phénomènes de transport balistique ou quasi balistique. La géométrie d'un nanofil facilite son intégration en tant que transistor à effet de champ [Bryllert, 2006].

Les nanofils de Si peuvent être utilisés comme « VS-FET » pour « Vertical Surround-Gate Field Effect Transistor » (Figure II.7) [Schmidt, 2006]. L'avantage de la méthode utilisé est qu'il n'y a pas besoin de polissage mécanique ni chimique qui serait critique à un diamètre de nanofils d'environ 40 nm et un rapport d'aspect de 10.

Pour les générations futures d'électronique ultra dense [Dick, 2006] les nanofils peuvent être utilisés comme des interconnexions 3D pour former des réseaux avec de nouvelles fonctionnalités.

La technologie basée sur les hétérostructures sous forme 1D a été employée pour fabriquer des transistors à électron unique [Thelander, 2003] et des mémoires à jonctions tunnel multiples [Thelander, 2005].



- **Optoélectronique :**

Des hétérostructures 1D peuvent être intégrées dans un nanofil de façon à former des boîtes quantiques. De telles structures peuvent fonctionner comme une source de photons uniques (Minot, 2007). Les nanofils peuvent aussi fonctionner comme des cavités laser [Zimmler, 2008]. En plus, des matériaux intéressants pour des applications optiques et dont la croissance en volume révèle des défauts s'avèrent de cristaux parfaits sous la forme de nanofils, par exemple les nanofils de GaN et de AlGaN [Ristić, 2005].

- **Détecteurs chimiques :**

Les nanofils occupent de plus en plus de place dans le domaine des sciences du vivant. Ils sont utilisés comme capteurs électriques ultrasensibles pour la détection d'espèces chimique et biologiques.

Les diamètres nanométriques des nanofils de taille comparable à celles des espèces chimiques et biologiques à détecter font d'eux un excellent transducteur primaire produisant un signal pouvant interférer avec des instruments macroscopiques.

En biologie et en chimie, l'intérêt porté pour les nanofils vient du fort rapport surface sur volume permettant une détection électrique très sensible de substances chimiques ou biologiques [Cui, 2001]. La figure II.8 montre la variation de la conductance du nanofil en fonction de son état lié ou non au virus [Patolsky, 2004].

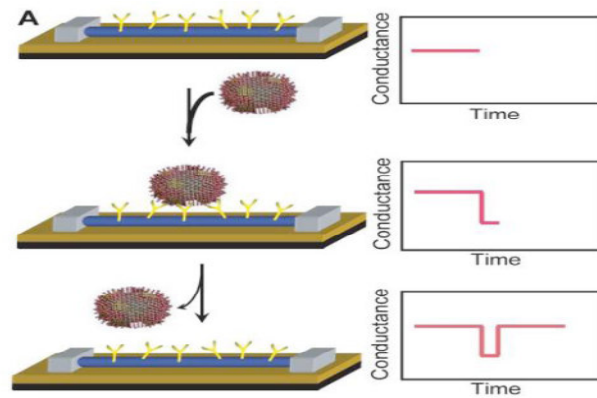


Figure II.8 : Schéma d'un virus unique dans 2 états lié et non lié à la surface d'un nanofil dans un dispositif avec des anticorps avec la variation temporelle de conductance correspondante à chaque état

- **Thermoélectricité :**

Les nanofils de silicium [Boukai, 2008], de tellure de bismuth [Lee, 2008] [Lim, 2005] [Zhou, 2005] et d'antimoniure d'indium [Uryupin, 2009] [Yang, 2010] ont montré la possibilité de fabrication de dispositifs thermoélectrique aussi bien pour la génération de l'électricité que la réfrigération. Ils présentent une figure de mérite thermoélectrique ZT élevée. L'électricité est obtenue par la conversion de la chaleur en utilisant l'effet Seebeck, l'inverse est possible en utilisant l'effet Peltier. Par exemple dans le cas des nanofils de Si, la figure de mérite peut être plus grande de deux ordres de grandeurs par rapport au matériau Si massif [Boukai, 2008]. Typiquement, quand le diamètre décroît la conductivité électrique décroît aussi. Dans le cas des semiconducteurs, la contribution électronique à la conductivité thermique est plus faible que la contribution phononique. La diffusion de bords et aux interfaces augmente dans les nanostructures ce qui conduit à la réduction de la conductivité thermique. Une autre conséquence de la réduction de taille est l'augmentation du coefficient de Seebeck à cause de la densité d'états élevée près du niveau de Fermi [Dresselhaus, 2007].

- **Spintronique :**

Les nanofils dopés présentent des applications potentielles dans le domaine du nanomagnétisme. En effet, le spin de l'électron peut transporter et stocker l'information. Une attention particulière est portée aux semiconducteurs magnétiques dilués (SMD) compatibles avec la technologie silicium. La recherche d'hétérostructures semiconductrices avec des propriétés ferromagnétiques est actuellement en pleine expansion. Les matériaux magnétiques permettent la réalisation de mémoires permanentes et réinscriptibles. L'utilisation de nanomatériaux semiconducteurs ferromagnétiques peut être appliquée à l'électronique de spin avec notamment la réalisation de composants de type spin-FET [Datta, 1990].

II.8 Physique de nanowire

II.8.I Conductivité de nanowire

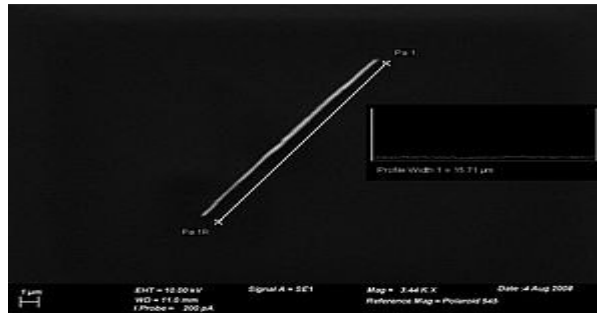


Figure II.9 Une SEM image d'un fil de nickel de 15 micromètre.

Les nanowire montrent également des propriétés électriques particulières en raison de leur taille. Contrairement à des nanotubes de carbone à mono paroi, dont le mouvement des électrons peut tomber sous le régime de transport balistique (ce qui signifie que les électrons peuvent se déplacer librement d'une électrode à l'autre), nanowire conductivité est fortement influencée par les effets de bord. Les effets de bord consistent les atomes qui se trouvaient à la surface du nanowire et ne sont pas entièrement liés à des atomes voisins, les atomes non liés sont souvent une source de défauts dans le nanowire, comme un nanowire réduit en taille, les atomes de surface deviennent plus nombreux par rapport aux atomes au sein du nanowire, et les effets de bords deviennent plus importants.

En outre, la conductivité peut subir une quantification de l'énergie: dire l'énergie des électrons passant par un nanowire peut prendre que des valeurs discrètes, qui sont des multiples de la constante de von Klitzing $G = 2e^2/h$ (où e est la charge de l'électron et h est la constante de Planck).

La conductivité est donc décrite comme étant la somme du transport par des canaux séparés de différents niveaux d'énergie quantifiés.

Cette quantification a été démontrée par la mesure de la conductivité d'un nanowire en suspension entre deux électrodes tout en le tirant: son diamètre réduit aussi, sa conductivité décroît par paliers et les paliers correspondent à des multiples de G .

La quantification de la conductivité est plus prononcée dans les semi conducteurs comme Si ou GaAs que dans les métaux, en raison de la densité électronique et de la masse inférieure de leur effectif. [Tilke2003]

II.8.II Application de nanoélectronique :

L'application la plus importante des nanowires dans le nanoélectronique au moyen d'eux comme jonctions ou comme nanowires de multi-segment ou dispositifs nanos croisés. On peut également fabriquer une jonction métallo-organique de film-métal et les jonctions de

métal-nanoparticule-métal dans un nanowire simple, qui ont été employées pour étudier des propriétés de transport d'électron des molécules et des nanoparticules. « Si » une partie du métal segmente ou des bandes sont remplacées par les couches de semi-conducteur, colloïdales et de polymère, on peut présenter des jonctions de rectification, la commutation électronique, et des éléments photoconducteurs dans les nanowires composés.

II.9 Dispositifs croisés de Nanowire :

La matrice croisée de nanowire est une structure souple et peut être configurée dans un grand choix d'éléments critiques de dispositif (figureII.10), tels que des diodes et des transistors. Par exemple, une diode de PN peut être obtenue en croisant simplement le nanowire de p et de type n. Les mesures électriques de telles jonctions croisées montrent la rectification actuelle claire à travers la jonction et le comportement actuel linéaire dans NWs.

Des FETs à l'échelle nanomètre peuvent également être réalisés dans la configuration croisée de nanowatt utilisant un nanowatt comme canal de conduite actif et l'autre nanowire croisé comme électrode de porte. [Dindar, Shoeb2005]

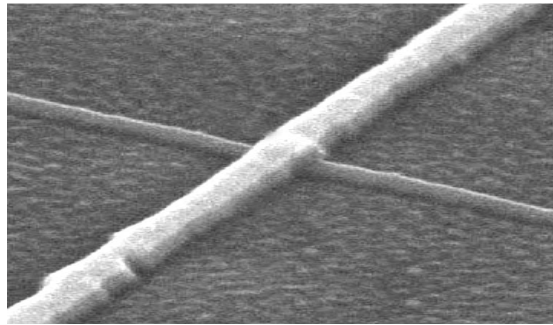


Figure II.910 Deux SI ont croisé Nanowires dans la taille de 10 le nanomètre (supérieurs dessus)

II.110 Conclusion :

Il y a un avenir très lumineux pour ces blocs constitutifs électroniquement bien définis de nanowire en science et nanotechnologies fondamentales. Spécifiquement, nous croyons que nous avons juste commencé à explorer le bord même d'une large gamme d'occasions, et cela là restent beaucoup de problèmes fondamentaux fascinants dans ces systèmes de nanowire tels que le rôle de la taille finie et des états logiques.

chapitre III

formulation théorique pour l'analyse des nanotubes de carbone

III.1 Introduction :

La paternité de la théorie des poutres est attribuée à Galilée, mais des études récentes indiquent que Léonard de Vinci l'aurait précédé. Léonard avait supposé que la déformation variait de manière linéaire en s'éloignant de la surface neutre, le coefficient de proportionnalité étant la courbure, mais il ne put finaliser ses calculs car il n'avait pas imaginé la loi de Hooke. De son côté, Galilée était parti sur une hypothèse incorrecte (il supposait que la contrainte était répartie uniformément en flexion), et c'est Antoine Parent qui obtint la distribution correcte [Ballarini 2003]. Ce sont Leonhard Euler et Jacques Bernoulli qui écrivirent la première théorie utile vers 1750, tandis que Daniel Bernoulli, le neveu du précédent, écrivit l'équation différentielle pour l'analyse vibratoire [Seon1999]. A cette époque, le génie mécanique n'était pas considéré comme une science, et l'on ne considérait pas que les travaux d'une académie des mathématiques puissent avoir des applications pratiques, et l'on continua à bâtir les ponts et les bâtiments de manière empirique. Ce n'est qu'au XIX^e siècle, avec la Tour Eiffel et les grandes roues, que l'on démontra la validité de la théorie à grande échelle.

Une poutre est un corps matériel qui possède une direction privilégiée. En effet, une poutre a la particularité d'avoir une dimension dont l'ordre de grandeur est supérieur aux deux autres. Typiquement, les dimensions caractéristiques de la section sont petites par rapport à la longueur de la poutre. Les théories de poutres traditionnelles exploitent cette particularité pour proposer des modélisations approchées. L'intérêt de ces modélisations approchées se situe dans l'apport de méthodes simplifiées pour traiter le problème de référence tridimensionnel. La simplification consiste généralement à ramener la résolution du problème tridimensionnel de référence à la résolution d'un problème unidimensionnel. Les théories les plus classiques et les plus anciennes pour des milieux poutres sont la théorie d'Euler-Bernoulli et la théorie de Timoshenko. La théorie d'Euler-Bernoulli, appelée résistance des matériaux, néglige le cisaillement.

Elle utilise un champ de déplacement qui rigidifie la section. Elle introduit de plus la liaison interne qui contraint la section droite restée orthogonale à la ligne moyenne après déformation. La théorie de Timoshenko [Timoshenko 1921], [Timoshenko 1922], [Timoshenko 1968], de déplacement plus général qui rigidifie la section droite.

Le flambement ou flambage est un phénomène qui, soumis à une force de compression, a tendance à se déformer dans une direction perpendiculaire à la force de compression. L'étude de flambement des nanotubes de carbone CNTs est une manière importante d'être étudiée, les CNTs ont été modélisés comme des poutres élastiques rectilignes (figure III.1) basant sur le modèle de Timoshenko qui ont efficacement étudié le flambement (flexion, vibration) des nanotubes de carbone, et ont donné des résultats fiables.

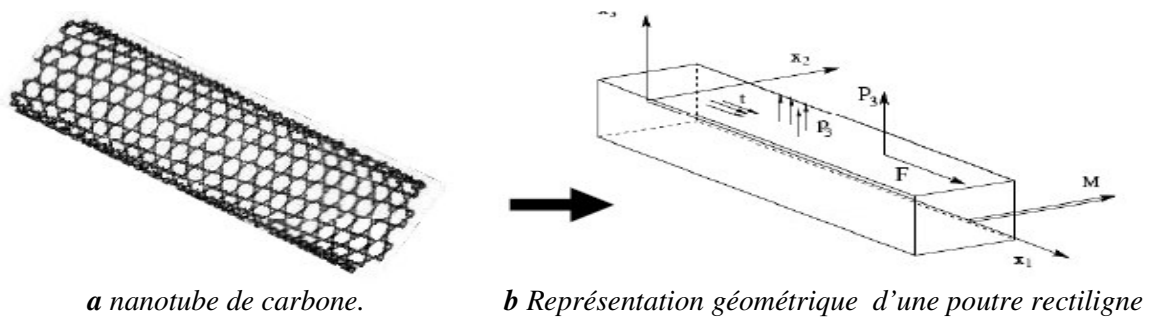


Figure III.1 Modélisation d'un nanotube de carbone à une poutre rectiligne

III.2 Le modèle de la mécanique moléculaire :

Dans l'étude des propriétés mécaniques de CNTs, l'emploi du le modèle de la mécanique quantique potentielle. Du point de vue de la mécanique moléculaire, le nanotube de carbone est considère comme une grande molécule consistée d'atomes de carbone. Atomiques sont considères comme points matériels. Leurs mouvements sont règles par un champ de force, qui est produit par des interactions (électron noyau) et (noyau-noyau). À Habituellement, le champ de force est exprimé sous forme d'énergie potentielle stérique. Elle dépend seulement des positions relatives aux noyaux constitutifs L'expression générale de l'énergie potentielle totale, en omettant l'interaction électrostatique, est la somme d'énergies dues à des interactions liées (c-c) et non liées (van der Walls).[Rappe 1992](figure III.2)

$$\text{Où } U = U_{p+} + U_{\theta+} + U_{\tau+} + U_{\omega+} + U_{vd} . \quad (\text{III.1})$$

Sont des énergies liées respectivement aux de variation, torsion et inversion U_{vd} ,

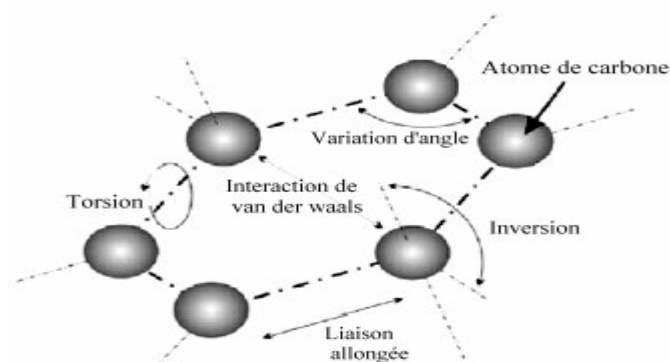


Figure III.2 L'énergie due à des interactions liées (c-c) et non-liées (van der Walls)
[Mahmood 2010]

Généralement pour un nanotube monocouche (SWCNT) soumis à des chargements de traction et de torsion, l'énergie due à l'interaction non-liée de van der Waals est négligeable, tandis que l'énergie due à la torsion et l'inversion reste insignifiante sur l'énergie potentielle inter atomes. Seules les énergies associées aux liaisons allongées et la variation des angles sont importantes dans le système énergétique potentielle totale. Par conséquent, l'équation (3.5) peut être simplifiée

Comme :

$$U = U_p + U_\theta = \frac{1}{2} \sum_i K_i (dR_i)^2 + \frac{1}{2} \sum_j C_j (d\theta_j)^2 \quad (\text{III.2})$$

Où (dR_i et K_i) sont l'allongement et la constante d'allongement de la liaison (i), respectivement, ($d\theta_j$ et C_j) sont la variation d'angle (j) et sa constante. Ainsi nous pouvons obtenir la force d'allongement et l'équation d'équilibre du moment de torsion.

$$F = K dR_i, M = C d\theta_j \quad (\text{III.3})$$

III.3 Les propriétés mécaniques :

La découverte des nanotubes de carbone (CNTs) en 1991 a suscité un intérêt considérable partiellement dû à leurs propriétés mécaniques remarquables. Par exemple, les nanotubes de carbone sont parmi les matériaux résistants connus dans la nature. Un nanotube de module de Young aussi grand que 1 TPa fois plus grand que l'acier et peut tolérer les grandes contraintes (environ 50%) avant échec mécanique. Les études des propriétés mécaniques se concentrent sur l'étude expérimentale et l'étude théorique. L'approche expérimentale est d'obtenir le module de Young en mesurant les amplitudes de vibration thermique intrinsèque des nanotubes de carbone.

Suivant cette approche, Treacy et al. [Treacy 1996] ont obtenu les modules de Young des nanotubes de carbone multi-paroi (MWCNTs). Un total de 11 valeurs de module de Young de MWCNTs ont été rapportées (de 0.4 à 4.15 TPa avec une moyenne de 1.8 TPa). Une étude expérimentale similaire sur les SWCNT a été présentée par Krishnan et al. [Krishnan 1998], qui a rapporté une moyenne de module de Young de 1.3 (- 0.4/+0.6) TPa des amplitudes mesurées de 27 SWCNTs.

Dans l'étude théorique, les propriétés mécaniques des nanotubes de carbone ont été simulées respectivement par le modèle atomistique et le modèle de la mécanique quantique. La méthode typique du modèle atomistique est la dynamique moléculaire classique (DM). En appliquant la méthode DM, Yao et al. [Yao 2002] ont choisi la fonction de Brenner pour étudier les propriétés mécaniques de SWCNT.

En utilisant la méthode de simulation DM pour analyser un SWCNT de type armchair ayant un diamètre de 1.2 nm, une longueur de 4.7 nm, on peut calculer un module de Young de 3.62 TPa et une résistance à la traction de 9.6 GPa. L'utilisation d'une approche similaire a permis à Zhang et al. [Zhang 1998] d'analyser les déformations plastiques des nanotubes de carbone. D'autre part, Chang et Gao [Chang 2003] ont déduit la forme close de l'expression pour le module élastique et le rapport de Poisson comme une fonction du diamètre de nanotube en employant l'approche de la mécanique moléculaire.

Xiao et al. [Xiao 2005] ont employé un modèle analytique mécanique pour la structure moléculaire, pour étudier les propriétés mécaniques des nanotubes de carbone. Récemment, quelques chercheurs ont eu recours à la mécanique quantique classique pour modéliser des nanotubes de carbone et ont obtenu quelques bons résultats.

