

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université Ibn Khaldoun de Tiaret**



Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Civil

**Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master**

Spécialité : Génie Civil  
Option : ouvrage d'art et infrastructure

**Présenté par :**

Barki Hanane

Dahlal sara

**Sujet du mémoire**

**Analyse de la vibration forcée d'un nanotube de  
carbone monocouche type zig-zag situé dans une  
matrice polymère**

Soutenu publiquement le / / devant le jury composé de :

Mr :A.CHEIKH

Président

Mr: S.BELMAHI

Rapporteur

Mr: M.ZIDOUR

co-rapporteur

Mr: H.HEBALI

Examineur

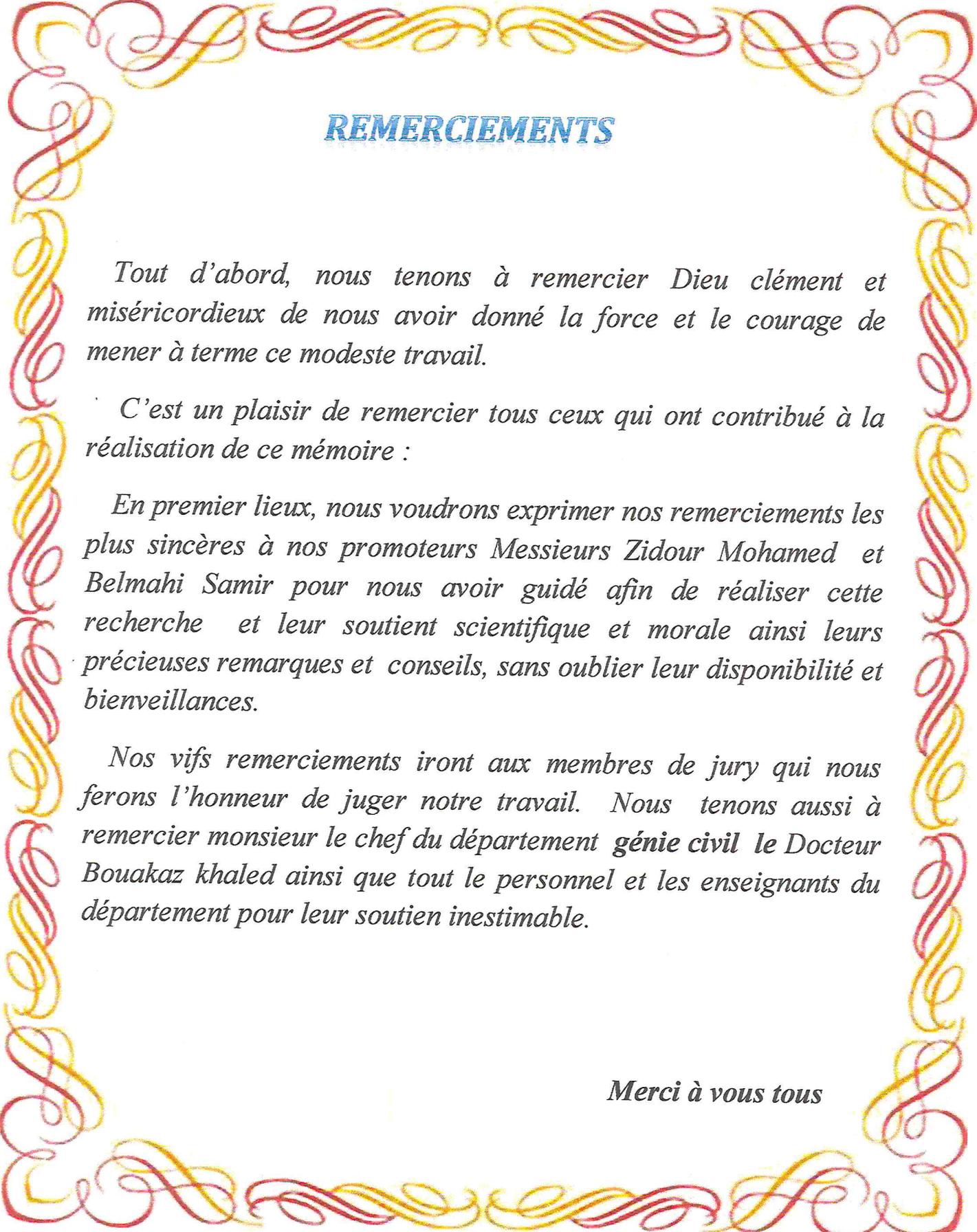
Mr: A.KRIM

Examineur

Mr: R.BENFERHAT

Examineur

2016/2017



## REMERCIEMENTS

*Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu clément et miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à terme ce modeste travail.*

*C'est un plaisir de remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire :*

*En premier lieux, nous voudrions exprimer nos remerciements les plus sincères à nos promoteurs Messieurs Zidour Mohamed et Belmahi Samir pour nous avoir guidé afin de réaliser cette recherche et leur soutien scientifique et morale ainsi leurs précieuses remarques et conseils, sans oublier leur disponibilité et bienveillances.*

*Nos vifs remerciements iront aux membres de jury qui nous ferons l'honneur de juger notre travail. Nous tenons aussi à remercier monsieur le chef du département génie civil le Docteur Bouakaz khaled ainsi que tout le personnel et les enseignants du département pour leur soutien inestimable.*

*Merci à vous tous*

# Dédicace

À la plus belle créature que Dieu a créée sur terre,  
À cette source de tendresse, de patience et de générosité,

À ma mère !

Ainsi Qu'à mon père !

À mon grand frère et son épouse

À mes beaux grands parents et à toute les familles Barki  
,BenAbdelkrim , Dahlal,khalifa,Boukhres.

À tous mes amis et collègues mes chers Sara, Messaouda  
,Jihed.Ghezlen .

À tous les étudiants de la promotion 2016/2017

Option : génie civil

A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de  
continuer ....

**Hanane**

---

## Résumé

Le présent travail portera sur l'étude de la vibration forcée d'un nanotube de carbone monocouche entouré par une matrice polymère qui représente le milieu élastique. On appliquant les théories d'élasticité, on développant l'équation différentielle générale de la vibration forcée d'un nanotube de carbone monocouche suivant le modèle de poutre d'Euler-Bernoulli. Cette dernière prend la combinaison de l'effet de l'interaction du milieu élastique du type Winkler avec le nanotube on utilisant le modèle de comportement local et non local. Par la suite une étude de l'influence de la distribution de l'amplitude et/ou la fréquence a été faite on faisant varier quelques paramètres tels que (l'effet d'échelle ( $\epsilon_0 a$ ), le rapport dimensionnel longueur/diamètre ( $L/d$ ), le nombre de mode ( $N$ ), l'effet de la chiralité et ainsi que l'effet du milieu élastique). Les résultats obtenus indiquent la dépendance de la variation de l'amplitude et la fréquence avec les différents paramètres du modèle.

Mot clé: nanotube; vibration forcée; Winkler; nanocomposite, nonlocal

---

**Abstrat**

This work will study the forced vibration of a monolayer carbon nanotube surrounded by a polymer matrix that represents the elastic medium. We apply the theories of elasticity, developing the general differential equation of the forced vibration of a monolayer carbon nanotube according to the Euler-Bernoulli beam model. The latter takes the combination of the effect of the interaction of the elastic medium of the Winkler type with the nanotube using the model of local and non-local behavior. Subsequently, a study of the influence of amplitude distribution and / or frequency was made by varying some parameters such as (scale effect ( $e_0a$ ), length / diameter dimension ratio ( $L / D$ ), the mode number ( $N$ ), the effect of the chirality and the effect of the elastic medium. The results obtained indicate the dependence of the variation of the amplitude and the frequency with the different parameters of the model.

**Keyword:** nanotube; Forced vibration; Winkler; Nanocomposite, nonlocal

## ملخص

يركز هذا العمل على دراسة الاهتزاز القسري لأنابيب الكربون طبقة واحدة محاطة البوليمر الذي يمثل وسيلة مرنة. على تطبيق نظرية مرونة، واحدة وضع الاهتزاز القسري التفاضلية العام المعادلة لأنابيب الكربون أحادي الطبقة فقا للنموذج شعاع أويلر-برنولي. يأخذ هذا الأخير مزيج من تأثير التفاعل من النوع المتوسط مرونة وينكلر مع أنابيب يستخدم نموذج للسلوك المحلية وغير المحلية. بعد ذلك دراسة تأثير توزيع السعة و / أو تردد أحرز ومتفاوتة بعض المعلمات مثل (تأثير على نطاق و(E0A)، والأبعاد طول / نسبة قطر (L / د)، وعدد من واسطة (B)، وتأثير شرليتي وبالتالي تأثير المتوسطة مرن). وتشير النتائج إلى أن الاعتماد على الاختلاف من السعة والتردد مع المعلمات نموذج مختلف.

الكلمة: أنابيب. الاهتزاز القسري؛ وينكلر. بمركب متناهي في الصغر غير محلي

---

## Sommaire

Résumé.....	
Liste des figures .....	
Liste des tableaux.....	
Liste des abréviations.....	
Liste des notations.....	
Introduction générale.....	

### Chapitre 1 : Recherche bibliographique sur les nanotubes de carbone

1.1 Introduction.....	01
1.2 Les formes traditionnelles du carbone.....	01
1.2.1 Le graphite.....	01
1.2.2 Le diamant.....	02
1.2.3 Différences entre graphite et diamant.....	03
1.2.4 Les fullerènes .....	03
1.3 Les nanotubes.....	05
1.3.1 Les différents types des nanotubes.....	05
1.3.1.1 Nanotube de Nitrure de bore .....	05
1.3.1.2 Nanotubes à base d'autre composant.....	05
1.3.1.3 Nanotube de carbone .....	05
1.3.2 Les nanotubes monocouches (ou mono parois).....	07
1.3.3 Méthodes de synthèse des nanotubes.....	09
1.3.3.1 Synthèse de NTC par arc électrique .....	09
1.3.3.2 Méthode d'ablation laser .....	10
1.3.3.3 Méthode de dépôt chimique en phase vapeur.....	12
1.3.3.4 Décomposition catalytique ( <i>HiPCO</i> ).....	13
1.3.4 Propriétés des nanotubes de carbone.....	15
1.3.4.1 Propriétés mécaniques.....	15
1.3.4.2 Propriétés thermiques .....	15
1.3.4.3 Propriétés électriques.....	16
1.3.4.4 Propriétés chimiques.....	16
1.3.4.5 Propriétés d'émission de champ.....	16
1.3.5 Défauts des nanotubes de carbone.....	17
1.3.6 Purification des nanotubes.....	18
1.3.6.1 Les méthodes chimiques.....	18
1.3.6.2 Les méthodes physiques .....	19
1.3.7 Ouverture des nanotubes.....	20
1.3.8 Applications des nanotubes de carbone.....	20
1.3.8.1 Applications mécaniques.....	20
1.3.8.2 Applications électroniques .....	21
1.3.8.3 Application thermiques .....	21
1.3.8.4 Applications optiques .....	21
1.4 Conclusion.....	21

---

**Sommaire**
**Chapitre 2 : Les matériaux composites et nanocomposites**

2.1 Introduction .....	23
2.2 Les matériaux composites.....	23
2.2.1 Renfort.....	25
2.2.1.1 Fibres de verre .....	25
2.2.1.2 Fibres de bore .....	26
2.2.1.3 Fibres de carbone .....	26
2.2.1.4 Fibres aramide (kevlar).....	27
2.2.2 Matrice.....	28
2.2.2.1 Matrices organiques .....	29
2.2.2.2 Matrices métalliques.....	30
2.2.2.3 Matrices céramiques.....	30
2.3 Polymère .....	30
2.3.1 Classification des polymères organiques .....	31
2.3.1.1 Selon leur origine .....	31
2.3.1.2 Selon leur doaine d'application .....	31
2.3.1.3 Selon leur structure (dimensionnalité).....	32
2.3.2 Utilisation des polymères .....	34
2.4 Avantages et inconvénients des matériaux composites .....	34
2.4.1 Avantages.....	34
2.4.2 Inconvénients.....	34
2.5 Les domaines d'application des composites .....	34
2.5.1 Dans la construction civil.....	34
2.6 Les nanocomposites .....	35
2.6.1 Nano composites (Nanotube de carbone/matrice Polymère).....	35
2.6.2 Procédé de fabrication des nano composites à base de NTCs.....	36
2.6.2.1 Techniques de la mise en œuvre.....	36
2.6.2.2 Dispersion des nanotubes.....	37
2.7 Conclusion.....	39

**Chapitre 3: La vibration forcée d'un nanotube de carbone monocouche  
type zig-zag**

3.1 Introduction .....	40
3.2 La structure d'un nanotube de carbone.....	40
3.3 Les propriétés mécaniques des nanotubes monocouches (SWCNT's).....	41
3.3.1 Module de young.....	41
3.4 Le modèle continu non local dans un nanotube de carbone.....	43
3.5 Le modèle de calcul (Euler-Bernoulli).....	44
3.5.1 Equation différentielle de la vibration (mouvement).....	44
3.5.2 Solution de l'équation.....	45

---

## Sommaire

3.5.3 Cas particuliers.....	46
3.5.3.1 Chargement local.....	46
3.5.3.2 La vibration libre d'un nanotube de carbone .....	46
3.6 Le modèle de Winkler .....	47
3.7 Le modèle de calcul (Euler-Bernoulli).....	49
3.8 Conclusion .....	51

## Chapitre 4 : résultats et discussion

4.1 Introduction .....	52
4.2 Résultats et discussions .....	52
4.2.1 Rapport d'amplitude en fonction de la fréquence.....	52
4.2.1.1 le cas général.....	52
4.2.1.2 effet du rapport dimensionnel.....	53
4.2.1.2 effet du nombre de mode.....	54
4.2.1.2 effet de localité de contrainte.....	55
4.2.2 Effet du milieu élastique (rigidité).....	56
4.2.2.1 amplitude /fréquence.....	56
4.2.2.2 Amplitude /nombre de mode.....	57
4.2.2.2 Amplitude / rapport dimensionnel.....	58
4.2.3 Module de Young / nombre de chiralité.....	59
4.2.4 Résultats divers.....	59
4.2.4.1 Amplitude (f), chiralité (n) , nombre de mode (N) et le rapport d'échelle ( $e_0a$ )...	59
4.2.4.2 Amplitude (f), chiralité (n), nombre de mode (N) et la raideur du matériau.....	60
4.3 Conclusion.....	61

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Structure du graphite hexagonal.....	02
Figure 1.2 : Structure atomique du diamant.....	03
Figure 1.3 : structure de graphite et de diamant.....	04
Figure 1.4 : Fullerène C60.....	05
Figure 1.5 : Nanotube de carbone.....	07
Figure 1.6 : hélicité des nanotubes.....	08
Figure 1.7 : Les types de nanotubes mono parois.....	09
Figure 1.8 : Production de nanotubes de carbone par la méthode de l'arc électrique.....	10
Figure 1.9 : Schéma de l'appareillage d'ablation laser.....	11
Figure 1.10 : Réacteur de synthèse laser continu (CO2) de l'ONERA.....	11
Figure 1.11 : Schéma d'un réacteur CVD pour la croissance des (NTC).....	12
Figure 1.12 : Nanotubes synthétisés par CVD.....	13
Figure 1.13 : Schéma du Production de nanotubes.....	13
Figure 1.14 : Influence du type de cycle sur la courbure de la surface.....	17
Figure 1.15 : Image (MET) d'un échantillon de nanotubes (collerette brute produite par arc Électrique). On peut distinguer, en plus des (SWNTs), des particules de catalyseur et deux Formes de carbone amorphe).....	18
Figure 2. 1 : Matériau composite.....	23
Figure 2.2 : Voie classique de la production des fibres de carbone.....	27
Figure 2.3 : Principaux matériau de renfort.....	28
Figure 2.4 : Les différentes familles de matrice.....	30
Figure 2.5 : Représentation de la chaîne d'un polymère linéaire.....	32
Figure 2.6 : Représentation schématique d'un polymère bidimensionnel, ici le carbone graphite.....	33
Figure 2.7 : Représentation schématique d'un polymère tridimensionnel.....	33
Figure 2.8 : L'influence de la dispersion des (CNTs) par ultrasons.....	37

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.9 : a) TricylindreExakt 80E (Source : Exakt Vertriebs GmbH, Allemagne). B) Schéma du circuit d'un fluide dispersé par (Source : IPAT, TUBraunschweig, Allemagne).....	38
Figure 3.1: Structure d'un plan de graphène en deux dimensions. Le réseau hexagonal est décrit à partir des deux vecteurs de base ( $a_1$ ) et ( $a_2$ ).....	40
Figure 3.2 : Schéma d'un nanotube de carbone type zigzag ( $n, 0$ ): (a) l'hexagonale (b) répartition de la force en liaison.....	41
Figure 3.3 : Une poutre repose sur une fondation élastique (Winkler).....	48
Figure 3.4 : Une poutre repose sur une fondation élastique (Winkler-Pasternak).....	48
Figure 4.1 : La relation entre le rapport ( $f$ ) et le rapport de fréquence ( $r$ ) sans milieu élastique pour $N=1$ .....	52
Figure 4.2 : La relation entre le rapport ( $f$ ) et la fréquence ( $r$ ) pour différent rapport $L/d$ sans milieu élastique ou ( $e_0a= 2nm$ et $N=1$ ).....	53
Figure 4.3: la relation entre le rapport ( $f$ ) et le rapport de fréquence ( $r$ ) pour le nombre de mode ( $N$ ).....	54
Figure 4.4 : la relation entre le rapport de l'amplitude ( $f$ ) et le rapport de fréquence ( $r$ ) pour différentes valeur de coefficient d'échelle ( $e_0a$ ).....	55
Figure 4.5 : la relation entre le rapport ( $f$ ) et le rapport de fréquence ( $r$ ) pour différent rigidité de winkler ( $K_w$ ).....	56
Figure 4.6 : la relation entre le rapport ( $f$ ) et le nombre de mode pour le module de winkler ( $K_w$ ).....	57
Figure 4.7 : la relation entre le rapport ( $f$ ) et le rapport ( $l/d$ ) pour le module de winkler ( $K_w$ ).....	58
Figure 4.8 : Relation entre le module de Yong ( $E$ ) et le nombre de maille ( $n$ ) type Zig-Zag.....	59

## Listes de Tableaux

<b>Tableau 1.1</b> : propriétés d'un atome de carbone.....	01
<b>Tableau 1.2</b> : propriétés d'un diamant.....	03
<b>Tableau 1.3</b> : la différence entre le graphite et le diamant.....	04
<b>Tableau 1.4</b> : les trois méthodes les plus utilisées pour la fabrication de NTC.....	14
<b>Tableau 1.5</b> : Quelques propriétés mécaniques des nanotubes de carbone.....	15
<b>Tableau 1.6</b> : Quelques caractéristiques des nanotubes de carbone.....	16
<b>Tableau 2.1</b> : Exemple des matériaux composites.....	25
<b>Tableau 2.2</b> : Caractéristiques mécaniques spécifiques des matériaux élaborés sous forme de fibre.....	27
<b>Tableau 2.3</b> : Caractéristiques moyennes des matrices thermodurcissables(TD) non renforcés.....	30
<b>Tableau 4.1</b> : le rapport (f) pour différentes valeurs de(n) en variant le nombre de mode (N) et le rapport d'échelle ( $e_0a$ ).....	60
<b>Tableau 4.2</b> : Présente le rapport (f) pour différentes valeurs de(n) en variant le nombre de mode (N) et le rapport à petite échelle (Kw).....	61

## Liste des abréviations

C : carbone

C60: Fullerène C60.

C70: Fullerène C70.

CCVD :Catalytic » ChemicalVaporDeposition.

CNT : (Carbone Nanotube) : Nanotube de Carbone.

MWCNT : (Multi-wallCarbon Nanotube) : Nanotube de Carbone Multifeuillet.

MWNT : (Multi-walledCarbon Nanotube) : Nanotube de Carbone Multi feuillet.

SWCNT : (Single-wallCarbon Nanotube) : Nanotube de Carbone Monofeuillet

CVD :ChemicalVaporDeposition.

C-C : liaison carbone-carbone

HiPCo :(High Pressure dismutation of CO) décomposition sous haute pression de CO.

HP :haute performance.

MET :Microscopie électronique de transmission.

TEM : Microscopie électronique de transmission

DWCNT :(double-wallCarbon nanotube) : Nanotube de Carbone double feuillet.

GD :grandes diffusions.

TD : matrices thermodurcissables.

TP : matrices Thermoplastiques.

ONERA: Laboratoire d'Etudes des Microstructures, Châtillon

$\vec{a}_1, \vec{a}_2$  : Les vecteurs de base du graphène

## Liste des abréviations

$\vec{ch}$  : Le vecteur chiral

$\theta$  : L'angle chiral

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

$e_0$  : Une constante appropriée à chaque matériel

$e_0a$  : Le rapport de petite échelle

$\tau$  : La contrainte tangentielle.

$\sigma$  : La contrainte axiale

$\varepsilon$  : La déformation axiale d'un nanotube de carbone

$M$  : Le moment de flexion

$q_m$  : La charge

$W$  : Le déplacement transversal

$\rho$  : La masse volumique

$A$  : La section transversale du nanotube

$I$  : Le moment d'inertie

$E$  : Le module de Yong du matériau

$V$  : La résultante de la force de cisaillement

$E$  : Le module de Young du nanotube monocouche

$L/d$  : Le rapport longueur/diamètre

$\sigma_{ij}$  et  $\varepsilon_{ij}$  : Les tenseurs des contraintes et déformations.

## Liste des abréviations

$W_{NE}$  : La fréquence d'un nanotube de carbone monocouche basée sur le modèle nonlocal d'Euler-Bernoulli.

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

$w$  : Le déplacement transversal.

$N$  : Nombre de mode

$r$  : Le rapport de fréquence

$k_{w/m}$  : Le rapport winkler

$X$  : L'axe des coordonnées axiales.

# ***Chapitre 1***

## 1.1 Introduction

Les nanotubes sont des matériaux d'actualité par excellent, ils ont été découverts en 1991 par Iijima [1]. Les nanotubes se présentent sous forme d'un feuillet de graphène formé d'atomes de carbone disposés en réseau hexagonal comme un nid d'abeilles, et enroulé sur elle-même comme un cigare. Son diamètre est de l'ordre du nanomètre, sa longueur peut atteindre plusieurs micromètres. La découverte des nanotubes de carbone a ouvert une nouvelle voie pour obtenir des pointes fines à haut rapport d'aspect. Cent-mille fois plus fin qu'un cheveu, cent fois plus résistant et six fois plus léger que l'acier et en plus ce sont des matériaux flexibles, conducteurs et possèdent d'excellentes propriétés mécaniques, thermiques et électroniques. Toutes ces propriétés conduisent à de nombreuses applications notamment dans la conception de nouveaux matériaux [2].

## 1.2 Les formes rationnelles du carbone

Le mot carbone provient du latin carbo, qui signifie « charbon » sous forme de suie et de charbon de bois, le carbone est connu depuis la Préhistoire. En 1772, Lavoisier démontra que le diamant est une forme de carbone. Il en sera de même pour le graphite en 1779 par Carl Wilhelm Scheele. C'est à nouveau Lavoisier qui répertoria le carbone comme un élément dans ses œuvres dès 1789. Le carbone est un élément central dans la vie sur terre, aussi bien pour les végétaux que pour les animaux. Les propriétés du carbone sont présentées dans le tableau 1.1 [3]

Tableau 1.1 propriétés d'un atome de carbone [3]

<b>Symbole</b>	C
<b>Numéro atomique</b>	6
<b>Electrons par niveau d'énergie</b>	2,4
<b>Masse atomique</b>	12,011 u
<b>Isotopes les plus stables</b>	C <sup>12</sup> stable avec six neutrons (98,93 %), C <sup>13</sup> stable avec sept neutrons (1,07 %)
<b>Série</b>	non-métaux
<b>Groupe, période, bloc</b>	14, 2, p
<b>Densité</b>	entre 1,8 (carbone amorphe) et 3,5 (diamant)
<b>Point d'ébullition</b>	3.825 °C (sublimation)

Le carbone existe en plusieurs formes :

### 1.2.1 Le graphite

Le graphite naturel est un minéral de carbone (C) élémentaire, de structure cristalline hexagonale. Sa couleur varie de noire à gris-noir. C'est un minéral tendre, flexible, d'éclat

métallique et d'aspect gras et luisant ; C'est une substance inerte qui résiste à l'attaque de la plupart des produits chimiques. C'est un excellent conducteur d'électricité et de chaleur. Il possède un faible coefficient de friction, en raison d'un clivage parfait entre ses lamelles superposées, son coefficient thermique est également faible [4]. Il est caractérisé par :

- une densité faible qui varie de 2,1 à 2,3;
- une dureté faible de 2 sur l'échelle de Mohs;
- un point de fusion très élevé (3500 °C).

Le graphite naturel se subdivise en trois variétés :

- le graphite en paillettes;
- le graphite de veine;
- le graphite amorphe.

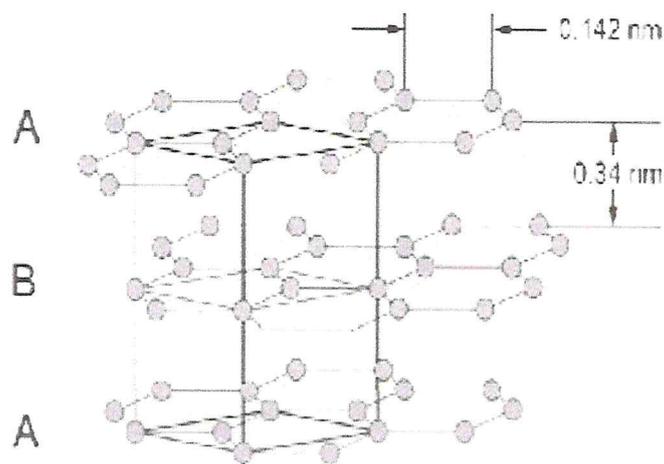


Figure 1.1 Structure du graphite hexagonal [5].

