

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DJILLALI LIABES SIDI BEL ABBES

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL & TRAVAUX PUBLICS

Laboratoire des Matériaux & Hydrologie

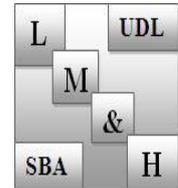
THESE DE DOCTORAT EN SCIENCE

Option : Structures & Matériaux

Présentée par

Melle : AISSANI Khadidja

Intitulé de la thèse



Etude du comportement mécanique des macros et nano structures sur des fondations élastiques

Composition du jury :

TOUNSI Abdelouahed	Pr	Président	UDL SBA
BACHIR BOUIADJRA Mohamed	MCA	Directeur de thèse	UDL SBA
ADDA BEDIA El Abbas	Pr	Examineur	UDL SBA
HOUARI Mohamed Sid Ahmed	MCA	Examineur	U DE MASCARA
KACI Abdelhakim	MCA	Examineur	U DE SAIDA
YEGHNEM Redha	MCA	Examineur	U DE SAIDA

Année universitaire 2016-2017

Résumé

Ce travail présente une nouvelle théorie non locale hyperbolique de déformation de cisaillement pour étudier la réponse statique, le flambement et le comportement dynamique des nano-poutres noyées dans une matrice polymère. Le modèle développé est capable de capturer le paramètre non local et l'effet de déformation de cisaillement sans l'utilisation du coefficient de correction de cisaillement. Le paramètre non local considère les effets de la taille réduite des nano-poutres.

En se basant sur les équations constitutives différentielles non locales d'Eringen, les équations du mouvement des nano-poutres sont obtenues en utilisant le principe d'Hamilton, l'effet de la matrice polymère (milieu élastique) sur les flèches, les charges critiques du flambement et les fréquences des nano-poutres est examiné, les modèles de fondations de type Winkler et Pasternak sont utilisés pour modéliser l'interaction de la nano-poutre avec le milieu élastique. Des solutions analytiques sont présentées pour des nano-poutres simplement appuyées et les résultats obtenus sont comparés avec ceux d'autres théories non locales connues dans la littérature.

Mots de passe : La théorie non locale, La nano-poutre, le milieu élastique.

Abstract

This work presents a new nonlocal hyperbolic shear deformation beam theory for the static, buckling and vibration of nanoscale-beams embedded in an elastic medium. The present model is able to capture both the nonlocal parameter and the shear deformation effect without employing shear correction factor. The nonlocal parameter accounts for the small size effects when dealing with nanosize structures such as nanobeams. Based on the nonlocal differential constitutive relations of Eringen, the equations of motion of the nanoscale-beam are obtained using Hamilton's principle. The effect of the surrounding elastic medium on the deflections, critical buckling loads and frequencies of the nanobeam is investigated. Both Winkler-type and Pasternak-type foundation models are used to simulate the interaction of the nanobeam with the surrounding elastic medium. Analytical solutions are presented for a simply supported nanoscale-beam, and the obtained results compare well with those predicted by the other nonlocal theories available in literature.

Keywords: *Nonlocal theory; Nanobeam; Elastic medium*

المخلص

في إطار هذا العمل تم عرض نظرية جديدة غير محلية للقص لدراسة الانحناء البسيط، فقدان التوازن بالالتواء و الاهتزاز لعارضة نانوية. النموذج المطور قادر على التقاط المعامل الغير محلي و تأثير تشوه القص دون استعمال معامل تصحيح القص ، و بناءا على المعادلات التفاضلية الغير محلية التأسيسية لإرينغن، يتم الحصول على معادلات الحركة باستعمال مبدأ هاملتون . تأثير الوسط المرن على الانحناء البسيط، فقدان التوازن بالالتواء و الاهتزاز، تم فحصه عن طريق نماذج الأساس من نوع وينكلر و بسترناك اللذان يدرسان تفاعل العارضة النانوية مع الوسط المرن. تقدم حلول تحليلية لعوارض مرتكزة ببساطة، قمنا بمقارنة النتائج المحصل عليها مع تلك الموجودة في الدراسات السابقة .



Table des matières

Dédicaces	
Remerciements	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclatures	
Liste des abréviations	
Introduction générale	1

Chapitre I

La Nanotechnologie L'innovation pour le monde de demain

I.1 Introduction.....	6
I.2 Les nanomatériaux.....	7
I.2.1 Définition des nanomatériaux.....	7
I.2.2 Historique et Définition du périmètre des Nanomatériaux	8
I.2.3 Les grandes familles de nanomatériaux.....	11
I.2.3.1 Les nano-objets.....	11
I.2.3.2 Les matériaux nanostructurés.....	11

I.3	Champ d'application des nanomatériaux	12
I.3.1	La Médecine.....	12
I.3.2	Automobile.....	13
I.3.3	Electronique et communications.....	14
I.3.4	Verre et articles en verre.....	14
I.3.5	Céramiques et matériaux de construction	14
I.3.6	Chimie et matériaux	15
I.3.7	Environnement.....	15
I.4	Procédés de fabrication des nanomatériaux	16
I.4.1	Procédés par voie physique.....	17
I.4.2	Procédés par voie chimique.....	17
I.4.3	Procédés par voie mécanique	18
I.5	Les risques liés à l'utilisation des nanomatériaux	18
I.5.1	Polémiques autour des nanomatériaux	19
I.5.2	Les nanomatériaux dans notre environnement et exposition	19
I.6	Les nanotechnologies, la façon d'innover au 21e siècle	21
I.6.1	Solide comme du béton	21
I.6.2	Microélectronique en tête de lice	21
I.6.3	Un bon tuyau	22
I.6.4	Haro sur le verre	22
I.6.5	Infrastructure québécoise en nanotechnologie	23
I.7	Conclusion.....	24

Chapitre II

Les Nanotubes de Carbone

II. 1	Introduction	25	
II. 2	Définition des nanotubes de carbone	26	
II.3	Le carbone	27	
II. 4	Les différentes formes du carbone	28	
II.4.1	Le graphite	28	
II.4.2	Le diamant	29	
II.4.3	Les carbones mal organisés	30	
II. 5	Les nouvelles formes du carbone	31	31
II.5.1	Fullerènes et dérivés	31	
II.5.2	Nanotubes multifeuillets (ou multiparois)	32	
II.5.3	Nanotubes monofeuillets (ou monoparois)	34	
II. 6	Synthèse de nanotubes	35	
II.6.1	Méthode de l'arc électrique	36	
II.6.2	Méthode d'ablation laser	37	
II.6.3	Méthode de dépôt chimique en phase vapeur	37	
II.6.4	Décomposition catalytique : HiPCO	38	
II.7	Propriétés des nanotubes de carbone	39	
II.7.1	Propriétés mécaniques	39	
II.7.2	Propriétés électroniques	41	
II.7.3	Propriétés émissives	41	
II.7.4	Propriétés thermiques	42	
II.7.5	Propriétés optiques	43	

II.8	Défauts des nanotubes des carbones	45
II.9	Applications des nanotubes de carbone	46
II.10	Inconvénients des Nanotubes	48
II.11	Conclusion	49

Chapitre III

Les théories des poutres et la fondation élastique

III.1	Introduction	50
III.2	Les modèles classiques	51
III.2.1	Premières hypothèses fondamentales de la théorie des poutres	51
III.2.1.1	Principe de Saint venant	51
III.2.1.2	Principe de Navier Bernoulli généralisé	52
III.3	La théorie classique des poutres	53
III.4	La théorie de déformation en cisaillement de premier ordre (TIMOSHENKO)	55
III.5	La théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevée(HSDT)	58
III.6	Théories des poutres selon la prise en compte de l'effet d'échelle	63
III.6.1	La théorie locale d'élasticité	63
III.6.2	La théorie non locale d'élasticité	63
III.7	La fondation élastique	66
III.8	Conclusion	67

Chapitre IV

Formulations mathématiques

IV.1	Introduction.....	68
------	-------------------	----

IV.2	Représentation de la nano-poutre utilisée.....	68
IV.3	Formulations mathématiques	69
IV.3 .1	Cinématiques.....	69
IV.3 .2	Le champ de déplacement	69
IV.3 .3	Les relations constitutives	70
IV.3 .4	Les équations du mouvement	70
IV.4	Les solutions analytiques.....	74
IV.4.1	La flexion.....	75
IV.4.2	Le flambement.....	75
IV.4.3	La vibration.....	75
IV.5	Conclusion	76

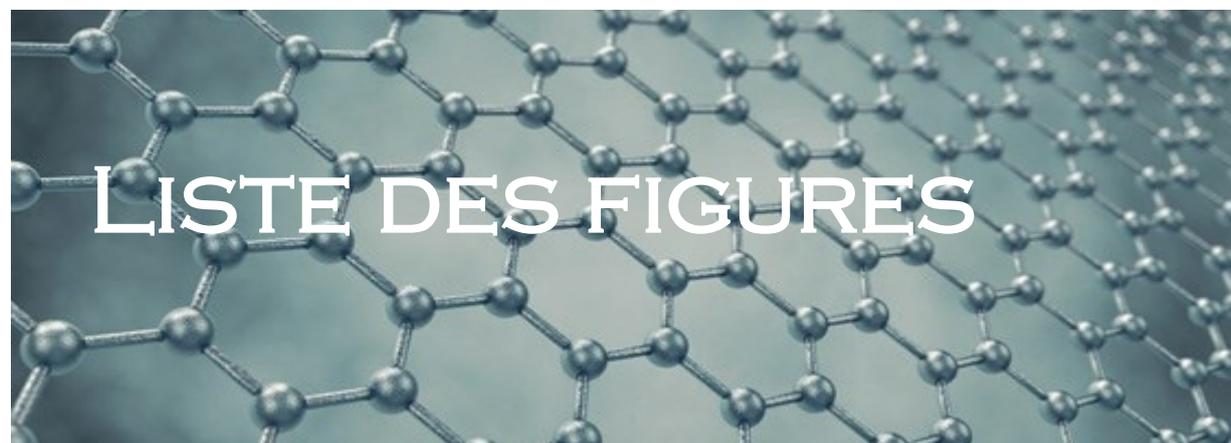
Chapitre V

Résultats et discussion

V.1	Introduction	77
V.2	Validation des résultats.....	78
V.3	Résultats de l'effet du paramètre du module de Winkler.....	82
V.4	Les résultats de l'effet du paramètre du module de Pasternak.....	88
V.5	Conclusion.....	92

Liste des abréviations

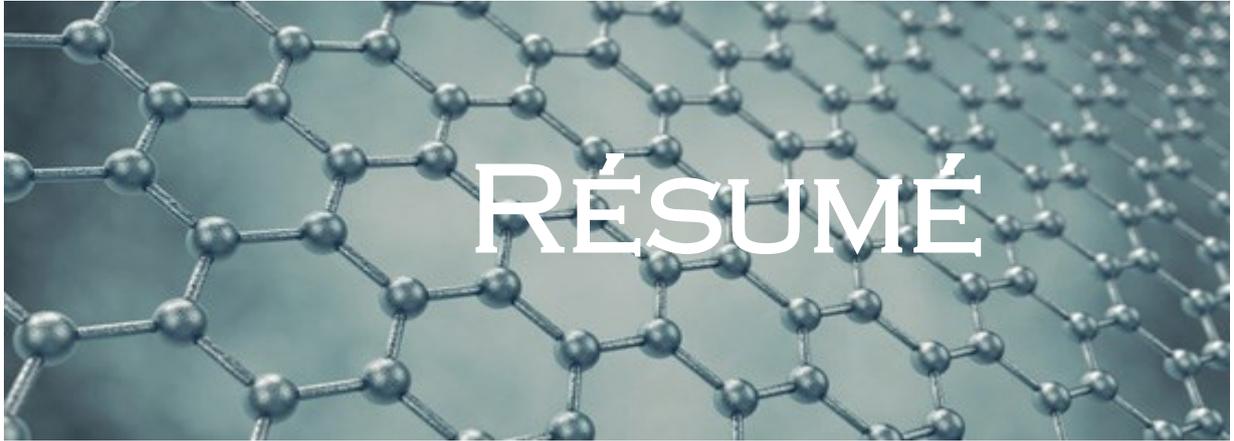
nm	Nano mètre
µm	Micro mètre
ADN	Deoxyribo Nucleic Acid
CNT	Carbone nano tube
FSDT	First shear deformation theory
HSDT	High shear deformation theory
MEMS	Micro electromechanic system
NEMS	Nano electromechanic system
PVD	Physical vapor deposition
CVD	Chemical vapor deposition
IQN	Infrastructure québécoise en nanotechnologies
C60	<i>Fullerène C60.</i>
MWNT	Multi wall nano tubes
SWCNT	<i>Single Wall Carbone NanoTube.</i>
HiPCO	<i>High Pressure dismutation of CO.</i>
CNT	<i>Carbone NanoTube.</i>
TEM	<i>TEM Microscopie électronique de transmission.</i>
EBT	Euler Beam theory
CBT	Classical beam theory
FSDT	First shear deformation theory
HSDT	high shear deformation theory



Liste des figures

Fig.I.1	Illustration de l'échelle nanométrique.....	9
Fig.I.2	Les deux approches d'élaboration des nano-objets et des nanomatériaux manufacturés.....	16
Fig.I.3	Cycle des nanomatériaux de la production à l'exposition des personnes.....	19
Fig.II.1	Structure d'un nanotube de carbone.....	26
Fig.II.2	Nanotube de carbone (SWNT)	27
Fig.II.3	Représentation de la structure atomique du graphite.....	28
Fig.II.4	Structure du diamant.....	29
Fig.II.5	fullerène C ₆₀	32
Fig.II.6	Structure Schématique d'un MWNT, ou l'on voit bien l'arrangement concentrique des feuilles de graphène.....	33
Fig.II.7	Structure d'un plan de graphène en deux dimensions. le réseau hexagonal est décrit à partir des deux vecteurs de base \vec{a}_1 et \vec{a}_2	34
Fig.II.8	Contrainte mécanique qui induit une flexion dans un nanotube de carbone lijima (1996)	39
Fig.II.9	Schéma de principe des trois principales méthodes de synthèses des nanotubes de carbones. Sublimation d'une cible de graphite par les méthodes de l'arc électrique (a) et de l'ablation laser (b). Décomposition catalytique d'hydrocarbure, méthode CVD (c).....	44
Fig.III.1	Schéma de principe de la théorie classique des poutres.....	54
Fig.III.2	Schéma de principe de la théorie des poutres de Timoshenko (FSDT).....	56
Fig.III.3	La distribution (constante) des contraintes de cisaillement à travers l'épaisseur dans la théorie de Timoshenko.....	57
Fig.III.4	Illustration de la poutre d'ordre élevé.....	58
Fig.III.5	La distribution (variable) des contraintes de cisaillement à travers l'épaisseur dans la théorie d'ordre élevé.....	59
Fig.III.6	Variation de la fonction de gauchissement f(z) des différents modèles en fonction de l'épaisseur.....	62
Fig.III.7	Variation de la fonction de gauchissement f'(z) des différents modèles en fonction de l'épaisseur.....	62
Fig.III.8	Une poutre repose sur une fondation élastique (Winkler-Pasternak).....	66
Fig.IV.1	Poutre en flexion dans le plan (x, z).....	68
Fig.V.1	L'effet du module de Winkler sur le rapport de la flèche des nano-poutres pour différentes valeurs du paramètre non-local ($e_0 a$) ($K_s = 0, L/h = 10$).....	85
Fig.V.2	L'effet du module de Winkler sur le rapport de la charge critique du flambement des nano-poutres pour différentes valeurs du paramètre non-local ($e_0 a$) ($K_s = 0, L/h = 10$).....	86
Fig.V.3	L'effet du module de Winkler sur le rapport de la fréquence des nano-poutres pour différent nombre de mode n ($K_s = 0, L/h = 10, \mu = 2$).....	87

Fig.V.4	L'effet du module de Winkler sur le rapport de la fréquence des nano-poutres pour différente nombre de mode n ($K_s = 0$, $L / h = 10$, $\mu = 2$).	88
Fig.V.5	L'effet du module de cisaillement de Pasternak sur le rapport de la flèche d'une nano-poutre pour plusieurs valeurs du paramètre non local ($K_w = 100$, $L / h = 10$).....	89
Fig.V.6	L'effet du module de cisaillement de Pasternak sur le rapport de la charge de flambement d'une nano-poutre pour plusieurs valeurs du paramètre non local μ . ($K_w = 100$, $L / h = 10$).....	90
Fig.V.7	L'effet du module de cisaillement de Pasternak sur le rapport de la fréquence d' une nano-poutre pour plusieurs valeurs du paramètre non local μ . ($K_w = 100$, $L / h = 10$).....	90
Fig.V.8	L'effet du module de cisaillement de Pasternak sur le rapport de la fréquence d' une nano-poutre pour plusieurs mode de vibration n. ($K_w = 100$, $L / h = 10$, $\mu = 2$).....	91



Liste des Tableaux

Tab.II.1 Comparaison des propriétés mécaniques des CNT et d'autres matériaux..... 40

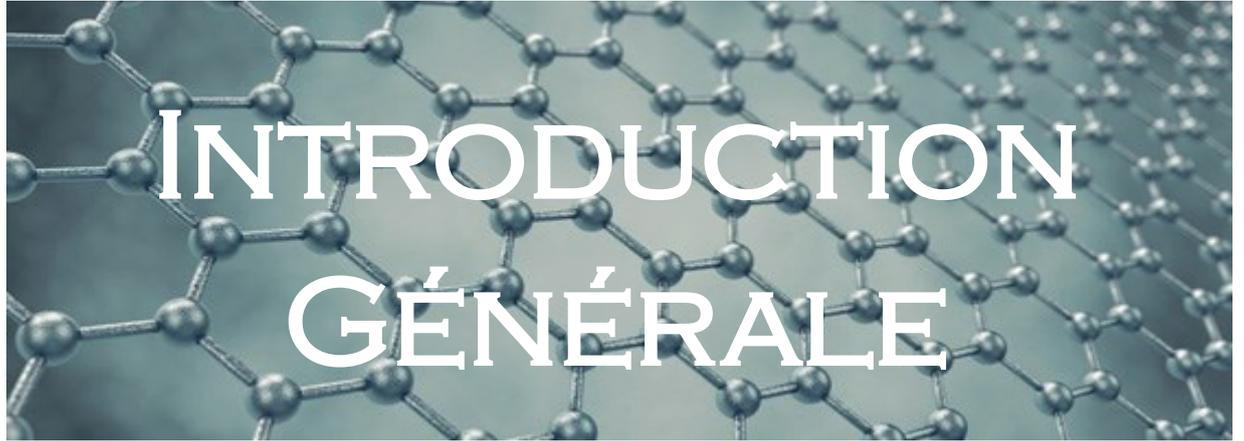
Tab.III.1 Les théories des poutres..... 50

Tab.V.1 Comparaison de la flèche maximale non dimensionnelle \bar{w} pour des nano-poutres simplement appuyées sous un chargement uniforme ($K_w = K_s = 0$)..... 79

Tab.V.2 Comparaison de la charge critique de flambement non dimensionnelle \bar{N} pour des nano-poutres simplement appuyées ($K_w = K_s = 0$)..... 81

Tab.V.3 Comparaison de la fréquence non dimensionnelle $\bar{\omega}$ pour des nano-poutres simplement appuyées ($K_w = K_s = 0$)..... 81

Tab.V.4 Comparaison des trois premières fréquences naturelles $\bar{\omega}$ des nano-poutres simplement appuyées ($\frac{L}{h} = 5, K_w = K_s = 0$)..... 82



INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction:

Le grand progrès dans l'application des nanostructures des industries des nano-ingénieries principalement les dispositifs des deux systèmes macro et nano électromécaniques, a rendu la modélisation des structures à l'échelle nanométrique importante en raison de leurs propriétés physiques élevées.