Par exemple, Li et al. [Li 2003] ont présenté l'approche de la mécanique structurale pour modéliser la déformation des nanotubes de carbone. Les modules de Young des nanotubes de carbone ont été obtenus en calculant la déformation élastique de SWCNTs. Ru [Ru 2000] a employé le modèle quantique pour étudier la rigidité à la flexion de nanotubes de carbone soumis à une compression axiale.

En outre, Han et Lu [Han 2003] ont étudié le flambement de DWCNT du à une torsion dans un milieu élastique en employant le modèle élastique de double paroi. Y.WU et al. [Wu 2006] ont pu calculer les propriétés mécaniques des SWCNTs mono paroi de type zigzag et armchair en fonction du diamètre en se basant sur un modèle. (figure III.3)

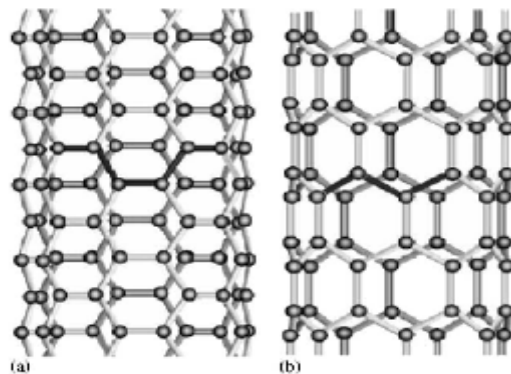


Figure III.3 Schéma représente: (a) un nanotube armchair et (b) un nanotube zigzag.

III.3.1 module de Young :

Un nanotube armchair soumis à une charge axiale est d'abord étudié. Selon sa structure, la liaison carbone-carbone et l'angle peuvent être classés en deux types de liaisons et angles, liaison (*a et b*), et l'angle (α et β), respectivement dans la (figure III.4a). Pour un nanotube de carbone type armchair, nous supposons que la force exercée sur la liaison (*b*) dans la direction axiale est perpendiculaire (figure III.4b).

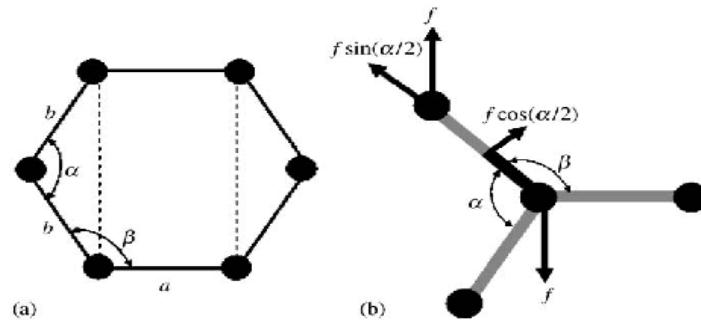


Figure III.4 Schéma d'un nanotube de carbone type armchair: (a) hexagonale (b) distribution de la Force en liaison [Wu 2006]

Dans le plan (b-b), les deux composantes de la force (f), l'un est ($f \sin(\alpha/2)$) le long de la direction de la liaison, et l'autre ($f \cos(\alpha/2)$) perpendiculaire à la liaison. Par l'utilisation de l'équation d'équilibre des forces, l'allongement (db) de la liaison est:

$$db = \frac{1}{K} f \sin(\alpha/2) \quad (\text{III.4})$$

Pour ($\alpha = 120^\circ$), l'énergie due a l'allongement de la liaison peut être écrite comme.

$$U_p = \frac{1}{2} K (db)^2 = \frac{1}{2} K \left(\frac{f^2 \sin(\alpha/2)}{K^2} \right) = \frac{3}{8} \frac{f^2}{K} \quad (\text{III.5})$$

Les expressions de la variation angles $d\alpha$ et ($d\beta$) doivent être trouvé en premier, afin d'obtenir l'énergie. La liaison (b) est divisé en deux moitiés, de sorte que le moment de rotation exercé sur la moitié droite dans le plan (b-b) est ($f \cos(\alpha/2)/2$).

D'autre part, le moment de rotation produit par la variation d'angle $d\alpha$ dans le plan (b-b) est ($Cd\alpha$), et par ($d\beta$) dans le plan (a-b) est ($Cd\beta$). Ainsi l'équation d'équilibre des moments peut être écrite comme suit :

$$\frac{f l_0}{2} \cos(\alpha/2) = Cd\alpha + Cd\beta \cos \varphi \quad (\text{III.6})$$

Où φ est l'angle de torsion entre le plan (b-b) et plan (a-b), qui peut être calculée par.

$$\cos \varphi = \frac{\tan(\alpha/2)}{\tan \beta} \quad (\text{III.7})$$

Sur la base de la structure géométrique de (n, n) des nanotubes, la relation entre les angles (α et β) peut être écrite comme suit:

$$\cos \beta = -\cos(\alpha/2) \cos(\Pi/2n) \quad (\text{III.8})$$

La dérivation des deux côtés de l'équation. (III.8), on obtient.

$$d\beta \sin \beta = \frac{1}{2} d\alpha \sin(\alpha/2) \cos(\Pi/2n)$$

$$d\beta = -\frac{\sin(\alpha/2)}{2 \sin \beta} \cos(\Pi/2n) \quad (III.9)$$

En substituant l'équation. (III.9) dans l'équation. (III.6), l'expression de $(d\alpha)$ peut être écrite comme suit:

$$\frac{f l_0}{2} \cos(\alpha/2) = C d\alpha + C d\beta \cos \varphi$$

$$d\alpha = \frac{f l_0}{2C} \cos(\alpha/2) - d\beta \cos \varphi$$

$$d\alpha = \frac{f l_0}{2C} \cos(\alpha/2) + \frac{\sin(\alpha/2)}{2 \sin \beta} \cos(\Pi/2n) d\alpha \cos \varphi$$

$$d\alpha = \frac{f l_0}{2C} \frac{2 \cos(\alpha/2) \sin \beta}{\sin \beta - \sin(\alpha/2) - \sin^2 \cos \beta \cos(\Pi/2n)}$$

$$d = \frac{f l_0}{C} \frac{\sin^2 \beta \cos^2(\alpha/2)}{2 \sin^2 \beta \cos(\alpha/2) - \sin^2 \cos \beta \cos(\Pi/2n)}$$

$$d\alpha = \frac{f l_0 \lambda_{a1}}{C} \quad (III.10)$$

Où

$$\lambda_{a1} = \frac{\sin^2 \cos^2(\alpha/2)}{2 \sin^2 \beta \cos(\alpha/2) - \sin^2(\alpha/2) \cos \beta \cos(\pi/2n)} \quad (III.11)$$

Pour $(\alpha=120^\circ)$, l'équation. (III.11) peut être simplifiée comme suit:

$$\lambda_{a1} = \frac{\frac{1}{4} \sin^2 \beta}{\frac{2}{2} \sin^2 \beta - \frac{3}{4} \cos \beta \cos(\pi/2n)}$$

$$\lambda_{a1} = \frac{\frac{1}{4}(1 - \cos^2 \beta)}{(1 - \cos^2 \beta) \cos \beta \cos(\pi/2n)}$$

$$\lambda_{a1} = \frac{4 - \cos^2(\pi/2n)}{16 + 2 \cos^2(\pi/2n)} \quad (III.12)$$

Donc, l'énergie associée à la variation angle ($d\alpha$) est.

$$U_{\theta\alpha} = \frac{1}{2} \frac{f^2 l_0^2 \lambda_{a1}^2}{c} \quad (\text{III.13})$$

En substituant l'équation (III.10) dans l'équation. (III.9), par l'utilisation l'équation. (III.1), l'énergie associée à la variation angle ($d\beta$) peut être obtenu comme suit:

$$U_{\theta\beta} = \frac{1}{2} C \left(\frac{-\sin(\alpha/2)}{2\sin\beta} \cos(\pi/2n) d\alpha \right)^2$$

$$U_{\theta\beta} = \frac{1}{2} \frac{f^2 l_0^2}{c} \left[\frac{\sin^2(\alpha/2)}{4\sin^2\beta} \cos^2(\pi/2n) \frac{(4-\cos^2(\pi/2n))^2}{(16+2\cos^2(\pi/2n))^2} \right]$$

$$U_{\theta\beta} = \frac{1}{2} \frac{f^2 l_0^2}{c} \left[\frac{(12-3\cos^2(\pi/2n))\cos^2(\pi/2n)}{4(16+2\cos^2(\pi/2n))^2} \right]$$

$$U_{\theta\beta} = \frac{1}{2} \frac{f^2 l_0^2}{c} \left[\sqrt{\frac{(12-3\cos^2(\pi/2n))\cos^2(\pi/2n)}{4(16+2\cos^2(\pi/2n))^2}} \right]^2$$

$$U_{\theta\beta} = \frac{1}{2} \frac{f^2 l_0^2 \lambda_{a2}^2}{c} \quad (\text{III.14})$$

Où

$$\lambda_{a2} = \frac{\sqrt{12-3\cos^2(\pi/2n)}\cos(\pi/2n)}{32+4\cos^2(\pi/2n)} \quad (\text{III.15})$$

Pour un nanotube de carbone type armchair, le nombre des hexagonales le long de la direction circonférentielle est ($2n$). En supposant que le nombre des hexagonales le long de la direction axiale est (N'), par conséquent, on a ($2N'n$) hexagonales de carbone, et ($4N'n$) liaison (b). Il y a aussi ($4N'n$) angles (α) et ($8N'n$) angles (β) dans un nanotube de carbone type armchair. Pour un hexagonale de carbone composé de deux angles (α) et quatre angles (β), l'énergie potentielle total d'un nanotube de carbone type armchair est: [Wu 2006]

$$U = \frac{3f^2(4Nn)}{8K} + \frac{1}{2} \frac{f^2 l_0^2 \lambda_{a1}^2 (4Nn)}{c} + \frac{1}{2} \frac{f^2 l_0^2 \lambda_{a2}^2 (8Nn)}{c}$$

$$U = \frac{3Nnf}{2K} + \frac{2Nnf^2l_0^2\lambda_{a1}^2}{C} + \frac{4Nnf^2l_0^2\lambda_{a2}^2}{C} \quad (\text{III.16})$$

Selon la mécanique des matériaux, l'énergie de déformation d'un cylindre mince de longueur (L) soumis à une force axiale (F) est:

$$U_b = \frac{1}{2} \int_0^L \frac{F^2}{E_0A} dL = \frac{1}{2} \frac{F^2L}{E_A} \quad (\text{III.17})$$

Basé sur les précédentes hypothèses, nous pouvons constater que la longueur d'un nanotube de carbone (n, n) est, $(L = \sqrt{3}Nl_0)$, et la force axiale $(F = 2nf)$. Par l'utilisation de l'équation $D = L_0 \sqrt{3} \frac{\sqrt{m^2+n^2+nm}}{\pi}$, la surface de la section du nanotube peut être écrite comme, $(A = 2\pi Rt = 3nl_0t)$ (t est l'épaisseur de la couche du nanotube). Ainsi l'expression de l'énergie de déformation d'un cylindre mince correspondant à un nanotube type armchair est:

$$U_b = \frac{2Nnf^2}{\sqrt{3}E_a t} \quad (\text{III.18})$$

En comparant l'énergie potentielle moléculaire total et l'énergie de déformation d'un nanotube type armchair, le module d'Young équivalent peut être obtenu comme suit: [Wu 2006]

$$\frac{2Nnf^2}{\sqrt{3}E_a t} = \frac{3Nnf}{2K} + \frac{2Nf^2}{2K} + \frac{2Nnf^2l_0^2\lambda_{a1}^2}{C} + \frac{4Nnf^2l_0^2\lambda_{a2}^2}{C}$$

$$E_a = \frac{4\sqrt{3}}{3} \frac{KC}{3Ct + 4Kl_0^2t(\lambda_{a1}^2 + 2\lambda_{a2}^2)} \quad (\text{III.19})$$

Pour $(n \rightarrow \infty)$, l'expression du module de Young d'un graphite est donnée par :

$$E_g = \frac{8\sqrt{3}KC}{18Ct + Kl_0^2t} \quad (\text{III.20})$$

Pour un nanotube zigzag, les positions des liaisons et des angles sont présentées sur la (figure III.5a). On constate que l'énergie potentielle n'est pas seulement associée à l'allongement de la liaison b , mais aussi avec la liaison a . Donc, l'équation d'équilibre des forces et des moments peuvent être obtenues:

$$f \cos(\pi - \beta) = Kd\beta \quad (\text{III.21})$$

$$2f = Kda \quad (\text{III.22})$$

$$\frac{fl_0}{2} \sin(\pi - \beta) = Cd\beta + Cda \cos\varphi \quad (\text{III.23})$$

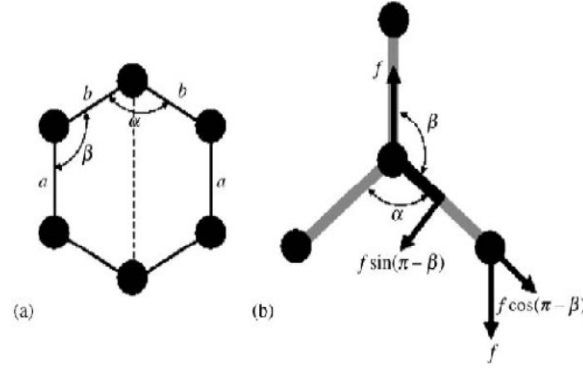


Figure III.5 Schéma d'un nanotube de carbone type zigzag ($n, 0$): (a) l'hexagonale (b) répartition de la force en liaison [Wu 2006].

Où (da) et (db) sont les allongements des liaisons (a et b). La relation entre les angles (α et β) est:

$$\sin(\alpha/2) = \sin \beta \cos(\pi/2n) \quad (\text{III.24})$$

De même, l'énergie potentielle associée à l'allongement des liaisons (a et b) sont:

$$U_{pb} = \frac{1}{2} K (db)^2 = \frac{f^2}{8K} \quad (\text{III.25})$$

$$U_{pa} = \frac{1}{2} K (da)^2 = \frac{2f^2}{K} \quad (\text{III.26})$$

Et les l'énergie potentielle associée à la variation des angles (da et $d\beta$) sont:

$$U_{\theta\alpha} = \frac{1}{2} \frac{f^2 l_0^2 \lambda_{z1}^2}{c} \quad (\text{III.27})$$

$$U_{\theta\beta} = \frac{1}{2} \frac{f^2 l_0^2 \lambda_{z2}^2}{c} \quad (\text{III.28})$$

Où

$$\lambda_{z1} = \frac{-3\sqrt{4-3\cos^2(\pi/2n)}\cos(\pi/2n)}{8\sqrt{3}-4\sqrt{3}\cos^2(\pi/2n)} \quad (\text{III.29})$$

$$\lambda_{z2} = \frac{12-9\cos^2(\pi/2n)}{16\sqrt{3}-4\sqrt{3}\cos^2(\pi/2n)} \quad (\text{III.30})$$

Ainsi, sur la base de la structure d'un nanotube type zigzag, l'énergie potentielle moléculaire totale peut être obtenue comme suit:

$$U = \frac{9Nnf}{4K} + \frac{Nnf^2 l_0^2 \lambda_{z1}^2}{c} + \frac{2Nnf^2 l_0^2 \lambda_{z2}^2}{c} \quad (\text{III.31})$$

L'énergie de déformation d'un cylindre mince correspondant à un nanotube type zigzag est:

$$U_b = \frac{\sqrt{3}Nnf^2}{E_z t} \quad (III.32)$$

Donc, le module de Young équivalent d'un nanotube type zigzag est [Wu 2006]:

$$\frac{\sqrt{3} Nn f^2}{E_z t} = \frac{9Nnf^2}{4K} + \frac{Nnf^2 l_0^2 \lambda_{z1}^2}{c} + \frac{2Nnf^2 l_0^2 \lambda_{z2}^2}{c}$$

$$E_z = \frac{4\sqrt{3} KC}{9Ct + 4kl_0^2 t(\lambda_{z1}^2 + 2\lambda_{z2}^2)} \quad (III.33)$$

Pour (n=∞) dans (λ_{z1} et λ_{z2}) on peut obtenir le module de Young de graphite à nouveau.

III.3.II Le module de cisaillement:

De même, un nanotube de carbone type armchair soumis à un chargement de torsion, le modèle analytique est présenté sur la (figure III.6). Lorsque les contraintes de cisaillement dans les deux directions sont les même, la relation entre (f₁ et f₂) est comme suit:

$$f_1 = \frac{\sqrt{3}}{3} f_2 \quad (III.34)$$

L'équation d'équilibre des forces est:

$$f_1 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) + f_2 \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = Kdb \quad (III.35)$$

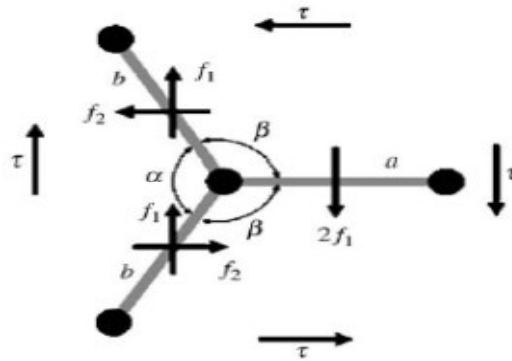


Figure III.6 Schéma présente la distribution des forces d'un nanotube type armchair. [Wu 2006]

Pour (α = 120°) l'énergie associée à l'allongement de la liaison peut être obtenue on utilise les équations (III.50) et (III.1):

$$U_\rho = \frac{1}{2} K (db)^2 = \frac{1}{2} \frac{f_2^2}{K} \quad (III.36)$$

L'équation d'équilibre des moments exercé sur la moitié droite de la liaison (b) est:

$$f_2 \frac{l_0}{2} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) - f_1 \frac{l_0}{2} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = Cd\beta \cos \varphi \quad (\text{III.37})$$

Par l'utilisation des équations (III.5), (III.7) et (III.8) la variation d'angle ($d\beta$) peut être obtenue comme suit:

$$d\beta = \frac{f_2 l_0 \lambda_a}{6C} \quad (\text{III.38})$$

Donc l'énergie associée à la variation d'angle (db) est:

$$U_\theta = \frac{f_2^2 l_0^2 \lambda_a^2}{72C} \quad (\text{III.39})$$

Où

$$\lambda_a = \sqrt{(4/\cos^2(\pi/2n)) - 1} \quad (\text{III.40})$$

Ainsi, l'énergie potentielle moléculaire totale d'un nanotube type armchair peut être obtenue comme suit:

$$U = \frac{2Nnf_2^2}{K} + \frac{Nnf_2^2 l_0^2 \lambda_a^2}{9C} \quad (\text{III.41})$$

L'énergie de déformation due à la torsion d'un cylindre mince correspondant à un nanotube type armchair est:

$$U_b = \int_L \frac{1}{2} \frac{T^2}{G_a J} dL = \frac{1}{2} \frac{T^2 L}{G_a J} \quad (\text{III.42})$$

Où (G_a) est le module de cisaillement, ($T = 2nf_2 r$) est le moment de torsion et ($J = 2\pi^3 t$) est le constant de torsion correspond au cylindre mince.