La structure du graphite est constituée de feuillets hexagonaux non compacts, nommés graphènes, séparés d'environ 0,336 nm le long de la direction de leur normale. Dans chaque feuillet, chaque atome de carbone est fortement lié par des liaisons covalentes de type sigma pour ses 3 électrons  $sp^2$ , et des liaisons covalentes de type  $\pi$  pour son autre électron p. Ces liaisons  $\pi$  sont des liaisons conjuguées avec les trois atomes voisins, les électrons y sont très mobiles ce qui explique la grande conductivité électrique et thermique ainsi que la couleur noire du graphite. Entre les feuillets les liaisons sont faibles et seraient de type liaison de van der Waals, ce qui expliquerait le clivage et la faible dureté. Par contre ceci est mis en doute dans des travaux récents [6].

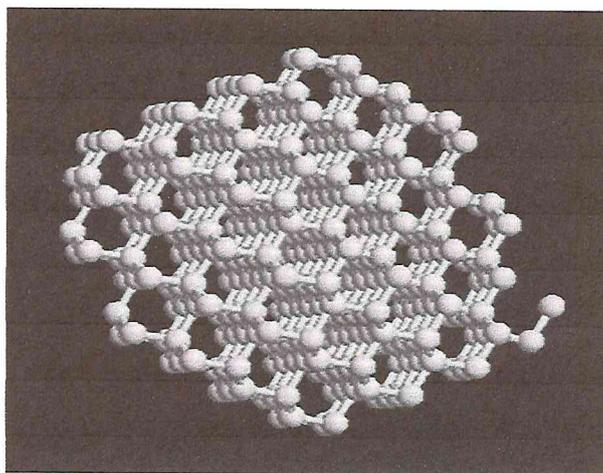
### 1.2.2 Le diamant

Le diamant est un minéral composé de carbone, c'est la pierre précieuse dont la composition est la plus simple, les autres pierres précieuses sont toutes des composés. Le diamant a parfois des traces d'azote qui peuvent aller jusqu'à 0,20% et une très petite proportion d'éléments étrangers. Le cristal de diamant se serait formé par l'assemblage dans les 3 directions de l'espace d'atomes de carbone. Les liaisons atomiques du diamant sont très courtes, cela explique en partie sa très grande dureté.[7]

**Tableau 1.2 propriétés d'un diamant**

<b>Famille</b>	Diamant
<b>Composition chimique</b>	C, carbone pur
<b>Dureté</b>	10
<b>Clivage</b>	Parfait
<b>Densité</b>	de 3,51 à 3,53
<b>Indice de réfraction</b>	de 2,417 à 2,419 (monoréfringent)
<b>Biréfringence</b>	Aucune
<b>Pléochroïsme</b>	Absent
<b>Dispersion</b>	0,044

Pour un diamant, chaque atome de carbone est hybridé et lié par covalence à quatre atomes voisins dans un arrangement tétraédrique. Sa dureté exceptionnelle s'explique par la résistance de ces liaisons covalentes. Chaque atome met en commun ses quatre électrons disponibles de sa couche externe avec ses quatre autres atomes voisins pour former ainsi une cage tétraédrique régulière. C'est cet arrangement "parfait" qui donne sa résistance à la plupart des sollicitations extérieures, et fait du diamant l'un des matériaux les plus durs que l'on connaisse. Il existe plusieurs structures cristallines du diamant, comme le diamant hexagonal ou la lonsdaléite, mais la structure la plus courante est de loin le diamant cubique. La maille de cette structure est de type cubique faces centrées [2]

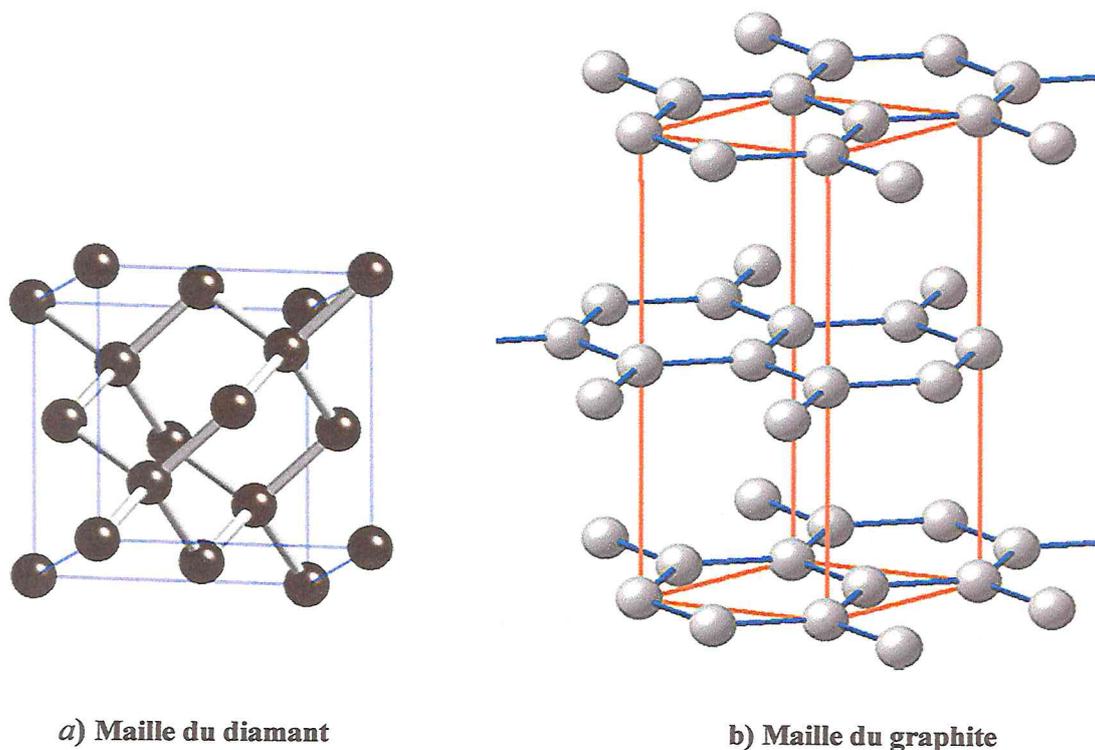
**Figure 1.2 Structure atomique du diamant [8]**

### 1.2.3 Différences entre graphite et diamant

Le graphite et le diamant se sont les deux des atomes de carbone, mais qui présentent des caractéristiques différentes :

**Tableau 1.3 la différence entre le graphite et le diamant**

Graphite	Diamant
Matériau très mou	Matériau très dur
Conducteur de courant	Isolant électrique
Conduit moyennement la chaleur	Excellent conducteur de chaleur
Opaque à la lumière visible	Transparent à la lumière visible



**Figure 1.3 structure de graphite et de diamant [9]**

### 1.2.4 Les fullerènes

En 1985, Curl, Kroto et Smalley ont réussi à isoler une forme majoritaire constituée de (60) atomes de carbone. Cette molécule, reformée sur elle-même comme une cage, à 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 (figure 1-3).

Cette nouvelle molécule de (60) atomes de carbone, ou C<sub>60</sub>, a été appelée Buckminster fullerène, par analogie avec les dômes géodésiques de l'architecte R. Buckminster Fuller.

Depuis. Le nom a évolué, et nous nous référons maintenant à cette Molécule en tant que fullerène, ou plus simplement C60 [2]

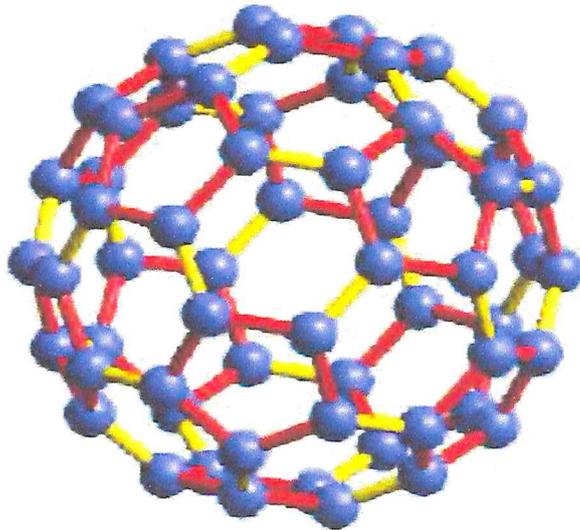


Figure1.4 Fullerène C60 [10]

### 1.3 Les nanotubes

Le nanotube est une structure cristalline particulière, de forme tubulaire, creuse et close, composée d'atomes disposés régulièrement en pentagones, hexagones et/ou heptagones, obtenue à partir de certains matériaux, en particulier le carbone et le nitrure de bore [4].

#### 1.3.1 Les différents types des nanotubes.

##### 1.3.1.1 Nanotube de Nitrure de bore

En 1994, l'École polytechnique, en France, a réussi à produire des nanotubes à partir de nitrure de bore. Leurs propriétés sont encore imprécises, mais on sait pour l'instant qu'ils sont un isolant électrique, qu'ils pourraient avoir des propriétés de conduction de la lumière, ce qui pourrait les rendre utiles en optronique, et des propriétés d'émission de champs [4].

##### 1.3.1.2 Nanotubes à base d'autre composant

Des nanotubes ont été produits à partir d'autres composés chimiques :

- Sulfures (molybdène, tungstène, cuivre)
- Halogénures (chlorure de nickel, chlorure de cadmium, iodure de cadmium) [4].

##### 1.3.1.3 Nanotube de carbone

Les nanotubes de carbone sont une forme allotropique du carbone appartenant à la famille des fullerènes. Ils sont composés d'un ou plusieurs feuillets d'atomes de carbone enroulés sur eux-mêmes formant un tube. Le tube peut être fermé ou non à ses extrémités par

une demi-sphère. On distingue les nanotubes de carbone simple-feuillet (SWNT ou SWCNT, pour Single-Walled(Carbon) Nanotubes) et multi-feuillets (MWNT ou MWCNT, pour Multi-Walled (Carbone) Nanotubes) [11].

La naissance des nanotubes de carbone est plus ancienne, une très grande partie des revues de toute nature attribuent, à tort, la découverte de tubes nanométriques composés de feuillets de graphite à Sumio Iijima (NEC) en 1991. Bien que ses publications aient marqué le point de départ de l'intérêt pour ces structures, Sumio Iijima n'a pas été en fait le premier à observer un nanotube de carbone. En effet, La première observation réelle de nanotubes semble dater de 1952 où Radushkevich et Lukyanovich ont publié des images claires de tubes de carbone d'environ 50 nanomètres de diamètre dans le *Journal of Physical Chemistry* (soviétique). Cette découverte ne s'est pas répandue, l'article étant publié en russe, les scientifiques de l'ouest n'ayant plus à cause de la guerre froide un accès que restreint aux publications de l'Académie des sciences d'URSS car elles n'étaient plus traduites en anglais.

Comme on l'a dit, des nanotubes de carbone furent produits bien avant cette date, mais c'est l'invention du microscope électronique en transmission qui rendra possible la visualisation directe de ces structures. Les nanotubes de carbone furent donc produits et observés sous différentes conditions, bien avant 1991. Un article d'Oberlin, Endo et Koyama publié en 1976 montre clairement des fibres de carbones creuses (*hollow carbon fibres*) de taille nanométrique, obtenues à partir de méthodes CVD. De plus, les auteurs montrent une image en MET d'un nanotube constitué d'une seule paroi. Plus tard, Endo a considéré que cette image était celle d'un nanotube monofeuillet.

En outre, en 1979, John Abrahams on présenta des preuves de l'existence des nanotubes de carbone à la 14<sup>e</sup> Conférence biennale du carbone de l'université d'État de Pennsylvanie. Lors de la conférence, les nanotubes de carbone furent décrits comme des fibres de carbone produites sur une anode de carbone après formation d'un arc électrique. Les caractéristiques de ces fibres étaient données, ainsi que des hypothèses sur leur croissance en milieu azoté à basse pression.

En 1981, un groupe de scientifiques soviétiques publia les résultats de la caractérisation chimique et structurale de nanoparticules de carbone produites par dismutation thermocatalytique de monoxyde de carbone. En utilisant des images MET et aux rayons X, les auteurs suggérèrent que leurs « cristaux tubulaires multicouche de carbone » étaient formés par enroulement de couches de graphène en cylindres. De plus, ils supposèrent que durant cet enroulement, plusieurs dispositions du réseau hexagonal du graphène étaient possibles. Ils envisagèrent deux possibilités : une disposition circulaire (nanotubes de type « fauteuil ») et une disposition en spirale (nanotubes chiraux).

En 1993, Sumio Iijima et Donald S. Bethune d'IBM en Californie réussissent indépendamment à synthétiser des nanotubes monofeuillets. Iijima obtient ses nanotubes monofeuillets en phase gazeuse, Bethune utilise quant à lui une technique de Co vaporisation de carbone et de cobalt [11]

### 1.3.2 Les nanotubes monocouches (ou mono parois)

La structure d'un nanotube de carbone mono feuillet peut être représentée par un feuillet de graphène enroulé sur lui-même et fermé ou non à ses deux extrémités par une demi-sphère.

La façon dont le feuillet de graphène est replié sur lui-même définit un paramètre, appelé chiralité, qui fixe la structure du nanotube. La chiralité permet de caractériser les différents types de nanotubes existants.

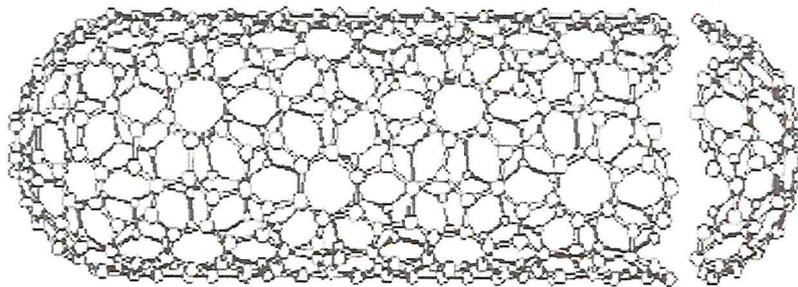


Figure 1.5 Nanotube de carbone (SWNT) [12]

Le nanotube mono feuillet peut être modélisé par l'enroulement d'une feuille de graphène sur elle-même. Cette feuille de graphène présente une structure de type nid d'abeille, dont on peut donner 2 vecteurs directeurs,  $a_1$  et  $a_2$ . On définit ensuite le vecteur de chiralité,  $\vec{C}_h$ , axe selon lequel le graphène s'enroule pour former le nanotube. Ce vecteur peut donc être décomposé en deux composantes, selon les vecteurs  $\vec{a}_1$  et  $\vec{a}_2$ . Soient  $m$  et  $n$  les scalaires tels que :

$$\vec{C}_h = m\vec{a}_1 + n\vec{a}_2 \quad (1.1)$$

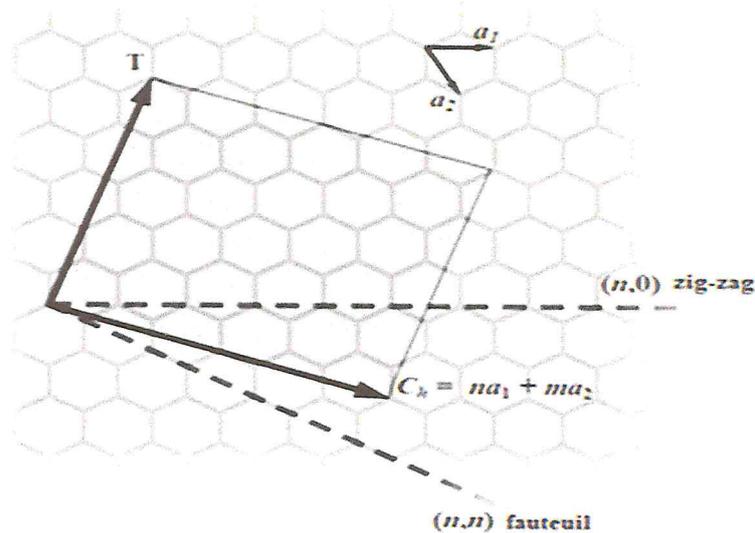


Figure 1.6 hélicité des nanotubes [13]

Selon la valeur de ces 2 scalaires, 3 types d'enroulements, donc trois types de nanotubes peuvent être décrits :

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

Ces différences de chiralité donneront aux nanotubes de carbone des propriétés différentes. Notamment, en ce qui concerne les propriétés électriques. Un nanotube de carbone de type "chaise" possède un comportement électrique métallique. Toutes les autres chiralités ont des comportements semi-conducteurs [11]

#### a. Armchair ou chaise

Lorsque l'axe du nanotube est perpendiculaire à une liaison C-C,  $\theta=30^\circ$  et indicé (n, n).

#### b. Zig-Zag

Lorsque l'axe du nanotube est parallèle à une liaison C-C,  $\theta=0^\circ$  et indicé (n, 0) présentant comme dans le cas des armchair une symétrie miroir à l'axe du tube.

#### c. Chiraux

Lorsque  $\theta$  diffère de  $0^\circ$  ou  $30^\circ$  et indicé (n, m) avec  $n \neq m$

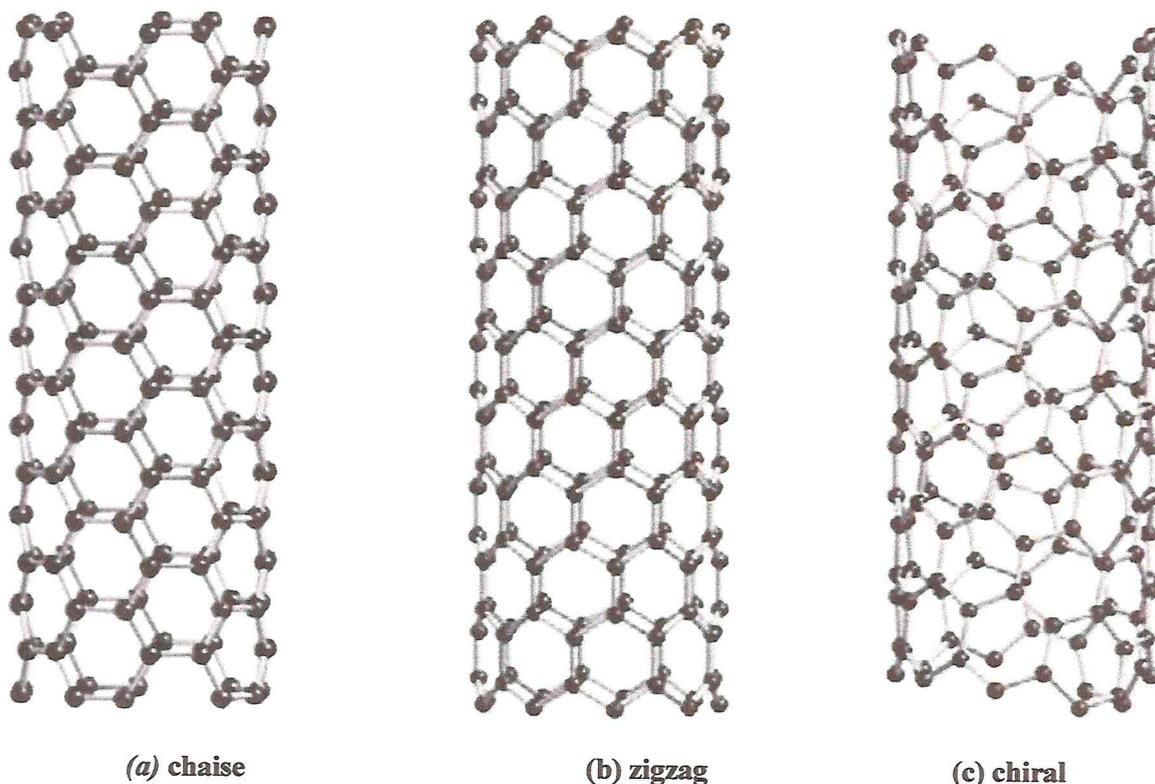


Figure 1.7 Les types de nanotubes mono parois [14]

### 1.3.3 Méthodes de synthèse des nanotubes

Quatre procédés ont été principalement développés pour la synthèse des nanotubes de Carbone : L'arc électrique, L'ablation laser, La CVD ou CCVD ((Catalytic) Chemicalvapor (Déposition)) et la décomposition catalytique (HiPCO).

#### 1.3.3.1 Synthèse de NTC par 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, et de produire les premiers nanotubes multifeuillets identifiés par S. Iijima [15]. Cette méthode crée des nanotubes par vaporisation électrique de deux tiges de carbone, la cathode et l'anode. Ces tiges sont séparées approximativement de 1mm et enfermées dans un gaz inerte (hélium, Argon) à basse pression entre (50 et 700 mbar). Des recherches ont prouvé qu'il est également Possible de créer pression entre (50 et 700 mbar). Des recherches ont prouvé qu'il est également possible de créer Des nanotubes avec cette méthode dans un liquide (N<sub>2</sub>) [16].

Un courant continu de (50 à 100A) avec une tension de (20V) créent une décharge à haute température entre les deux électrodes. [17].La décharge vaporise l'anode et forme un petit dépôt sur la cathode La production de nanotube de carbone à haut rendement dépend de l'uniformité de l'arc du plasma et de la température de dépôt formé sur l'électrode de carbone [18].Des Mesures montrent que la variation du diamètre dépend du mélange d'hélium et

d'argon. Ces mélanges ont différents coefficients de diffusions et de conductivités thermiques. Ces propriétés affectent la vitesse avec laquelle les molécules de carbone et de catalyseur se répandent et se refroidissent. La température, la densité de carbone et du catalyseur agissent également sur la variation du diamètre des nanotubes. [19]

La synthèse de nanotubes de carbones monofeuillets nécessite l'emploi d'une anode en Graphite contenant également des catalyseurs métalliques. 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...*) À l'issue De la synthèse, la proportion la plus importante de nanotubes monofeuillets se retrouve dans Une zone appelée collerette, autour de la cathode, qui présente un aspect spongieux. [20]

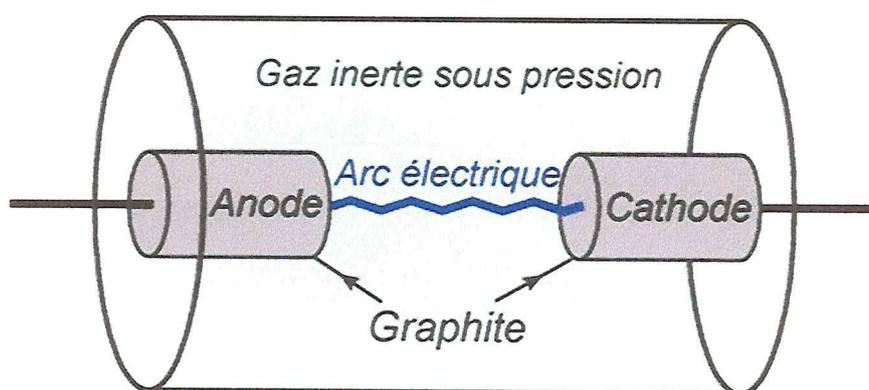


Figure 1.8 Production de nanotubes de carbone par la méthode de l'arc électrique [21].

### 1.3.3.2 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 [22]. Cette technique repose sur l'évaporation d'un disque de graphite par irradiation laser, la cible étant placée dans un four à (1200 °C) [Thés 1996]21. Le laser employé est un laser *Nd-YAG* impulsionnel nanoseconde. Sous l'effet de l'irradiation, la température de la cible atteint localement (4000 K). Pour assurer une sublimation homogène, la cible est en rotation à l'intérieur de l'enceinte, afin que le faisceau laser balaye sa surface. Deux impulsions lasers successives sont employées pour améliorer le rendement de synthèse. La première impulsion utilise l'harmonique du *ND-YAG* (532 nm), tandis que la seconde utilise le fondamental (1064 nm). La seconde impulsion permet d'augmenter la dissociation des agrégats de carbone formés par la première impulsion. Un flux de gaz inerte (*Ar*) permet d'évacuer les produits formés, qui sont récoltés Sur un collecteur en cuivre refroidi à l'eau. Comme dans le cas de la synthèse par arc Électrique, il est nécessaire d'utiliser un catalyseur métallique mélangé à la cible en graphite Pour former des nanotubes monofeuillet [20].

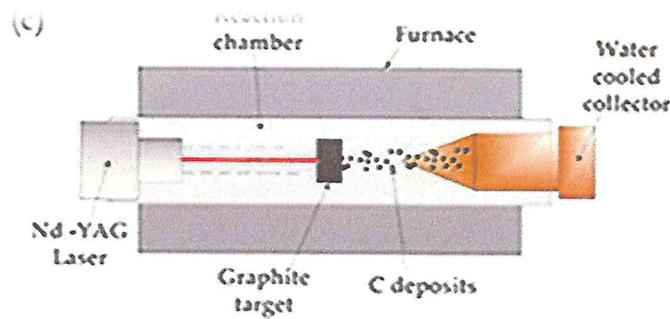


Figure 1.9 Schéma de l'appareillage d'ablation laser [23].

