



**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 : 2 Master VOA.

Présenté par :

- ❖ GADER ABDEL AZIZE
- ❖ CHAIB BESSOU MOHAMED

Sujet du mémoire

**ETUDE DE LA VIBRATION D'UNE NANO- POUTRE
DE NTC INCORPOEE DANS UN MILIEU
ELASTIQUE DE TYPE VLASSOV**

Soutenu publiquement ledevant le jury composé de :

Mr, M.khiloun

Mr,S.Belmahi

Mr,A.Chikh

Mr,K.Ouazir

Président

Rapporteur

Examineur

Examineur

PROMOTION : 2019/2020

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Mr Belmahisamir.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions .

Enfin nous remercions toutes personnes ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

*A mes très chères parents qui m'ont soutenue moralement et
Financièrement et de tendresse qu'Allah me les garde durant toute
ma vie.*

A mes très chères frères en particulier A tous mes amies .

A toute La famille gader et La famille chaib bessou

*Toutes les autres qui je n'ai pas cité nommément et qui se
reconnaître dans ma dédicace.*

A tous ma promotion de génie civil 2019/2020

Résumé

Dans ce travail, nous nous étudions le comportement d'une nanopoutre de carbone monoparois supposée soumise à une vibration forcée. Le modèle de poutre considéré est celui d'Euler- Bernoulli et le milieu élastique est celui de Vlassov. Des amplitudes entre le cas non local et local ont été calculées en fonction de plusieurs paramètres liés au nanotube de carbone tel que : le rapport de fréquence (r), le paramètre d'échelle (e_0a), le nombre de mode (N), le rapport d'aspect ou géométrique (L/d) et d'autres paramètres liés à la matrice polymère tel que la rigidité (k_s) Vlassov. Les résultats ont montré une dépendance entre les paramètres ci-dessus et le rapport des amplitudes de la vibration, ainsi, l'effet du milieu élastique est important pour des petits rapports de fréquence ($r < 4$ à 5), pour des nanotubes de carbone les plus courts ($L/d < 10$) et pour les modes les plus élevés. À partir de la fréquence ($3 < r$) le calcul de modèle de Vlassov peut être effectué avec le calcul simplifié de Winkler.

Mots clés : Euler Bernoulli, Vibration, Nanopoutre , Nanotube de carbone, Fréquence, Vlassov.

Abstract

In this work, we studied the behavior of a single-walled carbon nanobeam supposedly subjected to forced vibration. The beam model considered is that of Euler-Bernoulli and the elastic medium is that of Vlassov. Amplitudes between the non-local and local case were calculated as a function of several parameters related to the carbon nanotube such as: the frequency ratio (r), the scale parameter (e_0a), the number of modes (N), the aspect or geometric ratio (L / d) and other parameters related to the polymer matrix such as stiffness (k_s) Vlassov. The results showed a dependence between the above parameters and the ratio of the amplitudes of the vibration, thus, the effect of the elastic medium is important for small frequency ratios ($r < 4$ to 5), for carbon nanotubes the shortest ($L / d < 10$) and for the highest modes. from the frequency ($3 < r$) the calculation of the Vlassov model can be carried out with the simplified Winkler calculation.

Keywords: Euler Bernoulli, Vibration, Nano Beam, Carbon nanotube, Frequency, Vlassov.

ملخص

في هذا العمل ، درسنا سلوك نظرية الرافدة أوالعارضة النانوية الكربونية أحادية الجدار التي يُفترض أنها تعرضت للاهتزاز القسري. نموذج الحزمة الرافدة الذي تم النظر فيه هو نموذج أويلر برنولي Euler-Bernoulli والوسيط المرن هو نموذج فلاسوف Vlassov. تم حساب السعات بين الحالة غير المحلية والحالة المحلية كدالة للعديد من الخصائص المتعلقة بأنبوب الكربون النانوي مثل: نسبة التردد (r) ، حاصل المقياس ($e0a$) ، رقم وضع الاهتزاز (N) ، النسبة الهندسية (L / d) والمعلومات الأخرى المتعلقة بمصفوفة البوليمر مثل الصلابة ks Vlassov. أظهرت النتائج وجود علاقة بين الخصائص أعلاه ونسبة اتساع الاهتزاز ، وبالتالي فإن تأثير الوسط المرن مهم لنسب التردد الصغيرة ($r < 4$ إلى 5) ، لأنابيب الكربون النانوية الأقصر ($L / d < 10$) وللأوضاع الأعلى. من التردد ($r > 3$) ، يمكن إجراء حساب نموذج Vlassov باستخدام حساب Winkler المبسط

الكلمات الرئيسية: أويلر برنولي ، الاهتزاز ، شعاع النانو ، الأنابيب النانوية الكربونية ، التردد ، فلاسوف

Sommaire

Résumé	
Liste de figures.....	VII
Liste des tableaux.....	IX
Liste des abréviations.....	X
Liste de notations.....	XI
Introduction général.....	1

CHAPITRE I : Généralité sur les nanotubes de carbone

I.1 Introduction.....	2
I.2 le carbone.....	2
I.2.1 Les formes traditionnelles du carbone.....	3
I.2.1.1 Le graphite.....	3
I.2.1.2 Le diamant.....	4
I.2.2 Les nouvelles formes du carbone.....	5
I.2.2.1 Fullerènes.....	5
I.2.2.2 Les nanotubes mono feuillets (ou mono parois).....	6
I.2.2.3 Les nanotubes multi feuillets.....	9
I.3 Synthèses des nanotubes.....	10
I.3.1 Méthode de Arc électrique.....	10
I.3.2 Méthode d'ablation laser.....	11
I.3.3 L CVD ou CCVD (« catalytique » chemical vapor déposition »).....	13
I.3.4 Décomposition catalytique (HiPCO).....	14
I.4 Propriétés des nanotubes de carbone.....	15

I.4.1 Propriétés mécaniques.....	15
I.4.2 Propriétés thermiques.....	15
I.4.2 Propriétés thermiques.....	16
I.4.3 Propriétés électriques.....	17
I.5 Défaut des nanotubes de carbone.....	17
I.5.1 Défauts structurels.....	21
I.6 Purifications des nanotubes.....	22
I.6.1 Les méthodes chimiques.....	22
I.6.2 Les méthodes physiques.....	24
I.6.3 ouverture des nanotubes.....	25
I.7 Applications des nanotubes de carbone	25
I.7.1 Applications mécaniques	25
I.7.2 Applications électroniques	25
I.7.3 Applications thermiques.....	26
I.7.4 Applications optiques.....	27
I.8. Les polymères	27.
I.8.1 classification des polymères.....	27
I.8.1.1 Les polymères thermoplastiques.....	28
I.8.1.2. les polymères thermodurcissables.....	30
I.8.1.3 Elastomères.....	31
I.8.2 Utilisation des polymères.....	31
I.9 Conclusion.....	32

CHAPITRE II : Théories des poutres et modèles de supports élastiques

II.1 Introduction.....	33
II.2 Théories des poutres.....	33

II.2.1 Théorie d'Euler Bernoulli ou bien théorie classique des poutres.....	33
II.2.2 Théorie de Timoshenko.....	35
II.2.3 Théorie d'ordre élevée.....	37
II.3 Modélisation du système solide – milieu élastique.....	39
II.3.1 Fondation Winkler.....	39
II.3.2 Fondation Vlassov.....	41
II.4 Conclusion.....	42

Chapitre III : Étude de la vibration d'une nano-poutre de NTC incorporée dans un milieu élastique de type Vlassov

III.1 Introduction.....	45
III.2 Modélisation du système nanopoutre-milieu élastique.....	45
III.2.1 Modèle à deux paramètres.....	45
III.3 Conclusion.....	50

CHAPITRE VI : Discussions des Résultats

IV.1 Introduction.....	52
IV.2 Résultats et discussions.....	52
IV.2.1 Données de calcul.....	52
IV.2.2 Effets du milieu élastique Vlassov.....	53
IV.2.3 Comparaison entre les trois milieux élastiques Vlassov, Pasternak et Winkler.....	55
IV.2.4 Effet du rapport d'aspect.....	57
IV.2.5 Effet de nombre de mode.....	58
IV.2.6 Effet du coefficient de cisaillement.....	62
IV.3 Conclusion.....	62

Conclusion Générale

Bibliographie

LISTE DES ABREVIATIONS

AFM : Microscopie à force atomique.

CCVD :Catalytic Chemical Vapor Deposition.

CVD : Chemical Vapor Deposition. **CLBT** : théorie des poutres classique. **FSDBT** : théorie de premier ordre.

Hi PCo : (High pressure dismutation of CO) décomposition a haute pression de CO.

MET : Microscopie Electronique de Transmission.

MWCNT : Muti- Wall carbon nanotube.

NTC : Nanotube de Carbone.

PC : le Polycarbonate

PCV : le Polychlorure de Vinyle.

PE : le polyéthylène

PET : les polyesters et le polyéthylène terephthalate.

PMMA : poly (méthyle méth acrylate). **POM** : les poly acétals ou polyoxyméthylène. **PP** : le polypropylène.

PS : le polystyrène.

SWNT :(single-Wall carbon nanotube) nanotube de carbone mono feuillet

TD : matrices thermodurcissables.

TP : matrices thermoplastiques.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 propriétés physiques et mécaniques des matrices thermoplastiques(TP). [Ait Atman 2011].	30
Tableau I.2 les propriétés des matrices thermodurcissables(TD) [Ait Atmane, 2011].	31
Tableau IV.1 Variation du rapport de l'amplitude (W_{NL}/W_L) avec le rapport de fréquence (r) de nanotube de carbone situé dans différents types de matrice en polymère.	53
Tableau IV.2 Variation du rapport de l'amplitude (W_{NL}/W_L) avec le rapport de fréquence (r) de nanotube de carbone : comparaison Vlassov, Pasternak et Winkler.	55
Tableau IV.3. Variation du rapport d'amplitude (W_{NL}/W_L) avec le rapport de fréquence (r) et pour différentes géométries (rapport L/d), matrice polymère de type Polyéthylène.	57
Tableau IV.4. Variation du rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L) avec le rapport de fréquence (r) pour différentes modes (N), matrice polymère de type Polyéthylène.	59
.Tableau IV.5. Variation du rapport d'amplitude (W_{NL}/W_L) avec le rapport de fréquence (r) pour différents coefficient Vlassov (k_s), matrice polymère de type Polyéthylène.	61

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : structure de graphite hexagonal	4
Figure I.2 : structure de diamant	5
Figure I.3 : fullerène C60	6
Figure I.4 : nanotube de carbone (SWNT)	6
Figure I.5 : Structure d'un plan de graphène en deux dimensions.....	7
Figure I.6 : les différents types de nanotubes mano parois (a) chaise,(b) zigzag,(c)chiral...7	
Figure I.7 : Représentation graphite d'un SWNT et a droite : image de icroscope électronique a transmission de plusieurs SWNT.....	8
Figure I.8 : (MET) de fagots de nanotubes SWNTs en coupe transversale (à gauche) et en vue longitudinale (à droite) : Le diamètre de chaque nanotube est ici d'environ 1nm	8
Figure I.9 : à gauche : représentation graphique d'un MWNT et à droite : image de microscope électronique a transmission de plusieurs MWNT	9
Figure I.10 : Structure possibles des MWNT. Gauche : type poupée ruse. Droite : type rouleau de parchemin	10
Figure I.11 : Production de nanotubes de carbone par la méthode de l'Arc électrique.....	11
Figure I.12 : Schéma de l'appareillage d'ablation laser.....	12
Figure I.13 : schéma d'un réacteur CVD pour la croissance des (NTC)... ..	13
Figure I.14 : a gauche schéma de la production de nanotubes par méthode (Hip Co) a droite image de nanotubes (Hip Co).....	14
Figure I.15 : propriétés électroniques des nanotubes de carbones monocouches en fonction de leurs indices de chiralité (n,m)... ..	16
Figure I.16 : En arrêtant la contrainte sur chaque application de courant.....	18
Figure I.17 : Influence du type de cycle sur la courbure de la surface.....	19
Figure I.18 : Image MET des extrémités de deux nanotubes multicouches. On a indiqué quelques-uns des cycles non hexagonaux : (P) indique un pentagone et (H) un heptagone. (Image : Annick L'oiseau, Jean Michel Benoît).....	19
Figure I.19 : Introduction d'une paire pentagone-heptagone provoquant une variation de diamètre et de chiralité : a- de (11,0) à (12,0) ; b- de (9,0) à (12,0).....	20
Figure I.20 : Défauts pentagonaux et heptagonaux se traduisant par des jonctions.....	20

Figure I.21 : image (MET) d'un échantillon d'un nanotube collerette brut produite par arc électrique on peut distinguer en plus (SWNTs) des particules de catalyseur et deux formes de carbone amorphe.....	21
Figure I.22 : Essai de traction sur un nanotube individuel à l'aide d'un AFM. D'après Yu et al.....	25
Figure I.23 schéma de la structure semi-cristalline d'un polymère.....	29
Figure II.1 Définition des termes : poutre de courbe moyenne GOGÉ, de section droite S, et fibre neutre de section ds... ..	33
Figure II.2 Cinématique d'Euler Bernoulli (Dufort, 2000)	34
Figure II.3 Cinématique de Timoshenko (Timoshenko et al, 1972).....	36
Figure II.4 Variation de la fonction de gauchissement $f(z) = z$ et $f'(z)$ en fonction de l'épaisseur.....	37
Figure II.5 Cinématique de la Théorie d'Ordre Elevé	38
Figure II.6 Modèle de Winkler (d'après Selvadurai, 1979) [16].....	40
Figure II.7 Poutre reposant sur une fondation de Vlasov [Iancu, 2009a].	41
Figure III.1 Poutre reposant sur une fondation de Vlassov [Iancu, 2009a].....	46
Figure IV.1 : Une poutre repose sur une fondation élastique de type Vlassov.....	52
Figure IV.2 variation du rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L) en fonction de la fréquence (ω).....	54
Figure IV.3. Comparaison des résultats :milieu élastique Vlassov, Pasternak et Winkler...56	
Figure IV.4 Variation du rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L) en fonction de la fréquence (ω) pour différentes valeurs de rapport dimensionnel L/d	58
Figure IV.5 Variation du rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L) en fonction de la fréquence (ω) pour différentes modes (N)	60
Figure IV.6 Variation du rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L) en fonction des coefficients Vlassov (k_s).....	62

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les matériaux composites et comme leurs noms l'indiquent regroupent l'ensemble des techniques visant à produire, à manipuler et à utiliser des objets et matériaux à l'échelle du nanomètre.

Les nanotubes de carbone et depuis leurs découverts en 1991 par S.Iijima et grâce à leurs propriétés remarquables sont devenus parmi les matériaux utilisés actuellement comme une charge ou un renfort pour fabriquer ces nouveaux types de matériaux composites.

Le travail que nous avons élaboré dans ce mémoire étudie la vibration forcée d'un nanotube de carbone monocouche (SWCNT) qu'on a supposé incorporé dans milieu élastique de type Vlassov. Il est composé de quatre chapitres comme suit:

Chapitre 1, Les nanotubes de carbone et les composites : dans ce premier chapitre nous avons parlé d'une façon détaillée de la fabrication des nanotubes de carbones et leurs propriétés, ainsi la définition d'un matériau composites et le rôle de chaque matériaux qui le compose.

Chapitre 2, Théorie des poutres et modèles des milieux élastiques : Nous avons parlé de différents théorie de poutre (Euler- Bernoulli, Timoshenko et ordre élevés), nous avons parlé aussi de différents modèles de milieu élastique tel que Winkler, Pasternak et Vlassov).

Chapitre 03, Étude de la vibration d'une nano-poutre de NTC incorporée dans un milieu élastique de type Vlassov : Un calcul et un modèle numérique ont été développés sur la base de la théorie d'élasticité non locale et les principes de la résistance des matériaux.

Chapitre 04, résultats et interprétation : plusieurs résultats ont été traités sur la vibration en fonction de type de milieu élastique Vlassov et les paramètres géométriques de nanotube de carbone.

Ce travail se termine par une conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE I

GENERALITE SUR LES NANOTUBES DE CARBONE

I.1 Introduction

Les nanotubes de carbone (NTCs) constituent l'une des classes de nanomatériaux les plus intensivement étudiées en raison de leur utilisation potentielle dans un certain nombre d'applications. Les nanotubes de carbone ont 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. Ce dernier peut être fermé ou non à ses extrémités par une demisphère. On distingue les nanotubes de carbone simple-feuillet et multi-feuillets. La conductivité électrique, la conductivité thermique et la résistance mécanique des nanotubes de carbone sont remarquablement élevées dans leur sens longitudinal. Ils font partie des produits issus des nanotechnologies actuellement utilisés et commercialisés dans différents domaines. Les nanotubes de carbone sont cent mille (100000) fois plus fin qu'un cheveu, cent (100) fois plus résistant et six (6) fois plus léger que l'acier en plus de leurs flexibilités qui permettent à ce matériau d'être utilisé dans divers applications notamment dans la conception de nouveaux matériaux. Dans ce premier chapitre nous allons présenter les nanotubes de carbone (formes, géométrie et caractéristiques) après avoir présenter et décrire les formes traditionnelles du carbone tel que le graphite et le diamant. Par la suite nous allons présenter les procédés de synthèses les plus répandus ainsi que leur application .

I.2 Le carbone

Le carbone est l'élément chimique de numéro atomique 6, de symbole C. Il possède trois isotopes naturels ^{12}C , ^{13}C et ^{14}C ; les deux premiers sont stables tandis que le troisième est radioactif de demi-vie 5730 années [Aoumeur, 2013].

Le carbone est la tête de file du groupe des cristallogènes. Le corps simple carbone présente plusieurs formes allotropiques dont principalement le graphite et le diamant. L'élément carbone forme divers composés inorganiques comme le dioxyde de carbone (CO_2), et une grande variété de composés organiques et de polymères. C'est l'élément de base de toutes les formes de vie connues. Le carbone est le 4e élément le plus abondant dans l'univers et le 15e le plus abondant dans la croûte terrestre. Il est présent sur Terre à l'état de corps simple (charbon et diamants), de composés inorganiques (CO_2 et CH_4) et de composés organiques (biomasse, pétrole et gaz naturel). De nombreuses structures basées sur le carbone ont également été synthétisées : charbon actif, noir de carbone, fibres, nanotubes, fullerènes et graphène. La combustion du carbone sous toutes ses formes a été le fondement du développement technologique dès la préhistoire. Les matériaux à base de carbone ont des

applications dans de nombreux autres domaines : matériaux composites, batteries lithium-ion, dépollution de l'air et de l'eau, électrodes pour les fours à arc ou la synthèse de l'aluminium, etc.

I.2.1 les formes traditionnelles du carbone : Les formes de carbone les plus connus sont le graphite et le diamant et le fullerène

I.2.1.1 le graphite :

Le graphite est un minéral noir friable utilisé depuis des siècles pour l'écriture (encre de Chine, crayon à mine). La structure du graphite est constituée d'un empilement de plans, chacun étant constitué d'un pavage régulier d'hexagones en nid d'abeilles. Chaque atome de carbone est relié dans le plan des hexagones à trois atomes voisins par des liaisons faisant entre elles des angles de (120°). Ces liaisons planes sont fortes et caractérisées par une distance entre atomes de (0,142 nm). Les atomes sont au contraire faiblement reliés aux atomes des plans voisins comme sur la (Figure I-1), et la distance entre plans d'hexagones est de (0,335 nm). Cette structure a une densité d'un tiers plus faible que celle du diamant et définit le graphite comme un solide très anisotrope, quasi-bidimensionnel car les plans faiblement reliés glissent facilement les uns par rapport aux autres. Le graphite possède des propriétés thermiques et électriques très anisotropes. Les liaisons covalentes entre les atomes de carbone dans le graphène confèrent une grande vitesse de propagation aux phonons dans la direction parallèle du plan, il possède ainsi que une conductivité thermique d'environ 400 W m^{-1} .

K^{-1} cette dernière chute à $5 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ dans la direction perpendiculaire [Bonnissel, 2001]. Quant à sa conductivité électrique, elle est assurée par la délocalisation des électrons sur l'ensemble du plan et atteint $1,7 \times 10^5 \text{ S m}^{-1}$ dans la direction du plan et chute pareillement dans la direction perpendiculaire à $7 \times 10^4 \text{ S m}^{-1}$ [Buerschaper, 1944].

Le graphite a un large domaine d'utilisation qui passe de la vie quotidienne, comme mine des crayons à papier aux applications industrielles, comme les lubrifiants, joints d'étanchéité, balise pour moteurs électriques, modérateur de réacteur nucléaire, etc.....

Le graphite a un large domaine d'utilisation qui passe de la vie quotidienne, comme mine des crayons à papier aux applications industrielles, comme les lubrifiants, joints d'étanchéité, balise pour moteurs électriques, modérateur de réacteur nucléaire, etc.....

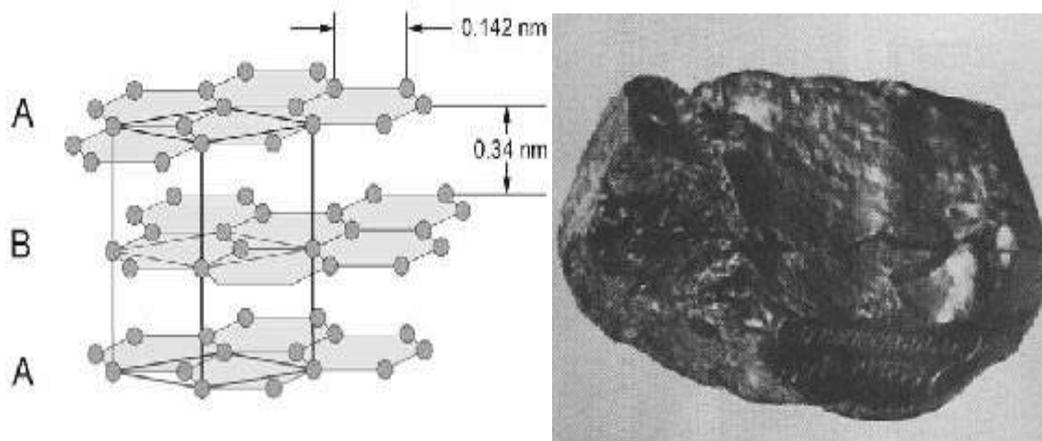


Figure I.1. Structure du graphite hexagonal

I.2.1.2 le diamant

Le diamant est un minéral transparent composé de cristaux de carbone pur. Cette pierre précieuse est connue pour être le minéral le plus dur qui soit. C'est seulement à la fin du XVIII^e siècle que le diamant fut identifié comme une forme cristalline du carbone par Lavoisier et Tenant. Dès lors, les chimistes ont cherché à le synthétiser. Ils n'y sont parvenus qu'au milieu du XX^e siècle.

