

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Tissemsilt

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Science de la Matière



# Mémoire

de fin d'études pour l'obtention du diplôme

de Master académique en

Filière : **Physiques**

Spécialité : **Nano Physique**

✓ Présentée par : **Belabdi Fatma Zohra**

*Thème*

---

L'influence physique et thermique sur un  
matériau en graphite

---

Soutenue le, 24 / 06 / 2021

**Devant le Jury :**

Mr. <i>FETHALLAH Dahmane</i>	Président	Prof	Univ-Tissemsilt
Mr. <i>BOUMIA Lakhder</i>	Encadreur	MAA	Univ-Tissemsilt
Mr. <i>MOUKHTARI Mohamed</i>	Examineur	MCA	Univ-Tissemsilt

**Année universitaire : 2020-2021**



## *Dédicace*

*Je dédie ce travail de mémoire à :*

*Ma chère mère et mon cher père*

*Mes chers frères et chères sœurs*

*Mes enseignants et surtout mon encadreur Dr Boumia Lakhdar.*

*Enfin, à toutes mes amies*

## **Remerciements**

*Je remercie d'abord Monsieur Boumia Lakhdar qui m'a facilité le travail de mon mémoire, pour l'intérêt continu porté à mon travail, pour ses conseils avisés. Ainsi que tous les membres de jury, Dr Dahmane Fethallah et Dr Mokhtari Mohamed d'avoir accepté d'être dans mon jury de soutenance et d'avoir accepté d'examiner mon travail. Merci à ma famille qui m'a soutenu tout au long de mon parcours d'études.*

## Résumé :

Les MWNTCs sont particulièrement connus par leur structure multicouche et leurs forces intertubes de Van der Waals. D'après les études faites dans ce domaine, on a su que les forces de van der Waals entre les nanotubes adjacents ont un effet important sur le comportement mécanique des nanotubes de carbone. Le flambement des nanotubes de carbone représente une propriété mécanique de base, les effets de l'échelle nanométrique et du changement de température sur le flambement sont d'un grand intérêt. On a essayé de représenter un modèle élastique non local pour le flambement de nanotubes de carbone multiparois.

On a basé sur l'hypothèse fondamentale d'Euler-Bernoulli, ce qui montre que l'élément choisi est constituée de fibres qui sont dans un état de compression ou de tension uniaxiale. En supposant la forme linéaire de la loi de Hooke.

### ملخص:

تشتهر MWNTCs بشكل خاص بهيكلها متعدد الطبقات وقوى Van der Waals المتداخلة. من الدراسات في هذا المجال، من المعروف أن قوى فان دير فال بين الأنابيب النانوية المجاورة لها تأثير كبير على السلوك الميكانيكي للأنابيب النانوية الكربونية. يعد ربط الأنابيب النانوية الكربونية خاصية ميكانيكية أساسية، كما أن تأثيرات المقياس النانوية وتغير درجة الحرارة على الالتواء، لها أهمية كبيرة. حاولنا تمثيل نموذج مرن غير محلي لالتواء الأنابيب النانوية الكربونية متعددة الجدران. وقد استند إلى فرضية أويلر-بيرنولي الأساسية، والتي توضح أن العنصر المختار يتكون من ألياف في حالة ضغط أو توتر أحادي المحور. بافتراض الشكل الخطي لقانون هوك.

### Abstract:

The MWNTCs are particularly known for their multi layer structure and their Van der Waals intertube forces. From studies in this area, it is known that van der Waals forces between adjacent nanotubes have a significant effect on the mechanical behavior of carbon nanotubes. Buckling of carbon nanotubes is a basic mechanical property; the effects of nanoscale and temperature change on buckling are of great interest. We tried to represent a non-local elastic model for the buckling of multi-walled carbon nanotubes.

Elastic model based on the fundamental Euler-Bernoulli hypothesis, which shows that the chosen element consists of fibers, which are in a state of uniaxial compression or tension. Assuming the linear form of Hooke's law.

# Table des matières

Dédicace .....	I
Remerciements .....	II
Résumé .....	III
ملخص .....	III
Abstract: .....	III
Table des matières .....	IV
Liste des figures .....	VI
Introduction.....	2
<b>Chapitre. I : Les différents types de carbone</b> .....	
I.1 Le carbone sous ses différentes formes .....	5
I.1.1 Graphite .....	5
I.1.2 Le diamant .....	5
I.1.3 Carbones mal structurées .....	6
I.1.4 Carbones .....	6
I.2 Les nouvelles formes du carbone .....	7
I.2.1 Les fullerènes .....	7
I.2.2 nanotubes de carbone monofeuillet .....	7
I.2.3 Nanotubes de carbones multifeuillet .....	8
I.3 Les différents types de Structures des nanotubes de carbone .....	8
I.3.1 Les nanotubes de carbone monofeuillet .....	8
I.3.2 Les nanotubes multifeuillet .....	10
I.4. les différentes propriétés des nanotubes de carbone .....	11
I.4.1 Propriétés mécaniques .....	11
I.4.2. Propriétés thermiques .....	11
I.4.3 Propriétés électroniques .....	12
I.4.4 Propriétés optiques .....	12
I.5. Synthèse de nanotubes .....	12
I.5.1. Méthode de l'arc électrique .....	13
I.5.2 Méthode d'ablation laser .....	13
I.5.3 Méthode de dépôt chimique en phase vapeur .....	14
I.5.4 Décomposition catalytique : HiPCO .....	14
I.6 Applications des nanotubes de carbone .....	14

II : formalismes et calculs .....	
<b>Chapitre II. Quelques modèles théoriques .....</b>	<b>17</b>
II.1 Quelques explications sur les modèles choisis .....	17
II.1.1) Le modèle d'Euler-Bernoulli.....	17
II.1.2Modèle Timoshenko.....	18
II.2.2 Inertie Rotatoire .....	19
II.2 Analyse de flambement Non local .....	22
<b>Chapitre III : .....</b>	
<b>Résultats et discussion .....</b>	<b>25</b>
III. Le flambement des nanotubes de carbone sous l'effet Thermique .....	26
IV.2. Discussion sur l'effet de changement de température.....	29
<b>Conclusion .....</b>	<b>33</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>35</b>

## Liste Des Figures

<b>Figure I.1</b> Structure du graphite » .....	5
<b>Figure I.2.</b> Structure du diamant ».....	6
<b>FigureI.3.</b> Structure du $C_{60}$ . Les liaisons C-C communes à un hexagone et un pentagone. ....	7
<b>FigureI.4.</b> Nanotube de carbone monocouche. ....	8
<b>FigureI.5.</b> structure possible des NTCs » .....	8
<b>Figures I.6</b> Les différentes formes de chiralités pour les NTCs .....	9
<b>FigureI.7.</b> Représentation du vecteur $c$ définissant l'enroulement du feuillet graphitique. ( $n,m$ ) appartient à $N^2$ .....	10
<b>FigureI.8</b> Production de nanotubes de carbone par la méthode de l'arc électrique .....	13
<b>FigureI.9</b> Pointe en MWCNT. ....	15
<b>Fig. II.1</b> « Représentation du modèle d'Euler-Bernoulli ».....	18
<b>Fig. III.1</b> Effet de la petite échelle sur le rapport de la déformation axial critique de flambement de DWNT dans le cas de la basse température ( $\theta = 60K$ ), $m=2$ .....	27
<b>Fig. III.2.</b> Effet de la petite échelle sur le rapport de la déformation axial critique de flambement de DWNT avec le rapport $L / d_1 = 60$ dans le cas de la haute température ( $\theta = 600K$ ), $m=2$ .....	28
<b>Fig. III.3.</b> Effet de la petite échelle sur le rapport de la déformation axial critique de flambement de DWNT dans le cas de la haute température ( $\theta = 600K$ ), $m=2$ .....	28
<b>Fig. III.4.</b> Effets thermiques sur la déformation critique de flambement de DWNT pour divers $m$ dans le cas de basse ou de la température ambiante.....	29



**Introduction**

**Générale**

# Introduction Générale

---

## Introduction

Le monde du nano est une nouvelle révolution dans la recherche scientifique et tous les domaines industriels. Aussi, il est prometteur de création des produits plus petits, plus légers, moins onéreux, un monde qui nous propose des ordinateurs plus efficaces. Tout simplement, on peut dire que c'est une aire nouvelle des nanosciences et des nanotechnologies. Ce monde fascinant vise à élaborer de nouveaux matériaux et des composants toujours plus petits, à construire « atome par atome » de nouvelles molécules puis à les assembler pour réaliser de nouvelles fonctions, et à exploiter des phénomènes nouveaux qui n'apparaissent qu'à l'échelle du nanomètre.