Cette technique est complexe dans sa mise en œuvre, car elle repose sur l'utilisation de deux impulsions lasers successives de fréquences différentes. Une autre méthode plus simple de synthèse par ablation laser utilise un faisceau laser qui est focalisé sur une cible obtenue en compactant de la poudre de graphite. Cette technique peut être couplée à des mesures in situ permettant ainsi l'étude et la modélisation des conditions de synthèse. ONERA (Laboratoire d'Etudes des Microstructures, Châtillon) dispose de ce type de montage (figure 1.9) où la forte puissance du laser continu ( $CO_2$ ) permet de fournir une énergie de (1500 W) suffisante pour vaporiser une quantité importante de matière par unité de temps. [24].

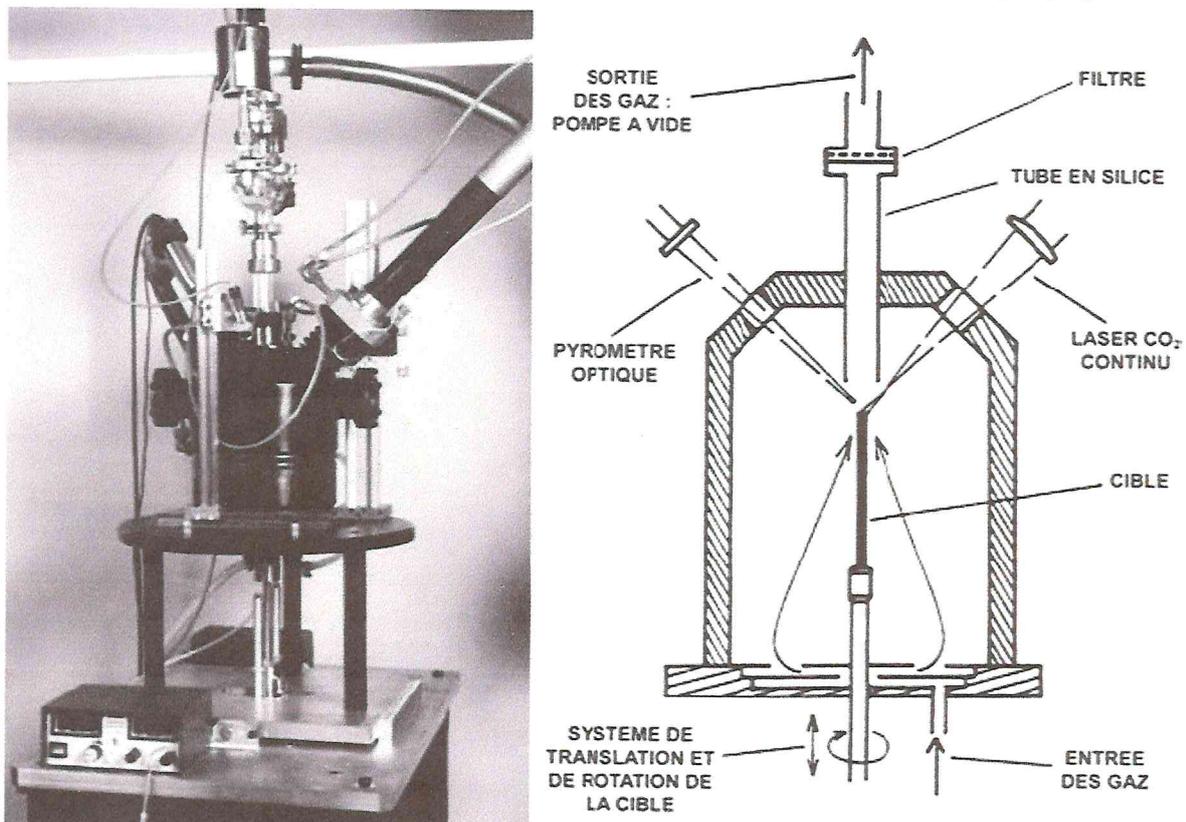


Figure 1.10 Réacteur de synthèse laser continu ( $CO_2$ ) de l'ONERA [Casti gnolles 2004] [24].

### 1.3.3.3 Méthode de dépôt chimique en phase vapeur

La synthèse de nanotubes de carbone par la méthode de dépôt chimique en phase vapeur *CVD* (Chemical Vapor Déposition) a été effectuée pour la première fois par Endo et al [25]. Comme l'arc électrique ou l'ablation laser, la *CVD* est une méthode catalytique qui nécessite la présence de métaux de transitions, typiquement (*Ni*, *Fe*, *Co*...), pour la croissance de (*NTC*). Le principe de la synthèse repose, en effet, sur la décomposition d'un gaz carboné à la surface d'une particule catalytique de taille nanométrique. La croissance du nanotube ayant lieu au niveau de la particule catalytique, il est par conséquent possible, en contrôlant le positionnement du catalyseur, de contrôler la localisation des nanotubes. Ces nanotubes peuvent donc être utilisés sans passer par des phases de purification. Cela constitue un avantage majeur vis-à-vis des méthodes « haute température » présenté précédemment (Figure. 1.10) présente un schéma d'un réacteur *CVD* simple. L'échantillon est placé dans un four alimenté par un flux de gaz carboné ( $CH_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $CO$ ) généralement dilué dans un gaz porteur le plus souvent réactif ( $NH_3$ ,  $H_2$ ). Le catalyseur peut être supporté par un substrat, où peut se présenter soit sous forme de poudre dans un creuset. Le temps de croissance varie de la minute à quelques heures. Le gaz est décomposé soit par chauffage du four, soit par l'intermédiaire d'un filament chaud porté à une température comprise entre ( $1500-2000^\circ C$ ) (On parle alors de Hot Filament-*CVD*) et situé à 1 cm au-dessus du substrat ou bien directement par chauffage du porte substrat ( $T < 1200^\circ C$ ) [26]

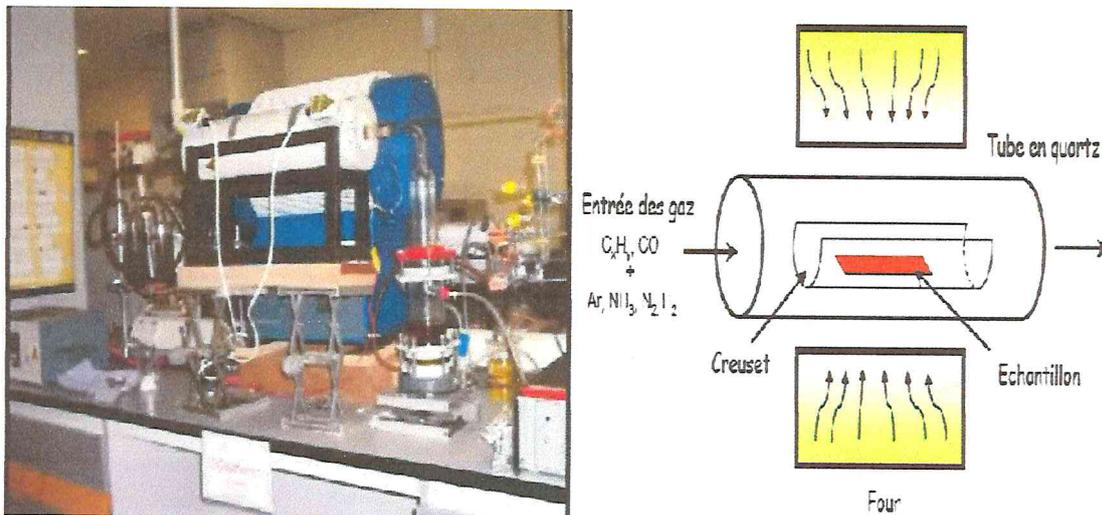


Figure 1.11 Schéma d'un réacteur *CVD* pour la croissance des (*NTC*) [26]

Il existe également une technique de synthèse de forêts de (*SWNT*) par *CVD* assistée avec de l'eau qui supprime le carbone amorphe et permet ainsi une croissance non limitée. Les (*SWNT*) ainsi créés peuvent atteindre une hauteur de plus de (2cm). De plus, il est possible d'aligner les nanotubes entre eux, perpendiculairement à la surface (figure. 1.11). Nous obtenons alors des (pelouses) de nanotubes [27] Cette propriété est très intéressante, pour toutes les utilisations des propriétés d'émission de champ des nanotubes. L'un des inconvénients de cette méthode est qu'elle ne permet pas, pour le moment, de fabriquer de grandes quantités de nanotubes monoparois. Enfin, le fait de faire croître les nanotubes à un

Endroit donné peut aussi s'avérer être un inconvénient puisque de ce fait, on ne peut pas les Manipuler facilement (peut pas les recueillir, les déplacer) [28]

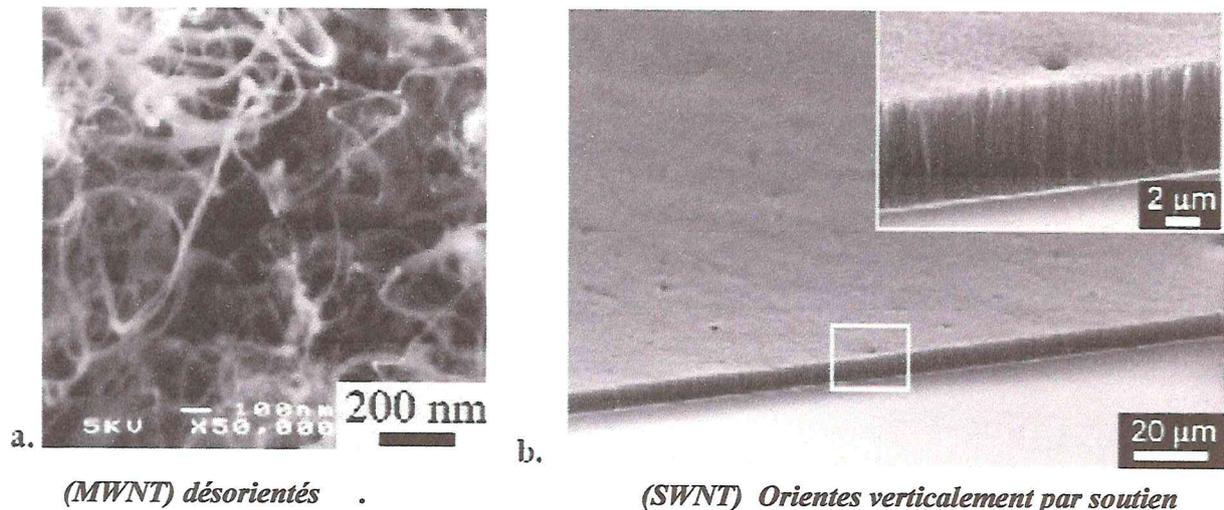
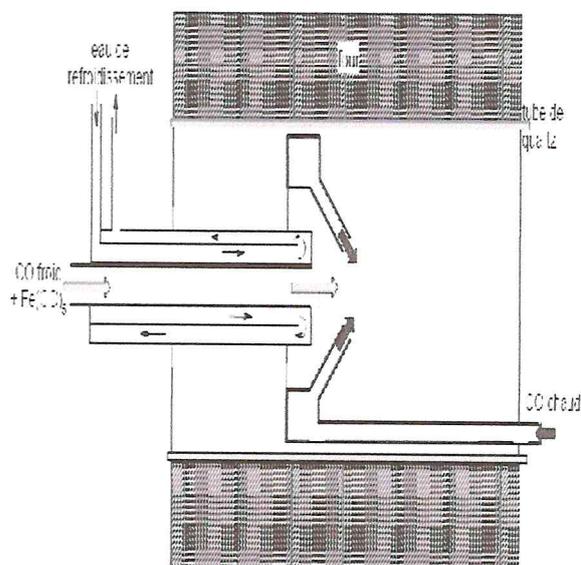


Figure 1.12 Nanotubes synthétisés par CVD [29]

#### 1.3.3.4. Décomposition catalytique (HiPCO)

Le procédé (HiPCO) (High Pressure dis mutation of CO) a été développé par le groupe de R. Smalley. Ce procédé fait partie de la famille des procédés de décomposition catalytique à moyenne température. Un flux continu de penta carbonyle de fer ( $Fe(CO)_5$ ) et de monoxyde de carbone (CO) est introduit sous une pression de (10 atm) dans une enceinte chauffée à (1200°C). L'originalité du procédé tient au fait que le catalyseur, nécessaire à la croissance des tubes 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 [20]



Méthode HiPCo.

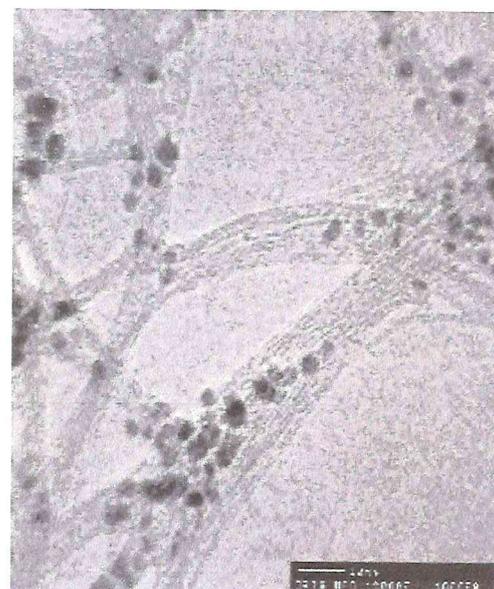


Image TEM de nanotubes (HiPCO)

Figure 1.13 Schéma du Production de nanotubes [17] et [30]

Tableau 1.4 les trois méthodes les plus utilisées pour la fabrication de NTC

Méthodes	Arc électrique	Ablation Laser	CVD
Référence	Ebbesen et Ajayan NEC ,Japan	Smalley,Rice,1995	Endo ,shinshu Nagano university,Japan
Temperature	4000°C-6000°C	1200°C-2000°C	750°C-1000°C
Rendement	30 à 90%	>70%	20 à 100%
SNTC	Nanotube très court Diameters ~0,6- 1.4nm	Long paquet de nanotube : 5 à10μ Diamètre~ 1-2nm	Long nanotube Diamètre ~0.6- 0.4nm
MNTC	Nanotube très court Diamètre inférieur <1-3nm Diamètre extérieur~10nm	Pas vraiment d'intérêt pour cette technique, car couteuse, mais la synthèse de MNTC est possible.	Longueur variable des nanotubes Diamètre ~10-24nm
Avantages	-production SNTCs et MNTCs -Forte qualité des NTCs -Technique peu couteuse -Croissance à l'air libre	-Production SNTCs -Diamètre contrôlables -Peu de défauts	-Faible température de fabrication -Diamètre contrôlable Des NTCs -Longueur contrôlable Des NTCs -Forte longueur de NTCs -croissance localisées sur substrat (orientation des NTCs) -NTCs de grande qualité
Inconvénients	-Forte température de fabrication -Longueur des NTCs non contrôlables -Fabrication de NTCs en poudre -besoin d'un traitement chimique (purification des NTCs)	-température de fabrication élevée -Technique couteuse -Alimentation électrique élevée	-Fabrication de MNTCs Principalement - Quelques défaut structural des NTCs

### 1.3.4 Propriétés des nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone possèdent des propriétés physiques, mécaniques, Thermiques et électroniques exceptionnelles.

#### 1.3.4.1 Propriétés mécaniques

Le module de Young des nanotubes de carbone a été calculé de façon théorique via des simulations par différentes équipes de chercheurs suivant différentes méthodes. On trouve dans la littérature des valeurs théoriques comprises entre 1 [31] et 1,5 [32] TPa.

Expérimentalement, l'équipe de Yu et al. [33] a attaché des MWNT à la pointe d'un AFM afin de mesurer leurs modules d'Young. Des valeurs allant de 270 à 950 GPa ont été mesurées. Le mécanisme de rupture "épée dans son fourreau" a été mis en évidence pour les MWNT.

**Tableau 1.5 Quelques propriétés mécaniques des nanotubes de carbone**

Propriétés	Monocouche	Multicouches
Limite d'élasticité	45 GPa	150 GPa
Module de young	1 à 1.4 TPa	1.4 à 1.6 TPa
Module de cisaillement	0.27 TPa	0.44 à 0.47 TPa
Module de flexion	0.2 à 1.2 TPa	3 à 30 GPa

A titre de comparaison, l'acier a une limite d'élasticité de 0.4 GPa et un module de Young de 0.21 TPa, ce qui montre que le nanotube est 4 fois plus résistant que l'acier.

#### 1.3.4.2 Propriétés thermiques

Les nanotubes de carbone ont une conductivité thermique très élevée mais à l'heure actuelle aucune valeur de conductivité thermique n'est universellement acceptée. Différents facteurs sont à prendre en compte dans la détermination de cette valeur : le type de nanotube (SWNT ou MWNT), le nombre de parois, la méthode de mesure ou du type de modélisation.

De nombreuses études faites par modélisation ont été publiées et donnent des valeurs allant de 200 à 6 600  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  [34]; [35] à température ambiante. Des études expérimentales sur des nanotubes seuls ont été faites et donnent des résultats là aussi très variables variant entre 2400 et 3500  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  pour des SWNT [36]; [37] et entre 200 et 1400  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  pour les MWNT [38]; [39]. Il faut noter ici que ces valeurs ont été obtenues via des méthodes de mesure différentes et à température ambiante. L'étude de Li et al. [19], montre que la conductivité thermique des SWNT est plus élevée que celle des MWNT. Pour comparaison, à température ambiante, le diamant a une conductivité thermique de 2 300  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  et le graphite de 2 000  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  dans le sens des feuillets.

**Tableau 1.6 Quelques caractéristiques des nanotubes de carbone**

Nanotube de carbone	Monocouche	Multicouches
Stabilité thermique (k)	< 2100	> 3200
Conductivités thermique (W /Mk)	6000	< 2000

### 1.3.4.3 Propriétés électriques

Les propriétés électriques des nanotubes de carbone dépendent directement de leur chiralité. Seuls les nanotubes dits “chaise” sont conducteurs, tous les autres sont semi-conducteurs. Le gap de la bande interdite des nanotubes semi-conducteurs varie en fonction de leur chiralité et de leur diamètre. Si les vecteurs chiraux sont tels que  $n - m = 3j$  où  $j$  est un entier non nul, le gap est faible et au vu de l'agitation thermique, ces nanotubes sont considérés comme conducteurs à température ambiante [40]. Des méthodes ont été développées pour trier les nanotubes en fonction de leur type (métallique vs. semi-conducteur) et permettent de viser des applications spécifiques [22]. Des mesures à deux ou quatre pointes sur des MWNT ont montré des valeurs de conductivité électrique à température ambiante comprises entre  $10^4$  et  $10^7 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$  [41]; [42]. Cette grande variabilité s'explique par la complexité d'une telle mesure et les différentes géométries des nanotubes étudiés. Pour comparaison, la valeur de conductivité électrique du métal le plus conducteur (l'argent) est de  $6,3 \times 10^7 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ . D'autres études ont montré que les nanotubes de carbone deviennent supraconducteurs à basse température [43].

### 1.3.4.4 Propriétés chimiques

Les nanotubes sont des structures creuses, que l'on peut remplir avec d'autres composés chimiques, ce qui en fait des récipients clos à l'échelle nanométrique. Les nanotubes de carbone sont relativement peu réactifs et une modification chimique de leur surface fait souvent appel à des espèces fortement réactives (oxydants forts, réducteurs forts, espèces radicalaires par exemple). C'est pourquoi une chimie de greffage de nanotubes basée sur des interactions non covalentes s'est fortement développée ces dernières années (adsorption de tensioactifs, enroulement de polymères, d'ADN, adsorption de pyrènes, etc.) [44].

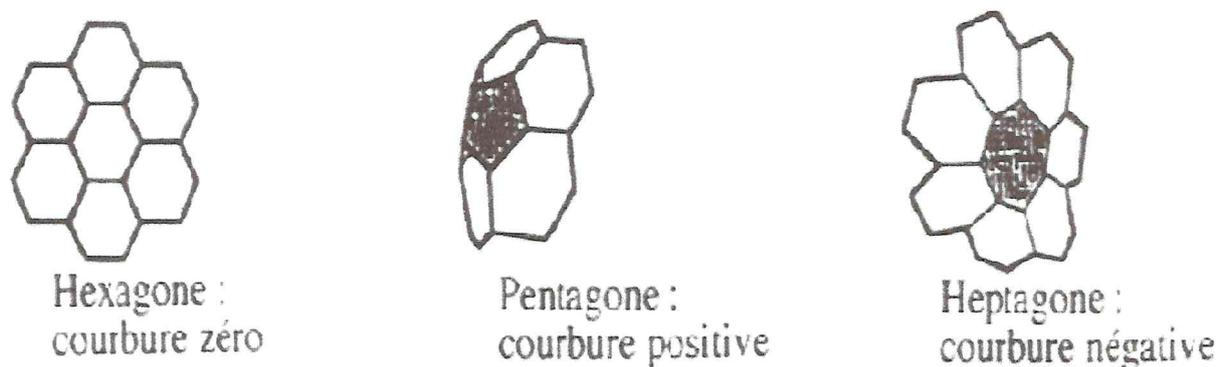
### 1.3.4.5 Propriétés d'émission de champ

Les nanotubes peuvent présenter une longueur extrêmement grande devant leur diamètre (rapport d'aspect  $> 1000$ ). Soumis à un champ électrique, ils vont donc présenter un très fort effet de pointe (cf. principe du paratonnerre). Avec des tensions relativement faibles, on peut générer à leur extrémité des champs électriques colossaux, capables d'arracher les électrons de la matière et de les émettre vers l'extérieur. C'est l'émission de champ. Cette émission est extrêmement localisée (à l'extrémité du tube) et peut donc servir à envoyer des

électrons sur un endroit bien précis, un petit élément de matériau phosphorescent qui constituera le pixel d'un écran plat par exemple. Le matériau phosphorescent évacue l'énergie reçue sous forme de lumière (même principe que les écrans de tubes cathodiques). L'exploitation de cette propriété a déjà permis de réaliser des prototypes d'écrans plats à nanotubes [45].

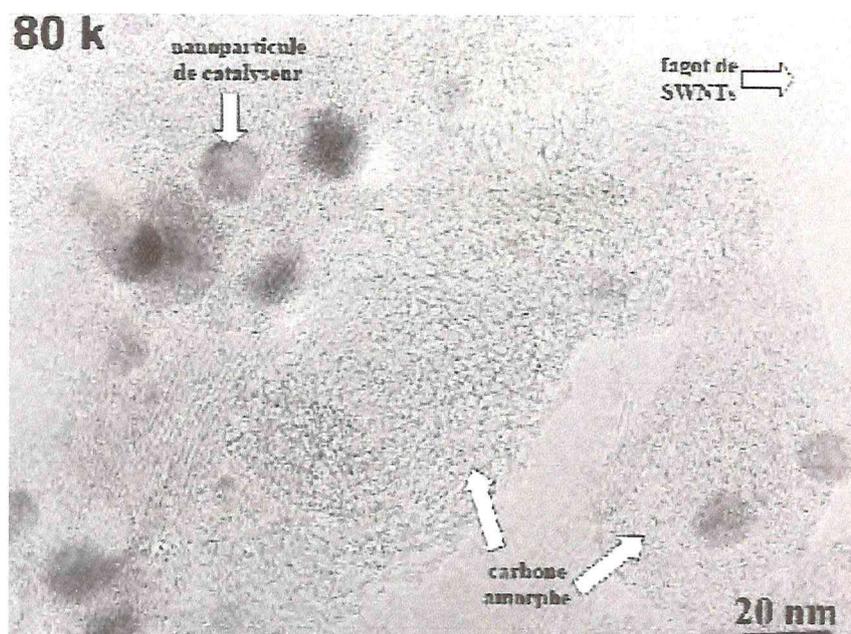
### 1.3.5 Défauts des nanotubes de carbone

Du fait d'interactions van der Waals attractives entre parois, les nanotubes mono couches ont la plupart du temps tendance à s'agglomérer en faisceaux de nanotubes appelés fagots. Du fait de la présence de cycles non hexagonaux, il existe des défauts dans le réseau graphène constitutif d'une paroi, qu'il s'agisse d'un (*MWNT*) ou d'un (*SWNT*). Un pentagone introduit une courbure positive tandis qu'un heptagone conduira à une courbure négative (figure. 1.14) [17]



**Figure 1.14** Influence du type de cycle sur la courbure de la surface [46].

En plus de ces défauts qu'on pourrait qualifier d'intrinsèques, il faut tenir compte d'impuretés, Carbonées ou non, s'ajoutant aux nanotubes. La nature de ces impuretés dépend naturellement du mode de synthèse des nanotubes [17]. Lorsqu'un catalyseur métallique est employé dans la synthèse on le retrouve dans l'échantillon brut. Il est d'autant plus difficile de s'en séparer qu'il est le plus souvent sous forme de particules nanométriques (rendant difficile une séparation par filtration ou centrifugation) et recouvert de plusieurs feuillets graphitiques (rendant peu efficace une élimination par oxydation). Tout le carbone présent dans un échantillon brut n'est malheureusement pas sous forme de nanotubes. On trouve des particules de graphite et du carbone amorphe plus ou moins structuré (figure 1.15). Des molécules carbonées de faible masse peuvent également être présentes, comme du (*C60*) ou des hydrocarbures poly aromatiques [17].



**Figure 1.15** Image (MET) d'un échantillon de nanotubes (collerette brute produite par arc Électrique). On peut distinguer, en plus des (SWNTs), des particules de catalyseur et deux Formes de carbone amorphe) [47].

### 1.3.6 Purification des nanotubes

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

- Les impuretés solubles : des fullerènes (*C60*, *C70*), des hydrocarbures aromatiques polycycliques.
- Les impuretés insolubles : du carbone amorphe, des particules de graphite, des Oignons de carbone, des particules métalliques de catalyseur (recouvertes de feuillets Graphitiques).

