RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ DE MÉDÉA
FACULTÉ DES SCIENCES



Mémoire

pour obtenire le diplome de Master

Spécialité : Physique des matériaux

THÈME :

L'effet d'échelle sur le comportement thermique des nanotubes de carbone basé sur la théorie de Timoshenko

Présenté par :

BENAMEUR Messaouda

SAIDANI Djamila

Soutenue publiquement le : 24 /09/2020., Devant le jury composé de :

M. DEHBAOUI	MCA	Université de Médéa	Président
A. BOUKAOUD	MCB	Université de Médéa	Examinateur
M. RADJAI	MCB	Université de Médéa	Examinateur
B. KHEROUBI	MCB	Université de Médéa	Encadreur

Année universitaire : 2019 / 2020

Dédicace

Je dédie ce modeste travail : A mon père ,Ma très chère mère ,Merci à eux je suis là
Mes sœurs : Siham ,sohila ,chaima et ma petite prince Zinouba
Mes frères : Abdelkader et Abdelbassed
A toute ma famille.
A tous mes amis
A tous ceux qui me sont chers et que j'aime de tous mon coeur.

Dédicace "Djamila".

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :
A mes parents
A mes frères et mes soeurs
A mon fiancé
A toute ma famille
A tous mes amis
A tous ceux qui m'ont aidé de prés ou de loin.

Dédicace "Messaouda".

Remerciements

Nous remercions en premier lieu Allah le tout puissant de nous avoir accordé la puissance et la volonté pour terminer ce travail.

Tout d'abord nous tenons à remercier notre encadreur, Monsieur KHEROUBI Boumediene, maitre conférence classe B à l'université de Médéa , pour son suivi constant et ses précieux conseils qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Nous tenons à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail. Un grand remerciement à Monsieur le Dr HOUHOU Oussama à l'université de Médéa ,Dr MEKHTICHE à l'université de Médéa , pour leurs aides et encouragements.

Nous remercions également les membres du Bibliothèque centrale pour le bon traitement.

Enfin, nous tenons à remercier vivement tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

Liste des abreviations

AFM	microscope à force atomique
ADN	Acide DésoxyriboNucléique
Ar	Argon
CNT	Carbon NanoTube
CVD	chemical vapor deposition
CCVD	Catalytic Chemical Vapor Deposition
CH_4	le méthane
C_2H_4	l'acétylène
C_3H_6	le propylène
C_6H_6	le benzène
Co	le cobalt
DWNTs	Nanotubes de carbone biparois
$EtOH(C_2H_5OH)$	l'éthanol
Fe	le Fer
He	Hélium
HiPCO	High Pressure dismutation of CO : décomposition sous haute pression de CO
MWNT	Multi Walled Carbone Nanotube
NREL	laboratoire national des énergies renouvelables américain
Ni	le nickel
PECVD	plasma-enhanced chemical vapor deposition
PGCD	grand diviseur commun
SWNT	Single Walled NanoTube
T_{cr}^{non}	la température critique avec la théorie nonlocal
Si_3N_4	le nitrure de silicium
SiO_2	le dioxyde de silicium
MgO	l'oxyde de magnésium

Table des matières

Table des figures **vii**

1 Généralités sur les nanotubes de carbone **3**
1.1 Introduction . . . 3
1.2 Les NTCs . . . 3
1.2.1 Le carbone . . . 3
1.3 Les formes de carbone . . . 4
1.3.1 Les différent formes traditionnelles de carbone . . . 4
1.3.2 Les nouvelles formes de carbone . . . 5
1.4 les propriétés des NTCs . . . 8
1.4.1 Structure . . . 8
1.4.2 Propriétés électriques . . . 10
1.4.3 Propriétés Mécaniques . . . 11
1.4.4 Propriétés Thermiques . . . 11
1.4.5 Propriétés biomédicales . . . 12
1.4.6 Propriétés d'émission de champ . . . 12
1.5 les méthodes de synthèses . . . 12
1.5.1 Voie de synthèse à haute température . . . 12
1.5.2 Arc électrique . . . 12
1.5.3 Ablation laser . . . 13
1.5.4 Voie de synthèse à moyenne température . . . 14
1.6 Application des NTCs . . . 15
1.7 les défauts . . . 15

2 Théorie d'élasticité **17**
2.1 Introduction . . . 17
2.2 Le milieu continu . . . 18
2.3 Evaluation de propriété matérielle de nanotubes de carbone par l'intermédiaire d'élasticité nonlocale . . . 18
2.4 La théorie des milieux continus . . . 19
2.4.1 La théorie d'Euler Bernoulli . . . 19
2.4.2 La théorie de Timoshenko . . . 21
2.5 La différence entre la théorie d'Euler-Bernoulli et Timoshenko . . . 22

3 Modèle nonlocal appliqué aux nanotubes de carbone **24**
3.1 Équation du mouvement . . . 24

4 Résultats et discussoins **27**
4.1 Résultats et discussions . . . 27

Bibliographie **32**

Table des figures

1.1 Structure du graphite hexagonal(ici avec quatre feuillets de graphène)[1]. 4
1.2 Structure du Diamant [1] 5
1.3 FullerèneC_{60} 5
1.4 Représentation schématique de l'enroulement d'un feuillet de graphène pour obtenir un NTC. 6
1.5 Représentation des trois types de tubes 6
1.6 Gauche a) :Faisceau de nanotubes de carbone mono-feuillet) Droite b) : nonotube mono-feuillet). 7
1.7 Représentation des différents NTCs synthétisés, à savoir les NTCs mono parois (SWNTs), bi parois (DWNTs) et multi-parois (MWNTs). 7
1.8 structures possibles des MWNT. (Gauche a) :type poupée russe, Droite b) :type de rouleau de parchemin.) 8
1.9 Du plan de graphène au nanotube. 8
1.10 Schéma représentant les vecteur $\vec{C}_h$ et angle θ d'hélicité ou de chiralité d'un nanotube de carbone, obtenu à partir de l'enroulement d'un feuillet de graphène. 9
1.11 :les trois structures différentes de NTC. 9
1.12 :Les indices chiraux n et m définissent l'hélicité du nanotube de carbone[2] 9
1.13 :Production de nanotubes par la méthode de l'arc électrique. 13
1.14 :Schéma de principe de l'arc électrique. 13
1.15 :Schéma de principe d'un dispositif par ablation laser. 14
1.16 : Schéma d'un réacteur CVD pour la croissance des (NTC). 14

2.1 Définition des termes : poutre de courbe moyenne G_0G_E, de section droite S, et fibre neutre de section dS 20
2.2 : La déformation dans la poutre de Bernoulli. 21
2.3 : La différence entre la déformation dans la poutre de Bernoulli et de Timoshenko. 22
2.4 : Longueur infinitésimale de poutre montrant la déformation de recourbement et de cisaillement. 23

4.1 :La relation entre la température critique nondimensionnelle de flambement (P_{cr}) et le nombre de mode (k) avec différent coefficients d'échelle (e_0a), la valeur de $L/d = 20$. 27
4.2 :La relation entre la température critique nondimensionnelle de flambement (P_{cr}) et le nombre de mode (k) avec différent valeurs de L/d, le coefficient d'échelle e_0a =1nm. 28

4.3 :La relation entre la température critique nondimensionnelle de flambement (P_{cr}) et le rapport (L/d) avec différent coefficients d'échelle (e_0a), avec $k = 1$ 29
4.4 :La relation entre la température critique nondimensionnelle de flambement (P_{cr}) et le rapport (L/d) avec différent coefficients d'échelle (e_0a), avec $k = 5$ 29
4.5 :La relation entre la température critique nondimensionnelle de flambement(P_{cr})et le rapport (L/d) avec différent coefficients d'échelle (e_0a),avec $k = 10$ 30

ملخص

من خلال هذا العمل تم دراسة خواص الالتواء الحرارية للانابيب النانوية الكربونية مع الأخذ بعين الاعتبار التأثير السلمي اعتمادا على نظرية التواصل غير المحلي ونموذج تيموشنكو، معادلة الحركة مشتقة ودرجة الحرارة الحرجة للالتواء مقدمة. تأثيرات المعاملات السلمية، نسبة الطول إلى القطر، التشوه العرضي للقص والجمود الدوارة تم مناقشتها. يمكن ملاحظة أن الآثار السلمية المحدودة مهمة ويجب أن تكون معتبرة للتحليل الحراري للانابيب النانوية الكربونية، درجة الحرارة الحرجة للالتواء تصبح عالية مع نسبة الطول وزيادة القطر. علاوة على ذلك، بالنسبة لنسب الطول إلى القطر الصغير والأنماط المرتفعة، التشوه العرضي للقص والجمود الدوراني لها تأثيرات ملحوظة على السلوكيات الحرارية للالتواء.

كلمات مفتاحية : الانابيب النانوية الكربونية ، التأثير السلمي ، الالتواء الحراري ، درجة الحرارة الحرجة للالتواء، نموذج تيموشنكو.

Résumé

Dans ce travail, quelques propriétés thermiques de flambement des nanotubes en carbone sont étudiées en tenant compte l'effet d'échelle (e_0a). Basé sur la théorie nonlocale du modèle de Timoshenko, l'équation de mouvement et la température critique de flambement sont présentées. Les influences d'effet d'échelle (e_0a), le rapport de la longueur au diamètre, la déformation transversale de cisaillement et l'inertie rotatoire sont discutés. Il peut être observé que les effets à petite échelle sont significatifs et il devra être pris en compte pour l'analyse thermique du nanotube de carbone. La température critique de flambement devient plus importante lorsque le rapport de la longueur au diamètre augmente.

Mot–clés : nanotube de carbone, effet d'échelle, flambement thermique, température critique de flambement, modèle de Timoshenko.

Abstract

In this work, some thermal properties of buckling of carbon nanotubes taking into account the scale effect(e_0a) are studied .based on the non local theory of the Timoshenko model, the equation of motion and the critical buckling temperature are presented. influences of scale effect(e_0a).The ratio of length to diameter . transverse shear deformation and rotational inertia are discussed . it has been observed that the significant role of the scale effects is dice and it must be taken into account during the thermal analysis of the carbon nanotube . the critical buckling temperature becomes higher as the ratio of length to diameter increases.

Keywords : carbon nanotube, scale effect, thermal buckling , critical buckling temperature, timoshenko model.

Introduction Générale

Les nanotubes de carbone suscitent un intérêt considérable dans le monde de la recherche, comme dans celui de l'industrie, compte tenu de leurs propriétés intrinsèques exceptionnelles et de leurs caractéristiques dimensionnelles. Bien que leur existence soit déjà connue du grand public en raison des multiples applications prometteuses.

Depuis leur découverte , les NTCs ont pris une place très importante dans de nombreux domaines scientifiques (matériaux, électronique, chimie, biomédical, etc. . .) de fait de leurs propriétés très particulières (chimiques, optiques, mécaniques, électroniques, magnétiques, etc..).

Quelques chercheurs ont indiqué que le comportement mécanique des nanotubes de carbone est sensible aux effets thermiques de l'environnement externe .[3].[4] [5]. Récemment, des travaux, Hsu et al. [6] et Lee et Chang [7] ont été entrepris pour l'étude des propriétés thermique du flambement des nanotubes de carbone en utilisant le modèle de Timoshenko. A fin de voir l'effet d'échelle (e_0a) sur les propriétés de flambement des nanotubes de carbone une équation faisant intervenir la théorie nonlocal de Timoshenko a été établie.

Ainsi l'objectif de notre travail est de présenter une étude sur l'effet d'échelle sur le comportement thermique des nanotubes de carbone, Ce travail comportera les chapitres suivants : Le premier chapitre rappelle d'abord la structure et les propriétés électroniques, thermiques, biomédicales, des nanotubes de carbone suivi d'une analyse des différents procédés de fabrication, les applications des NTCs, et enfin, nous avons cité quelques défauts des NTCs . Le deuxième chapitre traite Les méthodes de la mécanique des milieux continus sont souvent utilisées pour étudier certains problèmes physiques à l'échelle nanométrique, on a essayé de parler, des modèles utilisés pour étudier ces nanomatériaux qui sont le modèle d'Euler- Bernoulli et le modèle de Timoshenko de la théorie d'élasticité nonlocal, et la différence entre les deux.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté un développement mathématique pour le modèle nonlocal appliqué aux nanotubes de carbone.