Cette émergence des nanotechnologies et des nanosciences nécessite le développement de nouvelles techniques d'observation capables de s'adapter à cette miniaturisation des objets, afin d'étudier les propriétés physiques à l'échelle nanométrique. La mesure et la compréhension des propriétés mécaniques d'objets nanométriques peuvent en effet apporter des informations très utiles concernant leur structure, leurs applications pratiques et aussi, dans le cas de nanostructures biologiques, d'approfondir notre connaissance du fonctionnement du monde du vivant.

La découverte des nanotubes de carbone par S.Iijima en 1991[1] a permis d'explorer un nouveau monde à l'échelle nanométrique. Durant cette décennie, les études sur la synthèse des NTCs ont apporté une reproductibilité de ces formes allotropiques. La synthèse des NTCs ont apporté une reproductibilité de ces formes allotropiques. Pour leurs propriétés mécaniques et électriques exceptionnelles, ils ont éveillé l'esprit des scientifiques afin de concevoir des systèmes touchant le domaine de la nanotechnologie.

Un nanotube est un feuillet de graphite formé d'atomes de carbone disposés en réseau hexagonal, comme un nid d'abeilles, et enroulé sur lui-même comme un cigare. Son diamètre est de l'ordre du nanomètre, sa longueur peut atteindre plusieurs micromètres. En effet, alors que la fibre de carbone est fragile, le nanotube de carbone, constitué d'une seule molécule, jouit d'une cohésion atomique parfaite. Même lorsqu'il est en mélange, il est encore possible de profiter de tous ses avantages.

Dans ce travail réalisé, on a étudié l'effet de la température sur le flambement des nanotubes de carbone double parois (DWCNT). En utilisant la théorie de l'élasticité non locale, en se basant sur le modèle de Timoshenko. Le but de ce travail est d'analyser l'effet de flambement d'un nanotube de carbone double couche pour différentes chiralités. On a commencé par une introduction pour donner une idée générale sur le travail fait ainsi que le matériau utilisé, dans

## **Introduction Générale**

---

le premier chapitre, on a parlé sur les différents types du carbone, puis dans le chapitre deux, on a écrit le formalisme utilisé dans les différents calculs de bases de cette étude, puis, dans le dernier chapitre, chapitre trois, on a exposé nos résultats avec une discussion détaillée et en fin, on a fini par une conclusion.

**Chapitre. I :**  
**Les différents types de**  
**carbone**

# Chapitre I :

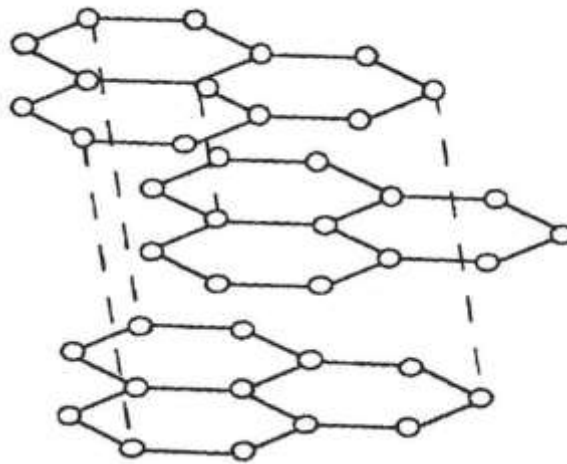
---

## Généralités :

### I.1 Le carbone sous ses différentes formes

#### I.1.1 Graphite

Le graphite est un solide noir de structure hexagonale (Voir Figure I.1). Les plans, dits plans graphènes, sont empilés l'une sur l'autre, avec une distance entre plans de 3,35 Å. Ces plans n'interagissent entre eux que par des forces van der Waals attractives. Comme ces forces sont relativement faibles, les plans graphènes peuvent glisser les uns sur les autres. A l'intérieur d'un plan la longueur de la liaison C-C est de 1,415 Å.



« Figure I.1 Structure du graphite ».

On peut trouver le graphite dans la nature et aussi le fabriquer. 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. Le graphite est un bon conducteur. Tous les carbones sont hybridés  $sp^2$ ,

#### I.1.2 Le diamant

Le diamant est la forme allotropique ne comportant que des carbones  $sp^3$ . Il consiste en des atomes liés comme indiqués sur la Figure.I.2. Les liaisons C-C ont pour longueur 1,514 Å. Le diamant est thermodynamiquement instable par rapport au graphite (la différence d'enthalpies

## Chapitre I :

---

libres est de  $2,88 \text{ kJ.mol}^{-1}$ ), mais la transformation diamant→graphite est extrêmement lente en conditions standards. Il y a principalement trois sortes de diamant : naturel, synthétique et fabriqué par CVD.



« Figure I.2. Structure du diamant ».

Comme le graphite, le diamant possède également une autre forme cristalline métastable : il s'agit d'une forme hexagonale appelée lonsdaléite. Notons que le diamant est beaucoup plus dense que le graphite. Le diamant est le matériau de dureté la plus élevée. Il possède la plus haute conductivité thermique connue parmi les solides à température ambiante.

### I.1.3 Carbones mal structurées

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.

### I.1.4 Carbynes

Les carbynes sont des formes monodimensionnelles de carbone, présentant des analogies avec la structure d'une chaîne de polymère. Dans les carbynes, tous les atomes de carbone sont dans un état d'hybridation  $sp$ , et liés à deux voisins [2]. Il existe deux structures différentes de carbynes :

- a) Structure alternant entre les liaisons triples et les liaisons simples.
- b) Structure de type cumulène, possédant une succession de doubles liaisons d'égale longueur.

# Chapitre I :

---

## I.2 Les nouvelles formes du carbone

### I.2.1 Les fullerènes

La structure se referme sur elle-même. Si le nombre de carbones est inférieur à quelques centaines, les structures stables sont fermées : il s'agit des fullerènes, de formule brute  $C_{2n}$ . Avec 12 pentagones et 20 hexagones, on forme le fameux  $C_{60}$ , ou Buckminster fullerène, du nom de Buckminster Fuller. Ce fullerène est représenté sur la figure.I.3



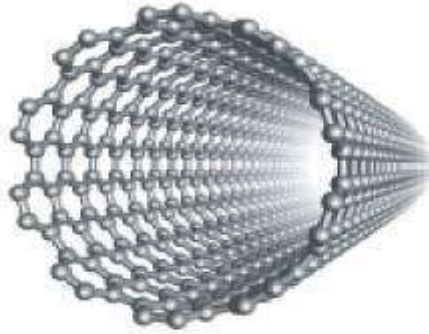
« FigureI.3. Structure du  $C_{60}$ . Les liaisons C-C communes à un hexagone et un pentagone. [3] »

En coupant en deux parties égales le  $C_{60}$  et en ajoutant des atomes de carbone avant de refermer la structure (Figure.I.3.), on peut construire le  $C_{70}$  (25 hexagones, 12 pentagones) et le  $C_{80}$  (30 hexagones, 12 pentagones).

En ajoutant encore des carbones, on arrive à un fullerène allongé avec plusieurs centaines à plusieurs millions d'hexagones et 12 pentagones : on obtient un nanotube de carbone monocouche.

### I.2.2 nanotubes de carbone monofeuillet

Les nanotubes de carbone monofeuillet ont été découverts en parallèle par Béthune [4] en 1993. Un nanotube monofeuillet est une feuille de graphène enroulée sur elle-même, de manière à former un cylindre unique. Le nano-objet obtenu est alors unidimensionnel. Les atomes de carbone restent dans un état d'hybridation  $sp^2$ . 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 graphène va définir la structure et les propriétés du nanotube formé.



**FigureI.4. Nanotube de carbone monocouche.**

### **I.2.3 Nanotubes de carbones multifeuillets**

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, permirent à Sumio Iijima de mettre en évidence en 1991 [5], dans le produit d'évaporation du graphite par arc électrique, des nanostructures graphitiques unidimensionnelles, baptisées nanotubes multifeuillets. Le diamètre du plus petit tube interne détermine la taille du canal central du nanotube. Le diamètre interne d'un nanotube multifeuillets est de l'ordre de deux nanomètres, tandis que le diamètre externe est de l'ordre d'une vingtaine de nanomètres.



« **FigureI.5. structure possible des NTC<sub>s</sub>** »

### **1.3 Les différents types de Structures des nanotubes de carbone**

Il existe deux types de nanotubes de carbone, les nanotubes de carbone monofeuillet (Single Walled Carbon Nanotubes, SWNT) .Les nanotubes de carbone multifeuillets, (Multi-Walled Carbon Nanotubes, MWNT).