Il est très facile de se séparer des impuretés solubles, un lavage au (*CS2*) [48] ou au toluène permet d'y parvenir. La question des impuretés insolubles est naturellement plus délicate et une grande variété de méthodes de purification ont été décrites, qu'on peut classer comme suit :

#### 1.3.6.1 Les méthodes chimiques

Elles reposent sur la différence de réactivité entre les nanotubes et les impuretés, le carbone amorphe et les espèces mal graphitent étant plus réactives. Les réactions mises en jeu sont des réactions d'oxydation, avec un oxydant liquide [49] (La plupart du temps) ou gazeux. [50], [51]. Elles doivent dégrader les impuretés en produits solubles ou gazeux. Elles permettent de se séparer du carbone amorphe et des particules métalliques, bien que les feuillets graphitiques entourant le métal constituent souvent un obstacle à son oxydation.

### 1.3.6.2 Les méthodes physiques

Elles reposent sur la différence de forme entre les nanotubes, très longs et très anisotropes, et les nanoparticules d'impuretés, bien souvent de forme approximativement sphérique. Les techniques utilisées sont principalement la microfiltration, tangentielle [52].ou directe, [53].ou la chromatographie, d'exclusion stérique [54], [55].Des séparations reposant sur la différence de densité existent également, il s'agit alors de purification par centrifugation. [56].Ces méthodes physiques permettent de se séparer des nanoparticules (catalyseur, graphite, oignons), le carbone amorphe étant trop divisé pour pouvoir être éliminé par ces méthodes. [17].

Quasiment tous les protocoles de purification sont une combinaison de plusieurs types de méthodes. Par exemple, la purification des nanotubes commerciaux *Tubes@Rice*[52].Consiste en un traitement à l'acide pour oxyder le carbone amorphe (méthode chimique), Suivi d'une microfiltration tangentielle pour séparer les nanoparticules des (*SWNTs*) (méthode physique).

Aucune de ces méthodes n'est sélective à (100%) et la purification reste aujourd'hui un problème tout aussi crucial que la synthèse. Les réactions d'oxydation n'attaquent pas entièrement le catalyseur et le carbone amorphe, alors même qu'elles oxydent partiellement les parois des nanotubes. Les processus de filtration sont souvent rendus difficiles par le colmatage des membranes et enfin l'efficacité des centrifugations est diminuée par l'agrégation entre les nanoparticules et les nanotubes. Nous allons dans la suite de ce paragraphe décrire brièvement quelques méthodes de purification de nanotubes monocouches. [17].

La littérature permet de classer les méthodes de purification en deux grandes catégories: filtration et traitements acides.

On distingue deux types de filtration :

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

b) Filtration tangentielle : Le flux de liquide à filtrer est tangentiel à la membrane. C'est le cas lorsque la solution filtrée est remise en circulation. [17].

La purification des (*MWNT*) produits par voie catalytique est souvent effectuée à partir d'un traitement à l'acide fluorhydrique [57], destiné à éliminer le support, suivi d'un traitement à reflux avec (*HNO<sub>3</sub>*) [52].afin d'éliminer le catalyseur. Une étape supplémentaire de retraitement thermique à haute température (> 2000 °C) peut être ajoutée afin d'évaporer les particules résiduelles de catalyseur et d'éliminer les éventuels défauts [58].Dillon et al. [59] ont décrit un processus conduisant à (98%) de (*MWNT*) purs.

Ce dernier combine un reflux avec (*HNO<sub>3</sub>*) à un traitement sous air à (550°C).Chiang [60] utilise un processus proche de celui de Dillon, les nanotubes étant traités avec (*HCl*)après oxydation sous air.

### 1.3.7 Ouverture des nanotubes

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

Tsang et al. [61].ont développé une méthode chimique d'ouverture des nanotubes Ceux-ci sont placés a reflux dans une solution d'acide nitrique pendant 24 heures, à (140°C). Environ (90%) des tubes sont ouverts. L'attaque acide se fait préférentiellement au niveau des points de courbure en bout de tube. De telles courbures sont engendrées par la présence de cycles à 5 atomes de carbone (à la place de cycles a 6 atomes) dont la tension inhérente fragilise l'extrémité du tube.

L'utilisation de (*HCl*) permet également d'ouvrir les (*MWNT*) en employant un léger reflux [62]. [63] a testé divers oxydants, conduisant à des résultats assez différents. L'utilisation de (*K2Cr2O7*) et (*H2O2*) en milieu acide ne conduit pas à l'ouverture. Les meilleurs résultats sont obtenus pour (*KMnO4*) en présence de (*MnO2*) (85% d'ouverture), (*OsCl3*) en présence de (*NaIO4*) (81 %) et (*RuCl3*) en présence de (*NaIO4*) (91%). L'oxydation s'effectue à (100° C) sur une durée comprise entre (30 et 60 minutes). Dans le cas de (*RuCl3(NaIO4)*), l'augmentation du temps de réaction (90 min) conduit à la destruction des nanotubes L'ouverture par reflux dans l'acide nitrique (qui est la plus utilisée), comme l'utilisation d'autres oxydants présentent l'inconvénient de conduire à la fonctionnalisation des atomes de carbone en bout de tube (formation de liaison (*C=O*) et rupture de liaison (*C-C*) ainsi qu'à celle des parois du tube. [64]. Une deuxième façon d'ouvrir les tubes consiste en une oxydation sous air. Selon Ajayan et al. [65], les conditions optimales impliquent un chauffage a (700°C) pendant 15 minutes. Le rendement d'ouverture est alors d'environ (20%). L'ouverture se fait par écaillage feuillet par feuillet des extrémités des tubes. Il arrive que les débris carbonés provenant de l'ouverture forment un bouchon. Afin de remédier à ce problème, un recuit à Haute température peut être effectué. [66]

### 1.3.8 Applications des nanotubes de carbone

#### 1.3.8.1 Applications mécaniques

Les nanotubes de carbone devraient constituer des fibres de renfort idéales pour les matériaux composites. Ils présentent en effet une forte résistance à la traction. En outre, ils ont un rapport longueur/diamètre très élevé, tout en étant suffisamment courts pour être coulés à travers les équipements classiques de mise en forme des polymères, autorisant ainsi des formes complexes.

La grande élasticité et la forme effilée des nanotubes en ont de bonnes pointes pour la microscopie à champ proche. Idéalement, une pointe devrait être aussi précisément définie que l'objet sondé et devrait conserver son intégrité malgré un usage répété, que ce soit sous vide, dans l'eau ou l'air. L'utilisation de nanotubes en tant que pointe de microscope à force Atomique permet (d'accroître la résolution latérale) d'augmenter la durée de vie de la pointe (Elle résistera mieux aux incidents tels qu'un crash sur la surface sondé).

### 1.3.8.2 Applications électroniques

Au vu de leurs propriétés électroniques, la première idée fut de les utiliser dans des composants électroniques, la recherche de la miniaturisation étant dans ce domaine un sous-primordial. Ainsi les nanotubes monofeuillets paraissent aujourd'hui de bons candidats en tant que conducteurs unidimensionnels intégrés à de futurs composants électroniques de taille nanométrique. Comme en outre les propriétés des SWNTs varient suivant la chiralité, on peut envisager, en assemblant des tubes d'indices  $(n, m)$  différents, réaliser des composants électroniques à base de nanotubes. Il a été montré que l'introduction d'une paire pentagone – Heptagone dans le réseau graphène pouvait changer l'hélicité du tube et avoir ainsi une forte influence sur la structure électronique. Ainsi, l'introduction de tels défauts peut induire une jonction métal-métal, semi-conducteur-métal ou semi-conducteur-semi-conducteur de taille nanométrique. Récemment, Yao et coll. [67] ont effectué des mesures de transport électrique sur ce type de jonctions intramoléculaires. Ils ont montré qu'une jonction métal-semi-conducteur avait des caractéristiques fortement asymétriques et se comportait ainsi comme une diode rectificatrice. Une telle diode fut aussi créée peu de temps après par superposition de deux SWNTs se croisant perpendiculairement. Assemblés en réseau bi ou tridimensionnel, les nanotubes monocouche pourraient être utilisés à la fois comme connexions et comme composants.

### 1.3.8.3 Application thermique

Les nanotubes pourraient accroître fortement la conductivité thermique de composites à fibre discontinue. Ces derniers pourraient bénéficier en outre, des propriétés mécaniques des tubes. [17]

### 1.3.8.4 Applications optiques

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 active 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. Des études commencent à également sur l'utilisation de nanotubes comme détecteur infrarouge [17]

## 1.4 Conclusion

A travers ce premier chapitre, on comprend mieux pourquoi les nanotubes de carbone jouent un rôle de premier plan dans le domaine des nanosciences. Vu de leurs dimensions et de leurs propriétés remarquables (mécanique, électroniques, thermiques...), ces macromolécules semblent trouver leur utilité dans de vastes domaines d'application.

Dans ce chapitre, nous avons détaillé quelques exemples de méthodes de synthèse des

Nanotubes de carbone en nous attachant à faire ressortir les avantages et les inconvénients de chacune d'entre elles. Nous avons aussi étudié la structure des nanotubes de carbone monoparoi et les nanotubes de carbone multi-paroi.

Enfin, les nanotubes sont d'excellents matériaux pour le renforcement des matrices Polymères. Ils seraient également susceptibles d'être employés comme un renfort dans un matériau composite.

# ***Chapitre 2***

## 2.1 Introduction

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés, notamment dans le domaine industriel (automobile, transports, travaux de bâtiment, publics, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux...etc.). L'avantage principal qu'offrent ces matériaux pour l'industrie est leur faible poids pour d'excellentes qualités mécaniques. Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes. Il est constitué d'une matrice qui assure la cohésion entre les éléments du renfort. Récemment, une nouvelle classe de matériau présentent de nouvelles propriétés a vu le jour sont appelés nanocomposites.

Dans ce chapitre on s'intéressera aux différents types de matrices existants, plus particulièrement aux nanocomposites à matrice polymère et à renfort de (NTC) en traitons la dispersion des renforts dans la matrice polymère et la production des nanocomposites à base (polymère/ NTC).

## 2.2 Les matériaux composites

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont les performances sont supérieures à celles des composants pris séparément. Il est constitué d'une ou plusieurs phases discontinues, appelée renfort réparties dans une autres phase continue, appelée matrice (figure 2.1).

Ce phénomène, qui permet d'améliorer la qualité de la matière face à une certaine utilisation (légèreté, rigidité à un effort...etc.), explique l'utilisation croissante des matériaux composites dans différents secteurs industriels. Néanmoins, la description fine des composites restes complexe du point de vue mécanique. [68]

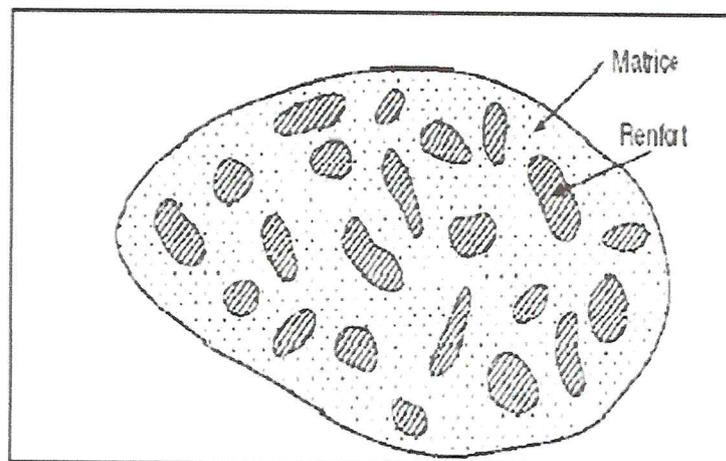


Figure 2.1 Matériau composite [68]

## Historique

Le bois fut le premier matériau composite naturel utilisé, ensuite le torchis a été utilisé en construction pour ses propriétés d'isolation et de coût. Parmi les premiers composites fabriqués par l'homme, on trouve également les arcs Mongols (2000 ans av. J.C.). Leur âme en bois était collée de tendon au dos et de corne sur sa face interne.

- 1823 : Charles Macintosh crée l'imperméable avec du caoutchouc sur des tissus comme le coton.
- 1892 : François Hennebique dépose le brevet du béton armé (le composite utilisé en construction) avec le béton qui forme la matrice et l'acier qui forme le renfort.

## Caractéristiques générales

Un matériau composite consiste dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. Dans le cas de plusieurs phases discontinues de natures différentes, le composite est dit hybride. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée la matrice. La phase discontinue est appelée le renfort ou matériau renforçant (figure 2.1). Une exception importante à la description précédente est le cas de polymères modifiés par des élastomères, pour lesquels une matrice polymère rigide est chargée avec des particules élastomères. Pour ce type de matériau, les caractéristiques statiques du polymère (module d'Young, contrainte à la rupture, etc.) ne sont pratiquement pas modifiées par l'adjonction de particules élastomères, alors que les caractéristiques au choc sont améliorées. [68]

Les propriétés des matériaux composites résultent :

- des propriétés des matériaux constituants.
- de leur distribution géométrique.
- de leurs interactions, etc.

Tableau 2.1 : Exemples des matériaux composites. [68]

Type de composites	Constituants	Domaines d'application
Composite à matrice organique Papier, carton Panneaux de particules Panneaux de fibres Toiles enduites Matériaux d'étanchéité Pneumatique Stratifiés.	Résines/charges/fibres cellulosiques Résines/copeaux de bois Résines/fibre de bois Résines souples/tissus Elastomères/bitumes/textiles. Caoutchouc/toile/acier Résines/charges/fibre de verre, de carbone, etc. Résines/microsphères.	Imprimerie, emballage, etc. Menuiserie Bâtiment Sports, bâtiment Toiture, terrasse, etc. Automobile Domaines multiples.
Composites à matrice minérale Béton Composite carbone-carbone Composite céramique	Ciment/sable/granulats Carbone/fibre de carbone Céramique/fibre céramique	Génie civil Aviation, espaces, sports, biomédecine, etc. Pièce thermomécaniques
Composites à matrice métallique	Aluminium /fibre de bore Aluminium /fibre de carbone	Espace
Sandwiches Peaux Ames	Métaux, stratifiés Mousse, nids d'abeilles balsa, plastiques renforcés, etc.	Domaines multiples

### 2.2.1 Renfort

Le renfort, souvent sous forme de fibres, sert au transfert des charges mécaniques. Les fibres ont une forme remarquable dans la matrice qui possède des propriétés qui s'approchent de plus en plus de celles prévues par la théorie. Ces propriétés sont impressionnantes à cause de leur forme et des moyens de fabrication. La structure moléculaire d'une fibre est généralement alignée dans le sens de l'axe de fibre ce qui produit une structure forte dans cette direction. Les fibres sont donc fortes mais fines, ce qui leur confère une grande souplesse. On les commercialise essentiellement sous forme de fibres courtes (les feutres ou les mats) ou fibres longues (coupées au moment de la fabrication du matériau). Les fibres peuvent se présenter sous forme linéique, surfacique et multi directionnelle utilisées dans l'industrie, tel qu'on trouve [69].

#### 2.2.1.1 Fibres de verre

Il existe une large gamme de fibres de verre fabriquées en continu. Ces fibres sont à base de silice ( $\text{SiO}_2$ ) combinée avec d'autres éléments. La plupart des composites à faible nombre de fibres de verre sont renforcés par des verres de type E développé initialement pour

des applications électriques. La fibre de verre type R est également utilisée comme renfort grâce à ses propriétés mécaniques et à sa tenue à la chaleur très élevée. Les fibres de verre sont produites par l'étirage du verre fondu à travers une filière. Elles sont fabriquées avec une gamme de diamètres habituellement compris entre 5 et 25mm et une grande vitesse de l'ordre 250m/s.

Les fibres de verre sont fragiles et leur rupture brutale est sans déformation plastique. Elles souffrent également d'un module de Young faible et d'une densité plus élevée que celle d'autres fibres. En conséquence ces fibres ont été supplantées par d'autres fibres à plus haute performance pour les applications demandant un module spécifique élevé mais elles continuent à dominer de loin les composites à Grande Diffusion.

### 2.2.1.3 Fibres de bore

Elles peuvent être noyées sans difficulté dans des matrices métalliques et également organiques. Pourtant leur fabrication ne se fait pas facilement. Le bore est dur, fragile, rigide et ne peut pas être étiré. Par conséquent la fabrication des fibres de bore se fait par dépôt en phase vapeur du bore sur un filament de tungstène. Les fibres de bore possèdent des propriétés élevées en traction mais il faut également noter leurs bonnes propriétés en compression.

### 2.2.1.3 Fibres de carbone

Le carbone est le sixième du tableau des éléments périodiques. Des fibres de carbone de très hautes performances ont été produites dans les années soixante, quelques années après la fabrication des premières fibres de bore. Les fibres de carbone ont été rapidement acceptées comme renforcement et adoptées au lieu des fibres de bore pour la plupart des applications, surtout pour les composites à matrice organique. Les fibres de carbone peuvent avoir presque les mêmes propriétés spécifiques que celles des fibres de bore, mais sont moins chères et plus fines. La production actuelle de fibres de carbone destinées aux renforts de composites s'établit à 3.000 tonnes/an. Elles sont principalement utilisées pour les composites « Hautes Performances » en aéronautique, en construction industrielle et dans les sports et loisirs. La production de fibres de carbone repose sur la maîtrise de la production des fibres acryliques, précurseurs traditionnels des fibres de carbone, de formule générique.  $(\text{CH}_2\text{-CHCN})_n\text{-}(\text{CH}_2\text{-CXY})_n'$  (acrylonitrile + cosmonomie) par la voie classique du solvant, dite ex-Pan (Figure I.1). On opère par carbonisation de la fibre de poly-acrylonitrile (PAN) sous atmosphère neutre d'azote dans des fours à pyrolyse de façon à ne conserver que la chaîne carbonée. La technologie développée par Sumitomo (Dialead), dite ex-Bray, fondée sur la distillation du pétrole, donne des fibres de qualité variable ; elle a connu un développement rapide. En dehors des secteurs de l'aéronautique, des sports et loisirs, les fibres de carbone ont largement été utilisées dans les composites « Grande Diffusion ».

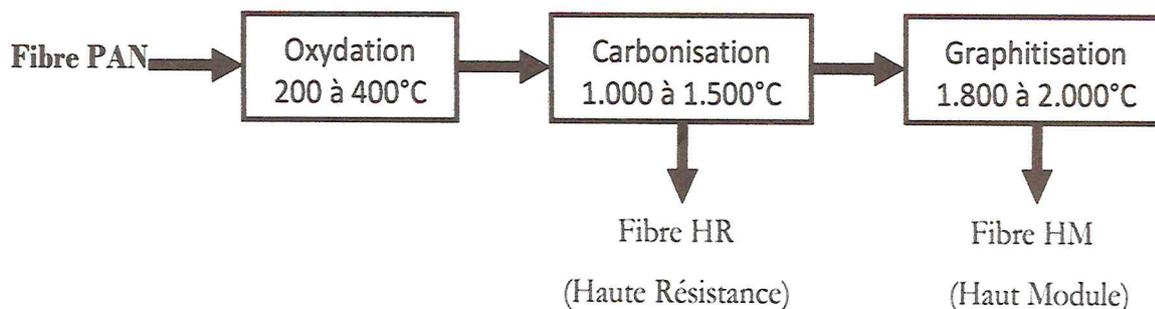


Figure 2.2 : Voie classique de la production des fibres de carbone [69]

#### 2.2.1.4 Fibres aramide (kevlar)

La fibre aramide est obtenue à partir des polyamides aromatiques (ou poly aramide) par synthèse chimique à basse température ; ses propriétés diffèrent de celles des polyamides aliphatiques classiques (type PA 6-6, dit « Nylon ») ; on la nomme souvent « Kevlar », qui est la marque de son créateur Dupont de Nemours. Les composites renforcés de fibres d'aramide offrent une bonne stabilité en température (Jusqu'à 200°C en fonction de la matrice) mais souffrent :

- D'une adhérence moyenne entre matrice et fibres.
- D'un prix encore trop élevé : le prix de base est encore de l'ordre de 40 \$/kg et de 160 \$/kg pour la nouvelle fibre Zylon (PBO).

La production mondiale de fibres d'aramide atteint 40.000 tonnes/an, dont seulement 4.000 tonnes sont utilisées dans les composites. Malgré leur résistance mécanique en traction, elles résistent mal en compression et dans le sens normal à l'axe de la fibre. De ce fait, elles sont noyées dans une matrice où sont mélangées d'autres fibres pour améliorer la tenue au choc d'une structure composite.

Tableau 2.2 : caractéristique mécaniques spécifiques des matériaux élaborés sous forme de fibre. [68]

Fibre de	Module E(Gpa)	Contrainte à la rupture $\sigma_u$ (kg/m <sup>3</sup> )	Masse volumique $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Module spécifique E/ $\rho$ (MNm/kg)	Contrainte spécifique $\sigma_u/\rho$ (KNm/Kg)
Verre –E	72.4	3500	2540	28.5	1380
Verre –S	85.5	4600	2480	34.5	1850
Carbone à					
• Haute module.	390	2100	1900	205	1100
• Contrainte élevée	240	3500	1850	130	1890
Kevlar (aramide)	130	2800	1500	87	1870
Bore	385	2800	2630	146	1100

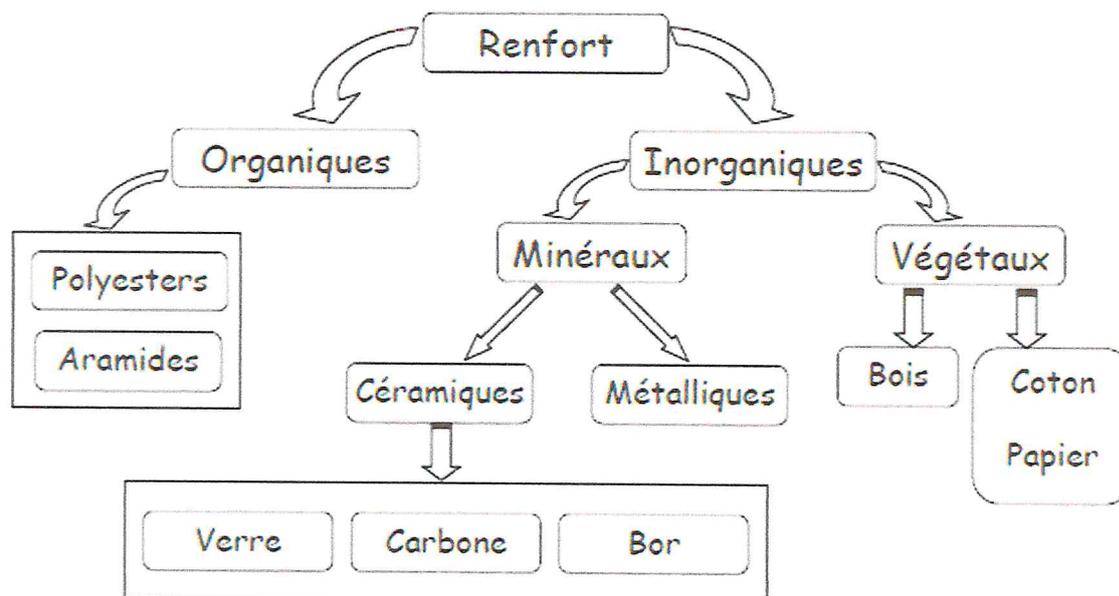


Figure 2.3 Principaux matériaux de renfort . [69]

### 2.2.2 Matrice

La matrice est un liant qui maintient en place la dispersion des fibres, les protège physiquement et chimiquement et assure, en plus, la liaison mécanique entre les éléments de renfort. Elle se présente sous plusieurs formes :

- Organique.
- Métallique.
- Minérale.

Suivant les caractéristiques de la matrice et des renforts, on distingue généralement deux grandes familles : Les composites de grande diffusion, peu onéreux, qui occupent une large part du marché et les composites à hautes performances. Ces derniers, généralement renforcés de fibres, continues de carbone ou Diaramide, sont réservés à des secteurs de forte valeur ajoutée : aéronautique, médical, sports et loisirs. Les Polymères se divisent en deux grandes familles :

- **Les thermodurcissables**, sont mis en forme par chauffage lors d'une transformation irréversible. Les principales résines thermodurcissables sont les polyesters insaturés, très largement utilisés, les résines époxydes et les résines phénoliques. Les composites à matrices thermodurcissables représentent environ 70% des composites transformés en Europe.
- **Les thermoplastiques**, durcissent au cours du refroidissement. Le processus de transformation chimique lors de leur fabrication est réversible. Les principales résines thermoplastiques utilisées dans les composites sont le polypropylène, les polyamides et le polyéther-éther-cétone.

### 2.2.2.1 Matrices organiques

Les deux types de résines qui sont, actuellement, utilisées présentent des propriétés foncièrement différentes. [70]

- **Résines thermoplastiques.** L'Emploi des Polymères Thermoplastiques (TP), renforcés avec des fibres courtes (et prochainement, avec des fibres longues) se développe fortement. Les polymères thermoplastiques ont une structure linéaire ; ils sont mis en forme par chauffage (les chaînes se plient), et durcissent au cours du refroidissement (les chaînes se bloquent). La transformation est réversible.