On sait aujourd'hui que, dans le diamant, chaque atome est relié à quatre atomes voisins disposés au sommet d'un tétraèdre régulier. Ces liaisons chimiques entre atomes (liaisons covalentes) sont fortes et caractérisées par une distance interatomique de seulement 0,136 nm. Cette symétrie tétraédrique signe un solide dense et anisotrope. Le diamant est une forme allotropique tridimensionnelle du carbone. Dans le diamant, les atomes de carbone sont en état d'hybridation sp^3 , et donc tétravalents. Il existe plusieurs structures cristallines du diamant [Yin,2006] comme le diamant hexagonal ou la lonsdaléite, mais la structure, la plus courante est de loin le diamant cubique (Figure I.2). La maille de cette structure est de type cubique faces centrées, avec un paramètre de maille de 0,356 nm.

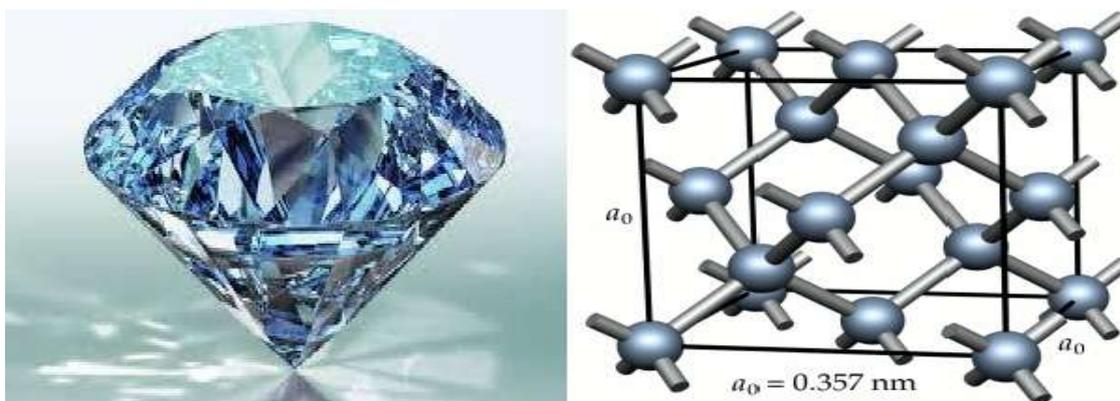


Figure I.2 : structure de diamant

I.2.2 les nouvelles formes de carbone

I.2.2.1 fullerènes

L'élément principal du graphite, et également point de départ pour la construction de nouvelles nanostructures carbonées, est le plan de graphène, que l'on peut se représenter comme une feuille plane pavée d'hexagones. Il est possible de briser virtuellement la planéité de la feuille de graphène en insérant des défauts dans la structure, de type pentagone ou heptagone [Lévy, 2004]. L'ajout d'un pentagone dans un plan d'hexagones crée une courbure positive. L'ajout d'un heptagone créera, dans le même plan, une courbure négative.

La courbure créée par chaque type de défaut s'annule, et une feuille de graphène dans laquelle on aurait inséré un pentagone et un heptagone resterait globalement plan. En 1985, Curl, Kroto et Smalley ont réussi à isoler une forme majoritaire constituée de 60 atomes de carbone. Cette molécule, refermée sur elle-même comme une cage, a la forme d'un icosaèdre tronqué dont tous les sommets sont occupés par des atomes de carbone. Sa structure est alors constituée de 12 pentagones et de 20 hexagones (Figure I.3). Cette nouvelle molécule de 60 atomes de carbone, ou C_{60} , 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 C_{60} . Le fullerène C_{60} est le représentant le plus connu de la famille des fullerènes, molécules « cage » de plus de 60 atomes de carbone [Naik 2002]. Les fullerènes doivent obéir à de fortes conditions de stabilité chimique, toutes les structures géométriquement possibles n'existent donc pas. Les fullerènes les plus connus sont les C_{60} et C_{70} , mais il existe également les C_{76} , C_{78} , C_{82} , C_{84} . Depuis leur synthèse initiale par ablation laser, les moyens de production de fullerènes ont progressé. En 1990, Krätschmer

réussit la première synthèse à grande échelle de fullerènes par la sublimation d'une électrode en graphite pararcélectrique [Wang, 2003]. Aujourd'hui, des méthodes de synthèse du C₆₀ par voie organique existent, ouvrant la voie à une production de masse des fullerènes [Brochard, 1986].

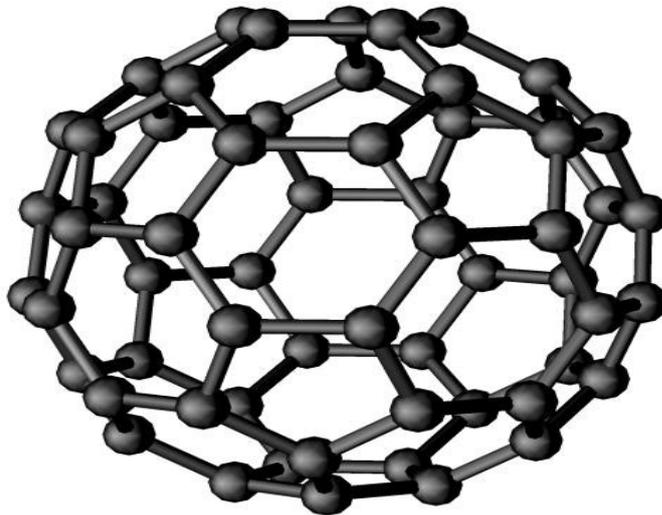


Figure I.3 fullerène C₆₀

I.2.2.2 les nanotubes mono-feuillets (ou mono-parois)

Les nanotubes de carbone mono-parois (Single Wall NanoTubes, SWNT) sont constitués d'une seule paroi. Ces nanotubes mono-parois sont classés en trois catégories : zigzag, chiral ou chaise. Les nanotubes monofeuillet ont été découverts en parallèle par Béthune et Iijima en 1993. [Iijima ,1993], [Bethune, 1993] c'est une feuille de graphène enroulée sur elle-même de manière à former un cylindre unique, Le nano-objet obtenu est alors unidimensionnel. Les atomes de carbone restent dans un état d'hybridation (sp^2). Le diamètre d'un nanotube monoparoi peut varier entre 1 et 2nm, la longueur est encore plus variable (100nm à quelques millimètres). [Bernard, 2007].

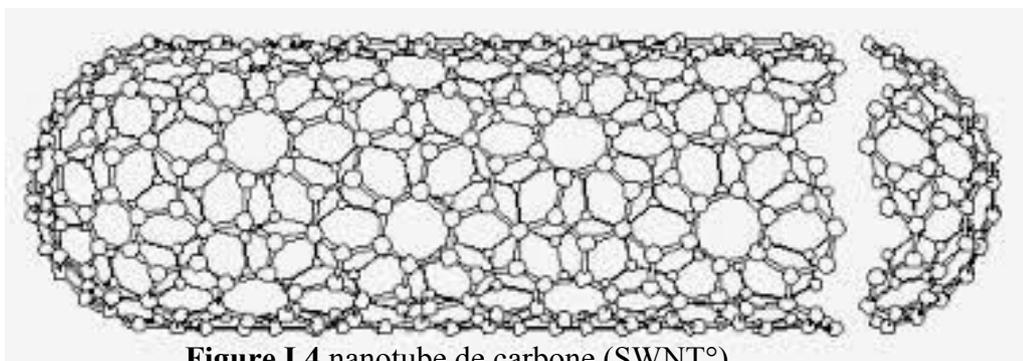
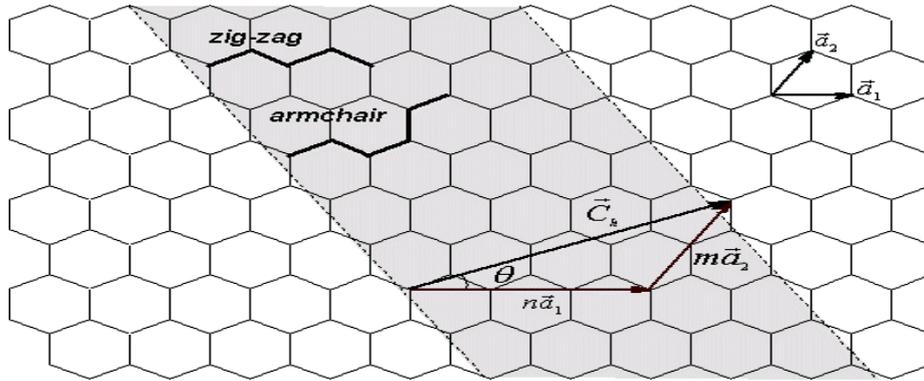


Figure I.4 nanotube de carbone (SWNT°)

La géométrie d'un NTC peut donner 2 vecteurs directeurs, a_1 et a_2 . On définit ensuite le

vecteur de chiralité, 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 a_1 et a_2 . Soient m et n les scalaires tels que :

$$C_h = n a_1 + m a_2.$$



L'angle de chiralité θ à l'angle entre le vecteur chiral et la direction zigzag (Figure I.5)

Figure I.5 structure d'un plan de graphene en deux dimensions.

Le réseau hexagonal est décrit à partir des deux vecteurs de base a_1 et a_2

Selon la valeur de ces 2 scalaires, 3 types d'enroulements, donc trois types de nanotubes peuvent être décrits : (figure I.6).

Si ($m = 0$ ou $n=0$) : on dira que le nanotube a une structure de type « zigzag » ; Si ($m = n$) on dira que le nanotube a une structure de type « chaise » ou « Armchair » ; Dans tous les autres cas, on dira que le nanotube est « chiral ».

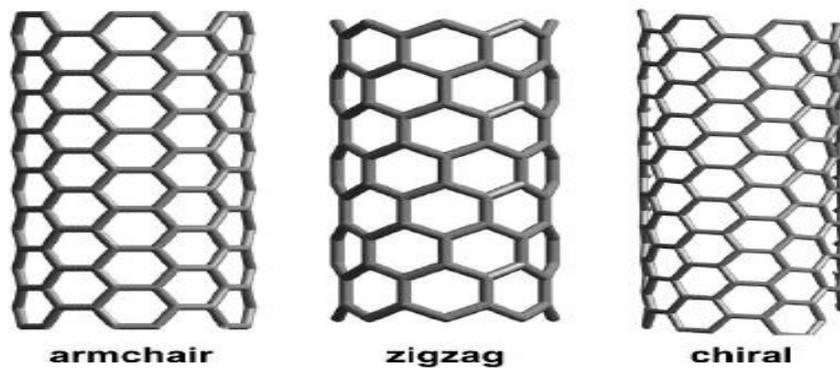


Figure I.6 les différents types de nanotubes mono parois : armchair, zigzag, chiral

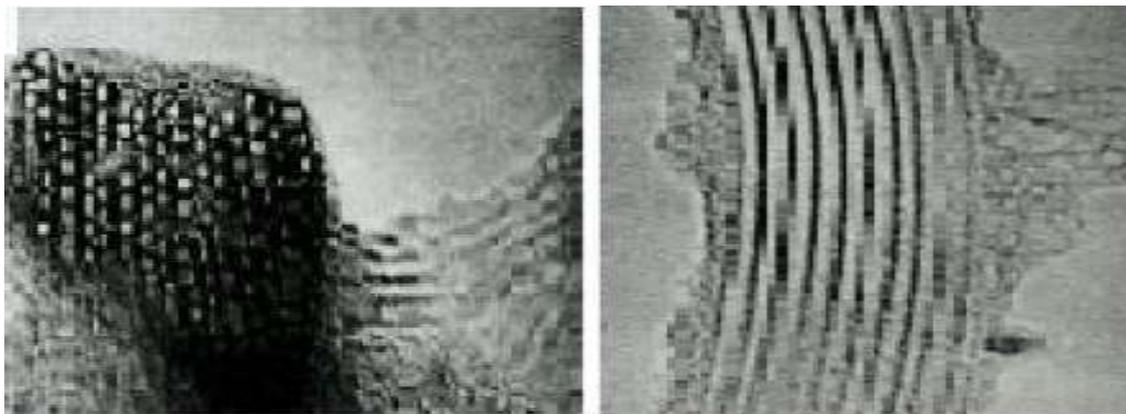


Figure I.7 représentation graphique d'un SWNT et a droite : image de microscope électronique a transmission de plusieurs SWNT [izard,2004]

L'enroulement de la feuille de graphène définit la structure (zigzag, armchair et chiral) et les propriétés physico-chimique du nanotube et tout particulièrement les propriétés électriques. C'est ainsi qu'on peut classer par chiralité des nanotubes conducteurs et d'autres semi-conducteurs.

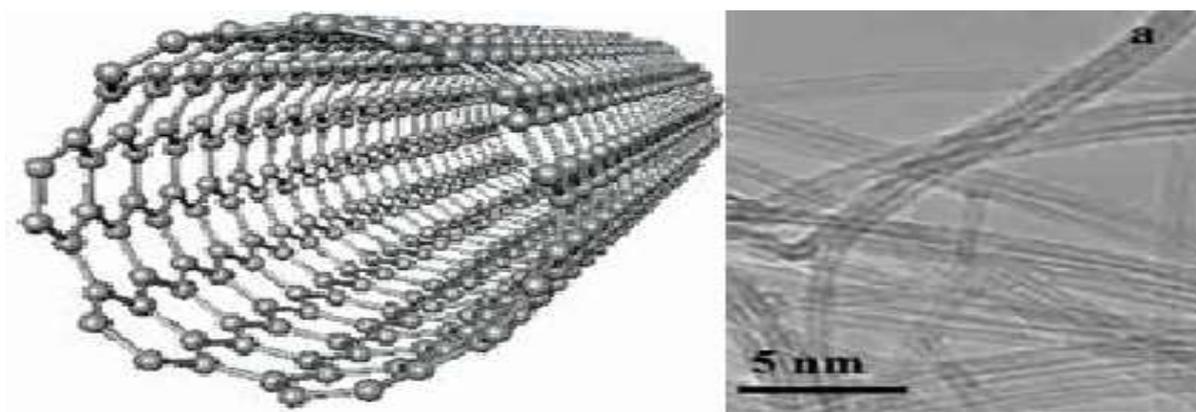


Figure I.8 [thés] Lucas (MET) de fagots de nanotubes SWNTs en coupe transversale (à gauche) et en vue longitudinale (à droite) : Le diamètre de chaque nanotube est ici d'environ 1 nm. [Marcoux, 2002]

Les nanotubes mono-parois ne possédant qu'un seul feuillet enroulé sur lui même sont dits mono-paroi (SWNT). Leur diamètre peut varier de 0.4 à 10nm [Saito , 1992]' bien que la plupart des SWNTs observés aient un diamètre inférieur à 2nm.

Leur longueur, quant à elle, est en règle générale de l'ordre du micron, mais peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres selon les conditions de synthèse. Si l'on se focalise sur leur très grand rapport d'an isométrie, c'est-à-dire le rapport entre leur longueur et leur diamètre qui peut être aussi grand que 10^3 à 10^5 , ces nanotubes peuvent être considérés

comme des structures unidimensionnelles. Lors de la synthèse, les SWNTs ne se retrouvent toutefois que rarement isolés, mais préfèrent plutôt s'associer au sein de faisceaux (ou fagots) de nanotubes, c'est-à-dire des agrégats constitués d'une dizaine à une centaine de nanotubes parallèles répartis au sein d'un réseau hexagonal (Figure I- 8).

I.2.2.3 les nanotubes multi-feuillets(ou multi-parois) :Multi Walled Carbone Nanotubes MWCNT)

Ils sont constitués de plusieurs feuillets de graphène de 0.340nm enroulés les uns autour des autres. Ils se présentent comme des tubes creux concentriques avec un diamètre interne de l'ordre du nanomètre et une longueur de l'ordre de quelques micromètres (figure I.9). Il existe deux modèles pour décrire la structure des nanotubes multi-feuillets

[Haddad ,2010].

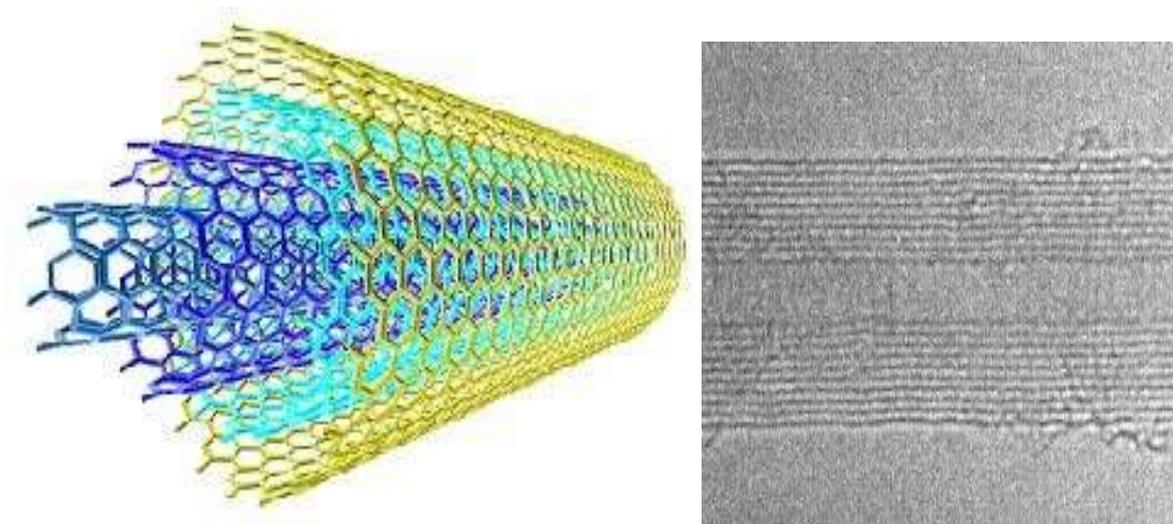


Figure I.9 a gauche présentation graphique d'un MWNT et a droite : image de microscope Électronique à transmission de plusieurs MWNT [saint-aubin,2010].

- ❖ Le modèle « parchemin » : un seul feuillet de graphène est enroulé en spirale sur lui-même.
- ❖ Le modèle « poupée ruse » : les plans de graphène sont arrangés en cylindres concentriques par emboîtement (Figure I.10).

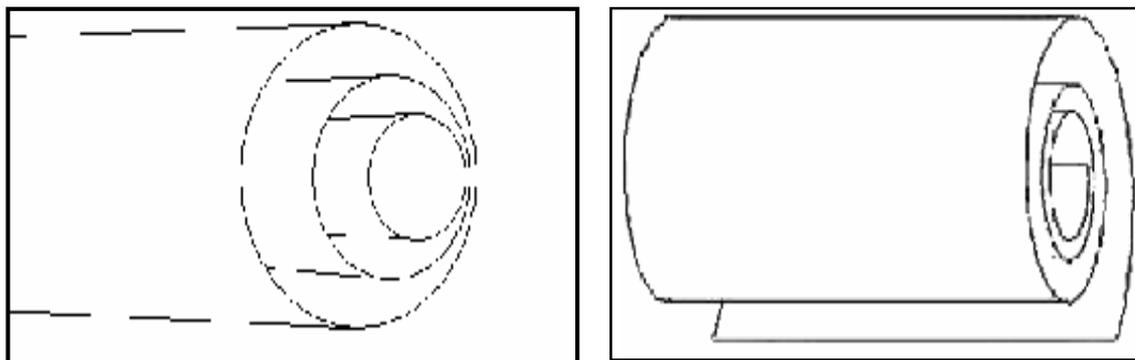


Figure I.10 type poupée ruse a gauche : type rouleau de parchemin a droite

I.3 synthèses des nanotubes

Dans ce paragraphe sont succinctement décrits les principaux procédés utilisés pour la synthèse des nanotubes de carbone. On peut les répartir en quatre grandes familles : l'arc électrique, le CVD ou CCVD (« Catalytic » Chemical Vapor Desposition, l'ablation laser et la décomposition catalytique (Hip Co).

I.3.1 méthode 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 [Kratshmer, 1990] et de produire les premiers nanotubes multi-feuillets identifiés par S. Iijima [Iijima,1991]. Cette technique est basée sur l'évaporation du graphite par un arc électrique, amorcé entre deux électrodes en graphite (Figure I.11). Un plasma chaud (environ 6000 K) est formé et maintenu entre ces deux électrodes, l'anode étant progressivement sublimée. Les espèces carbonées sublimées dans le plasma vont se recombiner à l'extérieur, et les produits formés vont se déposer sur les parois du réacteur. Les conditions de température à l'intérieur de l'enceinte sont très importantes pour la qualité et la quantité des nanotubes formés. La température est contrôlée en utilisant un gaz inerte (He, Ar...) à une certaine pression. Un collecteur refroidi par eau peut également être utilisé, suivant la géométrie du réacteur employé. La synthèse de nanotubes de carbone mono-feuillet nécessite l'emploi d'une anode en graphite.