#### **I.3.1 Les nanotubes de carbone monofeuillet**

Comme son nom l'indique, un nanotube monocouche est constitué d'un seul feuillet graphène. L'acronyme SWNT est couramment employé pour les désigner. Les valeurs de

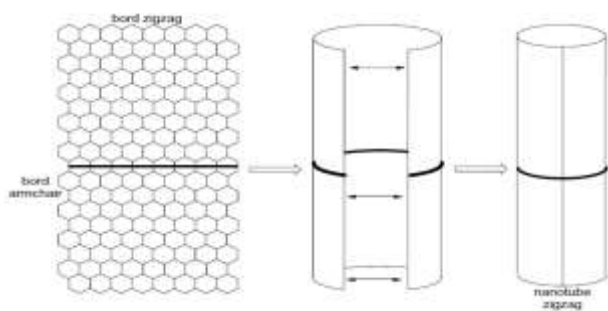


## Chapitre I :

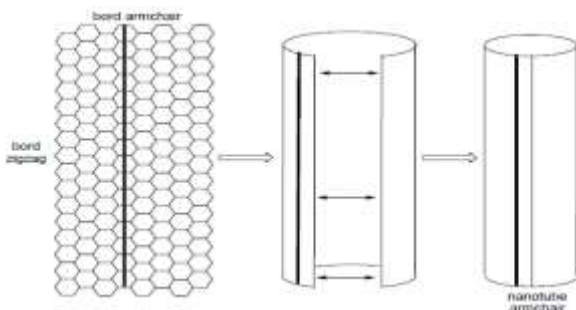
---

diamètres de SWNTs se situent typiquement autour de 1 nm. Les longueurs quant à elles peuvent aller jusqu'à quelques  $\mu\text{m}$ . Le feuillet de graphène possède deux types de bord, nommés armchair et zig-zag selon leur apparence.

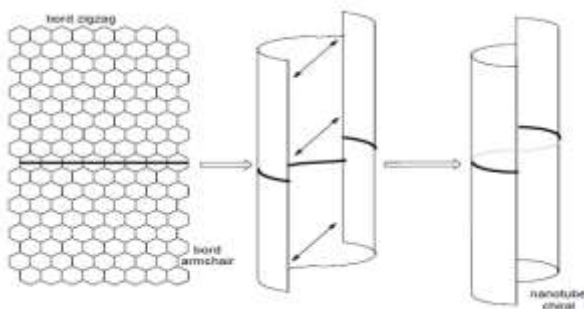
On peut également obtenir un deuxième type de nanotube, nanotube armchair. On peut enfin effectuer une translation d'un bord du feuillet graphène par rapport à l'autre, parallèlement à l'axe du nanotube (Figure I.6), avant de raccorder les bords pour former le nanotube. Un nanotube chiral est alors obtenu. La chiralité de cette feuille vient du fait que l'on a introduit une hélicité en combinant deux opérations de symétrie : une translation le long de l'axe du nanotube combinée à une rotation autour de ce même axe. Les hexagones s'enroulent donc autour de l'axe du nanotube de manière hélicoïdale.



**Nanotube zigzag ».**



**Nanotube armchair ».**

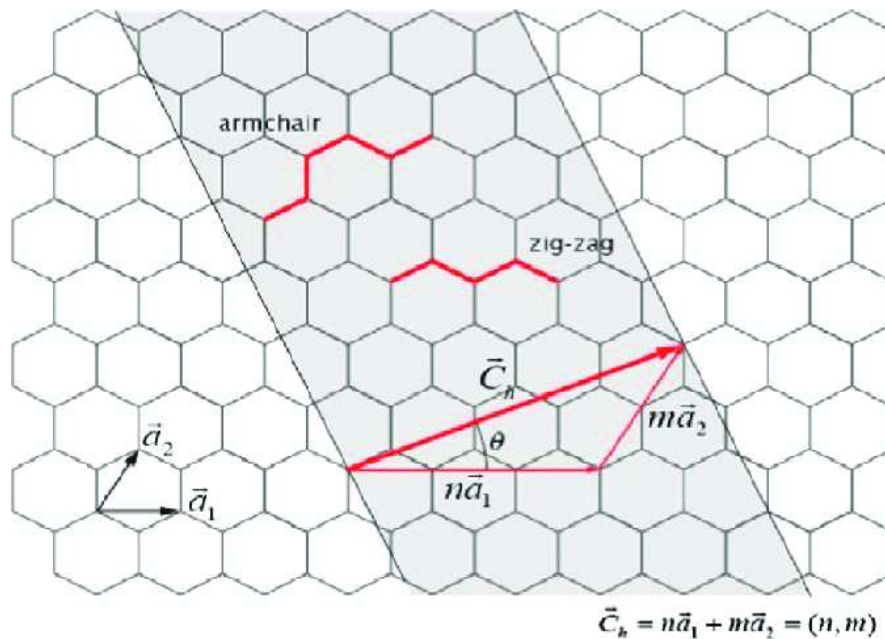


**Nanotube chiral : hélicoïdal**

« Figures I.6 Les différentes formes de chiralités pour les NTCs »

## Chapitre I :

Ces différents type de symétrie (armchair, zig-zag, chiral) sont caractérisés par l'emploi de deux indices (n, m), dits indices de chiralité. Pour cela, on définit une base (dans le plan graphène. Prenons un point quelconque O sur la surface du nanotube et faisons le tour du tube dans un plan perpendiculaire à son axe de manière à revenir à notre point de départ. Pour définir la symétrie de l'enroulement du feuillet graphène autour de l'axe, il suffit alors de décomposer le vecteur  $OA=C_h$  dans la base précédemment définie.



« **Figure I.7. Représentation du vecteur c définissant l'enroulement du feuillet graphitique** ». (n, m) appartiennent à  $\mathbb{N}^2$

$\theta$  = angle entre les vecteurs  $C_h$  et  $a_1$  (angle de chiralité). La symétrie d'un nanotube (n, m) peut également être caractérisée par la valeur de cet angle, comprise entre 0 et  $30^\circ$  :

$\theta = 0^\circ$  :  $n = 0$  ou  $m = 0$     NTC zigzag

$\theta = 30^\circ$  :  $n = m$             NTC armchair

$0 < \theta < 30^\circ$  :                NTC chiral.

### I.3.2 Les nanotubes multifeuillets

Les nanotubes multicouches sont constitués de plusieurs nanotubes concentriques n'ayant pas la même chiralité, créant ainsi une structure turbostratique. En effet, on appelle graphite turbostratique un empilement désordonné de plans graphènes. La distance entre les couches dans les MWNTs est de l'ordre de  $3,4 \text{ \AA}$ , ce qui est proche de la distance inter-plan dans le graphite. Les nanotubes multicouches ont un diamètre variant bien entendu avec le nombre de feuillets : entre 2 et 25 nm, pour une longueur allant de 20 à 80  $\mu\text{m}$ . La structure des

## Chapitre I :

---

nanotubes multifeuillets de type poupée russe décrite précédemment est communément admise, mais ce n'est pas la seule structure possible. Ainsi, certaines études expérimentales [6] laissent envisager que les nanotubes multifeuillets pourraient avoir une structure de type rouleau de parchemin, et de type poupée russe.

### I.4. les différentes propriétés des nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone possèdent des propriétés physiques exceptionnelles.

#### I.4.1 Propriétés mécaniques

La liaison C-C du graphite est une liaison chimique forte. L'énergie de dissociation de cette liaison est en effet de  $348 \text{ kJ.mol}^{-1}$ . C'est la raison pour laquelle les fibres (et notamment les nanotubes) ont des propriétés mécaniques uniques. Depuis leur découverte, de nombreux travaux théoriques ont prévu un module de Young très élevé pour les nanotubes. Lu, en utilisant un modèle empirique [7], prévoit un module de Young entre (0.97 et 1.1) TPa pour les nanotubes multiparois et monoparois respectivement. Il montre aussi que le module d'Young, ainsi que d'autres modules élastiques (cisaillement, ...) sont indépendants des caractéristiques géométriques des tubes (chiralité, diamètre...). Par comparaison, les toiles d'araignée, qui sont réputées pour posséder une forte résistance à la traction, ont un module d'Young comparable à celui du Kevlar (4 GPa) [8]. Yakobson et al. [9] ont montré que les nanotubes peuvent être soumis à d'importantes contraintes sans montrer de signe de déformation plastique, de fracture fragile ou de réarrangement atomique.

#### I.4.2. Propriétés thermiques

Le diamant présente la conductivité thermique la plus élevée de tous les matériaux connus à ce jour (environ  $103 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  à 300 K). Le plan de graphène possède une conductivité comparable. La structure particulière des nanotubes permet de penser que leur conductivité doit également être importante le long de l'axe du nanotube. La mesure des propriétés thermiques d'un nano-objet comme le nanotube est délicate. Cependant, quelques études expérimentales ont permis de mesurer la conductivité thermique de nanotubes multifeuillets. Leur conductivité est grande (de 600 à  $2000 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ).