- **Résines thermodurcissables :** Les résines Thermodurcissables (TD) sont, en général, associées à des fibres longues. Les polymères thermodurcissables ont la forme d'un réseau tridimensionnel ; au cours de la polymérisation, ce réseau se pont (double liaison de polymérisation) et durcit de façon définitive lors du chauffage selon la forme souhaitée. La transformation est irréversible. Les résines thermodurcissables principalement utilisées actuellement sont :

- **Résines polyesters :** Les polyesters insaturés sont les résines les plus utilisées dans les applications GD. Elles représentent sous la forme d'une solution polyacide plus polyalcool qui se rigidifie sous l'action d'un catalyseur et de l'action de la chaleur. Elles présentent le grand défaut d'émettre des vapeurs de styrène au cours de la polymérisation et d'être difficiles à stocker.

- **Résine époxyde :** C'est la plus utilisée dans l'aéronautique ; elle présente un bon accrochage sur les fibres et déboude propriétés mécaniques. Elle possède de bonnes propriétés jusqu'à une température de 170°C mais elle est plus coûteuse que la résine polyesters.

- **Résine phénolique :** Les résines phénoliques sont obtenues par la polycondensation du phénol et du formol ; elles présentent une très bonne tenue au feu, sans fumée (d'où leur utilisation dans le ferroviaire). Elles sont fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à mettre en œuvre.

- **Résine thermostable :** Polymère présentant des caractéristiques mécaniques stables sous des pressions et des températures élevées appliquées de façon continue. Cette propriété est mesurée en déterminant la température que peut supporter la résine durant 2000 Heures sans perdre la moitié de ses caractéristiques mécaniques.

- **Résine vinyesters :** Les vinyesters sont des dérivés de polyesters et d'acide acrylique ; ils ont une bonne tenue à la fatigue et un bon comportement à la corrosion mais sont combustibles. Les propriétés mécaniques des principaux types de matrices organiques sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau 2.3 : caractéristiques moyennes des matrices thermodurcissables(TD) non renforcés.**  
[71]

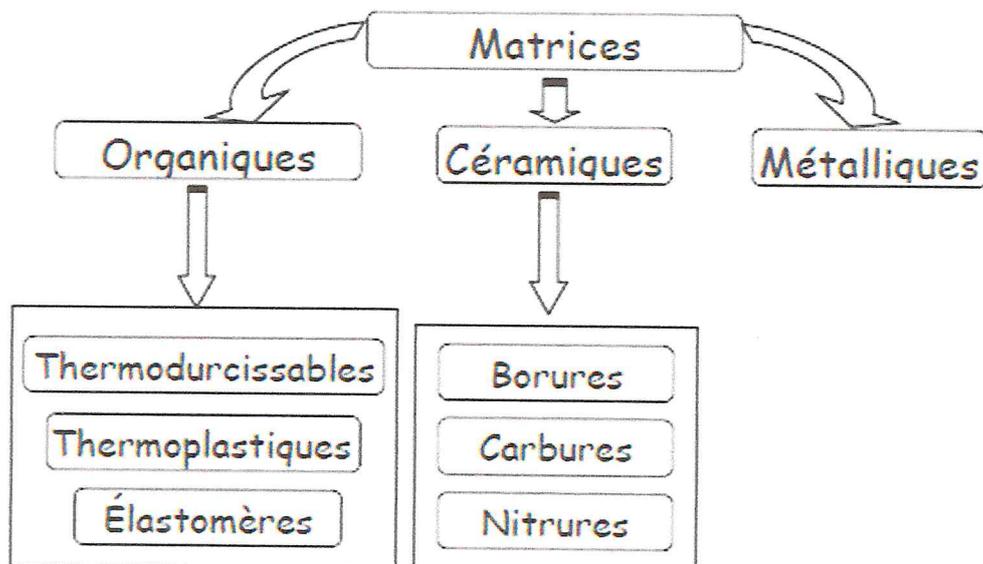
Matériaux	Masse spécifique (Kg/m <sup>3</sup> )	Module Elasticité (Gpa)	Résistance Traction (Mpa)	Module d'allongement Rupure (%)	Tenue à la température en continu (°C)
Polyster	1.2	2.9-3.1	50-60	2-3	120
Epoxyde	1.1-1.4	3	50-120	3-8	150-200
Vinylester	1.1	3.4-3.5	70-85	2-5	100-140
Polyamide	1.4-1.5	4-20	30-40	<1	250-300
Phénolique	1.3	3.8-7	50	1-1.5	120-150

### 2.2.2.2 Matrices métalliques

L'utilisation des matrices métalliques est encore actuellement en grande partie à un stade préindustriel. Plusieurs matériaux composites tels que ; l'Aluminium et ses alliages, Nickel, Titane, présentent une bonne conductibilité électrique et thermique, une bonne tenue à des températures élevées et de plus ils possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques transverses. Leur fabrication conduit à des coûts très élevés.

### 2.2.2.3 Matrices céramiques

Les matériaux utilisés sont les carbures de silicium et de carbone. Ils sont utilisés pour la fabrication des pièces qui subissent des contraintes d'origine thermique et leur coût est très élevé. [72]



**Figure 2.4 Les différentes familles de matrice [72]**

## 2.3 Polymère

La définition la plus généralement acceptée d'un polymère est celle d'un système formé par un ensemble de macromolécules, c'est-à-dire d'entités moléculaires de grande taille,

issues de l'assemblage covalent d'un grand nombre d'*unités répétitives* plus communément appelées unités (ou motifs) monomères. Les édifices macromoléculaires ainsi définis ont des dimensions moléculaires (caractérisées par leur masse molaire) très supérieures à celles des molécules simples ; il en résulte, pour le polymère résultant, des propriétés nouvelles utilisables, en particulier, dans le domaine des matériaux structuraux.

Il n'est pas possible de définir avec précision le passage de l'état simple à l'état macromoléculaire ; en effet, selon la propriété considérée, l'état macromoléculaire exerce son effet pour une masse molaire plus ou moins élevée. Pour fixer les idées, l'ordre de grandeur des masses molaires de la plupart des polymères linéaires produits industriellement est de  $\sim 10^5$  g.mol<sup>-1</sup>.

### 2.3.1 Classification des polymères organiques

#### 2.3.1.1 Selon leur origine

On peut les classer en trois catégories :

- Les polymères naturels : sont issus des règnes végétal ou animal. Leur importance est considérable mais ils ne seront que succinctement décrits dans la première partie de cet ouvrage. On peut cependant mentionner, dans cette catégorie, la famille des polysaccharides (cellulose, amidon...), celle des protéines (laine, soie...), le caoutchouc naturel, etc.
- Les polymères artificiels : sont obtenus par modification chimique de polymères naturels, de façon à transformer certaines de leurs propriétés ; les esters cellulosiques (nitrocellulose, acétate de cellulose...) ont toujours connu une certaine importance économique.
- Les polymères synthétiques : totalement issus du génie de l'Homme, sont obtenus par polymérisation de molécules monomères. Leur variété est extrême et ce sont eux qui seront le plus souvent considérés dans la suite de cet ouvrage.

#### 2.3.1.2 Selon leur domaine d'application :

Il est difficile de proposer une classification exhaustive tant la variété des propriétés a multipliées applications des polymères, comme matériaux en particulier. Il est cependant possible de regrouper les polymères en trois grandes catégories :

- Les **polymères de grande diffusion** (encore appelés **polymères de commodité**) : dont la production annuelle s'évalue en millions de tonnes, sont devenus d'un emploi quotidien. Le polyéthylène, le polystyrène, le poly (chlorure de vinyle) et quelques autres sont à classer dans cette catégorie ; ils présentent une importance économique considérable.
- Les **polymères techniques** : ont des caractéristiques mécaniques qui leur permettent de se substituer, de plus en plus, aux matériaux traditionnels (métaux, céramiques...) dans de nombreuses applications ; les polyamides, les poly acétals... font partie de cette famille.
- Les **polymères spéciaux** (ou **polymères de fonction**) : présentent généralement une propriété spécifique qui induit leur utilisation pour une application particulière. C'est dans cette catégorie que se trouvent les polymères conducteurs, photo actifs, thermostables,

adhésifs, etc. Tous les spécialistes ne donnent pas la même définition à chacune de ces catégories même s'ils s'accordent sur les termes ; un choix a été fait dans le cadre de cet ouvrage, qui veut étre proposition.

### 2.3.1.3 Selon leur structure (dimensionnalité)

Les polymères peuvent encore être classés en trois catégories [72]:

- polymères **linéaires** (ou **monodimensionnels**): pour lesquels chaque chaîne macromoléculaire est constituée d'un nombre (éventuellement) élevé mais fini d'unités monomères ; de tels systèmes correspondent à la polymérisation de monomères bivalents et une macromolécule linéaire peut être très schématiquement représentée par un trait continu divisé en intervalles figurant chacun une unité monomère (figure 2.5) ; un ensemble de chaînes polymères est constitué d'entités de longueur variable, propriété désignée par le terme dispersité<sup>1</sup> ;

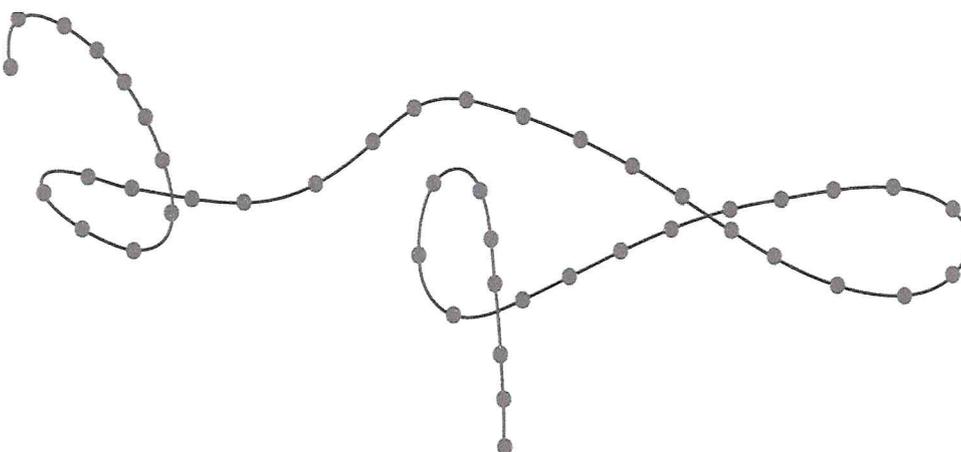


Figure 2.5 Représentation de la chaîne d'un polymère linéaire. [73]

- polymères **bidimensionnels** : dont certains peuvent être produits par la nature (carbone graphite, kératine...) ; dans le domaine des polymères synthétiques ce sont encordes curiosités de laboratoire. Ils se présentent sous la forme de feuillets bidimensionnels, d'épaisseur comparable à celle des molécules simples (figure 2.6) ;

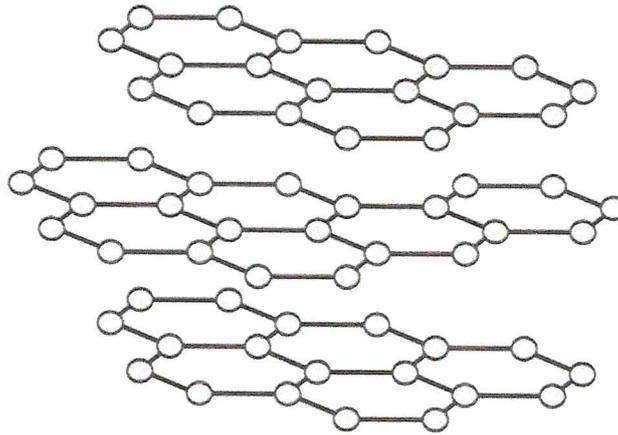


Figure 2.6 Représentation schématique d'un polymère bidimensionnel, ici le carbone graphite. [72]

- **polymères tridimensionnels naturels** : ou bien résultant de la polymérisation de monomères dont la valence moyenne est supérieure à deux ; ils peuvent aussi être obtenus par la réticulation (formation d'un réseau tridimensionnel), par voie physique ou chimique, de polymères linéaires. Leur dimension moléculaire peut être considérée comme infinie puisque toutes les unités monomères constitutives d'un objet sont liées de façon covalente pour former une seule macromolécule. Les liaisons se développent dans les trois dimensions et un élément de volume d'un tel système est représenté comme sur la figure (2.7) . [72]

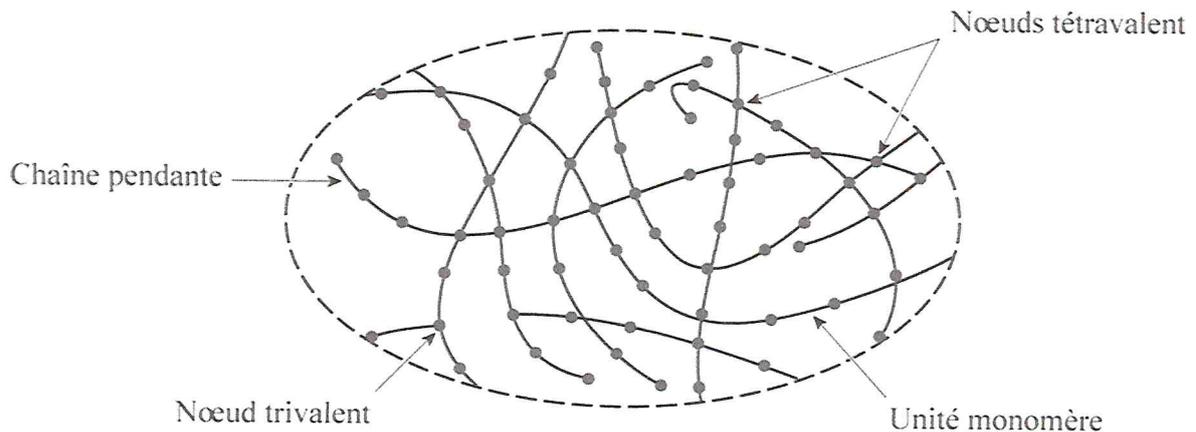


Figure 2.7 Représentation schématique d'un polymère tridimensionnel. [73]

Cette dernière classification est extrêmement importante puisque toutes les propriétés des systèmes macromoléculaires, les propriétés mécaniques en particulier, sont très fortement influencées par leur dimensionnalité. Pour bien le souligner, les monographies des familles des polymères synthétiques correspondants, seront présentées dans deux chapitres différents. [73]

### 2.3.2 Utilisation des polymères

On rencontre les polymères dans les petits objets usuels de la maison comme les appareils électroménagers, et aussi en tant que matériaux de construction, en revêtements et peintures, dans les emballages, les pneus, les fibres textiles, les produits médicaux, chirurgicaux, prothèses, produit d'hygiène, articles de loisirs, pièces de structures dans les véhicules de transport, les équipements électriques, les circuits électroniques, les colles. Ils s'infiltrèrent aussi dans l'alimentation, les produits cosmétiques...etc. [73]

## 2.4 Avantages et inconvénients des matériaux composites

### 2.4.1 Avantages

Les avantages des matériaux composites peuvent être résumés en points suivants [2]:

- Gain de masse.
- Mise en forme de pièces complexes (principe du moulage) et réduction du nombre d'interfaces (boulonnage, rivetage et soudure sur structures métalliques).
- Grande résistance à la fatigue.
- Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion (sauf en cas de contact entre de l'aluminium et des fibres de carbone).
- Insensibles aux produits chimiques "mécaniques " comme les graisses, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvants, pétrole

### 2.4.2 Inconvénients:

Les inconvénients des matériaux composites peuvent être résumés en points suivants [2]:

- Vieillessement sous l'action de l'eau et de la température.
- Attention aux décapants de peinture qui attaquent les résines époxydes.
- Tenue à l'impact moyenne par rapport aux métalliques.
- Meilleure tenue au feu que les alliages légers mais émission de fumées parfois toxiques pour certaines matrices.
- Coût parfois prohibitifs (temps et coût études et mise en œuvre), le gain en coût est surtout valable pour des grandes séries.

## 2.5 Les domaines d'application des matériaux composites

### 2.5.1 Dans la construction civil

L'utilisation des composites dans la construction civile est un nouveau créneau, qui commence à intéresser nos bâtisseurs. Le nombre de dégâts causés par les séismes à travers le monde a poussé les chercheurs à s'intéresser aux composites. Le handicap majeur de l'utilisation des matériaux composites dans la construction civile, reste leur cout, qui est encore excessif. L'utilisation des composites renforcés de fibres de carbone, en complément

des composites à fibre de verre (TD et TP) pourra se développer dans le secteur de la construction civile lorsque leur prix deviendra inférieur à 6€/kg [74]. Les composites apportent au bâtiment la souplesse des formes, la résistance aux contraintes climatiques, et la résistance aux séismes.

L'utilisation des composites dans le bâtiment ne pourra se développer que si les prescriptions techniques actuelles sont mieux adaptées à leur spécificité [75].

## 2.6 Les nanocomposites

Un nanomatériau est composé ou constitué de nano objets (dont la taille est comprise entre 1 et 100 nm) qui présente des propriétés spécifiques de l'échelle nanométrique. Un composite est un assemblage d'au moins deux matériaux (renfort et matrice) figure 2.1 du paragraphe 2.2, généralement non miscibles, chacun apportant une fonctionnalité particulière. Lorsque la taille du renfort à une dimension de l'ordre du nano mètre, on parle de nano matériaux ou de nanocomposites. Cette taille nanométrique apporte des avantages par rapport à une taille micrométrique. Elle permet, par exemple, d'améliorer les propriétés mécaniques sans compromettre la ductilité du matériau car la faible taille des particules ne crée pas de larges concentrations de contraintes. Le terme de nanocomposite est récent mais le concept ne l'est toutefois pas puisqu'il existe depuis toujours des nano composites dans la nature. En effet, beaucoup de matériaux sont constitués de blocs élémentaires de nature différente et de taille nanométrique et entrent donc dans cette classification, comme certaines nanostructure issues de la nature ; les os, les toiles d'araignées ainsi que les coquillages [2].

D'autre part, certains matériaux retrouvés sur des sites archéologiques témoignent que l'idée d'améliorer un matériau en le combinant avec un autre même à l'échelle nanométrique n'est pas nouvelle. Certaines colorations de peintures mayas sont dues aux inclusions de nanoparticules métalliques et d'oxyde dans un substrat de silicate amorphe. Le lustre de poteries de la renaissance italienne est également imputable à la présence de nanoparticules métallique de cuivre et d'argent de 5 à 100 nm obtenues par un processus de réduction. Les NC présentent plusieurs intérêts par rapport aux composites classiques. Un premier intérêt réside dans la surface inter faciale entre les nano charges et la matrice. Pour un poids donné, les nanoparticules présentent une surface d'échange beaucoup plus importante que les particules de taille microscopique. Les NC ont donc de meilleures propriétés comparatives mentales composites classiques, comme par exemple une meilleure répartition des contraintes à l'intérieur de la matrice [2].

### 2.6.1 Nano composites (Nanotube de carbone/matrice Polymère)

Si on se réfère à la littérature publique, on constate que les nanotubes de carbone ont été introduite dans différents types de polymères aussi bien thermoplastiques, que thermodurcissable ou encore mixtes (TD + TP).

Les NTC présentent un caractère hydrophobe. Ils ont donc tendance à s'agglomérer dans la plupart des solvants. De plus, les fortes interactions de type Van der Waals entre les nanotubes font qu'ils ont tendance à se regrouper en faisceaux. Les NTC mono paroi

(SWCNT) ont une surface spécifique plus élevée que les NTC multi paroi (MWCNT). Cependant ils sont plus difficiles à disperser dans les polymères et notamment les thermodurcissables [76]. Les NTC double paroi (DWCNT) présentent un compromis entre ces deux types de nanotube de carbone. La problématique de l'élaboration de nano composites telle qu'elle apparait dans la littérature est la dispersion homogène et l'amélioration de l'interface entre les NTC et la matrice et éventuellement l'orientation de ces derniers [2].

## 2.6.2 Procédé de fabrication des nano composites à base de NTCs

La mise en forme de matériaux composites à matrice polymère thermodurcissable, nécessite la mise en place de procédés très précis afin d'obtenir un matériau de qualité. La synthèse d'un polymère thermodurcissable s'avère plus complexe que celle d'un thermoplastique. Le paramètre à prendre en compte dans la fabrication de composites est la dispersion des renforts au sein de la matrice. La dispersion des renforts est certainement l'étape fondamentale du procédé de fabrication de composites [2].

### 2.6.2.1 Techniques de la mise en œuvre

Les nano composites (polymères / nanotubes de carbone (NTC)) peuvent être mis en œuvre suivant plusieurs procédés : la polymérisation in-situ, le mélange en solution par voie solvant ou le mélange par voie fondue.

Dans le cas de la polymérisation in-situ, les nanotubes sont introduits dans une solution contenant la matrice monomère.

La polymérisation du polymère autour des nanotubes est ensuite déclenchée par un apport de chaleur, par un rayonnement ou par un amorceur. Ce dernier est soit introduit dans le mélange une fois les nanotubes ajoutés soit préalablement fixé à la surface du nanotube par le biais d'une fonctionnalisation. Des nano composites polyamide/NTC ont pu ainsi être synthétisés en employant des nanotubes fonctionnalisés à l'acide. [2]

Ceci permet l'introduction de groupements  $-COOH$  à la surface des nanotubes [77] pour amorcer la polymérisation du polyamide. Cette méthode de synthèse permet une dispersion optimale des nanotubes dans le polymère. Dans le cas des mélanges en solution, le solvant du polymère utilisé doit également pouvoir disperser de manière homogène les nanotubes de carbone. La matrice polymère est tout d'abord mise en solution dans son solvant. Les nanotubes sont de leur côté dispersés dans le même solvant sous agitation par ultrasons. Cette solution de NTC est ensuite ajoutée à la matrice solubilisée sous agitation. Les nanotubes peuvent de cette manière s'introduire entre les chaînes macromoléculaires du polymère. Le solvant est en suite extrait par évaporation. Ainsi le toluène permet d'élaborer des nano composites à base d'élastomères, la décline (de cahydronaphtalène) à base d'élastomères, la décline (de cahydronaphtalène) à base de polypropylène le tétra hydrofuranne(THF) et le 1-méthyl-2-pyrrolidone (NMP) à base de polyuréthane et de polystyrène et le chloroforme à base de poly méthacrylate de méthyle.

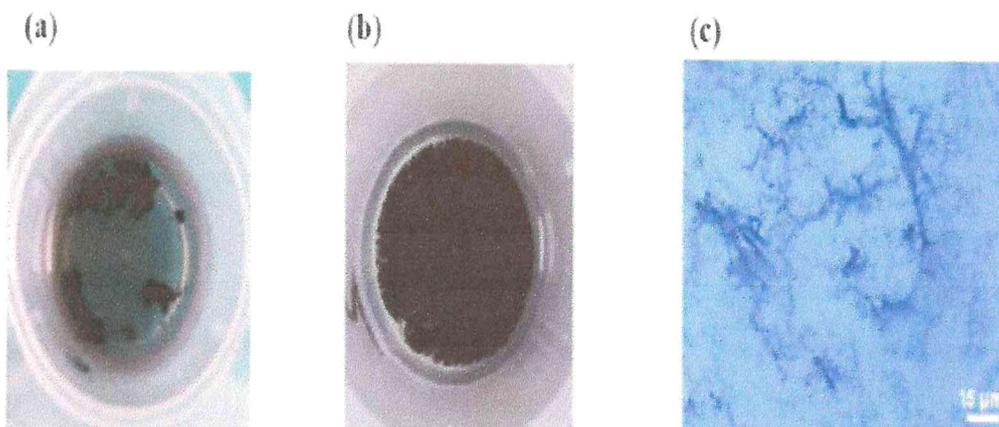
Dans le cas des mélanges en voie fondue, le polymère et les nanotubes incorporés, dans la plupart des cas, dans une extrudeuse chauffée. Le cisaillement apporté par la rotation des vis est l'élément déterminant dans la qualité de la dispersion des charges. Les NTC peuvent ainsi circuler au sein du polymère fondu. Des nano composites à base de polyéthylène, polyméthacrylatedeméthyle et autres polymères thermoplastiques ont été obtenus par cette méthode. [2]

### 2.6.2.2 Dispersion des nanotubes

#### Utilisation des ultrasons :

L'usage des ultrasons, est une technique très connue et utilisée en abondance dans le domaine [78], [62]. Ce procédé consiste à utiliser les vibrations de la solution dans un bain US pour casser les enchevêtrements de (CNTs) en deux étapes :

A la première étape, la masse appropriée de (CNTs) est introduite dans un volume d'éthanol et placée aux ultrasons pendant (1 heure) (figure 2.8.a et b), jusqu'à l'évaporation du solvant. Ensuite la poudre de (CNTs) est ajoutée à la base et à nouveau soumise aux ultrasons durant (1 heure) (figure 2.8.c). En seconde étape, l'élaboration du composite consiste à rajouter le catalyseur à la solution précédente pour procéder à la réticulation du polymère.



(a) (CNTs) dans l'éthanol avant passage aux ultrasons. (b) Après 1 heure aux ultrasons. (c) Image microscope optique d'une gouttelette de base+(CNTs) après 2 heures de dispersion.

**Figure 2.8 L'influence de la dispersion des (CNTs) par ultrasons [79].**

Les images ci-dessus montrent que l'usage des ultrasons peut fournir des résultats assez satisfaisants. En effet, un tel procédé permet de briser les gros agrégats de (CNTs). Cependant, des observations au microscope optique sur une gouttelette de la solution constituée de base + (CNTs) (après 2 heures de passages aux ultrasons) montrent que des agglomérats de tailles micrométriques persistent (figure 2.9).