Substituant l'expression de (T , J et r) dans l'équation (III.42) donne:

$$U = \frac{2\sqrt{3}Nnf^2}{3G_a t} \quad (\text{III.43})$$

Le module de cisaillement équivalent d'un nanotube de carbone type armchair peut être obtenue par l'égalité des équations (III.41) et (III.43). [Wu 2006]

$$G_a = \frac{6\sqrt{3}KC}{(18C + Kl_0^2 \lambda_a^2)t} \quad (\text{III.44})$$

Le module de cisaillement équivalent d'un nanotube de carbone type armchair peut être obtenue par l'égalité des équations (III.41) et (III.44). [Wu 2006]

Pour $n = \infty$ dans l'expression de (λ_a) on peut obtenir le module de cisaillement du graphite comme suit:

$$G_g = \frac{2\sqrt{3}KC}{(6C+Kl_0^2)t} \quad (\text{III.45})$$

La (figure III.8) représente le modèle analytique un nanotube de carbone type zigzag soumis à un chargement de torsion. Les équations d'équilibres des forces et des moments est comme suit:

$$f_1 \cos(\pi - \beta) + f_2 \sin(\pi - \beta) = Kdb \quad (\text{III.46})$$

$$2f_2 \frac{l_0}{2} = 2Cd\beta \cos\varphi \quad (\text{III.47})$$

$$f_1 = \sqrt{3}f_2 \quad (\text{III.48})$$

De même, l'énergie potentielle associée à la liaison et la variation d'angle $(d\beta)$ d'un nanotube type zigzag peut être obtenu comme suit:

$$U_\rho = \frac{3f^2}{2K} \quad (\text{III.49})$$

$$U_\theta = \frac{3f^2 l_0^2 \lambda_z^2}{8C} \quad (\text{III.50})$$

Où

$$\lambda_z = \sqrt{(4/3\cos^2(\pi/2n)) - 1} \quad (\text{III.51})$$

Ainsi, l'énergie potentielle moléculaire totale d'un nanotube type zigzag peut être obtenue comme suit:

$$U = \frac{3Nnf^2}{K} + \frac{3Nnf^2 l_0^2 \lambda_z^2}{2C} \quad (\text{III.52})$$

L'énergie de déformation due à la torsion d'un cylindre mince correspondant à un nanotube type zigzag est:

$$U_b = \frac{\sqrt{3} Nnf^2}{Gt} \quad (\text{III.53})$$

Le module de cisaillement d'un nanotube de carbone type zigzag peut être obtenue comme suit:

$$G_z = \frac{2\sqrt{3}KC}{6Ct+3Kl_0^2\lambda_z^2t} \quad (\text{III.54})$$

De même, pour $n = \infty$ dans l'expression de (λ_z) on peut obtenir le module de cisaillement du graphite.

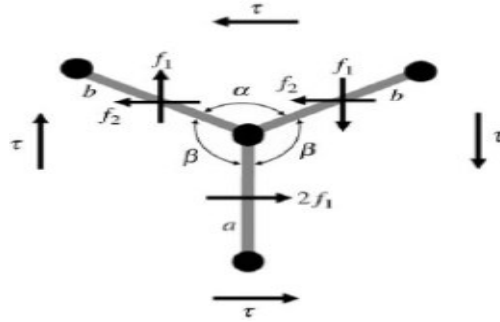


Figure III.8 Schéma présente la distribution des forces d'un nanotube type zigzag. [Wu 2006]

III.3.III Coefficient de poisson:

Pour obtenir le coefficient de poisson, la déformation axiale ε et la déformation circonférentiel ε' d'un nanotube de carbone type armchair est comme suit:

$$\varepsilon = \frac{d[b\sin(\alpha/2)]}{b\sin(\alpha/2)} \quad (\text{III.55})$$

$$\varepsilon' = \frac{d[a+b\cos(\alpha/2)]}{a+b\cos(\alpha/2)} \quad (\text{III.56})$$

Substituant l'expression de $(db \text{ et } da)$ dans les équations précédentes considérant les relations

$(a=b=l_0 \text{ et } \alpha = 120^\circ)$ donne:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{f}{kl_0} + \frac{\sqrt{3}}{6} \frac{fl_0\lambda_{a1}}{C} \quad (\text{III.57})$$

$$\varepsilon' = \frac{\sqrt{3}}{6} f \left(\frac{1}{kl_0} - \frac{l_0\lambda_{a1}}{C} \right) \quad (\text{III.58})$$

A partir de la définition du coefficient de poisson nous avons:

$$\nu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} = \frac{l_0^2\lambda_{a1}K-C}{l_0^2\lambda_{a1}K+3C} \quad (\text{III.59})$$

Pour un nanotube de carbone type zigzag La déformation axiale ε et la déformation circonférentielle ε' est comme suit:

$$\varepsilon = \frac{1}{6} f \left(\frac{9}{2Kl_0} + \frac{\sqrt{3}l_0\lambda_{z2}}{C} \right) \quad (\text{III.60})$$

$$\varepsilon' = \frac{f}{4Kl_0} - \frac{\sqrt{3}fl_0\lambda_{z2}}{6C} \quad (\text{III.61})$$

L'expression du coefficient de poisson d'un nanotube de carbone type zigzag est comme suit:

$$\nu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} = \frac{l_0^2 \lambda_{22} K - \frac{\sqrt{3}}{2} C}{l_0^2 \lambda_{22} K + \frac{3\sqrt{3}}{2} C} \quad (\text{III.62})$$

A partir des équations (III.74) et (III.77) L'expression du coefficient de poisson d'un graphite est donnée par cette relation. [Wu 2006]

$$\nu = \frac{l_0^2 K - 6C}{l_0^2 K + 18C} \quad (\text{III.63})$$

III.4 L'effet de la température sur le module de Young d'un nanotube de carbone monocouche (SWNT):

Sous les changements de la température d'environnements, le module de Young peut être une fonction de changement de la température comme suit: [Mallick 1997] [Shen 2001]

$$E_N = E_N^0 (1 - 0.0005\theta) \quad (\text{III.64})$$

Où (E_N^0, θ) est le module Young du nanotube de carbone monocouche sous la référence température et le changement de la température.

III.5 Le module de Young d'un nanotube de carbone multicouche (MWNT):

Zhan et al [Zhan 2002] ont étudié la relation entre le module de Young de (MWNT) et le nombre de couche (N) d'un nanotube multicouche (MWNT's) par cette relation:

$$E_{MWNT} = \frac{\bar{N}}{\bar{N} + 1 + t/h} \frac{t}{h} E_{SWNT} \quad (\text{III.65})$$

Où $(E_{MWNT}, E_{SWNT}, \bar{N})$ sont le module de Young du nanotube multicouche, le module de Young du nanotube monocouche, l'épaisseur de la couche, le nombre de couche et l'espacement entre les couches.

III.6 Application du modèle des milieux continus pour étude de flambement thermique des CNTs :

Les nanotubes de carbone (CNT) sont parmi les plus importants des nanomatériaux qui ont attiré l'attention de la communauté scientifique en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques et de larges applications potentielles dans la nano-ingénierie. Pour réaliser pleinement le potentiel d'application de nanotubes de carbone, il est important de caractériser les propriétés mécaniques de ces nanostructures ainsi que leur réponse matérielle. Cependant, comme la réalisation d'expériences contrôlées à l'échelle nanométrique est difficile et coûteuse, la plupart des recherches ont été principalement menées par la modélisation et des simulations informatiques. En effet, avec la difficulté pour les expériences contrôlées à l'échelle nanométrique, la simulation numérique a été réalisée à grande échelle. Deux approches fondamentalement différentes sont disponibles pour la modélisation théorique des matériaux nanostructures: les approches atomistiques et la mécanique des milieux continus. Le premier comprend la dynamique moléculaire classique (MD), dynamique moléculaire des liaisons fortes (TBMD) et la théorie de la fonctionnelle de densité (DFT) [Iijima 1996], [Yakobson 1997], [Hernandez 1998], [Sanchez-Portail 1999], [Qian 2002].

Ces approches sont souvent coûteuses en calcul, en particulier pour les nanotubes de carbone à grande taille avec un nombre élevé de parois. Par conséquent, la mécanique des milieux continus est de plus en plus considérée comme un moyen alternatif de modélage de matériaux à l'échelle nanométrique. Toutefois, les théories de la mécanique des milieux continus classiques sont incapables de prendre en compte l'effet d'échelle. L'effet d'échelle est prononcé en nanomatériaux, principalement dans le cas où la surface est grande par rapport au volume.

À cet égard, la théorie de l'élasticité non-locale proposée par Eringen et al. [Eringen 1972], [Eringen 1983], [Eringen 2002] a été largement appliquée pour obtenir l'équation gouvernante dépendante à l'échelle nanométrique par incorporation d'une longueur interne caractéristique dans le modèle. Selon la théorie non locale, les contraintes à un point de référence est une fonctionnelle de champ de déformation en chaque point du. La mise en œuvre du modèle d'élasticité non-local et les travaux pertinents de calcul sont faciles et pratiques [Peddieson 2003] [Kumar 2008].

Elle a été largement appliquée pour analyser la propagation de flexion, flambement, les vibrations et ondes des matériaux modélisables à des poutres (des éléments en forme de dispositifs de micro ou nano électromécaniques) [Peddieson 2003], [Lu 2006], [Wang C.M. 2006], [Reddy 2008] [Murmu 2009(1)], [Murmu 2009(2)], [Murmu 2009(3)], [Simsek 2010], [Simsek 2011], [Heireche 2008(1)], [Heireche 2008(2)], [Heireche 2008(3)], [Tounsi 2008], [Tounsi 2009(1)], [Tounsi 2009(2)], [Tounsi 2013].

Grâce au rapport d'aspect élevé des nanotubes de carbone, ils sont plus sensibles à l'instabilité de flambement lorsqu'il est soumis à des charges de compression. Ainsi, outre les propriétés mécaniques des nanotubes de carbone générales, le comportement de flambement des nanotubes de carbone est important pour les applications futures comme la microscopie à sonde. Sudak [Sudak 2003] a étudié une colonne infinitésimale de flambement de nanotubes de carbone (NTC), l'incorporation des forces de van der Waals et l'effet d'échelle, ont montré que la déformation axiale critique diminue comparativement aux résultats de poutres classiques.

Reddy [Reddy 2007] a reformulé différentes théories de poutres non locales pour évaluer la flexion statique, vibrations, et flambement des nano poutres. Murmu et Pradhan [Murmu 2008] ont réalisé une analyse de la stabilité de poutres entourées par un milieu élastique en utilisant le modèle de poutre d'Euler-Bernoulli non local. En outre, Murmu et Pradhan [Murmu 2009(1)] ont utilisé l'élasticité non locale et la théorie de poutres de Timoshenko pour étudier le flambement des SWCNTs embarqués dans un milieu élastique.

Senthilkumar et al. [Senthilkumar 2010] ont étudié l'effet d'échelle sur la charge critique de flambement pour les SWCNT basée sur la théorie de poutres de Timoshenko en utilisant la méthode de transformation différentielle. Récemment, Amara et al. [Amara 2010] ont étudié l'effet thermique sur le flambement de MWNT en utilisant le modèle de poutre non-local. En outre, certaines recherches indiquent que les comportements mécaniques des nanotubes de carbone sont sensibles aux effets thermiques dans l'environnement externe [Zhang 2007], [Tounsi 2008].

Cependant, l'effet de chiralité n'est pas pris en compte pour les propriétés thermiques de flambement. L'objectif de ce travail est d'étudier les caractéristiques thermiques du nanotube de carbone monoparoî de type amchair introduit dans un milieu élastique en utilisant la théorie non local de déformation de premier ordre (NNFSDT) on prend la considération l'effet d'échelle aussi bien que les effets de déformation transverse des CNTs et l'influence de module de Winkler.

Les résultats par le modèle de poutres de Timoshenko sont obtenus et comparés avec ceux obtenus par le modèle de poutres d'Euler-Bernoulli. Par ailleurs, l'effet de cisaillement indique clairement l'importance d'appliquer des modèles de poutres qui tiennent compte de la déformation de cisaillement des NTC. Les résultats révèlent également que le paramètre non-local a un effet significatif sur le comportement thermique de flambement de nanotubes de carbone à l'échelle nanométrique.

Les résultats par le modèle de poutres de Timoshenko sont obtenus et comparés avec ceux obtenus par le modèle actuel. Par ailleurs, l'effet de cisaillement indique clairement l'importance d'appliquer des modèles de poutres qui tiennent compte de la déformation de cisaillement des NTC. Les résultats révèlent également que le paramètre non-local a un effet significatif sur le comportement thermique de flambement de nanotubes de carbone à l'échelle nanométrique.

Un système de coordonnées (x, y, z) est introduit dans l'axe central de la poutre, où l'axe x est pris le long de la longueur de la poutre, l'axe Y dans le sens de la largeur et l'axe z est pris le long de la profondeur (hauteur). En outre, l'origine du système de coordonnées est sélectionnée à l'extrémité gauche de la poutre. On suppose que les déformations de la poutre ont lieu dans le plan x - z , de sorte que le déplacement des composantes (u_1, u_2, u_3) le long de l'axe (x, y, z) ne dépendent que de la coordonnées x et z et du temps t . Sous une forme générale, le champ de déplacement suivant peut être écrit:

$$u_1 = -z \frac{d\omega(x,t)}{dx} + \Psi(z) \left(\frac{\partial \omega(x,t)}{\partial x} + \varphi(x,t) \right) \quad (\text{III.66})$$

$$u_2(x, z, t) = 0 \quad (\text{III.67})$$

$$u_3(x, z, t) = \omega(x, t) \quad (\text{III.68})$$

Où w et φ représentent consécutivement le déplacement transversale et le déplacement angulaire de la poutre, et $\psi(z)$ représente la fonction de forme telle que : [Sahmani 2011]

- Pour le model d'Euler-Bernoulli : $\psi(z) = 0$
- Pour le model de Timoshenko : $\psi(z) = z$

III.7 Premières hypothèses fondamentales de la théorie des poutres

III.7.1 Principe de saint venant :

La contrainte en un point éloigné des points d'application d'un système de forces ne dépend que de la résultante générale et du moment résultant de ce système de forces, même si la répartition des contraintes n'est pas la même, la solution trouvée sera valable, si on se place suffisamment loin du point d'application des charges.

III.7.2 Principe de Navier Bernoulli :

L'hypothèse de Navier Bernoulli consiste à supposer que les sections normales à la fibre moyenne restent planes pendant la déformation de la poutre. Cette hypothèse qui permet de calculer les contraintes normales dues au moment fléchissant, est bien vérifiée dans le cas de flexion pur ou l'effort tranchant est nulle. Par contre, dans le cas de la flexion simple avec effort tranchant, les sections ne restent pas planes, mais se gauchissent en forme de lettre S très aplaties.

Le principe de Navier Bernoulli est fondé sur les observations suivantes :

*le gauchissement d'une section est toujours très petit vis-à-vis des dimensions de la section voisine, est toujours très petite, non seulement vis-à-vis de la distance des deux sections infiniment voisines.

*le principe de Navier Bernoulli revient à négliger le cisaillement et le gauchissement des sections transversales dans l'étude de déplacement et de déformation d'un élément de poutre.

La théorie la plus ancienne est celle de Kirchoff qui néglige l'effet de cisaillement transversal. Elle ne peut pas en conséquence être appliquée qu'aux structures très minces.

La théorie du premier ordre communément associée à [Reissner, 1945], qui fut l'un des premiers à énoncer ses bases, prend en compte les effets du cisaillement transversal à travers l'épaisseur. Elle conduit, de par l'hypothèse des « sections droites restent droites » à un vecteur des contraintes de cisaillement transverse constant dans l'épaisseur, en contradiction avec une représentation quadratique classiquement obtenue pour les poutres (théorie de Timoshenko) ou les plaques en flexion.

Pour corriger cette insuffisance, des facteurs dits de correction du cisaillement transverse y sont introduits.

Les éléments finis formulés en déplacement basés sur la théorie du premier ordre donnent généralement de bons résultats pour les structures isotropes et orthotropes. Ils deviennent peu précis une fois appliqués aux matériaux composites contenant plusieurs couches avec une anisotropie très différentes d'une couche à une autre. [Topdar 2003]

Certes, les facteurs de correction du cisaillement transverse, une fois introduits dans les modèles du 1^{er} ordre en déplacement, ont permis de résoudre des problèmes de structures multicouches mais leur évaluations dépend malheureusement du nombre de stratifications. Pour écarter à jamais ce type de problème, des théories d'ordre élevé ont été introduites au début des années 70.

III.7.3 Modèle d'Euler Bernoulli :

La théorie classique des poutres se base sur les hypothèses d'Euler-Bernoulli, selon lesquelles une section plane et normale au plan moyen de la poutre reste normale et perpendiculaire après déformation.

En se basant sur les hypothèses ci-dessus, le champ de déplacement est donné par :

$$\begin{cases} U(x, y) = u_0 - z \frac{dw}{dx} \\ W(x) = w_0(x) \end{cases} \quad \text{(III.69)}$$

Avec :

U, W : les déplacements suivant les direction x, y respectivement.

u_0, w_0 : les déplacements de la fibre moyenne suivant les directions x, y respectivement.

III.7.4 Modèle de poutre de Timoshenko :

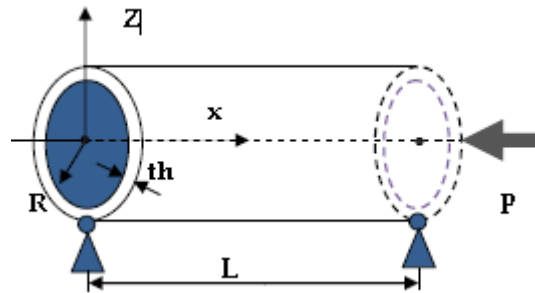


Fig. III.9 Nanotubes de carbone mono paroi avec des extrémités appuyées soumises a une charge P model de Timoshenko non local, montrant le rayon, L'épaisseur, la longueur et les axes de coordonnées.

Selon le modèle de Timoshenko (figure III.10), la relation des contraintes de déplacement sont données par [Sahmani 2011] :

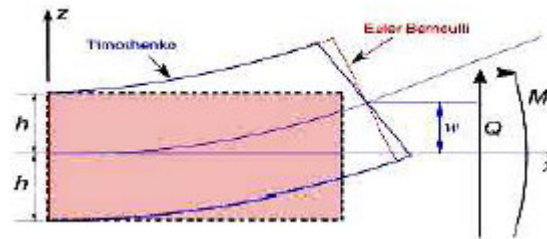


Fig. III.10 Poutre de Timoshenko et d'Euler Bernoulli

$$u_1(x, z, t) = z\varphi(x, t) \quad (III.70)$$

$$u_3(x, z, t) = \omega(x, t) \quad (III.71)$$

Nous avons :

$$\varepsilon_{xx} = \frac{du_1}{dx} = z \frac{d\varphi}{dx} \quad (III.72)$$

Ceci implique :

$$y_{x,z} = \varphi + \frac{d\omega}{dx} \quad (III.73)$$

x : La coordonnée longitudinale,

z : La coordonnée mesure a partir de l'axe neutre du nanotube,

w : Le déplacement transversal

φ : La rotation due au recourbement

ε_{xx} : La déformation normale

$y_{x,z}$: La déformation transversale de cisaillement

III.8 La théorie d'élasticité non locale des poutres :

Contrairement à la théorie classique, la théorie non locale considère que les contraintes en un point dépendent non seulement de la déformation à ce point, mais aussi sur des contraintes [Eringen 1983], Par exemple, dans la non - l'élasticité locale, la loi constitutive uni axiale est exprimée comme [Tounsi 2013(2)] , [Heireche 2008].

$$\sigma_x - \mu \frac{d^2 \sigma_x}{dx^2} = E \left(\varepsilon_x - \frac{\alpha T}{1-2\nu} \right) \quad (\text{III.74.a})$$

$$\tau_{xz} - \mu \frac{d^2 \tau_{xz}}{dx^2} = G \gamma_{xz} \quad (\text{III.74.b})$$

Respectivement (σ_x, τ_{xz}) et $(\varepsilon_x, \gamma_{xz})$ sont les composants d'effort et de contrainte est le module d'élasticité, E est le module d'élasticité, G est le module de cisaillement le module, α est le coefficient de dilatation thermique, T est le changement de température, et le ν est le rapport de poisson. $\mu = (e_0 a)^2$, e_0 est un paramètre nonlocal , a une longueur caractéristique interne (par exemple la longueur de la liaison C- C, pas du réseau, la distance granulaire) e_0 et une constante. Choix de $e_0 a$ (la dimension de longueur) est crucial pour assurer la validité des modèles non locaux.