Il a été remarqué qu'il y a une différence significative de la réponse de la structure du matériau à l'échelle nanométrique par rapport à leur réponse volumique.

Le problème de l'utilisation de la théorie classique est que celle-ci ne parvient pas à traiter l'influence de l'échelle, elle sur-estime le comportement des structures à l'échelle nanométrique. En outre dans le modèle classique les particules influencent l'une à l'autre par des forces de contact.

Ainsi à l'échelle nanométrique les influences de la taille ne peuvent pas être négligées. Par conséquent les théories de la mécanique du milieu continu dépendant de l'effet d'échelle (Zhou et Li 2001, Fleck et Hutchinson 1997, Yang et al. 2002) sont devenues plus populaires dans la modélisation des nanostructures, puisque elles fournissent des solutions très rapides comparativement aux simulations de la dynamique moléculaire pour plusieurs problèmes d'ingénierie.

En outre, les modèles non-locaux de la mécanique des milieux continus sont utilisés parce que l'effet d'échelle (tel que la distance entre les atomes) devient très important et son influence ne peut pas être négligée.

La théorie la plus largement utilisée pour l'investigation des structures à l'échelle nanométrique est la théorie d'élasticité non locale initié par Eringen (1972, 1983). Dans le modèle d'élasticité non locale l'influence des petites échelles est introduite en considérant que la contrainte à un point est non seulement fonction de la déformation dans ce point mais aussi fonction de toutes les déformations des autres points du milieu continu.

Ces théories constitutives prennent en compte les forces entre les atomes et la longueur d'échelle interne.

En se basant sur la relation constitutive non locale d'Eringen, plusieurs travaux ont été publiés pour développer les théories des poutres non locales et les utilisées pour étudier les réponses des nano-poutres en flexion (Wang et Liew, 2007; Pijaudier-Cabot et Bazant, 1987; Reddy et Pang, 2008), en flambement (Zhang et al., 2004; Zhang et al., 2006; Wang et al., 2006; Murmu et Pradhan, 2009; Amara et al., 2010; Narendaret Gopalakrishnan, 2011a; Tounsi et al., 2013ab; Zidour et al., 2014; Benguediab et al., 2014a; Berrabah et al., 2013; Eltaher et al., 2014), en vibration (Zhang et al., 2005; Benzair et al., 2008; Murmu et Pradhan, 2009 et 2010; Eltaher et al., 2012 and 2013;), et en propagation des ondes (Lu et al., 2007; Tounsi et al., 2008; Heireche et al., 2008; Song et al., 2010; Narendar et Gopalakrishnan, 2011b), et la thermo-mécanique (Mustapha and Zhong, 2010; Zidour et al. 2012).

La réponse mécanique des nano-poutres combinées avec l'effet du milieu élastique est pratiquement importante. Récemment, une attention considérable a été donnée au comportement mécanique des nanotubes de carbone noyés dans une matrice de polymère ou de métal (Ru, 2001; Kuzumaki et al. 1998, Schadler et al. 1998; Wagner et al., 1998; Bower et al., 1999; Qian et al., 2000; Besseghier et al., 2011). Besseghier et al. (2011) ont employé

le modèle de Winkler pour l'analyse de la propagation des ondes de nanotubes de carbone à double paroi dans un milieu élastique.

En outre, Pradhan et Murmu (2009a) ont étudié l'analyse des vibrations de la poutre noyée dans un milieu élastique en utilisant la théorie des poutres non locales et le modèle de fondation de Winkler. Il est à noter que ces travaux étaient basés sur le modèle de la poutre d'Euler- Bernoulli.

Cependant, le modèle de type Winkler est considéré comme une simple approximation de la réponse mécanique réelle du matériau élastique, et cela est dû à l'incapacité du modèle à tenir en compte de la continuité ou la cohésion du milieu. Une représentation plus réaliste du milieu élastique peut être atteinte, en considérant un modèle de fondation à deux paramètres.

L'un des modèles de fondation mécanique est le modèle de Pasternak (Pasternak, 1954) qui est souvent appelé comme modèle de la fondation à deux paramètres. Le premier paramètre de ce modèle considère la pression normale, tant dis que le second paramètre introduit la contrainte de cisaillement transversales due à l'interaction de la déformation au cisaillement du milieu élastique entourant (Bouderba et al., 2013). Les deux modèles de fondation Winkler et Pasternak ont été rapportés par Pradhan et Murmu (2009b) pour l'étude de la vibration des nanotubes de carbones noyés dans une matrice polymère.

Dans ce travail, une nouvelle théorie non locale de déformation de cisaillement hyperbolique des poutres noyées dans un milieu élastique est développée pour l'étude de la flexion, le flambement et la vibration des poutres à l'échelle nanométrique. Le but de cette théorie est de prendre la variation hyperbolique de la contrainte de cisaillement transversale à travers l'épaisseur sans employer le facteur de correction de cisaillement. Contrairement à la théorie de déformation de cisaillement hyperbolique proposée par Benguediab et al. (2014b), il est noté que la présente théorie utilise une nouvelle et différente fonction hyperbolique que celle présentée par Benguediab et al. (2014b).

Les deux paramètres Winkler et Pasternak sont utilisés pour étudier l'interaction de la nano-poutre avec le milieu élastique. En se basant sur les relations constitutives non locales d'Eringen, les équations du mouvement sont obtenues en utilisant le principe d'Hamilton. Les effets du paramètre non local, le paramètre du module de Winkler et de Pasternak et le rapport géométrique de la nano-poutre sur la flèche, la charge critique du flambement et la fréquence des nano-poutres sont examinés et discutés en détail.

Il est souhaitable que le présent travail sera utile pour les chercheurs et les ingénieurs travaillant dans le domaine des nanostructures.

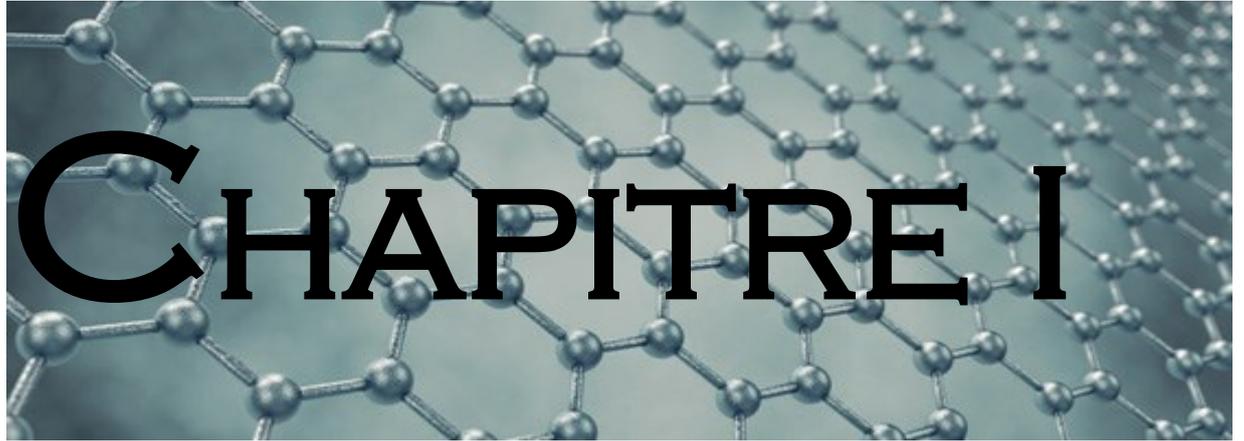
Ce manuscrit se décompose en cinq chapitres. Le premier chapitre présentera une vue générale sur la nanotechnologie.

Le second chapitre s'intéressera plus particulièrement à l'un des fers de lance des nanosciences, à savoir les nanotubes de carbone. Nous étudierons leur structure, leur synthèse, leurs différentes propriétés ainsi que quelques-unes de leurs applications. Suivra ensuite le troisième chapitre décrivant les différentes théories des poutres.

Dans le quatrième chapitre, nous entrerons plus précisément dans ce travail de thèse en analysant le comportement mécanique des nanotubes de carbone

Dans le dernier chapitre on présentera les résultats obtenus qui seront comparés avec d'autres résultats déjà publiés par d'autres auteurs. Cette comparaison nous a permis la validation de nos résultats.

Ce travail s'achèvera en présentant une conclusion générale qui résumera notre travail incluant les perspectives pour des travaux futurs.





I.1 Introduction:

La nanotechnologie est considérée comme la principale technologie du XXIe siècle. Elle est capable d'offrir des solutions à de nombreux problèmes contemporains grâce à des matériaux, composants et systèmes plus petits, plus légers, plus rapides et plus performants. Elle repose sur la connaissance et la maîtrise de l'infiniment petit, et regroupe l'ensemble des techniques qui permettent de fabriquer, de manipuler et de caractériser la matière à l'échelle nanométrique.

La nanotechnologie est le procédé de fabrication de structures à l'échelle nanométrique: elle permet de fabriquer de la matière de la même manière qu'on fabrique une maison avec des briques. C'est donc de l'architecture à l'échelle atomique et moléculaire. On crée des nanoparticules, soit des particules dont une de leurs trois dimensions est inférieure à cent nanomètres, et on les assemble pour former de nouvelles molécules. On peut également incorporer des nanoparticules à un produit pour augmenter son efficacité.

I.2 Les nanomatériaux:

I.2.1 Définition des nanomatériaux :

Ce sont des matériaux constitués de nano-objets qui présentent des propriétés spécifiques à l'échelle nanométrique. Les nano-objets peuvent se présenter sous la forme de particules, fibres ou tubes, de couches minces ou de constituants structurels. L'unité de référence du monde des nanotechnologies est donc le nanomètre (nm). Le préfixe nano vient du grec nano qui signifie nain. Un nanomètre est une unité de mesure qui équivaut à un milliardième de mètre ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 0,000\,000\,001 \text{ m}$). Un nanomètre correspond environ à la taille de 4 atomes de silicium mis côte à côte, à 1/100 de la largeur d'une molécule d'ADN, à 1/50 000 de l'épaisseur d'un cheveu humain ou encore à 1/500 000 de l'épaisseur du trait d'un stylo à bille.

Il existe de nombreuses définitions du terme « nanomatériau » :

- La Commission européenne a proposé en octobre 2011, dans le cadre d'une recommandation, une définition pour le terme « nanomatériau ». Un nanomatériau est un matériau naturel, formé accidentellement ou manufacturé contenant des particules libres, sous forme d'agrégat ou sous forme d'agglomérat, dont au moins 50 % des particules, dans la répartition numérique par taille, présentent une ou plusieurs dimensions externes se situant entre 1 nm et 100 nm.

Est également mentionné dans cette recommandation, que tout matériau est à considérer comme relevant de la définition mentionnée ci-dessus dès lors qu'il présente une surface spécifique en volume supérieure à $60 \text{ m}^2/\text{cm}^3$.

- Selon la norme ISO TS 80004-1, un nanomatériau est un matériau dont au moins une dimension externe est à l'échelle nanométrique c'est-à-dire comprise approximativement entre 1 et 100 nm ou qui possède une structure interne ou de surface à l'échelle nanométrique.

I.2.2 Historique et Définition du périmètre des nanomatériaux :

Le terme nanotechnologie fut utilisé, la première fois en 1974, par Norio Taniguchi. Il fut toutefois popularisé par K. Eric Drexler dans les années 80, lorsque celui-ci introduisit le terme « manufacture moléculaire ». Richard Feynman a été le premier scientifique à avancer l'idée qu'il serait bientôt possible, pour l'homme, de transformer la matière au niveau atomique.

Le terme nano (du grec nanos qui signifie « nain ») est un préfixe, qui placé devant une unité la divise par le facteur 10^{-9} . Un nanomètre correspond donc à un milliardième de mètre; en pratique, il indique une petitesse extrême à tel point d'ailleurs qu'une nanostructure doit être agrandie plus de 10 million de fois avant que nous puissions apprécier aisément ses détails minutieux à l'œil nu. (Tchangna , 2008)

- Un millimètre, c'est 1 000 000 nanomètres.
- Un cheveu humain mesure 25 000 à 50 000 nanomètres.
- une cellule sanguine mesure 2 500 nanomètres.
- Un atome est d'environ 0,1 nanomètres de diamètres.
- De même, une nanoseconde (ns) est égale à un milliardième de seconde.

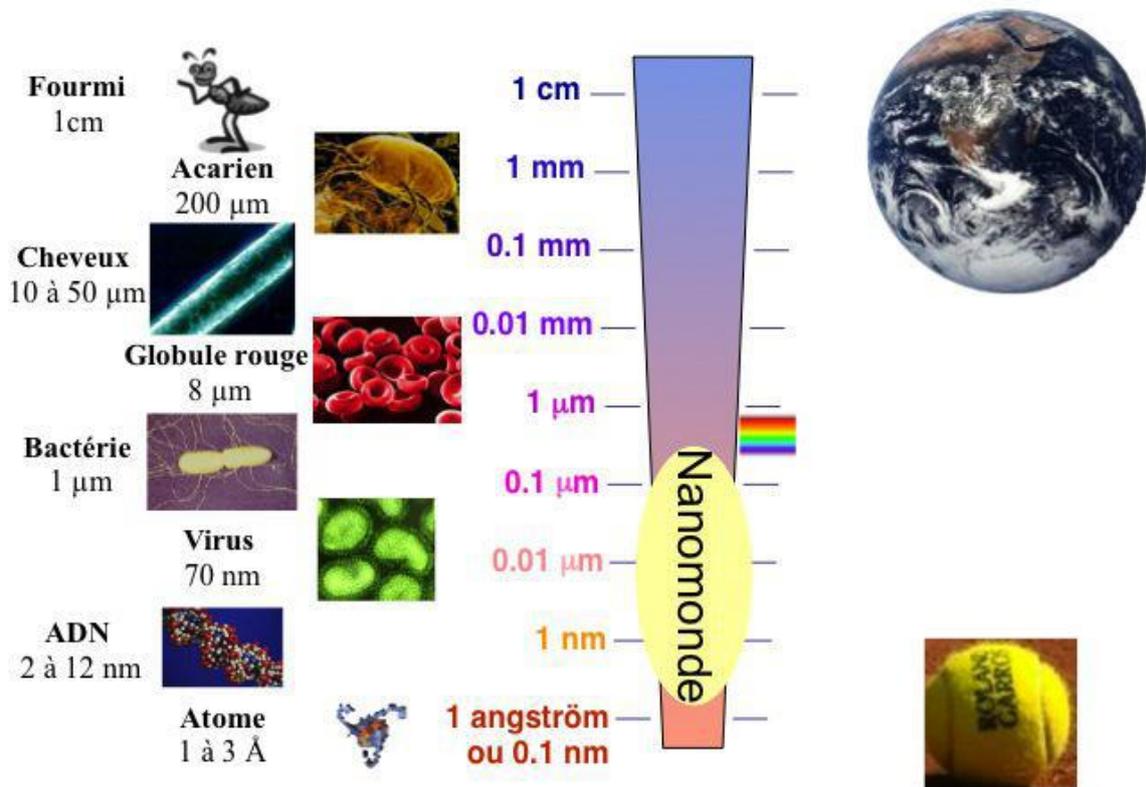


Fig.I.1: Illustration de l'échelle nanométrique [Pascale Chenevier, 2013]

Pour définir la notion de nanoparticules et/ou de nanomatériaux, il aura fallu attendre la terminologie pré-normative telle que définie par l'ISO publiée à la fin du mois de septembre 2008 sous le numéro ISO/TS27687 (« Nanotechnologies – Terminologie et définitions relatives aux nano- objets – Nanoparticule, nanofibre et nanoplat») à savoir :

- La définition nanométrique considère le domaine de dimension compris entre 1 et 100 nm.
- Les nano-objets sont des matériaux présentent une, deux ou trois dimension extrême dans le domaine nanométrique. Parmi ces nano-objets, les nanoparticules comprennent leurs trois dimensions dans le domaine nanométrique, les nano-plaques ont une dimension nanométrique alors que les nano fibres sont des nano-objets présentant deux dimensions nanométriques, troisième dimension étant plus longue de façon significative.

« Santé Canada » précise que l'échelle nanométrique signifie 1 à 100 nanomètres, c'est-à-dire la préconisation de l'ISO. Deux concepts spécifiques sont par contre ajoutés. Tout d'abord

celui de «phénomènes à l'échelle nanométrique» qui sont liés à la taille et sont distincts des propriétés chimiques ou physiques des atomes, molécules et matériaux particuliers. D'autre part, « Santé Canada» distingue les produits manufacturés en précisant « le terme «manufacturé» comprend les processus techniques et les contrôles de la matière et des processus à l'échelle nanométrique».

Un nanomatériau remplit au moins l'un des critères suivants :

- Il est composé de particules avec au moins une dimension dans la gamme 1-100 nanomètres, pour au moins 1% d'entre elles.
- Il a des structurations internes ou de surface avec au moins une dimension dans la gamme 1-100 nanomètres.
- Il a une surface spécifique de plus de $60\text{m}^2/\text{cm}^3$, en excluant les matériaux formés de particules de tailles inférieures au nanomètre.

I.2.3 Les grandes familles de nanomatériaux:

I.2.3.1 Les nano-objets : qui sont des matériaux dont une, deux ou trois dimensions externes se situent à l'échelle nanométrique c'est-à-dire approximativement entre 1 et 100 nm.

Parmi les nano-objets, il est possible de distinguer trois catégories :

- **les nanoparticules :** qui désignent des nano-objets dont les trois dimensions externes se situent à l'échelle nanométrique : nanoparticules de latex, d'oxyde de zinc, de fer et de cérium, d'alumine, de dioxyde de titane, de carbonate de calcium, etc.
- **les nanofibres, nanotubes, nanofilaments ou nanobâtonnets :** qui se rapportent à des nano-objets dont deux dimensions externes sont à l'échelle nanométrique et la troisième dimension significativement supérieure (nanotubes de carbone, nanofibres de polyester, nanotubes de bore, etc.). Ces termes désignent des nano-objets longilignes de section comprise entre 1 et quelques dizaines de nm et de longueur comprise entre 500 et 10 000 nm .
- **les nano-feuillets, nano-plats ou nano-plaquettes :** qui définissent des nano-objets dont une dimension externe se situe à l'échelle nanométrique et les deux autres dimensions sont significativement supérieures (nano-feuillets d'argile, nano-plaquettes de séléniure de cadmium, etc.).

Les nano-objets peuvent être utilisés en tant que tels sous forme de poudre, de suspension liquide ou de gel.