Les inconvénients de l'utilisation des ultrasons sont :

- Volume de matière limité.
- Nécessite des liquides de basse viscosité pour qu'elle soit efficace.
- L'US n'engendre pas suffisamment de force de cisaillement pour « dés agglomérer » les (NTC).

Des recherches [80],[81] , ont montré que l'énergie fournie par les vibrations aux fréquences ultrasonores induit des défauts, voire même la coupure des (NTC). Malgré ces points négatifs, l'utilisation d'ultrasons reste bien souvent nécessaire pour disperser les (NTC) lorsque ceux-ci sont en suspension dans un solvant (avant de mélanger ce dernier à la matrice polymère). Les ultrasons permettent en effet de séparer les amas de tubes, allant même jusqu'à les individualiser. L'étude réalisée par [82] montre l'importance de l'utilisation des ultrasons pour améliorer la dispersion des (NTC).

### Dispersion mécanique par tri cylindre

A l'origine, cet appareil a été conçu pour broyer des produits dans l'industrie pharmaceutique ou alimentaire (figure 2.9). Son utilisation pour disperser les (CNTs) est récente. Thostenson a montré que le tri cylindre est un outil assez performant pour disperser de manière homogène les (CNTs) dans une résine époxy. Il a pu ainsi d'obtenir des niveaux de conductivités électriques et thermiques supérieurs à d'autres travaux (utilisant notamment les ultrasons).

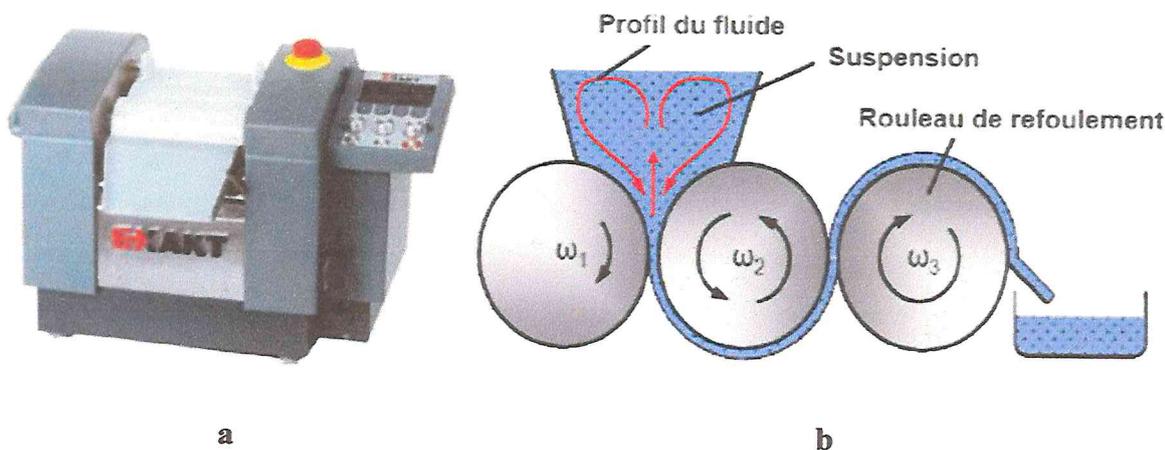


Figure 2.9 : a) TricylindreExakt 80E (Source : Exakt Vertriebs GmbH, Allemagne).

B) Schéma du circuit d'un fluide dispersé par (Source : IPAT, TUBraunschweig, Allemagne)[79].

Le principe général de ce système mécanique consiste à appliquer une combinaison de forces de cisaillements et pressions sur un fluide en régime laminaire. La solution à disperser est introduite au niveau des rouleaux 1 et 2, Tel que :  $w_2 = w_1 = 1/3 w_3$

Le cylindre du milieu (numéro 2) tourne dans un sens opposé aux deux autres. On peut modifier la vitesse de rotation du rouleau de refoulement  $\omega_3$  (tr/min), qui peut varier entre (30 et 600 tr/min). Ensuite, les deux autres cylindres tournent à des vitesses de rotation différentes avec un rapport de démultiplication tel que :

Le second paramètre que l'on peut modifier avec cet appareil est la distance entre chaque rouleau. Elle peut être comprise entre (5 et 130  $\mu\text{m}$ ). La combinaison de ces deux paramètres permettant aussi bien de régler la vitesse de rotation des rouleaux (forces de cisaillement) et la distance (pression exercée sur le fluide).

L'avantage que nous voyons à ce procédé est qu'il permet une grande cadence de fabrication. Ce procédé a été récemment utilisé par les membres de l'équipe de k. Schulte à Hambourg [83] et celle de Thostenson à Virginia Tech. (USA)[27] pour disperser des (NTC) dans des polymères époxyde.

## 2.7 Conclusion

Un matériau composite est constitué de différentes phases nommées renforts et matrice. Lorsque le matériau composite est non endommagé, les renforts et la matrice sont parfaitement liés et il ne peut pas y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases. Les renforts se présentent sous forme de fibres continues ou discontinues. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. L'amatrice assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure. Puis, on a donné une partie pour les différents types de polymères.

Enfin, nous avons savoir les nano composites à matrice polymère et à renforts de nanotube de carbone et leur technique de fabrication et la dispersion des nanotubes de carbone dans une matrice polymère.

# ***Chapitre 3***

**3.1 Introduction**

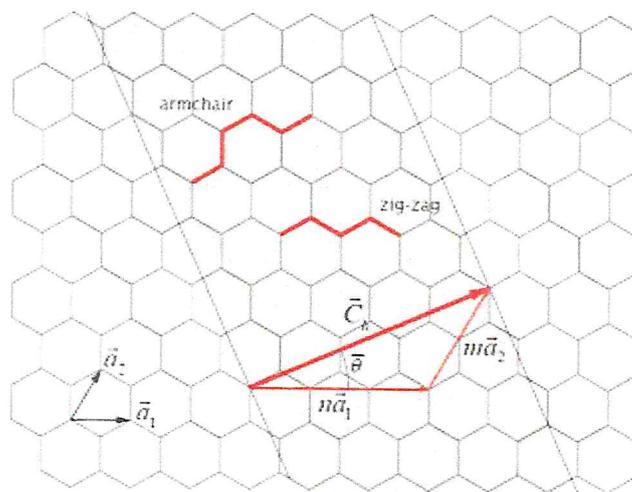
Les vibrations structurales sont très indésirables puisqu'elles peuvent causer des problèmes tels que la fatigue structurale, la transmission des vibrations à d'autres systèmes, le bruit interne ou externe du au rayonnement acoustique, etc. Néanmoins, il est possible de limiter et de réduire leurs effets grâce des techniques actuelle de réduction de vibrations.

La Formulation des théories des vibrations par Rayleigh en 1877, (Strutt (Lord Rayleigh) [84]) tel que le concept fondamental d'oscillations d'un système linéaire autour d'une position d'équilibre, et la notion de fréquences et de modes propres pour des systèmes discrets ou continus, Au cours des années 20, le développement des études des problèmes de vibration et de dynamique pour des aéronautiques, puis le développement des méthodes analytiques avec des structures définies par un petit nombre de degrés de liberté. Ensuite, les méthodes matricielles et le développement de codes des éléments finis et les différents logiciels dédiés à l'analyse vibratoire expérimentale de structures et qui s'adaptant à la taille des systèmes traités suite à l'apparition de l'informatique.

Dans ce chapitre l'étude porte sur la vibration forcée d'un nanotube de carbone monocouche par l'utilisation du modèle Euler-Bernoulli. Le paramètre ( $e_0a$ ), le nombre de mode (N), le rapport ( $L/d$ ), sont traitées pour étudier le rapport de l'amplitude ( $f$ ).

**3.2 La structure d'un nanotube de carbone**

Un nanotube monocouche est constitué d'un seul feuillet de graphène enroulée sur elle-même, de manière à former un cylindre unique. Le nano-objet obtenu est alors uni dimensionnel. Les atomes de carbone restent dans un état d'hybridation ( $sp^2$ ). Sa géométrie est déterminée par son diamètre et son hélicite. Cette dernière dépend des conditions d'enroulement de la feuille de graphène. Elles sont définies par un vecteur de chiralité noté ( $\vec{ch}$ ) ou bien par un angle d'helicité et un diamètre (figure 3.1).



**Figure 3.1: Structure d'un plan de graphène en deux dimensions. Le réseau hexagonal est décrit à partir des deux vecteurs de base ( $a_1$ ) et ( $a_2$ ) [86].**

On déduit l'expression du diamètre du nanotube :

$$d = l_0 \sqrt{3} \frac{\sqrt{(m^2 + n^2 + mn)}}{\pi} \tag{3.1}$$

Où ( $l_0$ ) la longueur de la liaison carbone-carbone ( $l_0 = 1,42$  nm).

### 3.3 Les propriétés mécaniques des nanotubes monocouches (SWCNT's):

Un nanotube monocouche peut être considéré comme un modèle de cylindre mince qui est composé de structure moléculaire liée par des liaisons carbone-carbone. Les équations d'équilibre de cette structure seront étudiées dans ce qui suit, on introduisant un module de Young variable.

#### 3.3.1 Module de Young

Pour un nanotube zigzag, les positions des liaisons et des angles sont présentées sur la (figure 3.2) ci-dessous. Il est vu que l'énergie potentielle n'est pas seulement associée à l'allongement de la liaison  $b$ , mais aussi avec la liaison  $a$ .

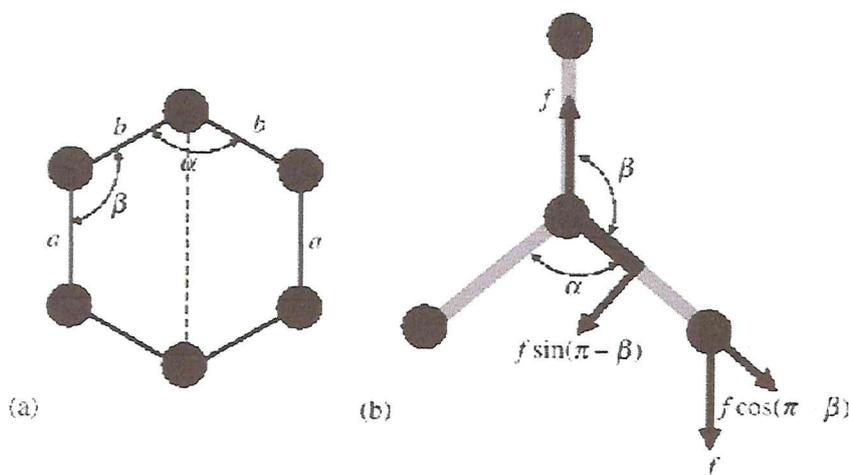
Donc, l'équation d'équilibre des forces et des moments peuvent être obtenues

$$f \cos(\pi - \beta) = K db \tag{3.2}$$

$$2f = K da \tag{3.3}$$

$$\frac{fl_0}{2} \sin(\pi - \beta) = C d\beta + C da \cos \varphi \tag{3.4}$$

Où ( $da$ ) et ( $db$ ) sont les allongements des liaisons ( $a$  et  $b$ ).



**Figure 3.2 : Schéma d'un nanotube de carbone type zigzag ( $n, 0$ ): (a) l'hexagonale (b) répartition de la force en liaison [87].**

La relation entre les angles ( $\alpha$  et  $\beta$ ) est:

$$\sin(\alpha 2) = \sin\beta \cos(\pi 2n) \quad (3.5)$$

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

$$U_{pb} = \frac{1}{2} K (db)^2 = \frac{f^2}{8K} \quad (3.6)$$

$$U_{pa} = \frac{1}{2} K (da)^2 = \frac{2f^2}{K}$$

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

$$U_{\theta a} = \frac{1}{2} \frac{f^2 l_0 \lambda_{z1}^2}{c}$$

$$U_{\theta a} = \frac{1}{2} \frac{f^2 l_0^2 \lambda_{z1}^2}{c} \quad (3.7)$$

$$U_{\theta \beta} = \frac{1}{2} \frac{f^2 l_0 \lambda_{z2}^2}{c}$$

Où :

$$\lambda_{z1} = \frac{-3\sqrt{4 - 3\cos^2(\pi/2n)} \cos(\pi/2n)}{8\sqrt{3} - 2\sqrt{3}\cos^2(\pi/2n)} \quad (3.8)$$

$$\lambda_{z2} = \frac{12 - 9\cos^2(\pi/2n)}{16\sqrt{3} - 4\sqrt{3}\cos^2(\pi/2n)} \quad (3.9)$$

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

$$U = \frac{9Nrf^2}{4K} + \frac{Nrf^2 l_0 \lambda_{z1}^2}{c} + \frac{2Nrf^2 l_0 \lambda_{z2}^2}{c} \quad (3.10)$$

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

$$U_b = \frac{\sqrt{3}Nrf^2}{E_z t} \quad (3.11)$$

Donc, le module de Young équivalent d'un nanotube type zigzag est [87]:

$$\frac{\sqrt{3}Nrf^2}{E_z t} = \frac{9Nrf^2}{4K} + \frac{Nrf^2 l_0 \lambda_{z1}^2}{c} + \frac{2Nrf^2 l_0 \lambda_{z2}^2}{c} \quad (3.12)$$

$$E_z = \frac{4\sqrt{3}KC}{9Ct + 4Kl_0t(\lambda_{z1}^2 + 2\lambda_{z2}^2)} \quad (3.13)$$

Pour  $(n \rightarrow \infty)$  dans  $(\lambda_{z1}$  et  $\lambda_{z2})$  on peut obtenir le module de Young de graphite à nouveau.

**3.4 Le modèle continu non local dans un nanotube de carbone :**

Dans la théorie d'élasticité non local (Eringen [88]), la contrainte au niveau d'un point de référence  $(x)$  est considérée comme une fonction du champ de déformation estimée à chaque point dans le corps. Cette observation est conforme au modèle atomique et aux observations expérimentales sur la dispersion des photons. En outre, quand l'effet des contraintes aux autres points que  $(x)$  est négligé, la théorie non local d'élasticité se conforme à la théorie (locale) classique d'élasticité ceci en mettant  $(e0a=0)$ . Par conséquent, la théorie non locale fournit une description plus précise du comportement matériel comparée à la théorie (locale) classique d'élasticité.

Les équations de base pour un solide élastique non local, linéaire, homogène et isotrope, n'a pas soumis par une force extérieure sont données :

$$\sigma_{ij,j}=0$$

$$\sigma_{ij}(x) = \int a(|x - x'|, \tau) C_{ijkl} \varepsilon_{kl}(x') dV(x') \quad \forall x \in V \quad (3.14)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$$

Ou  $(C_{ijkl})$  est le tenseur de module d'élasticité de l'élasticité isotrope classique,  $(\sigma_{ij}$  et  $\varepsilon_{ij})$  sont les tenseurs des contraintes et déformations respectivement, et  $(u_i)$  et le vecteur de déplacement.

$(a(|x - x'|), \tau)$  Est le module nono local ou la fonction d'atténuation incorporant aux équations constitutives qui caractérisent l'effet non local au point de référence  $(x)$  produit par la déformation locale de la source.  $(x'. |x - x'|)$  Est la distance entre le point de référence  $(x)$  et le point  $(x')$ , et  $(\tau = e0a/l)$  [88]. Ou  $(e0)$  est une constante appropriée à chaque matériel,  $(a)$  est la longueur interne qui caractérise le matériel (par exemple longueur interne qui caractérise le matériel (par exemple longueur, longueur d'onde).

La loi de Hooke pour un état uni-axial de la contrainte a été déterminée par cette équation [89], [90].

$$\sigma(x) - (e0a)^2 \frac{\partial^2 \sigma(x)}{\partial x^2} = E\varepsilon(x) \quad (3.15)$$

Où  $(E)$  est le module de Young du matériau. Ainsi, le coefficient  $(e0a)$  représente l'effet de petite taille.

La déformation  $\varepsilon$  pour le modèle de poutre d'Euler-Bernoulli est donnée par [85] :

$$\varepsilon = -y \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (3.16)$$

### 3.5 Le modèle de calcul (Euler-Bernoulli)

#### 3.5.1 Equation différentielle de la vibration (mouvement)

Considérons une poutre homogène simplement appuyé d'une section constante (A). L'équation de mouvement de vibration forcée. Dans le cas du modèle de poutre d'Euler-Bernoulli d'un de carbone monocouche est donnée par la formule suivante [91]:

$$\frac{\partial V}{\partial x} + q - \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (3.17)$$

Où (w) est le déplacement transversal, ( $\rho$ ) est la masse volumique, (A) est la section transversale du nanotube, (V) la résultante de la force de cisaillement sur la section transversale du nanotube est donnée par la formule suivante :

$$V - \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (3.18)$$

Le moment de flexion résultant dans une section de poutre est donné comme suit :

$$M = \int_A y \delta dA \quad (3.19)$$

Où (y) est la coordonnée mesurée positive à mi-distance dans la direction transversale de la poutre et ( $\sigma$ ) est la contraint axiale [88] [92].

A partir des relations (3.15), (3.16) et (3.18), le moment de flexion (M) pour le modèle non local peut être exprimé par :

$$\left[1 - (e0a)^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right] M = -EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (3.20)$$

Ou le moment d'inertie de la section du nanotube est donné comme suit :

$$I = \int_A y^2 dA \quad (3.21)$$

De l'équation (3.18) et (3.17) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial x} &= V, \text{ alors ;} \\ \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} &= \frac{\partial V}{\partial x} = -q + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (3.22)$$

De l'équation (3.20) :

$$M = -EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + (e0a)^2 \left[ \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - q \right] \quad (3.23)$$

La dérivation de l'équation (3.23) est comme suit :

$$\frac{\partial M}{\partial x} = -EI \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (e0a)^2 \left[ \rho A \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial t^2} - \frac{\partial q}{\partial x} \right] \quad (3.24)$$

Avec  $\frac{\partial M}{\partial x} = V$ , donc l'équation (3.24) devient :

$$V = -EI \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (e0a)^2 \left[ \rho A \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial t^2} - \frac{\partial q}{\partial x} \right] \quad (3.25)$$

La dérivation de l'équation (3.25) donne:

$$\frac{\partial V}{\partial x} = -EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + (e0a)^2 \left[ \rho A \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial t^2} - \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} \right] \quad (3.26)$$

Retournant à l'équation (3.17), en remplaçant  $\frac{\partial V}{\partial x}$  par l'équation (3.26), on trouve :

$$\begin{aligned} & -EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + (e0a)^2 \left[ \rho A \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial t^2} - \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} \right] + q - \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \\ \Rightarrow & EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \left( 1 - e0a^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \left( \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - q \right) = 0 \end{aligned} \quad (3.27)$$

C'est l'équation différentielle générale de la vibration forcée d'un nanotube de carbone mono couche selon la théorie d'Euler-Bernoulli avec :

$EI$  : Rigidité de flexion ( $N.m^2$ )

$k_w$  : raideur ou module de fondation Winkler ( $N/m^2$ ).

$M(x,t)$  : Moment de flexion ( $N.m$ ).

$A$  : section ( $m^2$ )

$\rho$  : densité (masse volumique) ( $Kg/m^3$ ).

$W(x,t)$  est une amplitude qui peut être lié à une distance (déplacement) dans le cas d'une vibration, pression acoustique dans le cas d'une onde sonore , champ électrique, courant...etc.

### 3.5.2 Solution de l'équation

La résolution de cette dernière aux dérivées partielles d'ordre quatre se faite par la technique de séparation des variables ( $x$ , et  $t$ ). En fait sachant que l'on traite un problème de vibration, on supposera que  $w(x, t)$  et le chargement  $q(x,t)$  sont des fonctions sinusoïdales de pulsation  $w$ .

On pose alors [90]:

$$\begin{cases} w(x, t) = \sum W_{NL} \sin(\lambda x) \sin(\omega t), & \lambda = \frac{N\pi}{L} \quad (m = 1, 2, \dots) \\ q(x, t) = q_m \sin(\lambda x) \sin(\omega t) \end{cases} \quad (3.28)$$

$w(x, t)$ , est le déplacement transversal.

$q(x, t)$ , est la densité de force exercée (chargement).

Remplaçant  $w(x, t)$  et  $q(x, t)$  dans l'équation (3.25) :

$$\Rightarrow W_{NL}(EI\lambda^4 - (1 + e_0 a^2 \lambda^2) \rho A \omega^2) - q_m (1 + e_0 a^2 \lambda^2) = 0 \quad (3.29)$$

$$\text{De cela : } W_{NL} = \frac{q_m L^4 (k)}{EI(\beta^4 - k\Omega^2)} \quad (3.30)$$

Avec :

$$\begin{cases} k = 1 + \lambda^2 e_0 a^2 \\ \beta = \lambda L \\ \Omega^2 = \rho A \frac{\omega^2 L^4}{EI} \end{cases} \quad (3.31)$$

### 3.5.3 Cas particuliers

#### 3.5.3.1 Chargement local

Pour le cas d'un chargement ou contrainte local, L'effet d'échelle ( $e_0 a$ ) sera égal à zéro ( $e_0 a = 0$ ) et par conséquent de la formule (3.31)  $k=1$ .

Ce qui donne dans l'équation (3.30) que :

$$W_{NE} = \frac{q_m L^4}{EI(\beta^4 - \Omega^2)} \quad (3.32)$$

Avec  $W_{NE}$  le déplacement dans le cas d'un état de contrainte locale.

#### 3.5.3.2 La vibration libre d'un nanotube de carbone

Dans le cas d'une vibration libre (non excité) où ( $q_m=0$ ), l'équation (3.29) devient:

$$\begin{aligned} \Rightarrow EI\lambda^4 - \rho A \omega_n^2 &= 0 \\ \Rightarrow \omega_n^2 &= \frac{EI\lambda^4}{\rho A} \end{aligned} \quad (3.33)$$

De l'équation (3.31)

$$\Omega^2 = \beta^4 r^2 \quad (3.34)$$

$$\text{Ou : } r^2 = \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \quad (3.35)$$

Pour étudier l'effet de paramètre d'échelle sur les vibrations forcées d'un nanotube de carbone monocouche (SWCNT), les résultats, incluent les paramètres local et non local sont comparés.

Le rapport de l'amplitude avec le paramètre non local sur ce lui qui est dans le cas local est donné par :

$$f = \frac{W_{NE}}{W_{LE}} = \frac{(1-r^2)k}{1-r^2k} \quad (3.36)$$

Où ( $W_{NE}$ ,  $W_{LE}$ ) sont les amplitudes basées sur le modèle non local et local de Euler Bernoulli respectivement.

### 3.6 Le modèle de Winkler

Il existe de nombreuses études sur la modélisation de fondation élastique Winkler dans la littérature zahou [93] et Eisenberger [94] ont étudié une solution générale aux vibrations des poutres sur différent fondation élastique Winkler. Eisenberger et Clastornik [95] ont étudié la vibration et le flambement d'une poutre sur déférant fondation élastique Winkler. Une réponse dynamique d'une poutre de Timoshenko avec une masse en mouvement concentré a été résolue par Lee [96] .En outre, certaines chercheurs [97] [98] ont étudié l'analyse des fondations élastiques avec les modèles Winkler-Pasternak.

En plus de différentes méthode de transformation des structures sur fondation élastique, comme la méthode différentielle quadratique (DQM) sont aussi utilisées largement.

Le modèle le plus simple concernant la base élastique est le modèle de Winkler, qui considère la base comme une série de ressorts séparés sans effets d'accouplement (figure 3.3).

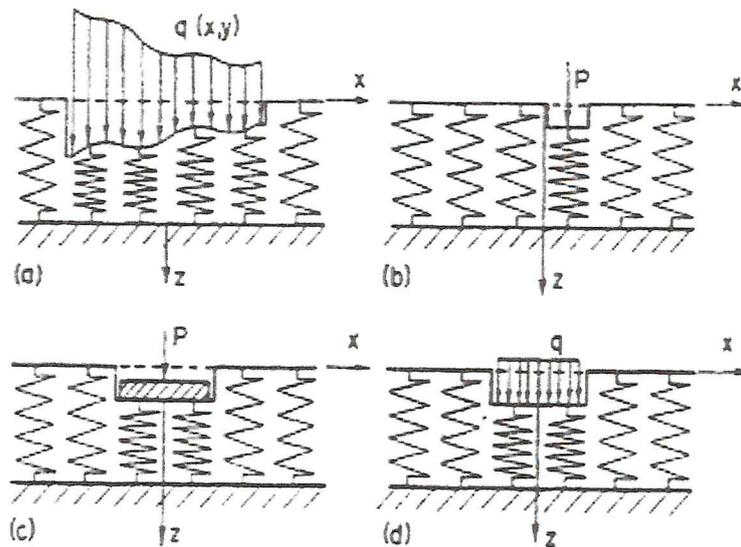


Figure 3.3: Une poutre repose sur une fondation élastique (Winkler).

Ceci a été amélioré plus tard par Pasternak qui a tenu compte des interactions entre les ressorts séparés (effet de cisaillement) (figure 3.4). Dans le modèle de Winkler en présentation un nouveau paramètre dépendant. Des lors, le modèle de Pasternak était largement employé pour décrire le comportement mécanique des interactions structures-bases élastique.

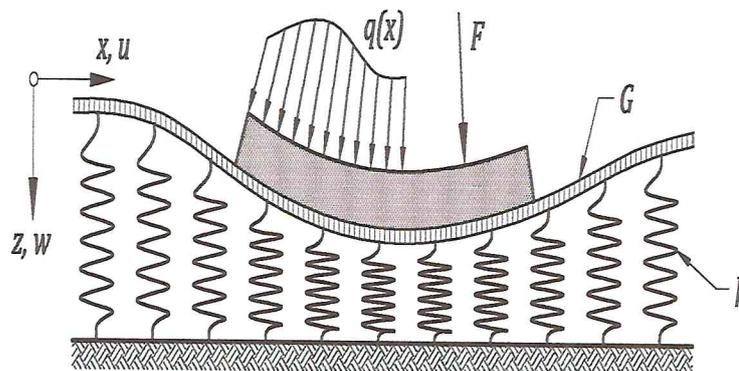


Figure 3.4: Une poutre repose sur une fondation élastique (Winkler-Pasternak).