## Chapitre I :

---

### I.4.3 Propriétés électroniques

L'une des caractéristiques importantes des nanotubes de carbone est le lien étroit existant entre leur structure spatiale et leurs propriétés électroniques. Ainsi, en fonction de leur chiralité, les nanotubes de carbone peuvent être métalliques ou semi-conducteurs. Un nanotube est métallique si  $2n + m$  est un multiple de 3 [10], ou de manière équivalente, si  $(n - m)$  est un multiple de 3. Les nanotubes de type chaise, définis par le couple  $(n, n)$ , sont donc métalliques ; les autres nanotubes sont semi-conducteurs en raison des effets de courbure. De coté technologique, les nanotubes peuvent porter des densités de courant très grandes,  $109 \text{ A.cm}^{-2}$  [11], valeur extrêmement élevée quand nous la comparons à celle d'un métal usuel,  $106 \text{ A.cm}^{-2}$ .

### I.4.4 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. [12] Ces performances égalent ou surpassent celles d'autres bons limiteurs optiques, comme le  $\text{C}_{60}$ , 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.

### I.5. Synthèse de nanotubes

Depuis la découverte des nanotubes de carbone, de nombreux efforts ont été déployés pour améliorer leur synthèse. 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. 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  $700^\circ\text{C}$  [13].

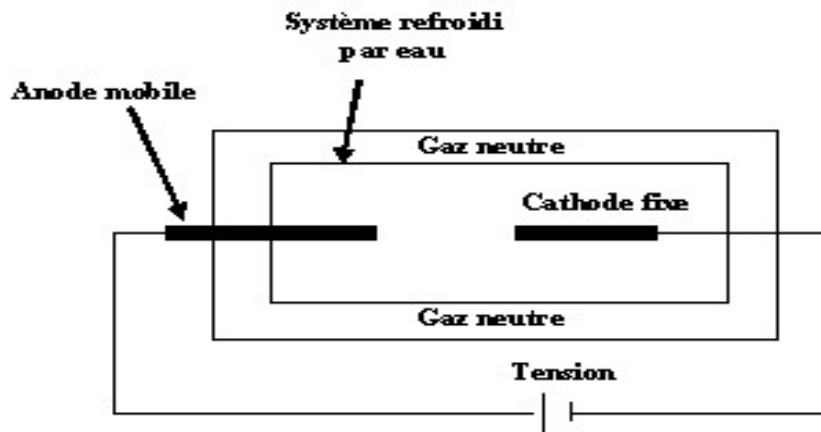
## Chapitre I :

---

### I.5.1. Méthode de l'arc électrique

La technique de l'arc électrique est un procédé de synthèse haute température. Cette technique a permis de synthétiser les fullerènes en grande quantité [14], et de produire les premiers nanotubes multifeuillets identifiés par S. Iijima [15].

Cette technique est basée sur l'évaporation du graphite par un arc électrique, amorcé entre deux électrodes en graphite (figure I.8). Un plasma chaud, voir 6000 K est formé et maintenu entre ces deux électrodes, l'anode étant progressivement sublimée. Les espèces carbonées sublimées dans le plasma vont se recombinaer à l'extérieur, et les produits formés vont se déposer sur les parois du réacteur.



« Figure I.8 Production de nanotubes de carbone par la méthode de l'arc électrique »

Ces catalyseurs vont être sublimés avec le graphite lors de la création du plasma, et vont permettre aux fagots de nanotubes de croître. Les catalyseurs les plus employés sont Ni, Fe, Co, Pt, Pd, Rh, Y, La, Lu...

### I.5.2 Méthode d'ablation laser

La technique de synthèse par ablation laser est la méthode qui a permis à Kroto et Smalley de découvrir les fullerènes en 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 [16]. Comme dans le cas de la synthèse par arc électrique, il est nécessaire d'utiliser un catalyseur métallique mélangé à la cible en graphite pour former des nanotubes monofeuillets. Cette technique est complexe dans sa mise en œuvre car elle repose sur l'utilisation de deux impulsions lasers

## Chapitre I :

---

successives de fréquences différentes. Une méthode de synthèse par ablation laser plus simple a également été développée [17]. Cette méthode utilise un laser CO<sub>2</sub> continu émettant à 10,6 μm à température ambiante [18].

### I.5.3 Méthode de dépôt chimique en phase vapeur

La synthèse de nanotubes de carbone par la méthode de dépôt chimique en phase vapeur (abrégée en CVD pour Chemical Vapor Deposition) a été effectuée pour la première fois par Endo et al. [19]. Dans cette méthode, des hydrocarbures (CH<sub>4</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>...) et de l'hydrogène sont mis en présence de catalyseurs métalliques (Fe, Co, Ni...), le tout dans un four porté à haute température (> 700°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).

### I.5.4 Décomposition catalytique : HiPCO

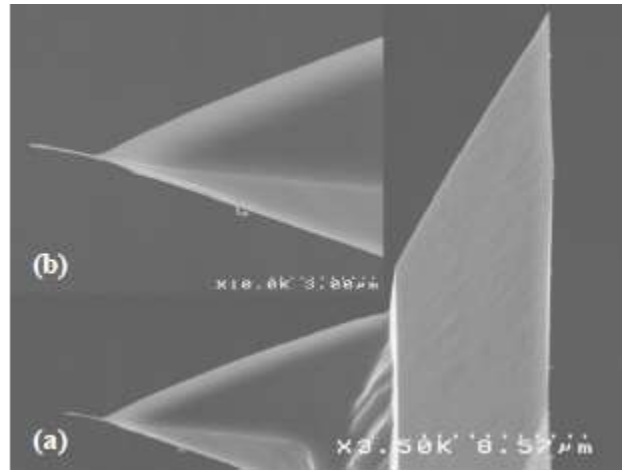
Le procédé HiPCO (High Pressure dismutation of CO : décomposition sous haute pression de CO) a été développé par le groupe de R. Smalley [20]. Ce procédé fait partie de la famille des procédés de décomposition catalytique à moyenne température. Un flux continu de pentacarbonyle de fer (Fe(CO)<sub>5</sub>) et de monoxyde de carbone (CO) est introduit sous une pression de 10 atmosphères dans une enceinte chauffée à 1200°C. L'originalité du procédé tient au fait que le catalyseur, nécessaire à la croissance des tubes monofeuillets, 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 monofeuillets exempts de toute impureté graphitique. Cette technique permet la synthèse à grande échelle de nanotubes monofeuillets.

## I.6 Applications des nanotubes de carbone

Leur dimension nanométrique et leurs propriétés spécifiques font des nanotubes de carbone des matériaux très intéressants du point de vue des applications.

## Chapitre I :

---



« Figure I.9 Pointe en MWCNT. [47] »

Les NTCs ont fait une révolution dans l'électronique moléculaire. Des hétérojonctions ont déjà été réalisées au sein d'un nanotube ou en couplant deux nanotubes (l'un métallique et l'autre semi-conducteur). Il a aussi été montré qu'ils se comportent comme des transistors à un électron. 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 [21].

Leurs propriétés ; rigidité, grande flexibilité et leur très faible diamètre font d'eux les pointes AFM les plus intéressantes.

Le développement des sources laser intenses a entraîné la nécessité de concevoir des systèmes de protection pour l'œil 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. [22]

# **Chapitre II**

## **FORMALISMES ET CALCULS**



### Chapitre II. Quelques modèles théoriques

On peut citer quelques modèles parmi plusieurs d'autres, seulement les plus utilisés par les théoriciens. Les modèles choisis pour notre étude sont les modèles élastiques pour les calculs du flambement d'un nanotube de carbone.

On peut considérer le nanotube multiparois comme un élément élastique (liaison chimique C-C).

On a étudié le cas de flambement de nanotubes de carbone double- parois en utilisant les équations d'Euler –Bernoulli et celles de Timoshenko.

Pour les éléments minces et longs, on se sert de l'hypothèse des petites déformations (Euler-Bernoulli) : les sections droites restent planes et perpendiculaires à la courbe moyenne. Mais pour les éléments courts et épais, on utilise les hypothèses faites par Timoshenko : les sections droites ne sont plus perpendiculaires à la courbe moyenne. Donc, on applique ici la théorie des éléments selon la théorie de l'élasticité isotrope.

#### II.1 Quelques explications sur les modèles choisis

##### II.1.1) Le modèle d'Euler-Bernoulli

Donc comme on l'a expliqué, pour les éléments minces et longs, au cours de la déformation de la liaison, les sections droites restent perpendiculaires à la courbe moyenne les sections droites restent planes. Donc on peut négliger le phénomène de cisaillement dans le cas de la flexion, ainsi, le risque de rupture sera causé par l'extension des fibres situées à l'extérieur de la flexion, et la flèche est due au moment fléchissant.

Les équations utilisées dans nos calculs sont les suivantes [23] :

$$E.I. \frac{d^2 y}{dx^2} = -M \quad (1)$$

$$\frac{d}{dx} \left( E.I. \frac{d^2 y}{dx^2} \right) = -\frac{dM}{dx} = -Q \quad (2)$$

$$\frac{d^2}{dx^2} \left( E.I. \frac{d^2 y}{dx^2} \right) = -\frac{dV}{dx} = p \quad (3)$$

## Chapitre II

$$p(x) = -\rho.A.\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( E.I. \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) = -\rho.A.\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (5)$$

$$E.I \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho.A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (6)$$

EI : la rigidité de flexion.