Dans le dernier et quatrième chapitre, nous avons illustrés les différents graphes qui montrent :

La variation de la température critique de flambement non dimensionnelle en fonction de nombre de mode (k)

- Pour différent coefficients d'échelle (e_0a), avec $L/d = 20$.
- Pour différente valeurs deL/d, avec e_0a=1nm.

La variation de la température critique de flambement non dimensionnelle en fonction du rapport L/d

- Pour différent coefficient d'échelle (e_0a) et pour k=1,5, 10.

Enfin, ce mémoire est achevé par une conclusion générale .

Chapitre 1

Généralités sur les nanotubes de carbone

1.1 Introduction

Les nanotubes de carbone sont des nanostructures uniques dotées de remarquables propriétés mécaniques dont certains découlement de la relation étroite entre aspects unidimensionnels.

Nanotube est un feuillet de graphite formé d'atomes de carbone disposés en réseau hexagonale comme nid d'abeilles, et en roulé sur lui-même , NTC sont des structures tubulaire de dimension nanométrique, un diamètre de quelque nanomètres et une longueur de quelques dizaines de micromètres, le nanotube de carbone est cent mille fois plus fin que le cheveu mais cent fois plus résistant et six fois plus léger que l'acier, Cette structure unidimensionnelle confère à ces nanotubes de carbone des propriétés physiques remarquables, en particulier une conductivité électrique supérieure à celle du cuivre et une conductivité thermique supérieure à celle du diamant .

A l'état naturel le carbone existe sous deux formes cristallines, le graphite et le diamant, En 1985, Kroto et al. [8] ont découvert la troisième structure du carbone appelée Buckminster-fullerène en hommage à l'architecte américain Buckminster Fuller qui inventa le concept du dôme géodésique. Cette découverte a valu la distinction du prix Nobel de chimie en 1996 à Richard Smalley, Harold Kroto et Robert Curl . En 1991, S. lijima [9] , à observé en microscopie électronique un sous produit de la synthèse des fullerènes qui se présentait comme un dépôt noirâtre , dur et filamenteux. ce dépôt s'est avéré être constitué des tubes creux, fermés à leurs extrémités et composés de carbone cristallisé.

1.2 Les NTCs

1.2.1 Le carbone

Le carbone est un des éléments les plus abondant dans notre univers et dans notre système solaire. Cet élément chimique se forme à l'intérieur des étoiles par des réactions de fusion nucléaire incluant des noyaux d'hélium. Lors de la mort des étoiles, le carbone et d'autres éléments chimiques sont expulsés dans l'univers et ils se trouvent ainsi dans la composition de notre planète. Dans le tableau périodique,

le carbone se trouve sur la deuxième linge, en sixième colonne et porte le numéro atomique Z=6, sa masse molaire est 12.0107 g/mol, sa structure électronique particulière $[1s^2 2s^2 2p^2]$. Ses orbitales atomiques sont capables de s'hybrider avec d'autres atomes de carbone ou des hétéroatomes, pour former des orbitales moléculaires de type sp^1, sp^2ou sp^3, ce qui confère au carbone un caractère bi-, tri- ou tétravalent [10], Le carbone peut avoir plusieurs formes cristallographiques différentes, appelées aussi formes allotropiques : graphite et diamant , les scientifique ont cependant réussi à créer des nouveaux types de carbone :fullérenes et les nanotubes.nous allons donc ici étudier en détails ses différentes formes.

1.3 Les formes de carbone

1.3.1 Les différent formes traditionnelles de carbone

graphite

Le graphite est un élément natif qui se trouve surtout dans les sédiments de métamorphisme régional mais qui, selon les roches, peut se former aussi à partir du charbon organique, du magma ou par réduction des carbonates. On peut donc en trouver des grandes quantités à faible cout. Sa structure est constituée de feuillets hexagonaux non compacts liées par des liaisons de type Van der Waals, nommés graphènes, séparés d'environ 0.336 nm le long de la direction de leur normale. Le graphite représente une structure lamellaire constituée d'un empilement de feuillets, voir figure 1.1. Chaque feuillet est constitué d'atomes de carbone en état d'hybridation sp^2, formant un réseau hexagonal de paramètres de maille 0.243 nm, la longueur de liaison C-C étant de 0.142 nm, cette structure cristalline est cohérente avec le groupe d'espace (P_{63}/mmc) et a quatre atomes de carbone par unité de cellule, le graphite hexagonale est la forme cristalline stable, Il possède des propriétés thermiques et électriques très anisotropes. Les liaisons entre les atomes de carbone dans le graphène confèrent une grande vitesse de propagation aux phonons dans la direction parallèle du plan, il possède ainsi une conductivité thermique d'environ $400 W m^{-1} K^{-1}$, cette dernière chute à $5 W m^{-1} K^{-1}$ dans la direction perpendiculaire [11], Quant à sa conductivité électrique, elle est assurée par la délocalisation des électrons sur l'ensemble du plan et atteint $1,7 \times 10^5 S m^{-1}$ dans la direction du plan et chute pareillement dans la direction perpendiculaire à $7 \times 10^4 S m^{-1}$ [12].

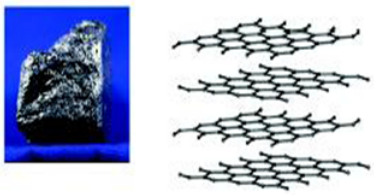


FIGURE 1.1 – Structure du graphite hexagonal(ici avec quatre feuillets de graphène)[1].

Le diamant

qui est une forme plus rare que le graphite, se forme dans des conditions de hautes températures et de pressions ($1400°C$ et $6GPa$ respectivement), Le diamant est la forme la plus compacte du carbone, il possède une structure sp^3 formant un réseau cubique à faces centrées,voir figure 1.2 . Cette structure lui attribue la plus grande dureté et la conductivité thermique la plus élevée de tous les matériaux d'origine naturelle, d'environ $2200Wm^{-1}K^{-1}$ [13], le diamant est un isolant électrique, car il possède une grande bande interdite d'environ $5,4eV$ [14]. L'utilisation du diamant est très variée, en plus de son utilisation dans la joaillerie, on le trouve dans l'industrie comme un outil de polissage ou de découpe en raison de ses propriétés mécaniques.

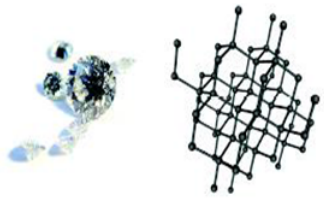


FIGURE 1.2 – Structure du Diamant [1]

1.3.2 Les nouvelles formes de carbone

Les fullerènes et dérivés

En 1985, R.Smalley, R.Curl et H.Kroto ont découvert une nouvelle forme d'organisation du carbone, Cette nouvelle structure sphérique est composée alternativement d'hexagones et de pentagones. La structure la plus connue des fullerènes est le C_{60} , ressemblant à un ballon de football, elle est constituée de 60 atomes de carbone voie, chaque atome est liée à trois autres par une liaison sp^2 , Cette molécule renfermée sur elle-même comme une cage a la forme d'un icosaèdre tronqué dont tous les sommets sont occupés par des atomes de carbone. Sa structure est alors constituée de 12 pentagones et de 20 hexagones d'un diamètre extérieur d'environ $7\mathring{A}$ [8],voir figure 1.3. Les fullerènes ont une faible résistivité électrique et peuvent devenir des supraconducteurs lorsqu'ils contiennent certains matériaux alcalins tels que le potassium ou le rubidium [15],ils possèdent aussi un module d'incompressibilité supérieur à celui du diamant [16].

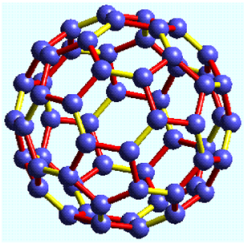


FIGURE 1.3 – FullerèneC_{60}

Nanotubes de carbone

Un nanotube de carbone est composé d'un ou plusieurs feuillets de graphène enroulés , suivant une rayon de courbure nanométrique,de façon à former une structure cylindrique. L'angle d'enroulement du feuillet de graphène,appelé hélicité θ , fixe la structure du nanotube [17], voir figure 1.4. L'orientation des motifs hexagonaux de carbone par rapport à l'axe du tube, fixe la structure du nanotube et permet de caractériser les différents types de nanotubes.

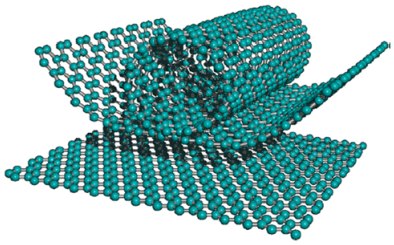


FIGURE 1.4 – Représentation schématique de l'enroulement d'un feuillet de graphène pour obtenir un NTC.

Ainsi trois principaux types d'arrangements seront distingués voir figure 1.5. :
- Lorsque les motifs hexagonaux de carbone décrivent un cercle perpendiculaire à l'axe du tube, le NTC a une structure de type « zigzag ».
- Pour des motifs hexagonaux de carbone alignés parallèlement à l'axe du tube ,on dit que le NTC a une structure de type « armchair » ou « chaise ».
- Lorsque les cycles forment une hélicité intermédiaire entre zigzag et armchair. Le Nanotube est alors qualifié de «chiral » ou « hélicoïdal ».

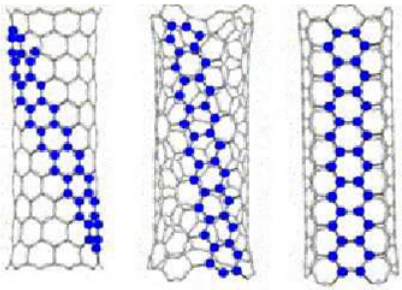


FIGURE 1.5 – Représentation des trois types de tubes

Il existe 2 type se nanotube carbone :

nanotubes mono-feuillets ou mono-parois (SWNT)

Ce genre de nanotubes de carbone a été découvert en parallèle par les deux savants Béthune et al [18] Iijima et Ichihashi en 1993 .un nanotube de carbone mono-feuillet (single-wall carbone nanotubes SWNT) est une feuille de graphène enroulée sur elle-même et qui peut être fermé à ses deux extrémités par une demi-molécule de fullerène (extrémités conique , polygonales ou sphériques). les NTCs mono-feuillet se regroupent lors de leur synthèse sous forme de fagots , aussi appelés

faisceaux, à la manière des cordes . Dans chaque faisceau , les tubes s'empilent de façon compacte et constituent un arrangement périodique de symétrie triangulaire comme schématiséleur nombre peut atteindre plusieurs dizaines dans un faisceau , voir figure 1.6.

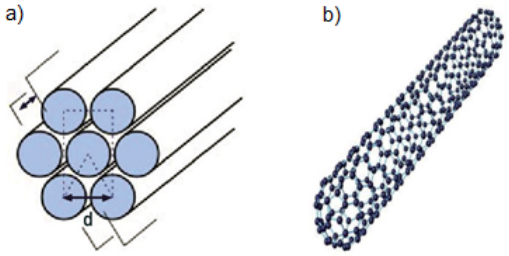


FIGURE 1.6 – Gauche a) :Faisceau de nanotubes de carbone mono-feuillet) Droite b) : nonotube mono-feuillet).

Les nanotubes multi feuillets (MWNT)

L'observation que l'expérience initiale de Tal Iijima concernait Les nanotubes multi-feuillets également appelés multi-parois ou multicouches (multi-wall carbone nanotubes –MWNT). Expérimentalement par Iijima et son groupe au laboratoire NEC et par Béthune et ses collègues du laboratoire IBM Almaden [18] [19], sont constitués de plusieurs feuillets de graphène (de 2 à 50) enroulés les uns autour des autres, On distingue ainsi les nanotubes de carbone bi parois ou Double-Walled carbone Nanotubes (DWNTs) ne possédant que deux parois et représentant ainsi une forme de NTCs entre les SWNTs et les MWNTs ,voir figure 1.7.