I.2.3.2 Les matériaux nano-structurés : qui possèdent une structure interne ou de surface à l'échelle nanométrique. Parmi les matériaux nano-structurés, il est possible de distinguer plusieurs familles parmi lesquelles :

- **les agrégats et agglomérats de nano-objets :** Les nano-objets peuvent se présenter soit sous forme individuelle (c'est-à-dire sous forme de particules primaires) ou soit sous forme d'agrégats ou d'agglomérats dont la taille est sensiblement supérieure à 100 nm.
- **les nano-composites :** Ces matériaux sont composés pour tout ou partie de nano-objets qui leur confèrent des propriétés améliorées ou spécifiques de la dimension nanométrique. Les nano-objets sont incorporés dans une matrice ou sur une surface afin d'apporter une nouvelle fonctionnalité ou de modifier certaines propriétés mécaniques, magnétiques, thermiques, etc. Les polymères chargés de nanotubes de carbone utilisés dans le

secteur des équipements sportifs, afin d'améliorer leur résistance mécanique et de diminuer leur poids, constituent un exemple de nano-composites.

- **les matériaux nano-poreux** : Ces matériaux possèdent des pores de taille nanométrique. Les aérogels de silice sont des matériaux nano-poreux qui présentent d'excellentes propriétés d'isolation thermique. [Myriam Ricaud, SyephaneDeval, 2014]

I.3 Champ d'application des nanomatériaux :

Le développement de la nanotechnologie va transformer notre quotidien. La possibilité de réduire la taille des objets tout en augmentant leurs performances nous promet des produits plus petits, plus légers, moins chers, plus puissants (ordinateurs) ou plus efficaces (soins médicaux). Plus de 300 produits contenant des nanoparticules sont déjà commercialisés. Progressivement c'est notre vie quotidienne toute entière, du travail aux loisirs, qui sera affectée par cette évolution extrêmement rapide.

I.3.1 La Médecine :

Les nanotechnologies vont permettre une révolution dans le domaine de la médecine. Au cours de ces dernières décennies on a vu la naissance de la nano-exploration et le nano-diagnostic, les nano médicaments, les neuro-prothèses et enfin l'ingénierie tissulaire, destinée à remplacer des tissus ou organes. Il est maintenant possible de manipuler le corps humain à l'échelle cellulaire voir moléculaire. En effet les nanotechnologies permettent la création de prothèses ayant une meilleure longévité, biocompatibilité, résistance et même pouvant restituer un sens perdu : **Le nanotube**

- **Un petit nanotube qui peut redonner vie aux nerfs:**

Autre promesse de la nano-médecine : un petit tube en apparence très anodin. Pourtant, il redonnera vie à des nerfs sectionnés. Il a été mis au point par des chercheurs de l'Institut national de recherche scientifique, à Varennes. Fait d'un polymère biodégradable, mais qui laisse néanmoins circuler l'oxygène, l'intérieur du tube est tapissé de cristaux nanométriques. La fonction de ces cristaux est d'activer l'échange électrique, sans lequel la régénération des nerfs est impossible.

- **Les nanoparticules pour la lutte contre le cancer:**

L'utilisation principale des nanoparticules (ferromagnétiques) se fait dans la lutte contre le cancer. L'un des premiers cas d'utilisation de ces nanoparticules dans ce domaine fut la destruction d'une tumeur cancéreuse grâce à des nanoparticules à base de fer. Il s'est à ce moment créé un véritable engouement pour les nanotechnologies. En injectant ces particules de 15 nanomètres dans la tumeur, puis en soumettant le malade à un champ magnétique faisant vibrer les particules à 100 000 Hz. La température des cellules cancéreuses dépasse rapidement 43°C, elles sont donc ensuite détruites de l'intérieur car elles ne peuvent pas résister à une température aussi élevée. Les déchets de ces cellules sont ensuite détruits par des macrophages (cellule de taille importante qui, dans les processus immunitaires, peut détruire des cellules étrangères par phagocytose), qui emmènent les particules vers la rate où elles seront éliminées par l'organisme.

I.3.2 Automobile:

On cherche à utiliser les nanomatériaux dans l'industrie automobile en vue de réduire le poids des véhicules, d'augmenter la résistance des pièces automobiles, notamment aux rayures, d'augmenter la tenue à la température de certaines pièces, de diminuer la consommation d'énergie, de limiter les émissions de gaz à effet de serre et d'augmenter la sécurité et le confort des passagers. Les recherches portent notamment sur les nanocomposites à matrice polymère permettant d'augmenter la résistance des matériaux tout en diminuant le poids des pièces. Les nanomatériaux pourraient aussi contribuer à augmenter le rendement de la combustion des carburants et à accroître le rendement thermique des moteurs. Des couches de polymères d'épaisseur nanométrique pourraient modifier les propriétés thermiques des vitrages et créer un habitacle athermique (ce qui existe déjà pour les pare-brises). D'autre part, du fait de l'importante surface d'échange des nanoparticules, une application intéressante serait leur utilisation dans les pots catalytiques pour le traitement des gaz de combustion. Des peintures extérieures avec effets de couleurs, résistant aux égratignures, élastiques et sur lesquelles les salissures n'ont pas prise sont aussi envisagées.

I.3.3 Electronique et communications:

Dans l'industrie de l'électronique et des communications, les nanomatériaux permettent de nombreuses applications telles que : des mémoires à haute densité et des processeurs miniaturisés, de nouvelles cellules solaires, batteries et cellules à combustion, des composantes digitales logiques, des écrans plats à éclairage brillant, un couplage silice/substances organiques. Ils permettent des vitesses de traitement plus rapides et une plus grande capacité d'enregistrement.

I.3.4 Verre et articles en verre:

L'industrie du verre souhaite développer des vitrages en verre renforcé en utilisant des composites à matrice verre visant à protéger la surface des verres grâce à des revêtements comportant notamment une fonction anti-pluie, une fonction auto-nettoyante et des propriétés optiques particulières (fonction réfléchissante, coloration, anti-reflet, absorption des UV).

I.3.5 Céramiques et matériaux de construction:

L'industrie des produits céramiques cherche à renforcer les céramiques en introduisant des nano-poudres comme les nanoparticules de nitrure de silicium qui permettent de renforcer l'alumine. L'industrie du bâtiment développe des capteurs miniaturisés qui seront intégrés dans l'habitat afin d'améliorer le confort et la sécurité. Des recherches sont en cours pour réaliser des revêtements plus résistants ou présentant des propriétés anti-salissures ou antidérapantes.

D'autre part, dans le domaine du génie civil et des grands ouvrages, l'amélioration de la sûreté passe par le renforcement des matériaux de construction.

I.3.6 Chimie et matériaux :

Les enjeux de l'industrie chimique portent essentiellement sur le développement de Nano-composites à matrice polymère, l'élargissement des domaines d'application des polymères et l'amélioration de certaines propriétés (allègement et renforcement des structures, amélioration des propriétés optiques, augmentation de la durabilité, mais également résistance au feu, aux températures élevées et aux chocs thermiques). Il s'agit notamment d'obtenir des céramiques, pigments, poudres et catalyseurs multifonctionnels et plus efficaces, des technologies de collage sans colle, de nouvelles technologies de soudage, des couches fonctionnelles (anti-adhésif, antistatique, etc.), des peintures, vitres et vêtements photo-actifs et autonettoyants, etc.

I.3.7 Environnement:

En matière d'environnement, l'utilisation des nanomatériaux est envisagée pour la réduction des émissions de polluants, le traitement des effluents notamment par photocatalyse et la purification des gaz, la production d'eau ultrapure à partir d'eau de mer, une meilleure utilisation, récupération et un meilleur recyclage des ressources existantes, des analyseurs chimiques spécifiques et multi-substances en temps réel, etc. Les nanomatériaux pourront être développés notamment sous la forme de membranes organiques nano-fonctionnelles, de catalyseurs, de filtres, de céramiques nano-poreuses et d'aérogels.[Bajjou]

I.4 Procédés de fabrication des nanomatériaux:

Les nanomatériaux manufacturés et destinés à des usages industriels peuvent être synthétisés selon deux approches différentes. **On différencie la méthode dite « ascendante » (en anglais bottom-up) de la méthode dite « descendante » (top-down).**

- L'approche « ascendante » vient des laboratoires de recherche et des nanosciences. Elle consiste à construire les nanomatériaux atome par atome, molécule par molécule ou agrégat par agrégat. L'assemblage ou le positionnement des atomes, des molécules ou des agrégats s'effectue de façon précise, contrôlée et exponentielle, permettant ainsi l'élaboration de matériaux fonctionnels dont la structure est complètement maîtrisée.
- L'approche « descendante » est issue de la microélectronique. Elle consiste à réduire et plus précisément à miniaturiser les systèmes actuels en optimisant les technologies industrielles existantes. Les dispositifs ou les structures sont ainsi graduellement sous-dimensionnés ou fractionnés jusqu'à atteindre des dimensions nanométriques. Le broyage à haute énergie est l'une des principales techniques utilisées dans cette approche actuellement.

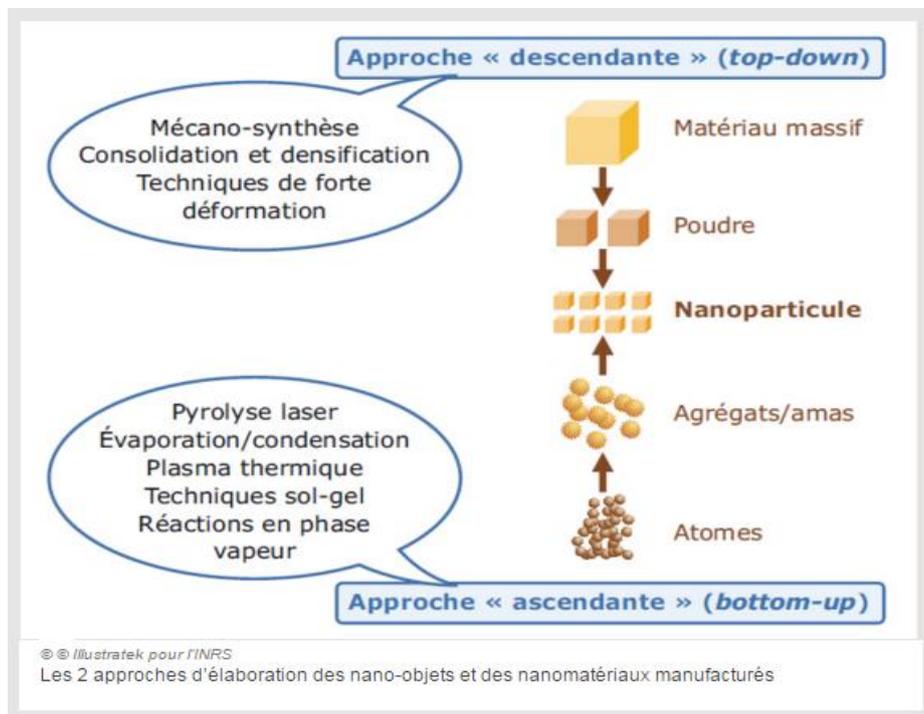


Fig.I.2: Les deux approches d'élaboration des nano-objets et des nanomatériaux manufacturés

Les deux approches tendent à converger en termes de gamme de tailles des objets. L'approche « bottom-up » semble néanmoins plus riche en termes de type de matière, de diversité d'architecture et de contrôle de l'état nanométrique alors que l'approche « top-down » permet d'obtenir des quantités de matière plus importantes mais le contrôle de l'état nanométrique s'avère plus délicat.

Les procédés actuels permettant la fabrication de nanomatériaux sont classés en trois grandes catégories :

I.4.1 Procédés par voie physique :

- L'évaporation/condensation,
- L'ablation laser,
- La décharge électrique,
- Les flammes de combustion,
- La pyrolyse laser,
- Les micro-ondes,
- L'irradiation ionique ou électronique,
- La décomposition catalytique,
- Les dépôts physiques en phase vapeur regroupés sous le terme de PVD (Physical Vapor Deposition), etc.

I.4.2 Procédés par voie chimique:

- Les réactions en phase vapeur regroupées sous le terme de CVD (Chemical Vapor Deposition),
- Les réactions en milieu liquide : co-précipitation chimique, hydrolyse, etc.,
- Les réactions en milieu solide,
- Les fluides supercritiques avec réaction chimique,
- Les techniques sol-gel : sol-gel à base de silice, alkoxyde de métal, etc

I.4.3 Procédés par voie mécanique:

- Le broyage à haute énergie ou mécano-synthèse,
- La consolidation et la densification
- Les techniques de forte déformation : torsion, friction, laminage, etc.

L'approche « ascendante » fait appel à des procédés d'élaboration chimiques et physiques alors que l'approche « descendante » induit, principalement, l'utilisation de méthodes mécaniques.

I.5 Les dangers et les risques liés à l'utilisation des nanomatériaux:

Malgré les progrès que la nanotechnologie apporte à notre vie, elle présente également d'énormes dangers pour les êtres vivants. Les industriels travaillant à partir de ces nouvelles technologies sont les premiers touchés. Ces dernières vont affecter dans les années à venir beaucoup plus de personnes, car la nanotechnologie est une science du futur : tout le monde aura la possibilité de l'exploiter. Les conséquences de ces nouvelles technologies mettent en place de nombreux débats où divers avis s'opposent entre progrès et environnement..

De jour en jour on peut voir l'avancement de la technologie et plus particulièrement celle du Nano. Cette nouvelle technologie est encore méconnue bien qu'elle existe déjà dans l'air ainsi que dans la nature. Mais la fabrication de nanorobots ou autres inventions de ce type peuvent avoir des conséquences très graves sur l'ensemble des êtres vivants : la perte de leur contrôle, le fait qu'ils se multiplient, etc. Aujourd'hui, ce sont ces dangers qui font l'objet des débats.

Les principales entrées dans le corps d'un être humain sont la peau, les voies respiratoires (donc les alvéoles pulmonaires) ainsi que les organes irrigués comme le foie, les reins, etc. Et pour les nanoparticules les plus petites, de l'ordre de 1nm, elles peuvent passer les barrières naturelles du cerveau et ainsi atteindre différentes zones de ce dernier.

I.5.1 Polémiques autour des nanomatériaux :

Aujourd'hui dans l'actualité les nanomatériaux sont de plus en plus décriés, alors qu'ils sont en train de devenir incontournables dans notre quotidien grâce à leurs propriétés intrinsèques, de nombreux scientifiques et associations s'élèvent pour mettre en garde les utilisateurs et les consommateurs sur les risques potentiels engendrés par les nanomatériaux. Et se heurtent aux lobbies des industries utilisatrices de ceux-ci.

À l'heure actuelle aucune étude sérieuse n'a été menée sur l'impact des nanomatériaux sur l'homme et sur l'environnement. Malgré tout, un certain nombre d'entre eux sont **accusé** d'être à l'origine de maladies, c'est le cas des nanotubes de carbone qui de par leur forme (allongée et cylindrique) sont comparées aux fibres d'amiante, dont il a été prouvé que leur petite taille et leur forme leur permettaient de pénétrer profondément dans les poumons et de développer des tumeurs cancéreuses.

I.5.2 Les nanomatériaux dans notre environnement et exposition :

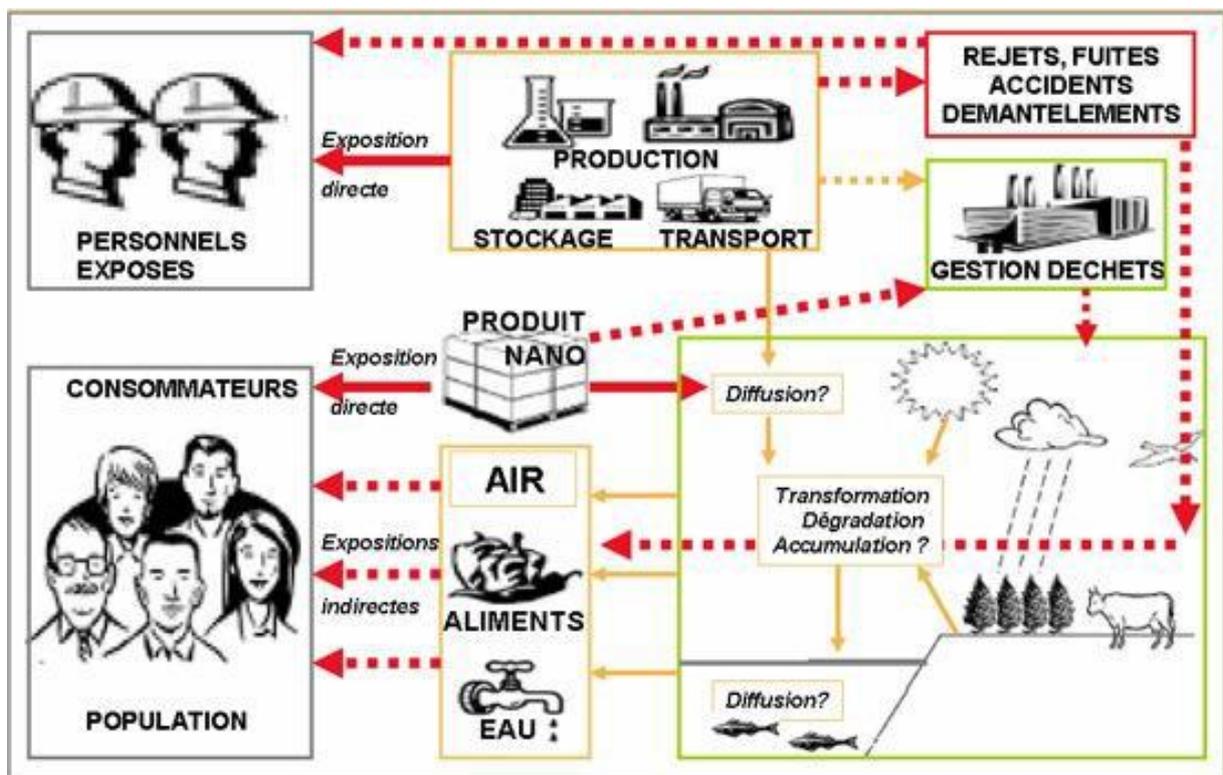


Fig.I.3: Cycle des nanomatériaux de la production à l'exposition des personnes.

La figure précédente *I.3* présente le cycle des nanomatériaux, de leur production à l'exposition des personnes, en passant par leur diffusion dans l'environnement.

En ce qui concerne l'exposition des personnes aux nanomatériaux, les opérateurs des industries qui utilisent les nanomatériaux ne sont pas les seuls à être susceptibles d'être exposés aux nanomatériaux. Les consommateurs de produits à base de nanomatériaux peuvent aussi être confrontés aux nanomatériaux, mais aussi plus indirectement l'ensemble de la population.

Les nanomatériaux peuvent aussi avoir un impact plus global sur l'environnement, on distingue alors :

1. Exposition directe, cela concerne les opérateurs des entreprises qui utilisent des nanomatériaux (lors des phases de production, de stockage, ou de transport) ainsi que les consommateurs de ces produits.
2. Exposition indirecte, cela concerne l'ensemble de la population. En effet, la phase de production des nanomatériaux peut être à l'origine de rejet dans l'environnement. Qui par infiltration dans les sols, dans l'eau et par la diffusion dans l'air vont pouvoir pénétrer dans l'organisme humain.