Le modèle considéré dans notre travail est le modèle de winkler (pas d'effet de cisaillement), De ce fait, le milieu élastique exerce une densité de force égale à :

$$f = - k_{win} w \tag{3.37}$$

Où le signe négatif indique que la pression (f) est opposée à la déflexion du nanotube externe. Le ( $k_{win}$ ) ici est proportionnel au module de Young de la matrice polymère.

Les hypothèses et les équations de la théorie des poutres classiques utilisées sont :

- la poutre et les matériaux du sol sont linéairement élastiques, homogènes et isotropes;

- la poutre considérée présente une section constante de largeur constante  $b$  qui est supportée par la fondation.
- la poutre dans le modèle de fondation de Winkler est basée sur la théorie de la flexion pure de poutre couramment utilisée dans l'analyse structurale [12].
- Les déplacements ou translations sont petits par rapport à l'épaisseur de la poutre;
- les déplacements ou translations verticales du sol « $w$ » en un point ne dépendent que de la pression de contact « $p$ », agissant au point de la fondation élastique idéalisée et d'une constante de proportionnalité  $K$  [12].
- Les contraintes axiales sont petites par rapport à l'unité;
- Les contraintes normales transversales et les contraintes de cisaillement sont négligeables;
- Les sections transversales sont planes et perpendiculaires à l'axe longitudinal avant et après une déformation (hypothèse de Bernoulli).
- Les directions positives du chargement, les déplacements et les forces internes sont dans le sens de la déflexion.

### 3.7 Le modèle de calcul (Euler-Bernoulli) :

Considérons une poutre homogène simplement appuyé d'une section constante ( $A$ ). L'équation de mouvement de vibration forcée. Dans le cas du modèle de poutre d'Euler-Bernoulli d'un nanotube de carbone monocouche est donnée par la formule suivante [99] :

$$\frac{\partial V}{\partial x} + q + f(x) - \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (3.38)$$

Ou ( $w$ ) est le déplacement transversal, ( $\rho$ ) est la masse volumique, ( $A$ ) est la section transversale du nanotube. ( $x$ ) représente le milieu élastique et ( $V$ ) la résultante de la force de cisaillement sur la section transversale du nanotube

Après traitement comme le cas précédent on trouve l'équation différentielle

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \left(1 - e0a^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) \left(\rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - q - f(x)\right) = 0 \quad (3.39)$$

La résolution de cette équation aux dérivées partielles d'ordre quatre se fait par la technique de séparation des variables ( $x$ , et  $t$ ). En fait sachant que l'on traite un problème de vibration, on supposera que  $w(x, t)$  et le chargement  $q(x,t)$  sont des fonctions sinusoïdales de pulsation  $w$ .

On pose alors [90]:

$$\begin{cases} w(x, t) = \sum W_{NL} \sin \lambda x \sin \omega t, & \lambda = \frac{N\pi}{L} \quad (m = 1, 2, \dots) \\ q(x, t) = q_m \sin \lambda x \sin \omega t \\ f(x, t) = -k_w w(x, t) \end{cases} \quad (3.40)$$

Où :

$w(x, t)$  est le déplacement transversal,  $f(x, t)$  est la densité de force exercée par le milieu élastique d'une raideur  $k_w$  (*Winkler*) proportionnel au module de Young de la matrice polymère.

La résolution de cette équation différentielle (9) donne l'amplitude dans le cas de contrainte non local,  $W_{NL}$

$$W_{NL} = \frac{q_m L^4 k}{EI \lambda^4 L^4 - \rho A \omega^2 L^4 + k_w L^4 - e_0 a^2 \rho A \omega^2 \lambda^2 L^4 + e_0 a^2 \lambda^2 L^4 k_w} \quad (3.41)$$

$$W_{NL} = \frac{q_m L^4 k}{EI [\beta^4 + k\gamma - k\Omega^2]} \quad (3.42)$$

Avec :

$$\begin{cases} k = 1 + \lambda^2 e_0 a^2 \\ \beta = \lambda L \\ \Omega^2 = \rho A \frac{\omega^2 L^4}{EI} \\ \gamma = \frac{k_w L^4}{EI} \end{cases} \quad (3.43)$$

Le rapport de l'amplitude avec le paramètre non local sur ce lui qui est dans le cas local est donné par :

$$f = \frac{\beta^4 K (1 - r^2) + K \gamma}{\beta^4 (1 - K r^2) + K \gamma} \quad (3.44)$$

Les différents paramètres utilisés dans les formules ci-dessous seront discutés dans le chapitre qui suit.

### **3.8 Conclusion**

Les théories d'élasticité sont l'origine pour étudier les différents problèmes de la mécanique du solide. A la différence des modèles classiques du milieu continu, la théorie non locale d'élasticité suppose que l'effort à un point de référence dans un corps dépend non seulement des contraintes à ce point, mais également des contraintes à tous les autres points du corps.

L'existence de plusieurs modèle tel que, winkler ou Winkler-Pasternak permis de trouver la solution d'une infinité des problèmes en élasticité et en mécanique en général.

Les différentes formulations et équations traités dans ce chapitre permettent par la suite de tracer plusieurs courbes prenant en compte : l'effet d'échelle, le nombre de mode, le rapport géométrique rapport ( $L/d$ ) et par conséquent la raideur du matériau pour bien comprend le milieu élastique.

# ***Chapitre 4***

## 4.1 Introduction

Ce chapitre sera consacré à l'étude et à l'analyse des différents résultats de la modélisation de la vibration forcée d'un nanotube de carbone mono couche entouré par une matrice polymère étudié dans le chapitre précédent selon l'approche Winkler et le modèle de calcul d'Euler-Bernoulli à laquelle on a pris en considération les théories d'élasticité locale et non locale.

La variété de paramètres liés à ce type de modèle nous permis de tracer un nombre important de courbes de l'amplitude en fonction de (rapport dimensionnel, effet d'échelle, nombre de mode et de chiralité...etc).

## 4.2 Résultats et discussions :

### 4.2.1 Rapport d'amplitude en fonction de la fréquence.

#### 4.2.1.1 le cas général

La figure 4.1 illustre la dépendance du rapport de l'amplitude ( $f$ ) avec le rapport de fréquence ( $r$ ) de nanotube de carbone situé dans un milieu élastique.

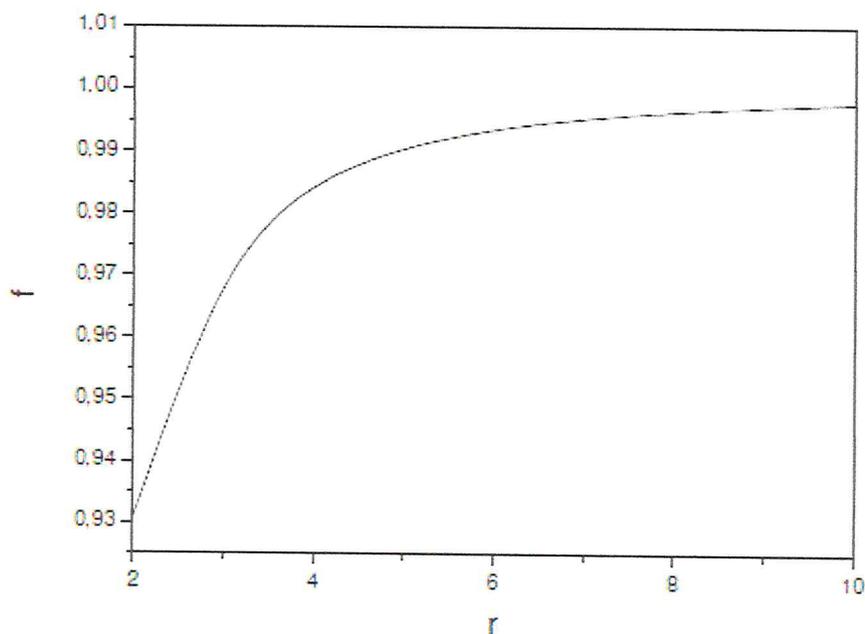
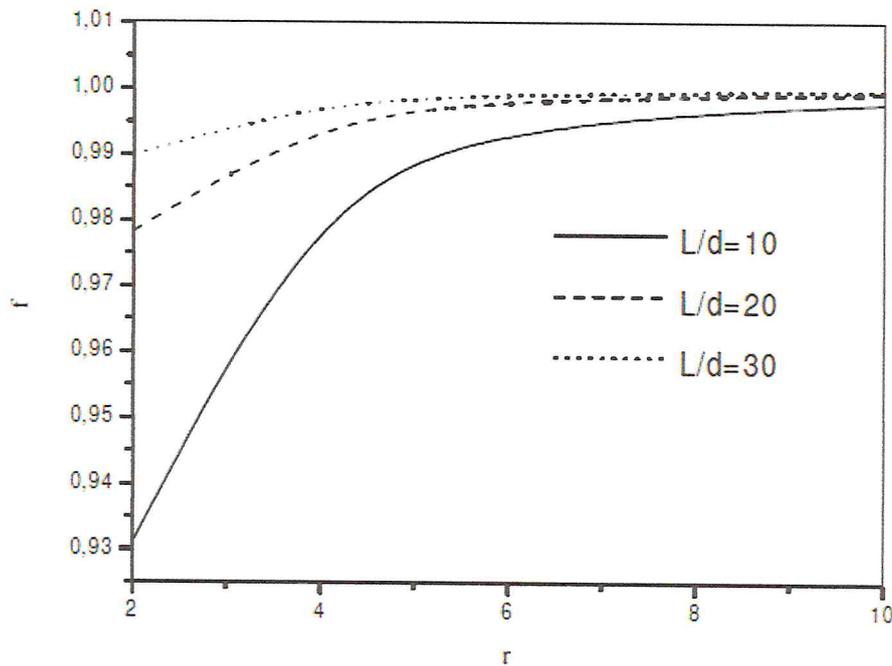


Figure 4.1 : La relation entre le rapport ( $f$ ) et le rapport de fréquence ( $r$ ) sans milieu élastique pour  $N=1$

On remarque que la variation est importante pour  $r < 5$ , elle peut atteindre 6%, à partir de cette valeur, la variation est faible, moins de 1% et commence à stabiliser avec une amplitude proche de l'unité. Cette observation nous permis de conclure que la dépendance entre l'amplitude et la fréquence est très faible pour toute une fréquence de vibration forcée ( $r$ ) plus grande de 5 ( $r > 5$ ).

#### 4.2.1.2 effet du rapport dimensionnel

La figure 4.2 représente la variation de la fréquence ( $f$ ) avec le rapport de l'amplitude ( $r$ ), pour différentes valeurs de rapport dimensionnel (Longueur/ diamètre), on admettant que le rayon «  $d$  » est constant et on faisant varier la longueur du nanotube.



**Figure 4.2 : La relation entre le rapport ( $f$ ) et la fréquence ( $r$ ) pour différent rapport  $L/d$  sans milieu élastique ou ( $e_0a= 2nm$  et  $N=1$ )**

Il est clair que comme le cas précédent que la variation de l'amplitude ( $f$ ) en fonction de la fréquence ( $r$ ) est toujours importante pour toute  $r < 5$  et au delà de 5, la variation est faible et commence à stabiliser avec une amplitude proche de l'unité. Néanmoins en particulierité, on peut dire que la fréquence dépend de la géométrie du nanotube, elle diminue si la longueur du nanotube augmente. Cette diminution peut atteindre de 6% en faisant varier  $L/d$  de 10 à 30.

#### 4.2.1.2 effet du nombre de mode

La figure 4.3 représente la variation de la fréquence ( $f$ ) avec le rapport de l'amplitude ( $r$ ), pour différentes valeurs de nombre de mode ( $N$ ) de  $N=1$  à 3.

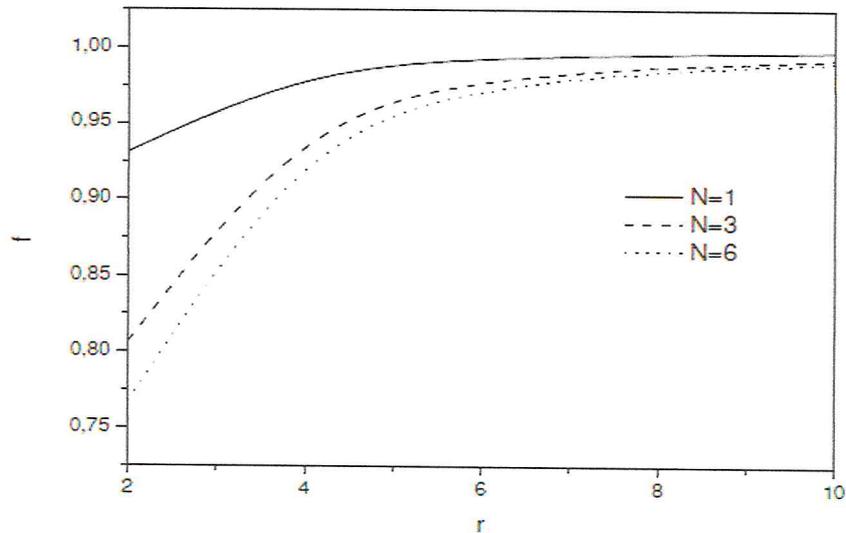


Figure 4.3: la relation entre le rapport ( $f$ ) et le rapport de fréquence ( $r$ ) pour le nombre de mode ( $N$ )

la variation de l'amplitude ( $f$ ) en fonction de la fréquence ( $r$ ) est toujours importante pour toute  $r < 5$  et au delà de 5, la variation est faible et commence à stabiliser avec une amplitude proche de l'unité. On remarque aussi que la fréquence dépend du nombre de modes et contrairement au cas de la géométrie, elle augmente si le nombre de modes augmente. Cette augmentation peut atteindre de 15 % en faisant varier  $N$  de 10 à 30.

#### 4.2.1.2 effet de localité de contrainte

La figure 4.4 représente la variation de l'amplitude ( $f$ ) avec le rapport de la fréquence ( $r$ ), pour différentes valeurs de l'effet d'échelle ( $e_0a$ ) de  $e_0a = 0$  à  $2$ .

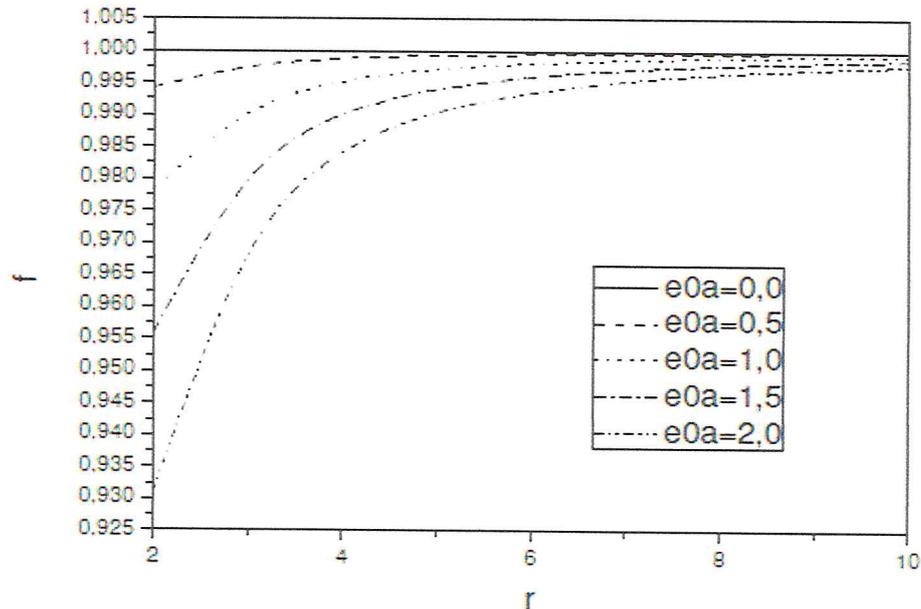


Figure 4.4 : la relation entre le rapport de l'amplitude ( $f$ ) et le rapport de fréquence ( $r$ ) pour différentes valeur de coefficient d'échelle ( $e_0a$ ).

la variation de l'amplitude ( $f$ ) en fonction de la fréquence ( $r$ ) est toujours importante pour toute  $r < 5$  et au delà de 5, la variation est faible et commence à stabiliser avec une amplitude proche de l'unité. Néanmoins en particulierité, on peut dire que la fréquence dépend du coefficient d'échelle, elle augmente si la valeur de  $e_0a$  augmente. Cette augmentation peut atteindre de 7 % en faisant varier  $e_0a$  de 0 à 2. Elle est attribuée à l'augmentation du diamètre du nanotube.

## 4.2.2 Effet du milieu élastique (rigidité)

### 4.2.2.1 amplitude /fréquence

La figure 4.5, représente la variation de la fréquence ( $f$ ) avec le rapport de l'amplitude ( $r$ ), pour différentes valeurs de la raideur du matériau ( $k_w$ ), nous avons étudié trois cas de valeur de raideur différentes ( $k_w$ ,  $2 k_w$  et  $3 k_w$ ).

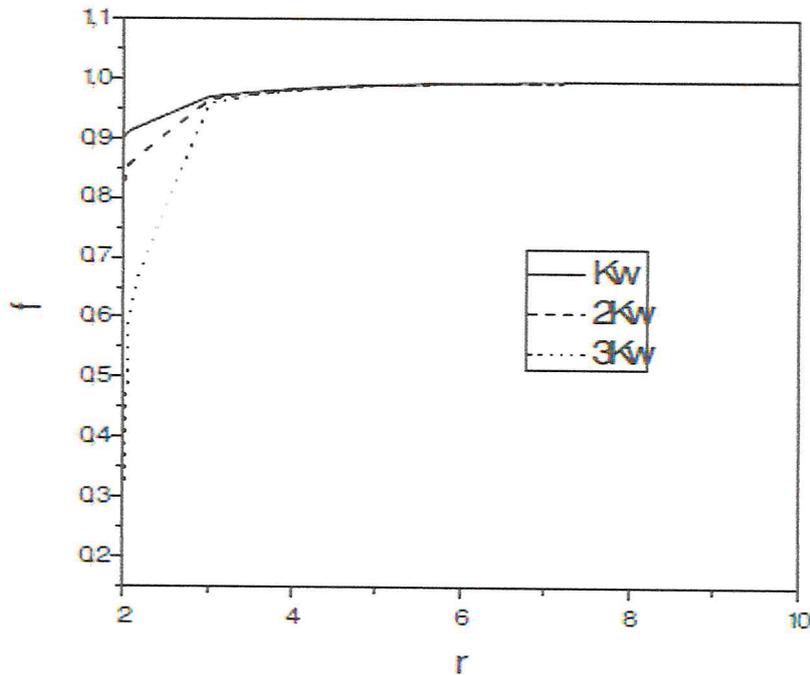


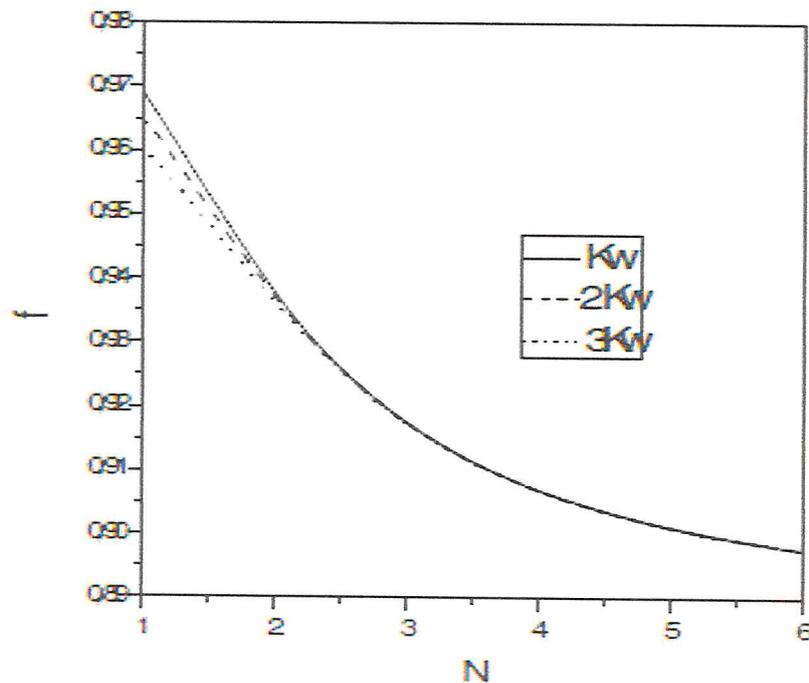
Figure 4.5 : la relation entre le rapport ( $f$ ) et le rapport de fréquence ( $r$ ) pour différent rigidité de winkler ( $K_w$ ).

la variation de l'amplitude ( $f$ ) en fonction de la fréquence ( $r$ ) est remarquable pour toute  $r < 4$ , au delà de cette valeur, la variation est presque stable avec une amplitude proche de l'unité. Néanmoins en particulierité, on peut dire que la fréquence dépend de l'élasticité du milieu traduite par la raideur ou la rigidité du matériau, on remarque que la dépendance augmente si la rigidité augmente. Cette augmentation peut atteindre jusqu'à 40 % en faisant multiplier la rigidité par 3.

## 4.2.2.2

Amplitude  
de mode

/nombre



**Figure 4.6 : la relation entre le rapport (f) et le nombre de mode pour le module de winkler ( $K_w$ ).**

Pour la figure 4.6, qui représente la variation de la fréquence (f) avec le nombre de mode, on peut dire que l'amplitude dépend aussi de l'élasticité du milieu dans le cas de la variation de nombre du mode, elle augmente de plus de 7% si on fait augmenter le nombre de modes de 1 à 6.

Pour les premiers modes (1 à 3), l'amplitude augmente avec l'augmentation de la raideur ou de la rigidité et au-delà de 3, la rigidité n'a pas d'influence. Ce qui traduit par une déformation faible et par conséquent une structure stable.

#### 4.2.2.2 Amplitude / rapport dimensionnel

La figure 4.7 illustre la dépendance du rapport de l'amplitude ( $f$ ) avec le rapport dimensionnel ( $L/d$ ).

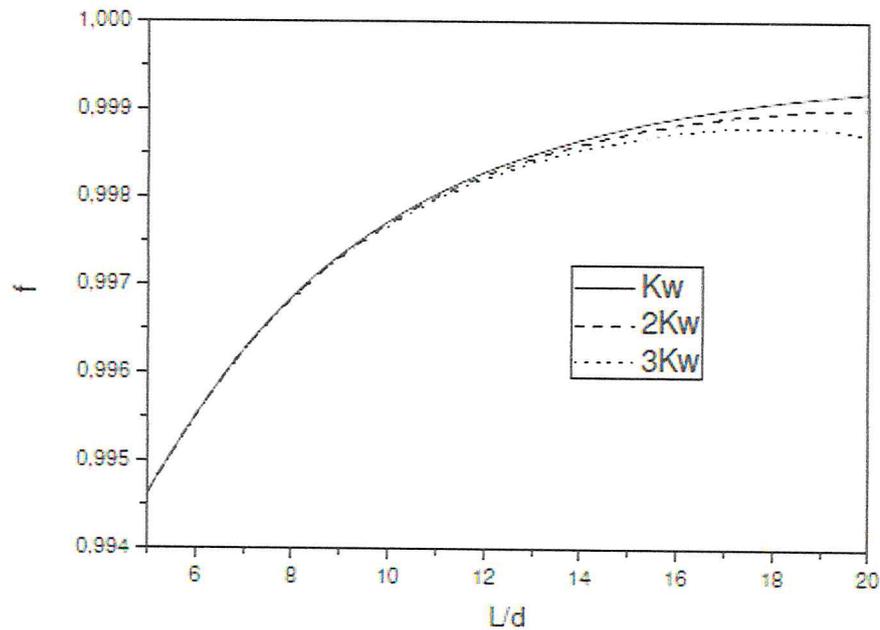


Figure 4.7 : la relation entre le rapport ( $f$ ) et le rapport ( $L/d$ ) pour le module de Winkler ( $Kw$ )

Il est vu que si la longueur augmente, l'amplitude devient négligeable et par conséquent une structure négligeable. Il est vu que pour des valeurs de ( $L/d$ ) inférieur à 10, la variation de la raideur n'a pas d'influence et le comportement est le même pour n'importe quelle valeur de  $kw$ , au-delà, la l'amplitude augmente avec l'augmentation de la raideur ( $kw$ ).