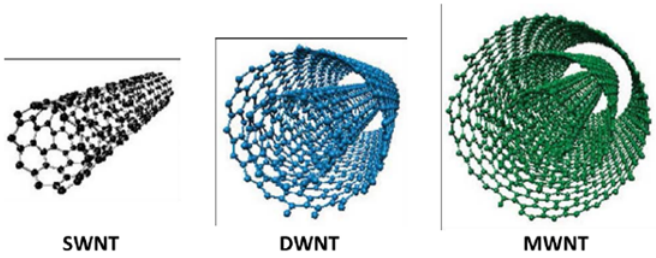


FIGURE 1.7 – Représentation des différents NTCs synthétisés, à savoir les NTCs mono parois (SWNTs), bi parois (DWNTs) et multi-parois (MWNTs).

Deux configurations différentes basés soit sur un emboitement de feuillets de graphène arrangés en cylindres concentriques dit en poupées russes a) , soit sur l'enroulement d'un unique feuillet de graphène en spirale dit en parchemin b),voir figure 1.8.

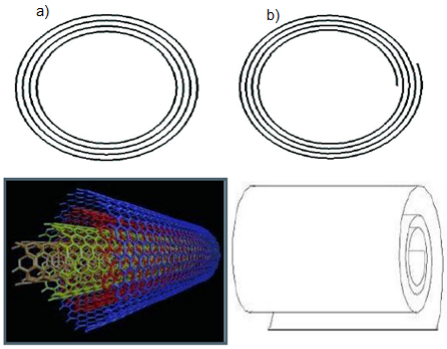


FIGURE 1.8 – structures possibles des MWNT. (Gauche a) :type poupée russe, Droite b) :type de rouleau de parchemin.)

1.4 les propriétés des NTCs

Les propriétés physiques remarquables des nanotubes de carbone ont été prédites théoriquement par plusieurs physiciens en même temps que leur découverte [20][21]. Avant d'aborder les propriétés extraordinaires de ces NTC, un rappel de leur structure particulière s'impose car leurs propriétés physiques en dépendent fortement.

1.4.1 Structure

on considère un plan de graphène fini et l'en enroule sur lui-même en joignant ses cotés opposés, on obtient un tube constitué de carbone à caractère sp^2 . La structure d'un nanotube de carbone peut être définie à partir d'un plan de graphène [22],voir figure 1.9,La façon dont est enroulé le NTC définit sa structure.

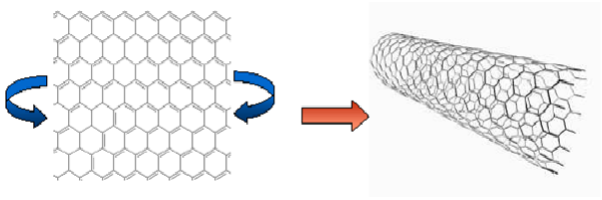


FIGURE 1.9 – Du plan de graphène au nanotube.

Les différentes façons d'enrouler le feuillet de graphène pour former un nanotube de carbone sont définies par un vecteur et un Angle d'hélicité, réspectivement notés $\vec{C_h}$ et θ. Le vecteur de chiralité est défini par la relation suivante : $\vec{C_h} = n\vec{a_1} + m\vec{a_2}$, avec n et m deux entiers positifs caractéristiques du tube, et $\vec{a_1}$ et $\vec{a_2}$ les deux vecteurs unitaires définissant le plan de graphène [23],voir figure 1.10 .

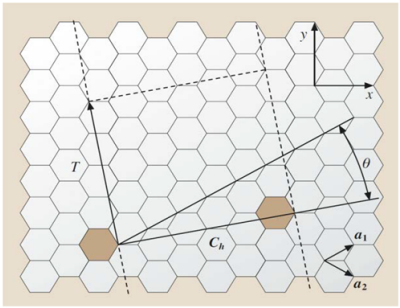


FIGURE 1.10 – Schéma représentant les vecteur $\vec{C}_h$ et angle θ d'hélicité ou de chiralité d'un nanotube de carbone, obtenu à partir de l'enroulement d'un feuillet de graphène.

À cause de la symétrie du plan de graphène, toutes les structures des nanotubes possibles peuvent être représentées par un enroulement de celui-ci avec un angle de chiralité compris entre 0° et 30°. Il existe trois structures différentes voir figure 1.11,voir figure 1.12.

* NTC de type zigzag : (n, 0) et $\theta = 0$.
* NTC de type armchair : (n ,n) et $\theta = 30$.
* NTC chiral : (n, m) et $0 < \theta < 30°$.

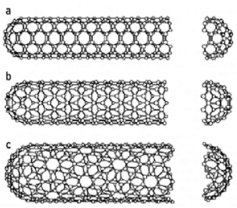


FIGURE 1.11 – :les trois structures différentes de NTC.

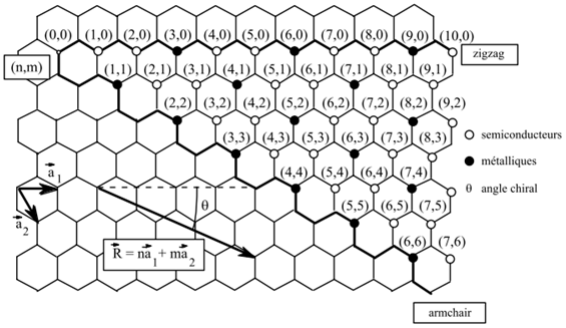


FIGURE 1.12 – :Les indices chiraux n et m définissent l'hélicité du nanotube de carbone[2]

D'autre part, le diamètre des NTCs, l'hélicité peut être calculé à partir du vecteur d'hélicité, à partir du couple (n,m), suivant les formules suivantes : Vecteur $\vec{C_h}$:

$$\|\vec{C_h}\| = a\sqrt{n^2 + m^2 + nm}$$

L'angle chiral θ est donné par :

$$\theta = arctan\frac{\sqrt{3}m}{(m+2n)}$$

Diamètre du nanotube :

$$d_t = a\frac{\sqrt{n^2+m^2+mn}}{\pi} = a_{c=c}\frac{\sqrt{3}\sqrt{n^2+m^2+mn}}{\pi}$$

Sachant que $a_(c = c)$ correspond à la longueur de la liaison entre deux atomes de carbone d'un NTC ($a_{c=c} = 1,42\mathring{A}$). Le diamètre des NTCs est compris entre 0,4 nm et quelques dizaines de nanomètres, en fonction du nombre de parois qu'ils possèdent, et leurs longueurs sont de l'ordre de la centaine de nanomètres à quelques microns.

Longueur de la maille élémentaire :

$$l = a_{c=c}\frac{\sqrt{3}\sqrt{n^2+m^2+mn}}{d_R}$$

Où $d_R = PGCD(2m + n, 2n + m)$

Nombre d'atomes par maille :

$$N = 4\frac{(n^2+m^2+nm)}{d_R}$$

1.4.2 Propriétés électriques

Les propriétés électroniques des NTCs dépendent fortement de leur angle d'enroulement et leur diamètre, L'orientation des motifs hexagonaux de carbone par rapport à l'axe du tube détermine le comportement métallique ou semi-conducteur théorique des SWNT [24]. Tous les NTCs de configuration « Armchair » sont métalliques, alors que les NTCs de types « Zigzag » ou «chiraux » sont soit semi-conducteurs soit métalliques. Dans le cas des SWNTs, on retrouve 2/3 de NTCs semi-conducteurs pour 1/3 de NTCs métalliques [25]. Avec les MWNTs, chacun des feuillets peut présenter des propriétés électriques différentes (soit semi-conductrice, soit métallique).Les nanotubes de carbone peuvent également transporter des densités de courant remarquables , voisins de $10^9 A.cm^2$ donc 100 fois supérieures à celles transportées par les métaux couramment utilisés tels que le cuivre ou l'argent [26]. Du fait de leur structure électronique unidimensionnelle, le transport électronique est dit balistique sur de longues distances dans les NTCs [27],[28]. D'après ces auteurs, l'électron traverse le NTC (selon l'axe) sans subir de collisions et sans dissiper d'énergie. Théoriquement, en tenant compte du transport balistique, un nanotube aurait une résistance minimale de $\frac{h}{4e^2}$ soit$6,5k\Omega$ (h : constante de Planck, e : charge d'un électron), indépendamment de sa longueur [29].

La conductivité électrique des nanotubes de carbone augmente avec la longueur du nanotube, alors que la conductivité d'un fil de cuivre n'augmente pas avec la longueur, mais avec son diamètre.La conductivité électrique des NTC devient supérieure à celle du cuivre (à diamètre équivalent), pour des longueurs supérieures à $10\mu m$. La résistivité électrique des NTCs sont de :

- 10^{-3} à 10^{-4} Ωcm (un record pour une molécule unique) pour les nanotubes de carbone mono-feuillet métalliques.
- 10 Ωcm pour les nanotubes de carbone mono-feuillet semi-conducteurs.
- 10^4 Ωcm pour les nanotubes de carbones multi-feuillets.

Les nanotubes de carbone mono-feuillet possèdent de meilleures caractéristiques électriques que les multi-feuillets en raison notamment des interactions électriques, de type Van der Waals, qui surviennent entre les différents feuillets de graphène [17].

1.4.3 Propriétés Mécaniques

Le nanotube de carbone bénéficie d'une tenue mécanique supérieure à celle du graphite : le module d'Young d'un nanotube multi-feuillets a été calculé comme étant jusqu'à 1,6 fois plus important que celui d'une fibre monocristalline de graphite [17],Leur résistance aux déformations, sans modification structurale, s'est révélée 100 fois supérieure à celle de l'acier, à section égale, avec une masse 6 fois plus faible [30].Les NTCs sont dotés d'une grande flexibilité, les SWNTs pouvant subir des déformations de flexion importantes et réversibles jusqu'à un angle critique de 110° [31], ainsi que d'une dureté supérieure à celle du diamant dans certains cas [17].

1.4.4 Propriétés Thermiques

Généralement le graphite et le diamant sont connus comme étant d'excellents conducteurs thermiques à température ambiante, présentent des conductivités thermiques comprises entre 400 et $2200 W m^{-1} K^{-1}$.Théoriquement, pour un SWNT isolé et dépourvu de tout défaut (lacunes, impuretés etc..), une dissipation thermique est évaluée à $6600 W m^{-1} K^{-1}$dans le sens longitudinal à température ambiante [32]. Leur tour ont calculé une conductivité thermique longitudinale peut chuter jusqu'à$2980 W m^{-1} K^{-1}$, lorsque le modèle de calcul tient compte de défauts au sein du NTC [33]. Ces valeurs théoriques sont voisines des valeurs expérimentales enregistrées par Small et al [34], Ainsi, Kim et al. [35] ont mesuré une conductivité thermique d'environ $3000 W m^{-1} K^{-1}$ pour un nanotube multi-feuillet isolé de 14nm de diamètre, Pop et al. [36] et Fujii et al. [37] ont mesuré respectivement$3600 W m^{-1} K^{-1}$ et$2000 W m^{-1} K^{-1}$ pour un nanotube mono-feuillet isolé de 2,4nm et 9,8nm de diamètre.

Hone et al. [38] ont mesuré la conductivité thermique d'un tapis de NTC mono-paroi alignés. Cette conductivité thermique qui n'excède pas$250 W m^{-1} K^{-1}$.dans l'axe des NTC, reste toutefois supérieur à la conductivité d'un tapis, de nanotubes multi-parois mesurée par Yang et al. entre 15 et $200 W m^{-1} K^{-1}$. D'autres valeurs de conductivité, plus faibles encore et voisines de$25 W m^{-1} K^{-1}$, ont été enregistrées par Yi et al. [39] pour des faisceaux de MWNT.

En effet, la conductivité thermique des nanotubes de carbone, à l'instar du graphite et du diamant, est régie par le transport des phonons à toutes les températures, et elle est proportionnelle à Cv^2l, (C :la chaleur spécifique, v :la vitesse du son et l : le libre parcours moyen des phonons) [40].

1.4.5 Propriétés biomédicales

Un grand intérêt a été porté aux NTCs ces dernières années dans les domaines de la biologie et de la recherche médicale. Des composés très attrayants pour les biocapteurs pour la détection de biomolécules [41]. Ainsi,les biocapteurs à base de NTCs développés jusque-là permettent de détecter des protéines , du glucose,de l'ADN ,de l'urée .