M : le moment de flexion.

p(x) : charge fonction de la longueur de l'élément.

A : la section de l'élément étudié.

$\rho$  : le poids de l'élément par unité de volume.

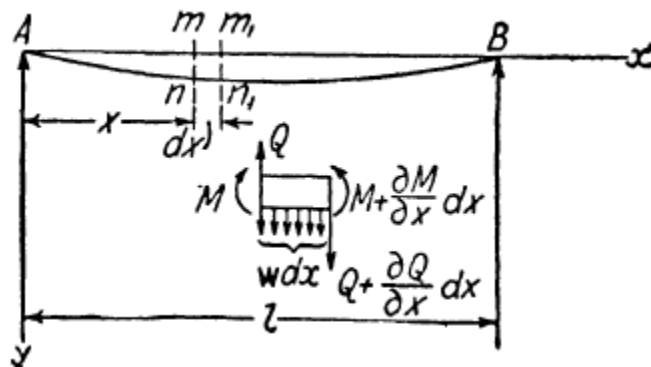


Fig. II.1 « Représentation du modèle d'Euler-Bernoulli »

### II.1.2 Modèle Timoshenko

On utilise le modèle de Timoshenko dans le cas où on aura un élément épais et court, donc ce modèle est une amélioration de celui d'Euler-Bernoulli. On introduit dans ce cas l'inertie de rotation et de déformation en cisaillement pour un élément en vibration. La théorie de Timoshenko prend en considération les deux l'effet de la déformation, de rotation d'inertie et de cisaillement.

## Chapitre II

---

On considère les dimensions de la barre en coupe très petites par rapport à la longueur. Des corrections seront maintenant données, tenant compte de l'effet des dimensions en coupe sur la fréquence. Ces corrections peuvent être très importantes en étudiant les modes de la vibration des fréquences plus élevées.

### II.2.2 Inertie Rotatoire

Il est facile de voir que pendant la vibration les éléments de la barre tels que le  $mm_1n_1$  (voir la fig.II.1) exécutent non seulement un mouvement de translation mais également de rotation, l'angle variable de la rotation qui est égale à la pente de la courbe de déflexion sera exprimé par  $dy/dx$  et la vitesse et l'accélération angulaire correspondante seront donnés par:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} \text{ et } \frac{\partial^3 y}{\partial x \partial t^2} \quad (7)$$

Par conséquent le moment des forces d'inertie de l'élément  $mm_1n_1$  autour de l'axe par son centre de gravité et la perpendiculaire au plan  $xy$  sera :

$$- I \cdot \rho \frac{\partial^3 y}{\partial x \partial t^2} dx \quad (8)$$

Le moment est pris positif quand c'est un sens horaire.

Ce moment devrait être pris en considération en considérant la variation du moment de flexion le long de l'axe de la barre. Puis, nous aurons :

$$\frac{dM}{dx} = Q - I \cdot \rho \frac{\partial^3 y}{\partial x \partial t^2} \quad (9)$$

Par substitution de la valeur  $dM/dx$ , on aura :

$$E \cdot I \frac{d^4 y}{dx^4} = - \frac{d^2 M}{dx^2} \quad (10)$$

Et nous obtenons :

$$E \cdot I \cdot \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = - \rho \cdot A \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + I \cdot \rho \cdot \frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \partial t^2} \quad (11)$$

## Chapitre II

---

C'est l'équation pour la vibration latérale des éléments, dans laquelle on représente l'effet de l'inertie rotatoire.

La courbe de flambement d'un nanotube de carbone élastique sous une charge axiale constante et une pression latérale est donnée par l'égalité [24] suivante :

$$N \frac{d^2 w}{d x^2} + p(x) = E I \frac{d^4 w}{d x^4}, \quad (12)$$

$x$  : coordonnée axiale

$N$  : force axiale constante

$w(x)$  : le flambement.

Une solution possible utilise la théorie non locale de milieu continu qui représente une tentative d'identifier les différentes forces interatomiques et intermoléculaires.

Ainsi la force axiale  $N$ , prend la valeur suivante :

$$N = \sigma A = N_m + N_t, \quad (13)$$

$A$  : la section du nanotube.

$$N_m = \sigma_m A, \quad N_t = -\frac{E A}{1-2 \nu} \alpha_x \theta \quad (14)$$

$\sigma_m$  : Contrainte axiale due au chargement mécanique avant de flambement.

$\nu$  : Coefficient de Poisson.

$E$  : Module de Young

$\alpha_x$  : Coefficient de dilatation thermique dans la direction de l'axe des  $x$ .

$\theta$  : Changement de température

$$(N_m + N_t) \frac{d^2 w}{d x^2} + p(x) = E I \frac{d^4 w}{d x^4}, \quad (15)$$

En utilisant la théorie d'élasticité non locale, la loi de Hooke pour le cas de contrainte uniaxiale est la suivante :

## Chapitre II

$$\sigma - (e_0 a)^2 \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} = E \varepsilon \quad (16)$$

$e_0$  : une constante propre au matériel.

La valeur de  $e_0$  doit être déterminée à partir des expériences ou en assortissant des courbes de dispersion des ondes planes avec ceux de la dynamique moléculaire [25].

Pour le cas où l'effet thermique on aura :

$$\sigma - (e_0 a)^2 \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} = E \varepsilon - \frac{E}{1-2\nu} \alpha_x \theta \quad (17)$$

$\sigma$  : Contrainte axiale

$\varepsilon$  : Déformation axiale.

Comme les CNTs ont la conductivité thermique élevée, on peut considérer que la variation de la température est uniformément répartie dans CNT. Treacy et al. [26] a exprimé une relation linéaire entre l'amplitude de vibration du déplacement libre du bout du nanotube de carbone ainsi que sa température :

$$E I_1 \frac{d^4 w_1}{d x^4} = p_{12} + (N_{m1} + N_{t1}) \frac{d^2 w_1}{d x^2} - (e_0 a)^2 \left( \frac{d^2 p_{12}}{d x^2} + (N_{m1} + N_{t1}) \frac{d^4 w_1}{d x^4} \right), \quad (18)$$

$$E I_2 \frac{d^4 w_2}{d x^4} = p_{23} - p_{12} + (N_{m2} + N_{t2}) \frac{d^2 w_2}{d x^2} - (e_0 a)^2 \left( \frac{d^2 (p_{23} - p_{12})}{d x^2} + (N_{m2} + N_{t2}) \frac{d^4 w_2}{d x^4} \right), \quad (19)$$

$$E I_n \frac{d^4 w_n}{d x^4} = -p_{(n-1)n} + (N_{mn} + N_{tn}) \frac{d^2 w_n}{d x^2} - (e_0 a)^2 \left( -\frac{d^2 p_{(n-1)n}}{d x^2} + (N_{mn} + N_{tn}) \frac{d^4 w_n}{d x^4} \right), \quad (20)$$

les indices 1 2..., n donnent le nombre de nanotube intérieur, nanotube adjacent, et nanotube extérieur, respectivement, et la pression de van der Waals par unité de longueur axiale sur le nanotube  $i$  dû au nanotube  $i+1$  peut être exprimé comme [ 27 ]

$$P_{i(i+1)} = c_{i(i+1)} (w_{i+1} - w_i), \quad (i=1, 2, \dots, n-1) \quad (21)$$

$c_{i(i+1)}$  : Coefficient d'interaction d'intertube

## Chapitre II

$$c_{i(i+1)} = \frac{320 (2R) \text{ erg} / \text{cm}^2}{0.16 a^2} \quad (i=1,2,\dots,n-1), \quad a=1.42 \times 10^{-8} \text{ cm}, \quad (22)$$

$R$  : rayon intérieur de chaque paire de nanotubes. (cm)

$$E I_1 \frac{d^4 w_1}{d x^4} = c_{12} (w_2 - w_1) + (N_{m1} + N_{i1}) \frac{d^2 w_1}{d x^2} - (e_0 a)^2 \left( c_{12} \frac{d^2 (w_2 - w_1)}{d x^2} + (N_{m1} + N_{i1}) \frac{d^4 w_1}{d x^4} \right), \quad (23)$$

$$E I_2 \frac{d^4 w_2}{d x^4} = c_{23} (w_3 - w_2) - c_{12} (w_2 - w_1) - p_{12} + (N_{m2} + N_{i2}) \frac{d^2 w_2}{d x^2} - (e_0 a)^2 \left( c_{23} \frac{d^2 (w_3 - w_2)}{d x^2} - c_{12} \frac{d^2 (w_2 - w_1)}{d x^2} + (N_{m2} + N_{i2}) \frac{d^4 w_2}{d x^4} \right), \quad (24)$$

$$E I_n \frac{d^4 w_n}{d x^4} = -c_{(n-1)n} (w_n - w_{n-1}) + (N_{mn} + N_{in}) \frac{d^2 w_n}{d x^2} - (e_0 a)^2 \left( -c_{(n-1)n} \frac{d^2 (w_n - w_{n-1})}{d x^2} + (N_{mn} + N_{in}) \frac{d^4 w_n}{d x^4} \right), \quad (25)$$

$$N_{mi} = \sigma_m A_i, \quad N_{ii} = -\frac{E A_i}{1-2\nu} \alpha_x \theta, \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (26)$$