I.6 Les nanotechnologies, la façon d'innover au 21e siècle :

Les nanotechnologies, cette science de l'infiniment petit, se développent à un rythme effréné à travers le monde. Trop souvent considérée comme l'apanage des chercheurs et des universitaires.

I.6.1 Solide comme du béton :

Une des réalisations exceptionnelles touche le secteur des matériaux cimentaires. Un nouveau procédé basé sur les nanotechnologies permet en effet le remplacement de la fumée de silice, une ressource peu accessible employée dans les bétons haute performance. « La nano-poudre de verre ou nano-silice provenant des déchets recyclés est transformée en fine poudre, explique le professeur Arezki Tagnit-Hamou de l'Université de Sherbrooke. « Les nano-sphères contenues dans la poudre de verre densifient le béton, le rendant encore plus résistant et moins perméable. » Une avenue qui laisse présager un bel avenir pour cette ressource, quand on sait que la production de béton dans le monde dépasse les quatre milliards de mètres cube par année et constitue la matière la plus utilisée sur la terre après l'eau.

I.6.2 Microélectronique en tête de lice :

L'industrie de la microélectronique, quant à elle, est touchée de plein fouet. On favorise en effet, la production de prototypes de microsystèmes qui seront dictés par les besoins du marché dans les domaines d'application tels que les technologies de l'information et des communications, l'automobile, l'aérospatiale, l'environnement et la santé pour en accélérer la commercialisation.

De l'avis de Claude Jean, vice-président et directeur général de TeledyneDalsaSemi-conducteur, de Bromont, « l'industrie des semi-conducteurs est en grande transformation. Les produits que nous utilisons aujourd'hui sont de plus en plus issus de la convergence (coopération) et de l'intégration de multiples technologies. »

On constate de plus que la Loi de Moore ne se dément pas, à savoir que le nombre de transistors par unité de surface d'un circuit intégré continue de doubler à tous les 18 à 24 mois. Ainsi, on comprend que le contenu des composantes électroniques, électromécaniques et optiques d'un téléphone intelligent notamment soit en rapide évolution.

I.6.3 Un bon tuyau :

Par ailleurs, l'intégration de nanoparticules aux composantes d'un tuyau de plastique utilisé en géothermie permet maintenant d'optimiser les échanges de chaleur et d'atteindre une plus grande conductivité. C'est du moins le pari gagné de Versaprofiles, filiale d'IPL et important fabricant nord-américain de tuyaux et de tubulures en thermoplastique pour les systèmes géothermiques. Aux dires de Stéphane Gonthier, président de l'entreprise, « l'utilisation des nanotechnologies nous a permis de concevoir le tuyau le plus performant au monde. » Les nanos peuvent également protéger les planchers contre les éraflures et les égratignures. En effet, de nouveaux vernis mis au point avec cette technique réduisent l'abrasion et diminuent l'usure du plancher. Parquets Alexandra, une PME de Lévis, en fait la promotion. Selon sa présidente, Alexandra Fortier, « les nanotechnologies ont donné naissance à une nouvelle génération de vernis très performants qui contribuent à préserver la beauté et la durabilité des parquets. »

I.6.4 Haro sur le verre :

De son côté, le professeur Gaétan Laroche et son équipe de l'Université Laval, ont travaillé sur la formation de buée sur les surfaces de verre et réussi à développer un revêtement antibuée. Leurs travaux ont suscité beaucoup d'intérêt, les applications étant très nombreuses. On a qu'à penser aux fenêtres, aux visières pour casque protecteur, aux lunettes de correction de la vue, aux lentilles d'appareil photo ou encore aux pare-brise des véhicules. À lui seul le marché de la lunetterie représenterait un énorme potentiel. En effet, plus de quatre milliards de personnes sur la planète requièrent une correction visuelle. Le revêtement antibuée est permanent pour le verre; il est également applicable sur le plastique. Le monde de la santé n'est pas en reste. Selon Josée Blanchard, directrice Développement des affaires, service de la vie, Sherbrooke Innopole, « les nanobiotechnologies ouvrent notamment la voie dans le domaine du diagnostic (capteurs, imagerie, etc.) et de la thérapeutique (livraison de médicaments, encapsulation, etc.). » De plus, on s'attend à ce que la nanomédecine transforme la médecine actuelle. La production et la commercialisation des produits pharmaceutiques subiront également de profonds changements.

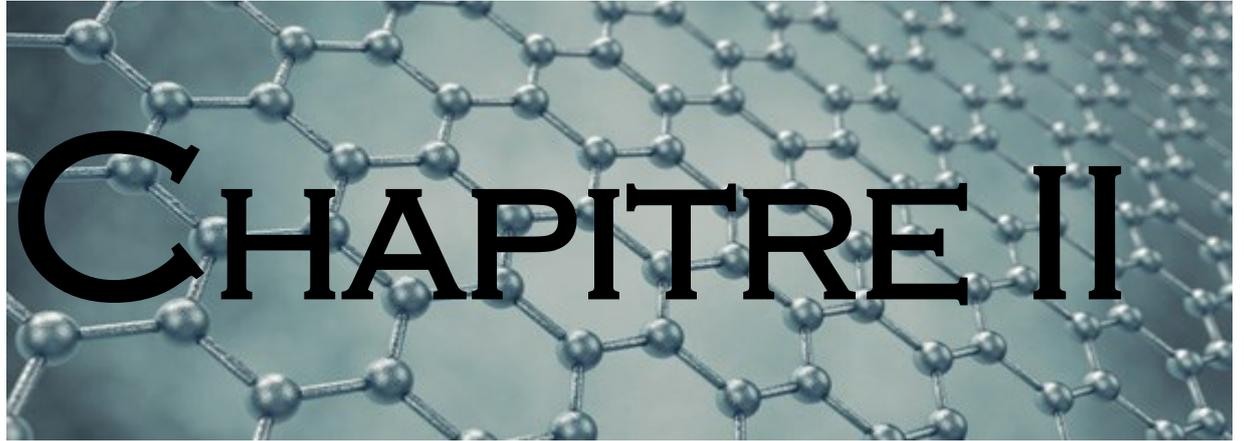
I.6.5 Infrastructure québécoise en nanotechnologie :

Verra-t-on un jour une ruée vers les Nanos au Québec :

En dépit de tous ces succès, la technologie n'a pas encore la cote au sein des PME québécoises. Certes, on retrouve une communauté de chercheurs, professeurs et étudiants en quête de nouveaux résultats probants, mais en général les industriels ne suivent pas la cadence. Regarde-t-on passer le train ou nos connaissances sur le sujet sont-elles trop embryonnaires? Pour pallier à cette lacune, NanoQuébec vient de mettre en place l'Infrastructure québécoise en nanotechnologies (IQN), un organisme qui fait le pont entre les projets industriels et les ressources existantes. Cette plate-forme originale regroupe les différentes expertises en nano fabrication, caractérisation des matériaux, synthèse chimique et modélisation. [les-nanotechnologies-la-facon-dinnover-au-21e-siecle 2012]

I.7 Conclusion:

Les nanotechnologies représentent sans nul doute de la prochaine révolution technologique. En émergence depuis la fin des années 90, leurs percées vont bouleverser tous les champs technologiques et scientifiques, par rapport aux autres champs, qu'elles opèrent à des dimensions nanométriques ou la matière que l'on manipule présente de nouvelles propriétés jusqu'alors inconnues. Par ailleurs, le succès des recherches dans le domaine des nanotechnologies ne peut résulter que de la convergence des efforts de plusieurs acteurs opérant dans différentes disciplines scientifiques et technologiques (informatiques, génie civil, mathématiques, chimie, physique., etc.).





II. 1 Introduction

Découverte depuis à peine plus d'une trentaine d'années, les nanotubes de carbone sont devenus le fer de lance des nanotechnologies. Objets unidimensionnels, à la fois cristaux et molécules, les nanotubes de carbone sont d'une simplicité chimique et d'une singularité structurale absolument uniques. Leurs caractéristiques dimensionnelles associées à des propriétés physiques, mécaniques et électriques remarquables ouvrent à l'industrie des perspectives d'innovations nombreuses et prometteuses. L'éventail des applications actuelles et potentielles suggère que le risque d'exploitation professionnelle aux nanotubes de carbone est d'ores et déjà une réalité dans de nombreux secteurs d'activité tels que la chimie, la plasturgie, l'électronique, la santé, l'énergie, l'automobile, l'aéronautique..

II.2 Définition des nanotubes de carbone:

Les nanotubes, sont les derniers nés de la famille des carbones, On peut voir un nanotube idéal comme une bande de grande longueur, découpée dans une feuille de graphène et enroulée sur elle-même, qui peut ou non être fermée à ses extrémités (*figure II.1*). Le diamètre de ces structures est nanométrique et leur longueur est de l'ordre du micromètre. La fermeture des tubes exige d'introduire dans le réseau d'hexagones plan des défauts topologiques qui courbent ce plan. Le défaut de base est un pentagone qui transforme le plan en cône ouvert d'angle au sommet 112° . L'introduction successive des hexagones et de pentagones ferme progressivement le plan et le transforme en une coquille. On peut montrer mathématiquement qu'il est suffisant d'introduire 20 hexagones et 12 pentagones pour fermer la coquille et aboutir à un polyèdre fermé. Le plus petit polyèdre régulier, obéissant à cette règle de fermeture dite d'Euler, est précisément la molécule C₆₀ qui contient 20 hexagones et 12 pentagones (*figure II.2*).

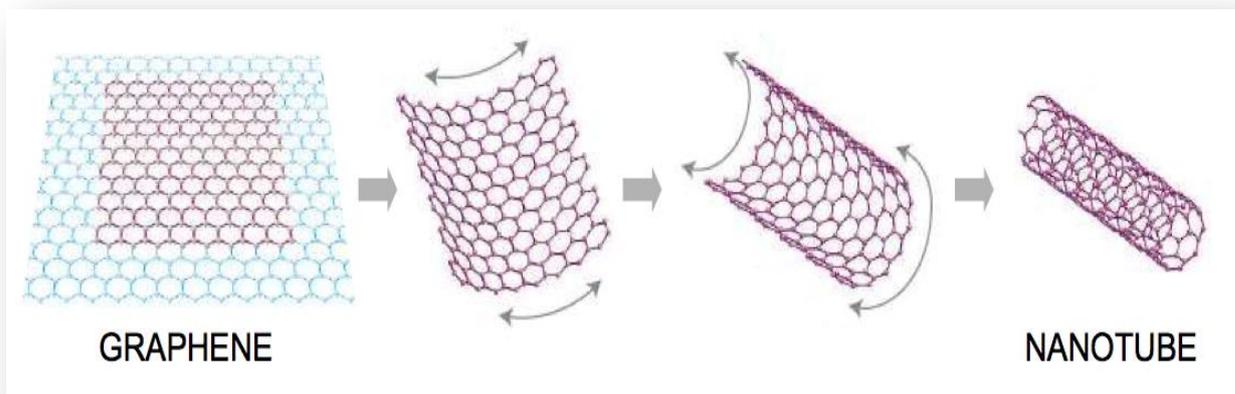


Fig.II.1: Structure d'un nanotube de carbone [Pascale Chenevier, 2013]



Fig.II.2:Nanotube de carbone (SWNT)

II.3 Le carbone :

L'élément fondamental de la vie, est un atome capable de se lier d'une manière variée à un grand nombre d'atomes différents, ce qui lui permet d'offrir des possibilités de synthèse multiples. Cette versatilité est due à sa structure électronique particulière $[1s^2_2s^2_2p^2]$. Ses orbitales atomiques sont capables de s'hybrider avec d'autres atomes de carbone ou des hétéroatomes, pour former des orbitales moléculaires de type sp^1 , sp^2 ou sp^3 ce qui confère au carbone un caractère bi-, tri- ou tétravalent. Il est donc possible de rencontrer des structures carbonées monodimensionnelles, bidimensionnelles ou tridimensionnelles. La seule forme thermodynamiquement stable du carbone est le graphite hexagonal. Les autres formes allotropiques du carbone sont métastables dans les conditions normales de température et de pression. Les formes traditionnelles du carbone sont le graphite, le diamant, les carbones mal organisés. De nouvelles formes du carbone ont été récemment découvertes, tels que les fullerènes, les nanotubes multi feuillets, nanotubes monofeuillets.[Izard,2004]

II.4 Les différentes formes du carbone :

II.4.1 Le graphite :

Le graphite est la forme la plus abondante et la plus stable à température et à pression ambiante. Sa structure est constituée de feuillets hexagonaux non compacts, nommés graphènes, séparés d'environ 0,34 nm le long de la direction de leur normale. Dans chaque feuillet, les atomes de carbone sont fortement liés par des liaisons covalentes de type sp^2 , tandis que les liaisons entre les feuillets sont faibles, de type Van der Waals π , ce qui explique le clivage et la faible dureté. La *figure II.3* est une représentation de la structure atomique du graphite.

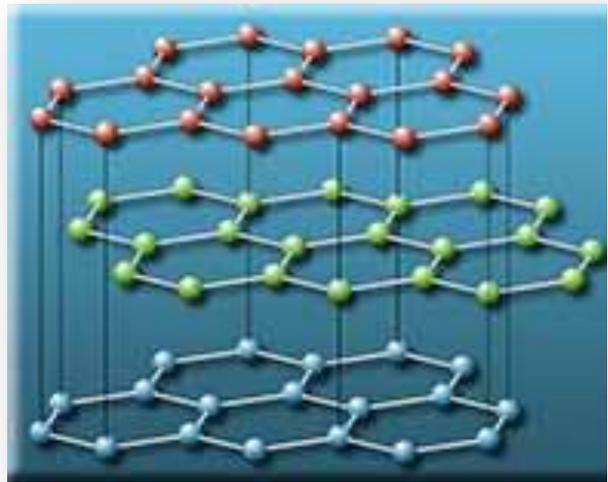


Fig.II.3: Représentation de la structure atomique du graphite.

II.4.2 Le diamant:

Le diamant est une forme métastable du carbone dans les conditions de température et de pression normales. Il ne comporte que des atomes sp^3 et possède la dureté la plus élevée (10 Mohs). Ainsi chaque atome de carbone est associé de façon tétraédrique à ses quatre voisins les plus proches et complète sa couche extérieure. Ces liaisons covalentes, fortes et donc difficiles à casser, couvrent tout le cristal, d'où son incroyable dureté. D'autre part il présente une plus forte densité que le graphite (3500 Kg/m³ contre 2200 Kg/m³ pour le graphite) et possède la plus haute conductivité thermique à température ambiante. La figure II.4 montre l'arrangement des atomes de carbone dans la structure du diamant.

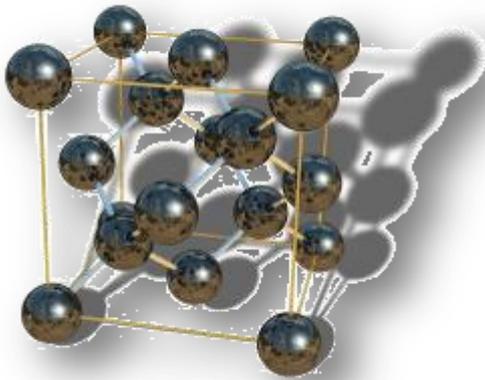


Fig.II.4: Structure du diamant

II.4.3 Les carbones mal organisés :

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

Le graphite peut également se rencontrer sous une forme partiellement organisée. Le désordre structural est créé par des défauts d'empilement des plans de graphène, ce qui éloigne la structure de ce graphite des formes ordonnées vues précédemment, en perdant l'ordre orientationnel et en augmentant la distance inter-feuillets. Pour le différencier des graphites hexagonal et rhomboédrique, on parle de graphite turbostratique.

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

II. 5 Les nouvelles formes du carbone :

II.5.1 Fullerènes et dérivés :

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. 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 défauts s'annule, et une feuille de graphène dans laquelle on aurait inséré un pentagone et un heptagone resterait globalement plane.

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, à la forme d'unicosaèdre 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 II.5).

Cette nouvelle molécule de 60 atomes de carbone, ou C_{60} , a été appelée buckminsterfullerène, par analogie avec les dômes géo désiques 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 « cages » de plus de 60 atomes de carbone [Kroto, 1985]. 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 par arc électrique [Krätschmer, 1990]. Aujourd'hui, des méthodes de synthèse du C_{60} par voie organique existent, ouvrant la voie à une production de masse des fullerènes.



Fig.II.5: Fullerène C₆₀

II.5.2 Nanotubes multifeuillets (ou multiparois) :

La découverte des fullerènes en 1985 créa un véritable engouement pour la recherche et la caractérisation de nouvelles nanostructures carbonées. Les techniques de caractérisation, et notamment la microscopie électronique, permirent à Sumio Iijima de mettre en évidence en 1991 [Iijima, 1991], dans le produit d'évaporation du graphite par arc électrique, des nanostructures graphitiques unidimensionnelles, baptisées nanotubes multifeuillets (MultiWall Nano Tubes, MWNT).

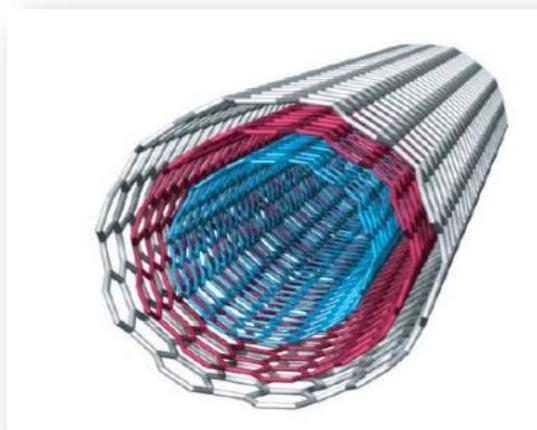


Fig.II.6: Structure Schématique d'un MWNT, ou l'on voit bien l'arrangement concentrique des feuilles de graphène. [Bernard, 2007]

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

La façon dont les différentes couches graphitiques des nanotubes multifeuillets s'empilent est a priori aléatoire. Il n'a pas été mis en évidence un empilement selon des règles préférentielles entre les différents feuillets. La distance moyenne inter-feuillets est de 0,344 nm, ce qui rapproche sa structure de celle du graphite turbo stratique. La structure des nanotubes multifeuillets de type poupée russe décrite précédemment est communément admise, mais ce n'est pas la seule structure possible. Ainsi, certaines études expérimentales [Zhou, 1994] laissent envisager que les nanotubes multifeuillets pourraient avoir une structure de type rouleau de parchemin. D'autres études suggèrent, surtout dans le cas des gros nanotubes, que les deux types de structure coexistent au sein des tubes

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

II.5.3 Nanotubes monofeuillets (ou monoparois) :

Les nanotubes de carbone monofeuillets (SingleWallNanoTubes, SWNT) ont été découverts en parallèle par Béthune [Bethune,1993] et Iijima [Iijima,1993] en 1993.