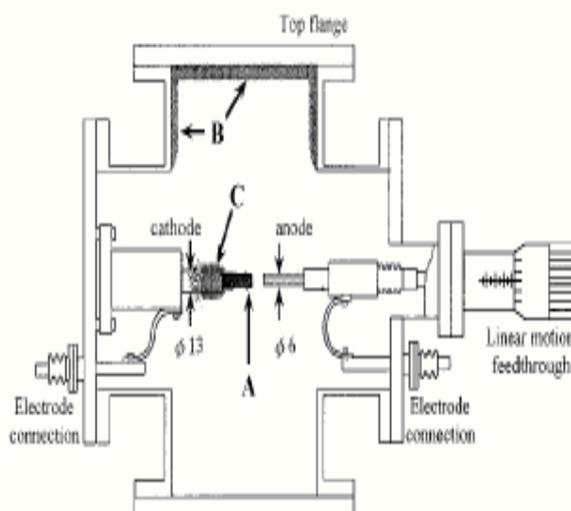


Figure I.11 schéma de la synthèse des CNTs par décharge arc électrique

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 [Béthune, Iijima, 1993]. 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 mono-feuillets se retrouve dans une zone appelée collerette, autour de la cathode, qui présente un aspect spongieux. Notons qu'en 1997, C. Journet et al. ont amélioré la technique de l'arc électrique en employant un mélange de catalyseur Ni/Y [Journet, 1997, 1998]. Ce mélange a permis d'obtenir des rendements de synthèse élevés, ce qui a ouvert la voie à la production de masse des nanotubes mono-feuillets. Aujourd'hui, un certain nombre de sociétés et Mer Inc. (entre autres) commercialisent des nanotubes produits par cette technique [Bernard, 2007].

I.3.2 méthode d'ablation laser

La synthèse de nanotubes de carbone par la méthode d'ablation laser a été décrite pour la première fois en 1996. Les nanotubes de carbone sont produits lors de la vaporisation d'une cible, composée de graphite et de catalyseurs métalliques, sous l'effet d'une forte irradiation laser. La cible de graphite dopée est placée dans un four (autour de 1200°C). Sous l'effet du laser (un laser Nd-YAP à 1,08 μm avec une fréquence de répétition de 15 Hz, des impulsions de 20 ns et une énergie par impulsion de 300 mJ par exemple [Thess, 1996], la cible de graphite est vaporisée et les nanotubes se forment. À l'aide d'un flux de gaz inerte (flux d'argon à 1,6 Lh^{-1} par exemple [Thess, 1996] la suie produite est transportée jusqu'à un collecteur en cuivre sur lequel elle se condense. C'est ce condensat qui constitue le produit de

la synthèse. Les catalyseurs additionnés à la cible de graphite sont le plus souvent le nickel et le cobalt. Le travail "titanesque" qu'effectuent les producteurs de nanotubes de carbone est de faire varier de façon systématique les différents paramètres de synthèse afin d'améliorer le rendement, le contrôle de la chiralité, la puretéetc. Ils font notamment varier la nature des catalyseurs, leur proportion, la puissance du laser, son taux de répétition, la température du four, le flux de gaz inerte, sa nature... etc. [Thess, 1996]... Cette méthode produit des nanotubes de carbone mono- paroi qui sont organisés en corde comme sur la (Figure I.12)

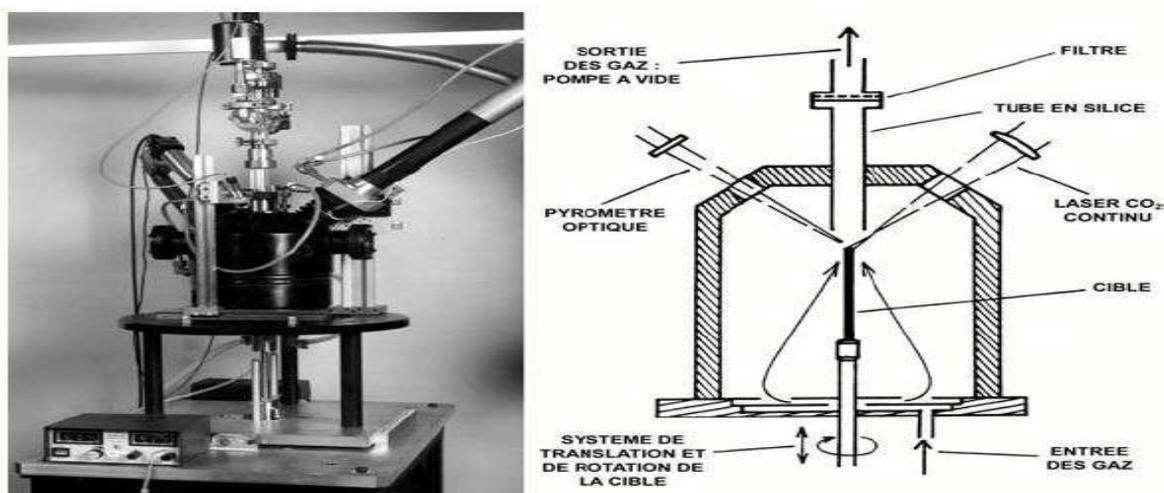


Figure I.12 Schémas simplifiés la réaction de synthèse laser continu (CO₂) de L'ONERA [Castignolles ,2004]

Au sein d'une corde, les nanotubes sont liés les uns aux autres par des liaisons de Van-der-Waals de l'ordre de 500 eV par micron de contact inter-tubes et la distance entre nanotubes est de l'ordre de 0,315 nm [R. Saito G.1998]. Un des avantages de la méthode de synthèse par ablation laser est qu'elle permet de produire d'assez grandes quantités de nanotubes mono-paroi (g/Jour). Les rendements sont très élevés, 70% à 90% de la masse de graphite de départ.

I.3.3 méthode de dépôt chimique en phase vapeur

La synthèse de nanotubes de carbone par la méthode de dépôt chimique en phase vapeur (abrégée en CVD pour Chemical Vapor Déposition) a été effectuée pour la première fois par Endo et al. [Endo, 1995]. Dans cette méthode, des hydrocarbures (CH_4 , C_6H_6 ...) et de l'hydrogène sont mis en présence de catalyseurs métalliques (Fe, Co, Ni...), le tout dans un four porté à haute température ($T > 700\text{C}$). Les nanotubes se forment alors sur les plots de catalyseurs (Figure I.13). L'un des avantages de cette méthode est que les nanotubes se forment de façon continue (contrairement à la méthode d'ablation laser par exemple). Nous pouvons espérer trouver des conditions expérimentales permettant de fabriquer des nanotubes purs avec un contrôle parfait du diamètre et de la chiralité. Cependant, cela est encore loin d'être la réalité.

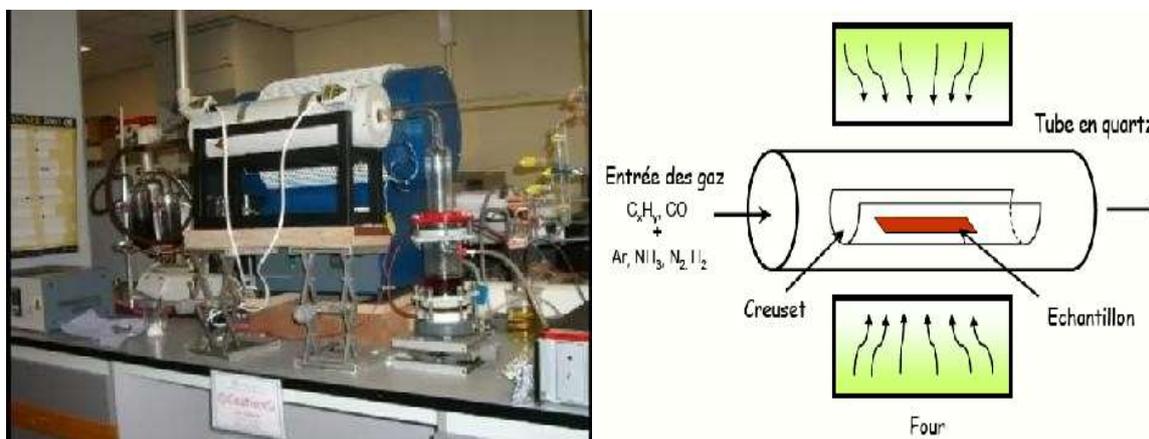


Figure I.13 schéma d'un réacteur CVD pour la croissance des (NTC).

Un autre avantage de cette méthode est que l'on peut faire croître les nanotubes à des endroits prédéterminés. Cela peut s'avérer très intéressant pour toutes les applications en nanoélectronique, par exemple, pour fabriquer des matrices de transistors à base de nanotubes de carbone. 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 2 cm. De plus, il est possible d'aligner les nanotubes entre eux, perpendiculairement à la surface. Nous obtenons alors des « pelouses » de nanotubes. Cette propriété est très intéressante pour toutes les utilisations des propriétés d'émission de champ des nanotubes. En revanche, un inconvénient de cette méthode est qu'elle ne permet pas, pour le moment, de fabriquer de grandes quantités

de nanotubes mono-parois. En et, si la production de nanotubes de carbones multi-parois est relativement facile, celle de nanotubes de carbones mono-parois est difficile.

I.3.4 Décomposition catalytique (Hip Co)

Le procédé (Hip CO) (High Pressure dismutation of CO : décomposition sous haute pression de CO) a été développé par le groupe de R. Smalley [Nikolaïev ,1999]. Ce procédé fait partie de la famille des procédés de décomposition catalytique à moyenne température. Un flux continu de penta carbonyle de fer ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) et de monoxyde de carbone (CO) est introduit sous une pression de 10 atm dans une enceinte chauffée à 1200°C . L'originalité du procédé tient au fait que le catalyseur, nécessaire à la croissance des tubes mono-feuillets, est formé in situ par la décomposition du gaz précurseur. De surcroît, le monoxyde de carbone utilisé comme source de carbone pour la croissance des tubes ne se pyrolyse pas à 1200°C , ce qui permet d'obtenir des nanotubes de carbone mono-feuillets exempts de toute impureté graphitique. Les nanotubes formés par cette technique sont assez originaux. Ils présentent une large distribution de longueurs (dont des nanotubes très petits), mais contiennent beaucoup de catalyseur résiduel. Cette technique permet la synthèse à grande échelle de nanotubes mono-feuillets. Le procédé de fabrication est Flux continu, ce qui est très positif pour une industrialisation. Une société commerciale (Carbone Nanotech Inc.) propose des nanotubes synthétisés par cette technique. En outre, le fait de pouvoir obtenir des nanotubes avec un diamètre moyen très petit (de l'ordre de 0,7 nm) est un avantage en ce qui concerne les propriétés optiques puisque cela ramène la bande interdite des nanotubes semi-conducteurs vers des régions spectrales où les détecteurs sont les plus sensibles.

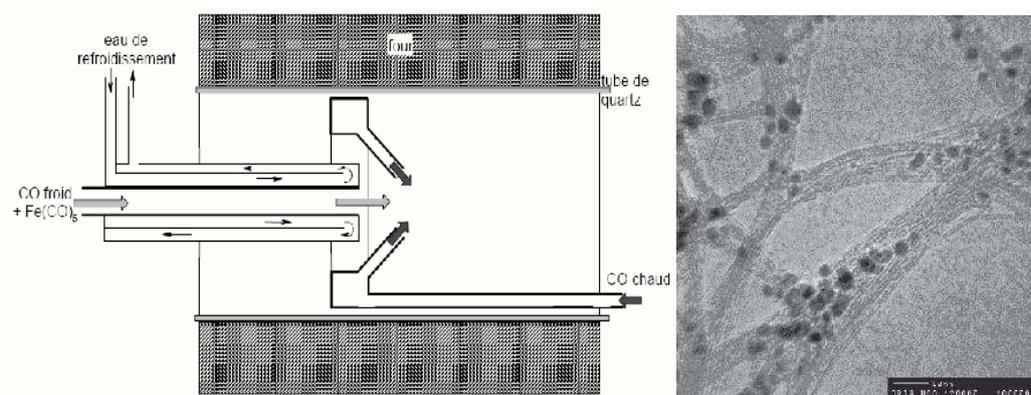


Figure I.14 a gauche schéma de la production de nanotubes par méthode (Hip Co) [Marcoux, 2002] a droite image de nanotubes (Hip Co).

I.4 Propriétés des nanotubes de carbone

Bien qu'étant proches du graphite de par leur structure, les nanotubes présentent des propriétés intrinsèques bien différentes et parfois beaucoup plus intéressantes que celles de ce matériau.

I.4.1 propriétés mécaniques

Etant donné la force de la liaison C=C, les nanotubes sont souvent considérés comme des matériaux au potentiel exceptionnel, notamment en regard de leurs propriétés axiales. Il existe de nombreux calculs théoriques pour le module d'élasticité (ou module d'Young) dont les valeurs s'échelonnent de 600 à 5500GPa, selon le modèle utilisé [**Saito, Yakobson, Overnay, Tibbets**]. Des mesures expérimentales ont confirmé des modules d'Young de 1000 à 3000GPa [**Lourie, Krishnan**] pour des SWNTs et des modules d'Young d'environ 1000 GPa pour des MWNTs [**Treacy, Wong, Poncharal**], ce qui est environ 25% plus élevé que celui des meilleures fibres de carbone produites à ce jour. Les nanotubes possèdent en outre une faible densité, 6 fois plus faible que celle de l'acier par exemple, ainsi qu'une grande résistance à la flexion [**Iijima 1996, Bernholc**]. La contrainte de rupture des nanotubes est théoriquement comprise entre 15 et 55 GPa [**Walters, Yu, Wagner, Li F**]. En comparaison, les fibres commerciales les plus résistantes produites à ce jour sont des fibres de carbone dont la contrainte de rupture est à 6.37GPa (Toray T1000G) [**Soficar**]. Cependant, les différentes propriétés intrinsèques de nanotubes de carbone idéaux que nous venons d'énoncer sont à modérer car les nanotubes ne sont jamais exempts de défauts. Dans le cas des SWNTs par exemple, les nanotubes de carbone sont associés en faisceaux. Le module d'Young de fagots de nanotubes est estimé entre 600 et 1000GPa [**Salvetat, 1999, Yu**]. Toutefois, ces propriétés restent parmi les meilleures recensées à ce jour. Combinées à leur forte anisométrie, les nanotubes sont d'excellents candidats pour le renfort mécanique de matériaux.

I.4.2 Propriétés thermiques

Comme pour la conductivité électrique, la conductivité thermique a d'abord été mesurée sur un film dense d'agrégat de nanotubes. Dans ce cas, la valeur mesurée de $35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ est bien inférieure à la valeur théorique de $6000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Mais les mesures sur des nanotubes multi parois individuels montrent des valeurs de $3000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, proches de la théorie

I.4.3 Propriétés électriques

L'une des caractéristiques importantes des nanotubes de carbone est le lien étroit existant entre leur structure spatiale (la nature du repliement) et leurs propriétés électroniques. Ainsi, en fonction de leur chiralité, les nanotubes de carbone peuvent être métalliques ou semi-conducteurs. Un nanotube est métallique si $2n + m$ est un multiple de 3, ou de manière équivalente, si $n.m$ est un multiple de 3. Les nanotubes de type chaise, définis par le couple (n, n) , sont donc métalliques; les autres tubes sont semi-conducteurs en raison des effets de courbure. D'un point de vue technologique, les nanotubes de carbone présentent des propriétés très attrayantes. Métalliques, les nanotubes peuvent porter des densités de courant très grandes, 10^9 A.cm^{-2} , valeur extrêmement élevée quand nous la comparons à celle d'un métal usuel, 10^6 A.cm^{-2} . Semi-conducteurs, une application centrale vise à les intégrer dans des dispositifs tels que les transistors de champ constituant ainsi des portes logiques laissant, ou non, passé le courant. Pour ce qui nous concerne, le cadre de ce travail cherche plus à exploiter les propriétés mécaniques et les caractéristiques géométriques des nanotubes. Cependant, que cela soit pour exploiter ces propriétés électroniques ou ces propriétés mécaniques, il n'existe pas de méthode able permettant de produire des nanotubes aux propriétés ciblées. Cette absence de contrôle des propriétés du matériau au niveau de la production est perçue comme un blocage fondamental pour l'exploitation des nanotubes de carbone pour la nanoélectronique. Comme nous le verrons, cela constitue également une difficulté majeure pour leur exploitation comme nano sondes. [Saito]

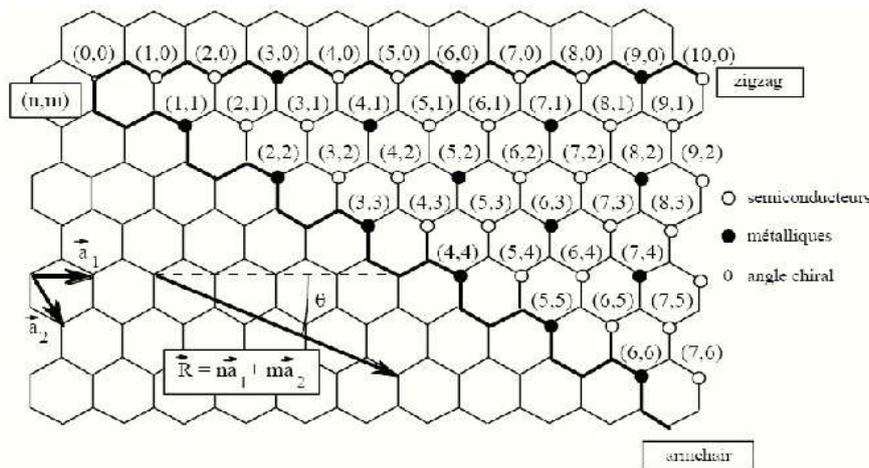


Figure I.15 propriétés électroniques des nanotubes de carbones monocouches en fonction de leurs indices de chiralité (n,m) .

Au-delà des différentes méthodes de synthèse et de manipulation, une façon d'aborder ce problème est d'intervenir après synthèse en développant des méthodes aptes à modifier les nanotubes de carbone. Si cette dernière approche n'est peut-être pas la plus satisfaisante à terme pour ce qui concerne une éventuelle production industrielle, tant du point de vue des coûts que de la mise en œuvre, elle présente l'énorme avantage de proposer des solutions dans le cadre de la production à l'unité, qui est elle tout à fait adaptée pour des travaux de recherche. En outre, cette capacité à modifier les nanotubes de carbone, les cordes ou faisceaux pour les mono-parois ou la capacité à éplucher des multi-parois, peut s'avérer une source d'information utile pour modéliser les propriétés des nanotubes de carbone.

I.5 Défaut des nanotubes de carbones

I.5.1 Défauts structurels

Les nanotubes de carbone sont constitués uniquement d'atomes de carbone hybridés sp^2 et formant des réseaux d'hexagones. L'outil principal pour caractériser les nanotubes est la microscopie électronique, qui projette une image en deux dimensions. Pour accéder à la troisième dimension, il faut utiliser les microscopies à effet tunnel et à force atomique. La troisième dimension est en théorie accessible par TEM à l'aide d'une reconstruction numérique à partir d'images (Figure. I.16) En arrêtant la contrainte sur chaque application de courant, un nanotube multi-parois peut être caractérisé après la perte de chaque feuillet le constituant. (A) La conductance $G(V_g)$ change entre les comportements semi-conducteur et métallique, en raison de la modification de la nature du feuillet externe à chaque étape de l'amincissement. (B) Lorsque le dernier feuillet métallique (marqué n-9) a été enlevé, les feuillets semi-conducteurs restants peuvent être complètement réduits an de former des régions de conductance nulle. En considérant que les pics indiqués par desèches dans la courbe de $G(V_g)$ correspondent aux bords des bandes de conduction et de valence, les auteurs évaluent les gaps des bandes électroniques des différents feuillets par une constante de proportionnalité. Figure extraite de la référence. [Philippe,2013].

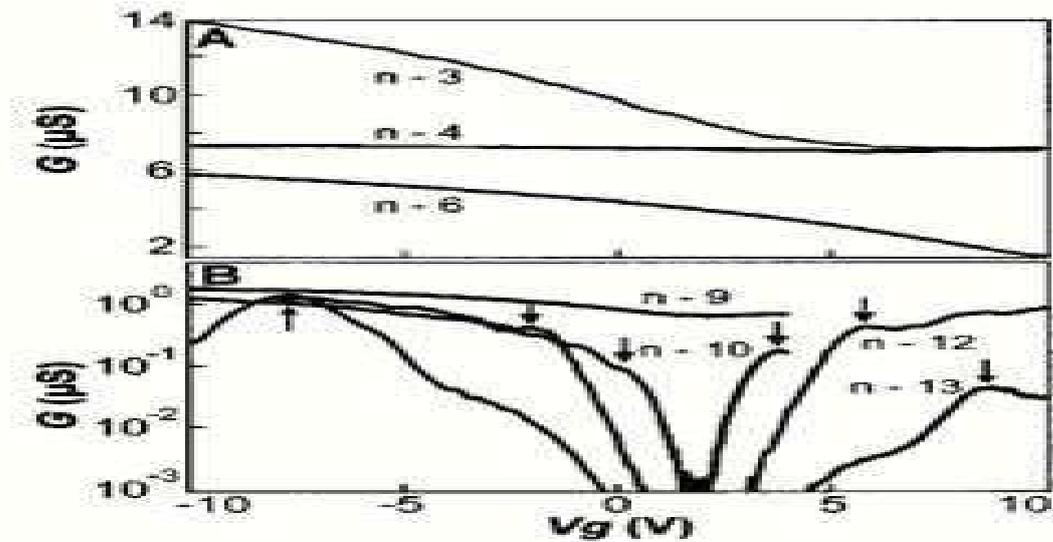


Figure I.16 En arrêtant la contrainte sur chaque application de courant

Deux dimensions inclinées à différents angles. En pratique, cette opération est trop lourde pour être exploitable. Parmi les défauts présents dans les nanotubes pouvant avoir une influence notable sur les propriétés mécaniques, nous distinguons les dislocations, les agglomérats, et les défauts topologiques. Les atomes de carbone peuvent former par exemple des pentagones ou des heptagones plutôt que des hexagones. Les dislocations entraînent une diminution de la résistance à la rupture, alors que les défauts topologiques, lorsqu'ils induisent une courbure locale de la couche de graphite, peuvent diminuer le module élastique effectif d'un nanotube. Les pentagones, supposés à l'origine des courbures observées par TEM, ont été détectés par microscopie à effet tunnel car ils induisent une modification de la densité électronique locale. Le nanotube multi-parois est formé de plusieurs couches concentriques et, comme dans le cas du graphite, chaque couche interagit avec ses voisines par l'action des forces de Van der Waals. Ces forces étant faibles, nous pouvons nous interroger sur la qualité du couplage mécanique entre les couches. La morphologie et la qualité structurale du nanotube multi-parois vont dépendre étroitement de la méthode de synthèse utilisée. Les nanotubes produits par arc électrique contiennent peu de défauts structuraux du fait de la température élevée des atomes de carbone lors du processus de synthèse, et sont en majorité rectilignes. Les courbures observées sur certains nanotubes sont dues à des contraintes mécaniques plutôt qu'à des défauts de structure. Les nanotubes synthétisés par décomposition catalytique d'un hydrocarbure sont souvent très longs et sont parfois regroupés en fibres continues de nanotubes.