Ce paramètre a été déterminé en comparant les courbes de dispersion basées sur les modèles atomiques [Eringen 1972], [Eringen 1983]. Pour un matériau donne, le paramètre correspondant non-local peut être estimé en ajustant les résultats de la dynamique des réseaux atomiques a celles de l'expérimental.

Notons ici, que les CNT sont normalement isotropes c.-à-d les propriétés mécanique sont identique dans toute les directions.[wang2005] ont prouvé que la valeur du paramètre nonlocal dépend des conditions de frontière, du chirality, des formes de mode, du nombre de parois, et de la nature du mouvement. Dans l'enquête sur l'effet nonlocal de paramètre, il est crucial de déterminer la grandeur du paramètre e_0 puisqu'il a une influence significative sur l'effet de la petite échelle de longueur. Jusqu'ici, aucune expérience n'a été entreprise pour prévoir l'importance de e_0 pour des nanotubes de carbone.

Dans la littérature [Tounsi 2013(1)],[wang2005],il est suggéré que le paramètre non-local peut être déterminé à l'aide d'une comparaison des courbes de dispersion de la mécanique des continus non-locaux et de la simulation de dynamique moléculaire. Il convient noter que selon les discussions précédentes au sujet des valeurs du paramètre nonlocal en détail, $e_0 a$ est habituellement considéré comme coefficient de simple-échelle qui est plus petit que 2,0 nanomètre pour des nanostructures [Tounsi 2013(2)]

Utilisant un modèle équivalent en énergie [zhang2006],[bounia2014] le module de Young équivalent, le module de cisaillement, et le coefficient de Poisson d'un armchair CNT sont exprimés comme suit :

$$E_a = \frac{4\sqrt{3}}{3} \frac{KC}{3Ct + 4Kl_0^2 t (\lambda_{a1}^2 + 2\lambda_{a2}^2)} \quad (\text{III.77})$$

$$G_a = \frac{6\sqrt{3}KC}{(18C+Kl_0^2\lambda_a^2)t} \quad (\text{III.78})$$

$$v = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} = \frac{l_0^2\lambda_{a1}K-C}{l_0^2\lambda_{a1}K+3C} \quad (\text{III.79})$$

Là où K et C sont la force constants. t est l'épaisseur des nanotubes et les paramètres λ_{a1} , λ_{a2} et λ_a est données par :

$$\lambda_{a1} = \frac{4-\cos^2(\pi/2n)}{16+2\cos^2(\pi/2n)} \quad (\text{III.80})$$

$$\lambda_{a2} = \frac{-\sqrt{12-3\cos^2(\pi/2n)}\cos(\pi/2n)}{32+4\cos^2(\pi/2n)} \quad (\text{III.81})$$

$$\lambda_a = \sqrt{4/\cos^2\frac{\pi}{2n} - 1} \quad (\text{III.82})$$

Où n paramètre de chiralité, $R = \frac{3na}{2\pi}$ (III.83)

Là où a est la longueur du lien de carbone-carbone qui est $1.42A^0$

Basé sur la première théorie de faisceau de déformation de cisaillement développée par Bouremana [bouremana2013] et autres, le champ de déplacement à un point quelconque peut être écrite comme suit :

$$u = u_0(x) - z \frac{\partial w_b}{\partial x} \quad (\text{III.84.a})$$

$$w(x, z) = w_b(x) + w_s(x) \quad (\text{III.84.b})$$

Là où x est la coordonnée de longitude, le z la coordonnée mesurée à partir du midplan du CNT, et l' u , W sont des déplacements dans le x , z , les directions, respectivement u_0 , w_b , et le W_s sont des déplacements de midplan. Les tensions liées au déplacement dans Eqs. (III.84.a) et (III.84.b) soyez :

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x^0 + zk_x^b \text{ and } \gamma_{xz} = \gamma_{xz}^s \quad (\text{III.85.a})$$

Où

$$\varepsilon_x^0 = \frac{\partial u_0}{\partial x}, k_x^b = -\frac{\partial^2 w_b}{\partial x^2}, \gamma_{xz}^s = \frac{\partial w_s}{\partial x} \quad (\text{III.85.b})$$

Les équations de base seront obtenues en employant le principe de l'énergie potentielle minimum. La variation de l'énergie de tension du faisceau peut être énoncée comme :

$$\delta u = \int_v (\sigma_x \delta \varepsilon_x + \tau_{xz} \gamma_{xz}) dV \quad (III.86)$$

$$\delta u = \int_0 \left(N \frac{d\delta u_0}{dx} - M \frac{d^2 \delta w_b}{dx^2} + Q \frac{d\delta w_s}{dx} \right) dx \quad (III.87)$$

Là où N , M , et Q sont les résultantes d'effort définies comme

$$(N, M) = \int_A (1, z) \sigma_x dA \text{ and } Q = \int_A k_s \tau_{xz} dA \quad (III.88)$$

Où les k_s est le facteur de correction de cisaillement. La première variation du travail effectué par les forces externes est donnée par :

$$\delta V = \int_0^L q (\delta w_b + \delta w_s) dx + \int_0^L L P_t \left(\frac{d\delta u_0}{dx} + \frac{d(w_s + w_b) d(\delta w_b + \delta w_s)}{dx} \right) dx \quad (III.89)$$

Là où Q est la charge transversale et le P_t distribués est la force thermique qui peut être exprimée comme suit :

$$P_t = - \frac{E\beta TA}{1-2\nu} \quad (III.90)$$

Dans quel β est le coefficient de dilatation thermique, le T le changement de température, A le air transversal, et le ν le coefficient de Poisson.

Selon tout le principe d'énergie potentielle minimum, la première variation de toute l'énergie potentielle doit être zéro. C'est-à-dire,

$$\delta \pi = \delta(U - V) \quad (III.91)$$

Dans quel π est toute l'énergie potentielle. Substitution d'Eqs. (III.87) et (III.85) dans l'équation (III.91), et après avoir effectué l'intégration par des pièces, nous atteignons :

$$\frac{dN}{dx} = 0 \quad (III.92.a)$$

$$\frac{d^2 M}{dx^2} - p_t \frac{d^2 (w_b + w_s)}{dx^2} + q = 0 \quad (III.92.b)$$

$$\frac{dQ}{dx} - P_t \frac{d^2 (w_b + w_s)}{dx^2} + q = 0 \quad (III.92.c)$$

Afin de renforcer généralement la force des composés, CNTs sont généralement enfoncés dans un milieu élastique, et le milieu élastique environnant exerce un effet fort sur comportements mécaniques de CNTs tels que la stabilité et le comportement dynamique. Pour analyser les caractéristiques de boucle thermiques de CNTs a entouré avec un milieu élastique, modèle élastique de type Winkler de base est utilisée pour simuler l'interaction de CNTs avec le milieu élastique environnant. C'est-à-dire, le modèle de type Winkler de base peut être énoncé comme suit :

$$q = -k_w (w_b + w_s) \quad (III.93)$$

Dans k_w es Le module d'élasticité du ressort ou le paramètre de Winkler À l'aide d'Eq. (III.77), (III.78), (III.85.a), (III.85.b), et (III.88), la force-tension et les relations de moment-tension de la théorie de premier ordre non-local actuelle de déformation de cisaillement peut être obtenu comme suit :

$$N - (e_0)^2 \frac{d^2 N}{dx^2} = EA \frac{du_0}{dx} \quad (III.94)$$

$$M - (e_0)^2 \frac{d^2 M}{dx^2} = EI \frac{d^2 w_b}{dx^2} \quad (III.95.a)$$

$$Q - (e_0)^2 \frac{d^2 Q}{dx^2} = k_s GA \frac{dw_s}{dx} \quad (III.95.b)$$

Où :

$$(A, I) = \int_A (1, z^2) dA \quad (III.95.c)$$

Et en utilisant Eqs. (III.92.a), (III.92.b), (III.92.c), (III.93), (III.95.a), (III.95.b), et (III.95.c), l'équation de gouvernement pour la boucle du faisceau déformable de cisaillement de premier ordre nonlocal peut être obtenue en tant que ci-dessous :

$$-EI \frac{d^4 w_b}{dx^4} = \left(1 - (e_0)^2 \frac{d^2}{dx^2}\right) \left(P_t \frac{d^2 (w_b + w_s)}{dx^2} + k_w (w_b + w_s)\right) \quad (III.96)$$

$$k_s GA \frac{d^2 w_s}{dx^2} = \left(1 - (e_0)^2 \frac{d^2}{dx^2}\right) \left(P_t \frac{d^2 (w_b + w_s)}{dx^2} + k_w (w_b + w_s)\right) \quad (III.97)$$

Dans ce travail, des solutions analytiques sont données pour les nanotubes mono paroi de type amchair. Le champ suivant de déplacement satisfait des conditions de limite et des équations de gouvernement.

$$\begin{Bmatrix} w_b \\ w_s \end{Bmatrix} = \sum_{n=1}^{\infty} \begin{Bmatrix} w_{bn} \sin(\alpha x) \\ w_{sn} \sin(\alpha x) \end{Bmatrix} \quad (III.98)$$

Là où w_{bn} et w_{sn} sont des paramètres arbitraires à être $\alpha = k\pi/L$ déterminés et k par nombre entier positif qui est lié aux modes de flambement. Substituant les expansions du w_{bn} et du w_{sn} de l'équation (III.97) dans l'équation (III.98), les solutions de forme close peuvent être obtenues à partir des équations suivantes :

$$\left(\begin{bmatrix} S_{11} & 0 \\ 0 & S_{22} \end{bmatrix} - \lambda(k_w + P_t \alpha^2) \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} w_{bn} \\ w_{sn} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (III.99)$$

Où

$$s_{11} = EI\alpha^4, s_{22} = A_s\alpha^2, \lambda = 1 + \mu\alpha^2 \quad (\text{III.100})$$

Puis, la température critique avec la nouvelle théorie de premier ordre non-local de déformation de cisaillement peut être obtenue comme :

$$T_{cr} = \frac{(1-2\nu)s_{11}s_{22}}{EA\beta\lambda\alpha^2(s_{11}+s_{22})} - k_w \frac{(1-2\nu)}{EA\beta\alpha^2} \quad (\text{III.101})$$

Dans l'intérêt de la simplicité, la variable sans dimensions suivante est présentée pour le paramètre de base de Winkler :

$$K_w = \frac{L^4}{EI} k_w \quad (\text{III.102})$$

III.9 Conclusion :

Dans ce travail, les caractéristiques thermiques du nanotube de carbone mono paroi (SWCNT) de type amchair introduit dans un milieu élastique à un paramètre sont analysées en utilisant la théorie non locale de déformation de premier ordre (NNFSDT). Le modèle présent prend en considération l'effet d'échelle aussi bien que les effets de déformation transverse des nanotubes. L'équivalent du module d'Young ainsi que le module de déformation SWCNT est obtenu en employant le modèle équivalent d'énergie. Une solution de la température critique dimensionnelle est obtenue dans cette investigation. Les résultats illustrés dans ce travail peuvent fournir des informations précieuses et significatives pour l'analyse et la conception de la nouvelle génération des nanotubes ainsi que les caractéristiques thermiques des nanotubes mono paroi « SWCNT » de type amchair.

chapitre IV
résultats et discussions

IV.1 Introduction

Le but de ce travail est d'analyser la température critique de flambement thermique des nanotubes de carbone par le modèle de NNFSDT basé sur les relations obtenues dans le chapitre précédent, à cet effet nous avons choisi un nanotube de carbone à mono-paroi pour étudier le comportement de la température critique vis-à-vis du rapport L/d , le paramètre non-local $e_0 a$ et le nombre de mode m , le nombre de chiralité et mettre en évidence l'effet du paramètre de Winkler sur la température critique de flambement.

IV.2. l'effet de chiralité sur les propriétés mécaniques de (SWCNT):

À partir des relations obtenues dans le chapitre précédent pour le module de Young et le module de cisaillement, on peut constater que l'épaisseur t_h de tube est une quantité importante pour déterminer les propriétés mécaniques des nanotubes de carbone mono paroi. Cependant, il n'y a aucun accord au sujet des valeurs exactes de t_h . Quelques études supposent que t_h est égal à l'espacement de couche intercalaire de graphite (0.34 nm) [Krishnan 1998]. [Yu 2000(2)]. [Hernandez 1998]. [Yao 1998], le module de Young équivalent a été alors calculé basé sur cette valeur. En revanche, quelques différentes valeurs de l'épaisseur de tube, telles que 0.06 nm [Yakobson 1996], 0.65 nm [Odegard 2002] et 0.0617 nm [Vodenitcharova 2003], ont été suggérées aussi.

Les paramètres utilisés dans ce travail sont les constantes de force telles que [W.D. Cornell 1995] : $K/2 = 46900$ kcal/mol/nm, $C/2 = 63$ kcal/mol/rad, et la valeur expérimentale du module de Young du graphite, qui est égal à 1.06 TPa [Thostenson 2001], l'épaisseur de tube, $t_h = 0.258$ nm peut être calculée [Wu 2006].

En utilisant cette valeur de t_h , le module de cisaillement de graphite prédit dans la présente étude est de 0.418 TPa qui montre une bonne concordance avec l'expérimental (0.44 } 0.3 TPa) [Wu 2006], [Blaklee 1970], et le rapport de Poisson de graphite prédit est 0.273 qui est raisonnable aussi, ainsi $t_h = 0.258$ nm est employée comme épaisseur de tube dans l'analyse suivante.

Le paramètre de chiralité n qui définit la structure du nanotube de carbone de type armchair et fortement lié au diamètre conformément à l'équation **vecteur de chiralité** du (Chapitre. I), c.à.d. l'augmentation du paramètre de chiralité n augmente le diamètre d .

La Figure IV.1 montre la variation du module de Young par rapport au paramètre de chiralité n . Il peut être remarqué que le module de Young pour les nanotubes de carbone de type armchair augmentent avec n croissant. La même tendance de variation est présentée dans la Figure IV.2 pour le module de cisaillement.

Depuis les Figures IV.1 et IV.2, on peut clairement observer que pour des valeurs de n plus petites, par exemple, n moins de 12, le module de Young, le module de cisaillement et le rapport de Poisson montre une dépendance forte à l'égard de ce paramètre. Par contre pour n plus grand, la dépendance devient très faible.

La raison de ce phénomène est qu'un nanotube de carbone avec plus petit diamètre a une plus grande courbure, qui a comme conséquence une déformation significative des liaisons de C-C.

Quand le diamètre du nanotube augmente, l'effet de la courbure diminue graduellement, et toutes les valeurs des modules de Young, modules de cisaillement et rapports de Poisson approchent aux valeurs de la feuille de graphite comme prédit par le model de Y. Wu et al. [Wu 2006] aussi bien que ceux rapportés dans les littératures [Xiao 2005], [Li 2003].

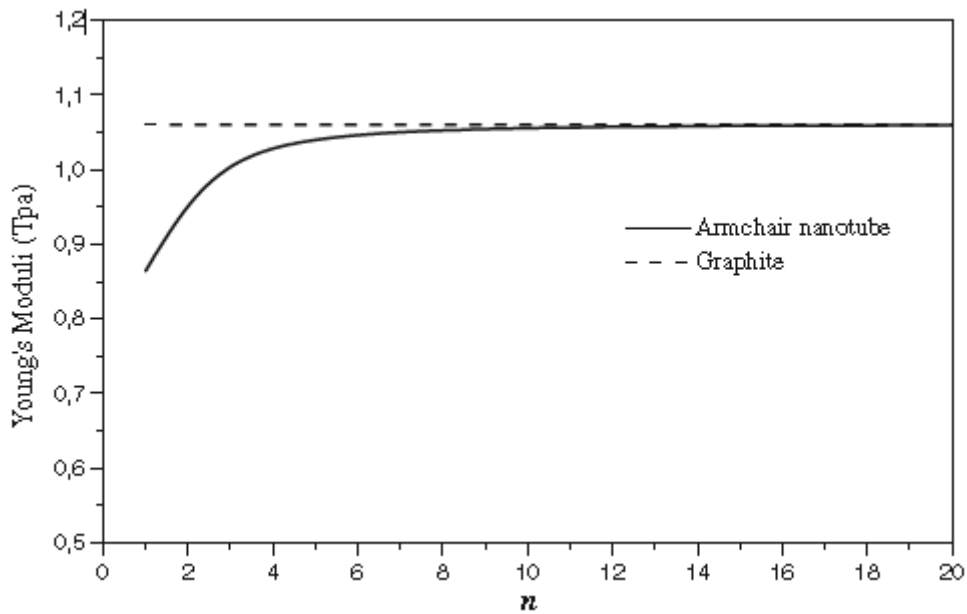


Fig. IV.1 - La variation du module de Young

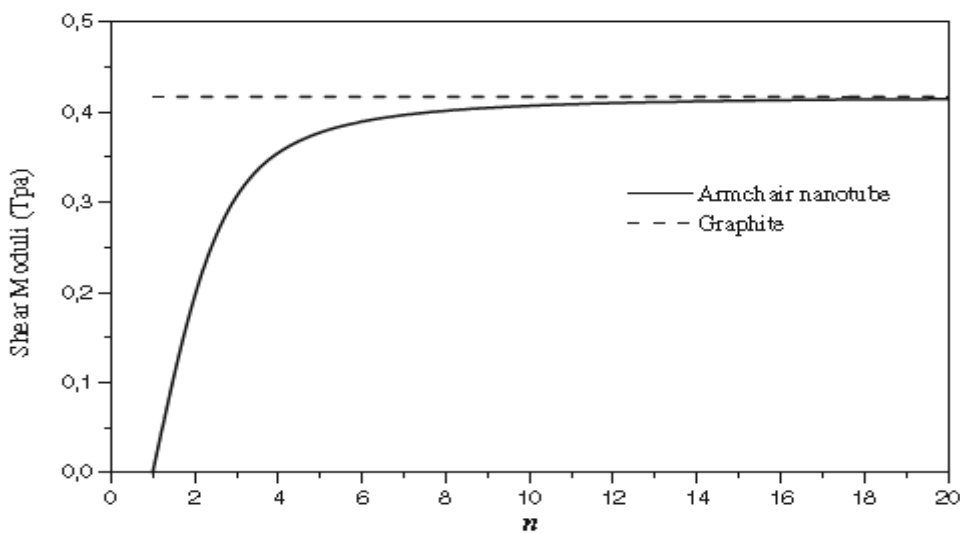


Fig. IV.2 - La variation du module de Cisaillement.

IV.2.1 L'effet de la température sur le module de Young d'un nanotube de carbone monocouche (SWNT):

$$E_N = E_N^0(1 - 0.0005\theta) \quad (IV.1)$$

Où (E_N^0 , θ) sont le module Young du nanotube de carbone monocouche sous la référence température et le changement de la température.

IV.2.2 Le module de Young d'un nanotube de carbone multicouche (MWNT):

Zhan et al [Zhan 2002] ont étudié la relation entre le module de Young de (MWNT) et le nombre de couche (N) d'un nanotube multicouche (MWNT's) par cette relation:

$$E_{MWNT} = \frac{\bar{N}}{\bar{N}+1+t/h} \frac{t}{h} E_{SWNT} \quad (IV.2)$$

IV.3 Validité et applicabilité du modèle du milieu continue pour les CNTs :

L'applicabilité du modèle de poutre sur les nanotubes de carbone (NTC) est examiné par plusieurs auteurs (par exemple [Wang 2005], [Harik 2001], [V.M. Harik2002]). Harik et al. On rapporte des rangs d'applicabilité du modèle de poutre dans la mécanique des nanotubes de carbone et nano tiges.