1.4.6 Propriétés d'émission de champ

Les nanotubes de carbone sont capables d'émettre des électrons par effet tunnel via leur pointe lorsqu'ils sont placés parallèlement aux lignes d'un champ électrique. Avec des tensions relativement faibles, il est possible de générer à leurs extrémités des champs électriques colossaux, capables d'arracher les électrons de la matière et de les émettre vers l'extérieur [42]. Cette émission est extrêmement localisée (à l'extrémité du tube) et peut servir à envoyer des électrons sur un endroit bien précis. L'émission électronique des nanotubes de carbone (assemblés sous forme de films) est de :

— 10^7 A/cm^2 pour les nanotubes de carbone mono-feuillet ,
— de 10^6 à $10^8 A/cm^2$ pour les nanotubes de carbone multi-feuillets

1.5 les méthodes de synthèses

Il existe deux principales méthodes de synthèse des NTCs :

— la méthode physique « haute température » : c'est la première méthode utilisée pour la synthèse des NTC,On distingue principalement deux techniques :
+ arc électrique.
+ ablation laser.
— La méthode chimique « moyenne température» : c'est(CVD(ou CCVD pour« Catalytic » Chemical Vapor Deposition) et ses dérivés).

1.5.1 Voie de synthèse à haute température

Les techniques « haute température » sont basées sur la condensation d'atomes de carbone générés par l'évaporation d'une source de carbone sous forme solide (graphite). Cette réaction est réalisée dans une enceinte où règnent un fort gradient de température et une pression partielle d'un gaz inerte tel que l'hélium ou l'argon. Les températures mises en jeu sont de l'ordre de $3000 - 4000°C$ ou plus, et sont proches de la température de sublimation du graphite.

1.5.2 Arc électrique

Cette méthode a été initialement développée pour la synthèse en grand quantité de fullerènes C_{60} par Kraschmer et al [43], historiquement elle a été aussi utilisée par Iijima dans la découverte des premiers nanotubes de carbone en 1991 [9]. Cette technique est établi un fort courant électrique $(80 - 100A)$ à travers deux électrodes de graphite espacées de quelques millimètres (1mm) plongées dans une atmosphère inerte (He,Ar). Durant le passage du courant, un arc électrique s'établit entre l'anode

et la cathode permet d'élever localement la température à des milliers de degrés Celsius ($> 3000°C$) : le carbone est alors vaporisé au niveau de l'anode. Il se condense ensuite sur la cathode.La suie ainsi obtenue est formée de fines particules métalliques, du carbone amorphe et des nanotubes de carbone sous forme d'amas,voir figure 1.13.

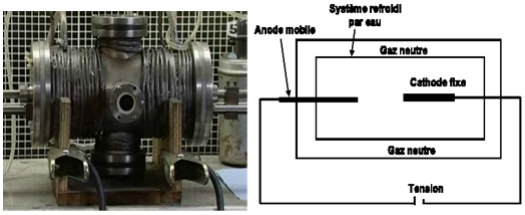


FIGURE 1.13 – :Production de nanotubes par la méthode de l'arc électrique.

En utilisant des électrodes en graphite pur, seuls des MWNT sont obtenus en très faible quantité (Iijima 1991). En 1993, Béthune et al.[18] L'ajout de catalyseurs métalliques dans l'anode voir figure 1.14 ont observé que l'utilisation des électrodes de graphite imprégnées par des métaux de transitions (Fe, Ni, Co) permettent d'obtenir un nouveau type de nanotube de carbone avec un seul feuillet (SWNT)[44].

Ce procédé est simple et peu coûteux mais les processus qui se déroulent lors de la synthèse sont complexes.

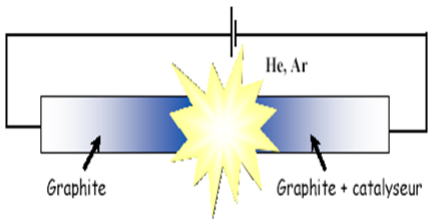


FIGURE 1.14 – :Schéma de principe de l'arc électrique.

1.5.3 Ablation laser

Guo et al sont les premiers à réussir la synthèse des SWNT par la méthode Ablation laser en 1995[45], dans un four chauffé à une température avoisinant les $1200°C$, consiste à bombarder une cible de graphite avec un rayonnement laser de forte énergie (continu ou pulsé), Les produits carbonés obtenus par la sublimation du graphite sont ensuite entraînés par un flux de gaz inerte et récupérés au niveau d'un collecteur en cuivre refroidi à l'eau,voir figure 1.15. C'est les cibles en graphite pur permet la synthèse des MWNT alors que les cibles imprégnées par des nanoparticules métalliques favorisent la synthèse des SWNT [46]. Ablation laser obtenu un grand rendement presque 50% du carbone se transforme en SWNT[45], et une production en continu jusqu'à $1,5gh^{-1}$ [47]. Elle est très coûteuse parce qu'elle nécessite des sources laser de grande puissance (environ$1kW$).

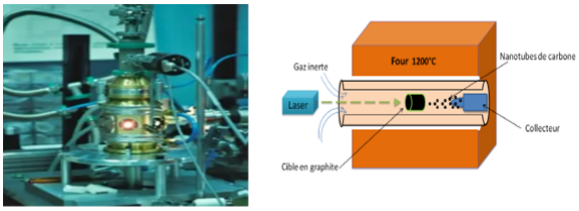


FIGURE 1.15 – :Schéma de principe d'un dispositif par ablation laser.

1.5.4 Voie de synthèse à moyenne température

CVD ou CCVD pour « Catalytic » Chemical Vapor Deposition)

Il existe d'autres méthodes de synthèse des nanotubes de carbone comme la CVD (par dépôts chimiques en phase vapeur), Cette technique a été initialement développée pour la production de fibres de carbone dès le début des années 70, puis adaptée pour la première fois pour la production des nanotubes de carbone par José-Yacman et al. en 1993 [48]. Le principe CCVD de synthèse des NTCs est basé sur la décomposition d'un gaz carboné sur des nanoparticules métalliques dans un four porté à une température comprise entre 600 à 1200°C [58], selon la nature du gaz,voir figure 1.16. Le carbone libéré par la décomposition du gaz précipite à la surface de la particule [49]. Cette condensation génère la croissance de structures tubulaires graphitisées. Le gaz carboné peut être le monoxyde de carbone (CO)ou un hydrocarbure comme le méthane (CH_4) , l'acétylène (C_2H_4), l'éthylène (C_2H_4) et le propylène (C_3H_6) . Des synthèses ont également été réalisées à partir de sources carbonées liquides comme le benzène (C_6H_6) ou l'éthanol (EtOH, C_2H_5OH) . Les types de catalyseur sont également très variés en forme et composition. La décomposition s'effectue à l'aide de précurseurs sous forme de nanoparticules à base de métaux de transition comme le fer (Fe), le cobalt (Co) et le nickel (Ni), ou de mélanges de nanoparticules métalliques Co/Mo , Fe/Co , Co/Ni . La croissance des nanotubes dépend

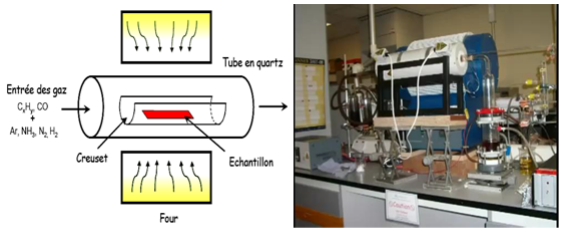


FIGURE 1.16 – : Schéma d'un réacteur CVD pour la croissance des (NTC).

aussi de la taille des particules catalytiques (Co, Ni, Fe, Pd), de la température du four, de la pression du débit des gaz et de la nature du support (Si_3 N_4, SiO_2, MgO, TiN ...) sur lequel sont localisées les particules métalliques [50]. Le diamètre des nanotubes semble lié à la taille de la particule catalytique dont ils sont issus.[51] . La CCVD permet la synthèse de grandes quantités de nanotubes de carbone (de l'ordre du kg), avec un meilleur contrôle de l'alignement et des paramètres de forme (diamètre et longueur).aussi un meilleur rendement avec un faible coût. Permet-

tant de synthétiser des SWNTs ou des MWNTs, selon les conditions opératoires. la PECVD (une méthode CVD particulière ; assistée par plasma) ainsi que Le procédé HiPCO (High Pressure dismutation of CO : décomposition sous haute pression de CO), Il existe d'autres méthodes de synthèse, qui ne seront pas détaillées comme combustion d'hydrocarbures , par décharge électrique en solution aqueuse [52], par rayonnement solaire [53], etc.. . .

1.6 Application des NTCs

Dans cette partie, nous présentons les principaux domaines d'applications des nanotubes de carbone selon leurs propriétés électriques, thermiques, mécaniques exceptionnelles : L'intégration de nanotubes de carbone en microélectronique a débuté en 1998 avec la réalisation des premiers transistors à base de NTC [54]. Ainsi, des diodes de dimensions nanométriques ont pu être fabriquées en utilisant la propriété remarquable de semi-conductivité des NTC. En dopant la moitié d'un SWNT semi-conducteur de type p par du potassium, Zhou et al. [55] on réussi la création d'une jonction $p - n$ sur un seul nanotube. Les nanotubes de carbone utilisés comme émetteurs ou générateurs d'électrons semblent parfaitement adaptés pour concevoir la nouvelle génération d'écrans plats de télévision à effet de champ [56]. À cause d'une géométrie creuse, Il ya de bonnes propriétés mécaniques, plusieurs d'études se sont intéressées à l'utilisation de ces nanotubes de carbone dans le stockage des gaz et en particulier l'hydrogène, les NTC pourraient stocker jusqu'à 8% de leur masse en hydrogène[57] [58], surtout après L'annonce du laboratoire national des énergies renouvelables américain (NREL). Actuellement, les pointes de microscope à force atomique ont été réalisées à base de silicium L'équipe de Cheung et al. [59], sont remplacer les points de silicium par des pointes NTC et réussi expérimentalement, à l'aide d'un AFM utilisant des pointes en NTC, de sonder avec une bonne résolution la structure des protéines alors que les autres types de pointes ne distinguaient pas ces structures.

1.7 les défauts

Les applications technologiques sont plusieurs , utilisé dans les secteurs industriels innovants, tels que l'industrie cosmétique (écrans solaires, rouges à lèvres, pâtes dentifrices. . .), l'industrie automobile (peintures, pneumatiques, lubrifiants, pare-brise. . .), le secteur de la santé (pharmacocinétique et biodisponibilité des médicaments, matériels prothétiques, imagerie moléculaire. . .), [60],les risques liées à différentes utilisation des NTCs , concerne la toxicité de ces nanoparticules in vivo et danger sur la santé humaine et sur l'environnement[61], cependant les propriétés toxicologiques des nanotubes de carbone sont directement corrélées à leurs caractéristiques physico-chimiques, L'appareil respiratoire constitue la voie majeure de pénétration de nanotubes de carbone dans l'organisme humain...[62], Les quelques données disponibles jusqu'ici montrent qu'elles se répartissent dans les voies respiratoires en fonction de leur diamètre. Toutefois l'appareil respiratoire semble présenter une barrière efficace et le passage des nanoparticules entre les poumons et le sang serait limité. La plupart des donnés de la toxicité des nanotubes de carbone est estimée à partir de données expérimentales chez l'animal, Les SWNTC riches en fer

ont plus de propriétés oxydatives que la forme purifiée de SWNTC pauvres en fer [63]. Seulement il est admis, de façon consensuelle, que seule la forme non purifiée des NTC contient du fer, inducteur de stress oxydant. Quelques études semblent montrer l'apparition de dommages au niveau de l'ADN après incubation de cellules avec des NTC , D'autres études effectuées chez des souris exposées à des MWNT tentent d'évaluer les effets des NTC par inhalation et par injection [64], [65], [66]. Les différents auteurs rapportent des réactions inflammatoires avec formation de granulomes. Une formation similaire de granulomes a été observée chez des rats instillés par voie intra trachéale avec des SWNTC, où l'inflammation disparaît après 3 mois [67]. Cette réaction inflammatoire s'observe d'autant plus lorsque les NTC sont mal dispersés et forment des agrégats de taille micrométrique. En effet, le diamètre et la longueur des NTCs avaient une influence sur leur toxicité. En effet, plus les NTCs sont longs et plus les réponses inflammatoires sont importantes [61]. Pour ce qui est du diamètre, les SWNTs provoquent plus d'effets toxiques que les DWNTs [68] et les MWNTs [69].