Du fait d'interactions van der Waals attractives entre parois, les nanotubes monocouches ont la plupart du temps tendance à s'agglomérer en faisceaux de nanotubes appelés fagots. Du fait de la présence de cycles non hexagonaux, il existe des défauts dans le réseau 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 I.17)

[Marcoux, 2002].

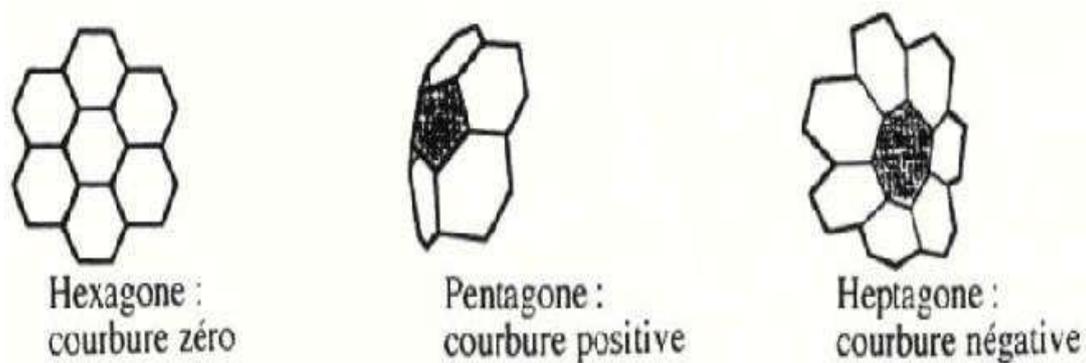


Figure I.17 Influence du type de cycle sur la courbure de la surface.

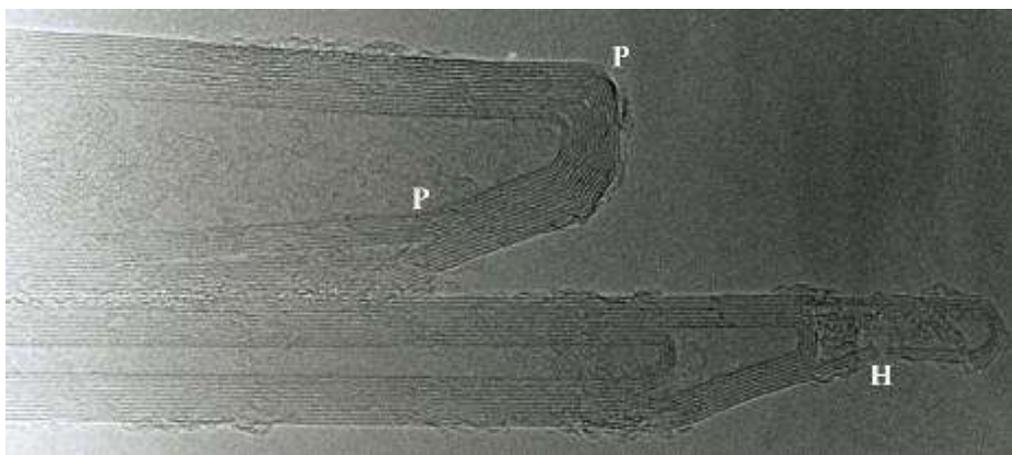


Figure I.18 Image MET des extrémités de deux nanotubes multicouches. On a indiqué quelques-uns des cycles non hexagonaux : (P) indique un pentagone et (H) un heptagone.

(Image : Annick Loiseau, Jean Michel Benoît).

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

du tube (Figure I.19).

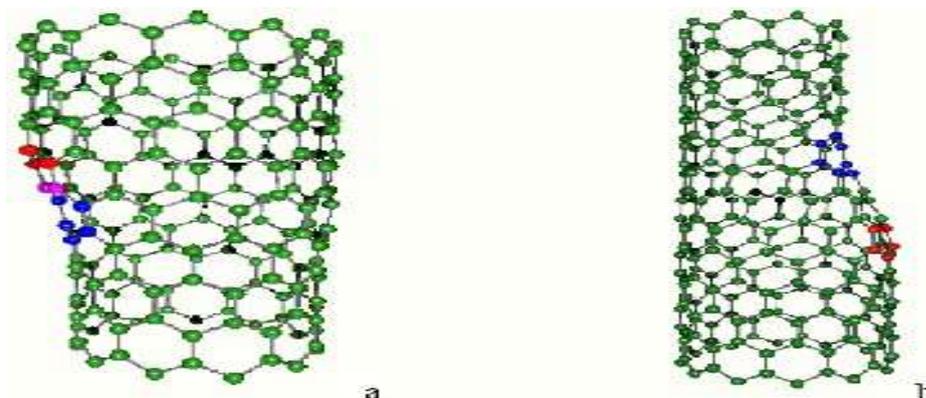


Figure I.19 Introduction d'une paire pentagone-heptagone provoquant une variation de diamètre et de chiralité : a- de (11,0) à (12,0) ; b- de (9,0) à (12,0).

De telles combinaisons peuvent expliquer la forme torsadée de certains nanotubes multicouches produits par décomposition catalytique d'hydrocarbures. En introduisant ces défauts en plus grand nombre dans le réseau graphitique, il est possible d'imaginer une grande quantité de structures variées (jonctions en Y, en T, etc.) (Figure I.20)

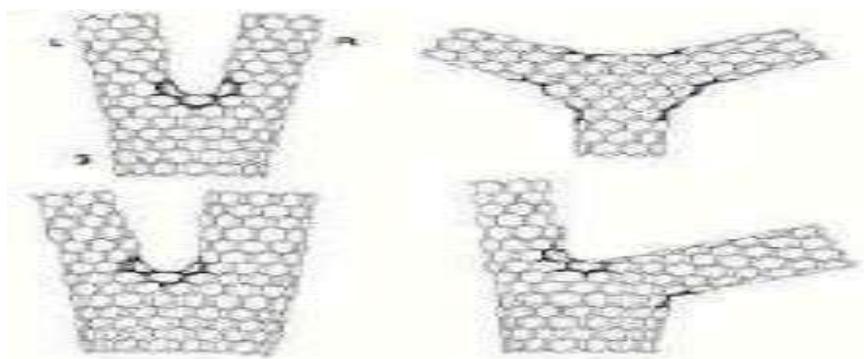


Figure I.20 Défauts pentagonaux et heptagonaux se traduisant par des jonctions.

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

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 I.21).des molécules carbonés de faible masse peuvent également être présentes, comme du (C60) ou des hydrocarbures poly aromatiques. [Marcoux,2002].

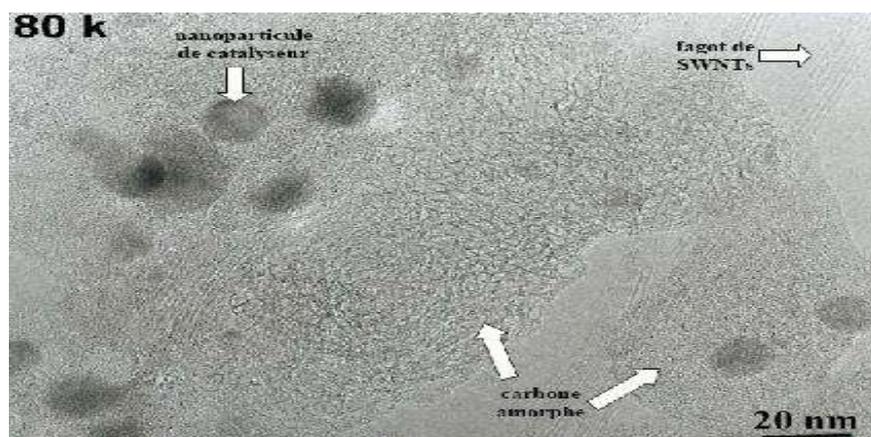


Figure I.21 image (MET) d'un échantillon d'un nanotube collerette brut produite par arc électrique on peut distinguer en plus (SWNTs) des particules de catalyseur et deux formes de carbone amorphe.

I.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) [Bandow, 1997] 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.

I.6.1 Les méthodes chimiques

Elles reposent sur la différente réactivité entre les nanotubes et les impuretés, le carbone Amorphe et les espèces mal graphitisées étant plus réactives. Les réactions mises en jeu sont des réactions d'oxydation, avec un oxydant liquide [Vaccarini, 1999] (la plupart du temps) ou gazeux [Zimmerman, 2000] 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.

I.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 [Rinzler, 1998] ou directe, [Shelimov, 1998] ou la chromatographie, d'exclusion stérique [Duesberg, 1999]. Des séparations reposant sur la différence de densité existent également, il s'agit alors de purification par centrifugation. [Bonard, 1997] Ces méthodes physiques permettent de se séparer des nanoparticules (catalyseur, graphite, oignons), le carbone amorphe étant trop divisé pour pouvoir être éliminé par ces méthodes. [Marcoux, 2002]

Quasiment tous les protocoles de purification sont une combinaison de plusieurs types de méthodes. Par exemple, la purification des nanotubes commerciaux Tubes Rice [Rinzler, 1998] consiste en un traitement à l'acide pour oxyder le carbone amorphe (méthode chimique), suivi d'une microfiltration tangentielle pour séparer les nanoparticules des (SWNTs) (méthode physique). Un autre exemple de purification de (SWNTs) [Shi, 1999] décrit l'oxydation du carbone amorphe sous flux d'air (350°C), suivie de l'oxydation du catalyseur dans une solution de (HCl) concentrée. Deux microfiltrations directes (une à 1 µm, l'autre à 0,2 µm), en phase aqueuse avec tensioactif, permettent enfin d'éliminer les nanoparticules. [Marcoux, 2002] Aucune de ces méthodes n'est sélective à (100%) et la purification reste aujourd'hui un problème tout aussi crucial que la synthèse. Les réactions d'oxydation n'attaquent pas entièrement le catalyseur et le carbone amorphe, alors même qu'elles oxydent partiellement les parois des nanotubes. Les processus de filtration sont souvent rendus difficiles par le colmatage des membranes et enfin l'efficacité des centrifugations est diminuée par l'agrégation entre les nanoparticules et les nanotubes. Nous allons dans la suite de ce paragraphe décrire brièvement quelques méthodes de purification

de nanotubes monocouches [**Marcoux, 2002**].

La littérature permet de classer les méthodes de purification en deux grandes catégories: filtration et traitements acides. Ces méthodes peuvent être associées entre elles. D'un point de vue pratique, les (MWNT) produits analytiquement sont plus faciles à purifier car ils ne contiennent comme impureté que le catalyseur et son support, alors que les (SWNT) produits par arc électrique ou ablation laser contiennent énormément de carbones amorphes de petites tailles. Les (SWNT) sont souvent purifiés à l'aide de techniques de filtration car la technique d'attaque acide peut entraîner leur destruction [**Dujardin, 1998**]. On distingue deux types de filtration :

- ❖ Filtration directe : Le flux de liquide à filtrer est perpendiculaire à la membrane, dans la même direction que le filtrat. C'est la méthode classique de filtration.
- ❖ Filtration tangentielle : Le flux de liquide à filtrer est tangentiel à la membrane. C'est le cas lorsque la solution filtrée est remise en circulation. [**Marcoux ,2002**]

Li et al. [**Li 2000**] ont mis au point une procédure de purification des (SWNT) associant une ultra signification et une filtration, avec un rendement de (40%) et une pureté de (95%). Toujours en associant ultrasons et filtration, Bonard et al. [**Bonard, 1997**] ont employé un surfactant pour agréger les particules et obtenu un rendement de purification de (90%). Bandow et al. [**Bandow, 1997**] ont utilisé plusieurs filtrations avec des solvants différents, permettant d'éliminer successivement les carbones de type fullerènes et les nanoparticules catalytiques. Shelimov et al. [**Shelimov, 1998**].

Avec une méthode assez proche (la filtration a lieu dans ce cas en présence d'ultrasons) ont obtenu le même rendement de (90%) mais cette variante permet de purifier une plus grande quantité de nanotubes en une seule fois. L'équipe de Bernier [**Vaccarini, 1999**] purifie des (SWNT) produits par arc électrique par reflux dans (HNO_3), le résidu étant ensuite dispersé dans une solution contenant un surfactant puis filtré à partir d'un système de filtration tangentielle. Après lavage, les (SWNT) sont recuits a (1600°C) pour éliminer les traces de surfactant et de catalyseurs résiduels. Plus récemment, Zhou et al [**Zhou, 2000**] ont purifié des (SWNT) par une méthode en deux étapes, comprenant un reflux dans une solution (H_2O_2 20%) suivie de plusieurs filtrations avec des solvants différents.

La purification des (MWNT) produits par voie catalytique est souvent effectuée a partir d'un traitement a l'acide fluorhydrique [**Leroux ,1999**], destiné a éliminer le support,

suivi d'un traitement à reflux avec (HNO_3) [Rinzler, 1998] afin d'éliminer le catalyseur. Une étape supplémentaire de retraitement thermique à haute température ($T > 2000 \text{ }^\circ\text{C}$) peut être ajoutée afin d'évaporer les particules résiduelles de catalyseur et d'éliminer les éventuels défauts [Hamwi, 1997]. Dillon et al. [Dillon, 1997] ont décrit un processus conduisant à (98%) de (MWNT) purs. Ce dernier combine un reflux avec (HNO_3) à un traitement sous air à (550°C). Chiang [Chiang, 2001] utilise un processus proche de celui de Dillon, les nanotubes étant traités avec ($\text{H}-\text{Cl}$) après oxydation sous air.

I.6.3 ouverture des nanotubes

Dans la plupart des cas, les nanotubes sont fermés par des hémisphères de type (C_{60}) ou, dans le cas de la synthèse par voie catalytique, par une particule de catalyseur. On distingue deux méthodes principales d'ouverture : oxydation chimique et thermique.

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

L'utilisation de (HCl) permet également d'ouvrir les (MWNT) en employant un léger reflux [Sloan, 1998]. Hwang [Hwang, 1995] a testé divers oxydants, conduisant à des résultats assez différents. L'utilisation de ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) et (H_2O_2) en milieu acide ne conduit pas à l'ouverture. Les meilleurs résultats sont obtenus pour (KMnO_4) en présence de (MnO_2) (85% d'ouverture), (OsCl_3) en présence de (NaIO_4) (81%) et (RuCl_3) en présence de (NaIO_4) (91%). L'oxydation s'effectue à (100°C), sur une durée comprise entre (30 et 60 minutes). Dans le cas de ($\text{RuCl}_3(\text{NaIO}_4)$), l'augmentation du temps de réaction (90 min) conduit à la destruction des nanotubes.

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

Une deuxième façon d'ouvrir les tubes consiste en une oxydation sous air. Selon Ajayan et al. [Ajayan, 1993], les conditions optimales impliquent un chauffage à (700°C) pendant 15 minutes. Les rendements d'ouverture est alors d'environ (20%). L'ouverture se

fait par écaillage feuiller par feuillet des extrémités des tubes. Il arrive que les débris carbonés provenant de l'ouverture forment un bouchon. Afin de remédier à ce problème, un recuit à haute température peut être effectué [Ugarte, 1998].

I.7 Applications des nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone, du fait de leurs nombreuses propriétés, offrent un immense potentiel d'applications. Ces applications pourraient considérablement améliorer la vie quotidienne mais permettraient également de développer divers domaines scientifiques, on peut résumer leurs applications potentielles :

I.7.1 Application mécanique

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 mie en formes complexes.

La grande élasticité et la forme effilée des nanotubes en ont fait de bonnes pointes pour la microscopie à champ proche. Idéalement, une pointe devrait conserver son intégrité malgré un usage répété, que ce soit sous vide, dans l'eau ou l'air. L'utilisation de nanotube 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). Est consacrée à un exemple d'utilisation d'un nanotube multicouche comme pointe AFM. [Marcoux, 2002]

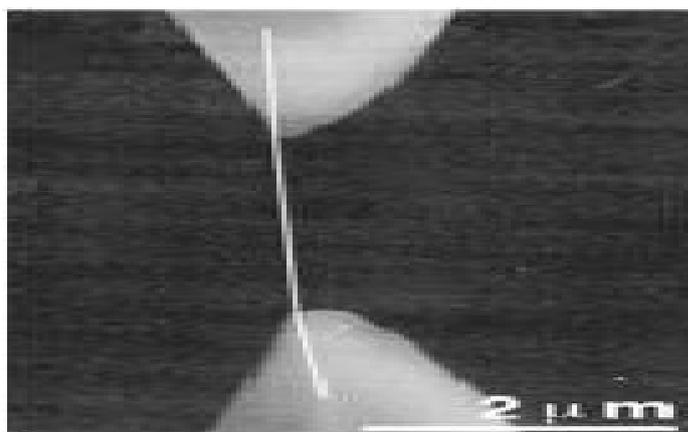


Figure I.22 Essai de traction sur un nanotube individuel à l'aide d'un AFM. D'après Yu et al. [Yu, al, 2000].

I.7.2 Application 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 souci primo. Ainsi les nanotubes mono feuillets 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 suivants la chiralité, on peut envisager, en assemblant des tubes d'indices (nm) 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. [Yao, 1999] on effectué des mesures de transport électrique sur e type de jonctions intramoléculaires ils ont montré qu'une jonction métal-semi- conducteur avait des caractéristiques fortement asymétriques et se comparait ainsi comme une diode rectificatrice. Une telle diode fut aussi créé peu de temps après par superposition de deux SWNTs se croisant perpendiculairement. Assemblés en réseau bi ou tridimensionnel, les nanotubes monocouches pourraient être utilisés à la fois comme connexions et comme composants.

Les nanotubes utilisés comme émetteurs d'électrons semblent être les candidats idéaux pour la nouvelle génération d'écrans plats à effet de champ. En effet les nanotubes peuvent avoir des qualités émissives exceptionnelles (jusqu'à 1 A.cm^{-2}) à bas champ d'extraction ($3-5 \mu\text{V.cm}^{-2}$).

Des détecteurs chimiques basés sur des nanotubes monocouches individuels sont à l'étude. En effet, il a été montré que la résistance de SWNTs semi-conducteurs variait fortement après exposition à des gaz, tels que NO_2 ou NH_3 . Ces nanotubes « détecteurs » font preuve à température ambiante d'une rapidité de réponse et d'une sensibilité plus élevée que les détecteurs actuels existants. Dans cette même optique, Collins et coll [Collins, 2000]. Ont décrit les variations de la résistance électrique de SWNTs exposés à O_2 .

Les nanotubes font preuve de propriétés intéressantes dans la conversation directe de l'énergie électrique en énergie mécanique.

I.7.3 Applications thermiques

Les nanotubes pourrait accotoir fortement la conductivité thermique de composites à fibres discontinue. Ces derniers pourraient bénéficier en outre, des propriétés mécaniques des tubes [Marcoux, 2002]

I.7.4 Applications optiques

Le développement des sources laser intenses a entraîné la nécessité de concevoir des systèmes de protection pour l'œil et les détecteurs optique. Les systèmes de protection actifs sont appelés limiteurs optiques. Idéalement, ils transmettent la lumière pour de faibles flux lumineux tandis que pour de forts flux ils limitent la transmission, de manière à maintenir l'intensité en dessous du seuil de dommage du détecteur.

Ces études commencent à porter également sur l'utilisation de nanotubes comme détecteur infrarouge [Marcoux, 2002].

I.8 Les polymères

Le terme polymère (du grec polys qui signifie « nombreux, plusieurs» et mêros qui signifie « unité, partie») ; qui sont typiquement regroupe toute matériau formées par la répétition d'un très grand nombre n de petites molécules de faible masse moléculaire appelées monomères qui liés entre eux par des liaisons primaires (liaisons covalentes) sachant que le monomère est une molécule de base (pouvant être par exemple non saturée ou cyclique ou encore comportant des fonctions réactives à ses extrémités.

L'assemblage des monomères pour l'obtention de polymères (ou macromolécules) s'appelle la polymérisation. La réaction de polymérisation est également utilisée par les organismes vivants.

Une multitude de produits et d'objets en plastique sont apparus sur le marché au cours du dernier demi-siècle. Tantôt loués, voire prestigieux, tantôt méprisés, voire maudits, ils sollicitent finalement les cinq sens du consommateur. Ils se sont introduits dans tous les domaines d'activités. Ils sont utilisés dans les appareils électroménagers, les matériaux de construction (revêtements, peinture), les emballages, les pneumatiques, les articles de loisirs, le textile, les produits pharmaceutiques, les prothèses, dans l'automobile, l'aéronautique, l'aéronavale, les équipements électriques, les produits cosmétiques, ainsi que dans les petits objets usuels de la maison. Les objets en plastique sont plus légers que les métaux et se prêtent à une grande variété de formes. En outre, quantité de propriétés avantageuses de volume, de surface, ou d'interface, valorisent les plastiques. Les propriétés de ces matériaux reposent sur le choix qui est fait parmi les innombrables architectures moléculaires possibles et les procédés de synthèse, ainsi que sur la mise en œuvre des résines, qui peuvent être mélangées ou chargées avec d'autres matériaux. Le procédé de mise en forme et les traitements ultérieurs fixent les caractéristiques finales des objets. On

voit donc que les chemins qui conduisent des molécules aux objets performants sont très techniques. Ils parcourent un champ doublement complexe du fait des matériaux polymères, comme du fait des procédés. Les polymères représentent un immense tonnage au point d'être susceptibles de polluer l'environnement car ils proviennent généralement du pétrole ou du gaz.