Wang [Wang 2006] et Hu [Hu 2004] présentent une étude rigoureuse, dans laquelle ils vérifient la validité du modèle de poutre pour l'étude des ondes de flexion, simulées par la dynamique moléculaire (MD), pour un nanotube de carbone mono paroi (SWCNT). Dans cette étude, Wang et Hu ont observés que, lorsque le nombre d'onde devient très grand, la microstructure des nanotubes de carbone joue un rôle important dans la dispersion des ondes de flexion et diminue de manière significative la vitesse de phase des ondes de flexion de haute fréquence.

Dans la présente étude, les résultats numériques pour les contraintes critiques de flambement obtenues à partir de cette théorie de mécanique des milieux continus (à l'aide du modèle de poutre de Timoshenko non-local) sont comparés à ceux obtenus à partir des simulations par la dynamique moléculaire et la théorie des coques de Sanders [Silvestre 2011]. Etant donné que les simulations par la DM mentionnées dans ce paragraphe considèrent les nanotubes de carbone avec des extrémités fixes, nous considérons aussi le modèle de poutre de Timoshenko non-local avec des conditions aux limites pour extrémités encastrées [Wang C.M. 2006].

En outre, un CNT (5,5) est analysé avec un diamètre $d = 6.71A^0$ et un CNT (7,7) avec un diamètre $d = 9.40A^0$, pour des longueurs différentes. Les nanotubes sont modélisés en utilisant une épaisseur $t_h = 0.66A^0$, un module de Young $E = 5.5 \text{ TPa}$ et le coefficient de Poisson $\nu = 0.19$ [Yakobson 1996].

Les longueurs des nanotubes de carbone utilisés dans le tableau ci-dessous sont extraites du travail effectué par Silvestre et al. [Silvestre 2011]. Les résultats de simulations de la dynamique moléculaire, le modèle de NNFSDT et le modèle des coques de Sanders sont comparés dans le tableau IV.2. On voit que les contraintes critiques de flambement sont en bon accord par rapport aux résultats obtenus à partir des simulations de la dynamique moléculaire ainsi que la théorie des coques de Sanders. Sur la base des résultats de simulation MD, la valeur de la constante non-locale est déterminée pour NTC basé sur un processus de moyenne. La meilleure correspondance entre les simulations MD et les formulations non-locales est obtenue pour une valeur constante non-locale $e_0a = 0.54nm$ pour CNT (5, 5) et $e_0a = 1.05nm$ pour CNT (7, 7) avec une bonne précision (l'erreur est inférieure à 10%) [Tounsi 2013].

Tableau IV.1 : Comparaison entre le flambement critique de contrainte d'un CNT (5,5) et un CNT (7,7) obtenu par MD (Dynamique Moléculaire), SST (la théorie des coques de Sanders) et NNFSDT (la théorie non-locale de déformation du premier ordre).

$L(A^{\circ})$	$d(A^{\circ})$	MD	NNFSDT	SST
16.09	6.71	0.08146	0.08216	0.08729
21.04	6.71	0.07528	0.07460	0.08288
28.46	6.71	0.06992	0.06302	0.07858
28.29	9.40	0.06514	0.06542	0.06582
40.59	9.40	0.04991	0.05763	0.05885
52.88	9.40	0.04710	0.04962	0.05600

IV.4 L'analyse de la température critique des CNTs en appliquant le modèle du milieu continu

IV.4.1 L'analyse de la température critique d'un SWCNT en appliquant le modèle non-locale de déformation de premier ordre (NNFSDT) et non local de Timoshenko

L'analyse du flambement thermique du modèle armchair SWNT incorporé dans le modèle élastique en utilisant la théorie du premier ordre. Cette théorie a été développée récemment par [Bouremana2013] et [Al1999] basée sur la supposition que le déplacement transversaux dans le plan médian consistent à trouver la flexion et le cisaillement transversal, dans lesquels la flexion ne contribuent pas avec les forces et les moments. Le modèle de Winkler est utilisé pour simuler.

Dans cette analyse l'influence du paramètre non local, le nombre de mode m , le rapport L/d longueur-diamètre, le module de Winkler et l'effet de chiralité sont présent en compte.

Dans la figure IV.3 nous illustrons une comparaison entre l'application du modèle de poutre non local de Timoshenko (TBT) [Heireche2008] et le modèle de NNFSDT. On peut observer que la température critique non dimensionnelle de flambement augmente avec l'augmentation du nombre de mode et le rapport longueur-diamètre. En outre, il est observé que les effets du rapport L/d sur la température critique de flambement de SWCNT de type

armchair devient significatifs quand le nombre de mode devient supérieure à 5 de plus la température critique de flambement pour les trois rapports devient plus grande avec l'augmentation de nombre de mode.

La figure IV.4 montre la variation de la température critique non dimensionnelle de flambement par rapport au nombre de mode pour différentes valeurs de nombre de chiralité. Cette analyse démontre que l'effet du nombre de chiralité sur la température critique non dimensionnelle de flambement est relativement faible pour des nombre petits de mode, cependant la différence devient évidente avec l'augmentation de nombre de mode.

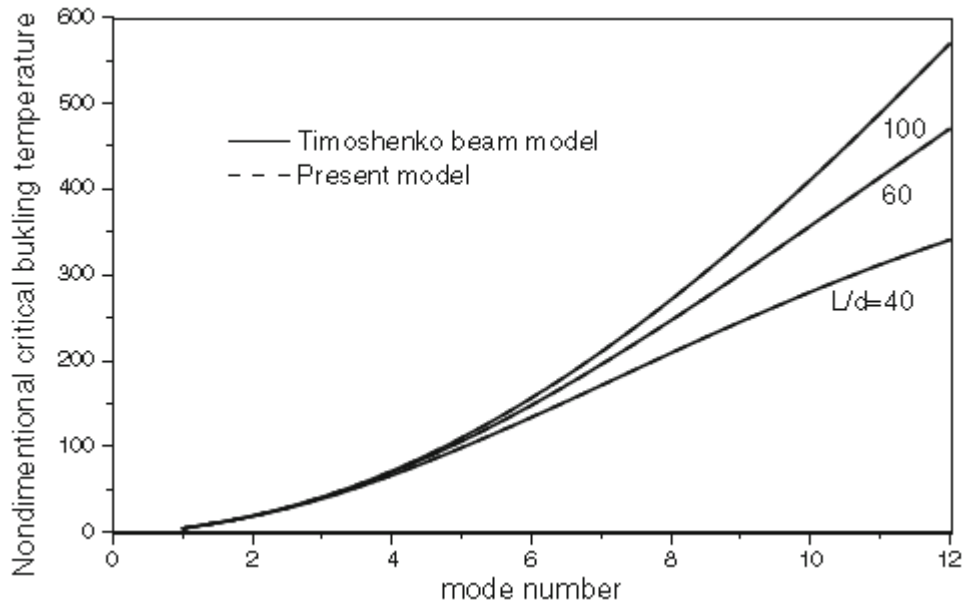


Figure IV.3 Comparaison de la température critique de flambement de SWCNT avec différentes valeurs de nombre de modes basé sur le modèle de NNFSDT et le modèle de poutre de Timoshenko ($e_0 = 1nm, K_w = 0, n = 15$).

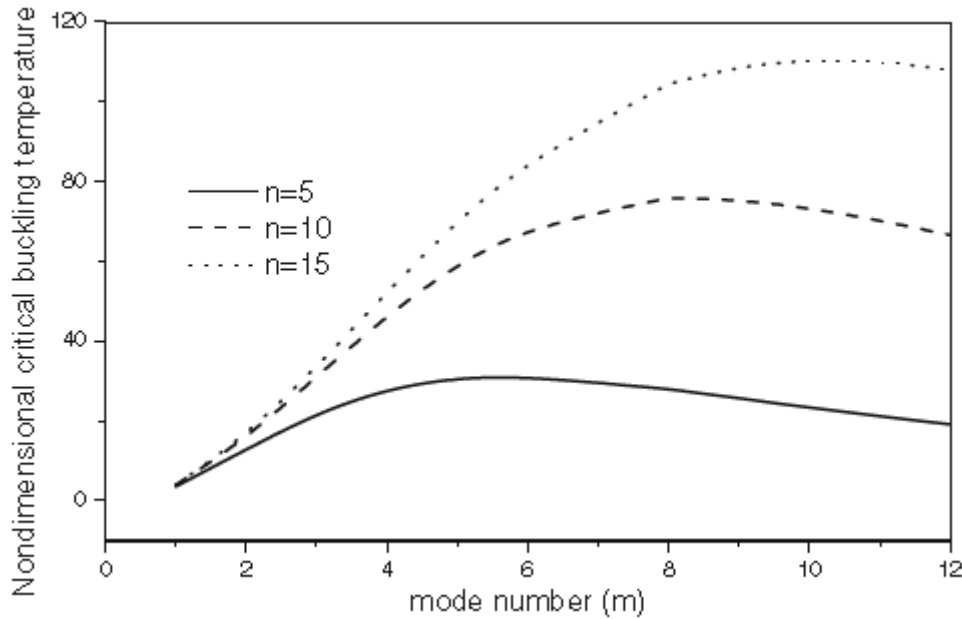


Figure IV.4 La température critique de flambement de DWCNT avec différentes valeurs de nombre de chiralité pour différents valeurs de nombre de modes basé sur le modèle de NNFSDT ($d=20, e_0a = 1\text{nm}, K_w = 10$).

IV.5 L'analyse de la température critique d'un SWCNT de type armchair en appliquant le modèle de winkler :

Dans cette analyse les paramètres utilisés dans les calculs pour les SWCNT de type zigzags sont donnés comme suit: la longueur du NTC $L = 10\text{ nm}$, l'épaisseur effective prise $a_{th} = 0,258\text{ nm}$ [Y. Wu 2006], les constantes de force $K/2 = 46\ 900\text{ kcal/mol/nm}$ et $C/2 = 63\text{ kcal/mol/RAD}$ [Cornell 1995], La densité de masse $\rho = 2,3\text{ g/cm}^3$ [Benzair 2008], [Heireche 2008], K_c est le coefficient de correction du module de cisaillement de nanotube de carbone, sa valeur est $K_c = 2(1 + \nu)/(4 + 3\nu)$, ν est le coefficient de Poisson [Cowper 1996]. Le coefficient de dilatation thermique $\beta = 1.1 \times 10^{-4}\text{K}^{-1}$.

Afin de montrer l'influence de la déformation de cisaillement transversal sur la température critique de flambement de SWCNT de type armchair la figure IV.5 présente l'effet du paramètre de chiralité n sur la température critique de flambement basé sur le modèle de Winkler est important surtout pour K_w est supérieure car lorsque K_w augmente la température critique de flambement diminue, cette tendance décroissante est attribuée à la rigidité de milieu élastique.

Avec le rapport $L/d = 20$ (longueur-diamètre), $n=15$ et $m=1$ la figure IV.6 indique l'effet du paramètre non-local à petite échelle sur la température critique de flambement pour les SWCNT de type armchair pour différentes valeurs de paramètre de Winkler, où lorsque le paramètre non local e_0a augmente la température critique de flambement diminue. Ainsi on peut conclure que le modèle élastique (i.e local) mais la théorie non locale continue donne des résultats précis et fiables. En outre une caractéristique intéressante qui peut être déduite où lorsque le paramètre de Winkler augmente la température critique de flambement diminue indépendamment du paramètre non local.

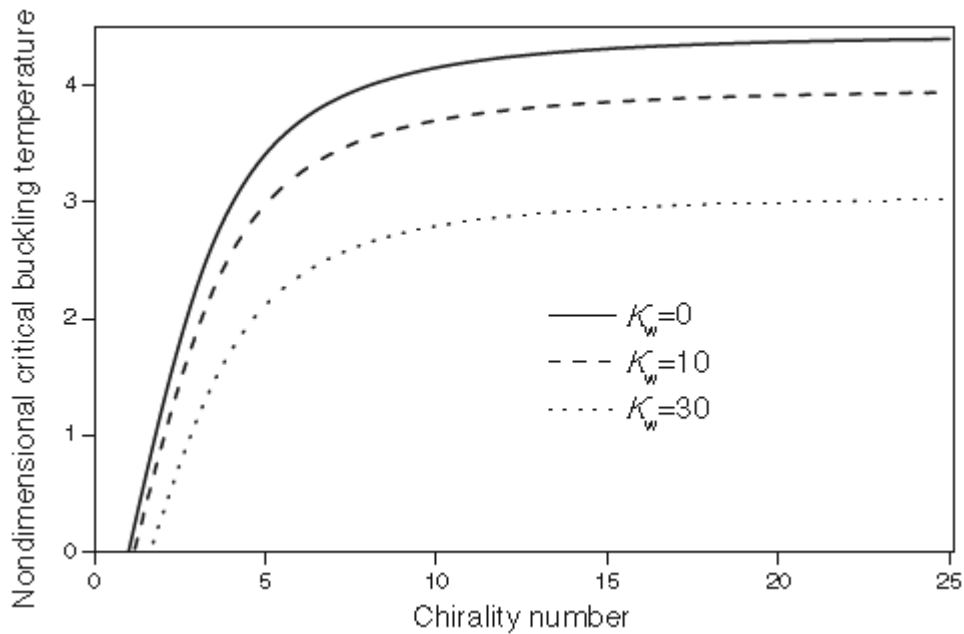


Figure V.5 variation de la température critique de flambement de SWCNT de type armchair avec différentes valeurs de K_w pour différentes valeurs de chiralité ($L/d=20$, $e_0a = 2nm$, $m = 1$)

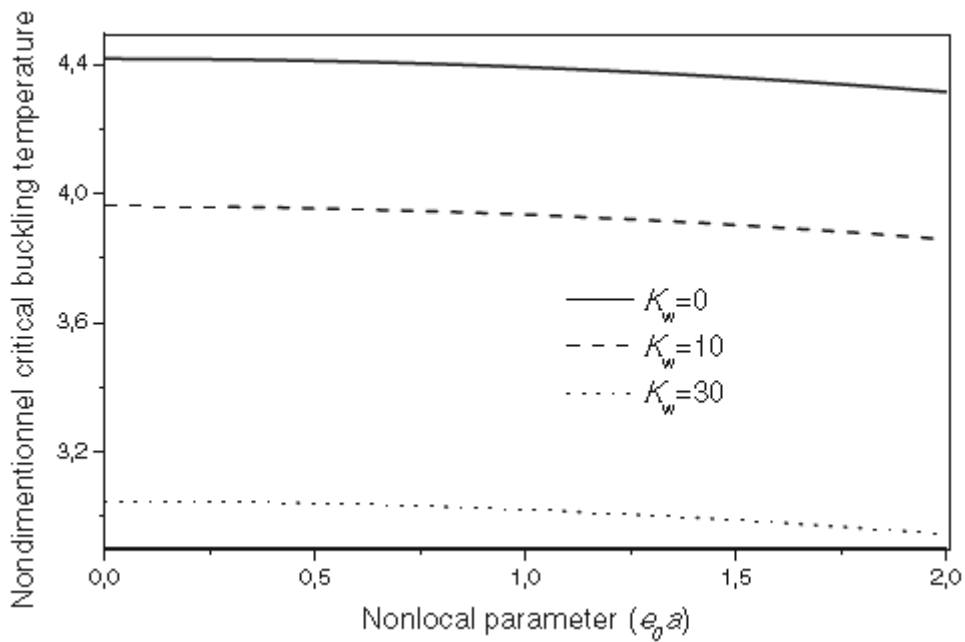


Figure IV.6 variation de la température critique de flambement de SWCNT de type armchair avec différentes valeurs de K_w pour différentes valeurs de paramètre non local e_0a ($L/d=20$, $n = 15$, $m = 1$)

IV.6 L'analyse de la température critique d'un SWCNT de type armchair en appliquant le modèle non local du premier ordre :

La figure VI.7 montre la variation de la température critique de flambement pour SWCNT de type armchair en fonction du rapport L/d (longueur-diamètre pour différentes valeurs du paramètre de Winkler), pour l'étude $K_w = 0$, $K_w = 10$ et $K_w = 30$.

Dans ce calcul on prend une valeur constante du paramètre non local $e_0 a = 2nm$ et paramètre de structure $n=15$ sont employés pour le modèle proposé c.à.d. le modèle NNFSDT, et on constate d'après la figure IV.7 que lorsque le rapport longueur-diamètre augmente la température critique de flambement augmente jusqu'à prendre une valeur constante pour des valeurs plus élevées de L/d , ainsi pour des SWCNT fines, l'effet de déformations de cisaillement est moins comparés à SWCNT courte.

Afin d'accentuer l'effet de la déformation transversale de cisaillement, le rapport de la température critique de flambement par la nouvelle théorie non local de déformation de cisaillement de premier ordre à la théorie non local des poutre de Euler-Bernoulli avec différentes valeurs de rapport longueur-diamètre est illustré dans la figure IV.8.

La figure IV.8 montre que pour différentes nombres de mode, tous les rapports de température critique de flambement sont plus petit que la valeur 1.0, il signifie cela en raison des influences de la déformation transversale de cisaillement, la température critique de flambement de la nouvelle théorie NNFSDT est inférieure à celui de la théorie non local de Euler-Bernoulli (E.B).

Ce phénomène est plus évident pour les nombre de mode plus élevé et de plus petits pour le rapport de la longueur- diamètre. Il implique que les influences de déformations transversales de cisaillement sont considérées et la théorie non locale de déformation de cisaillement de premier ordre est prononcée lorsque les nanotubes sont courts.