Chapitre 2

Théorie d'élasticité

2.1 Introduction

L'étude et l'analyse des vibrations (ou signaux) ont pris, au cours des dernières années, un essor considérable en raison du développement de techniques plus en plus sophistiquées et de besoins les plus variés dans différents domaines : mécanique (transports, machines...), acoustique, optique, transmission, etc.

Les préoccupations actuelles peuvent être, très schématiquement, divisées en trois catégories.

La première théorique a trait au calcul dynamique des structures en tant que prolongement de la résistance des matériaux et de la mécanique des milieux continus. S'il est possible dans les cas simples, c'est-à-dire pour un nombre restreint de problème, de calculer le comportement de celles-ci et leur isolation pour limiter les nuisances, dans la majorité des cas, les méthodes analytiques deviennent insuffisantes pour obtenir, par exemple, les fréquences de résonance d'ordre élevé de systèmes continus. Ainsi le calcul des premiers modes propres d'une poutre d'axe rectiligne, de section constante, encastrée à une extrémité, libre à l'autre, ne pose pas la moindre difficulté ; par contre, si on lui associe une ou plusieurs autres poutres de directions et de sections différentes, les solutions deviennent quasi impossibles à trouver. Et pourtant, dans de nombreux cas, il faut absolument connaitre ces fréquences car, pour raisons économie de matière, les constructions sont de plus légères donc appelées à vibrer pour de basses fréquences, en générale situées dans des zones dangereuses pour la structure ou son environnement.

La deuxième concerne une aide extrêmement précieuse, bien que relativement récente, apporté aux bureaux d'études par la mise sur le marché d'ordinateurs et de micro-ordinateurs associés à des progiciels très performants fondés sur la méthode des éléments finis, d'un cout non prohibitif, rendant la partie calcul aisée. Si dans la plupart des cas les résultats sont valables, la plus grande prudence doit être de rigueur lors de l'exploitation des résultats, certains progiciels estompant, par exemple, des modes propres intermédiaires. Cela amène à tempérer, lors de la prise en main de l'outil informatique, l'ardeur des nocives pour ces méthodes séduisantes de calcul, si elles permettent de prévoir le comportement de structures impossibles à envisager avec la seule aide de la calculette, l'opérateur doit rester extrêmement vigilant et critique vis-à-vis des valeurs affichées à l'écran, d'autant plus qu'il n'a pas eu à intervenir, une fois la modélisation terminée, le déroulement du programme étant complètement aveugle. Dans certaines circonstances, cette stratégie du presse-

bouton peu réserver de bien désagréables surprises.

La dernière est d'ordre expérimental : en effet, certains progiciels calculent les modes propres d'ordre élevé avec des erreurs intolérables, aussi l'ultime recours reste l'expérimentation ; la mesure réclame, elle aussi, de multiple connaissances et une extrême rigueur. Il ne suffit plus de brancher, étalonner et lire sur un écran.

2.2 Le milieu continu

Si l'on regard la matière de « très prés » (échelle nanoscopique), la matière est granulaire, faite d'atomes. Mais à l'œil nu (donc en se plaçant à notre échelle), un objet solide semble continu, c'est-à-dire que ses propriétés semblent varier progressivement.

L'hypothèse des milieux continus consiste à considérer des milieux dont les propriétés caractéristiques, c'est-à-dire celles qui nous intéressent densité, élasticité, etc. sont continues.

Alors le modèle de continuum est basé sur les modèles traditionnels de technologie tels que des poutres.

Une fois appliqué aux nanotubes, ce modèle traite les molécules comme matériel continu avec une géométrie définie et des propriétés matérielles isotropes (par exemple module de Young).

Pour simplifier les essais on admet que les matériaux ont les mêmes propriétés mécaniques en tous points (homogènes) et dans toutes les directions (isotropes).

2.3 Evaluation de propriété matérielle de nanotubes de carbone par l'intermédiaire d'élasticité nonlocale

Erigen [70] [71] a proposé l'élasticité nonlocale pour expliquer l'effet d'échelle dans l'élasticité en assumant l'effet à un point de référence pour être un fonctionnel du champ de contrainte à chaque point dans le corps. De cette façon, la taille d'échelle interne a pu être considérée dans les équations constitutives simplement comme paramètre matérielle.

L'application de l'élasticité nonlocale en micro- nano-matériel a suscité beaucoup d'attention parmi la communauté de nanotechnologie récemment. Elle a été bien reconnue que les nanotubes de carbone (CNTs) montrent les propriétés mécaniques exceptionnelles.

La recherche intensive sur l'application de l'élasticité nonlocale pour CNTs a conduit. Le potentiel d'appliqué la théorie élastique nonlocal de poutre au micro et des nano-matériels ont été essayés la première fois par Peddison et autres [72], dans lesquels la version nonlocal de la théorie de poutre d'Euler-Bernoulli a été formulée et appliquée pour étudier les poutres.

L'application de l'élasticité nonlocal était recommandent dans l'indication d'effets d'échelle pour des nano-matériels.

L'effet de petite taille sur la relation de dispersion de propagation des ondes de CNTs a été explicitement indiqué [73][74] pour un nombre d'onde et de diamètre différent de CNT par l'intermédiaire des théories élastiques nonlocal de poutre.

Les propriétés matérielles de CNTs, telles que la rigidité de recourbement, le module de cisaillement, on s'attend à ce que l'élasticité nonlocal puisse être appliquée pour indiquer l'effet d'échelle sur les propriétés matérielles de CNTs [75].

2.4 La théorie des milieux continus

2.4.1 La théorie d'Euler Bernoulli

La théorie des poutres, ou théorie d'Euler-Bernoulli, est un modèle utilisé dans le domaine de la résistance des matériaux.

Le terme de « poutre » désigne un objet dont la longueur est grande par rapport aux dimensions transverses (section fine). Une poutre est un élément de structure utilisée pour la construction dans les bâtiments, les navires et autres véhicules, et dans la fabrication de machines. Cependant, le modèle des poutres peut être utilisé pour des pièces très diverses à condition qu'elles respectent certaines conditions.

La paternité de la théorie des poutres est attribuée à Galilée, mais des études récentes indiquent que Léonard de Vinci l'aurait précédé. De Vinci 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 obtient la distribution correcte.

Ce sont Leonhard Euler et Jacques Bernoulli qui émirent la première théorie utile vers 1750, alors que Daniel Bernoulli, le neveu du précédent, écrivit l'équation différentielle pour l'analyse vibratoire. À cette époque, le génie mécanique n'était pas considéré comme une science, et on ne considérait pas que les travaux d'une académie des mathématiques puissent avoir des applications pratiques, et on continua à bâtir les ponts et les bâtiments de manière empirique.

Ce n'est qu'au XIXe siècle, avec la Tour Eiffel et les grandes roues, que l'on démontra la validité de la théorie à grande échelle.

Principe de modélisation

On nomme « poutre » un solide engendré par des surfaces, appelées « sections droites », telles que :

Les centres de gravité des sections forment une courbe continue et dérivable, appelée « courbe moyenne» ; son rayon de courbure est grand devant sa longueur ;

Les sections sont perpendiculaires à la courbe moyenne ; elles varient de manière continue et « lente » ;

La dimension des sections est petite devant la longueur de la courbe moyenne ; le matériau est homogène et isotrope.voir figure 2.1

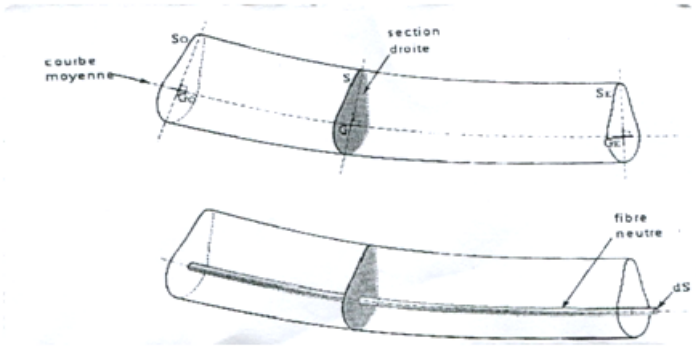


FIGURE 2.1 – Définition des termes : poutre de courbe moyenne G_0G_E, de section droite S, et fibre neutre de section dS

Si le rayon de courbure est faible ou que la section varie brutalement, il faudra considérer les concentrations de contrainte.

Dans les cas les plus simples, surtout celui des poutres au sens « élément de structure » (fer, tube,...) la courbe moyenne est droite et la section droite est constante.

On nomme « fibre » un volume généré par une petite portion dS de la section droite suivant une courbe parallèle à la courbe moyenne. On nomme « fibre neutre » la fibre générée par la courbe moyenne elle-même.

Pour simplifier, sauf indication contraire, nous dessinerons des poutres dont la courbe moyenne est une droite avant déformation.

Hypothèse pour les calculs

- Elastique linéaire : Un matériau est dit élastique s'il retrouve entièrement sa forme ou son volume après avoir subi un cycle de charge/décharge quelconque.voir figure 2.2
  Pour la courbe 1, le matériau n'est pas élastique, puisqu'il ne revient pas dans sa configuration initiale après la décharge. Par contre, la courbe 2 caractérise un comportement élastique linéaire : la relation reliant F et U étant linéaire.
- Homogénéité : On supposera que tous les éléments de la matière, aussi petits soient ils, sont identiques. (Hypothèse non applicable pour le béton ou le bois).
- Isotropie : On supposera qu'en tout point et dans toutes les directions, la matière a les mêmes propriétés mécaniques. (Hypothèse non applicable pour le bois ou les matériaux composites).

Hypothèse des petites déformations (haut) : les sections droites restent planes et perpendiculaires à la courbe moyenne ;

Pour les grandes déformations (bas), les hypothèses ne sont plus respectées, les section droites deviennent gauches et ne sont plus perpendiculaires à la courbe moyenne.

La théorie des poutres est une application de la théorie de l'élasticité isotrope. Pour mener les calculs de résistance des matériaux, on considère les hypothèses suivantes : Hypothèse de Bernoulli : au cours de la déformation, les sections droites restent perpendiculaires à la courbe moyenne.

Les sections droites restent planes selon Navier-Bernoulli (pas de gauchissement).

L'hypothèse de Bernoulli permet de négliger le cisaillement dans le cas de la flexion : le risque de rupture est alors dû à l'extension des fibres situées à l'extérieur de la flexion, et la flèche est au moment fléchissant. Cette hypothèse n'est pas valable pour les poutres courtes. Le cisaillement est pris en compte dans le modèle de Timoshenko et Mindlin.

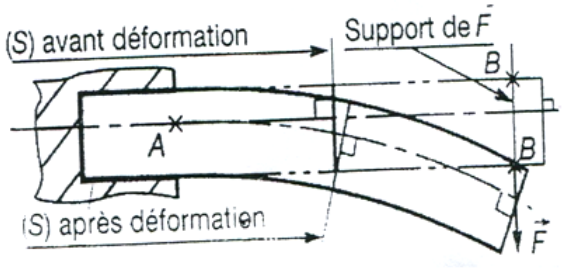


FIGURE 2.2 – : La déformation dans la poutre de Bernoulli.

2.4.2 La théorie de Timoshenko

La théorie de Timoshenko de poutre a été développée par le scientifique ukrainien Stephen Timoshenko au début du 20 ème siècle.

Le modèle prend en compte les effets de déformation, de cisaillement, de rotation et l'inertie. Ce qui convient pour décrire le comportement de poutres courtes, ou des poutres soumises à la haute fréquence d'excitation lorsque la longueur d'onde approche de l'épaisseur de la poutre.