### II.2 Analyse de flambement Non local :

Pour le flambement axial non local de nanotube de carbone double parois, on aura :

$$E I_1 \frac{d^4 w_1}{d x^4} = c_{12} (w_2 - w_1) + \left( \sigma_m - \frac{E}{1-2\nu} \alpha_x \theta \right) A_1 \frac{d^2 w_1}{d x^2} - (e_0 a)^2 \left( c_{12} \frac{d^2 (w_2 - w_1)}{d x^2} + \left( \sigma_m - \frac{E}{1-2\nu} \alpha_x \theta \right) A_1 \frac{d^4 w_1}{d x^4} \right), \quad (27)$$

$$E I_2 \frac{d^4 w_2}{d x^4} = -c_{12} (w_2 - w_1) + \left( \sigma_m - \frac{E}{1-2\nu} \alpha_x \theta \right) A_2 \frac{d^2 w_2}{d x^2} - (e_0 a)^2 \left( -c_{12} \frac{d^2 (w_2 - w_1)}{d x^2} + \left( \sigma_m - \frac{E}{1-2\nu} \alpha_x \theta \right) A_2 \frac{d^4 w_2}{d x^4} \right), \quad (28)$$

## Chapitre II

Considérons les conditions aux limites. On aura :

$$w_1 = C \sin\left(\frac{m\pi}{L} x\right), \quad w_2 = D \sin\left(\frac{m\pi}{L} x\right), \quad (29)$$

$C, D$  sont les constantes réelles.

$m$  : un nombre entier positif qui est lié aux modes de flambement.

Les solutions non triviales pour les constantes  $C$  et  $D$  existent seulement quand le déterminant suivant soit nul :

$$Det = \begin{vmatrix} \left[ E I_1 + (e_0 a)^2 \sigma_m A_1 \right] \left( \frac{m\pi}{L} \right)^4 + c_{12} \left[ 1 + (e_0 a)^2 \left( \frac{m\pi}{L} \right)^2 \right] + \sigma_m A_1 \left( \frac{m\pi}{L} \right)^2 - \frac{E}{1-2\nu} \alpha_x \theta A_1 \left( \frac{m\pi}{L} \right)^2 \left[ 1 + (e_0 a)^2 \left( \frac{m\pi}{L} \right)^2 \right], & c_{12} \left[ 1 + (e_0 a)^2 \left( \frac{m\pi}{L} \right)^2 \right] \\ -c_{12} \left[ 1 + (e_0 a)^2 \left( \frac{m\pi}{L} \right)^2 \right], & \left[ E I_2 + (e_0 a)^2 \sigma_m A_2 \right] \left( \frac{m\pi}{L} \right)^4 + c_{12} \left[ 1 + (e_0 a)^2 \left( \frac{m\pi}{L} \right)^2 \right] + \sigma_m A_2 \left( \frac{m\pi}{L} \right)^2 - \frac{E}{1-2\nu} \alpha_x \theta A_2 \left( \frac{m\pi}{L} \right)^2 \left[ 1 + (e_0 a)^2 \left( \frac{m\pi}{L} \right)^2 \right] \end{vmatrix}$$

(30)

$$X \sigma_m^2 + Y \sigma_m + Z = 0 \quad (40)$$

Où

$$X = A_1 A_2 \left( \frac{m\pi}{L} \right)^4 \left[ 1 + (e_0 a)^2 \left( \frac{m\pi}{L} \right)^2 \right]^2, \quad (41)$$

$$Y = E (I_1 A_2 + I_2 A_1) \left( \frac{m\pi}{L} \right)^6 \left[ 1 + (e_0 a)^2 \left( \frac{m\pi}{L} \right)^2 \right] + \left[ c_{12} (A_1 + A_2) \left( \frac{m\pi}{L} \right)^2 - \frac{2E}{(1-2\nu)} \alpha_x \theta A_1 A_2 \left( \frac{m\pi}{L} \right)^4 \right] \left[ 1 + (e_0 a)^2 \left( \frac{m\pi}{L} \right)^2 \right]^2, \quad (42)$$

$$Z = E^2 I_1 I_2 \left( \frac{m\pi}{L} \right)^8 + c_{12} E (I_1 + I_2) \left( \frac{m\pi}{L} \right)^4 \left[ 1 + (e_0 a)^2 \left( \frac{m\pi}{L} \right)^2 \right] - \frac{E}{(1-2\nu)} \alpha_x \theta \left[ 1 + (e_0 a)^2 \left( \frac{m\pi}{L} \right)^2 \right] \\ \times \left[ E (I_1 A_2 + I_2 A_1) \left( \frac{m\pi}{L} \right)^6 + \left[ c_{12} (A_1 + A_2) \left( \frac{m\pi}{L} \right)^2 - \frac{E}{(1-2\nu)} \alpha_x \theta A_1 A_2 \left( \frac{m\pi}{L} \right)^4 \right] \times \left[ 1 + (e_0 a)^2 \left( \frac{m\pi}{L} \right)^2 \right] \right]$$

(43)

## Chapitre II

---

La déformation axiale critique de flambement peut être obtenu par :

Si on néglige l'effet thermique, on aura le suivant :

$$\left(-\frac{\sigma_m}{E}\right)_m = -\frac{\sqrt{\left(\frac{c_{12}}{E}\right)^2 (A_1 + A_2)^2 \left[1 + (e_0 a)^2 \left(\frac{m \pi}{L}\right)^2\right]^2 + 2c_{12} \left(\frac{A_2 - A_1}{E}\right) (I_1 A_2 - I_2 A_1) \left(\frac{m \pi}{L}\right)^4 \times \left[1 + (e_0 a)^2 \left(\frac{m \pi}{L}\right)^2\right] + (I_1 A_2 - I_2 A_1)^2 \left(\frac{m \pi}{L}\right)^8}}{2 A_1 A_2 \left(\frac{m \pi}{L}\right)^2 \left[1 + (e_0 a)^2 \left(\frac{m \pi}{L}\right)^2\right]} + \frac{(I_1 A_2 + I_2 A_1) \left(\frac{m \pi}{L}\right)^4 + c_{12} \left(\frac{A_1 + A_2}{E}\right) \left[1 + (e_0 a)^2 \left(\frac{m \pi}{L}\right)^2\right]}{2 A_1 A_2 \left(\frac{m \pi}{L}\right)^2 \left[1 + (e_0 a)^2 \left(\frac{m \pi}{L}\right)^2\right]} \text{.}^{[*..*]}$$

(44)



**Chapitre III**

**RESULTATS ET**

**DISCUSSION**

### III. Le flambement des nanotubes de carbone sous l'effet Thermique

L'effet thermique sur la déformation axial de flambement d'un nanotube à double parois.

Les coefficients de dilatation thermique pour CNTs sont négatifs a la basse ou à la température ambiante et deviennent positifs à haut température Jiang et al [28]

Le module de Young  $E = 1$  TPa

L'épaisseur effective des nanotubes de carbone monoparois  $t=0.35$  nm [29].

Le diamètre intérieur  $d_1 = 0.7$  nm ;  $d_2 = 14$ nm : diamètre extérieur

Le coefficient de poisson  $\nu = 0.3$  et le coefficient d'interaction d'intertube  $c_{i(i+1)}$

$\delta$  Entre la déformation axiale critique de flambement avec l'effet thermique inclus et sans effet thermique :

$$\delta = \left( -\frac{\sigma_m}{E} \right)_{th} - \left( -\frac{\sigma_m}{E} \right)_{nth} = -\frac{\alpha_x \theta}{1-2\nu} \quad (1)$$

$\left( -\frac{\sigma_m}{E} \right)_{th}$  : Déformation critique de flambement avec l'effet thermique

$\left( -\frac{\sigma_m}{E} \right)_{nth}$  Déformation critique de flambement sans l'effet thermique. Pour étudier plus loin

L'effet du paramètre d'échelle et du changement de température sur la déformation critique de flambement, ainsi que les rapports suivants sont utilisés.

$$\chi_N = \left( -\frac{\sigma_m}{E} \right)_N / \left( -\frac{\sigma_m}{E} \right)_L, \quad \chi_{th} = \left( -\frac{\sigma_m}{E} \right)_{th} / \left( -\frac{\sigma_m}{E} \right)_{nth} \quad (2)$$

$\left( -\frac{\sigma_m}{E} \right)_N$  : Déformation critique de flambement basé sur le model non local de nanotube

## Chapitre III

$(-\frac{\sigma_m}{E})_L$  Déformation critique de flambement basé sur le model local de nanotube.