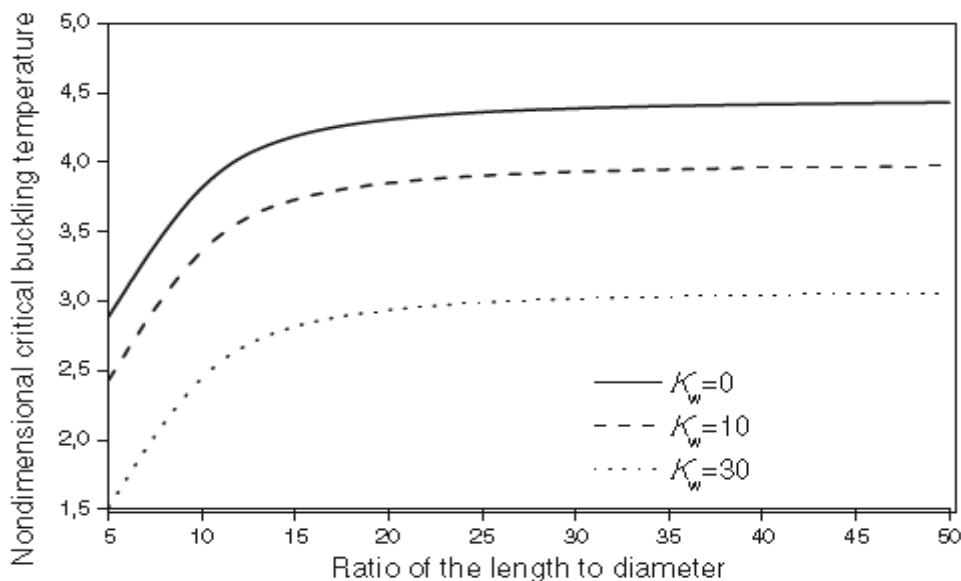


Figure IV.7 Relation entre la température critique de flambement de SWCNT de type armchair, Le rapport L/d et le nombre de paramètre de Winkler ($e_0 a = 2nm$, $n = 15$, $m = 1$)

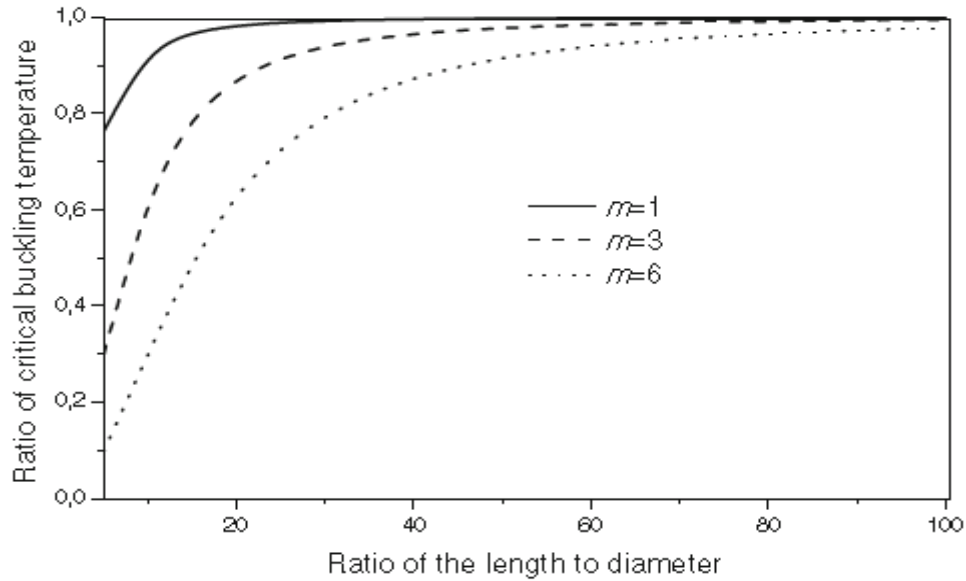


Figure IV.8 rapport de la température critique de flambement par le modèle de poutre de Timoshenko au modèle de E.B par rapport au rapport L/d avec différentes valeur de mode ($e_0a = 2nm, m = 8, K_w = 10$)

VI.7 Conclusion :

Dans ce travail, les caractéristiques thermiques du nanotube mono paroi SWCNT de type armchair introduit dans un milieu élastique sont employées on utilisant une nouvelle théorie non locale de déformation de cisaillement de premier ordre NNFSDT.

On a trouvé que pour des petites valeurs du paramètre de chiralité de module de Young et le module de cisaillement ont montré une forte dépendance à son égard, la raison de ce comportement est que les nanotubes de carbone à faible diamètre sont posés à de larges courbures qui provoquent une importante distorsion des liaisons C-C, contrairement avec carbone à grand diamètre qui sont plus résistant.

La formulation mathématique inclut l'effet du paramètre non local, le changement de température et la chiralité des nanotubes de carbone mono paroi de type armchair.

Les effets du coefficient d'échelle, le rapport longueur-diamètre, la déformation transversale de cisaillement, la rigidité du milieu élastique et la chiralité des propriétés de flambement thermique sont tous vérifiés (voir Figure VI.1, VI.2, VI.3, VI.4, VI.5, VI.6, VI.7, VI.8)

La formulation se prête particulièrement à la nanostructure incorporée dans un milieu élastique de Pasternak [boudarba2013],[zidi2014] et/ou étudié avec la théorie avancée de déformation de cisaillement [mahi2015], qui sera considérées dans un avenir proche.

conclusion générale

Conclusion générale

Nous avons partagé ce manuscrit en deux parties, la première partie rassemble le chapitre I et le chapitre II, elle fait le point sur la bibliographie, nous avons étudié la structure des nanotubes de carbone mono-paroi, nous avons donné quelques éléments théoriques sur les propriétés des nanotubes de carbone.

Nous avons aussi détaillé quelques exemples de méthodes de synthèse des nanotubes de carbone en nous attachant à faire ressortir les avantages et les inconvénients de chacune d'entre elles. Ceci nous a permis de donner les principaux résultats concernant leur structure électronique. Enfin nous avons vu que les nanotubes de carbone joueront un rôle fondamentale dans le développement de la technologie durant les prochaines décennies.

Les recherches sur l'application des nanowire commencent à prendre forme et permettent de montrer que les nanowire les nanowires possèdent propriétés physiques et chimiques qui sont uniques et qui sont les candidats potentiels pour différent nano-échelle électrique, thermoélectrique, optique, magnétique.

La deuxième partie rassemble le chapitre III et le chapitre IV, elle est consacrée aux calculs mathématique et simulations où nous incluant l'effet du paramètre non local, le changement de température et la chiralité des nanotubes de carbone mono paroi de type armchair.

On a trouvé que pour des petites valeurs du paramètre de chiralité de module de Young et le module de cisaillement on montré une forte dépendance à son ègard, la raison de ce comportement est que les nanotubes de carbone à faible diamètre sont posés à de larges courbures qui provoquent une importante distorsion des liaisons C-C, contrairement avec carbone à grand diamètre qui sont plus résistant

Enfin, cette étude peut servir comme une base de données pour les futurs chercheurs dans le but de développer et d'approfondir les connaissances.

Bibliographie

Bibliographie

-A-

[Ago 1999] H. Ago, T. Kugler, C. Cacialli, W.R. Salaneck, M.S.P. Shaffer, A.H. Windle, R.H. Criend, *J.Phys. Chem. B*, 103 8116 (1999).

[Ajayan 1993 (1)] P. M. Ajayan, S. Iijima., Capillarity-induced filling of carbon nanotubes, *Nature* 333-361 (1993).

[Ajayan 1993 (2)] P.M. Ajayan, T.W. Ebbesen, T. Ichihashi, S. Iijima, K. Tanigaki, H. Hiura, *Nature*, 362 522 (1993).

[Ajayan 1999] P. M. Ajayan, Nanotubes from carbon, *Chem. Rev*, 99, 1787-1799 (1999).

[Ajayan 2000] P. M. Ajayan, L. S. Schadler, C. Giannaris, A. Rubio, Single-walled carbon nanotubepolymer composites: Strength and weakness. *Adv. Mater.* 2000, 12 (10), 750-753.

[Ajayan 2007] P. M. Ajayan, J. M. Tour, Materials science - Nanotube composites. *Nature* 2007, 447 (7148), 1066-1068.

[Al-Hosani 1999] K. Al-Hosani, S. Fadhil, A. El-Zafrany, Fundamental solution and boundary element analysis of thick plates on Winkler foundation. *Computers and Structures* 70 (1999), 325-336.

[Andrews 2002] R. Andrews, D. Jacques, D. Qian, T. Rantell, *Accounts of Chemical Research*, 2002, 35, 1008-1017.

[Arani 2011] A. G. Arani, M. Mohammadimehr, A. R. Saidi, S. Shogaei and A. Arefmanesh, Thermal buckling analysis of double-walled carbon nanotubes considering the small-scale length effect, *Mechanical Engineering Science* (2011) 225: 248-256

[Aubry 2009] C. Aubry, Développement et mise en oeuvre de structures textiles multifonctionnelles contenant des nanotubes de carbone – Application aux capteurs chimiques pour la détection de solvants, L'Université des sciences et technologiques de Lille, 2009.

[Avsec 2007] J. Avsec, M. Oblak, *J. Sound Vib.* 308 (2007) 514.

[Amara 2010] K. Amara, A. Tounsi, E.A. Adda-Bedia, *Applied Mathematical Modeling* 34(12), 3933 (2010)

-B-

[Bacon 1960] R. Bacon, *Appl. Phys.*, 31 :283 (1960).

[Bandow 1997] S. Bandow, A. M. Rao, K. A. Williams, A. Thess, R. E. Smalley, P. C. Eklund, Purification of single-wall carbon nanotubes by microfiltration, *J. Phys. Chem. B*, (1997), 101, 8839 8842.

[Benzair 2008] A. Benzair, A. Tounsi, A. Besseghier, H. Heireche, N. Moulay, L. Boumia, The thermal effect on vibration of single-walled carbon nanotubes using nonlocal Timoshenko beam theory, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 41 (2008) 225404 (10pp)

- [Berber 2000] S. Berber, Y.-K. Kwon, D. Tománek, Unusually high thermal conductivity of carbon nanotubes, *Phys. Rev. Lett.*, (2000), 84, 4613-4616.
- [Berger 2004] C. Berger, Z. Song, T. Li, X. Li, A. Y. Ogbazghi, R. Feng, Z. Dai, A. N. Marchenkov, E. H. Conrad, P. N. First, W. A. de Heer, *J. Phys. Chem. B*, 108 19912 (2004).
- [Bernard 2007] C. Bernard, Propriétés mécaniques des nanotubes de carbone en tant que nanosondes et leur fonctionnalisation par bio-nanoparticules, thèse de doctorat, l'Université Bordeaux I, (2007).
- [Besseghier 2011] A. Besseghier, AbdelouahedTounsi, MohammedSidAhmedHouari, Abdelnour Benzair, LakhdarBoumia, HouariHeireche; Thermal effect on wave propagation in double-walled carbon nanotubes embedded in a polymer matrix using nonlocal elasticity; *Physica E* 43 (2011) 1379–1386
- [Bethune 1993] D. S. Bethune, C. H. Kiang, M. S. de Vries, G. Gorman, R. Savoy, J. Vazquez, R. Beyers, Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer wall, *Nature*, 363, 605 (1993).
- [Bonard 1997] J.M. Bonard, T. Stora, J.P. Salvetat, C. Maier, T. Stöckli, C. Duschl, L. Corro, W.A. Heer, Châtelain, *Advanced Materials*, 9 827 (1997).
- [Bonnot 1993] A.M.Bonnot, B.Mathis, S.Moulin, *Applied Physics Letters*, 63 :1754, (1993).
- [Bozlar 2009] M. Bozlar, Modification de surface des nanotubes de carbone par un polymère conducteur électrogénéré pour la réalisation de nanocomposites multifonctionnels, École Normale Supérieure de Cachan - Paris, 2009.
- [Buchoux 2011] J. Buchoux; nanotubes de carbone comme sondes en microscopie à force atomique, thèse de doctorat, l'Université Bordeaux I, (2011).
- [Bounia 2014] L. Boumia, M. Zidour, A. Benzair, A. Tounsi, *Phys. E*. 59, 186–191(2014)
- [Bouremana2013] M. Bouremana, M.S.A. Houari, A. Tounsi, A. Kaci, E.A. Adda Bedia, *Steel Compos. Struct.* 15(5), 467 (2013)
- [Bouderba2013] B. Bouderba, M.S.A. Houari, A. Tounsi, *Steel Compos Struc* 14(1), 85–104 (2013)
- [berrabah 2013] J.H.M. Berrabah, A. Tounsi, A. Semmah, E.A. Adda Bedia, *Struct. Eng. Mech.* 48(3), 351 (2013)
- [Bryllert2006]Bryllert T., Wernersson, L. E., Froberg, L. E., Samuelson, L. Vertical High-Mobility Wrap- Gated InAs Nanowire Transistor [Revue] *IEEE Elect Dev Lett.* - 2006. - Vol. 27. - pp. 323-325.
- [Boukai2008]Boukai A.I., Bunimovich, Y., Tahir-Kheli, J., Yu, J.-K., Goddard, W.A., Heath, J.R. Silicon nanowires as efficient thermoelectric materials [Revue] *Nature.* - 2008. - Vol. 451. - pp. 168- 171.
- C-
- [Cai 2008] D. Y.Cai, M.Song, Latex technology as a simple route to improve the thermal conductivity of a carbon nanotube/polymer composite. *Carbon* 2008, 46 (15), 2107-2112.

[Canestraro 2006] C.D. Canestraro, M.C. Schnitzler, A.J.G. Zarbin, M.G.E. daLuz, L.S. Roman, *Applied Surface Science*, 2006, 252, 5575-5578.

[Cantoro 2006] M. Cantoro, S. Hofmann, S. Pisana, V. Scardaci, A. Parvez, C. Ducati, A.C Ferrari, A. M. Blackburn, K.-Y. Wang, J. Robertson, Catalytic chemical vapor deposition of SWNT at Low Temperatures, *Nano Letters*, 6 (2006) 1107.

[Cassell 1999] A.M. Cassell, J.A. Raymakers, J. Kong, H. Dai, Large Scale CVD Synthesis of Single-Walled Carbon Nanotubes, *Journal of Physical Chemistry B*, 103 (1999) 6484.

[Castignolles 2004] M. Castignolles, Etudes de la synthèse et de la structure par microscopie et spectroscopie électroniques de nanotubes de carbone purs et dopés à l'azote, Thèse de doctorat, Université Montpellier II, (2004).

[Charlier 1993] J. C. Charlier, J. P. Michenaud, Energetics of multilayered carbon tubules, *Phys. Rev. Lett.* 70, 1858-1861 (1993).

[Charlier 2003] J. C. Charlier, Propriétés électroniques des nanotubes de carbone, Cours Ecole Nanotube Aussois, (Mai 2003).

[Chiang 2001] I.W. Chiang, B.E. Brinson, R.E. Smalley, J.L. Margrave, R.H. Hauge, *J. Phys. Chem. B*, 105 1157 (2001).

[Civalek 2007] O. Civalek, Nonlinear analysis of thin rectangular plates on Winkler-Pasternak elastic foundations by DSC-HDQ methods. *Applied Mathematical Modeling* 31 (2007), 606-624.

[Col 2006] J. N. Coleman, U. Khan, W. J. Blau, Y. K. Gun'ko, *Carbon*, vol.44, pp.1624-1652, 2006.

[Collins 2001] P. C. Collins, M. S. Arnold, P. Avouris, Engineering Carbon Nanotubes and Nanotube Circuits Using Electrical Breakdown, *Science*, 292, 706 (2001).

[Com 2005a] P. Combette, I. Ernoult, *Physique des polymères I*, Edition Hermann(2005)

[Cornwell 1998] CF. Cornwell, LT. Wille. Simulations of the elastic response of singlewalled carbon nanotubes. *Comput Mater Sci* 1998(10):42-5.

[Cui 2000] Cui Y, Duan X, Hu J, Lieber CM (2000) Doping and electrical transport in silicon nanowires. *J Phys Chem B* 4(22):5213-5216

-D-

[Dai 1996 (1)] H. Dai, A.G. Rinzler, P. Nikolaev, A. Thess, D.T. Colbert, R.E. Smalley, Single -wall nanotubes produced by metal-catalyzed disproportionation of carbon monoxide, *Chemical Physics Letters*, 260 (1996) 471-475.

[Dai 1996 (2)] H. Dai, J.H. Hafner, A.G. Rinzler, D.T. Colbert, R.E. Smalley, Nanotubes as nanoprobes in scanning probe microscopy, *Nature*, 384 (1996) 147.

[Dalton 2003] A.B. Dalton, S. Collins, E. Muñoz, J.M. Razal, V.H. Ebron, J.P. Ferraris, J.N. Coleman, B.G. Kim, R.H. Baughman, Super-tough carbon-nanotube fibres, *Nature*, 423 (2003) 703.

[Den Hartog 1960] J.P. Den Hartog. *Vibrations mécaniques*. Dunod, 1960.

[Dillon 1997] A.C. Dillon, K.M. Jones, T.A. Bekkedahl, C.H. Kiang, D.S. Bethune, M.J. Heben, *Nature* 386 377 (1997).

[Doyle 1997] J.F. Doyle, *Wave Propagation in Structures*, 2nd ed. (Springer, New York, 1997).

[Ducastelle 2003] F. Ducastelle, *Propriétés électroniques, Cours Ecole Nanotube Aussois* (Mai 2003).

[Duesberg 1998] G. S. Duesberg, J. Muster, V. Krstic, M Burghard, S. Roth, *Chromatographic size separation of single-wall carbon nanotubes*, *Applied Physics A : Materials Science & Processing*, (1998), A, 67, 117-119.

[Duesberg 1999] G. S. Duesberg, W. Blau, H. J. Byrne, J. Muster, M. Burghard, S. Roth, *Chromatography of carbon nanotubes*, *Synth. Met.*, (1999), 103, 2484-2485.

[Dujardin 1998] E. Dujardin, T.W. Ebbesen, A. Krishnan, M.M.J. Treacy, *Adv. Mater.*, 10 611 (1998).

[Dunlap 1992] B. I. Dunlap. *Physical Review B*, 46: 1933 (1992).

[Dresselhaus2007] Dresselhaus M. S., Chen, G., Tang, M. Y., Yang, R. G., Lee, H., Wang, D. Z., Ren, Z. F., Fleurial, J.-P., Gogna, P. *New Directions for Low-Dimensional Thermoelectric Materials [Revue] Advanced Materials*. - 2007. - Vol. 19. - pp. 1043-1053.

[Datta1990] Datta S., Das, B. [Revue] *Appl. Phys. Lett.* - 1990. - Vol. 56. - p. 665.

-E-

[Ebbesen 1992] T.W. Ebbesen, P.M. Ajayan, *Large scale synthesis of carbon nanotubes*, *Nature* 358, pp. 220-222, (1992).

[Eisenberger 1987] M. Eisenberger, J. Clastornik, *Vibrations and buckling of a beam on a variable Winkler elastic foundation*. *Journal of Sound and Vibration* 115 (1987), 233-241.

[Eisenberger 1994] M. Eisenberger, *Vibration frequencies for beams on variable one- and two-paramter elastic foundations*. *Journal of Sound and Vibrations* 176(5) (1994), 577-584.

[Emmenegger 2003] C. Emmenegger, J.-M. Bonard, P. Mauron, P. Sudan, A. Lepora, B. Grobety, A. Züttel, L. Schlapbach, *Synthesis of carbon nanotubes over Fe catalyst on aluminium and suggested growth mechanism*, *Carbon* 41 (2003) 539.

[Endo 1995] M. Endo et al. *Carbon*, 33 :873, (1995).

[Enouz 2003] S. Enouz, *étude de nanotubes de carbone dopés à l'azote par Microscopie Electronique en Transmission Haute Résolution et Spectroscopie de Pertes d'Energie*, Stage de DEA Matière et Rayonnement, Université de Rennes1, (2003).

[Eringen 1972] Eringen A C 1972 *Int. J. Eng. Sci.* 10 1

[Eringen 1983] Eringen A C, *J Appl Phys*, 54 (1983) 4703

-F-

[Fan 1999] S. Fan, M.G. Chapline, N.R. Franklin, T.W. Tomblor, A.M. Cassell, H. Dai, *Self-oriented regular arrays of carbon nanotubes and their field emission properties*, *Science* 283 (1999) 512.

[Fertis 1995] D.G. Fertis. Mechanical and structural vibrations. Wiley interscience, 1995.

[Flahaut 2003] E. Flahaut, R. Bacsa, A. Peigney, C. Laurent, Gram-scale CCVD synthesis of doublewalled carbon nanotubes, Chemical Communications, (2003) 1442.

-G-

[Gao 2001] Y. Gao, X. Shi, Y. Zhao. Mechanical behaviour of carbon nanotubes. J. Mech Strength 2001;23(4):402–12.

[Gao 2005] J.Gao, M. E.Itkis, A.Yu, E.Bekyarova, B.Zhao, R. C.Haddon, Continuous Spinning of a Single-Walled Carbon Nanotube à Nylon Composite Fiber. Journal of the American Chemical Society 2005, 127 (11), 3847-3854.

[Gazetas 1998] G. Gazetas, G. Mylonakis, Seismic soil–structure interaction: new evidence and emerging Issues. Geotechnical Special Publication 75 (1998), 1119–1174.

[Geradin 1993] D. Geradin, M. Rixen. Th2orie des vibrations - Application `a la dynamique des structures. Masson, 1993.

[Gohier 2007] A. Gohier, Cinétique de Croissance de Nanotube de Carbone Mono-Parois et Multi-Parois Orientes par Procède Plasma, Thèse de Doctorat, l'Université de Nantes (Sciences des Matériaux), 2007.