Un nanotube monofeuillet est une feuille de graphène enroulée sur elle-même, de manière à former un cylindre unique. Le nano-objet obtenu est alors unidimensionnel. Les atomes de carbone restent dans un état d'hybridation sp^2 . Le nanotube idéal ainsi formé présente deux extrémités, qui peuvent être fermées par deux dômes, comme des demi-fullerènes, mais pouvant comporter des défauts dans le cas d'un nanotube réel. L'enroulement de la feuille de graphène va définir la structure et les propriétés du nanotube formé. [Bernard,2007]

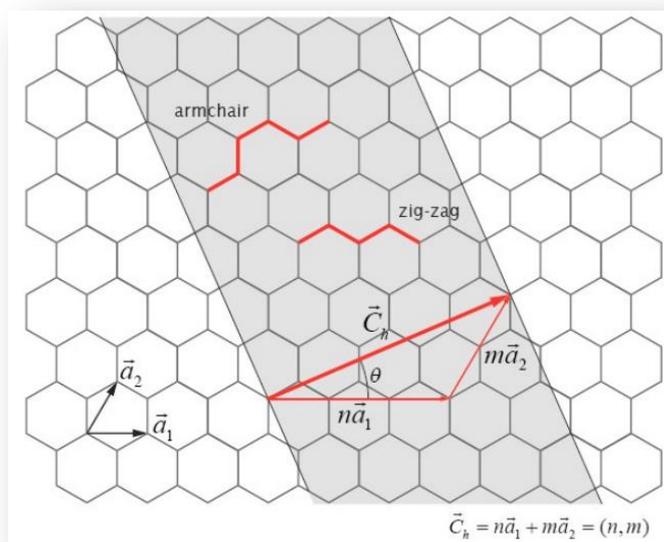


Fig.II.7: Structure d'un plan de graphène en deux dimensions. le réseau hexagonal est décrit à partir des deux vecteurs de base \vec{a}_1 et \vec{a}_2 . [Bernard,2007]

II. 6 Synthèse de nanotubes:

Depuis la découverte des nanotubes de carbone, de nombreux efforts ont été déployés pour améliorer leur synthèse. Les premiers nanotubes de carbone ont été produits par une décharge électrique en utilisant des électrodes en graphite dans un environnement contenant un gaz inerte.

Cette méthode, d'un coût relativement peu élevé, a permis de produire d'importantes quantités de nanotubes. Cependant, elle produit également des impuretés telles que du carbone amorphe, sans aucun contrôle précis de la longueur et du rayon des nanotubes. Les nanotubes de carbone peuvent également être synthétisés par une technique d'ablation laser produisant des nanotubes de haute qualité mais avec un rendement moins important. Une méthode simple de synthèse des nanotubes de carbone est réalisée par un dépôt chimique en phase vapeur (CVD: Chemical Vapor Deposition) à une forte température, typiquement supérieure à (700°C) [Bethune, 1993]. La production des nanotubes de carbone est assurée par des gaz d'hydrocarbure décomposés sur des surfaces catalytiques.

Ce processus CVD permet de contrôler précisément la localisation de la croissance des nanotubes en utilisant des catalyseurs calibrés. Ce procédé peut aussi être utilisé à de plus basses températures pour faire croître des nanostructures en carbone sur des surfaces recouvertes de catalyseur.

La différence majeure entre la production de nanotubes multi-parois et de nanotubes mono-parois est la nécessité d'utiliser un catalyseur, allié à un gaz carboné, le tout à une température adaptée afin d'obtenir la forme mono-paroi des nanotubes de carbone. Il existe plusieurs enjeux dans la production des nanotubes de carbones mono-parois. Tout d'abord, il faut avoir un contrôle de la distribution en diamètre et de la chiralité des échantillons, la chiralité représentant la façon dont la feuille de graphène est enroulée. De plus, selon l'utilisation souhaitée, il peut s'avérer nécessaire d'avoir un contrôle sur la (pureté) des échantillons. Enfin, en ce qui concerne les éventuelles applications industrielles, la production de nanotubes en grande quantité est la première étape à réaliser. [Bernard, 2007]

Nous présenterons ici les procédés de synthèse les plus répandus en exposant les avantages et les inconvénients de chacun d'eux. Nous allons examiner successivement la méthode de l'arc électrique, d'ablation laser, de dépôt chimique en phase vapeur et enfin la méthode dite HiPCO [Li,1996].

II.6.1 Méthode de l'arc électrique :

La technique de l'arc électrique est un procédé de synthèse haute température. Cette technique a permis de synthétiser les fullerènes en grande quantité [Krätshmer,1990], et de produire les premiers nanotubes multifeuillets 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. 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 monofeuillets nécessite l'emploi d'une anode en graphite contenant également des catalyseurs métalliques. Ces catalyseurs vont être sublimés avec le graphite lors de la création du plasma, et vont permettre aux fagots de nanotubes de croître [Bethune,1993,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 monofeuillets 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,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 monofeuillets.

II.6.2 Méthode d'ablation laser :

La technique de synthèse par ablation laser est la méthode qui a permis à Kroto et Smalley de découvrir les fullerènes en 1985. Cette technique repose sur l'évaporation d'un disque de graphite par irradiation laser, la cible étant placée dans un four à 1200°C [Thèse.A]. Comme dans le cas de la synthèse par arc électrique, il est nécessaire d'utiliser un catalyseur métallique mélangé à la cible en graphite pour former des nanotubes monofeuillets.

Cette technique est complexe dans sa mise en œuvre car elle repose sur l'utilisation de deux impulsions lasers successives de fréquences différentes. Une méthode de synthèse par ablation laser plus simple a également été développée. Cette méthode utilise un laser CO₂ continu émettant à 10,6 μm à température ambiante [Izard,2004].

II.6.3 Méthode de dépôt chimique en phase vapeur :

La synthèse de nanotubes de carbone par la méthode de dépôt chimique en phase vapeur (abrégée en CVD pour Chemical Vapor Deposition) a été effectuée pour la première fois par [Endo et al]. Dans cette méthode, des hydrocarbures (CH₄, C₆H₆...) et de l'hydrogène sont mis en présence de catalyseurs métalliques (Fe, Co, Ni...), le tout dans un four porté à haute température (> 700°C). Les nanotubes se forment alors sur les plots de catalyseurs. L'un des avantages de cette méthode est que les nanotubes se forment de façon continue (contrairement à la méthode d'ablation laser par exemple). Nous pouvons espérer trouver des conditions expérimentales permettant de fabriquer des nanotubes purs avec un contrôle parfait du diamètre et de la chiralité. Cependant, cela est encore loin d'être la réalité.

Un autre avantage de cette méthode est que l'on peut faire croître les nanotubes à des endroits prédéterminés. Cela peut s'avérer très intéressant pour toutes les applications en nano-électronique, par exemple, pour fabriquer des matrices de transistors à base de nanotubes de carbone. 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 monoparois. En effet, si la production de nanotubes de carbone multiparois est relativement facile, celle de nanotubes de carbone monoparois est difficile.

II.6.4 Décomposition catalytique : HiPCO

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

Un flux continu de pentacarbonyle 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 monofeuillets, est formé in situ par la décomposition du gaz précurseur. De surcroît, le monoxyde de carbone utilisé comme source de carbone pour la croissance des tubes ne se pyrolyse pas à 1200°C , ce qui permet d'obtenir des nanotubes de carbone monofeuillets exempts de toute impureté graphitique.

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 monofeuillets. Le procédé de fabrication est à flux continu, ce qui est très positif pour une industrialisation. Une société commerciale [CarbonNanotechInc] 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.

II.7 Propriétés des nanotubes de carbone :

Les nanotubes de carbones présentent les propriétés suivantes :

II.7.1 Propriétés mécaniques :

La présence de fortes liaisons chimique C-C dans le graphite rend les propriétés des nanotubes de carbone exceptionnelles. En effet une importante énergie, équivalente à 348 KJ.mol⁻¹, est nécessaire pour dissocier une telle liaison. Grâce à ces liaisons fortes entre les atomes, les nanotubes de carbone présente un module de Young équivalent à celui du diamant. De nombreux travaux théoriques entrepris montrent un module d'Young des nanotubes de carbone très élevé : Les calculs de Yakobson et son équipe, Yakobson (1996) montrent un module de Young de l'ordre de 1Tpa pour une feuille de graphène. De plus, les tests de flexibilité réalisés sur les nanotubes montrent que ces derniers peuvent être soumis à d'importantes contraintes (longitudinales ou transverses) sans montrer de signe de déformation plastique, de fracture fragile ou de réarrangement atomique.

Sous l'effet de la contrainte, les défauts produits sont distribués sur l'ensemble de la structure et les atomes de carbone peuvent changer d'hybridation sp² et passer à une géométrie tétraédrique caractéristique d'une hybridation sp³ et inversement. Le nanotube possède ainsi une grande facilité à se courber ou se tordre selon son axe.

La Figure II.9 est une image HRTEM d'un nanotube fléchi à cause d'une contrainte mécanique.

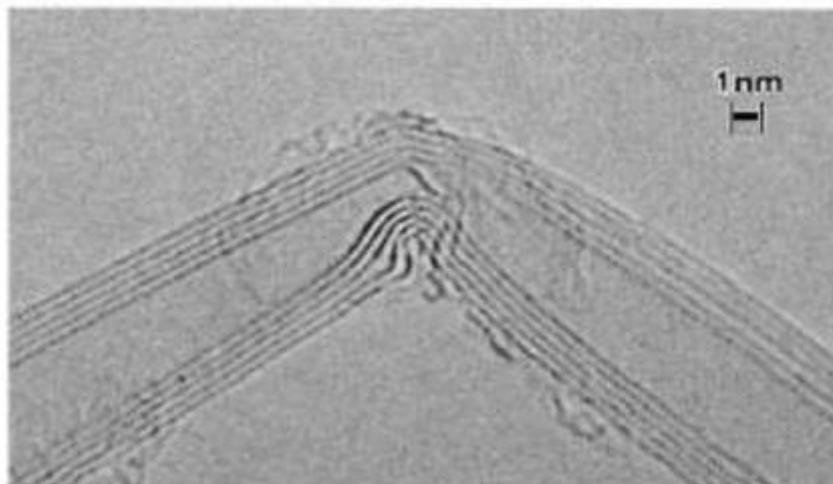


Fig.II.8: Contrainte mécanique qui induit une flexion dans un nanotube de carbone [Iijima, 1996]

Selon les calculs du module d'Young réalisés par l'équipe de Overney, Overney (1993) sur un SWCNT, le résultat est similaire à celui de Yakobson. En utilisant un modèle empirique [Lu.1997], Lu quant à lui, prévoit un module d'Young de 0.97 TPa pour les nanotubes multi parois et de 1.1 TPa pour les nanotubes mono parois.

Il indique aussi que le module d'Young, ainsi que d'autres modules élastiques (cisaillement, ...) sont indépendants des caractéristiques géométriques des tubes (chiralité, diamètre...). Avec une extrémité libre, les nanotubes vibrent sous l'effet du mouvement brownien. En étudiant leur vibration par TEM (Transmission Electron Microscopy), il est possible de remonter à leur module d'Young. Krishnan et al, (1998) obtiennent par cette méthode une valeur de 1.25 TPa avec une marge d'erreur de 0.5 TPa pour des nanotubes mono parois. Par ailleurs, la nano manipulation des nanotubes par AFM a permis de montrer que ces derniers peuvent supporter de larges déformations réversibles et une résistance à la rupture importante. Un nanotube coudé à 180 peut être remis dans une configuration linéaire par nano manipulation à l'aide de la pointe d'AFM. L'équipe de Yu (2000), ont pu mesurer expérimentalement par AFM, des valeurs de résistance à la rupture comprise entre 13 et 52 GPa, valeurs bien plus importantes que celle de l'acier (200MPa). Récemment, Huang et al ont montré expérimentalement que des SWCNT pouvaient présenter des caractéristiques de superplasticité. Un nanotube peut ainsi s'étendre à 280% de sa longueur. [Huang, 2006].

Tableau II.1 Comparaison des propriétés mécaniques des CNT et d'autres matériaux

Matériau	Module de Young (GPa)	Résistance à la traction (GPa)	Densité
SWNT	1050	150	
MWNT	1260	150	2,6
Fibres de Carbone	230	3,5	1,75
Acier	208	0,4	7,8
Résines époxydes	3,5	0,005	1,25
Bois	16	0,008	0,6

II.7.2 Propriétés électroniques :

La structure électronique d'un nanotube de carbone est une conséquence directe de la structure hexagonale d'un mono-feuillet de graphite dont la surface de Fermi se trouve être réduite à 6 points, sommets de la zone de Brillouin. En effet, dans un métal on appelle énergie de Fermi l'énergie maximum des états électroniques occupés. Ces états participent à la conduction si, de surcroît, ils sont délocalisés à travers l'échantillon. Un plan de graphite ne contient que six états de conduction à l'énergie de Fermi.

Le repliement du plan de graphite pour former un nanotube impose une périodicité qui quantifie le vecteur d'onde dans la direction perpendiculaire à l'axe du tube. Des nanotubes avec d'autres angles de repliement seront semi conducteurs, avec une bande interdite inversement proportionnelle au diamètre du tube et égale à quelques milli électronvolts. Compte tenu de tous les angles possibles de repliement, un tiers des nanotubes est conducteur et deux tiers sont semi-conducteurs. Suivant la valeur des deux paramètres caractérisant un nanotube de carbone, à savoir l'hélicité et le diamètre du tube, le nanotube mono feuillet est soit semi conducteur avec une bande d'énergie interdite de quelques milli électronvolts, soit métallique avec seulement deux états électroniques au niveau de Fermi. Ces deux « modes de conduction », orbitales électroniques délocalisées pouvant participer à la conduction électrique le long du tube, en font un système modèle pour l'étude du transport électronique à une dimension.

II.7.3 Propriétés émissives :

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

II.7.4 Propriétés thermiques :

De même que pour les propriétés électroniques, l'unidimensionnalité des nanotubes laisse espérer des propriétés thermiques originales. Le diamant présente la conductivité thermique la plus élevée de tous les matériaux connus à ce jour environ (103 à 300 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Le plan de graphène possède une conductivité comparable, mais le graphite présente des propriétés moindres dues à l'anisotropie. La structure particulière des nanotubes permet de penser que leur conductivité doit également être grande le long de l'axe du nanotube.

La mesure des propriétés thermiques d'un nano-objet comme les nanotubes est délicate. Cependant, quelques études expérimentales ont permis de mesurer la conductivité thermique de nanotubes multi feuillets. Leur conductivité est grande, mais significativement plus faible que celle du graphite. Ces résultats sont a priori décevants, mais ils peuvent s'expliquer en considérant le fait que tous les feuillets ont participé à la conduction thermique alors que seul le feuillet externe a été utilisé pour les mesures. Ces considérations permettent d'estimer la magnitude de la conduction d'un tube mono feuillet au même ordre de grandeur que celle du graphite. [Izard ,2004]

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

Les matériaux carbonés sont utilisés industriellement pour améliorer la conductivité thermique.

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

Des mesures aboutirent à des valeurs de conductivité thermique longitudinale allant de (1800 à 6000 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) pour un fagot isolé et à température ambiante. Des valeurs aussi élevées sont imputées à un libre parcours moyen particulièrement élevé pour les phonons (de l'ordre de 100 nm). Une valeur de (6600 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) fut obtenue pour un nanotube (10,10)

isolé et à température ambiante, ce qui est comparable à la conductivité thermique d'un hypothétique feuillet de graphène isolé.

II.7.5 Propriétés optiques :

Par ailleurs, les nanotubes de carbone possèdent des propriétés optiques intéressantes. En effet, le matériau le plus noir jamais conçu par l'homme est un tapis de nanotubes disposés verticalement, réalisé par des chercheurs de l'Université Rice autour du professeur Pulickel Ajayan ; avec un indice de réflexion de 0,045%, il est 30 fois plus sombre que le carbone, ce qui lui permet d'absorber 99,9 % de la lumière qu'il reçoit. C'est 3 fois « mieux » que ce que permettait l'alliage de nickel-phosphore qui était le matériau réputé le plus sombre. Ces inventions pourraient intéresser les secteurs militaire, de la communication, de l'énergie (solaire notamment), de l'observation, des colorants, etc.

De plus la photo physique des nanotubes en fait un matériau très prometteur pour la conception d'une nouvelle famille de détecteurs infrarouge. En effet, les nanotubes se comportent comme un semi-conducteur à gap direct, dont la valeur varie typiquement entre 0,1eV et 1eV, en fonction du diamètre des nanotubes et selon leur géométrie spatiale (symétrie) ou leur composition (mono- ou multi-feuillet). Les nanotubes présentent donc des propriétés d'absorption intéressantes dans l'infrarouge. Des chercheurs d'IBM ont indiqué avoir réussi à faire émettre de la lumière infrarouge par des nanotubes de carbone semi-conducteurs placés dans une géométrie de transistor.

Les nanotubes non dopés et soumis à un champ électrique généré par une grille peuvent conduire le courant par l'intermédiaire d'électrons (tension de grille négative) ou de trous (tension de grille positive). Si on soumet en plus le nanotube à une tension drain-source (entre les deux extrémités du tube), le courant est transporté par des trous à une extrémité et des électrons à l'autre (transistor ambipolaire). À l'endroit où ces deux types de porteurs se rencontrent (par exemple au milieu du tube si la tension de grille est nulle), il y a recombinaison de paires électron-trou et émission d'un photon.

Cependant, les nanotubes restent un objet peu connu en ce que les propriétés dépendent largement du processus de fabrication (ablation laser, dépôt en phase vapeur, conditions associées.). Malgré les grands progrès réalisés et la maturité incontestable des techniques de croissance et de manipulation, il reste nécessaire, pour chaque laboratoire utilisant des nanotubes, d'acquérir les savoir-faire technologiques de fabrication des dispositifs les mettant en œuvre et de se faire sa propre opinion expérimentale de leurs propriétés.

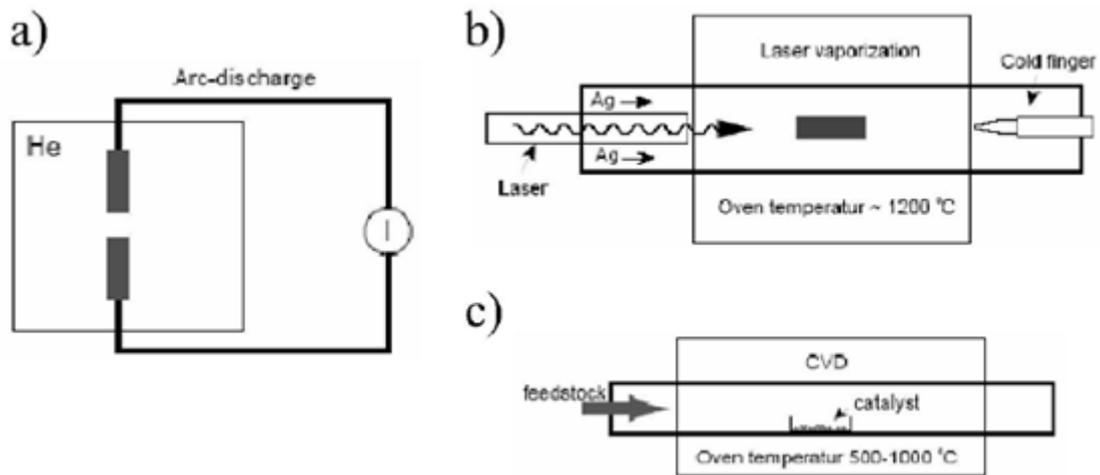


Fig.II.9: Schéma de principe des trois principales méthodes de synthèses des nanotubes de carbones. Sublimation d'une cible de graphite par les méthodes de l'arc électrique (a) et de l'ablation laser (b). Décomposition catalytique d'hydrocarbure, méthode CVD (c)[Bernard, 2007]

II.8 Défauts des nanotubes des carbones:

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 multiparois 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 des nanotubes multiparois 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.