L'équation est du 4 ème ordre, mais contrairement à la théorie de la poutre ordinaire,c'est-à-dire la théorie d'Euler-Bernoulli il y'a aussi un deuxième ordre spatial dérivés présents. Physiquement, en tenant compte de valeur ajoutée de manière efficace les mécanismes de déformation diminue la rigidité de la poutre, tandis que le résultat et une plus grande déformation sous une charge statique et la baisse prévue des fréquences propres pour un ensemble donné de conditions aux limites.

Ce dernier effet est plus marqué pour des fréquences plus élevées que la longueur d'onde est courte, et donc la distance entre des forces de cisaillement diminue.

Si le module de cisaillement de la poutre matériel approches infini et donc la poutre devient rigide en cisaillement- inertie de rotation, et si les effets sont négligés, la théorie de poutre de Timoshenko converge vers la théorie de poutre ordinaire.

Donc la théorie de poutre de Timoshenko est une prolongation de la théorie de poutre d'Euler Bernoulli à tenir compte de l'effet de la déformation transversale de cisaillement. Cette théorie plus de raffinage de poutre détendent l'acceptation de normalité des sections plates qui demeurent plates et normale à la ligne centrale déformée. La relaxation prend la forme de permettre une rotation additionnelle à la pente de recourbement, et admet ainsi une contrainte de cisaillement différente de zéro.

2.5 La différence entre la théorie d'Euler-Bernoulli et Timoshenko

Deux modèles mathématiques, le modèle de Timoshenko et le modèle d'Euler-Bernoulli, sont présentés.

Puisque la théorie de Timoshenko est évoluée que la théorie d'Euler-Bernoulli, on le connait pour être supérieur en prévoyant la réponse passagère de la poutre. La supériorité du modèle de Timoshenko est plus prononcée pour des poutres avec un bas allongement. On lui montre que l'utilisation d'un contrôleur basé par Bernoulli de supprimer la vibration de poutre peut mener à l'instabilité provoquer par l'excitation négligente des modes non modelés.

Dans la théorie d'Euler-Bernoulli, les déformations de cisaillement sont négligées, et les sections plates demeurent plates et normales à l'axe longitudinal. Dans la théorie de poutre de Timoshenko, les sections plates demeurent plates mais ne sont toujours plus normale à l'axe longitudinal.

La différence entre la normale à l'axe longitudinal et la rotation de section plate est la déformation de cisaillement. Ces relations sont montrées dans voir figure 2.3.

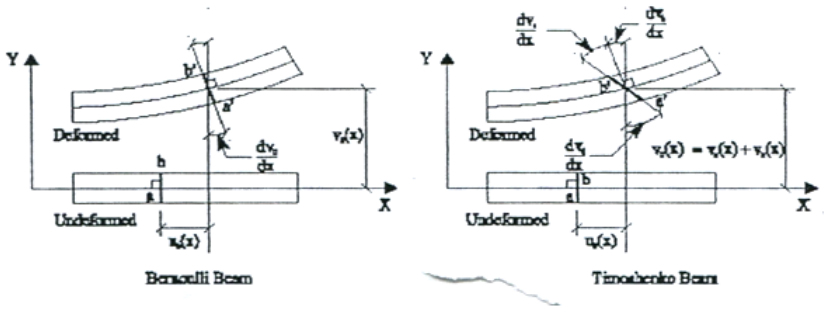


FIGURE 2.3 – : La différence entre la déformation dans la poutre de Bernoulli et de Timoshenko.

Il peut avoir dans voir figure 2.3 que dans la poutre d'Euler-Bernoulli la déformation à une section $\frac{dv_b}{dx}$ et juste la rotation due eu recourbement seulement, puisque la section plate demeure normale à l'axe longitudinal. Cependant, dans la poutre de Timoshenko la déformation de section est la somme de deux contributions : un est dû au recourbement $\frac{dv_b}{dx}$et l'autre est dû à la déformation de cisaillement$\frac{dv_s}{dx}$. En considérant une longueur infinitésimal de la poutre, suivant les indications de la voir figure 2.4, on le voit que la déformation de cisaillement dans la théorie de la poutre de Timoshenko $\frac{dv_s}{dx}$est identique que la contrainte de cisaillement liée au cisaillement pur.

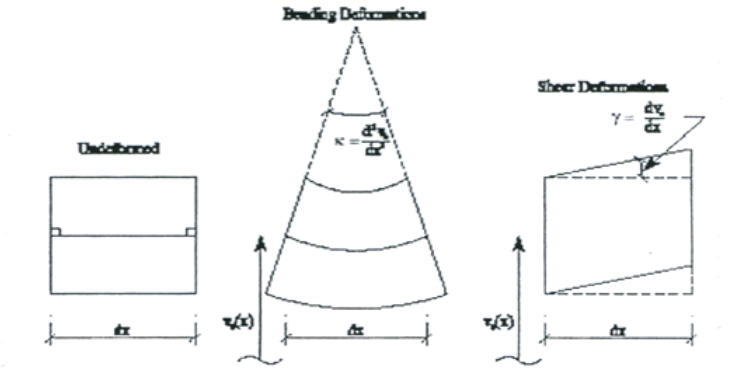


FIGURE 2.4 – : Longueur infinitésimale de poutre montrant la déformation de recourbement et de cisaillement.

Chapitre 3

Modèle nonlocal appliqué aux nanotubes de carbone

3.1 Équation du mouvement

Pour la théorie nonlocal de Timoshenko, la loi de Hooke de Nanotube en carbone peut être exprimée comme les formes différentielles partielles suivantes :

$$\sigma_x - (e_0 a)^2 \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} = E\varepsilon_x \tag{3.1}$$

$$\tau_{xz} - (e_0 a)^2 \frac{\partial^2 \tau_{xz}}{\partial x^2} = G\gamma_{xz} \tag{3.2}$$

où :

σ_x : La contrainte normale,

τ_{xz} : La contrainte de cisaillement,

ε_x : La déformation normale (extension),

γ_{xz} : La déformation de cisaillement transversal,

E : Module de Young ,

G : Module de cisaillement

$e_0 a$:Coefficient de l'effet à échelle réduite.

Les expressions de la déformation axiale et de la déformation de cisaillement sont[76] :

$$\varepsilon_x = z\frac{\partial \psi}{\partial x} \tag{3.3}$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x} - \psi \tag{3.4}$$

où :

w :le déplacement transversal,

ψ :la rotation a causé par le recourbement.

Pour le modèle de Timoshenko avec la contrainte thermique, la relation suivante peut être dérivée :

$$\frac{\partial S}{\partial x} = -N_T \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \tag{3.5}$$

$$\frac{\partial M}{\partial X} + S = 0 \tag{3.6}$$

où :

S :La force de cisaillement,

M :Le moment de flexion résultant,

N_T :La force thermique qui peut être exprimés comme :

$$N_T = -\frac{E\alpha T A_c}{1-2\upsilon} \tag{3.7}$$

où :

α :le coefficient de dilatation thermique,

T :le changement de température,

A_c :Le secteur (surface) en travers,

υ le coefficient de Poisson.

Le moment de flexion et la force de cisaillement peuvent être définis par :

$$M = \int_{A_c} z\sigma_x dA_c \tag{3.8}$$

$$S = \int_{A_c} \tau_{xy} dA_c \tag{3.9}$$

En multipliant l'équation (3.1) par zdA_c et en intégrant le résultat sur la surface A_c, on obtient :

$$\int_{A_c} z\sigma_x dA_c - (e_0 a)^2 \int_{A_c} z\frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} dA_c = E\int_{A_c} z\varepsilon_x dA_c$$

En remplaçant les équations (3.3), (3.8), on obtient :

$$\int_{A_c} z\sigma_x dA_c - (e_0 a)^2 \int_{A_c} z\frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} dA_c = E\int_{A_c} z^2\frac{\partial \psi}{\partial x} dA_c$$

Avec :$I = \int_{A_c} z^2 dA_c, \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} = \int_{A_c} z\frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} dA_c$ D'où

$$M - (e_0 a)^2 \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} = EI\frac{\partial \psi}{\partial x} \tag{3.10}$$

En intégrant l'équation (3.2), on obtient :

$$\int_{A_c} \tau_{xz} dA_c - (e_0 a)^2 \int_{A_c} \frac{\partial^2 \tau_{xz}}{\partial x^2} dA_c = \int_{A_c} G\gamma_{xz} dA_c$$

En remplaçant l'équation (3.9),$\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} = \int_{A_c} \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x^2} dA_c$ Donc on obtient :

$$S - (e_0 a)^2 \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} = KA_c G(\frac{\partial w}{\partial x} - \psi) \tag{3.11}$$

Où : $I = \int_{A_c} z^2 dA_c$ est le moment d'inertie et K le facteur de correction de cisaillement qui est employé pour compenser l'erreur due à la prétention constante de contrainte de cisaillement. Basé sur les équations. (3.6) et (3.10), la relation suivante peut être obtenue :

$$M = EI\frac{\partial \psi}{\partial x} + (e_0 a)^2(-\frac{\partial S}{\partial x}) \tag{3.12}$$

Substitution d'Eq. (3.5) dans Eq. (3.12), nous pouvons être obtenons :

$$M = EI\frac{\partial\psi}{\partial x} + (e_0a)^2(N_T\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}) \tag{3.13}$$

Basé sur Eqs. (3.5) et (3.11), il peut être dérivé cela :

$$S = KA_cG(\frac{\partial w}{\partial x} - \psi) + (e_0a)^2(-N_T\frac{\partial^3 w}{\partial x^3}) \tag{3.14}$$

Substitution d'Eq. (3.14) dans Eq. (3.5), nous pouvons obtenir :

$$kA_cG(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial\psi}{\partial x}) + (e_0a)^2(-N_T\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}) = -N_T\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \tag{3.15}$$

Basé sur Eqs. (3.6), (3.13) et (3.14), la relation suivante peut être dérivé :

$$EI\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + kA_cG(\frac{\partial w}{\partial x} - \psi) = 0 \tag{3.16}$$

Il peut observer qu'Eqs. (3.15) et (3.16) sont les équations de mouvement. Pour l'état de frontière articulé, la solution du nanotube en carbone peut être exprimée comme :

$$w = Wsin(\lambda x), \psi = \Psi cos(\lambda x) \tag{3.17}$$

oùW et Ψ sont les amplitudes de la déviation et de la pente,$\lambda = \frac{k\pi}{L}$ et$k$ un entier positif qui est lié à la modes de flambement.

Substitution d'Eq. (3.17) dans Eqs. (3.15) et (3.16), nous pouvons obtenir :

$$\left[(e_0a)^2\lambda^2 + 1\right]\lambda^2 N_T W + \lambda^2 KA_cGW - \lambda KA_cG\Psi = 0 \tag{3.18}$$

$$\lambda KA_cGW - (\lambda^2 EI + KA_cG)\Psi = 0 \tag{3.19}$$

Puis,la température critique avec la théorie nonlocal peut être dérivée comme :

$$T_{cr}^{non} = \frac{\lambda^2 kGI(1-2\upsilon)}{\alpha\left[(e_0a)^2\lambda^2 + 1\right](kA_cG + EI\lambda^2)} \tag{3.20}$$

En conséquence, la température critique de flambement peut être exprimée comme forme suivante [6][7] :

$$P_{cr} = \frac{T_{cr}^{non}}{I/\alpha A_cL^2} \tag{3.21}$$

Chapitre 4

Résultats et discussoins

4.1 Résultats et discussions

Les constantes matérielles utilisées dans le calcul sont le module de Young $E = 1TPa$, le rapport de Poisson $\nu = 0.3$, le module de cisaillement $G = E/[2(1+\nu)]$, le coefficient de cisaillement $k = 10/9$, et le coefficient de dilatation de température $\alpha = 1.1 \times 10^{-6}K^{-1}$ due à la haute température [3][7][77] [78]. Le facteur e_0a est habituellement considéré comme coefficient d'échelle simple qui est plus petit que 2.0 nanomètre pour les nanostructures [4] [75].