[Goj 2004] F. H. Gojny, M. H. G. Wichmann, U. Köpke, B. Fiedler and K. Schulte, Composites Science and Technology, vol. 64, Issue 15, pp.2363-2371, 2004.

[Grobert 1999] N. Grobert, W.K. Hsu, Y.Q. Zhu, J.P. Hare, H.W. Kroto, D.R.M. Walton, M. Terrones, H. Terrones, Ph. Redlich, M. Rühle, R. Escudero, F. Morales, Enhanced magnetic coercivities in Fe nanowires, Applied Physics Letters,,75 (1999) 3363.

[Gse 1988] C. G'Sell, Instabilités de déformation pendant l'étrirage des polymères solides, Revue de Physique Appliquée, 23, 1085-1101(1988)

[Gu 2008] H. Gu and T. M. Swager, Adv. Mater, vol. 20, pp. 4433–4437, 2008.

[Guo 2004] L. Guo, J. Liang, S. Dong, Z. Xu, Q. Zhao, Property of carbon nanotube tip for surface topography characterization, Applied Surface Science, 228 (2004) 53.

[Grange2009] Grange, R .; Choi, JW; Hsieh, CL; Pu, Y .; Magrez, A .; Smajda, R .; Forro, L .; . Psaltis, D. (2009) «*nanofils de niobate de lithium: synthèse, propriétés optiques et la manipulation*» Applied Physics Letters **95** (14):. 143105

-H-

[Hafner 1999] J.H. Hafner, C.L. Cheung, C.M. Lieber, Direct Growth of Single-Walled Carbon Nanotube Scanning Probe Microscopy Tip, Journal of the American Chemical Society, 121 (1999) 9750.

[Hamada 1992] N. Hamada, S. Sawada, A. Oshiyama, New one-dimensional conductors – graphitic microtubules, Phys. Rev. Lett., 68, 1579 (1992).

- [Hamwi 1997] A. Hamwi, H. Alvergnat, S. Bonnamy, C. Béguin, *Carbon*, 35 723 (1997).
- [Hassen 2010] AIT ATMANE Hassen, *Vibration des structures composites en tenant compte de l'effet du cisaillement*, Université Djillali Liabes de Sidi bel Abbes, 2011.
- [Hata 2004] K. Hata, D.N. Futaba, K. Mizuno, T. Namai, M. Yumura, S. Iijima, *Water-Assisted Highly Efficient Synthesis of Impurity-Free Single-Walled Carbon Nanotubes*, *Science* 306 (2004) 1362.
- [Haudin 1995] J.M. HAUDIN, *Structure et morphologie des polymères semi-cristallins*. In : G'SELL, C, *Introduction à la mécanique des polymères*. Institut National polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 1995, 97-115
- [Haymet 1986] A. D. J. Haymet, *J. Am. Chem. Soc.*, 108, 319 (1986).
- [Heath 1985] J. R. Heath, S. C. O'Brien, Q. Zhang, Y. Liu, R. F. Curl, H. W. Kroto, F. K. Tittel, R. E. Smalley, *J. Am. Chem. Soc.*, 107 7780 (1985).
- [Hebard 1992] A. F. Hebard, M. J. Rosseinsky, R. C. Haddon, D. W. Murphy, S. H. Glarum, T. T. M. Palstra, A. P. Ramirez, A. R. Kortan, *Nature*, 350, 600 (1992).
- [Heireche 2008] H. Heireche, A. Tounsi, A. Benzair, M. Maachou, E.A. Adda Bedia, *Sound wave propagation in single-walled carbon nanotubes using nonlocal elasticity*, *Physica E* 40 (2008) 2791–2799
- [Heireche 2008] H. Heireche, A. Tounsi, A. Benzair, *Nanotechnology* 19 (2008) 185703.
- [Hernandez 1998] E. Hernandez, C. Goze, P. Bernier, A. Rubio. *Elastic properties of C and BXCYNZ composite nanotubes*. *Phys Rev Lett* 1998;80:4502–5.
- [HetVenyi 1961] M. HetVenyi, *Beams on elastic foundations*. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1961.
- [Hone 1999] J. Hone, M. Whitney, A. Zettl, *Thermal conductivity of single-walled carbon nanotubes*, *Synth. Met.*, (1999), 103, 2498-2499.
- [Hongo 2003] H. Hongo, F. Nihey, T. Ichihashi, Y. Ochiai, M. Yudasaka, S. Iijima. *Support materials based on converted aluminum films for chemical vapor deposition growth of single-wall carbon nanotubes*, *Chemical Physics Letters*, 380 (2003) 158.
- [Houdyp 2006] P.Houdyp, C.Brechignac, M.Lahmani, *Les nanosciences, Nanomatériaux et nanochimie: La collection Échelles*, Éditions Belin, (2006), p.687.
- [Hu 2004] M. Hu, Y. Murakami, M. Ogura, S. Maruyama, Tatsuya Okubo, *Morphology and chemical state of Co–Mo catalysts for growth of single-walled carbon nanotubes vertically aligned on quartz substrates*, *Journal of Catalysis*, 225 (2004) 230.
- [Huang 2002] Z.P. Huang, D.Z. Wang, J.G. Wen, M. Sennett, H. Gibson, Z.F. Ren, *Effect of nickel, iron and cobalt on growth of aligned carbon nanotubes*, *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, Vol.74, No.3, pp.387-391, (2002).
- [Hure 2002] P. Hure, M. Guimon, *Les appareils de protection respiratoire: Choix et utilisation*. INRS, ED 780, (2002).

[Hwang 1995] K.C. Hwang, J. Chem. Soc. Chem. Commun, 173 (1995).

[Holmes 2000] Holmes JD, Johnston KP, Doty RC, Korgel BA (2000) Control of thickness and orientation of solution-grown silicon nanowires. Science 287(5457):1471–1473

-I-

[Iijima 1991] S. Iijima, Nature, 354 :56 (1991).

[Iijima 1993 (1)] S. Iijima, Helical microtubules of graphitic carbon, Nature, 354, 56 (1993).

[Iijima 1993 (2)] S. Iijima, T. Ichihashi, Single-shell carbon nanotubes of 1 nm diameter, Nature, 363, 603 (1993).

[Izard 2004] N. Izard, nanotubes de carbone : Systèmes pour la limitation optique, thèse de doctorat, l'Université Montpellier II, (2004).

-J-

[Jiang 2002] K. Jiang, Q. Li, S. Fan, Spinning continuous carbon nanotube yarns, Nature, 419 (2002) 801.

[Jiang 2004] H. Jiang, R. Liu, Y. Huang, K.C. Hwang, J. Eng. Mater. Technol. 126 (2004) 265.

[Jost 1999] O. Jost et al. Appl. Phys. Lett., 75 :2217, (1999).

[Journet 1997] C. Journet, W. K. Maser, P. Bernier, A. Loiseau, M. Lamy de la Chapelle, S. Lefrant, P. Deniard, R. Lee, J. E. Fischer, Large-scale production of single-walled carbon nanotubes by the electric-arc technique, Nature, (1997), 388, 756-758.

[Jung 2001] M. Jung, K.Y. Eun, J.-K. Lee, Y.-J. Baik, K.-R. Lee, J. W. Park, Growth of carbon nanotubes by chemical vapor deposition, Diamond and related Materials, 10 (2001) 1235.

[Jung 2003] S.H. Jung, M.R. Kim, S.H. Jeong, S.U. Kim, O.J. Lee, K.H. Lee, J.H. Suh, C.K. Park, Highyield synthesis of multi-walled carbon nanotubes by arc discharge in liquid nitrogen, Applied Physics A: Materials Science & Processing, Vol.76,No.2, pp.285-286, (2003).

[Joerg 2008] Appenzeller, Joerg; Knoch, Joachim; Bjork, Mikael T .; Riel, Heike; Schmid, Heinz; Riess, Walter (2008). *«Vers l'électronique de nanofils" IEEE Transactions on Electron Devices 55 (11):. 2827*

-K-

[Kashiwagi 2002] T. Kashiwagi, E. Grulke, J. Hilding, R. Harris, W. Awad, J. Douglas, Macromolecular Rapid Communication, 2002, 23, 761-765.

[Kau 2001] H.-H. Kausch, N. Heymans, C. J. G. Plummer, P. Decroly, Matériaux polymères : propriétés mécaniques et physiques, Presses polytechniques et universitaires romandes (2001)

[Khan 2007] U. Khan, K. Ryan, W. J. Blau and J. N. Coleman, Composites Science and Technology, vol.67, Issues 15-16, pp. 3158-3167, 2007.

[Kim 2006] D. Kim, J.E. Bourrée, S.Y. Kim, Numerical study on the field emission properties of aligned carbon nanotubes using the hybrid field enhancement scheme, *Applied Physics A*, 83 (2006) 111.

[Kim 2007] J.Y. Kim, H.S. Park, S.H. Kim, *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, 103, 1450-1457.

[Kociak 2001] M. Kociak, A. Y. Kasumov, S. Guéron, B. Reulet, I. I. Khodos, Y. B. Gorbatov, V. T. Volkov, L. Vaccarini, H. Bouchiat, *Phys. Rev. Lett.*, 86, 2416 (2001).

[Koo 2006] J. H. Koo, *Polymer nanocomposites : processing, characterization, and applications*, Editeur: McGraw-Hill, 2006.

[Krätschmer 1990] W. Krätschmer, L. D. Lamb, K. Fostiropoulos, D. R. Huffman, *Nature*, 347, 354 (1990).

[Krishnan 1998] A. Krishnan, E. Dujardin, T.W. Ebbesen, et al. Young's modulus of single-walled nanotubes. *Phys Rev B* 1998;58(20):14013-9.

[Kroto 1985] H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl, R. E. Smalley, *Nature*, 318 162 (1985).

[Kumar 2002] S. Kumar, T.D. Dang, F.E. Arnold, A.R. Bhattacharyya, B.G. Min, X. Zhang, R.A. Vaia, C. Park, W.W. Adams, R.H. Hauge, R.E. Smalley, S. Ramesh, P.A. Willis, *Synthesis, Structure, and Properties of PBO/SWNT Composites*, *Macromolecules*, 35 (2002) 9039.

-L-

[Lambin 1994] P. Lambin, L. Philippe, J. C. Charlier, J. M. Michenaud, *Electronic band structure of multilayered carbon tubules*, *Comput. Mater. Science*, 2,350-356 (1994).

[Lassagne 2006] B. Lassagne, *Transport électronique dans les nanotubes de carbone: étude sous champ magnétique*, thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, (2006).

[Lau 2002] K.T. Lau, D. Hui, *Composites part B*, vol. 33, pp.263-277, 2002.

[Lee 1998] H.P. Lee, *Dynamic response of a Timoshenko beam on a Winkler foundation subjected to a moving mass*. *Applied Acoustics* 55 (1998), 203-215.

[Lee 2008] S. H. Lee, M. W. Kim, S. H. Kim and J. R. Youn, *European Polymer Journal*, vol. 44, pp. 1620-1630, 2008.

[Leroux 1999] C. Leroux, K. Metenier, S. Gautier, E. Crackowiak, S. Bonnamy, C. Béguin, J. Power Sources, 81-82 317 (1999).

[LFMC 2001] *L'industrie française des matériaux composites Etude stratégique réalisée par NODAL CONSULTANTS Rapport final 17 décembre 2001.*

[Li 2000] C. Li, H.M. Cheng, Y.T. Xing, P.H. Tan, G. Su, *Carbon*, 38 2041 (2000).

[Li 2004] Y.-L. Li, I.A. Kinloch, A.H. Windle, *Direct Spinning of Carbon Nanotube Fibers from Chemical Vapor Deposition Synthesis*, *Science*, 304 (2004) 276.

[Liao 2004] Y.H. Liao, O. Marietta-Tondin, Z. Liang, C. Zhang, B. Wang, *Materials Science and Engineering A*, vol.385, pp.175–181, 2004.

[Liu 1998] J. Liu, A. G. Rinzler, H. Dai, J. H. Hafner, R. Kelley Bradley, P. J. Boul, A. Lu, T. Iverson, K. Shelimov, C. B. Huffman, F. Rodriguez-Macias, Y.-S. Shon, T. Randall Lee, D. T. Colbert, R. E. Smalley, Fullerene pipes, *Science*, 280, 1253-1256 (1998).

[Liu 1999] C. Liu, Y. Y. Fan, M. Liu, H. M. Cheng, M. S. Dresselhaus, Hydrogen storage in single-walled carbon nanotubes at room temperature, *Science*, 286, 1127-1129 (1999).

[Liu 2004] T.X. Liu, I.Y. Phang, L. Shen, S.Y. Chow, W.D. Zhang, *Macromolecules*, 2004, 37, 7214.

[Liu 2008] J. Liu, A. Rasheed, M. L. Minus, S. Kumar, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 112, pp. 142–156, 2009.

[Lu 1996] K.L. Lu, R. M. Lago, Y. K. Chen, M. L. H. Green, P. J. F. Harris, S. C. Tsang, *Carbon*, vol. 34, pp. 814-816, 1996.

[Lu 1997] J. Lu, Elastic properties of carbon nanotubes and nanoropes. *Phys Rev Lett* 1997;79:1297–300.

[Lu 2007] Lu P, Lee H P, Lu C and Zhang P Q 2007 *Int. Solids. Struct.* 44 5289

[Lee2008]Lee J., Farhangfa, S., Lee, J., Cagnon, L., Scholz, R., Gösele, U., Nielsch, K. Tuning the crystallinity of thermoelectric Bi₂Te₃ nanowire arrays grown by pulsed electrodeposition [Revue] *Nanotechnology*. - 2008. - Vol. 19. - p. 365701.

[Lim2005]Lim J. R., Whitacre, J. F., Fleurial, J.-P., Huang, C.-K., Ryan, M. A., Myung, N. V. Fabrication Method for Thermoelectric Nanodevices [Revue]. - 2005. - Vol. 17. - pp. 1488-1492.

-M-

[Ma 2009] X. Ma, J.W. Butterworth, G.C. Clifton, Static analysis of an infinite beam resting on a tensionless Pasternak foundation. *European Journal of Mechanics A/Solids* 28 (2009), 697-703.

[Maachou 2011] M. Maachou, M. Zidour, H. Baghdadi, N. Ziane, A. Tounsi A nonlocal Levinson beam model for free vibration analysis of zigzag single-walled carbon nanotubes including thermal effects, *Solid State Communications*, 151 (2011) 1467–1471

[Mahmood 2010] Mahmood M. Shokrieh, R. Rafiee, Prediction of Young's modulus of graphene sheets and carbon nanotubes using nanoscale continuum mechanics approach, *Materials and Design* 31 (2010) 790–795.

[Mallick 1997] P.K. Mallick, *Composites Engineering Handbook*, Marcel Dekker, USA, 1997.

[Marcoux 2002] P. Marcoux, Réactivité et manipulation de nanotubes de carbone monocouches : fonctionnalisation de surface par greffage covalent et mise en oeuvre comme agent structurant, thèse de doctorat, Université d'Angers, (2002).

[Marty 2003] L.Marty, V.Bouchiat, C.Naud, M.Chaumont, T.Fournier, A.M.Bonnot, *Nano Letters*, 3 :10911096, (2003).

[Marty 2006] L.Marty, A.Iaia, M.Faucher, V.Bouchiat, C.Naud, M.Chaumont, T.Fournier , A.M. Bonnot, *Thin Solid Films*, 501 :299, (2006).

[Maruyama 2005] S. Maruyama, E. Einarsson, Y. Murakami, T. Edamura, Growth process of vertically aligned single-walled carbon nanotubes, *Chemical Physics Letters* 403 (2005) 320.

[Meirovitch 1967] L. Meirovitch. *Analytical Methods in Vibrations*. The Macmillan Company, 1967.

[Mintmire 1992] J. W. Mintmire, B. I. Dunlap, C. T. White, Are fullerene tubules metallic? *Phys. Rev. Lett*, 68, 631 (1992).

[Mintmire 1993] J. W. Mintmire, D. H. Robertson, C. T. White, *J. Phys. Chem. Solids*, (1993), 54, 1835.

[Mishra 2000] S. R. Mishra, H. S. Rawat, S. C. Mehendale, K. C. Rustagi, A. K. Sood, R. Bandyopadhyay, A. Govindaraj, C. N. R. Rao, Optical limiting in single-walled carbon nanotube suspensions, *Chem. Phys. Lett.*, (2000), 317, 510-514.

[Mizoguti 2000] E. Mizoguti, F. Nihey, M. Yudasaka, S. Iijima, T. Ichihashi, K. Nakamura, Purification of single-wall carbon nanotubes by using ultrafine gold particles, *Chem. Phys. Lett.*, (2000), 321, 297-301.

[Moreles 2005] Moreles M A, Botello S and Salinas R 2005 *J. Sound Vib.*284 1119.

[Mongillo 2012] Mongillo, Massimo; Spathis, Panayotis; Katsaros, Georgios; Gentile, Pascal; De Franceschi, Silvano (2012). "Périphériques et Logic multifonctionnel portes avec des nanofils de silicium non dopé" *Lettres Nano* **12** (6):. 3074.

[Mahi 2015] A. Mahi, E.A. Adda Bedia, A. Tounsi, *Applied Mathematical Modelling*, (2015), in press.

-N-

[Naceri 2011] M.Naceri, M. Zidour, A. Semmah, M. Houari, A. Benzair, A. Tounsi, Sound wave propagation in armchair single walled carbon nanotubes under thermal environment, *Journal of Applied Physics* 110, 124322 (2011).

[Nikolaev 1999] P. Nikolaev, M.J. Bronikowski, R.K. Bradley, F. Rohmund, D.T. Colbert, K.A. Smith, R.E. Smalley, Gas-phase catalytic growth of single-walled carbon nanotubes from carbon monoxide, *Chemical Physics Letters*, 313 (1999) 91.

[Nitta 1999] K. H. NITTA, M.Takayanagi, Role of Tie molecules in the Yielding Deformation of Isotactic Polypropylene. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 1999, Vol. 37, 357-368

[Novoselov 2004] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Norozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov, *Science*, 306 666 (2004).

-O-

[Ohta 2006] T. ohta, A. Bostwick, T. Seyller, K. Horn, E. Rotenberg, *Science*, 313 951 (2006).

-P-

[Peddieson 2003] Peddieson J, Buchanan G. G, McNitt R. P. *Int J Engng Sci* 41 (2003), 305.

[Penu 2008] C. Penu, Nanocomposites à matrice polyamide 6 ou polystyrène et à renforts de nanotubes de carbone : Du procédé de synthèse aux phénomènes de percolation, Thèse de Doctorat, L'Institut National Polytechnique de Lorraine, 2008.

[PET 2003] *Compte Rendu de Physique*, vol.4, pp.967–974, 2003.

[Pop 2004] V. N. Popov, *Materials Science and Engineering R*, vol.43, pp.61–102, 2004.

[Posadov 1973] G. Posadov, M.I., Malikova, T.A., *The design of structures on an elastic foundation*, Stroiizdat, Moscow, 1973.

[Pötschke 2002] P. Pötschke, T.D. Fornes, D.R. Paul, *Polymer*, 2002, 43, 3247-3255.

[Patolsky2004]Patolsky F., Zheng, G., Hayden, O., Lakadamyali, M., Zhuang, X., Lieber, C. M. Electrical detection of single viruses [Revue] *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*. - 2004. - Vol. 101. - pp. 14017–14022.

-R-

[Rak 2001] E. G. Rakov, *Russ. Chem. Rev.*, vol. 70, pp. 827 – 863, 2001.