### 4.2.3 Module de Young / nombre de chiralité

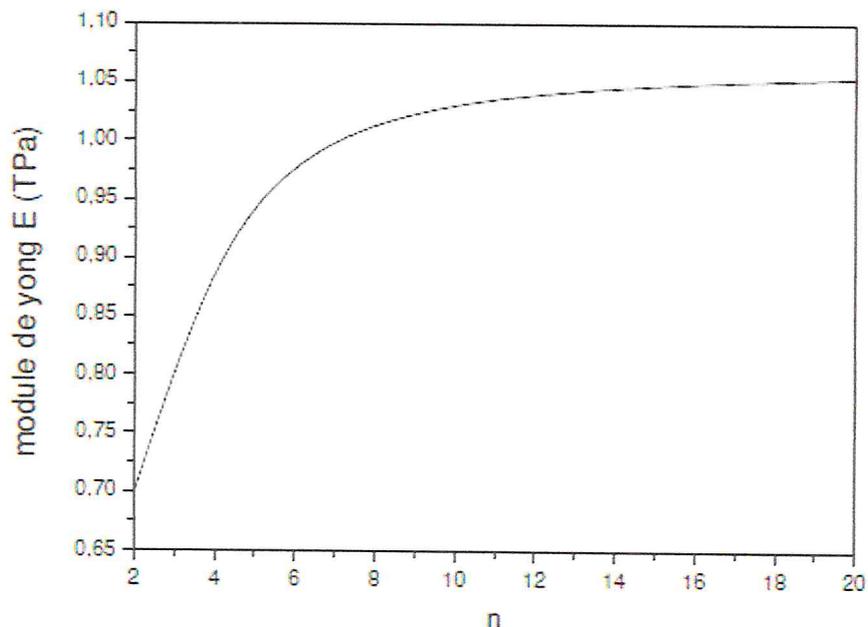


Figure 4.8 : Relation entre le module de Yong (E) et le nombre de maille (n) type Zig-Zag.

Il est clair que le module de Young augmente si la chiralité augmente jusqu'à la valeur exacte dans le cas du graphite. On constate que les nanotubes de carbone de type zigzag qui ont des grands diamètres sont plus rigide que les autres (moins de 1nm de diamètre).

### 4.2.4 Résultats divers

#### 4.2.4.1 Amplitude (f), chiralité (n), nombre de mode (N) et le rapport d'échelle ( $e_0a$ ).

Les résultats du Rapport de l'amplitude pour différents valeurs de chiralité (n), le rapport d'échelle ( $e_0a$ ) et le nombre de mode vibratoire sur la base du modèle non local d'Euler Bernoulli sont présentés dans le tableau 4.1.

**Tableau 4.1 : le rapport ( $f$ ) pour différentes valeur de( $n$ ) en variant le nombre de mode ( $N$ ) et le rapport d'échelle ( $e_0a$ ).**

n	e <sub>0</sub> a=1		e <sub>0</sub> a=2	
	N=1	N=6	N=1	N=6
2	0.9919738	0.9900678	0.9905792	0.9900170
4	0.9949589	0.9902660	0.9919734	0.9900678
6	0.9968879	0.9905792	0.9935622	0.9901514
8	0.9979735	0.9909852	0.9949588	0.9902660
10	0.9986010	0.9914587	0.9960583	0.9904095
12	0.9989851	0.9919738	0.9968879	0.9905792
14	0.9992337	0.9925078	0.9975078	0.9907722
16	0.9994026	0.9930420	0.9979735	0.9909853
18	0.9995220	0.9935622	0.9983277	0.9912152
20	0.9996093	0.9940586	0.9986010	0.9914587

Tout d'abord on remarque que si on augmente le nombre de chiralité, l'effet du milieu élastique diminue malgré pour n'importe quelle valeur de nombre de mode. Par contre l'effet du milieu élastique augmente Avec l'augmentation du rapport d'échelle ( $e_0a$ ) et le nombre de mode ( $N$ ).

#### 4.2.4.2 Amplitude ( $f$ ), chiralité ( $n$ ), nombre de mode ( $N$ ) et la raideur du matériau.

Les résultats du rapport de l'amplitude pour différents valeurs de chiralité ( $n$ ), la raideur ou la rigidité et le nombre de mode vibratoire sur la base du modèle non local d'Euler Bernoulli sont présenté dans le tableau 4.2 ci-dessous.

**Tableau 4.2** : Présente le rapporte(f) pour différente valeur de(n) en variant le nombre de mode (N) et le rapport à petit échelle (Kw).

N	Kw=0.9		Kw=1.8		Kw=2.7	
	N=1	N=6	N=1	N=6	N=1	N=6
2	0.9905740	0.9900170	0.9905688	0.9900170	0.9905636	0.9900170
4	0.9919587	0.9900678	0.9919435	0.9900678	0.9919283	0.9900678
6	0.9935404	0.9901513	0.9935186	0.9901513	0.9934966	0.9901513
8	0.9949343	0.9902659	0.9949096	0.9902659	0.9948846	0.9902659
10	0.9960333	0.9904094	0.9960081	0.9904094	0.9959826	0.9904093
12	0.9968638	0.9905791	0.9968391	0.9905791	0.9968142	0.9905790
14	0.9974849	0.9907721	0.9974614	0.9907721	0.9974376	0.9907720
16	0.9979520	0.9909852	0.9979299	0.9909851	0.9979074	0.9909851
18	0.9983075	0.9912151	0.9982869	0.9912150	0.9982657	0.9912150
20	0.9985821	0.9914586	0.9985627	0.9914585	0.9985428	0.9914584

Tout d'abord on remarque que si on augmente le nombre de chiralité, l'effet du milieu élastique diminue pour n'importe quelle valeur de nombre de mode et de rigidité kw. Par contre l'effet du milieu élastique augmente Avec l'augmentation de la raideur du matériau kw et le nombre de mode (N).

### 4.3 Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié la vibration libre des nanotubes de carbone monocouche (SWCNT) type Zigzag entourer par une matrice polymère (un milieu élastique) basée sur la théorie l'élasticité non locale et la théorie des poutres d'Euler-Bernoulli

Les résultats ont montré la dépendance des fréquences de vibration sur les différents paramètres, telle que l'effet d'échelle ( $e_0a$ ), le nombre de mode (N), le rapport dimensionnel (L/d), le nombre de chiralité (n) et la raideur du matériau kw.

la variation de l'amplitude (f) en fonction de la fréquence (r) est toujours importante pour toute  $r < 5$  malgré en variant l'effet d'échelle ( $e_0a$ ), le nombre de mode (N), le rapport dimensionnel (L/d), et au delà de 5, la variation est faible et commence à stabiliser avec une amplitude proche de l'unité. On conclut aussi que le nombre de mode a le plus d'effet sur l'amplitude correspondante au milieu élastique.

la fréquence dépend de l'élasticité du milieu traduite par la raideur ou la rigidité du matériau, elle augmente si la rigidité augmente et si le nombre de modes augmente de 1 à 3.

Au-delà de  $N=3$ , la rigidité n'a pas d'influence. Ce qui traduit par une déformation faible et par conséquent une structure stable. Par contre elle diminue et devient négligeable si la longueur augmente, et par conséquent une structure stable. Aussi on peut conclure que l'amplitude augmente avec l'augmentation de la raideur ( $k_w$ ).

La valeur du module de Young dépend de la chiralité du matériau, elle reflète la rigidité et la résistance de ce dernier, pour cela les nanotubes de carbone de type zigzag qui ont des grands diamètres sont plus rigide que les autres.

---

## CONCLUSION GENERALE

Nous avons déterminé dans le cadre de ce travail, les différents paramètres qui pouvant influencer la distribution de la vibration libre d'un nanotube de carbone monocouche par l'utilisation du modèle élastique non locale de la poutre Euler-Bernoulli et on introduisant l'approche de winkler.

Ce modèle permet de déterminer la distribution des rapports d'amplitude ( $f$ ) et de la fréquence ( $r$ ) d'un nanotube de carbone de type zigzag entouré par un milieu élastique, on prenant en considération les paramètres suivant : effet d'échelle ( $e_0a$ ), le nombre de mode ( $N$ ), le rapport dimensionnel ( $L/d$ ), le nombre de chiralité et le coefficient élastique ( $K_{win}$ ).

Les résultats ont montré la dépendance des fréquences de vibration sur les différents paramètres, telle que l'effet d'échelle ( $e_0a$ ), le nombre de mode ( $N$ ), le rapport dimensionnel ( $L/d$ ), le nombre de chiralité ( $n$ ) et la raideur du matériau  $k_w$ .

la variation de l'amplitude ( $f$ ) en fonction de la fréquence ( $r$ ) est toujours importante pour toute  $r < 5$  malgré en variant l'effet d'échelle ( $e_0a$ ), le nombre de mode ( $N$ ), le rapport dimensionnel ( $L/d$ ), et au delà de 5, la variation est faible et commence à stabiliser avec une amplitude proche de l'unité. On conclut aussi que le nombre de mode a le plus d'effet sur l'amplitude correspondante au milieu élastique.

la fréquence dépend de l'élasticité du milieu traduite par la raideur ou la rigidité du matériau, elle augmente si la rigidité augmente et si le nombre de modes augmente de 1 à 3. Au-delà de  $N=3$ , la rigidité n'a pas d'influence. Ce qui traduit par une déformation faible et par conséquent une structure stable. Par contre elle diminue et devient négligeable si la longueur augmente, et par conséquent une structure stable. Aussi on peut conclure que l'amplitude augmente avec l'augmentation de la raideur ( $k_w$ ).

La valeur du module de Young dépend de la chiralité du matériau, elle reflète la rigidité et la résistance de ce dernier, pour cela les nanotubes de carbone de type zigzag qui ont des grands diamètres sont plus rigide que les autres.

En perspective, il est évident et nécessaire d'élargir cette étude par l'utilisation de d'autres matrices telles que la céramique, le métal ou des résines...etc.

## Bibliographie

- [1]: Iijima S, nature 35456(1991).
- [2]: B.Hanane, S. Nouria, Analyse de la vibration forcée d'un nanotube de carbone monocouche, Mémoire de fin d'études, Université Ibn Khaldoun De Tiaret 2016.
- [3]: <http://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-carbone-3873/>.
- [4]: <https://www.mern.gouv.qc.ca/mines/industrie/mineraux/mineraux-proprietes-graphite.jsp/>.
- [5]: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Graphite>
- [6]: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Graphite/>.
- [7]: <http://www.diamants-infos.com/taille/caracteristique.html/>.
- [8]: <http://philippe.boeuf.pagesperso-orange.fr/robert/physique/diams.htm>
- [9]: <http://diamantgraphite.wixsite.com/tpecristaux/structure>
- [10]: <http://asserttrue.blogspot.com/2013/03/olive-oil-fullerene-and-lifespan.html>
- [11]: M. Moreno, Synthèse en phase gazeuse de nanoparticules de carbone par plasma hors équilibre Thèse de doctorat de M Moreno, École des mines de Paris, 2006.
- [12]: <https://fr.slideshare.net/prmarcoux/pierre-r-marcoux-thse-de-doctorat-juin-2002>
- [13]: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Nanotube\\_de\\_carbone](https://fr.wikipedia.org/wiki/Nanotube_de_carbone).
- [14]: <https://sites.google.com/site/nanotechnologieauduhou/nanotubes>.
- [15]: Ichihashi T., « Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter », Nature, 363,603; 1993
- [16]: S.H. Jung, M.R. Kim, S.H. Jeong, S.U. Kim, O.J. Lee, K.H. Lee, J.H. Suh, C.K. Park, Highyield synthesis of multi-walled carbon nanotubes by arc discharge in liquid nitrogen, Applied Physics A: Materials Science & Processing, Vol.76,No.2, pp.285-286, (2003).
- [17]: Pierre Marcoux, Réactivité et manipulation de nanotubes de carbone monocouches fonctionnalisation de surface par greffage covalent et mise en oeuvre comme agent structurant, Ecole doctorale d'angers, 25 juin 2002.
- [18]: T.W. Ebbesen, P.M. Ajayan, Large scale synthesis of carbon nanotubes, Nature 358, pp. 220-222, (1992).
- [19]: P. Sébastien, étude de potentialité des nanotubes de carbone dans le domaine hyperfréquence: Application à l'élaboration de matériaux nano-composites et contribution à la miniaturisation de composants électromécaniques (NEMS), l'Université toulouse III, thèse de doctorat, (2008).
- [20]: N. Izard, nanotubes de carbone : Systèmes pour la limitation optique, thèse de doctorat, l'Université Montpellier II, (2004).
- [21]: <http://www.maxicours.com/se/fiche/6/9/417969.html>
- [22]: H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'brien, R. F. Curl, R. E. Smalley, Nature, 318 162 (1985).
- [23]: <https://perso.esiee.fr/~subramak/TPE/PRODUCTION.html>.
- [24]: M. Castignolles, Etudes de la synthèse et de la structure par microscopie et spectroscopie électroniques de nanotubes de carbone purs et dopés à l'azote, Thèse de doctorat, Université Montpellier II, (2004).
- [25]: M.Endo et al. Carbon, 33 :873, (1995).
- [26]: A. Gohier, Cinétique de Croissance de Nanotube de Carbone Mono-Parois et Multi-Parois Orientés par Procédé Plasma, Thèse de Doctorat, l'Université de Nantes (Sciences des

## Bibliographie

- Matériaux), 2007. [Goj 2004] F. H. Gojny, M. H. G. Wichmann, U. Köpke, B. Fiedler and K. Schulte, *Composites Science and Technology*, vol. 64, Issue 15, pp.2363-2371, 2004.
- [27]: A. Thess, R. Lee, P. Nikolaev, H. Dai, P. Petit, J. Robert, C. Xu, Y. Hee Lee, S. Gon Kim, A. G. Rinzler, D. T. Colbert, G. E. Scuseria, D. Tománek, J. E. Fischer, R. E. Smalley, *Crystalline ropes of metallic carbon nanotubes*, *Science*, 273, 483-487 (1996).
- [28]: C. Bernard, *Propriétés mécaniques des nanotubes de carbone en tant que nanosondes et leur fonctionnalisation par bio-nanoparticules*, thèse de doctorat, l'Université Bordeaux I, (2007).
- [29]: <http://perso.fundp.ac.be/~jfcolume/these2.html>.
- [30]: K. H. NITTA, M. Takayanagi, *Role of Tie molecules in the Yielding Deformation of Isotactic Polypropylene*. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 1999, Vol. 37, 357-368
- [31]: « Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites : a review », *Composites Science And Technology*, 2001.
- [32]: « Mechanical and Thermal Properties of Carbon Nanotubes », *Carbon*, 1995.
- [33]: « Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load », *Science*, 2000 .
- [34]: Grujicic, M., G. Cao, and W.N. Roy, « Computational analysis of the lattice contribution to thermal conductivity of single-walled carbon nanotubes », *Journal of Materials Science*, 2005.
- [35]: Berber, S., Y.-K. Kwon, and D. Tománek, « Unusually High Thermal Conductivity of Carbon Nanotubes », *Physical Letter Reviews*, 2000.
- [36]: « Measuring the thermal conductivity of individual carbon nanotubes by the Raman shift method », *Nanotechnology*, 2009.
- [37]: « Thermal Conductance of an Individual Single-Wall Carbon Nanotube above Room Temperature », *Nano Letters*, 2006.
- [38]: « Thermal and electrical transport in multi-walled carbon nanotubes », *Physics Letters A*, 2004.
- [39]: « Sorting carbon nanotubes by electronic structure using density differentiation », *Nature Nanotechnology*, 2006.
- [40]: « Electronic, Thermal and Mechanical Properties of Carbon Nanotubes », *Philosophical Transactions : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2004.
- [41]: « Electrical transport properties of individual disordered multiwalled carbon nanotubes », *Applied Physics Letters*, 2006.
- [42]: « Electrical conductivity of individual carbon nanotubes », *Nature*, 1996.
- [43] : Article sur le site du département de Physique de l'École normale supérieure.
- [44] : (en) A. Hirsch, « Functionalization of Single-Walled Carbon Nanotubes », *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 41, 2002, p. 1853-1859.
- [45]: (fr) Motorola met des nanotubes dans ses écrans.
- [46] : z .mohamed, *Etude du comportement mécanique des nanotubes en carbone entourés par une matrice polymère*, THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE DJILALI LIABES DE SIDI BEL ABBES 2012.

## Bibliographie

- [47] : [https://www.archgate.net/figure/275349765\\_fig12\\_Figure-12-Coupe-transversale-image-MET-d%27oignons-de-carbone-observe-dans-un-Image-\(MET\)](https://www.archgate.net/figure/275349765_fig12_Figure-12-Coupe-transversale-image-MET-d%27oignons-de-carbone-observe-dans-un-Image-(MET)).
- [48] : S. Bandow, A. M. Rao, K. A. Williams, A. Thess, R. E. Smalley, P. C. Eklund, Purification of single-wall carbon nanotubes by microfiltration, *J. Phys. Chem. B*, (1997), 101, 8839-8842.
- [49] : L. Vaccarini, C. Goze, R. Aznar, V. Micholet, C. Journet, P. Bernier, Purification procedures of carbon nanotubes, *Synth. Met.*, (1999), 103, 2492-2493.
- [50] : J. L. Zimmerman, R. K. Bradley, C. B. Huffman, R. H. Hauge, J. L. Margrave, Gasphase purification of single-wall carbon nanotubes, *Chem. Mater.*, (2000), 12, 1361-1366.
- [51] : E. Mizoguti, F. Nihey, M. Yudasaka, S. Iijima, T. Ichihashi, K. Nakamura, Purification of single-wall carbon nanotubes by using ultrafine gold particles, *Chem. Phys. Lett.*, (2000), 321, 297-301.
- [52] : A. G. Rinzler, J. Liu, H. Dai, P. Nikolaev, C. B. Huffman, F. J. Rodríguez-Macías, P. J. Boul, A. H. Lu, D. Heymann, D. T. Colbert, R. S. Lee, J. E. Fischer, A. M. Rao, P. C. Eklund, R. E. Smalley, Large-scale purification of single-wall carbon nanotubes : process, product and characterization, *App. Phys. A*, 67, 29-37 (1998).
- [53] : K. B. Shelimov, R. O. Esenaliev, A. R. Rinzler, C. B. Huffman, R. E. Smalley, Purification of single-wall carbon nanotubes by ultrasonically assisted filtration, *Chem. Phys. Lett.*, (1998), 282, 429-434.
- [54] : G. S. Duesberg, W. Blau, H. J. Byrne, J. Muster, M. Burghard, S. Roth, Chromatography of carbon nanotubes, *Synth. Met.*, (1999), 103, 2484-2485.
- [55] : G. S. Duesberg, J. Muster, V. Krstic, M. Burghard, S. Roth, Chromatographic size separation of single-wall carbon nanotubes, *Applied Physics A : Materials Science & Processing*, (1998), A, 67, 117-119.
- [56] : J.M. Bonard, T. Stora, J.P. Salvetat, C. Maier, T. Stöckli, C. Duschl, L. Corro, W.A. Heer, Châtelain, *Advanced Materials*, 9 827 (1997).
- [57] : C. Leroux, K. Metenier, S. Gautier, E. Crackowiak, S. Bonnamy, C. Béguin, *J. Power Sources*, 81-82 317 (1999).
- [58] : A. Hamwi, H. Alvergnat, S. Bonnamy, C. Béguin, *Carbon*, 35 723 (1997).
- [59] : A.C. Dillon, K.M. Jones, T.A. Bekkedahl, C.H. Kiang, D.S. Bethune, M.J. Heben, *Nature* 386 377 (1997).
- [60] : I.W. Chiang, B.E. Brinson, R.E. Smalley, J.L. Margrave, R.H. Hauge, *J. Phys. Chem. B*, 105 1157 (2001).
- [61] : S.C. Tsang, Y.K. Chen, P.J.C. Harris, M.L.H. Green, *Nature*, 372 159 (1994).
- [62] : J. Sloan, J. Hammer, M. Zweifka-Sibley, M.L.H. Green, *Chem. Commun*, 347 (1998).
- [63] : K.C. Hwang, *J. Chem. Soc. Chem. Commun*, 173 (1995).
- [64] : H. Ago, T. Kugler, C. Cacialli, W.R. Salaneck, M.S.P. Shaffer, A.H. Windle, R.H. Friend, *J. Phys. Chem. B*, 103 8116 (1999).
- [65] : P.M. Ajayan, T.W. Ebbesen, T. Ichihashi, S. Iijima, K. Tanigaki, H. Hiura, *Nature*, 362 522 (1993).
- [66] : D. Ugarte, T. Stöckli, J.M. Bonard, A. Châtelain, W.A. Heer, *Appl. Phys. A*, 67 101 (1998).

## Bibliographie

- [67] : Z. Yao, H. W. C. Postma, L. Balents, C. Dekker, *Nature* 402, 273 (1999).
- [68] : Rabhi Nabil, Comportement au choc des stratifiés composite renforcé par des fibres naturelles, mémoire Master 2013.
- [69] : Steven S., Guy V.A. Bruno.V.M (Reaction Kinetics as Measured by Modulated Temperature DSC.I.Linear Step-Growth Polymerization of DGEBA+Aniline) *Journal of Applied Polymer Science* vol 91.2004.
- [70]: Tripathi G., Srivastava D., « Effect of Carboxyl-Terminated Poly (Butadiene-co-Acrylonitrile) (CTBN) Concentration on Thermal and Mechanical Properties of Binary Blends of Diglycidyl Ether of Bisphenol-A (DGEBA) Epoxy Resin », *Materials Science & Engineering A*, vol. 443, (2007), pp. 262-269.
- [71] : Laarej merad, Etude par spectroscopie raman et Modélisation d'une résine composite RTM, DOCTORAT, Université de Tlemcen, 31/01/2010.
- [72] : Michel Fontanille-Yves Gnanou, *Chimie et Physico-chimie des polymères*, 3ème édition (2002, 2005, 2010, 2013).
- [73] : L'industrie française des matériaux composites, Etude stratégique réalisé par NODAL, consultants Rapport final 17,12,2001.
- [74] : X. Ma, J.W. Butterworth, G.C. Clifton, Static analysis of an infinite beam resting on a tensionless Pasternak foundation. *European Journal of Mechanics A/Solids* 28 (2009), 697-703.
- [75] : Ait Atmane Hassen, Vibration des structures composites en tenant compte de l'effet du cisaillement, UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES, 07 février 2011.
- [76] : F. H. Gojny, M. H. G. Wichmann, U. Köpke, B. Fiedler and K. Schulte, *Composites Science and Technology*, vol. 64, Issue 15, pp.2363-2371, 2004.
- [77] : K.C. Hwang, *J. Chem. Soc. Chem. Commun*, 173 (1995).
- [78] : J.Xiong, Z. Zheng, X. Qin, M. Li, H. Li, X. Wang, *Carbon* 2006, 44 (13), 2701-2707. 032
- [79] : M. Bozlar, Modification de surface des nanotubes de carbone par un polymère conducteur électrogénéré pour la réalisation de nanocomposites multifonctionnels, École Normale Supérieure de Cachan - Paris, 2009.
- [80]: K.L. Lu, R. M. Lago, Y. K. Chen, M. L. H. Green, P. J. F. Harris, S. C. Tsang, *Carbon*, vol. 34, pp. 814-816, 1996.
- [81] : B.P.Grady, F.Pompeo, R.L.Shambaugh, D.E.Resasco, *Journal of physical chemistry B*, 2002, 106, 5852-5858.
- [82] : Y.H. Liao, O. Marietta-Tondin, Z. Liang, C. Zhang, B. Wang, *Materials Science and Engineering A*, vol.385, pp.175–181, 2004.
- [83] : F. H. Gojny, M. H. G. Wichmann, U. Köpke, B. Fiedler and K. Schulte, *Composites Science and Technology*, vol. 64, Issue 15, pp.2363-2371, 2004.
- [84]: J.S. Strutt (Lord Rayleigh). *Theory of sound*. Dover publications, 1945.
- [85]: S. Timoshenko. *Théorie des vibrations*. Librairie polytechnique Ch. Béranger, 1939.
- [86]: W.Yongdong, Z. Xiaochun, University of Hong Kong, *Thin-Walled Structures* 44 (2006) 667–676.

## Bibliographie

- [87]: Y. Wu, X. Zhang, A.Y.T. Leung, W. Zhong, An energy-equivalent model on studying the mechanical properties of single-walled carbon nanotubes, *Thin-Walled Structures* 44 (2006) 667–676.
- [88]: Eringen A C, *J Appl Phys*, 54 (1983) 4703.
- [89]: Q. Zhang, S. Rastogi, D. Chen, D. Lippits, P.J. Lemstra, *Carbon*, 2006, 44, 778-785.
- [90]: H. Heireche, A. Tounsi, A. Benzair, M. Maachou, E.A. Adda Bedia, Sound wave propagation in single-walled carbon nanotubes using nonlocal elasticity, *Physica E* 40 (2008) 2791–2799.
- [91]: J.F. Doyle, *Wave Propagation in Structures*, 2nd ed. (Springer, New York, 1997).
- [92]: Peddieson J, Buchanan G. G, McNitt R. P. *Int J Engng Sci* 41 (2003), 305.
- [93]: D. Zhou, A General solution to vibrations of beams on variable Winkler elastic foundation. *Computers & Structures* 47 (1993), 83-90.
- [96]: M. Eisenberger, Vibration frequencies for beams on variable one- and two-parameter elastic foundations. *Journal of Sound and Vibrations* 176(5) (1994), 577-584.
- [94]: M. Eisenberger, J. Clastornik, Vibrations and buckling of a beam on a variable Winkler elastic foundation. *Journal of Sound and Vibration* 115 (1987), 233-241.
- [95]: H.P. Lee, Dynamic response of a Timoshenko beam on a Winkler foundation subjected to a moving mass. *Applied Acoustics* 55 (1998), 203-215.
- [96]: X. Ma, J.W. Butterworth, G.C. Clifton, Static analysis of an infinite beam resting on a tensionless Pasternak foundation. *European Journal of Mechanics A/Solids* 28 (2009), 697-703.
- [97]: O. Civalek, Nonlinear analysis of thin rectangular plates on Winkler-Pasternak elastic foundations by DSC-HDQ methods. *Applied Mathematical Modeling* 31 (2007), 606-624.
- [98]: J.F. Doyle, *Wave Propagation in Structures*, 2nd ed. (Springer, New York, 1997).