II.9 Applications des nanotubes de carbone :

Du fait de leurs propriétés exceptionnelles, Les nanotubes de carbone recèlent de potentialités trèsdiverses et leurs utilisations ouvrent de nombreuses perspectives.

L'application la plus directe envisagée consiste à les utiliser comme additifs pour polymères(thermoplastiques, thermodurcissables et élastomères). Les propriétés spécifiques des nanotubes decarbone peuvent ainsi être transposées d'électrons semblent parfaitement adoption inter-tubulaire)ainsi qu'entre les dans des matrices, à condition d'assurer une bonne dispersion de l'additif dans le composite. Il est alors possible de choisir d'apporter une propriété bien précise des nanotubes (conductivité thermique ou électrique, renforcement mécanique, etc.) ou, au contraire, une multifonctionnalité. Des matériaux composites haute performance ou des polymères conducteurs peuvent ainsi être élaborés trouvant leurs applications dans l'automobile (peintures conductrices évitant l'emploi de solvants polaires), l'aéronautique (ailes d'avions, trains d'atterrissage des hélicoptères, etc. la défense, les équipements sportifs (raquettes de tennis, vélos, kayaks, clubs de golf, etc.), la médecine, les textiles etc. leurs propriétés électriques semblent en faire un matériau de choix pour l'électronique, la recherche de la miniaturisation étant dans ce domaine un souci primordial.

Les nanotubes de carbone utilisés comme émetteurs ou générateurs d'électrons semblent parfaitement adaptés pour concevoir la nouvelle génération d'écrans plats de télévisions à effet de champ, par ailleurs, la finesse des extrémités des nanotubes à laquelle s'ajoutent leurs propriétés mécaniques et électriques en font des pointes idéales déjà utilisées en microscopies en champ proche pour sonder les propriétés de la matière.

Ils présentent d'excellentes qualités en catalyse notamment en raison de leur stabilité à hautetempérature sous atmosphère inerte. A ces propriétés similaires aux charbons actifs s'ajoute leur très grande surface externe. L'absence de microporosité permet, du surcroit, l'accès rapide aux sites. Ils permettent une activité augmentée et une meilleure sélectivité. Enfin, leurs propriétés mécaniques exceptionnelles ne limitent plus la durée de vie du catalyseur, qu'il s'agisse d'hydrogénation, d'oxydation sélective ou d'hydrodésulfuration.

Ils peuvent également être utilisés dans le domaine de la filtration, principalement dans les secteurs agroalimentaire et médical. Les membranes à base de nanotubes peuvent constituer d'excellents filtres, et les débits importants qu'elles acceptent sont un atout supplémentaire pour une filtration efficace.

Enfin, les caractéristiques géométriques des nanotubes de carbone (surface, cavité intérieure, etc.) sont propices aux manipulations chimiques telles que l'adsorption de gaz et le greffage de molécules. Les nanotubes de carbone pourraient ainsi être employés pour le stockage de gaz et de l'énergie et la réalisation de capteurs chimiques.

Cependant, les études sur le stockage de l'hydro gène pour les piles à combustibles concluent à des possibilités limitées, inférieures au seuil fixé par l'industrie automobile notamment.

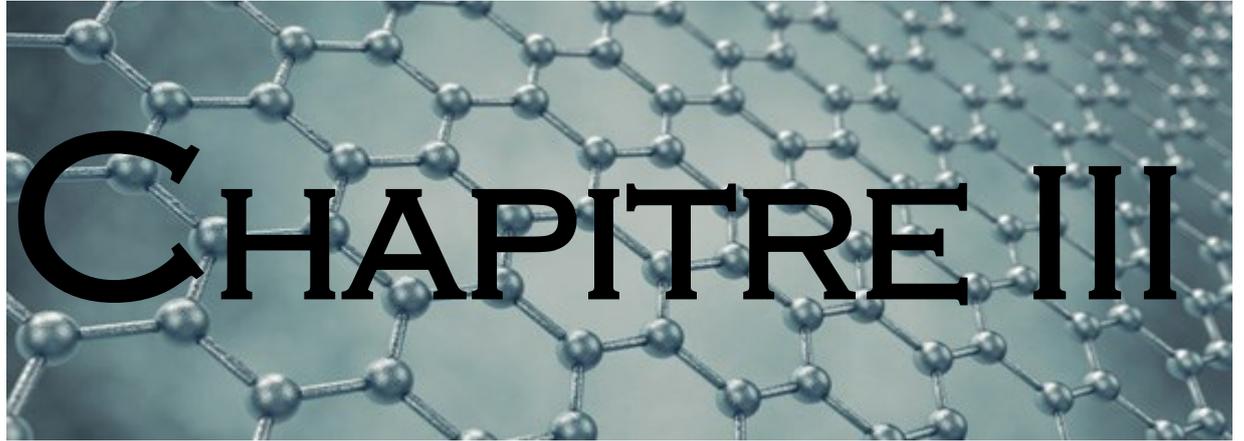
II.10 Inconvénients des Nanotubes:

Les nanotubes de carbone ont des propriétés qui suscitent beaucoup d'espoirs industriels, mais outre leur coût élevé, en début et fin de cycle de vie notamment, ou en cas de dispersion accidentelle, les nanotubes, comme d'autres nano molécules, présentent des risques de pollution nanométrique. Une étude publiée le 4 avril 2010 dans la revue Nature Nanotechnologies indique que les nanotubes de carbone ne seraient non pas bio persistants, comme on le pensait jusqu'alors, mais qu'ils seraient plutôt dégradés par une enzyme, myeloperoxidas qui s'attaque à ces nanotubes. Elle est produite par les neutrophiles, qui constituent la majorité des globules blancs.

Il est important de savoir que grâce à leur petite taille, les nanomatériaux peuvent facilement pénétrer dans le corps humain. En effet, ce dernier a plusieurs entrées, notamment la peau et les voies respiratoires. C'est pour cela que le corps humain est exposé aux dangers. La peau n'est plus une barrière efficace contre bon nombre de corps étrangers. Un nano robot peut passer à travers les barrières naturelles du cerveau tout comme il peut atteindre la zone placentaire chez la femme enceinte. Il faut être prudent, car les effets cardiovasculaires, respiratoires et cancérigènes des nanotechnologies sont encore inconnus. Même si les avancées apportées par les nanotechnologies dans le domaine de la santé sont très prometteuse, il y a beaucoup d'inquiétudes concernant les nanomatériaux.

II.11 Conclusion :

Ce chapitre, nous a permis de constituer une recherche bibliographique sur les nanotubes de carbone de montrer l'importance de ces nano-objets tant dans le domaine des nanosciences que dans leur côté applicatif. Leurs dimensions particulières ainsi que leurs propriétés diverses ouvrent à l'industrie des perspectives d'innovations nombreuses et prometteuses. Vu les différentes propriétés d'un nanotube de carbone, il est important de noter que la structure géométrique du nanotube a une grande influence sur ses propriétés électroniques. En raison des propriétés physiques remarquables, Les nanotubes de carbone sont d'excellents matériaux pour le renforcement des matrices polymères. Ils seraient également susceptibles d'être employés comme un renfort dans un matériau composite qui sera présentée au chapitre quatre.



III.1 Introduction :

En mécanique des structures, les théories des poutres permettent de simplifier les problèmes rencontrés, en assimilant le solide étudié à une poutre, à savoir une structure élancée, dont une dimension est grande devant les deux autres.

Celle-ci s'applique dans un domaine d'efforts permettant au matériau homogène et isotrope de demeurer linéaire et élastique, ce qui implique, entre autres, qu'après déformation, le solide reprend sa forme initiale.

Les théories des poutres sont des modèles utilisés dans le domaine de la résistance des matériaux. On utilise trois modèles :

Tableau III.1 Les théories des poutres

Le modèle 1	Le modèle 2	Le modèle 3
la théorie d'Euler-Bernoulli	la théorie de Timoshenko	La théorie d'ordre élevé
Elle néglige l'influence du cisaillement	Elle prend en compte l'effet du cisaillement, utilise le facteur de correction (le premier ordre).	Elle prend en compte l'effet du cisaillement

Les hypothèses principales sont les suivantes :

- l'axe de la poutre, x , est droit.
- la poutre se déforme dans le plan $x - z$, qui est plan principal d'inertie.
- la poutre transmet des efforts normaux en direction x , des cisaillements en direction z et des moments autour de l'axe y .

La construction d'une théorie de poutre consiste à reprendre, pour un milieu curviligne, le cheminement suivi pour le milieu continu. Les étapes successives du traitement sont donc la définition d'une cinématique, l'application des équations d'équilibre, l'introduction des lois de comportement. On en déduit des relations globales entre forces, couples, flèches et angles de rotation des sections. Dans le cas d'une poutre homogène isotrope, la part de cisaillement dans la flèche est directement reliée à l'élancement (L/h).

III.2. Les modèles classiques :

Ces modèles sont basés sur une distribution linéaire des déplacements dans l'épaisseur (Reissner, 1961), (Yang, 1966), les déformations dues aux cisaillements transverses sont négligées, la normale reste droite et perpendiculaire à la surface moyenne après avoir déformée.

III.2.1 Premières hypothèses fondamentales de la théorie des poutres

III.2.1.1 Principe de Saint venant:

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

III.2.1.2 Principe de Navier Bernoulli généralisé :

L'hypothèse de Navier Bernoulli consiste à supposer que les sections normales à la fibre moyenne restent planes pendant la déformation de la poutre. Cette hypothèse qui permet de calculer les contraintes normales dues au moment fléchissant, est bien vérifiée dans le cas de flexion pure où l'effort tranchant est nul. Par contre, dans le cas de la flexion simple avec effort tranchant, les sections ne restent pas planes, mais se gauchissent en forme de lettre S très aplaties. De même lorsque nous étudions la torsion, nous verrons qu'une section non circulaire, ayant deux axes symétries, prend sous l'effet d'un couple de torsion, un gauchissement radial.

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

- Le gauchissement d'une section est toujours très petit vis-à-vis des dimensions de la section.
- La variation du gauchissement, infiniment voisines.
- Le principe de Navier Bernoulli revient à négliger le cisaillement et le gauchissement des sections transversales dans l'étude de déplacement et de déformation d'un élément de poutre.

Il est rare de trouver une théorie qui serait applicable à tous les cas possibles (matériau composite, anisotrope, isotrope, grand nombre de couches, stratification sandwich etc....) et aux différents domaines (statique, dynamique et flambage), et qui de plus serait simple et facile et ne coûte pas chère en temps de calcul. La théorie la plus ancienne est celle de Kirchoff (Dhatt, 1969) qui néglige l'effet de cisaillement transversal. Elle ne peut en conséquence être appliquée qu'aux structures très minces. La théorie du premier ordre communément associée à (Reissner, 1945), qui fût l'un des premiers à énoncer ses bases, prend en compte les effets du cisaillement transversal à travers l'épaisseur. Elle conduit, de par l'hypothèse des « sections droites restent droites » à un vecteur des contraintes de

cisaillement transverse constant dans l'épaisseur, en contradiction avec une représentation quadratique classiquement obtenue pour les poutres (théorie de Timoshenko) ou les plaques en flexion. Pour corriger cette insuffisance, des facteurs dits de correction du cisaillement transverse γ sont introduits. Les éléments finis formulés en déplacement basés sur la théorie du premier ordre donnent généralement de bons résultats pour les structures isotropes et orthotropes. Ils deviennent peu précis une fois appliqués aux matériaux composites contenant plusieurs couches avec une anisotropie très différente d'une couche à une autre (Topdar, 2003). Certes, les facteurs de correction du cisaillement transverse, une fois introduits dans les modèles du 1^{er} ordre en déplacement, ont permis de résoudre des problèmes de structures multicouches mais leur évaluations dépend malheureusement du nombre de stratifications. Pour écarter à jamais ce type de problème, des théories d'ordre élevé ont été introduites au début des années 70. La première théorie a été proposée en 1969 par Whitney, qui a supposé un champ de déplacement d'ordre élevé à 3. Elle a donné des résultats précis mais fût abandonnée en raison de sa complexité théorique ; elle exige en effet un grand nombre de paramètres (Whitney, 1969). D'autres théories sont apparues par la suite, chacune d'elles présente des avantages et des inconvénients, avec des formalismes différents selon le domaine d'application.

III.3 La théorie classique des poutres :

La théorie classique des poutres (CBT) se base sur les hypothèses d'Euler-Bernoulli, selon lesquelles une section plane et normale au plan moyen de la poutre reste normale et perpendiculaire après déformation (figure III.1).

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

Par

$$\begin{cases} U(x, y) = u_0 - z \cdot \frac{dw}{dx} \\ W(x) = w_0(x) \end{cases} \quad (\text{III-1})$$

Avec :

U, W : Les déplacements suivant les directions x, z respectivement.

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

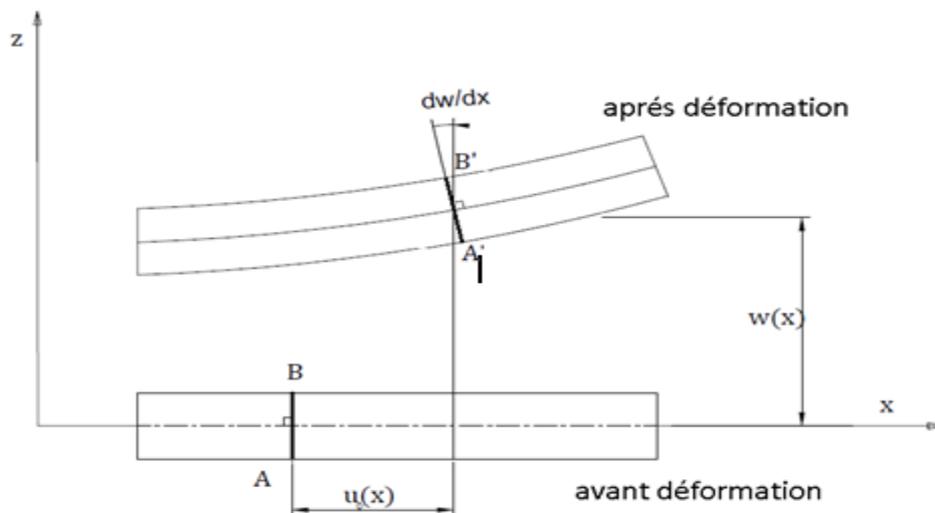


Fig. III.1 : Schéma de principe de la théorie classique des poutres

$\frac{\partial w}{\partial x}$ Est la rotation due à la flexion.

Sous ces hypothèses, les sections droites de la poutre ne subissent aucun glissement, en effet :

$\gamma = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = 0$	(III-2)
--	---------

Donc il en résulte que le cisaillement est négligeable par les hypothèses de cette théorie. Puisque ce modèle ne tient pas en compte l'effet de cisaillement transverse, il donne des résultats imprécis pour les poutres courtes.

III.4 La théorie de déformation en cisaillement de premier ordre (Timoshenko) :

Les études sur la théorie de déformation en cisaillement du premier ordre (FSDT) s'applique pour le cas 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 III.2). Ceci est dû au cisaillement transversal, découvert par Timoshenko, sur l'épaisseur de la poutre. Cette théorie peut être référée dans (Reissner, 1945 ; Mindlin, 1951) qui a mené au modèle de plaque de Reissner-Mindlin. Ainsi que Timoshenko et Woinowsky-Krieger (1959), Reddy (1997, 1999).

Dans ce cas, la fonction $f(z)$ 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.

La théorie de déformation en cisaillement du premier ordre (théorie de Timoshenko) a prolongée la théorie classique des poutres en tenant compte de l'effet de cisaillement transverse, et cela à travers ces hypothèses. L'hypothèse de base porte sur une schématisation du champ de déplacement à l'intérieur du solide (hypothèse "cinématique") : le solide est assimilé à un milieu curviligne, le champ de déplacement du milieu continu étant ensuite évalué à partir de la solution trouvée en supposant qu'une section droite initialement plane et perpendiculaire à la "ligne moyenne" ainsi définie reste plane mais non perpendiculaire. En un point quelconque du milieu curviligne.

Le champ de déplacement pour un point M(x, z) quelconque s'exprime en fonction de ces inconnues :

$$\begin{cases} U(x, z) = u_0(x) + z \cdot \frac{dw}{dx} - z \cdot \varphi_y(x) \\ W(x, z) = w_0(x) \end{cases} \quad \text{(III-3)}$$

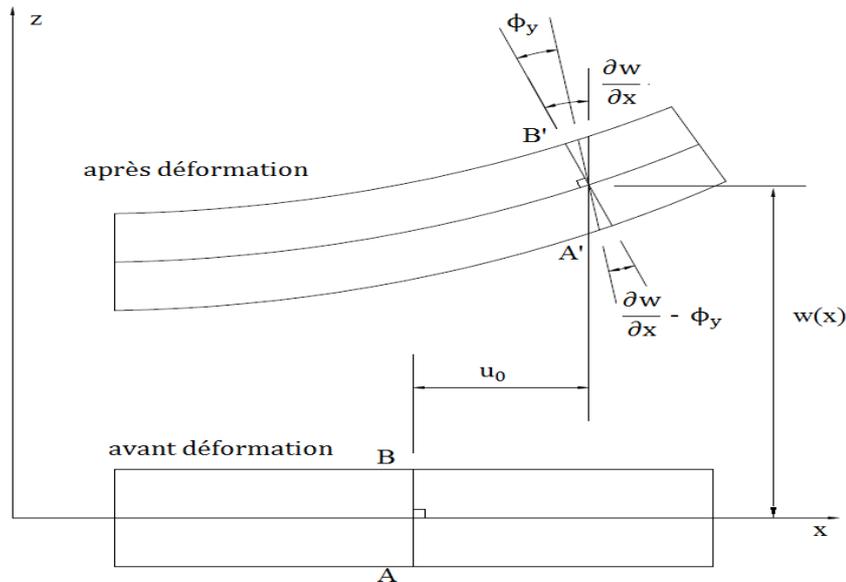


Fig III.2 : Schéma de principe de la théorie des poutres de Timoshenko (FSDT).

Où φ_y : Étant la rotation totale de la section mesurée sur la ligne moyenne de la poutre.

Si on veut calculer la contrainte de cisaillement :

$$\tau = \gamma \cdot G \quad \left\{ \begin{array}{l} \gamma = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = \varphi_y \end{array} \right. \quad \text{(III-4)}$$

Avec G : le module de cisaillement transverse.

Donc, cette théorie a corrigée le défaut de la théorie classique qui ne tient pas compte du cisaillement transverse, mais au même temps ces contraintes sont constantes à travers l'épaisseur, ce qui n'est pas la réalité. Pour cela, les chercheurs ont trouvé des coefficients correcteurs notés "k" pour régler ce problème. Ces coefficients dépendent de la forme géométrique de la poutre considérée (par exemple, pour une poutre de section rectangulaire $k=5/6$).