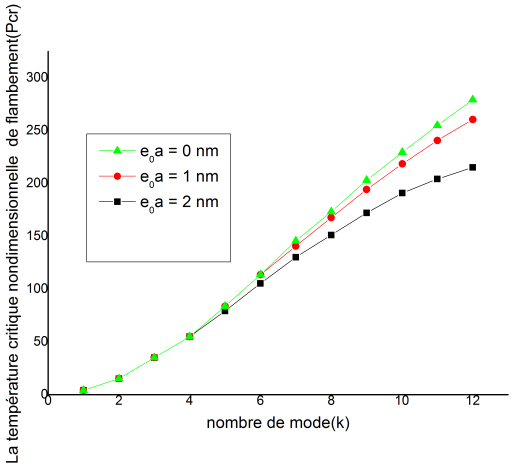


FIGURE 4.1 – :La relation entre la température critique nondimensionnelle de flambement (P_{cr}) et le nombre de mode (k) avec différent coefficients d'échelle (e_0a), la valeur de $L/d = 20$.

La relation entre la température critique de flambement (P_{cr}) et le nombre de mode (k) est présentée dans la figure 4.1, le rapport de la longueur au diamètreL/d est 20, Le coefficient d'échelle e_0a =0, 1 et 2 nm sont considérés. Les résultats des deux modèles (Euler-Bernoulli et Timoshenko) sont presque les mêmes pour les petites valeurs de k, la différence devient évidente avec l'augmentation de nombre de mode. Le modèle élastique classique (modèle local), qui ne considère pas les effets d'échelle, donnera une approximation plus élevée pour la température critique de flambement. Mais la théorie nonlocal présentera des résultats précis et fiables.

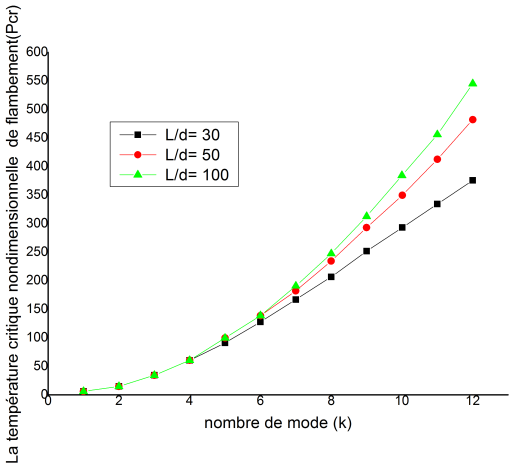


FIGURE 4.2 – :La relation entre la température critique nondimensionnelle de flambement (P_{cr}) et le nombre de mode (k) avec différent valeurs de L/d, le coefficient d'échelle e_0a =1nm.

Les influences du rapport de la longueur au diamètre (L/d) sur la température critique de flambement sont ulistrées dans la figure 4.2, avec coefficient d'échelle (e_0a) égal à 1 nm, on peut constater de figure 4.2 que la différence entre les trois graphes devient remarquable quand le nombre de mode est supérieur à 4. D'ailleurs, les températures de flambement pour tous les trois rapports deviennent plus grands avec l'augmentation de nombre de mode. Plus le rapport de la longueur au diamètre est grand, plus la température critique de flambement devient haute. Il signifie que le rapport de la longueur au diamètre a l'influence significative sur la température critique de flambement pour de plus grands nombres de mode.

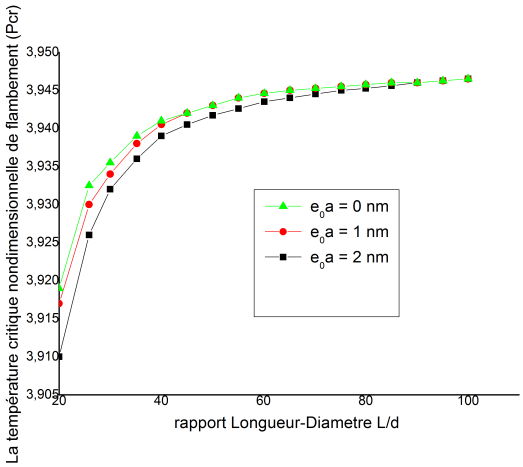


FIGURE 4.3 – :La relation entre la température critique nondimensionnelle de flambement (P_{cr}) et le rapport (L/d) avec différent coefficients d'échelle (e_0a), avec $k = 1$

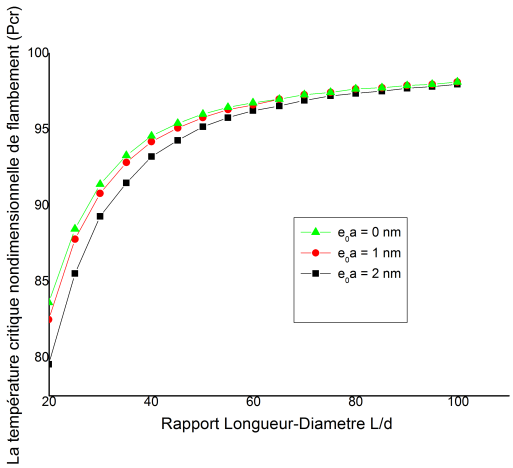


FIGURE 4.4 – :La relation entre la température critique nondimensionnelle de flambement (P_{cr}) et le rapport (L/d) avec différent coefficients d'échelle (e_0a), avec $k = 5$

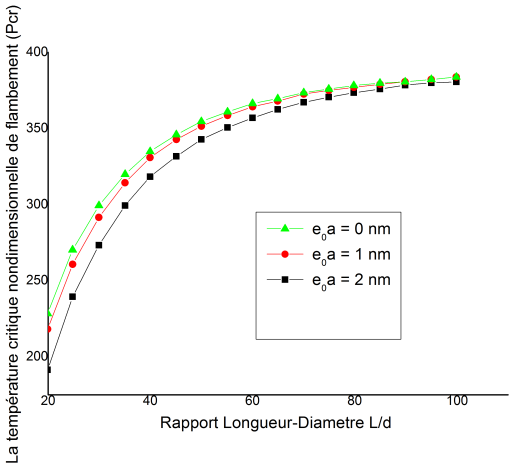


FIGURE 4.5 – :La relation entre la température critique nondimensionnelle de flambement(P_{cr})et le rapport (L/d) avec différent coefficients d'échelle (e_0a),avec $k = 10$

La relation entre la température critique de flambement et le rapport de la longueur au diamètre sont montrées dans les figures 4.3 , 4.4 , 4.5, avec coefficient d'échelle e_0a =0, 1 et 2 nm et le nombre de mode k=1, 5 et 10 respectivement. On peut voir que les valeurs de la température critique de flambement pour ces nombres de mode sont très différentes. Dans la figure 4.3, les gammes est le plus petit pour k=1, mais la gamme est la plus grande pour k=10 dans la figure 4.5. Il signifie que plus le nombre de mode est grand, plus la température critique de flambement devient haute. En outre, on peut observer que quand le rapport de la longueur au diamètre est petit, les effets d'échelle sont significatifs. Cependant, les effets d'échelles sur la température critique de flambement diminueront avec l'augmentation du rapport (L/d). Il implique que les effets d'échelle sur les propriétés thermiques de flambement ne sont pas évidents pour le nanotube en carbone mince mais devrait être tenu compte pour nanotube court.

Conclusion Générale

Dans ce travail, basé sur la théorie nonlocal de Timoshenko, l'équation de mouvement et la température critique de flambement du nanotube en carbone sont présentée. Les influences de l'effet d'échelle, le rapport de la longueur au diamètre, la déformation de cisaillement transversal et l'inertie rotatoire sur les propriétés thermiques de flambement sont discutés. On peut conclure que l'effet d'échelle joue un rôle important sur le comportement thermique de flambement, particulièrement pour un nombre de mode plus élevé et un nanotube en carbone court. La température critique de flambement varie avec différents rapports de la longueur au diamètre (L/d). Les influences de la déformation de cisaillement transversal et de l'inertie rotatoire sont évidentes pour des nombres de mode plus élevé et de plus petits rapports de la longueur au diamètre.

Bibliographie

[1] Buchoux, J. : Nanotubes de carbone comme sondes en microscopie à force atomique : nanomécanique et étude à l'interface air-liquide de fluides complexes. PhD thesis, Bordeaux 1 (2011)

[2] Mintmire, J., Robertson, D., White, C. : Properties of fullerene nanotubules. Journal of Physics and Chemistry of Solids **54**(12) (1993) 1835–1840

[3] Zhang, Y., Liu, X., Liu, G. : Thermal effect on transverse vibrations of double-walled carbon nanotubes. Nanotechnology **18**(44) (2007) 445701

[4] Tounsi, A., Heireche, H., Berrabah, H., Benzair, A., Boumia, L. : Effect of small size on wave propagation in double-walled carbon nanotubes under temperature field. Journal of Applied Physics **104**(10) (2008) 104301

[5] Murmu, T., Pradhan, S. : Thermo-mechanical vibration of a single-walled carbon nanotube embedded in an elastic medium based on nonlocal elasticity theory. Computational Materials Science **46**(4) (2009) 854–859

[6] Hsu, J.C., Lee, H.L., Chang, W.J. : Thermal buckling of double-walled carbon nanotubes. Journal of applied physics **105**(10) (2009) 103512

[7] Lee, H.L., Chang, W.J. : A closed-form solution for critical buckling temperature of a single-walled carbon nanotube. Physica E : Low-dimensional Systems and Nanostructures **41**(8) (2009) 1492–1494

[8] Kroto, H.W., Heath, J.R., O'Brien, S.C., Curl, R.F., Smalley, R.E. : C60 : Buckminsterfullerene. nature **318**(6042) (1985) 162–163

[9] Iijima, S. : Helical microtubules of graphitic carbon. nature **354**(6348) (1991) 56–58

[10] Belenkov, E.A., Greshnyakov, V.A. : Classification schemes for carbon phases and nanostructures. New carbon materials **28**(4) (2013) 273–282

[11] Bonnissel, M., Luo, L., Tondeur, D. : Compacted exfoliated natural graphite as heat conduction medium. Carbon **39**(14) (2001) 2151–2161

[12] Buerschaper, R.A. : Thermal and electrical conductivity of graphite and carbon at low temperatures. Journal of Applied Physics **15**(5) (1944) 452–454

[13] Kidalov, S.V., Shakhov, F.M. : Thermal conductivity of diamond composites. Materials **2**(4) (2009) 2467–2495

[14] Radovic, L.R. : Chemistry & physics of carbon. Volume 29. CRC Press (2004)

[15] Margadonna, S., Prassides, K. : Recent advances in fullerene superconductivity. Journal of Solid State Chemistry **168**(2) (2002) 639–652

[16] Horikawa, T., Kinoshita, T., Suito, K., Onodera, A. : Compressibility measurement of c60 using synchrotron radiation. Solid state communications **114**(3) (2000) 121–125

[17] RICAUD, M., LAFON, D., ROOS, F. : Les nanotubes de carbone : quels risques, quelle prévention ? Hygiène et sécurité du travail (Paris) (210) (2008) 43–57

[18] Bethune, D., Kiang, C.H., De Vries, M., Gorman, G., Savoy, R., Vazquez, J., Beyers, R. : Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls. Nature **363**(6430) (1993) 605–607

[19] Mintmire, J., White, C. : Electronic and structural properties of carbon nanotubes. Carbon **33**(7) (1995) 893–902

[20] Mintmire, J.W., Dunlap, B.I., White, C.T. : Are fullerene tubules metallic ? Physical review letters **68**(5) (1992) 631

[21] Dresselhaus, M., Dresselhaus, G., Saito, R. : Carbon fibers based on c 60 and their symmetry. Physical Review B **45**(11) (1992) 6234

[22] Hamada, N., Sawada, S.i., Oshiyama, A. : New one-dimensional conductors : Graphitic microtubules. Physical review letters **68**(10) (1992) 1579

[23] Monthioux, M., Serp, P., Flahaut, E., Razafinimanana, M., Laurent, C., Peigney, A., Bacsa, W., Broto, J.M. : Introduction to carbon nanotubes. In : Springer handbook of nanotechnology. Springer (2010) 47–118

[24] Saito, R., Fujita, M., Dresselhaus, G., Dresselhaus, u.M. : Electronic structure of chiral graphene tubules. Applied physics letters **60**(18) (1992) 2204–2206

[25] Seichepine, F. : Réalisation d'interconnexions de faible résistivité à base de nanotubes de carbone biparois pour la microélectronique. PhD thesis, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier (2011)