[Rappe 1992] AK. Rappe, CJ. Casewit, KS. Colwell, et al. A full periodic-table forcefield for molecular mechanics and molecular dynamics simulation. *J Am Chem Soc* 1992;114:10024–35.

[Regueiro 1992] M. N. Regueiro, P. Monceau, J.-L. Hodeau, *Nature*, 355, 237 (1992).

[Ricaud 2008] M. Ricaud, F. R. D. Lafon, *Les nanotubes de carbone : quels risques, quelle prévention?*, INRS-Cahiers de notes documentaires ND 2286-210-08, 210, 43 (2008).

[Rinzler 1995] A.G. Rinzler, J.H. Hafner, P. Nikolaev, L. Lou, S.G. Kim, D. Tománek, P. Nordlander, D.T. Colbert, R.E. Smalley, *Unraveling Nanotubes: Field Emission from an Atomic Wire*, *Science*, 269, 1550 (1995).

[Rinzler 1998] A. G. Rinzler, J. Liu, H. Dai, P. Nikolaev, C. B. Huffman, F. J. Rodríguez-Macías, P. J. Boul, A. H. Lu, D. Heymann, D. T. Colbert, R. S. Lee, J. E. Fischer, A. M. Rao, P. C. Eklund, R. E. Smalley, *Large-scale purification of single-wall carbon nanotubes : process, product and characterization*, *App. Phys. A*, 67, 29-37 (1998).

[Ren 1998] Z. F. Ren, Z. P. Huang, J. W. Xu, J. H. Wang, P. Bush, M. P. Siegal, P. N. Provencio, *Synthesis of large arrays of well-aligned carbon nanotubes on glass*, *Science*, 282, 1105-1107 (1998).

[Rohlfing 1984] E. A. Rohlfing, D. M. Cox, A. Kaldor, *J. Phys. Chem.*, 81, 3322 (1984).

[Rols 2008] S. Rols, J. Cambedouzou, M. Chorro, H. Schober, V. Agafonov, P. Launois, V. Davydov, A.V. Rakhmanina, H. Kataura, J.L. Sauvajol, *Phys. Rev. Lett.* 101, 065507 (2008)

[Ruoff 1995] R. S. Ruoff, D. C. Lorents, *Carbon*, (1995), 33, 925.

-S-

- [Saint-aubin 2010] K. Saint-aubin, Etude de dispersions de nanotubes de carbone par des polymères pour l'élaboration de composites conducteurs et structurés, thèse de doctorat, l'Université Bordeaux I, (2010).
- [Ristić2005] Ristić J., Calleja, E., Trampert, A., Fernández-Garrido, S., Rivera, C., Jahn, U., Ploog, K. H. Columnar AlGaN/GaN Nanocavities with AlN/GaN Bragg Reflectors Grown by Molecular Beam Epitaxy on Si(111) [Revue] Phys. Rev. Lett. . - 2005. - Vol. 94. - p. 146102.
- [Saito 1992] R. Saito, M. Fujita, G. Dresselhaus, M. S. Dresselhaus, Electronic structure of graphene tubules based on C60, Phys. Rev. B, 46, 1804 (1992).
- [Saito 1998] R. Saito, G. Dresselhaus, M. S. Dresselhaus, Physical Properties of Carbon Nanotubes. Imperial College Press, (1998). ISBN N° 1-86094-093-5.
- [Salvetat 1999 (1)] JP. Salvetat, AJ. Kulik, JM. Bonard, et al. Elastic modulus of ordered and disordered multiwalled carbon nanotubes. Advanced Materials 1999;11(2):161–5.
- [Salvetat 1999 (2)] JP. Salvetat, GAD. Briggs, JM. Bonard, et al. Elastic and shear modulus of singlewalled carbon nanotube ropes. Phys Rev Lett 1999;82(5):944–7.
- [Sawi 2010] Ihab EL SAWI, Dispersion de nanotubes de carbone et intégration de la fonction de conductivité électrique dans les matériaux composites structuraux, l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2010.
- [Schartel 2005] B. Schartel, P. Pötschke, U. Knoll, M. Abdel-Goad, European Polymer Journal, 2005, 41, 1061-1070.
- [Sébastien 2008] P. Sébastien, etude de potentialité des nanotubes de carbone dans le domaine hyperfréquence: Application à l'élaboration de matériaux nano-composites et contribution à la miniaturisation de composants électromécaniques (NEMS), l'Université toulouse III, thèse de doctorat, (2008).
- [Shen 2001] H.S. Shen, Int. J. Solids Struct. 43 (2001) 1259.
- [Shi 1999] Z. Shi, Y. Lian, F. Liao, X. Zhou, Z. Gu, Y. Zhang, S. Iijima, Purification of single-wall carbon nanotubes, Solid State Communications, (1999), 112, 35-37.
- [Shih 1993] Y. S. Shih, B. T. Blotter, Non-linear vibration analysis of arbitrarily laminated thin rectangular plates on elastic foundations. Journal of Sound and Vibration 167(1993), 433-459.
- [Shintani 2003] K. Shintani, T. Narita. Atomistic study of strain dependence of Poisson's ratio of singlewalled carbon nanotubes. Surf Sci 2003;532-535:862–8.
- [Shelimov 1998] K. B. Shelimov, R. O. Esenaliev, A. R. Rinzler, C. B. Huffman, R. E. Smalley, Purification of single-wall carbon nanotubes by ultrasonically assisted filtration, Chem. Phys. Lett., (1998), 282, 429-434.
- [Shen 2001] Shen, H.S.,. International Journal of Solids and Structures 43, 1259–1281. 2001

- [Sloan 1998] J. Sloan, J. Hammer, M. Zweifka-Sibley, M.L.H. Green, Chem. Commun, 347 (1998).
- [Sluzarenko 2006] N.Sluzarenko, B.Heurtefeu, M.Maugey, C.Zakri, P.Poulin, S.Lecommandoux, Diblock copolymer stabilization of multi-wall carbon nanotubes in organic solvents and their use in composites. Carbon 2006, 44 (15), 3207-3212.
- [Smalley 1997] R. E. Smalley, D. T. Colbert, T. Guo, A. G. Rinzler, P. Nikolaev, A. Thess, International Patent, 13 March (1997), international publication number WO 97/09272.
- [Smith 1998] B.W. Smith, M. Monthieux, D.E. Luzzi, Nature, 396, 323 (1998).
- [Sorin 2005] C. Sorin. Cojocar, D. Kim, D. Pribat, J.Eric. Dourée, Synthesis of multi-walled carbon nanotubes by combining hot-wire and dc plasma enhanced chemical vapour deposition, Proceeding of the third international conference on Hot-Wire (Cat-CVD) Process, V.501, ISS.1-2, pp.227-232, (2005).
- [Stevens 2000] R. Stevens, C. Nguyen, A. Cassell, L. Delzeit, M. Meyyappan, J. Hana, Improved fabrication approach for carbon nanotube probe devices, Applied Physics Letters, 77 (2000) 3453.
- [Stones 1986] A. J. Stones, D. J. Wales, Chem. Phys. Lett., (1986), 128, 501.
- [Strutt 1945] J.S. Strutt (Lord Rayleigh). Theory of sound. Dover publications, 1945.
- [Suenaga1 2000] K. Suenaga1, M. Tencé, C. Mory, C. Colliex, H. Kato, T. Okazaki, H. Shinohara, K. Hirahara, S. Bandow, S. Iijima, Element-Selective Single Atom Imaging, Science, 290 (2000) 2280.
- [Suenaga1 2001] K. Suenaga1, E. Sandré, C. Colliex, C. J. Pickard, H. Kataura, S. Iijima, Physical Review B, 63 (2001) 165408.
- [Sui 2008] G. Sui, W. H. Zhong, X. P. Yang, Y. H. Yu and Zhao, Polym. Adv. Technol, vol.19, pp. 1543- 1549, 2008.
- [Sun 1998] X. Sun, R. Q. Yu, G. Q. Xu, T. S. A. Hor, W. Ji, Broadband optical limiting with multiwalled carbon nanotubes, Appl. Phys. Lett., (1998), 73, 3632-3634.
- [sudak 2003] L.J. Sudak, J. Appl. Phys. 94, 7281
- [Schmidt2006]Schmidt V., Riel, H., Senz, S., Karg, S., Riess, W., Gösele, U. Realization of a Silicon Nanowire Vertical Surround-Gate Field-Effect Transistor [Revue] Small. - 2006. - Vol. 2. - pp. 85 - 88.
- T-
- [Tans 1997] S.J.Tans, M.H.Devoret H.Dai A.Thess R.E.Smalley L.J.Geerligs C.Dekker Individual Singlewall carbon nanotubes as quantum wires, Nature, 386, 474-477 (1997)
- [Thess 1996] A. Thess, R. Lee, P. Nikolaev, H. Dai, P. Petit, J. Robert, C. Xu, Y. Hee Lee, S. Gon Kim, A. G. Rinzler, D. T. Colbert, G. E. Scuseria, D. Tománek, J. E. Fischer, R. E. Smalley, Crystalline ropes of metallic carbon nanotubes, Science, 273, 483-487 (1996).
- [Tho 2001] E. T. Thostenson, Z. Ren, T-W. Chou, Composites Science and Technology, vol 61, Issue 13, pp. 1899-1912, 2001.

[Tho 2005] E. T. Thostenson, C. Li, T-W. Chou, Composites Science and Technology, vol. 65, pp.491– 516, 2005.

[Thostenson 1899] Thostenson ET, Ren Z, Chou TW. Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review. Compos Sci Technol 2001;61:1899–912.

[Thostenson 2006] E. T.Thostenson, T. W.Chou, Processing-structure-multi-functional property relationship in carbon nanotube/epoxy composites. Carbon 2006, 44 (14), 3022-3029.

[Timoshenko 1921] S.P. Timoshenko, Philos. Mag. 41, 744 (1921).

[Timoshenko 1939] S. Timoshenko. Théorie des vibrations. Librairie polytechnique Ch. Béranger, 1939.

[Tsang 1994] S.C. Tsang, Y.K. Chen, P.J.C. Harris, M.L.H. Green, Nature, 372 159 (1994).

[Tilike 2003] Tilke, AT; Simmel, FC; Lorenz, H .; Blick, RH; Kotthaus, JP (2003). "Interférence quantique dans un nanofil de silicium unidimensionnel" physique Rev. B **68** (7):. 075311

[Tounsi 2013] A. Tounsi, S. Benguediab, E.A. Adda Bedia, A. Semmah,M. Zidour, Advances in Nano Research 1(1), 1 (2013)

[Tounsi 2013] A. Tounsi, A. Semmah, A.A. Bousahla, J. Nanomechanics Micromech. (ASCE) 3, 37 (2013)

[Tounsi 2013] A. Tounsi, M.S.A. Houari, S. Benyoucef, E.A. Adda Bedia, Aerosp. Sci. Technol. 24, 209–220 (2013)

[Thelander2003]Thelander C., Martensson, T., Björk, M. T., Ohlsson, B. J., Larsson, M. W., Wallenberg, L. R., Samuelson, L. Single-electron transistors in heterostructure nanowires [Revue] Applied physics letters. - 2003. - Vol. 83. - pp. 2052-2054.

[Thelander2005]Thelander C., Nilsson, H. A., Jensen, L. E., Samuelson, L. Nanowire single-electron memory [Revue] NanoLett. - 2005. - Vol. 5. - pp. 635–638.

-U-

[Ugarte 1998] D. Ugarte, T. Stöckli, J.M. Bonard, A. Châtelain, W.A. Heer, Appl. Phys. A, 67 101 (1998).

[Uryupin2009]Uryupin O. N., Vedernikov, M. V., Shabaldin, A. A., Ivanov, Y. V., Kumzerov, Y. A., Fokin, A.,V. Thermoelectric Properties of InSb Nanowires Over a Wide Temperature Range [Revue] Journal of electronic materials. - 2009. - Vol. 38. - pp. 990-993.

-V-

[Vacarini 1999] L. Vacarini, C. Goze, R. Aznar, V. Micholet, C. Journet, P. Bernier, Purification procedures of carbon nanotubes, Synth. Met., (1999), 103, 2492-2493.

[Vigolo 2000] B. Vigolo, A. Pénicaud, C. Coulon, C. Sauder, R. Pailler, C. Journet, P. Bernier, P. Poulin, Macroscopic fibers and ribbons of oriented carbon nanotubes, *Science*, 290, 1331-1334 (2000).

[Vivien 1999] L. Vivien, E. Anglaret, D. Riehl, F. Bacou, C. Journet, C. Goze, M. Andrieux, M. Brunet, F. Lafonta, P. Bernier, F. Hache, Single-wall carbon nanotubes for optical limiting, *Chem. Phys. Lett.*, (1999), 307, 317-319 et *ibid* (1999), 312, 617.

[Vivien 2000] L. Vivien, D. Riehl, E. Anglaret, F. Hache, *IEEE J. of Quant. Elect.*, (2000), 36, 680.

[Vizcaino2013] Vizcaíno, JLP; Núñez, CGA (2013). "La manipulation rapide et efficace de nanofils pour les appareils électroniques" SPIE Salle de presse.

-W-

[Wang 2006] X. Wang, H. Cai, *Acta Mater.* 54 (2006) 2067.

[Wang 2009] S. R. Wang, R. Liang, B. Wang, C. Zhang, *Carbon* 2009, 47 (1), 53-57.

[Wildöer 1998] J. W. G. Wildöer, L. C. Venema, A. G. Rinzler, R. E. Smalley, C. Dekker, Electronic structure of atomically resolved carbon nanotubes *Nature* (London), 391, 59-61 (1998).

[Wei 2001] B.Q. Wei, R. Vajtai, P.M. Ajayan, *Applied Physics Letters*, 79, no. 8 (2001) 1172-1174.

[Wei 2006] C. Y. Wei, *Applied Physics Letters* 2006, 88 (9).

[Wu 2006] Y. Wu, X. Zhang, A.Y.T. Leung, W. Zhong, An energy-equivalent model on studying the mechanical properties of single-walled carbon nanotubes, *Thin-Walled Structures* 44 (2006) 667-676

[Wisser 2006] Wissner-Gross, AD (2006). "*Reconfiguration diélectrophorétiques d'interconnexions de nanofils*" (PDF) *Nanotechnologie* 17 (19):. 4986-4990

[Web] "[Nanofils se reconfigurés](http://Nanofils.se_reconfigurés)". Nanotechweb.org. Le 19 octobre 2006.

-X-

[Xiao 2007] K. Q. Xiao, L. C. Zhang, I. Zarudi, *Composites Science and Technology*, 2007, 67, 177-182.

[Xiong 2006] J. Xiong, Z. Zheng, X. Qin, M. Li, H. Li, X. Wang, *Carbon* 2006, 44 (13), 2701-2707.

[Xu 2001] J. M. Xu, Highly ordered carbon nanotubes arrays and IR detection, *Infrared Physics & Technology*, (2001), 42, 485-491.

-Y-

[Yam 1995] T. Yamabe, *Synthetic Metals*, vol.70, pp.1511-1518, 1995.

[Yao 2002] Z. Yao, C. Zhu, M. Cheng, et al. Research on mechanical properties of carbon nanotube using molecular dynamics. *Vac Electron* 2002;5:5-7.

[Yao 2006] X.H. Yao, Q. Han, *J. Eng. Mater. Technol.* 128 (2006) 419.

[Yao 2007] X.H. Yao, Q. Han, *Compos. Sci. Technol.* 67 (2007) 125.

[Yongdong 2006] W. Yongdong, Z. Xiaochun, *University of Hong Kong, Thin-Walled Structures* 44 (2006) 667–676.

[Yudasaka 1995] M. Yudasaka, R. Kikuchi, T. Matsui, Y. Ohki, S. Yoshimura, Specific conditions for Ni catalyzed carbon nanotube growth by chemical vapordeposition, *Applied Physics Letters*, 67 (1995) 2477.

[Yang 2011] Yang-Yuan Chen, Cheng-Lung Chen, Ping-Chung Lee and Min-Nan Ou DOI: 10.5772/16941, *Nanotechnology and Nanomaterials* » "Nanowires - Fundamental Research", book edited by Abbass Hashim, ISBN 978-953-307-327-9, Published: July 19, 2011 under CC BY-NC-SA 3.0 license. © The Author(s).

[Yang2010] Yang X., Wang, G., Slattery, P., Zhang, J. Z., Li, Y. *Ultrasmall Single-Crystal Indium Antimonide Nanowires [Revue] Crystal Growth and Design*. - 2010. - Vol. 10. - pp. 2479– 2482.

-Z-

[Zhan 2002] Zhan-chun Tu, Zhong-can Ou-Yang, *Physical review B*, volume 65, 233407, June 2002.

[Zhang 2004] M. Zhang, K.R. Atkinson, R.H. Baughman, *Multifunctional Carbon Nanotube Yarns by Downsizing an Ancient Technology*, *Science* 306 (2004) 1358.

[Zhang 2005] Y. Zhang, Y. W. Tan, H. L. Stormer, P. Kim, *Nature*, 438 201 (2005).

[Zhang 2005] Zhang Y Q, Liu G R, Xie X Y, *Phys Rev*, 71 (2005) 195404-1-195404-7.

[Zhang 2006] Q. Zhang, S. Rastogi, D. Chen, D. Lippits, P.J. Lemstra, *Carbon*, 2006, 44, 778-785.

[Zhao 2003] Zhao Y, Ma C C, Chen G and Jiang Q 2003 *Phys. Rev. Lett.* 91 175

[Zhou 1993] D. Zhou, A General solution to vibrations of beams on variable Winkler elastic foundation. *Computers & Structures* 47 (1993), 83-90.

[Zhou 1994] O. Zhou, R.M. Fleming, D.W. Murphy, C.H. Chen, R.C. Haddon, A.P. Ramirez et S.H. Glarum, *Science*, 263 :1744 (1994).

[Zhou 2000] O. Zhou, B. Gao, C. Bower, L. Cleming, H. Shimoda, *Mol. Cryst. and Liq. Cryst.*, 340 541 (2000).

[Zidour 2011] M. Zidour, K. Benrahou, A. Semmah, M. Naceri, H. Belhadj, K. Bakhti, A. Tounsi, The thermal effect on vibration of zigzag single walled carbon nanotubes using nonlocal Timoshenko beam theory, *Computational Materials Science* 51 (2012) 252–260.

[Zimmerman 2000] J. L. Zimmerman, R. K. Bradley, C. B. Huffman, R. H. Hauge, J. L. Margrave, *Gasphase purification of single-wall carbon nanotubes*, *Chem. Mater.*, (2000), 12, 1361-1366.

[Zidi 2014] M. Zidi, A. Tounsi, M.S.A. Houari, E.A. Adda Bedia, O. Anwar Bég, *Aerosp. Sci. Technol.* 34, 24–34 (2014) “Bending analysis of FGM plates under hygro-thermo-mechanical using a four variable refined plate theory”.

[Zidour 2012] ,M, Daoudji, TH, M, Benrahou, KH, Tounsi, A, Adda Bedia, E. A, Hadji, L. (2014), "Buckling analysis of chiral single-walled carbon nanotubes by using the nonlocal Timoshenko beam theory", *Mechanics of composite Materials*, 50(1), 95-104.

[Zimmerler2008] Zimmerler M. A., Bao, J., Capasso, F., Muller, S., Ronning, C. Laser action in nanowires: Observation of the transition from amplified spontaneous emission to laser oscillation [Revue] *Applied Physics Letters*. - 2008. - Vol. 93. - pp. 051101-051103.

[Zhou2005] Zhou J., Jin, C., Seol, J. H., Li, X., Shi, L. Thermoelectric properties of individual electrodeposited bismuth telluride nanowires [Revue] *Appl. Phys. Lett.*. - 2005. - Vol. 87. - pp. 133109-133111.