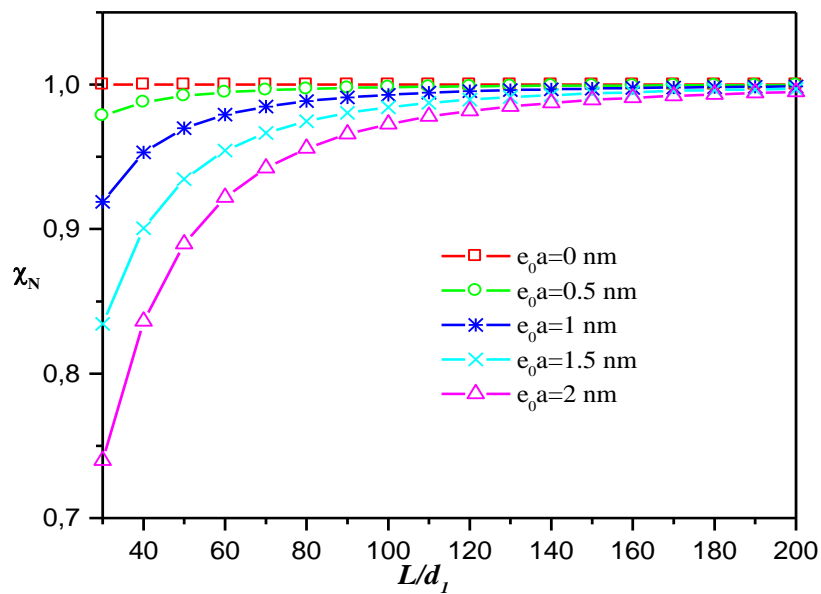
Le moment d'inertie I

$$EI = \frac{E\pi}{64} (d_0^4 - d_i^4) = \frac{\pi Et}{8} d^3 = \frac{\pi C}{8} d^3 \quad (3)$$

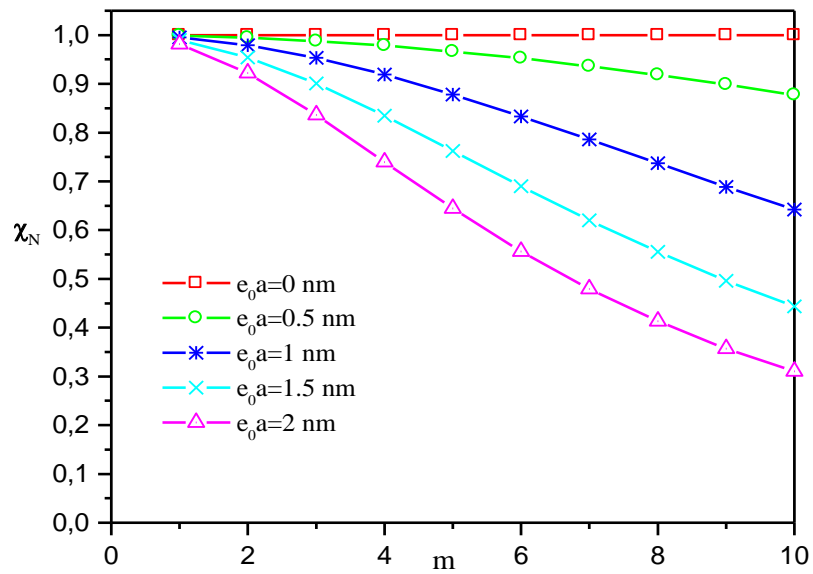
$$I = \frac{\pi t}{8} d^3$$

Le coefficient d'interaction d'intertube  $c_{i(i+1)}$

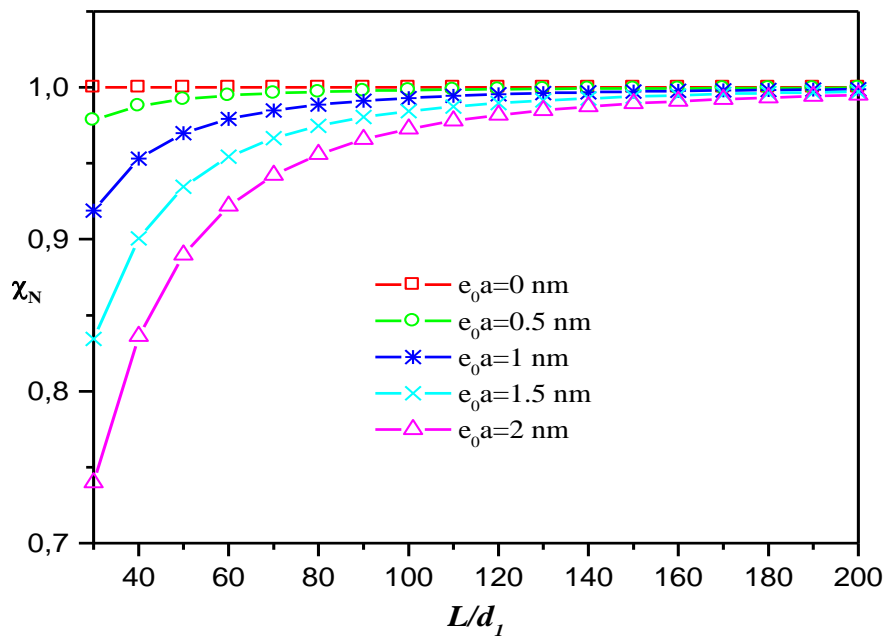
$$c_{12} = 0.96293 \cdot 10^{11} \text{ J/cm}^4$$



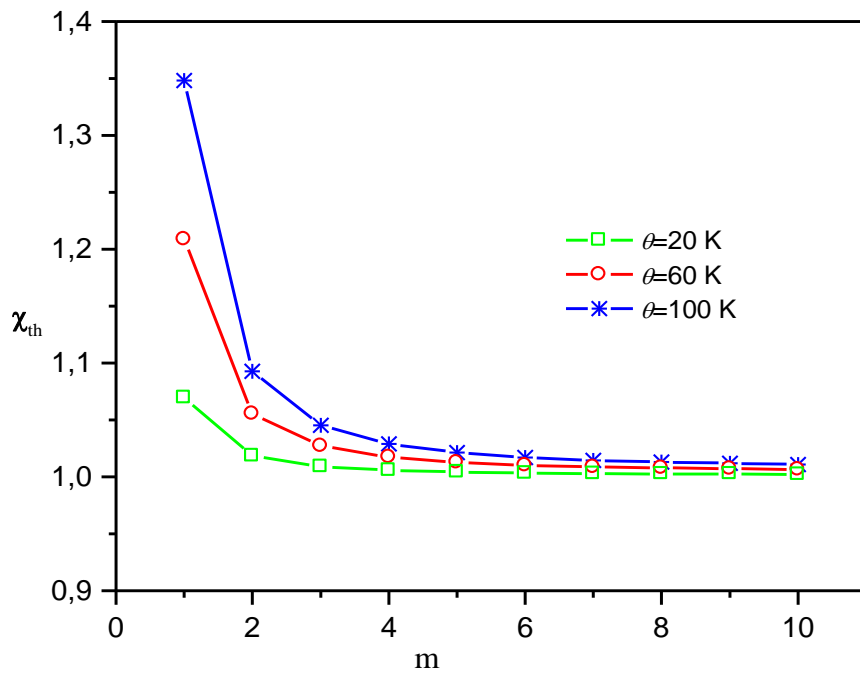
**Fig. III.1** Effet de la petite échelle sur le rapport de la déformation axial critique de flambement de DWNT dans le cas de la basse température ( $\theta = 60\text{K}$ ),  $m=2$ .



**Fig. III.2.** Effet de la petite échelle sur le rapport de la déformation axial critique de flambement de DWNT avec le rapport  $L / d_1 = 60$  dans le cas de la haute température ( $\theta = 60$  K),  $m=2$



**Fig. III.3.** Effet de la petite échelle sur le rapport de la déformation axial critique de flambement de DWNT dans le cas de la haute température ( $\theta = 60$  K),  $m=2$ .