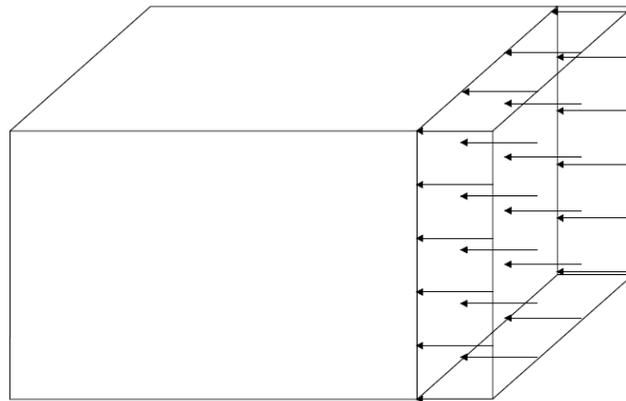


Fig III.3 : La distribution (constante) des contraintes de cisaillement à travers l'épaisseur dans la théorie de Timoshenko.

Les facteurs de correction sont calculés par comparaison entre l'énergie de cisaillement transverse du 1er ordre et celle d'ordre supérieur (Shyang-Ho et Yen-Ling, 2006 ; Davoodinik, 2005 ; Ugural, 1981). Un calcul plus exact (Shyang-Ho et Yen-Ling, 2006 ; Nowinski, 1978 ; Zhong et Yu, 2007 ; Chabraborty et al, 2003) des facteurs de correction sont obtenus en comparant l'énergie de cisaillement du 1er ordre avec l'énergie de cisaillement par contraintes de cisaillement. Ces contraintes sont déduites des équations d'équilibre.

D'ailleurs pour éviter l'introduction d'un facteur de correction, des théories de déformation en cisaillement d'ordre élevé ont été développées.

III.5 La théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevée(HSDT) :

À la différence de la théorie classique et la théorie de Timoshenko avec les acceptations de la distribution linéaire du déplacement par l'épaisseur, la théorie d'ordre élevé est basée sur une distribution non linéaire des champs dans l'épaisseur. Par conséquent, on tient compte des effets de la déformation transversale de cisaillement et/ou de la déformation normale transversale. Ces modèles n'exigent pas des facteurs de correction. Elle est plus précise que la théorie du premier ordre puisqu'elle introduit une fonction qui tient compte du phénomène de "gauchissement". Par définition; le gauchissement apparaît lorsque la section transversale de la poutre perde sa planéité (figure III.4). La fonction $f(z)$ représente le gauchissement et sa dérivée $f'(z)$ le cisaillement.

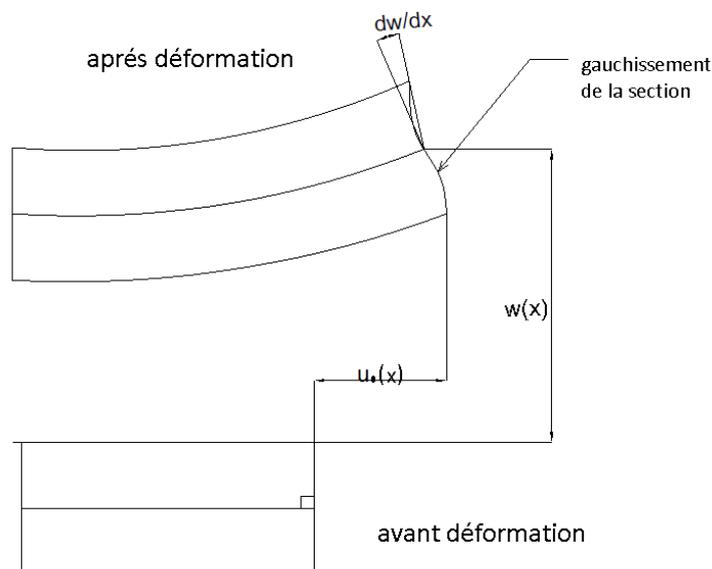


Fig III.4 : Illustration de la poutre d'ordre élevé.

Le champ de déplacement est généralement écrit comme suite:

$$\left. \begin{aligned} u(x, z) &= u_0(x) - z \frac{\partial w_0(x)}{\partial x} + f(z) \varphi_y(x), \\ w(x, z) &= w_0(x), \end{aligned} \right\} \quad \text{(III-5)}$$

Avec : (u_0, w_0) et (φ_y) sont les déplacements en membrane et la rotation autour de l'axe y, respectivement, $f(z)$ est une fonction de cisaillement transverse caractérisant les théories correspondantes. En effet, les déplacements de la théorie classique de poutre (CBT) sont obtenus en prenant $f(z) = 0$, alors que la théorie de premier ordre (FSDT) peut être obtenue par $f(z) = z$.

Pour que les contraintes tangentielles soient nulles sur les bords extrêmes de la poutre,

On doit avoir:

$$f'(z) \Big|_{z = \pm \frac{h}{2}} = 0 \quad \text{(III-6)}$$

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 (III-6). Selon l'expression de la fonction de gauchissement.

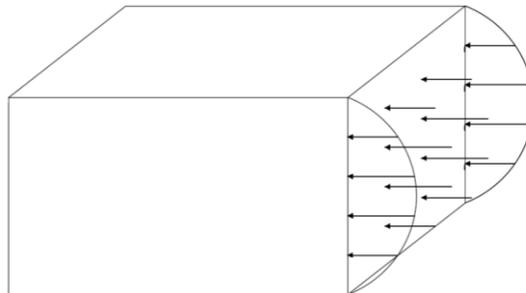


Fig.III.5 : La distribution (variable) des contraintes de cisaillement à travers l'épaisseur dans la théorie d'ordre élevé.

Voici quelques contributions importantes de développement de modèles d'ordre supérieur qui se sont distingués dans la littérature et qui diffèrent par la fonction de formes $f(z)$:

- L'approche d' (Ambartsumyan, 1969) avec ;

$$f(z) = \frac{z}{2} \left(\frac{h^2}{4} - \frac{z^2}{3} \right) \quad \text{(III-7)}$$

- L'approche de (Reissner, 1945), Panc et Kaczkowski avec ;

$$f(z) = \frac{5}{4} z \left(1 - \frac{4z^2}{3h^2} \right) \quad \text{(III-8)}$$

- L'approche de (Reddy, 1987) avec ;

$$f(z) = z \left(1 - \frac{4z^2}{3h^2} \right) \quad \text{(III-9)}$$

Dans le modèle de (Reddy, 1987), le champ de déplacement membranaire est cubique et le déplacement normal w est constant. Ce modèle donne une bonne approximation pour les contraintes de cisaillement transverse par rapport à la solution élastique tridimensionnelle. La distribution des contraintes de cisaillement transversal est parabolique suivant l'épaisseur. Les conditions aux limites sur les surfaces libres sont satisfaites.

-L'approche de (Touratier, 1991) avec ;

$$f(z) = \frac{h}{\pi} \sin \left(\frac{z}{h} \right) \quad \text{(III-10)}$$

Touratier propose le modèle "sinus" qui est différent des autres modèles d'ordre supérieur puisqu'il n'utilise pas de fonction polynomiale. Une fonction trigonométrique sinusoidale est donc introduite pour modéliser la répartition des contraintes de cisaillement suivant l'épaisseur. La fonction de cisaillement transverse s'écrit comme suit :

$$f(z) = \frac{h}{\pi} \sin\left(\frac{z}{h}\right) = \frac{h}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)!} \left(\frac{\pi z}{h}\right)^{2n+1} \quad (\text{III-11})$$

$$= z \left(1 - \frac{\pi^2}{3!} \frac{z^2}{h^2} + \frac{\pi^4}{5!} \frac{z^4}{h^4} - \frac{\pi^6}{7!} \frac{z^6}{h^6} + \dots \right)$$

Récemment, Afaq et al. (Afaq, 2003b) propose un modèle exponentiel avec une cinématique plus riche.

La fonction de cisaillement transverse est de la forme suivante :

$$f(z) = z e^{-2(z/h)^2} \quad (\text{III-12})$$

Le choix de la fonction exponentielle permet un développement en puissance pair et impair de la variable z alors que la fonction "sinus" (Touratier) ne permet qu'un développement en puissances impaires.

-L'approche de (Aydogdu, 2005) avec ;

$$f(z) = z \alpha^{\frac{-2\left(\frac{z}{h}\right)^2}{\ln(\alpha)}} \quad (\text{III-13})$$

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.

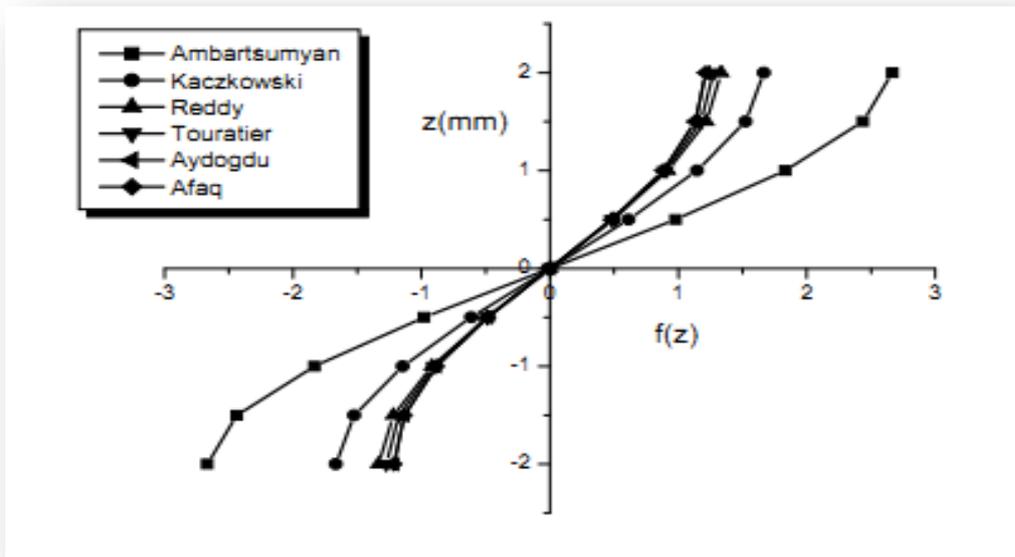


Fig.III.6 :Variation de la fonction de gauchissement $f(z)$ des différents modèles en fonction de l'épaisseur

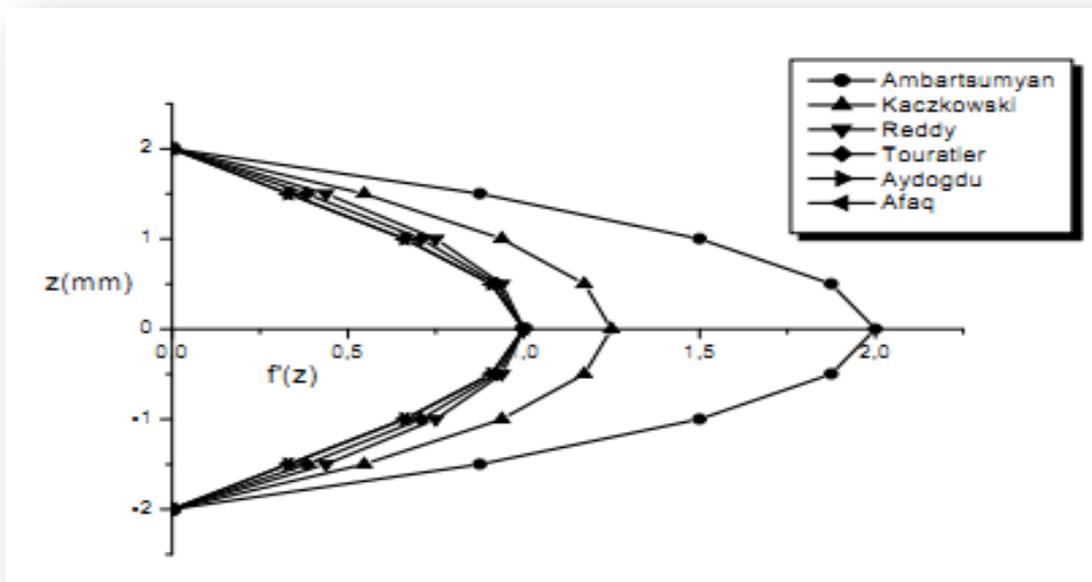


Fig. III.7 :Variation de la fonction de gauchissement $f'(z)$ des différentes modèles en fonction de l'épaisseur.

La figure ci-dessus (III-6), illustre la variation de la fonction de gauchissement $f(z)$ des différents modèles en fonction de l'épaisseur de la poutre. Cette fonction est symétrique par rapport au plan moyen de la poutre. On remarque que les deux approches d'Ambartsumyan et de Kaczkowski sont un peu loin des autres fonctions de forme ; elles ont servies comme éléments de base pour développer les autres fonctions qui sont plus proches de l'analyse 3D. Pour la (figure III-7), on remarque aussi la divergence des deux approches d'Ambartsumyan et de Kaczkowski par rapport aux autres approches.

III.6 Théories des poutres selon la prise en compte de l'effet d'échelle :

La modélisation des structures est différentes entre le monde macro et le monde micro et nano. La différence qui existe est celle de l'effet d'échelle qui a une grande influence sur le comportement de ces structures au niveau micro et nanométrique.

III.6.1 La théorie locale d'élasticité :

C'est tout simplement les théories existées avant le début de l'ère de la minimisation des objets. Cette théorie ne tient pas en compte de l'effet d'échelle dans ces hypothèses et alors néglige les forces entre les atomes. La théorie est applicable dans le cas des structures macro métriques mais incapable d'étudier les structures micro nanométriques.

III.6.2 La théorie non locale d'élasticité :

L'importance croissante des micros et nano technologie a récemment attiré une attention considérable sur le besoin des modèles mathématiques capables de capturer les effets de la petite taille de ces structures. A cet effet, il s'est avéré que les modèles classiques des poutre semblent insatisfaisants pour modéliser un tel système. Pour ces raisons, les chercheurs ont préférés une nouvelle théorie qui est « non locale » qui peut résoudre un tel problème [Giacchino Alotta et al., 2014].

La question qui se pose, pourquoi la non localité ? Le domaine de l'applicabilité des théories classiques de l'élasticité est intimement relié à grandes échelles de temps et de longueur. Si L dénote la longueur caractéristique externe (par exemple, longueur de la fissure, longueur d'onde...etc.) et l la longueur caractéristique interne (par exemple, distance entre granulaire, paramètre granulaires), dans un champ où $L/l \gg 1$ les théories classiques locales prédisent suffisamment le comportement de ce corps solide, alors que si $L/l \approx 1$ les théories locales échouent et nous devons recourir aux théories atomiques qui peuvent expliquer les attractions interatomique à longue portée, même que cette dernière est bien très couteuse en termes de calcul informatique. Pour ces raisons et pour le fait que même la construction d'un modèle moléculaire a besoin de quelques considérations théoriques, les chercheurs ont préférés une formulation « enrichie » continue, où les effets de la micro ou nanostructure et les forces intermoléculaires sont pris en considération dans la modélisation, dans un sens approprié, en présentant des termes non locaux appropriés [Gioacchino Alotta et al., 2014]. Pour le cas dynamique, il y aura un raisonnement semblable T/t là où T est le temps caractéristique externe (par exemple, l'échelle de temps des charges appliquées) et t est le temps caractéristique interne (par exemple, l'échelle de temps de la transmission du signal d'une molécule à une autre). Encore, les théories classiques échouent lorsque $T/t \approx 1$, et on se trouve encore face à un besoin d'une théorie non locale.

Les théories de l'élasticité non locale sont concernées par la physique des corps matériels dont le comportement à un point matériel est influencé par l'état de tous les points du corps. La théorie non local généralise la théorie classique de champ à deux points : (i) la loi de bilan énergétique est considérée valide globalement (pour le corps entier) ; et (ii) l'état du corps à un point matériel est décrit par les fonctionnels de réponse. Ceci signifie que nous

avons besoin de la connaissance complète des variables indépendantes à tous les points du corps pour décrire l'état du corps à chaque point. La terminologie de la théorie d'élasticité non locale doit être comprise dans ce sens. Eringen a proposé, pour la première fois, l'élasticité non locale pour expliquer l'effet de l'échelle en élasticité en supposant que l'effort à un point de référence peut être considéré comme une fonction du champ de contrainte à chaque point dans le domaine. De cette façon, la taille interne a pu être considérée dans les équations constitutives simplement comme un paramètre matériel. Dans un travail de Peddieson et al., ils ont proposé une version d'élasticité non local pour formuler une version non local de théorie de poutre d'Euler-Bernoulli. Ils ont conclu que la mécanique continue non locale pourrait potentiellement jouer un rôle utile dans l'analyse liée aux applications de la nanotechnologie [A. Cemal Eringen, 2002].

Avant les années 60, quelques éléments de théorie de l'élasticité étaient entrés dans la discussion des divers phénomènes physiques qui ont exigé des descriptions mathématiques sous la forme des équations différentielles et intégro-partielles. Par exemple, les équations radiatives du transfert de Chandrasekhar sont de ce type. D'autres références historiques dans cette catégorie sont données en plusieurs articles dans la *Continuum Physics*, Vol. IV, édité par Eringen.

L'approche de l'élasticité non locale dépendante au temps a été faite par Eringen et à l'élasticité micropolaire non locale par Eringen. Ces premières théories n'ont pas inclus l'aspect (i), à savoir, la nature globale des lois d'équilibre. Cet aspect avec les équations constitutives non locales a été formulé par Eringen et Edelen. Un revu de développement de la théorie, ainsi que les références historiques des années 1976, sont contenus dans la *Continuum Physics*, Vol. IV, édité par Eringen.

III.7 Les fondations élastiques:

Il existe de nombreuses études sur la modélisation de fondation élastique Winkler dans la littérature. Zhou [Zhou.1993.] et Eisenberger [Eisenberger 1994] ont étudié une solution générale aux vibrations des poutres sur différent fondation élastique Winkler. Eisenberger et Clastornik [Eisenberger 1987] ont étudié la vibration et le flambement d'une poutre sur différent fondation élastique Winkler. Une réponse dynamique d'une poutre de Timoshenko avec une masse en mouvement concentré a été résolu par Lee [Lee 1998]. En outre, certains chercheurs [Ma 2009] [Civalek 2007] ont étudié l'analyse des fondations élastiques avec les modèles Winkler-Pasternak.

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

Le modèle le plus simple concernant la base élastique est le modèle de Winkler, qui considère la base comme une série de ressorts séparés sans effets d'accouplement. Ceci a été amélioré plus tard par Pasternak qui a tenu compte des interactions entre les ressorts séparés (figure III.8). Dans le modèle de Winkler en présentant un nouveau paramètre dépendant. Dès lors, le modèle de Pasternak était largement employé pour décrire le comportement mécanique des interactions structures-bases élastiques.