[26] Wei, B., Vajtai, R., Ajayan, P. : Reliability and current carrying capacity of carbon nanotubes. Applied Physics Letters **79**(8) (2001) 1172–1174

[27] Frank, S., Poncharal, P., Wang, Z., De Heer, W.A. : Carbon nanotube quantum resistors. science **280**(5370) (1998) 1744–1746

[28] Chiu, H.Y., Deshpande, V., Postma, H.C., Lau, C., Miko, C., Forro, L., Bockrath, M. : Ballistic phonon thermal transport in multiwalled carbon nanotubes. Physical review letters **95**(22) (2005) 226101

[29] Yao, Z., Dekker, C., Avouris, P. : Electrical transport through single-wall carbon nanotubes. In : Carbon Nanotubes. Springer (2001) 147–171

[30] Aitken, R.J., Chaudhry, M., Boxall, A., Hull, M. : Manufacture and use of nanomaterials : current status in the uk and global trends. Occupational medicine **56**(5) (2006) 300–306

[31] Iijima, S., Brabec, C., Maiti, A., Bernholc, J. : Structural flexibility of carbon nanotubes. The Journal of chemical physics **104**(5) (1996) 2089–2092

[32] Berber, S., Kwon, Y.K., Tománek, D. : Unusually high thermal conductivity of carbon nanotubes. Physical review letters **84**(20) (2000) 4613

[33] Che, J., Cagin, T., Goddard III, W.A. : Thermal conductivity of carbon nanotubes. Nanotechnology **11**(2) (2000) 65

[34] Timusk, T. : The mysterious pseudogap in high temperature superconductors : an infrared view. Solid state communications **127**(5) (2003) 337–348

[35] Kim, P., Shi, L., Majumdar, A., McEuen, P.L. : Thermal transport measurements of individual multiwalled nanotubes. Physical review letters **87**(21) (2001) 215502

[36] Pop, E., Mann, D., Cao, J., Wang, Q., Goodson, K., Dai, H. : Negative differential conductance and hot phonons in suspended nanotube molecular wires. Physical Review Letters **95**(15) (2005) 155505

[37] Fujii, M., Zhang, X., Xie, H., Ago, H., Takahashi, K., Ikuta, T., Abe, H., Shimizu, T. : Measuring the thermal conductivity of a single carbon nanotube. Physical review letters **95**(6) (2005) 065502

[38] Hone, J., Llaguno, M., Nemes, N., Johnson, A., Fischer, J., Walters, D., Casavant, M., Schmidt, J., Smalley, R. : Electrical and thermal transport properties of magnetically aligned single wall carbon nanotube films. Applied physics letters **77**(5) (2000) 666–668

[39] Yi, W., Lu, L., Dian-Lin, Z., Pan, Z., Xie, S. : Linear specific heat of carbon nanotubes. Physical Review B **59**(14) (1999) R9015

[40] Hone, J., Whitney, M., Piskoti, C., Zettl, A. : Thermal conductivity of single-walled carbon nanotubes. Physical Review B **59**(4) (1999) R2514

[41] Lu, F., Gu, L., Meziani, M.J., Wang, X., Luo, P.G., Veca, L.M., Cao, L., Sun, Y.P. : Advances in bioapplications of carbon nanotubes. Advanced Materials **21**(2) (2009) 139–152

[42] Lahmani, M., Dupas, C., Houdy, P. : Les nanosciences : Nanotechnologies et nanophysique. Belin (2006)

[43] Krätschmer, W., Lamb, L.D., Fostiropoulos, K., Huffman, D.R. : Solid c 60 : a new form of carbon. Nature **347**(6291) (1990) 354–358

[44] Iijima, S., Ichihashi, T. : Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. nature **363**(6430) (1993) 603–605

[45] Guo, T., Nikolaev, P., Thess, A., Colbert, D.T., Smalley, R.E. : Catalytic growth of single-walled manotubes by laser vaporization. Chemical physics letters **243**(1-2) (1995) 49–54

[46] Li, Y., Mann, D., Rolandi, M., Kim, W., Ural, A., Hung, S., Javey, A., Cao, J., Wang, D., Yenilmez, E., et al. : Preferential growth of semiconducting single-walled carbon nanotubes by a plasma enhanced cvd method. Nano Letters **4**(2) (2004) 317–321

[47] Eklund, P., Pradhan, B., Kim, U., Xiong, Q., Fischer, J., Friedman, A., Holloway, B., Jordan, K., Smith, M. : Large-scale production of single-walled carbon nanotubes using ultrafast pulses from a free electron laser. Nano Letters **2**(6) (2002) 561–566

[48] José-Yacamán, M., Miki-Yoshida, M., Rendon, L., Santiesteban, J. : Catalytic growth of carbon microtubules with fullerene structure. Applied physics letters **62**(6) (1993) 657–659

[49] Grüneis, A., Rümmeli, M., Kramberger, C., Barreiro, A., Pichler, T., Pfeiffer, R., Kuzmany, H., Gemming, T., Büchner, B. : High quality double wall carbon nanotubes with a defined diameter distribution by chemical vapor deposition from alcohol. Carbon **44**(15) (2006) 3177–3182

[50] Inami, N., Mohamed, M.A., Shikoh, E., Fujiwara, A. : Synthesis-condition dependence of carbon nanotube growth by alcohol catalytic chemical vapor deposition method. Science and Technology of Advanced Materials **8**(4) (2007) 292

[51] Chung, D.S., Park, S., Lee, H., Choi, J., Cha, S., Kim, J., Jang, J., Min, K., Cho, S., Yoon, M., et al. : Carbon nanotube electron emitters with a gated structure using backside exposure processes. Applied Physics Letters **80**(21) (2002) 4045–4047

[52] Hsin, Y.L., Hwang, K.C., Chen, F.R., Kai, J.J. : Production and in-situ metal filling of carbon nanotubes in water. Advanced Materials **13**(11) (2001) 830–833

[53] Laplaze, D., Bernier, P., Maser, W., Flamant, G., Guillard, T., Loiseau, A. : Carbon nanotubes : the solar approach. Carbon **36**(5-6) (1998) 685–688

[54] Martel, R., Schmidt, T., Shea, H., Hertel, T., Avouris, P. : Single-and multi-wall carbon nanotube field-effect transistors. Applied physics letters **73**(17) (1998) 2447–2449

[55] Zhou, C., Kong, J., Yenilmez, E., Dai, H. : Modulated chemical doping of individual carbon nanotubes. Science **290**(5496) (2000) 1552–1555

[56] Minoux, E., Groening, O., Teo, K.B., Dalal, S.H., Gangloff, L., Schnell, J.P., Hudanski, L., Bu, I.Y., Vincent, P., Legagneux, P., et al. : Achieving high-current carbon nanotube emitters. Nano Letters **5**(11) (2005) 2135–2138

[57] Dillon, A., Jones, K., Bekkedahl, T., Kiang, C., Bethune, D., Heben, M. : Storage of hydrogen in single-walled carbon nanotubes. Nature **386**(6623) (1997) 377–379

[58] Dillon, A., Gilbert, K., Parilla, P., Alleman, J., Hornyak, G., Jones, K., Heben, M. : Hydrogen storage in carbon single-wall nanotubes. In : Proceedings of the 2002 US DOE Hydrogen Program review. (2002) 1–18

[59] Cheung, C.L., Hafner, J.H., Lieber, C.M. : Carbon nanotube atomic force microscopy tips : Direct growth by chemical vapor deposition and application to high-resolution imaging. Proceedings of the National Academy of Sciences **97**(8) (2000) 3809–3813

[60] Chermont, Q., Seguin, J. : trejean, jp jolivet, d. gourier, m. bessodes and d. scherman. Proc. Natl. Acad. Sci. USA **104** (2007) 9266–9271

[61] MENARD-MOYON, C., BIANCO, A. : Atténuation de la toxicité des nanotubes de carbone grâce à la fonctionnalisation chimique. (2014)

[62] Maynard, A.D., Baron, P.A., Foley, M., Shvedova, A.A., Kisin, E.R., Castranova, V. : Exposure to carbon nanotube material : aerosol release during the handling of unrefined single-walled carbon nanotube material. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A **67**(1) (2004) 87–107

[63] Sarkar, S., Sharma, C., Yog, R., Periakaruppan, A., Jejelowo, O., Thomas, R., Barrera, E.V., Rice-Ficht, A.C., Wilson, B.L., Ramesh, G.T. : Analysis of stress responsive genes induced by single-walled carbon nanotubes in bj foreskin cells. Journal of nanoscience and nanotechnology **7**(2) (2007) 584–592

[64] Shvedova, A.A., Kisin, E., Murray, A.R., Johnson, V.J., Gorelik, O., Arepalli, S., Hubbs, A.F., Mercer, R.R., Keohavong, P., Sussman, N., et al. : Inhalation vs. aspiration of single-walled carbon nanotubes in c57bl/6 mice : inflammation, fibrosis, oxidative stress, and mutagenesis. American Journal of Physiology-Lung Cellular and Molecular Physiology **295**(4) (2008) L552–L565

[65] Muller, J., Decordier, I., Hoet, P.H., Lombaert, N., Thomassen, L., Huaux, F., Lison, D., Kirsch-Volders, M. : Clastogenic and aneugenic effects of multi-wall carbon nanotubes in epithelial cells. Carcinogenesis **29**(2) (2008) 427–433

[66] Karlsson, H.L., Cronholm, P., Gustafsson, J., Moller, L. : Copper oxide nanoparticles are highly toxic : a comparison between metal oxide nanoparticles and carbon nanotubes. Chemical research in toxicology **21**(9) (2008) 1726–1732

[67] Mercer, R.R., Scabilloni, J., Wang, L., Kisin, E., Murray, A.R., Schwegler-Berry, D., Shvedova, A.A., Castranova, V. : Alteration of deposition pattern and pulmonary response as a result of improved dispersion of aspirated single-walled carbon nanotubes in a mouse model. American Journal of Physiology-Lung Cellular and Molecular Physiology **294**(1) (2008) L87–L97

[68] Yan, L., Zhao, F., Li, S., Hu, Z., Zhao, Y. : Low-toxic and safe nanomaterials by surface-chemical design, carbon nanotubes, fullerenes, metallofullerenes, and graphenes. Nanoscale **3**(2) (2011) 362–382

[69] Jia, G., Wang, H., Yan, L., Wang, X., Pei, R., Yan, T., Zhao, Y., Guo, X. : Cytotoxicity of carbon nanomaterials : single-wall nanotube, multi-wall nanotube, and fullerene. Environmental science & technology **39**(5) (2005) 1378–1383

[70] Eringen, A. : Nonlocal polar field models. New York : Academic (1976)

[71] Eringen, A.C. : On differential equations of nonlocal elasticity and solutions of screw dislocation and surface waves. Journal of applied physics **54**(9) (1983) 4703–4710

[72] Peddieson, J., Buchanan, G.R., McNitt, R.P. : Application of nonlocal continuum models to nanotechnology. International Journal of Engineering Science **41**(3-5) (2003) 305–312

[73] Wang, Q. : Wave propagation in carbon nanotubes via nonlocal continuum mechanics. Journal of Applied physics **98**(12) (2005) 124301

[74] Wang, Q., Varadan, V. : Application of nonlocal elastic shell theory in wave propagation analysis of carbon nanotubes. Smart Materials and Structures **16**(1) (2007) 178

[75] Wang, Q., Wang, C. : The constitutive relation and small scale parameter of nonlocal continuum mechanics for modelling carbon nanotubes. Nanotechnology **18**(7) (2007) 075702

[76] Achenbach, J. : On harmonic guided waves in elastic cylinders. In : Wave propagation in elastic solids. Applied mathematics and mechanics. Volume 16. North-Holland Publishing Company Amsterdam (1973) 202–258

[77] Yao, X., Han, Q. : Buckling analysis of multiwalled carbon nanotubes under torsional load coupling with temperature change. (2006)

[78] Hao, M., Guo, X., Wang, Q. : Small-scale effect on torsional buckling of multi-walled carbon nanotubes. European Journal of Mechanics-A/Solids **29**(1) (2010) 49–55