Nous développerons dans ce paragraphe quelques généralités ainsi que quelques définitions et propriétés des polymères. Nous terminerons en présentant les polymères dégradables. La majeure partie de ce paragraphe a été rédigée à partir de références bibliographiques générales (Carrega, 1999, 2000, 2007, Ashby et Jones, 1991-a, 1991-b, Champetier et coll., 1970, 1972, Châtain, 1993, Fayolle et Verdu, 2005, Verdu, 2000, 2006).

I.8.1 Classification des polymères

Il existe trois grandes familles de polymères suivant les propriétés des matériaux :

I.8.1.1 Les polymères thermoplastiques

Ils forment le groupe le plus important parmi les polymères synthétiques et sont constitués de macromolécules de taille limitée, linéaires ramifiées. Le terme thermoplastiques traduit le fait que le type de polymère passe de l'état rigide à l'état malléable par une faible élévation de température. Ce processus théoriquement réversible, peut être répété un nombre infini de fois sans modification de la structure et sans altération des propriétés. Pour ces raisons, les thermoplastiques sont généralement faciles à mettre en œuvre et à recycler.

Cette classe regroupe tous les polymères dont la cohésion latérale n'est assurée que par des liaisons secondaires. On peut déduire qu'ils sont sensibles à l'effet de la température mais aussi aux solvants. Les thermoplastiques sont constitués de longues chaînes indépendantes entre elles qui peuvent être étirées et orientées dans l'axe de l'effort appliqué. Selon que le polymère est amorphe ou semi cristallin et selon les conditions de sollicitation (température, niveau de vitesse et chargement). Le niveau de déformation des chaînes moléculaires avant rupture sera plus ou moins important, conduisant à des faciès de rupture plus ou moins ductiles. Ce comportement ductile est essentiellement observé dans les thermoplastiques. Sous contrainte normale la rupture se produit par la formation de craquelures (crazing) liées à l'étirement des chaînes moléculaires dans le sens de l'effort. Les micros vides qui apparaissent durant ce processus sont responsables du blanchiment du matériau. Les

thermoplastiques peuvent exister à l'état semi cristallin ou amorphe.

- ❖ polymère amorphe : chaîne stérique ment irrégulière pelote (PS, PMMA, PC) transparents.
- ❖ polymères semi cristallins : chaîne linéaires et flexibles : cristallisation partielle translucides, plus grande résistance à la température et aux agents chimiques.

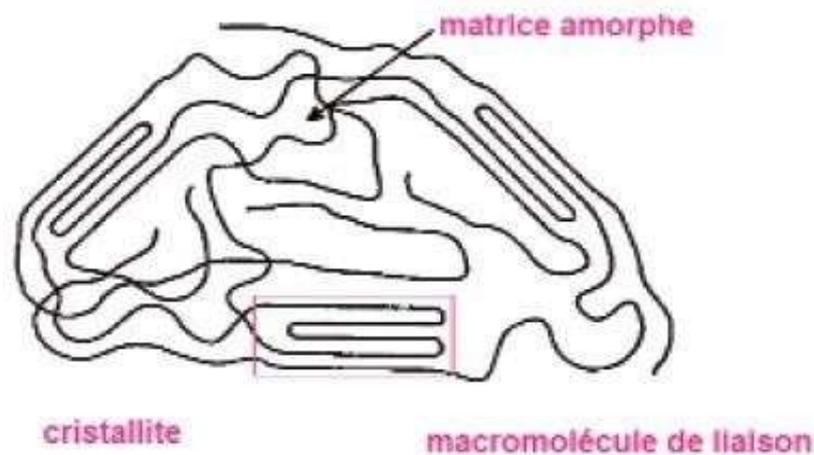


Figure I.23 schéma de la structure semi-cristalline d'un polymère.

- le polyéthylène (PE) ;
- le polypropylène(PP) ;
- le polystyrène(PS) ;
- le polycarbonate(PC) ;
- le polyester et le polyéthylène téréphtalate(PET) ;
- le polypéthane ou polyoxyméthylène (POM) ;
- le polychlorure de vinyle(PVC).

Ce tableau présente les propriétés physiques et mécaniques des matrices thermoplastiques (TP)

Tableau I.1 propriétés physiques et mécaniques des matrices thermoplastiques(TP). [Ait Atman 2011].

Matrices (TP)	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Module d'élasticité longitudinale	Coefficient de poisson	Contrainte de rupture (traction)	Allongement à rupture (%)
PP	900	1200	0.4	30	20 a400
PPS	1300	4000	/	65	100
PA	1100	2000	0.35	70	200
PES	1350	3000	/	85	60
PEI	1150	3300	/	105	60
PEEK	1300	4000	/	90	50

I.8.1.2. Les polymères thermodurcissables

Ce sont des polymères constitués en un réseau tridimensionnel fortement édifice le taux de réticulation est de (10 a 100) fois plus élève que dans le cas des élastomères. Ainsi, les thermodurcissables sont beaucoup plus résistants a la température que les thermoplastiques.

Tableau I.2 les propriétés des matrices therm durcissables(TD) [Ait Atmane, 2011]

Matrices (TD)	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Module d'élasticité longitudinale (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de poisson	Contrainte de rupture (traction) (MPa)	Allongement à rupture	Coefficient de dilatation thermique (°C ⁻¹)
Epoxyde	1200	4500	1600	0.4	130	2	10 ⁻⁵
Phénolique	1300	3000	1100	0.4	70	2.5	10 ⁻⁵
Polyester	1200	4000	1400	0.4	80	2.5	8 10 ⁻⁵
Polycarbonate	1200	2400	/	0.35	60	/	6 10 ⁻⁵
Vinylester	1150	3300	/	/	75	4	5 10 ⁻⁵
Silicone	1100	2200	/	0.5	35	/	/
Uréthane	1100	700a7000	/	/	30	100	/
Polyamide	1400	4000a19000	1100	0.35	70	/	8 10 ⁻⁵

I.8.1.3 Elastomères

Présentent des propriétés caoutchouteuse a température ambiante (très faible module de Young). Ils sont constitués de chaines monodimensionnelles entre lesquelles ont été réalisés des ponts réticulation en faible densité pour éviter les déformations non recouvrables (écoulement), tout en conservant la mobilité moléculaire autorisant le comportement caoutchouteuse. On citera quelques exemples de matière élastomère :

- ❖ le poly isoprène (caoutchouc Natural) ;
- ❖ le polybutadiène (caoutchouc artificiel) ;
- ❖ le polychloroprène (néoprène).

I.8.2 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 ,produits d'hygiène ,articles de loisirs, de structures dans les véhicules de transport,

les équipements électriques ,les circuits électroniques ,les les colles .Ils s'infiltrant aussi dans l'alimentation, les produits cosmétiques....etc.[Nodal,2001]

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un historique sur les nanotubes de carbone depuis leurs découvertes. Leur description, propriétés et leurs domaines d'application ont été bien détaillés et qui nous a permet de montrer leurs avantages. Ainsi, les nanotubes de carbone sont d'excellents matériaux pour le renforcement des matrices polymère, ils seraient susceptibles d'être employés comme un renfort dans un matériau composite.

CHAPITRE II

THEORIES DES POUTRES ET MODELES DE SUPPORTS
ELASTIQUES

II.1 Introduction

Pour résoudre les problèmes des structures ayant comme éléments structuraux des poutres dans le domaine élastique, il est nécessaire de choisir la bonne théorie écrivant correctement le comportement statique et dynamique de la structure ainsi que la méthode de résolution à appliquer. En effet, Il existe plusieurs théories de poutres et des modèles d'interaction solide- milieu élastique pour répond au besoin de travail.

II.2 Théories des poutres

Il existe trois principales théories de poutres

- ❖ la théorie d'Euler-Bernoulli, qui néglige l'influence du cisaillement [BELKACEM, 2016] ;
- ❖ la théorie de Timoshenko qui prend en compte l'effet du cisaillement en exigeant un facteur de correction [BELKACEM, 2016] ;
- ❖ la théorie d'ordre élevé qui prend en compte l'effet du cisaillement [BELKACEM, 2016].

II.2.1 Théorie d'Euler Bernoulli ou bien théorie classique des poutres

Dans cette théorie, les modèles sont basés sur une distribution linéaire des déplacements suivant l'épaisseur de la poutre. On appliquant l'hypothèse suivante :

La section reste perpendiculaire à la ligne ou courbe moyenne de la poutre et la section plane reste plane (figure II.1).

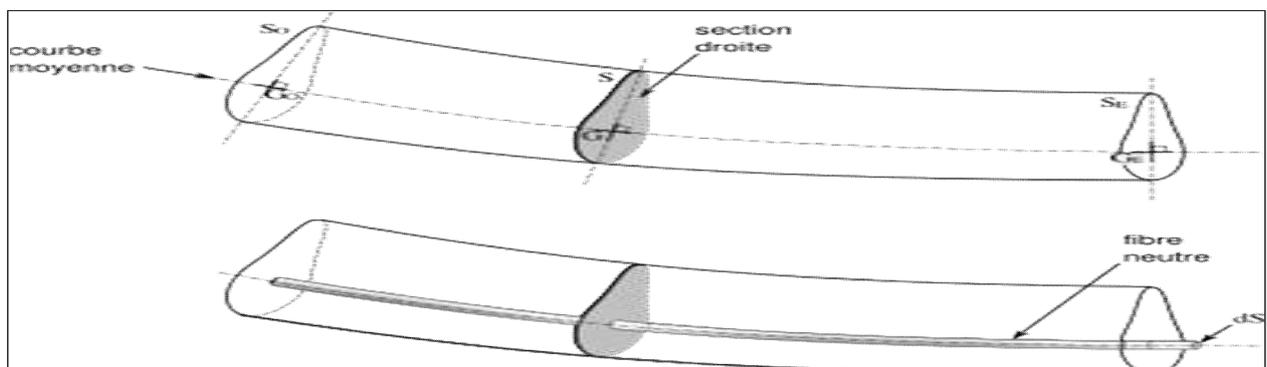


Figure II.1 Définition des termes : poutre de courbe moyenne GOGÉ, de section droite S , et fibre neutre de section ds .

Les déformations dues au cisaillement transversal sont négligées (pas de cisaillement sur la hauteur de la poutre »),

La fonction qui décrit la répartition de déplacement suivant l'épaisseur de la poutre $\phi(z)$ égale à zéro :

$$\phi(z) = \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (\text{II.1})$$

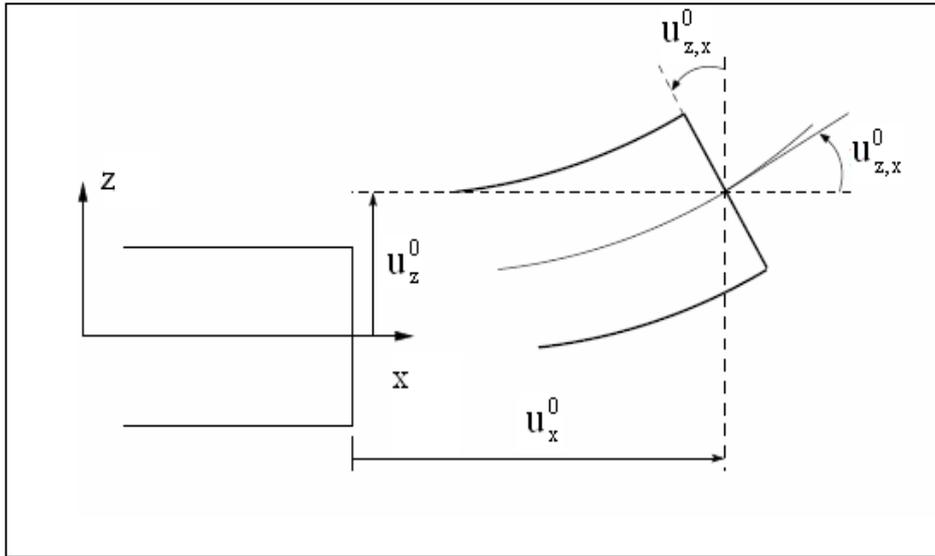


Figure II.2 Cinématique d'Euler Bernoulli (Dufort, 2000)

Pour le cas des poutres élancées et d'après la théorie classique des poutres, le déplacement d'un point « M » est donné par les deux composantes suivantes:

$$U(M) = \begin{cases} u(x, z) = u^0(x) - z\phi^0(x) \\ w(x, z) = w^0(x) \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

C'est le déplacement suivant X et bien la $w(x, z)$ est le déplacement dans la direction de \mathbf{Z} ou flèche.

La rotation autour de l'axe Y , provoquée par la flexion est tel que:

$$w_x^0(x) = \frac{\partial w^0}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (\text{II.3})$$

$u^0(x)$ et $w^0(x)$ sont les composantes de déplacement au milieu de la section et sur la ligne moyenne de la poutre, respectivement le long des axes X et Z . Lorsque cette théorie est utilisée pour l'analyse des fréquences naturelles des poutres, les flèches sont sous-estimées. Ceci est la conséquence de négliger la déformation transversale.

II.2.2 Théorie de Timoshenko

La théorie de Timoshenko est plus riche et plus générale que la théorie élémentaire des poutres au prix d'une fonction supplémentaire. Cette solution permet d'affiner les solutions analytiques issues de la théorie classique. Toutefois ces solutions sont entachées d'erreurs au voisinage des appuis et de la zone indentation où nous pouvons avoir des concentrations de contrainte et des champs de déplacement non homogènes.

Elle s'applique sur des poutres courtes, elle est basée sur le principe; qu'après déformation, la section plane reste plane mais elle perd sa perpendicularité par rapport à la ligne moyenne de la poutre (figure II.2). Ceci est dû au cisaillement transversal, découvert par Timoshenko, sur l'épaisseur de la poutre. Cette théorie est analogue à la théorie de "Reissner-Mindlin" dans le cas des plaques épaisses. (Timoshenko et al, 1972).

Dans le cas où nous avons un élancement faible, l'effet du cisaillement devient plus important

Sur la déformée. Alors, la fonction $\phi(z)$ est égale à Z . Il existe un cisaillement uniforme et les déformations dues au cisaillement transversal ne sont pas négligées, c'est la théorie de premier ordre (FSDBT).

Le déplacement d'après Timoshenko s'écrit comme suit :

$$U(M)= \begin{cases} u(x, z) = u^0(x) - zW'_x(x) + zY'_{xz}(x) \\ w(x, z) = w^0(x) \end{cases} \quad (II.4)$$

zY'_{xz} : est la distorsion ou la déformation angulaire mesurée sur la ligne moyenne de la poutre.

el que :

$$\gamma'_{xz}(x) = W'_x(x) - \phi^0(x) \quad (II.5)$$

$\phi^0(x)$: Etant la rotation totale de la section mesurée sur la ligne moyenne de la poutre.

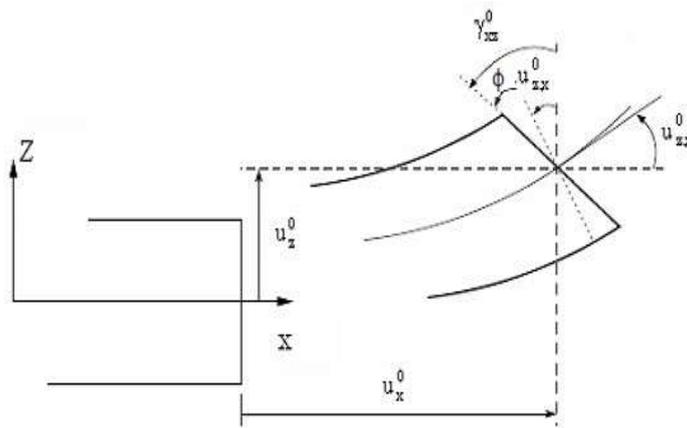


Figure II.3 Cinématique de Timoshenko (Timoshenko et al, 1972)

Par définition, la distorsion est donnée par la relation suivante:

$$\gamma_{xz}(x) = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = -W'_x(x) + \gamma'_{xz}(x) + W'_x(x) \quad (II.6)$$

$$\gamma_{xz}(x) = \gamma'_{xz}(x) \quad (II.7)$$

Sachant que la contrainte de cisaillement est égale:

$$\tau_{xz} = G_{KZ}\gamma_{KZ} = G_{KZ}\gamma'_{KZ} \quad (II.8)$$

G_{KZ} : est le module de cisaillement transversal qui est supposé constant.

Avec cette théorie, les contraintes tangentielles de cisaillement sont constantes et uniformes sur toute l'épaisseur de la poutre; cela veut dire qu'elles existent même sur les bords supérieurs et inférieurs de la poutre et pourtant il n'ya aucun chargement qui induit le cisaillement. Cette contradiction mène à introduire des coefficients de correction pour mieux considérer le cisaillement transversal. Ces coefficients correcteurs notés "k" dépendent de la forme géométrique de la poutre considérée (par exemple, pour une poutre de section rectangulaire $k=5/6$).

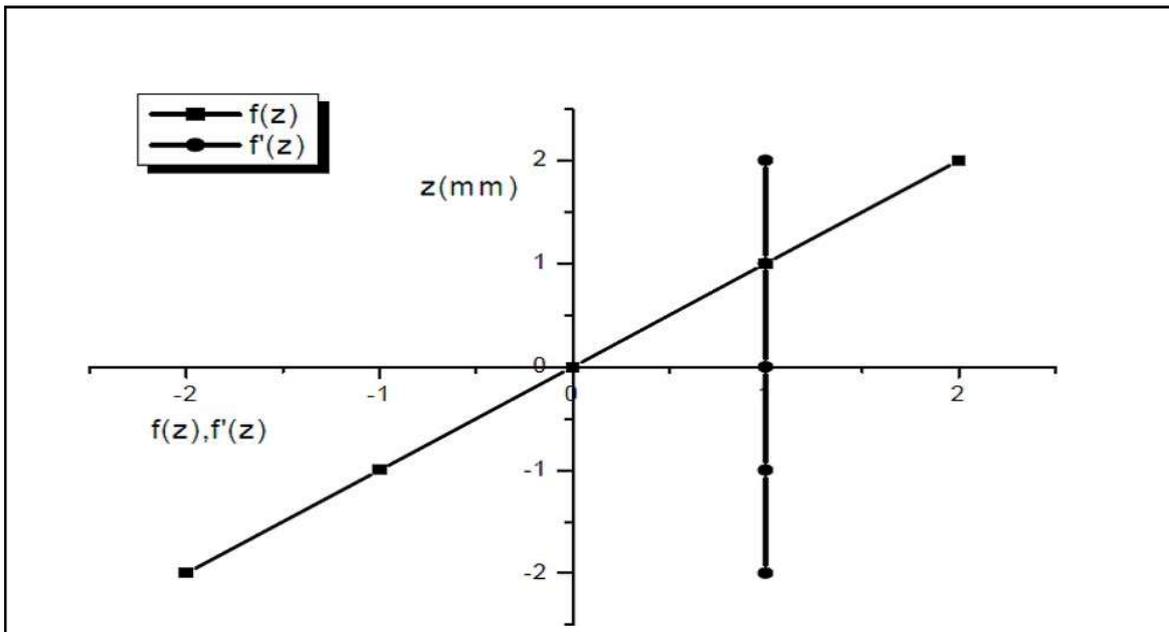


Figure II.4 Variation de la fonction de gauchissement $f(z) = z$ et $f'(z)$ en fonction de l'épaisseur.

Les non nullité des contraintes tangentielles sur les bords extrêmes de la poutre et l'introduction des coefficients de correction de cisaillement ont menés d'autres chercheurs à essayer de trouver une autre théorie pouvant ne pas tenir compte de ces facteurs; c'est "la théorie d'ordre élevé".

II.2.3 Théorie d'ordre élevée

Dans cette théorie la distribution des champs de déplacement est non linéaire selon l'épaisseur de la poutre. Elle est plus précise que la théorie du premier ordre puisqu'elle introduit une fonction qui tient compte du phénomène de "gauchissement».Ce phénomène apparaît lorsque la section transversale de la poutre perd sa planéité (figure II.5). La $\phi(z)$ fonction représente le gauchissement et sa dérivée $\phi'(z)$ le cisaillement.

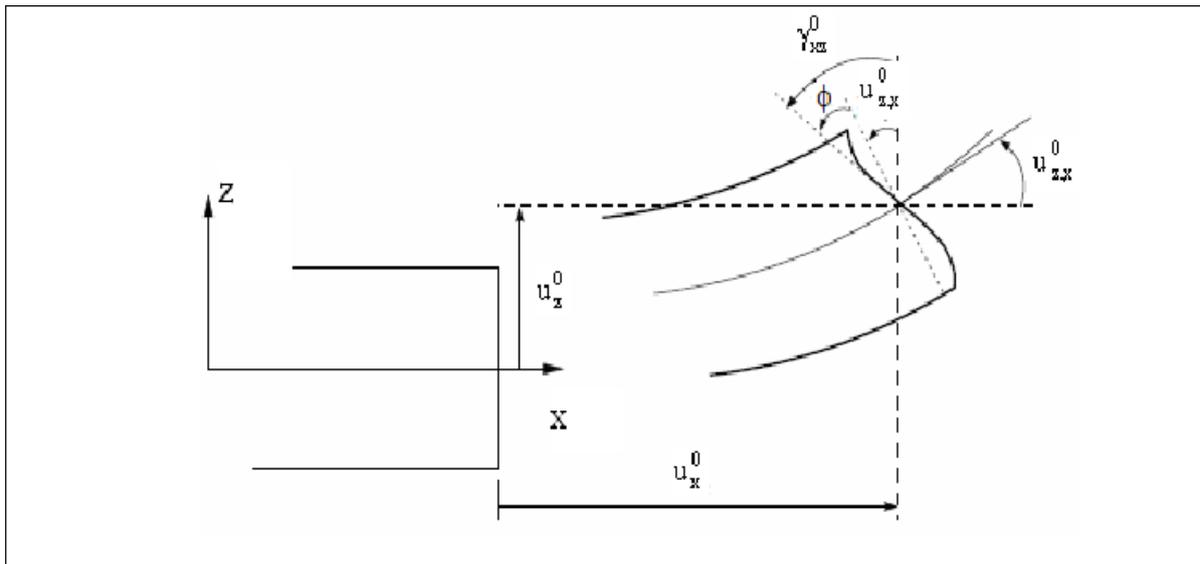


Figure II.5 Cinématique de la Théorie d'Ordre Elevé.