**Fig. III.4.** Effets thermiques sur la déformation critique de flambement de DWNT pour divers  $m$  dans le cas de basse ou de la température ambiante

### IV.2. Discussion sur l'effet de changement de température

Pour le cas de la basse température, on suppose que  $\alpha = -1.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [30] et le rapport  $\chi_N$ , avec  $m = 2$  et  $\theta = 60 \text{ K}$ , le rapport  $\chi_N$ , le paramètre non local  $e_0 a$  et le rapport  $L/d$  sont montrés dans la fig.III.1 Le rapport  $\chi_N$  sert d'index pour évaluer quantitativement l'effet d'échelle réduite sur la solution de flambement de DWCNT. On voit clairement la figure III.1 que le rapport  $\chi_N$  est moins que l'unité. Ceci signifie que l'application du modèle local d'Euler-Bernoulli pour l'analyse de CNT mènerait une grande prédiction de déformation axiale critique de flambement si l'effet de la petite échelle de longueur entre les différents atomes de carbone dans CNTs est négligé. À mesure que le paramètre d'échelle  $e_0 a$  augmente, le rapport  $\chi_N$  obtenu pour la théorie non local de poutre devient plus petit que ceux de la théorie locale. Cette réduction est particulièrement significative pour des valeurs

## Chapitre III

---

plus élevées de  $m$ , et l'effet à échelle réduite ne peut pas être négligé ainsi. La réduction peut être expliquée par l'effet d'échelle réduite qui rend le CNTs plus flexible pendant que le modèle non local peut être vu comme atomes liés par les ressorts élastiques [30] tandis que le modèle local de milieu continu considère le ressort constant pour prendre une valeur infinie. Dans l'ensemble, la théorie non locale devrait être employée si on a besoin des prévisions précises.

Pour le cas de la haute température, nous supposons  $\alpha = 1.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [30]. Avec le rapport  $L/d_1=60$  et le changement de la température  $\theta = 60K$ , la variation du rapport  $\chi_N$  avec le paramètre d'échelle  $e_0a$  pour diverse valeur de  $m$  est montrée dans la figure. III. 2, avec  $m=2$  et  $\theta = 60K$ , la variation du rapport  $\chi_N$  avec le paramètre non local  $e_0a$  pour diverse valeur de  $L/d_1$  est montré dans la figure.III.3, on trouve les figures.III.2 et III.3 que la déformation de flambement de nanotube de carbone est liée au paramètre non local  $e_0a$ . on peut voir les figures. III.2 et III.3 que le rapport  $\chi_N$  est moins que l'unité, qui est semblable au cas de la basse température. Par conséquent la déformation axiale critique du flambement basée sur la théorie classique de poutre est surestimée.

On s'attend à ce que l'effet à échelle réduite diminue pour CNT très mince. En comparant sa grandeur avec la longueur du nanotube mince, la petite échelle est si petite qu'elle est prise égale à zéro. Figures.III.1 et III.3 confirment ce point pour les deux cas des basses et haute températures en montrant les différentes variations du rapport  $\chi_N$  contre le rapport  $L/d_1$  pour  $m = 2$  avec différent paramètre d'échelle  $e_0a$ . Par conséquent, il est clair que l'effet à échelle réduite soit significatif pour CNTs court.

## Chapitre III

---

Pour le cas de la basse température, nous supposons  $\alpha = -1.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [30]. Avec le rapport  $L/d_1 = 60$  et le paramètre d'échelle  $e_0 a = 2nm$ , le rapport  $\chi_{th}$ , le changement de température  $\theta$  et  $m$  sont indiqués dans la figure.III.4, on voit dedans la figure.III.4 que la déformation de flambement de nanotube de carbone double parois dépend du changement de température  $\theta$ . L'effet thermique sur la déformation de flambement devient plus significatif avec l'augmentation du changement de température  $\theta$  et le rapport  $L/d_1$  et devient moins significatif avec l'augmentation de  $m$ . Par exemple, dans le cas  $L/d_1 = 60$ , nous observons de figure.III.4 que l'effet du changement de température sur la déformation de flambement peut être négligé quand  $m \geq 8$ . On voit également de figure.III.4 que le rapport  $\chi_{th}$  est plus que l'unité. Ceci signifie que la déformation de flambement comprenant l'effet thermique est plus grande que celui sans considérer la variation température et augmente avec l'augmentation du changement de température.

# **Conclusion Générale**



# Conclusion Générale

---

## Conclusion

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons étudié le phénomène de flambement des nanotubes sous les effets thermique ainsi l'influence d'échelle et d'autres paramètres comme l'impact de la structure des nanotubes sur leurs propriétés mécaniques. L'importance de cette étude est qu'elle sert comme base de données pour les futurs chercheurs.

Nous avons essayé d'analyser le comportement du flambement des nanotubes de carbone multiparois a en se servant du modèle non local d'Euler-Bernoulli. Par l'étude de la déformation critique de flambement de nanotube de carbone à deux parois, nous avons réussi à obtenir une expression explicite. Donc, d'après les résultats obtenus, la petite échelle et de changement de température affecte de manière significative le comportement de flambement, on peut voir clairement car ce dernier est réduit. L'influence du changement de température sur la déformation de flambement du DWNTC (Nanotube à double parois) est également discutée. Ainsi, nous constatons que les paramètres de température, les rapports longueur-diamètre et les modes de vibration influencent le comportement de notre matériau choisi.

Références

Bibliographiques

### Références bibliographiques

- [1] Helical microtubules of graphitic carbon, S. Iijima, *Nature*, 1993, 354, 56.
- [2] Amelinckx S., Bernaerts D., Zhang X.B., Van Tendeloo G. et Van Landuyt J. *Science*, 267 :1334 (1995)
- [3] Bethune D.S., Kiang C.H., de Vries M.S., Gorman G., Vasquez J. et Beyers R. *Nature*, 363 :605 (1993)
- [4] Iijima S. et Ichihashi T. *Nature*, 363 :603 (1993)
- [5] <http://www.pa.msu.edu/cmp/csc/nanotube.html>
- [6] Ruland W., Schaper A.K., Hou H. et Greiner A. *Carbon*, 41 :423 (2003)
- [7] Yakobson B.I., Brabec C.J., Bernholc J., Nanomechanics of Carbon Tubes: Instabilities Beyond the Linear Response, *Physical Review Letters* 76, 2511 (1996)
- [8] Saito R., Fujita M., Dresselhaus G., and Dresselhaus M.S., *Appl. Phys. Lett.*, 60 (18), 2204 (1992)
- [9] Fischer J.E., Dai H., Thess A., Lee R., Hanjani N.M., Dehaas D.L., Smalley R.E., *Phys. Rev. B* 55, R4921-R4924 (1997)
- [10] Site web de l'équipe de P. Avouris au Nanoscale science department d'IBM <http://www.research.ibm.com/nanoscience/>
- [11] Single-wall carbon nanotubes for optical limiting, L. Vivien, E. Anglaret, D. Riehl, F. Bacou, C. Journet, C. Goze, M. Andrieux, M. Brunet, F. Lafonta, P. Bernier, F. Hache, *Chem. Phys. Lett.*, 1999, 307,
- [12] L. Vivien, D. Riehl, E. Anglaret, F. Hache, *IEEE J. of Quant. Elect.*, 2000, 36, 680.
- [13] Lauret Jean-Sébastien, Etude des propriétés optiques des nanotubes de carbone, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI (2003)
- [14] Journet C., Maser W.K., Bernier P., Loiseau A., Lamy de la Chapelle M., Lefrant S., Deniard P., Lee R. et Fischer J.E. *Nature*, 388 :756 (1997)
- [15] Journet Catherine. La production de nanotubes de carbone. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II (1998)
- [16] Nikolaev P., Bronikowski M.J., Kelley Bradley R., Rohmund F., Colbert D.T., Smith K.A. et Smalley R.E. *CPL*, 313 :91-97 (1999)
- [17] <http://www.cnanotech.com>
- [18] Decossas Sébastien, Nanotribologie par Microscopie de Force Atomique (AFM) sur des nanotubes de carbone, Thèse de Doctorat (2001), Université Grenoble I - Joseph Fourier
- [19] Wong Kang et al, *Physica E* 27 332-340 (2005)

## Références Bibliographiques

---

- [20] Lu et al, Nanotechnology 18 065501 (2007)
- [21] H. Heireche, A. Tounsi, A. Benzair, and I. Mechab, J. Appl. Phys. 104,014301 (2008).
- [22] M. Benouis, magister, étude et analyse de l'instabilité des nanotubes en carbone, novembre 2009.
- [23] Fennimore et al. Nature 424 408-410 (2003).
- [24] A.C. Eringen, J. Appl. Phys. 54, 4703 (1983).
- [25] M.M. J Trency, Ebben, J.M. Gibson, Gibson, Nature 381, 678 (1996)
- [26] C.Q. Ru, Phys. Rev. B 62, 16962 (2000).
- [27] H. Jiang. R. Liu, Y. Hwang, J. Eng. Mater. Technol. 126, 265 (2004).
- [28] L.F Wang. And H. Y. Hu, Phys. Rev. B 71, 195412 (2005).
- [29] H. Heireche, A. Tounsi, A.Benzair, M. Maachou, E.A. Adda Bedia, Physica. E40, 2791 (2008).
- [30] X.H. Yao, Q. Han, J.Eng. Mater. Technol. 128, 419 (2006).