Dans ce cas, le champ de déplacement devient:

$$U(M) = \begin{cases} u(x, z) = u^0(x) - zw_x^0(x) + \Phi(z)\gamma_{xz}^0(x) \\ w(x, z) = w^0(x) \end{cases} \quad (II.9)$$

$$\gamma_{xz}(x) = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = -w_x^0(x) + \Phi'(z)\gamma_{xz}^0(x) + w_x^0(x) \quad (II.10)$$

$$\gamma_{xz}(x) = \Phi'(z)\gamma_{xz}^0(x) \quad (II.11)$$

Pour que les contraintes tangentielles soient nulles sur les bords extrêmes de la poutre, on doit avoir:

$$\Phi'(z) / z = \pm \frac{h}{2} \quad (II.12)$$

C'est la condition qui nous permet d'avoir une répartition parabolique des contraintes de cisaillement sur l'épaisseur de la poutre d'une part et de choisir correctement des fonctions cubiques qui répondent à la condition (II.11).

Selon l'expression de la fonction de gauchissement $\Phi(z)$, quelques modèles sont présentés dans la littérature des nano-poutres :

- 1) Le modèle Euler-Bernoulli (la théorie des poutres classiques) (CLBT) :

$$\Phi(z) = 0 \quad (\text{II.13})$$

- 2) Le modèle de Timoshenko ou bien la théorie du premier ordre (FSDBT):

$$\Phi(z) = z \quad (\text{II.14})$$

- 3) Le modèle d'ordre élevé, avec l'approche de (Levinson, 1980), (Murthy, 1981) et (Reddy, 1984):

$$\Phi(z) = z \left(1 - \frac{4z^2}{3h^2} \right) \quad (\text{II.15})$$

- 4) Le modèle exponentiel proposé par (Afaq et al, 2003) :

$$\Phi(z) = z e^{-2\left(\frac{z}{h}\right)^2} \quad (\text{II.16})$$

- 5) Le modèle d'Aydogdu (Aydogdu, 2005):

$$\Phi(z) = z \alpha \frac{-z\left(\frac{z}{h}\right)^2}{\ln \alpha} \quad (\text{II.17})$$

Avec, h: étant l'épaisseur de la poutre. Le choix de la fonction exponentielle permet un développement en puissance pair et impair de la variable z alors que la fonction "sinus" de Touratier ne permet qu'un développement en puissance impair.

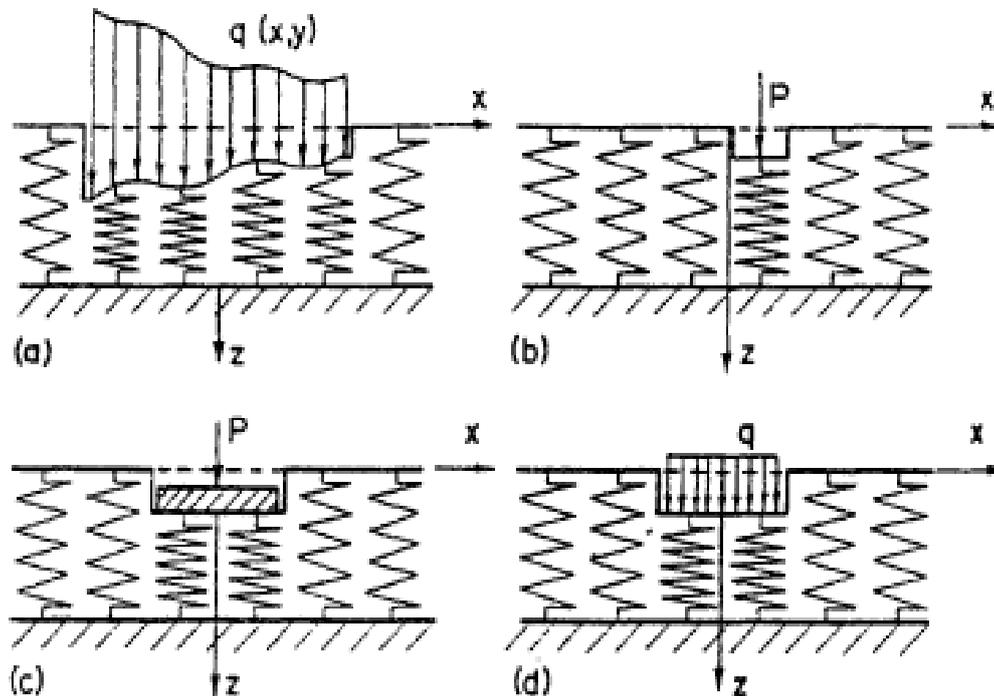
II.3 Modélisation du système solide – milieu élastique

Le nanotube est un matériau sera supposé reposer sur une matrice polymère qui représente le milieu élastique. Pour cela plusieurs approches existent, telles que Winkler en 1867, Filonenko et Borodich en 1940, Hetényi en 1950 ; Winkler-Pasternak en 1954 et Vlasov en 1960 [Iancu, 2014].

II.3.1 Fondation Winkler

La modélisation Winkler suppose une poutre posée sur un support (fondation) élastique, modélisé par une série de ressorts verticaux, identiques, séparés mais infiniment rapprochés, sans effet d'accouplement, linéairement élastiques et d'une raideur constante k_s [Iancu, 2014], [BELMAHI, 2018a]. Ce modèle ne prend pas en compte les déformations de cisaillement transversal pour simplifier l'obtention des solutions analytiques [BELMAHI, 2018a]. Le

tassement du sol se produit dans la zone située au-dessous de la surface de chargement et en dehors de ces zones, les tassements sont nuls (figure II.6). D'autre part, les tassements de la zone chargée dans le cas d'une fondation rigide restent les mêmes dans le cas d'une fondation flexible (figure II.6 c,d) [Iancu, 2014]. Cette approche présente une relation linéaire entre le déplacement algébrique normal de la structure et de la pression de contact entre la poutre et la fondation élastique [BELMAHI, 2018a]. Ce modèle a été développé à l'origine pour l'analyse des voies de chemin de fer en 1867 et qui a trouvé l'application dans l'analyse des divers problèmes d'interaction sol / structure, par exemple, des semelles sur le sol, des pieux chargés latéralement dans le sol ...etc. [BELMAHI, 2017a].



(a) charge quelconque ; (b) charge concentrée, (c) fondation rigide, (d) fondation flexible.

Figure II.6 Modèle de Winkler (d'après Selvadurai, 1979) [BELMAHI, 2018.b].

(b) charge quelconque ; (b) charge concentrée, (c) fondation rigide, (d) fondation flexible.

Figure II.6 Modèle de Winkler (d'après Selvadurai, 1979) [BELMAHI, 2018.b].

Winkler a proposé une raideur k_s indiquée nommée par la constante de proportionnalité est connue sous le nom de module de réaction de sol support [Iancu, 2014], [BELMAHI, 2018.b], Tel que :

$$q(x,y) = k_w \cdot w(x,y) \quad (\text{II.18})$$

(k_w) est proportionnel au module de Young de la matrice polymère.

II.3.2 Modèle de Vlassov (1960)

Vlasov, en 1960, a adopté l'approche de la continuité simplifiée basée sur le principe variationnel et en déduit un modèle de base à deux paramètres. Dans sa méthode, la fondation a été traitée comme une couche élastique et les contraintes ont été imposées en limitant la déflexion dans la fondation à une forme de mode appropriée, $\phi(z)$, le modèle de Vlasov à deux paramètres (figure II.7) prend en compte l'effet de l'énergie de déformation de cisaillement négligée dans le sol et les forces de cisaillement provenant du sol environnant en introduisant un paramètre arbitraire, γ , pour caractériser la distribution verticale de la déformation dans le sous-sol [Iancu, 2009a ; Madhav, 2015].

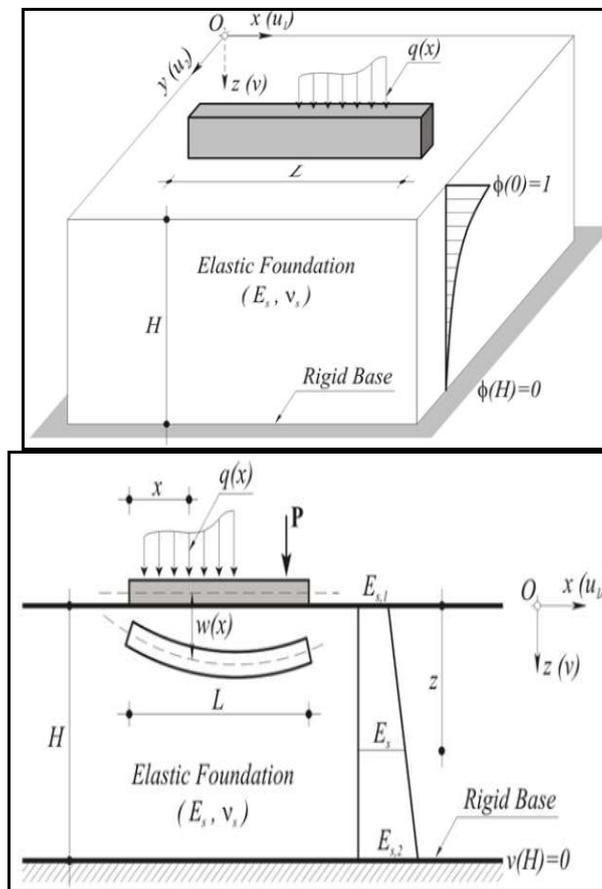


Figure II.7 Poutre reposant sur une fondation de Vlasov [Iancu, 2009a].

Supposons une poutre, supportée par un milieu élastique à deux paramètres, (Figure II.7). La réaction de ce milieu à deux paramètres soumise à une charge répartie, $q(x)$ est décrite par :

$$P(x) = k_s(x)bw(x) - k_s(x)b \frac{\partial^2 w(x)}{\partial z^2} \quad (\text{II.19})$$

En utilisant le calcul vibrationnel, les paramètres du modèle de Vlasov sont exprimés selon [Iancu, 2009b]:

$$k_s = \int_0^H \frac{E_s(1-\nu_s)}{(1+\nu_s)(1-2\nu_s)} \left(\frac{d\varphi}{dz}\right)^2 dz \quad (\text{II.20})$$

$$k_1 = \int_0^H \frac{E_s}{2(1+\nu_s)} \varphi^2 dz \quad (\text{II.21})$$

Avec $\varphi(z)$ est donnée par:

$$\varphi(z) = \frac{\sinh \gamma(1 - \frac{z}{H})}{\sinh \gamma} \quad (\text{II.22})$$

C'est une fonction définissant la variation de la déviation $v(x, y)$, dans la direction z , qui satisfait la condition limite selon :

$$\left(\frac{\gamma}{H}\right)^2 = \frac{1 - 2\nu_s}{2(1 - \nu_s)} \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{dw}{dx}\right)^2 dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} w^2 dx} \quad (\text{II.23})$$

Puisque γ n'est pas connu a priori, pour cela, en supposant initialement une valeur approximative de γ , les valeurs de k_s et k_1 sont alors évaluées à l'aide des (Éq. (II.21) et Éq. (II.22)). À partir de la solution de la déflexion de la poutre, la valeur de γ est calculée à l'aide de l'Éq. (II.23). La nouvelle valeur de γ est à nouveau utilisée pour calculer les nouvelles valeurs de k_s et k_1 . On utilise un processus itératif, la procédure est répétée jusqu'à ce que deux valeurs successives de γ soient approximativement égales [Iancu, 2009b].

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur les différentes théories des poutres à savoir la théorie classique des poutres (Euler-Bernoulli), la théorie de déformation en cisaillement du premier ordre (Timoshenko) et la théorie de déformation de cisaillement d'ordre élevé. Ainsi, nous avons parlé de différents modèles d'interaction solide-milieu

élastique existent dans la littérature. Donc, on a observé à travers ce chapitre la différence et la complexité ou les simplifications utilisé pour chaque théorie ou pour chaque modèle.

CHAPITRE III

ÉTUDE DE LA VIBRATION D'UNE NANO-POUTRE DE NTC
INCORPORÉE DANS UN MILIEU ELASTIQUE DE TYPE VLASSOV

III.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 dû au rayonnement acoustique, etc. Néanmoins, il est possible de limiter et de réduire leurs effets grâce à des nouvelles techniques très évoluées.

La formulation des théories des vibrations par Rayleigh en 1877, (Strutt (Lord Rayleigh) [84]) tel que le concept fondamental d'oscillation d'un système linéaire autour d'une position d'équilibre, et la notion de fréquences et de modes propre pour des systèmes discrets ou continus. Au cours des années 20, le développement des études des problèmes de vibration et de dynamique pour l'industrie aéronautiques, puis le développement des méthodes analytiques avec des structures définies par un petit nombre de degrés de liberté. Ensuite, les méthodes matricielles, le développement de codes des éléments finis et les différents logiciels dédiés à l'analyse vibratoire expérimentale de structures, 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 simple paroi par l'utilisation du modèle Euler-Bernoulli. Le rapport géométrique (L/d), le nombre de mode (N) et le coefficient Vlassov (k_s), sont traités pour étudier le rapport de l'amplitude (W_{NL}/W_L) en fonction du rapport de fréquence r .

III.2 Modélisation du système nanopoutre-milieu élastique

La modélisation du milieu élastique repose sur une hypothèse concernant le comportement de la réaction du substrat sous chargement. La réaction élastique peut être représentée par plusieurs modèles : (modèle à un seul paramètre et modèle à deux ou trois paramètres) [BELMAHI, 2017a ; BELMAHI, 2018.b].

Dans cette partie, nous nous intéressons au modèle à deux paramètres de Vlassov en particulier un et deux paramètres qui sont brièvement présentés dans la section suivante.

III.2.1 Modèle à deux paramètres

Le modèle de Vlassov à deux paramètres prend en compte l'effet de l'énergie de déformation de cisaillement négligée dans le sol et les forces de cisaillement provenant du sol environnant en introduisant un paramètre arbitraire, \mathcal{V} , pour caractériser la distribution verticale de la déformation dans le sous-sol [Iancu, 2009a ; Madhav, 2015].

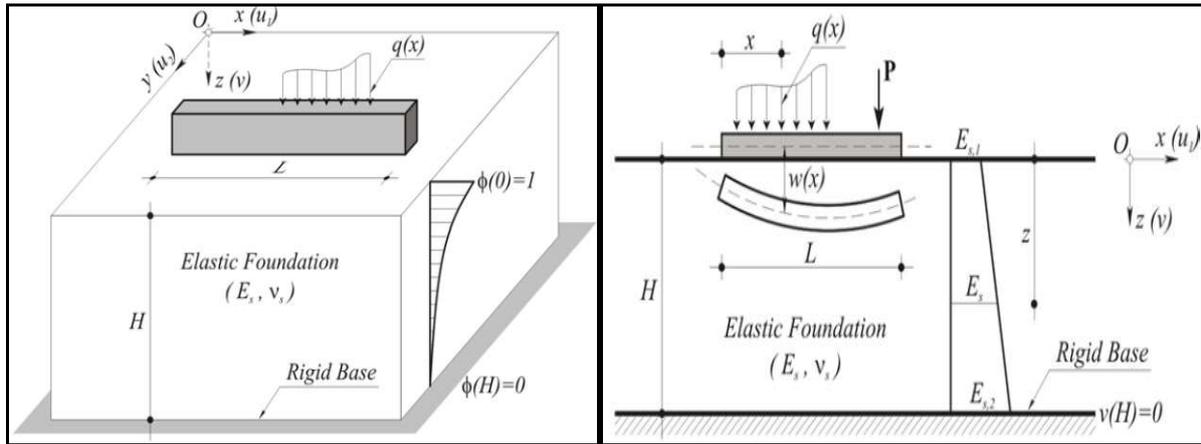


Figure III.1 Poutre reposant sur une fondation de Vlassov [Iancu, 2009a].

La réaction du milieu élastique est décrite par Vlassov selon l'équation (III.1) suivante :

$$P(x) = k(x)bw(x) - k_s(x)b \frac{\partial^2 w(x)}{\partial x^2} \quad (III.1)$$

b : est l'épaisseur de la poutre ;

w : est la déflexion de la ligne moyenne de la poutre ;

k la raideur du sol élastique Winkler.

k_s la raideur du sol élastique Vlassov.

Ainsi, si le deuxième paramètre k_s est négligé, la modélisation mécanique du milieu élastique converge vers le modèle à un paramètre dite le modèle de Winkler.

$$P(x) = k(x) b w(x) \quad (III.2)$$

Considérant une nano-poutre homogène de nanotube de carbone à paroi simple avec une longueur (L), une section constante (A) et une densité (ρ). La nanopoutre repose sur un milieu élastique de type Vlassov, selon la figure III.1.

La loi de Hooke pour un état de contrainte uni-axial est donnée par l'équation suivante (Heireche et al. 2008) :

$$\sigma(x) - (e_0 a)^2 \frac{\partial^2 \sigma(x)}{\partial x^2} = E \varepsilon \quad (III.3)$$

Où :

E est le module d'élasticité du nanotube de carbone.

$e_0 a$: est l'effet de petite échelle avec :

(a) : est une longueur caractéristique interne qui représente la longueur d'une liaison C-C,
 e_0 : est un paramètre d'ajustement).

$\varepsilon(x)$: est la déformation donnée par l'équation III.4 suivante:

$$\varepsilon(x) = -y \frac{\partial^2 w(x)}{\partial^2 x} \quad (III.4)$$

L'équation de mouvement d'un nanotube de carbone monocouche donnée par Doyle (1997) à laquelle le chargement et le milieu élastique ont été ajoutés:

$$\frac{\partial v(x)}{\partial x} + q(x) - p(x) - \rho A \frac{\partial^2 w(x)}{\partial^2 t} = 0 \quad (III.5)$$

Remplaçant l'équation (III.1) dans l'équation (III.5), on trouve la dérivée de la force de cisaillement $V(x)$:

$$\frac{\partial v(x)}{\partial x} = -q(x) + (k_b w(x) - k_s b \frac{\partial^2 w(x)}{\partial^2 x} + \rho A \frac{\partial^2 w(x)}{\partial^2 t}) \quad (III.6)$$

Où :

$w(x)$ est le déplacement dans la direction z ,

(ρA) est la masse par unité de longueur de la nanopoutre,

$V(x)$: est la force de cisaillement,

$q(x)$: la charge répartie sur la nanopoutre.

D'après les théories classiques de la résistance des matériaux, la résultante de l'effort de cisaillement $V(x)$ de la section du nanotube est égale à la dérivée du moment de flexion par rapport à la variable x :

$$V(x) = \frac{\partial M(x)}{\partial x} \quad (III.7)$$

La dérivée de la force de cisaillement $V(x)$ est égale à la deuxième dérivée du moment de flexion $M(x)$ selon l'équation (III.8) suivante :

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial^2 M(x)}{\partial^2 x} \quad (III.8)$$

Et le moment de flexion résultant dans une section de nanopoutre est donné comme suit:

$$M(x) = \int_A y \sigma dA \quad (III.9)$$

A partir des équations (III.3), (III.4) - (III.6), (III.8) et (III.9) le moment de flexion est égal à :

$$M(x) = -EI \frac{\partial^2 w(x)}{\partial x^2} + (e_0 a)^2 \left[\rho A \frac{\partial^2 w(x)}{\partial t^2} - q(x) + k b w(x) - k_s b \frac{\partial^2 w(x)}{\partial x^2} \right] \quad (III.10)$$

Où:

I : est le moment d'inertie pour la section transversale du nano-poutre.

Dérivant maintenant l'équation (III.10) on trouve la force de cisaillement V(x):

$$V(x) = -EI \frac{\partial^3 w(x)}{\partial x^3} + (e_0 a)^2 \left[\rho A \frac{\partial^3 w(x)}{\partial x \partial t^2} - \frac{\partial q(x)}{\partial x} + k b \frac{\partial w}{\partial x} - k_s b \frac{\partial^3 w(x)}{\partial x^3} \right] \quad (III.11)$$

En remplaçant la première dérivée de l'équation (III.11) dans l'équation (III.5), nous obtenons l'équation différentielle générale unidimensionnelle dans le cas non local de la vibration forcée d'une nanopoutre basée sur la théorie d'Euler-Bernoulli et suivant l'approche de Vlassov:

$$EI \frac{\partial^4 w(x)}{\partial x^4} + \left(1 - (e_0 a)^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \left(\rho A \frac{\partial^2 w(x)}{\partial t^2} - q(x) + k b w(x) - k_s b \frac{\partial^2 w(x)}{\partial x^2} \right) = 0 \quad (III.12)$$

Ainsi, dans le cas du modèle local (eoa=0) avec un vibration non forcée, l'équation (III.12) représentera l'équation différentielle dominante de la vibration libre de nanopoutre d'Euler Bernoulli suivante

$$EI \frac{\partial^4 w(x)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w(x)}{\partial t^2} + k b w(x) - k_s b \frac{\partial^2 w(x)}{\partial x^2} = 0 \quad 0 \leq x \leq l \quad (III.13)$$

Retourner à l'équation (III.12), la résolution de celle-ci avec des dérivées partielles d'ordre quatre se fait par la technique de séparation des variables x et t . Sachant que nous traitons un problème de vibration, on supposera que le déplacement $w(x,t)$ et le chargement $q(x, t)$ sont des fonctions sinusoïdales de pulsation (ω) [BELMAHI, 2018.a; BELMAHI, 2018.b]. Nous posons donc :

$$\begin{cases} w(x,t) = \sum w_{NL} \sin \lambda x \sin \omega t \\ q(x,t) = q_m \sin \lambda x \sin \omega t \end{cases} \quad \lambda = \frac{N\pi}{l} \quad (m = 1, 2, \dots) \quad (III.14)$$

La résolution de cette équation différentiel (III.12) donne l'amplitude dans le modèle de

la théorie non local, telle que:

$$W_{NL}(x) = \frac{q_m L^4 (1 + \lambda^2 (e_0 a)^2)}{EI \lambda^4 L^4 - \rho A \omega^2 L^4 + k b L^4 + k_s b \lambda^2 L^4 - (e_0 a)^2 \rho A \omega^2 \lambda^2 L^4 + (e_0 a)^2 \lambda^2 L^4 k b + (e_0 a)^2 k_s b \lambda^2 L^4} \quad (\text{III.15})$$

Ou plus simplifier :

$$W_{NL}(x) = \frac{q_m L^4 (1 + \lambda^2 (e_0 a)^2)}{EI \lambda^4 L^4 + (1 + \lambda^2 (e_0 a)^2) (k b L^4 + k_s b \lambda^2 L^4 - \rho A \omega^2 L^4)} \quad (\text{III.16})$$

Ou encore :

$$W_{NL}(x) = \frac{q_m L^4 \Psi}{EI (\beta^4 + \Psi (\gamma + \lambda^2 \alpha - \Omega^2))} \quad (\text{III.17})$$

Avec :

$$\begin{cases} \Psi = 1 + \lambda^2 (e_0 a)^2 \\ \beta = \lambda L \\ \Omega^2 = \rho A \frac{\omega^2 L^4}{EI} \\ \gamma = \frac{k b L^4}{EI} \\ \alpha = \frac{k_s b \lambda^2 L^4}{EI} \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

Dans le cas du modèle local ($e_0 a = 0$), l'amplitude (W_L) sera exprimée comme suit:

$$W_L(x) = \frac{q_m L^4}{EI (\beta^4 + \gamma + \lambda^2 \alpha - \Omega^2)} \quad (\text{III.19})$$

Pour une vibration libre où $q(x) = 0$, sans milieu élastique ($k = 0$) et dans le cas du modèle de la théorie local ($e_0 a = 0$), à partir de l'équation (III.15), on a:

$$EI \lambda^4 - \rho A \omega_{NL}^2 = 0 \quad (\text{III.20})$$

Où:

$$\omega_{NL}^2 = \frac{EI \lambda^4}{\rho A} \quad (\text{III.21})$$

Dans l'équation. (III.18) nous avons:

$$\Omega^2 = \rho A \frac{\omega_{NL}^2 L^4}{EI} \quad (\text{III.22})$$

En substituant l'équation (III.21) dans l'équation (III.22) nous avons:

$$\Omega^2 = \beta^4 \gamma^2 \quad (\text{III.23})$$

Avec :

$$r^2 = \frac{\omega_{NL}^2}{\omega_L^2} \quad (III.24)$$

Donc, (r) est le rapport de fréquence entre la vibration forcée et la vibration libre. Pour étudier l'effet de la localité des contraintes ou de la charge, le rapport entre les deux amplitudes non locale et locale calculé vaut:

$$\frac{W_{NL}}{W_L} = \frac{\Psi \beta^4 (1-r^2) + \Psi(\gamma + \lambda^2 \alpha)}{\beta^4 (1-\Psi r^2) + \Psi(\gamma + \lambda^2 \alpha)} \quad (III.25)$$

III.3 Conclusion

Les théories d'élasticité sont la base du calcul de différents problèmes de la mécanique du solide. La théorie d'élasticité non locale suppose que l'effort à un point de référence dans un corps dépend non seulement des contraintes a ce point, mais également des contraintes a tous les autres points du corps. L'existence de plusieurs modèles pour représenter un milieu élastique tel que, Winkler, Pasternak ou Vlassov 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 permettront par la suite de tracer plusieurs courbes prenant en compte : l'effet d'échelle (e_0a), le nombre de mode (N), le rapport géométrique (L/d) et le coefficient du milieu élastique Winkler (k) et Vlassov (k_g).

CHAPITRE IV

DISCUSSIONS DES RESULTATS

IV.1 Introduction

Ce chapitre a été consacré à l'étude et à l'analyse des différents résultats de la modélisation de la vibration forcée d'une nano-poutre de carbone mono couche (NTC) entouré par un milieu élastique de type Vlassov, représenté et modélisé par différents types de matrice polymère.

La variété de paramètres liés à ce modèle nous a permis de tracer un nombre important de courbes en fonction du rapport d'aspect (L/d), la rigidité du milieu élastique et le nombre de mode N .

IV.2 Résultats et discussions

IV.2.1 Données de calcul

Supposons une nano poutre de carbone reposée sur un milieu élastique de type Vlassov selon la figure IV.1

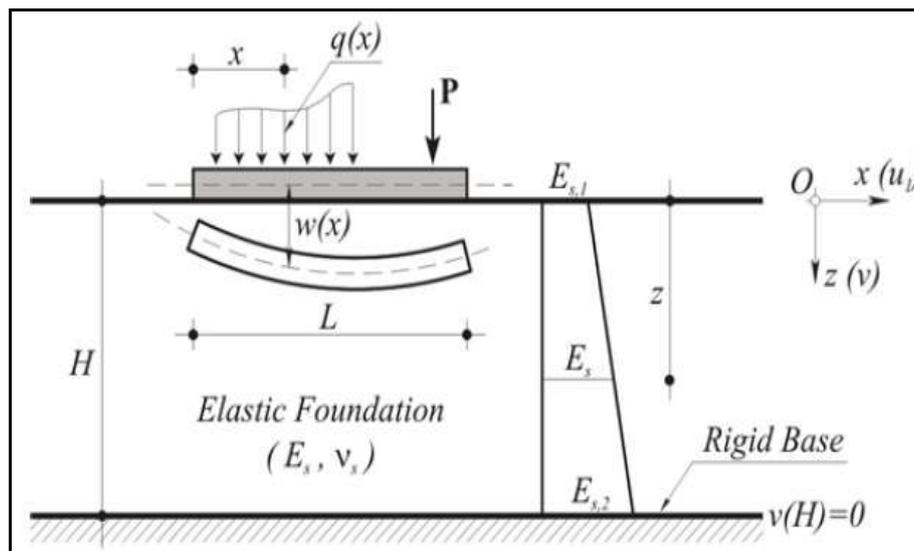


Figure IV.1 : Une poutre repose sur une fondation élastique de type Vlassov.

Les caractéristiques des matériaux sont les suivantes : épaisseur de nanotube ($t=0.34\text{nm}$), la masse volumique ($\rho = 2.3\text{g/cm}^3$), le diamètre de nanotube ($d=0.7\text{nm}$), le module de Young ($E= 1\text{Tpa}$). Les coefficients Vlassov k_s et et la rigidité k dépendent du type de la matrice étudiée.

IV.2.2 Effets du milieu élastique Vlassov

Le tableau IV.1 représente la variation du rapport de l'amplitude (W_{NL}/W_L) avec le rapport de fréquence (r) de nanotube de carbone placé dans une matrice élastique en polymère selon le modèle de Vlassov. Les différents types de polymère considérés sont : Polyéthylène (PE), Polycarbonate (PC), Résine époxy et Polyester.

Tableau IV.1 Variation du rapport de l'amplitude (W_{NL}/W_L) avec le rapport de fréquence (r) de nanotube de carbone situé dans différents types de matrice en polymère.

r	Polyéthylène (PE)		Polycarbonate (PC)		Résine époxy		Polyester	
	k=0.9	ks=0.96	k=2.2	ks=1.95	k=2.7	ks=2	k=3.2	ks=3
2	0,9775221307		0,9768593164		0,9765922857		0,9763192848	
2,5	0,9871412100		0,9869270019		0,9868422042		0,9867563820	
3	0,9915571136		0,9914652921		0,9914292313		0,9913928995	
3,5	0,9939944795		0,9939481664		0,9939300579		0,9939118569	
4	0,9954950792		0,9954690690		0,9954589259		0,9954487470	
4,5	0,9964892692		0,9964734926		0,9964673512		0,9964611942	
5	0,9971838756		0,9971737332		0,9971697899		0,9971658394	
5,5	0,9976891990		0,9976823744		0,9976797234		0,9976770688	
6	0,9980687460		0,9980639814		0,9980621319		0,9980602806	
6,5	0,9983613049		0,9983578758		0,9983565455		0,9983552140	
7	0,9985917090		0,9985891771		0,9985881951		0,9985872128	
8	0,9989269749		0,9989255056		0,9989249361		0,9989243666	
9	0,9991549708		0,9991540590		0,9991537061		0,9991533532	
10	0,9993171354		0,9993165399		0,9993163096		0,9993160793	

La figure IV.2 représente la variation du rapport de l'amplitude (W_{NL}/W_L) avec le rapport de fréquence (r) de nanotube de carbone situé dans différents types de polymère (matrice élastique).

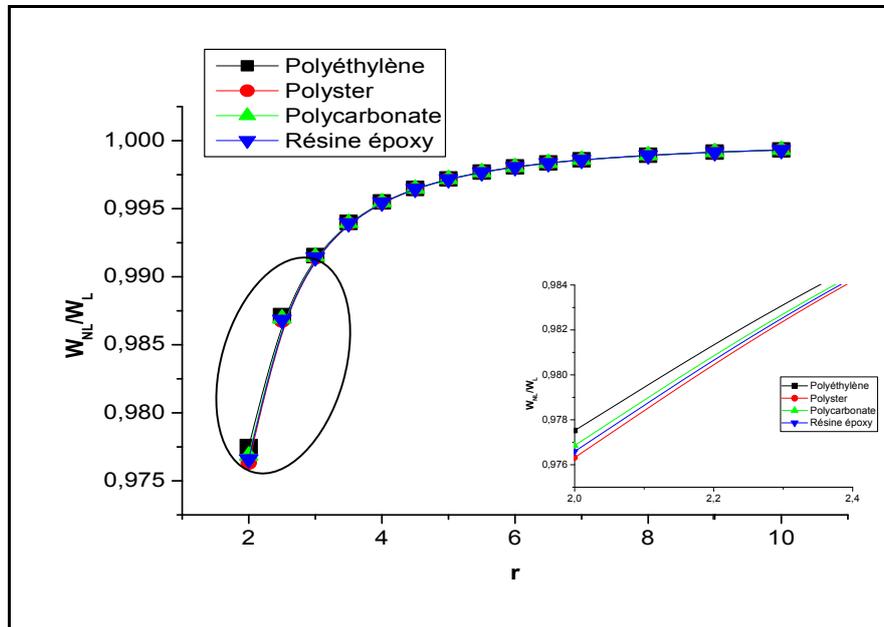


Figure IV.2 Variation du rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L) en fonction de la fréquence (r).

D'après le calcul effectué dans le chapitre III et les résultats représentés dans les tableaux IV.1, on admet et on constate que l'effet du calcul non local est important lorsque le rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L) tend vers « 0 » et inversement l'effet non local n'a pas d'importance lorsque le rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L) tend vers « 1 ».

Sur la figure IV.2, on remarque bien que la variation du rapport de l'amplitude (W_{NL}/W_L) avec le rapport de fréquence (r) est considérable et importante pour les premières fréquences $r < 5$, (Exemple de Polyéthylène (PE) : varie de 0,977 à 0,997 tableau IV.1).

Entre les valeurs de rapport de fréquence ($5 < r < 8$) la variation du rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L) devient faible (Exemple de Polyéthylène (PE) : varie de 0,997 à 0,998 tableau IV.1). À partir de la valeur de $r > 8$, la variation est négligeable et tend vers l'unité ($W_{NL} = W_L$), ce que signifie dans cet intervalle que le calcul peut être simplifié et effectué seulement avec le calcul local.

Ainsi, à partir de la même courbe on peut constater que l'effet de la rigidité du milieu élastique Vlassov sur le calcul non local est considérable seulement pour des petites fréquences ($r < 3$). Dans cet intervalle l'effet non local augmente avec l'augmentation de la rigidité Vlassov telle que le polyster et la résine époxy et diminue avec la diminution de la

rigidité telque le Polycarbonate et Polyéthylène (PE). Au dela de ($r > 3$) il est constaté que la rigidité de la matrice Vlassov n'a pas d'effet sur le rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L).

Cette observation nous a permis de conclure que la dépendance entre l'amplitude et la fréquence est très faible pour toute fréquence de vibration forcée $r > 5$, où l'utilisation de la théorie d'élasticité local est efficace et l'effet de la rigidité est négligé, par contre pour tout rapport de fréquence $r < 5$, la théorie d'élasticité no-local est la plus adaptée où la présence du milieu élastique a un effet sur les résultats.

IV.2.3 Comparaison entre les trois milieux élastiques Vlassov, Pasternak et Winkler

Le tableau IV.2 représente une comparaison de la variation du rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L) avec le rapport de fréquence (r) de nanotube de carbone pour les trois modèles des milieux élastiques (Vlassov, Pasternak et Winkler).

Tableau IV.2 Variation du rapport de l'amplitude (W_{NL}/W_L) avec le rapport de fréquence (r) de nanotube de carbone : comparaison Vlassov, Pasternak et Winkler.

Polyéthylène (PE)					
r	Vlassov (Present travail)		Pasternak (PFE Zitouni 2019)		Winkler (BELMAHI, 2018)
	<i>k = 0.9</i>	<i>ks = 0.96</i>	<i>k = 0.9</i>	<i>ks = 0.321</i>	<i>k = 0.9</i>
2	0,9775221307		0,9775229398		0,977701924
2,5	0,9871412100		0,9871414748		0,987200251
3	0,9915571136		0,9915572278		0,991582607
3,5	0,9939944795		0,9939945373		0,994007389
4	0,9954950792		0,9954951117		0,995502347
4,5	0,9964892692		0,9964892890		0,996493685
5	0,9971838756		0,9971838883		0,997186718
5,5	0,9976891990		0,9976892076		0,997691113
6	0,9980687460		0,9980687520		0,998070083
6,5	0,9983613049		0,9983613092		0,998362268
7	0,9985917090		0,9985917122		0,998592420
8	0,9989269749		0,9989269767		0,998927388
9	0,9991549708		0,9991549720		0,999155226
10	0,9993171354		0,9993171361		0,999317302

La figure 4.3 représente la variation du rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L) avec le rapport de fréquence (r) de nanotube de carbone situé dans différents cas de milieux élastiques (Vlassov, Pasternak et Winkler).

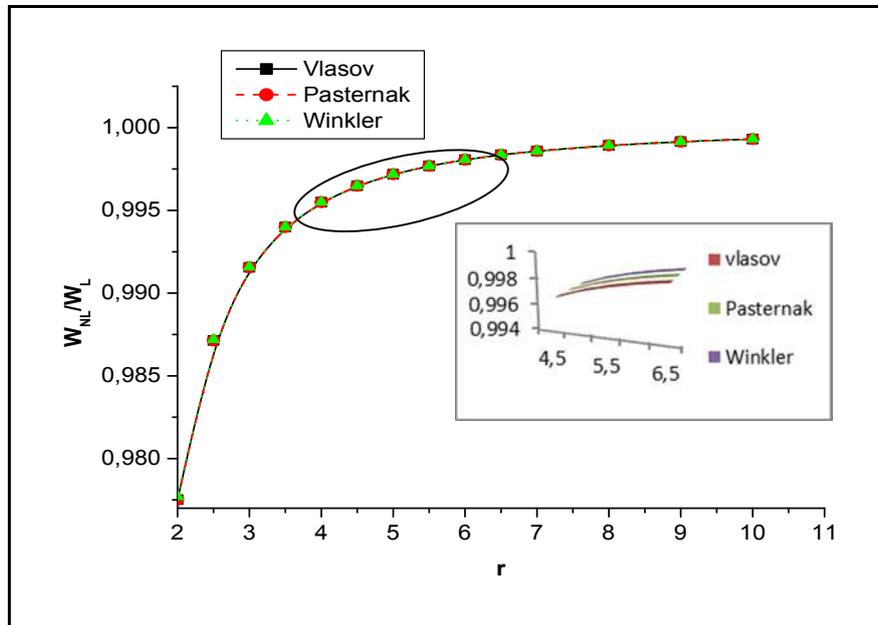


Figure IV.3. Comparaison des résultats :milieu élastique Vlassov, Pasternak et Winkler.

La comparaison se fait entre le calcul en utilisant un milieu élastique de type Vlassov effectué dans ce présent travail, le calcul en utilisant un milieu élastique de type Winkler (BELMAHI, 2018) et un autre utilisant le milieu élastique de type Pasternak (PFE Zitouni, 2019) : Il est constaté ici que les trois types de matrices considérées (Vlassov, Winkler et Pasternak) donnent presque les memes résultats (memes valeurs) avec une faible différence de (0.0001 ou 1/10000), neanmoins pour des petites fréquences ($r < 2.5$) cette différence est augmentée jusqu'au (0.001 ou 1/1000), ce qui montre que les trois modèles sont efficaces. Ainsi, pour des calculs qui nécessitent de grands détails et précisions de calcul, le milieu Vlassov sera le mieu adapté.

Comme conclusion on peut dire que les hypothèses de Winkler peremettent la simplification de calcul et aussi d'obtenir des résultats comparables avec les autres types de milieux élastiques (Pasternak et Vlasov), ainsi, le choix de la méthode de calcul dépend des résultats attendus par le chercheur ou le concepteur.

IV.2.4 Effet du rapport d'aspect

Le tableau IV.3 représente la variation du rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L) avec le rapport de fréquences (r) et pour différentes géométries (rapport L/d) de nanotube de carbone situé dans une matrice polymère de type Polyéthylène.

Tableau IV.3. Variation du rapport d'amplitude (W_{NL}/W_L) avec le rapport de fréquence (r) et pour différentes géométries (rapport L/d), matrice polymère de type Polyéthylène.

r	Polyéthylène (PE) $ks = 0.96 ; Kp = 0.9, N = 6$		
	$L/d = 10$	$L/d = 20$	$L/d = 30$
2	0,9301966898	0,9775221307	0,9885596677
2,5	0,9589041737	0,9871412100	0,9937294906
3	0,97265117460	0,9915571136	0,9959605445
3,5	0,98039975850	0,9939944795	0,9971562986
4	0,9852286861	0,9954950792	0,9978803024
4,5	0,9884528769	0,9964892692	0,9983549690
5	0,9907173965	0,9971838756	0,9986842658
5,5	0,9923710132	0,9976891990	0,9989226314
6	0,9936164839	0,9980687460	0,9991010086
6,5	0,9945785301	0,9983613049	0,9992381201
7	0,9953374308	0,9985917090	0,9993458677
8	0,9964436863	0,9989269749	0,9995022862
9	0,9971973222	0,9991549708	0,9996084100
10	0,9977340120	0,9993171354	0,9996837699

La figure IV.4 représente la variation du rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L) avec le rapport de fréquences (r) et pour différentes géométries (rapport L/d) de nanotube de carbone situé dans une matrice polymère de type Polyéthylène (milieu élastique Vlassov).

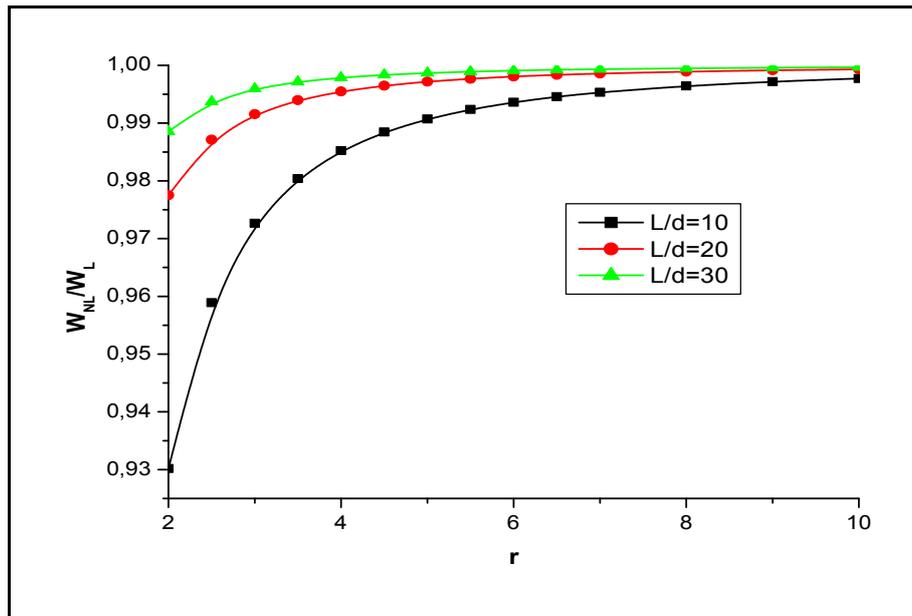


Figure IV.4 variation du rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L) en fonction du rapport de fréquences (r) pour différentes valeurs de rapport dimensionnel L/d .

Il est clair sur la figure IV.4 que la négligence de la variation du rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L) augmente en faisant augmenter le rapport d'aspect (L/d). Cela signifie que le rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L) est important pour les nanotubes les plus courts ($L/d < 10$ selon cette étude).

Comme conclusion la théorie d'élasticité non-local est mieux adaptée pour les nanotubes de carbone les plus courts ($L/d < 10$) et vis versa.

IV.2.5 Effet de nombre de mode

Le tableau IV .4 représente la variation du rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L) avec le rapport de fréquences (r) et pour différentes nombre de mode (N) de nanotube de carbone situé dans une matrice polymère de type Polyéthylène.

Tableau IV.4. Variation du rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L) avec le rapport de fréquence (r) pour différentes modes (N), matrice polymère de type Polyéthylène.

r	Polyéthylène (PE) $k_s=0.96$; $k_w=0.9$, $L/d=20$			
	$N=2$	$N=6$	$N=10$	$N=12$
2	1.004380055	0,977522131	0,946941779	0,921886641
2,5	0,981206139	0,98714121	0,969009431	0,953835712
3	0,997482913	0,991557114	0,979453847	0,969221755
3,5	0,998756095	0,99399448	0,985306285	0,977919122
4	0,999214524	0,995495079	0,988940998	0,983348454
4,5	0,999445943	0,996489269	0,991362498	0,986977432
5	0,999583191	0,997183876	0,993060698	0,989528129
5,5	0,99967278	0,997689199	0,994299447	0,991391697
6	0,999735133	0,998068746	0,995231711	0,992795845
6,5	0,99978058	0,998361305	0,995951392	0,993880779
7	0,999814884	0,998591709	0,996518838	0,994736816
8	0,999862615	0,998926975	0,99734559	0,995984981
9	0,999893683	0,999154971	0,997908528	0,996835503
10	0,999915133	0,999317135	0,998309274	0,997441294

La figure IV.5 représente la variation du rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L) avec le rapport de fréquences (r) et pour différentes nombre de mode (N) de nanotube de carbone situé dans une matrice polymère de type Polyéthylène.

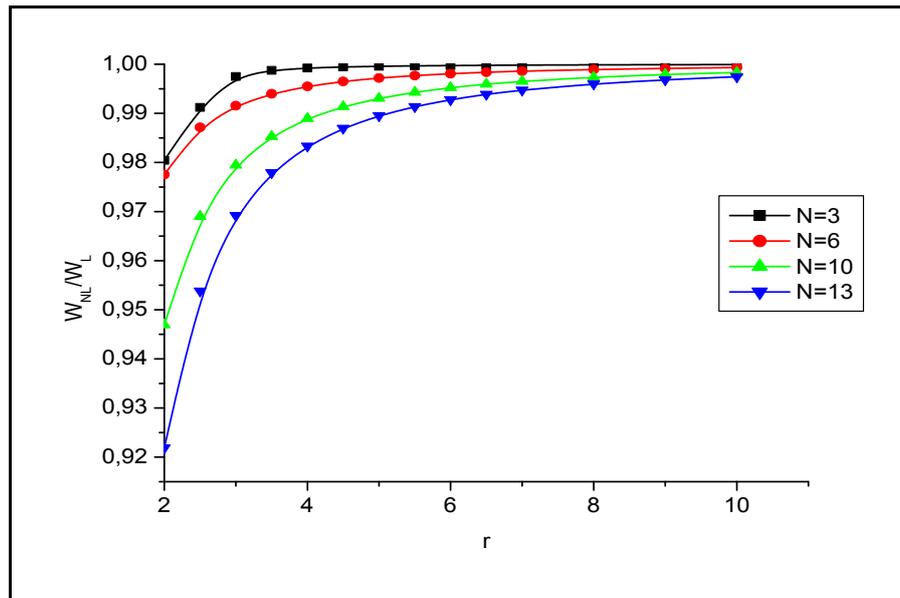


Figure IV.5 Variation du rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L) en fonction de la fréquence (r) pour différents modes (N).

Il est clair sur la figure IV.3 que le rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L) varie à la fois en fonction de rapport de fréquence r et le nombre de mode N . Cette variation passe par deux étapes :

Pour r varie de 1 à 4 ou jusqu'à 5, l'intensité du rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L) est importante. A partir de $r = 5$, la dépendance est négligeable. Aussi on peut constater que pour les premiers modes ($N \leq 3$), la dépendance est négligeable.

Ce que permis de conclure que l'effet non local est important pour les modes $N \geq 3$.

IV.2.6 Effet du coefficient de cisaillement

Le tableau IV.5 représente la variation du rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L) avec le rapport de fréquence (r) et pour différentes valeurs de coefficient Vlassov (k_s) de nanotube de carbone situé dans une matrice polymère de type Polyéthylène.

Tableau IV.5. Variation du rapport d'amplitude (W_{NL}/W_L) avec le rapport de fréquence (r) pour différents coefficient Vlassov (k_s), matrice polymère de type Polyéthylène.

r	Polyéthylène (PE) K=0.9, L/d=20 ; N=6			
	$k_s = 0.96$	$k_s = 1.95$	$k_s = 2$	$k_s = 3$
2	0,9775221307	0,977521003	0,97752095	0,9775198057
2,5	0,9871412100	0,987140841	0,98714082	0,9871404492
3	0,9915571136	0,991556954	0,99155695	0,9915567847
3,5	0,9939944795	0,993994398	0,99399439	0,9939943136
4	0,9954950792	0,995495033	0,99549503	0,9954949854
4,5	0,9964892692	0,996489241	0,99648924	0,9964892121
5	0,9971838756	0,997183858	0,99718386	0,9971838388
5,5	0,9976891990	0,997689187	0,99768919	0,9976891742
6	0,9980687460	0,998068738	0,99806874	0,9980687287
6,5	0,9983613049	0,998361299	0,9983613	0,9983612926
7	0,9985917090	0,998591704	0,9985917	0,9985916997
8	0,9989269749	0,998926972	0,99892697	0,9989269694
9	0,9991549708	0,999154969	0,99915497	0,9991549666
10	0,9993171354	0,999317134	0,99931713	0,9993171325

La figure IV.6 représente la variation du rapport de l'amplitude (W_{NL}/W_L) avec le rapport de fréquence (r) pour différentes coefficient Vlassov (k_s) de nanotube de carbone situé dans une matrice polymère de type Polyéthylène.

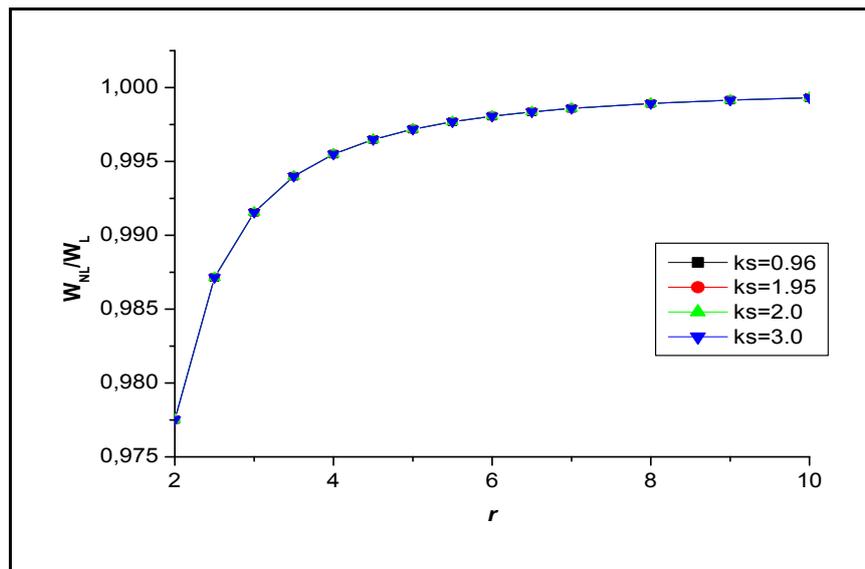


Figure IV.6 Variation du rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L) en fonction des coefficients Vlassov (ks).

A partir de la courbe de la figure IV.6, on peut constater que la variation du coefficient de Vlassov ks n'a pas donnée de grandes influences sur le calcul. Neanmoins, on peut remarquer sur le tableau que l'effet non local augmente avec l'augmentation du coefficient Vlassov pour les petites fréquences ($r < 4$). entre ($4 < r < 8$), la dépendance est faible et par conséquent on peut avoir un effet faible sur le calcul par la théorie non-locale.

Au-delà de $r > 7$, il est constaté que le coefficient Vlassov n'a pas d'effet sur le rapport des amplitudes (W_{NL}/W_L) et par conséquent le calcul peut se faire par la théorie locale.

Cette observation nous a permis de conclure que la dépendance entre l'amplitude et la fréquence est très faible pour toute fréquence de vibration forcée (r) plus grande de ($r > 4$) où l'utilisation de la théorie d'élasticité local est efficace, ainsi, le résultat peut être obtenu en appliquant seulement le modèle simplifié de Winkler.

IV.3 Conclusion

Ce travail qui a été consacré à l'étude du comportement d'une nanopoutre de carbone monoparois supposée soumise à une vibration forcée selon le modèle de poutre d'Euler-Bernoulli et le milieu élastique de Vlassov. Des rapports des amplitudes entre le cas non local et local ont été calculés en fonction de plusieurs paramètres liés au nanotube de carbone tel que : le rapport de fréquence (r), le nombre de mode (N), le rapport d'aspect ou géométrique (L/d) et d'autres paramètres liés à la matrice tel que le coefficient Vlassov ks .

Selon cette étude nous avons conclu que :

Le rapport de fréquences dépend de tous les paramètres indiqués ci-dessus et la théorie d'élasticité no-local en présence du milieu élastique Vlassov est la plus adaptée et mieux convenable pour :

- toute fréquence de vibration ($r < 4$ à 5), ainsi, l'effet du milieu élastique est important pour des petites fréquences.
- pour le cas des nanotubes de carbone les plus courts ($L/d < 10$) et
- pour les modes les plus élevés (à partir du mode 3 et vis versa).

Et enfin ; le choix du type de milieu élastique (Vlassov ; Pasternak ou Winkler) dépend des résultats attendus par le chercheur ou le concepteur ainsi l'utilisation d'un milieu élastique simplifier de Winkler permet d'obtenir des résultats comparables avec les autres types de milieux élastiques mais avec un temps et un coût de calcul réduit.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude qui a pour but d'étudier la vibration forcée et libre d'un nanotube de carbone incorporé dans un milieu élastique du type Vlassov. La théorie des poutres Euler Bernoulli et la théorie d'élasticité non locale ont été utilisées. Le travail a inclus l'effet de plusieurs paramètres tels que le rapport géométrique (L/d), le nombre de mode de vibration (N) et la rigidité Vlassov ks . Ainsi, une comparaison a été faite entre les différents modèles de milieu élastique (Vlassov, Winkler et Pasternak).

Pour cela, des rapports des amplitudes entre le cas non local et local (W_{NL}/W_L) ont été calculés en fonction des rapports de fréquences (r) et qui nous a permis de conclure que :

Le rapport des amplitudes dépend de tous les paramètres cités ci-dessus et que la théorie d'élasticité non-local en présence du milieu élastique Vlassov est la plus adaptée et mieux convenable pour :

- toute fréquence de vibration ($r < 4$ à 5), ainsi, l'effet du milieu élastique est important pour des petites fréquences.
- pour le cas des nanotubes de carbone les plus courts ($L/d < 10$)
- pour les modes les plus élevés (à partir du mode 3 et vis versa).

Enfin, on peut dire que le choix du type de milieu élastique (Vlassov ; Pasternak ou Winkler) dépend des résultats attendus par le chercheur ou le concepteur ainsi l'utilisation d'un milieu élastique simplifié de Winkler permet d'obtenir des résultats comparables avec les autres types de milieux élastiques mais avec un temps et un coût de calcul réduit.

En perspective ; on peut dire qu'un travail expérimental sur ce nouveau matériau en nanocomposite est vivement sollicité pour valider l'ensemble des résultats de la littérature basés uniquement sur une modélisation théorique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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

[Ait Atmane 2011] Ait Atmane Hassen, Vibration des structure composites et tenant compte l'effet de cisaillement UNIVERSITE DJILALI LIABES DE SIDI BEL ABBES ,07 février 2011

[Brochard 1986] Brochard F., *J. Chem. Phys.*, 84 4664-4672 (1986)

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

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

[Bethune 1993] Bethune.D.S. Kiang.C.H., de Vries.M.S., Gorman.G. Vasquez.J et Beyers.R *Nature*, 363:605(1993), Lijima.S et I.chihashi.T.*Nature*, 363:603(1993).

[Bernard 2007] Charlotte Bernard Propriétés mécaniques des nanotubes de carbone en tant que nanosondes et leur fonctionnalisation par bio-nanoparticules, l'université Bordeaux, école doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur .30 Octobre 2007.

[Bonard 1997] Bonard J.M., Stora.T., J.P.Salvetat., Maier.C., Stockli.T., Duschl.C., Corro.L., Heer.W.A., Chatelein, *Advanced Materials*, 9 827(1997).

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

[BOUZIANI, 2018] BOUZIANI Abdelkader et BOUZIT Yacine étude de la vibration forcée d'un nanotube de carbone situé dans un milieu thermique. Mémoire de master université de Tiaret.

[BELKACEM, 2016] Adim Belkacem (2016), Etude de la stabilité des plaques en matériaux composites : analyse et modélisation, Thèse de doctorat LMD, Université Djillali Liabes Sidi Bel Abbes, Algérie.

[BELMAHI, 2017a] BELMAHI.S ; M. ZIDOUR ; M. MERADJAH2 ; T. BENSATTALAH. vibration forcée d'un nanotube de carbone a base de polymère situé dans un milieu élastique ; Conférence Internationale sur les Matériaux Polymères et leurs Composites (CIMPC'17) 25-26 Avril 2017 .Tlemcen –Algérie.

[BELMAHI, 2017b] BELMAHI Samir , Zidour Mohammed ,Meradjah Mohammed, hamidi Ahmed . Analyse De La Vibration Forcee D'un Nanotube De Carbone Monocouche Type Zigzag Situe Dans Une Matrice Polymere. International symposium on construction management and civil engineering (ISCMCE-2017) Skikda-Algeria. Thème1.

[BELMAHI, 2018a] Samir BELMAHI, Mohamed Zidour, Mustapha Meradjah, Tayeb Bensattalah and Ahmed Dihaj. Analysis of boundary conditions effects on vibration of nanobeam in a polymeric matrix . .Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal Vol. 67 No. 5, 2018.

[BELMAHI, 2018.b] Belmahi Samir, Mohammed Zidour and Mustapha Meradjah. Small-scale effect on the forced vibration of a nano beam embedded an elastic medium using nonlocal elasticity theory. Advances in Aircraft and Spacecraft Science, Vol. 6, No. 1 (2019) 001-000

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

[Collins 2000] Extreme oxygen sensitivity of electronic properties of carbon nanotubes, Collins. P. G., Bradley. K., Ishigami. M., Zettl. A., Science, 2000, 287, 1807-1804.

[Duesberg 1999/1998] Duesberg.G.S., Blau.W., Byrne.H.J., Muster.J., Burghard.M., Roth.S Chromatography of carbon nanotubes Synth.Met.,(1999), 103,2484-2485.

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

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

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

[Hamwi 1997] Hamwi.A., Alvergnat.H., Bonnamy.S., Béguin.C., Carbon, 35 723 (1997).

[Hwang 1995] Hwang.K.C., Chem.J., Soc.Chem.Comm., 173 (1995).

[Heireche, H. 2008] Heireche. H., Tounsi A., Benzair. A., Scale effect on wave propagation of double-walled carbon nanotubes with initial axial loading. J. Appl. Phys. 19(18) (2008), 185703. Doi: 10.1088/0957-4484/19/18/185703.

[Iijima 1993] Iijima.S., Ichihashi.T., Nature 363 (1993) 603-605

[Iijima 1991] Iijima.S., Nature 35456(1991)

- [Iijima 1996] Iijima.S., Ch.Brabec.A.Maiti.J.Bernholc.J.Phys.Chem.104., 2089-2092
- [Iijima, S. 1996] Iijima. S., Brabec. C., Maiti. A., Bernholc. J., Structural flexibility of carbon nanotubes. J. Chem. Phys. 104(5) (1996), 2089 – 2092. doi:10.1063/1.470966 (1996). [Iancu, 2014] Iancu-Bogdan Teodoru. Analysis of beams on elastic foundation: the finite differences approach. Gheorghe Asachi Technical University of Iasi 1-9 (2014)
- [Journet et Al 1997] Journet.C., Maser.W.K., Bernier.P., Lioseau.A., Lamy de la chapelle.M., Lefrant.S., Deniard.P., Lee.R. et Fischer.J.E., Nature 388 :756 (1997). Journet Cathrine la production de nanotubes de carbone .Thèse de doctorat Université Montpellier II (1998).
- [Kratshmer 1990] Kratshmer.W., Lamb.L.D., Fostiropoulos.K. et Huffman.D.R., Nature, 318 :162 (1985).
- [Li 2000] Li.C., Cheng.H.M., Xing.Y.T., Tan.P.H., Su.G., Carbon, 38 2041 (2000).
- [Lourie 1998]Lourie O., Wagner H.D., « Evaluation of Young’s modulus of carbon nanotubes by microRaman spectroscopy. », Journal of Materials Research, 13, 2418; 1998
- [Li 2000] Li F., Cheng H.M., Bai S., Su G., Dresselhaus M.S., « Tensile strength of single-walled carbon nanotubes directly measured from their macroscopic ropes », Applied Physics Letters, 77 (20), 3161; 2000
- [Marcoux 2002] Pierre Marcoux Réactivité et manipulation de nanotubes de carbones monocouches fonctionnalisation de surface par greffage covalent et en mise en œuvre comme agent structurant, Ecole doctorale d’Angers, 25 juin 2002.
- [Nikolaev 1999] Nikolaev.P., Bronikowski.M.J., kelley Bradelly.R., Rohmund.F., Colbert.D.T., Smith.K.A et smalley.R.E. CPL, 313 :91-97(1999).
- [Naik 2002] Naik R.R., Brott L.L., Clarson S.J., Stone M.O., Journal of Science and Nanotechnology 2, 95-100 (2002)
- [Rinzler 1998] Rinzler.A.G., Liu.J., Dai.H., Nikolaev.P., Huffman.C.B., Rodriguez-Macias.F.J., Boul.P.J., Lu.A.H., Heymann.D., Colbert.D.T., Lee.R.S., Fischer.J.E., Rao.A.M., Eklund.P.C., Smalley.R.E., Large-scale purification of single-Wall carbon nanotubes : process, product and characterization App Phys A 67,29 -37 (1998).
- [RIAD, 2018] Riad Hamza-Cherif, Mustapha Meradjah, Mohamed Zidour , Abdelouahed Tounsi, Samir Belmahi, Tayeb Bensattalah. Vibration Analysis of Nano Beam Using

Differential Transform Method Including Thermal Effect. Journal of Nano Research, Vol. 54, pp. 1-14, 2018.

[Soficar] (Fibres de carbone); <http://www.soficar-carbon.com>

[Salvetat] Salvetat J-P., Poulin P., « Renfort mécanique des composites par les nanotubes de carbone », Techniques de l'ingénieur

[Saito 1998] Saito R., Dresselhaus G., Dresselhaus M.S., « Physical properties of carbon nanotubes », Imperial College Press, London; 1998

[Saito 1998] Saito.R., Dresselhaus.G., Dresselhaus M.S., Physical Properties of Carbon Nanotubes, Imperial College Press (1998)

[Saito 1992] Saito.R., Fujita.M., Dresselhaus.G., and Dresselhaus.M.S., Appl.Phys.Lett., 60 (18),2204 (1992).

[Shelimov 1998] Shelimov.K.B., Esenaliev.R.O., Rinzler.A.R., Huffman.C.B., Smalley.R.E., purification of single- Wall carbon nanotubes by ultrasonically assisted filtration,Chem.Phys.Lett (1998), 282,429-434.

[Thes 2010] Haddad Raoudha Thes., 2010.

[Thes 2013] Thes. Prof Philippe Serp, 2013.

[Thes 1996] Thess,A.Lee,R ,Nikolaev P,Dai H,Petit Robert J,Xu C,Hee, Lee,Y,Gon Krim S Rinzler A.G,Colbert D.T,Scuseria G.E,Tomanek D , Fischer J.E.et Smalley R.E.Science,273 :483 (1996).

[Treacy ,wong, poncharal]Treacy M.J., Ebbesen T.W., Gibson J.M., « Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes », Nature, 381, 678; 1996

[Thostenson 2006] Thostenson. E. T., Chou. T. W., Processing-structure-multi-functional property Relationship in carbon nanotube/époxy composites. carbon 2006,44(14),3022-3029..

[Tsang 1994] Tsang.S.C., Chen.Y.K., Harris.P.J.C., Green.M.L.H., Nature.372 159 (1994).

[Ugrate 1998] Ugrate.D., Stockli.T., Chatelain.A., Heer.W.A., Appl. Phys. A, 67101 (1998).

[Vacating 1999] Vaccarini.L., Goze.C., Aznar.R., Micholet.V., Journet.C., Bernier.P., Purification procedures of carbon nanotubes Synth.Met (1999), 103, 2492-2493.

[Wang 2003] Wang S., Humphreys E.S., Chung S.Y., Delduco D.F., Lustig S.R., Wang H., Parker K.N.,Rizzo N.W., Subramoney S., Chiang Y.M., Jagota A., Nature Materials, 2 196 (2003).

[Walters 1999] Walters D.A., Ericson L.M., Casavant M.J., Liu J., Colbert D.T., Smith K.A., Smalley R.E., « Elastic strain of freely suspended single-wall carbon nanotubes ropes»,

Applied Physics Letters, 74 (25), 3803; 1999

[Yao 1999] Ya. Z., Postma. H. W. C., Balents. L., Dekker. C., Nature 402, 273 (1999).

[Yu 2000] Yu M.F. et al., Science 287, 637-640 (2000)

[Yin 1983] Yin M.T. et Cohen M.L. Physical Review Letter, 50 :2006 (1983)

[Zhou 2000] Zhou.O., Gao.B., Bower.C., Cleming.L., Shimoda.H., Cryst.Mol. And Cryst.Liq., 340 541 (2000).

[Zimmerman 2000] Zimmerman.J.L., Bradley.R.K., Huffman.C.B., Hauge.R.H., Margrave.J.L., Gas-phase Purification of single-wall carbon nanotubes, Chem.

[ZIDOUR, 2012] Zidour Mohamed. Etude du comportement mécanique des nanotubes en carbone entourés par une matrice polymère. Thèse de doctorat. Université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbes .2012.