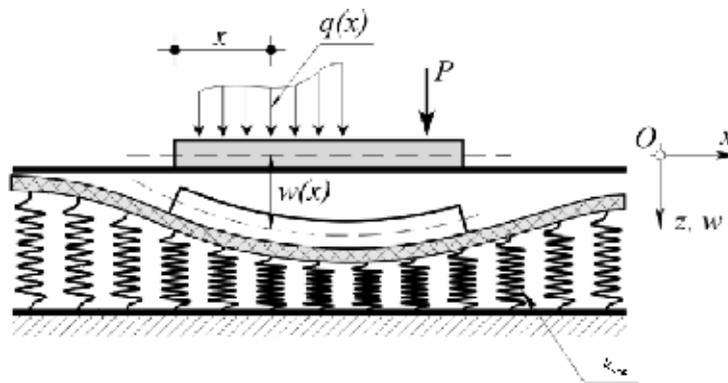


Fig III.8: Une poutre repose sur une fondation élastique (Winkler-Pasternak).

Le milieu élastique exerce une pression le long de l'axe (x), agissant sur le tube extérieur, cette pression est dû à l'entourage du milieu élastique qui est modélisé comme une suite de ressorts identiques a un module (k_{win}). (figure. III.8)

De ce fait, le milieu élastique exerce une densité de force égale à: [Yoon 2003] [Sudak 2003]

$$f_2 = -k_{win} w_2$$

Où le signe négatif indique que la pression f_2 est opposée à la déflexion du nanotube externe

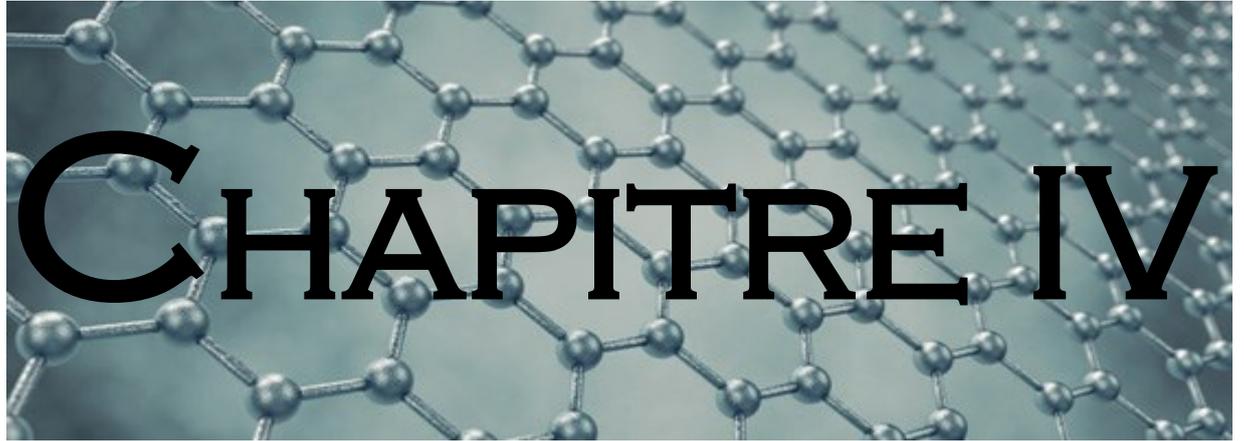
Le (k_{win}) ici est proportionnel avec le module de Young de la matrice polymère. Donc il est considéré comme une fonction de changement de la température [Yoon 2003]

$$k_{win} = k_{win}^0 (1 - 0.0003\theta)$$

Où (k_{win}^0) est la constante de ressort dans le cas de la température de référence d'environnement.

III.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a abordé le sujet de la modélisation des poutres et les théories d'élasticité existé dans ce domaine. Ces théories sont divisées en deux parties, selon deux critères. Selon la prise en compte du cisaillement ou non : on trouve globalement trois types dans la littérature, la théorie d'Euler-Bernoulli, la théorie de Timoshenko et la théorie d'ordre élevé. Un deuxième critère est la prise en compte de l'effet d'échelle, on trouve deux théories : la théorie locale et la théorie non locale. Dans ce travail, on va utiliser la théorie non locale d'ordre élevée.



IV.1 Introduction:

Une poutre, ou un élément de flexion, est fréquemment rencontré dans les structures mécaniques et de génie civil. Elle est l'élément structural le plus répandu, puisqu'elle fait partie de la plupart des ouvrages de construction et elle est soumise aux charges appliquées transversalement à sa longueur, qui provoque sa flexion et son cisaillement transverse.

Le but de ce chapitre est de déterminer les équations d'équilibre d'une poutre simplement appuyée en matériau isotrope en utilisant le principe d'Hamilton qui affirme que la somme des variations d'énergie cinétique, potentielle et de la variation du travail effectuée par les forces non conservatives, prise pendant un intervalle de temps quelconque T_1 à T_2 est identiquement nulles.

IV.2 Représentation de la nano- poutre utilisée:

Considérons une poutre constituée d'un matériau isotrope (voir figure IV.1).

La géométrie de la poutre en considération est comme suit :

$$0 \leq X \leq L \quad -b/2 \leq Y \leq b/2 \quad -h/2 \leq Z \leq h/2$$

Où : x , y et z sont les coordonnées cartésiennes, L est la longueur, b la largeur et h est la hauteur totale de la poutre. La poutre est soumise à une charge transversale d'intensité $q(x)$ par unité de longueur de la poutre.

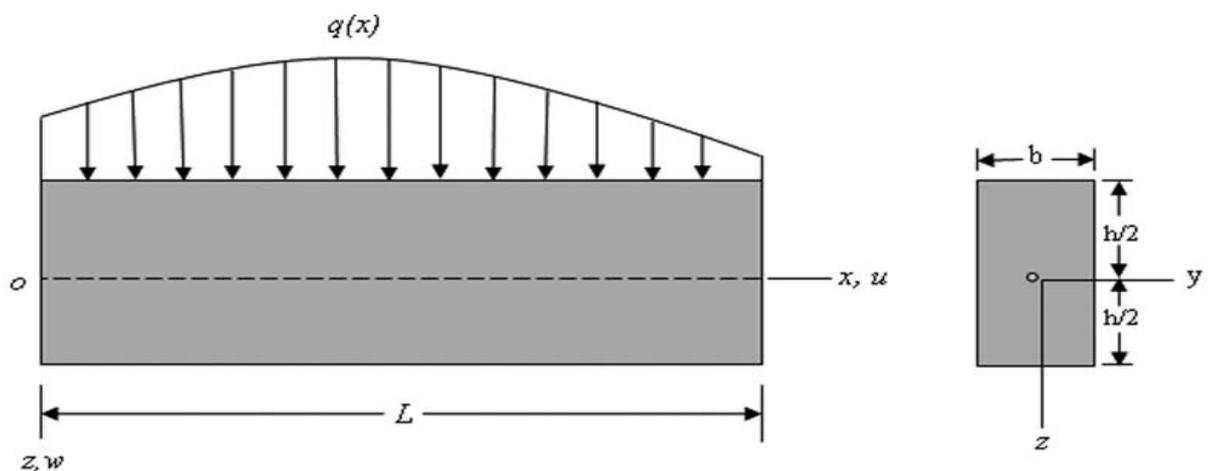


Fig.IV.1: Poutre en flexion dans le plan (x, z)

IV.3 Formulations mathématiques :

IV.3 .1 Cinématiques :

Le champ de déplacement de la présente théorie est choisi selon les hypothèses suivantes : (1) les déplacements en plan et transverse sont partitionnés en flexion et en cisaillement ; (2) l'expression de la flexion est similaire à celle donnée par la théorie classique des poutre et (3) l'expression du cisaillement donne lieu à la variation hyperbolique de la déformation tangentielle et par conséquent à la contrainte tangentielle à travers l'épaisseur de la poutre de telle sorte que cette contrainte s'annule sur la surface supérieure et inférieure de la poutre.

IV.3 .2 Le champ de déplacement:

En se basant sur le travail présenté par Berrabah et al. (2013) et Ouled Larbi et al.(2013), le champ de déplacement de la présente théorie peut être exprimé par :

$$u(x, z, t) = -z \frac{\partial w_b}{\partial x} - f(z) \frac{\partial w_s}{\partial x} \quad (\text{IV-1a})$$

$$w(x, z, t) = w_b(x, t) + w_s(x, t) \quad (\text{IV-1b})$$

Où w_b et w_s sont respectivement les composantes de la flexion et du cisaillement du déplacement transversal le long du plan médian de la poutre. Dans ce travail une nouvelle fonction hyperbolique est proposée :

$$f(z) = \frac{h \sinh\left(\frac{10z}{h}\right)}{10 \cosh(5)} - \frac{h}{100} \quad (\text{IV-2})$$

Le champ de déformation associé au champ de déplacement de l'équation (IV-1) est donné par :

$$\varepsilon_x = z k_x^b + f(z) k_x^s \quad (\text{IV-3a})$$

$$\gamma_{xz} = g(z) \gamma_{xz}^s \quad (\text{IV-3b})$$

Où

$$k_x^b = -\frac{\partial^2 w_b}{\partial x^2}, \quad k_x^s = -\frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2}, \quad \gamma_{xz}^s = \frac{\partial w_s}{\partial x}, \quad (\text{IV-3c})$$

$$g(z) = 1 - f'(z) \text{ et } f'(z) = \frac{df(z)}{dz} \quad (\text{IV-3d})$$

IV.3.3 Les relations constitutives :

Le comportement des matériaux à l'échelle nanométrique est différent de celui à l'échelle macroscopique. L'élasticité non locale est considérée pour la première fois par Eringen, (1972, 1983), Il a supposé que le champ des contraintes en un point x dans un milieu élastique continu ne dépend pas uniquement du champ de déformation à ce point, mais aussi de la déformation dans tous les autres points du milieu continu. Eringen a appliqué cette hypothèse dans la théorie atomique dynamique et expérimentale de la dispersion des photons. En effet, les composantes du tenseur des contraintes en un point x sont exprimées par :

$$\sigma_x - \mu \frac{d^2 \sigma_x}{dx^2} = E \varepsilon_x \quad (\text{IV-4a})$$

$$\tau_{xz} - \mu \frac{d^2 \tau_{xz}}{dx^2} = G \gamma_{xz} \quad (\text{IV-4b})$$

Où E et G sont respectivement le module de Young et le coefficient de cisaillement de la nano poutre, et $\mu = (e_0 a)^2$ est le paramètre non local qui prend en compte l'effet d'échelle, 'a' est une longueur caractéristique interne et e_0 est une constante appropriée à chaque matériaux.

IV.3.4 Les équations du mouvement :

Dans cette partie, le principe d'Hamilton est utilisé pour déterminer les équations du mouvement (Ait Yahia et al. 2015, Bourada et al. 2015, Mahi et al. 2015, Nedri et al. 2014, Hebali et al. 2014, Belabed et al. 2014, Draiche et al. 2014, Benachour et al. 2011, Bessaim et al. 2013, Bourada et al. 2012) :

$$\int_0^T (\delta U + \delta V - \delta K) dt = 0 \quad (IV-5)$$

Où δU est la variation de l'énergie de déformation ; δV est la variation de l'énergie potentielle et δK est la variation de l'énergie cinétique.

La variation de l'énergie de déformation de la nano-poutre est donnée par la relation suivante :

$$\begin{aligned} \delta U &= \int_0^L \int_A (\sigma_x \delta \varepsilon_x + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz}) dA dx & (IV-6) \\ &= \int_0^L \left(-M_b \frac{d^2 \delta w_b}{dx^2} - M_s \frac{d^2 \delta w_s}{dx^2} + Q \frac{d \delta w_s}{dx} \right) dx \end{aligned}$$

Où M_b , M_s et Q sont les résultantes des contraintes définies par :

$$(M_b, M_s) = \int_A (z, f) \sigma_x dA \quad \text{et} \quad Q = \int_A g \tau_{xz} dA \quad (IV-7)$$

La variation de l'énergie potentielle par l'application des charges peut être écrite comme suit :

$$\delta V = - \int_0^L (q + f_e) \delta(w_b + w_s) dx - \int_0^L N_0 \frac{d(w_b + w_s)}{dx} \frac{d \delta(w_b + w_s)}{dx} dx \quad (IV-8)$$

Où q et N_0 sont respectivement la charge transversale et la charge axiale. Les deux modèles de type Winkler et Pasternak sont utilisés pour étudier l'interaction des nano-poutres avec le milieu élastique .(Ait Atmane et al., 2010; Boudierba et al., 2013; Zidi et al., 2014; Khalfi et al., 2014; Ait Amar Meziane et al., 2014):

$$f_e = k_w w - k_s \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (IV-9)$$

Avec k_w et k_s sont respectivement les modules de Winkler et Pasternak du milieu élastique.

La variation de l'énergie cinétique peut être exprimée comme suite :

$$\begin{aligned} \delta K &= \int_0^L \int_A \rho [\dot{u} \delta \dot{u} + \dot{w} \delta \dot{w}] dA dx \\ &= \int_0^L \left\{ I_0 (\dot{w}_b + \dot{w}_s) (\delta \dot{w}_b + \delta \dot{w}_s) + I_2 \left(\frac{d\dot{w}_b}{dx} \frac{d\delta \dot{w}_b}{dx} \right) + K_2 \left(\frac{d\dot{w}_s}{dx} \frac{d\delta \dot{w}_s}{dx} \right) \right. \\ &\quad \left. + J_2 \left(\frac{d\dot{w}_b}{dx} \frac{d\delta \dot{w}_s}{dx} + \frac{d\dot{w}_s}{dx} \frac{d\delta \dot{w}_b}{dx} \right) \right\} dx \end{aligned} \quad (IV-10)$$

L'indice supérieur "''" indique la dérivée partielle par rapport au temps, ρ est la masse volumique; et (I_0, I_2, J_2, K_2) sont les inerties massiques définies par:

$$(I_0, I_2, J_2, K_2) = \int_A (1, z^2, z f, f^2) \rho dA \quad (IV-11)$$

En introduisant les équations . (IV-6),(IV-8), et (IV-10) dans l'équation. (IV-5) et en intégrant par partie par rapport aux deux variables, puis en rassemblant les coefficient δw_b et δw_s , les équations du mouvement suivantes de la nano-poutre sont obtenues:

$$\delta w_b : \frac{d^2 M_b}{dx^2} + q - f_e - N_0 \frac{d^2 (w_b + w_s)}{dx^2} = I_0 (\ddot{w}_b + \ddot{w}_s) - I_2 \frac{d^2 \ddot{w}_b}{dx^2} - J_2 \frac{d^2 \ddot{w}_s}{dx^2} \quad (IV-12a)$$

$$\delta w_s : \frac{d^2 M_s}{dx^2} + \frac{dQ}{dx} + q - f_e - N_0 \frac{d^2 (w_b + w_s)}{dx^2} = I_0 (\ddot{w}_b + \ddot{w}_s) - J_2 \frac{d^2 \ddot{w}_b}{dx^2} - K_2 \frac{d^2 \ddot{w}_s}{dx^2} \quad (IV-12b)$$

Et les conditions aux limites du présent modèle sont les suivantes :

$$\text{spécifié } w_b \text{ ou } V_b \equiv \frac{dM_b}{dx} - (k_s + N_0) \frac{d(w_b + w_s)}{dx} + I_2 \frac{d\ddot{w}_b}{dx} + J_2 \frac{d\ddot{w}_s}{dx} \quad (IV-12c)$$

$$\text{spécifié } w_s \text{ ou } V_s \equiv \frac{dM_s}{dx} + Q - (k_s + N_0) \frac{d(w_b + w_s)}{dx} + J_2 \frac{d\ddot{w}_b}{dx} + K_2 \frac{d\ddot{w}_s}{dx} \quad (IV-12d)$$

$$\text{spécifié } \frac{dw_b}{dx} \text{ ou } M_b \quad (IV-12e)$$

$$\text{spécifié } \frac{dw_s}{dx} \text{ ou } M_s \quad (IV-12f)$$

Lorsque l'effet de la déformation de cisaillement est négligé ($w_s = 0$), Les équations d'équilibre de l'équation. (IV-12) deviennent celles obtenues à partir de la théorie des poutres d'Euler-Bernoulli.

En substituant les relations contraintes-déformations exprimées par l'équation. (IV-4) dans les expressions des résultantes des forces et des moments données, Les équations constitutives suivantes sont obtenues

$$M_b - \mu \frac{d^2 M_b}{dx^2} = -D \frac{d^2 w_b}{dx^2} - D_s \frac{d^2 w_s}{dx^2} \quad (IV-13a)$$

$$M_s - \mu \frac{d^2 M_s}{dx^2} = -D_s \frac{d^2 w_b}{dx^2} - H_s \frac{d^2 w_s}{dx^2} \quad (IV-13b)$$

$$Q - \mu \frac{d^2 Q}{dx^2} = A_s \frac{dw_s}{dx} \quad (IV-13c)$$

Où (IV-13d)

$$(D, D_s, H_s) = \int_A (z^2, z f, f^2) E dA, \quad A_s = \int_A g^2 G dA$$

En substituant l'équation (IV-3) dans l'équation (IV-12), les équations d'équilibre non locales peuvent être écrites en termes de déplacements (w_b, w_s) comme suite:

$$\begin{aligned} & -D \frac{d^4 w_b}{dx^4} - D_s \frac{d^4 w_s}{dx^4} + q - \mu \frac{d^2 q}{dx^2} - f_e + \mu \frac{d^2 f_e}{dx^2} - N_0 \left(\frac{d^2 (w_b + w_s)}{dx^2} - \mu \frac{d^4 (w_b + w_s)}{dx^4} \right) \\ & = I_0 \left((\ddot{w}_b + \ddot{w}_s) - \mu \frac{d^2 (\ddot{w}_b + \ddot{w}_s)}{dx^2} \right) - I_2 \left(\frac{d^2 \ddot{w}_b}{dx^2} - \mu \frac{d^4 \ddot{w}_b}{dx^4} \right) - J_2 \left(\frac{d^2 \ddot{w}_s}{dx^2} - \mu \frac{d^4 \ddot{w}_s}{dx^4} \right) \end{aligned} \quad (IV-14a)$$

Les équations du mouvement de la théorie locale peuvent être déterminées de l'équation

(IV-14) en prenant le paramètre d'échelle μ égal à 0.

IV.4 Les solutions analytiques :

Dans cette partie des solutions explicites sont présentées pour la flèche, la charge critique du flambement et la fréquence en fonction des paramètres géométriques, les constantes matérielles, les deux paramètres du module de Winkler et Pasternak et le paramètre non local. Le champ de déplacement dans le cas des nano-poutres simplement appuyées peut être décrit par les fonctions harmoniques suivantes qui satisfaites les conditions aux limites.

$$\begin{Bmatrix} w_b \\ w_s \end{Bmatrix} = \sum_{n=1}^{\infty} \begin{Bmatrix} W_{bn} \sin(\alpha x) e^{i\omega t} \\ W_{sn} \sin(\alpha x) e^{i\omega t} \end{Bmatrix} \quad (\text{IV-15a})$$

Où W_{bn} , et W_{sn} sont des paramètres arbitraires à déterminer, ω est la fréquence propre associée à n mode de vibration, et $\alpha = n\pi / L$. Il est connu que le moment de flexion max et/ou les conditions de la force de cisaillement du modèle non local est différent du modèle classique comme discuté par Lu(2007). Les conditions aux limites d'une nano-poutres simplement appuyées sont spécifiées par $w = 0$ et $M_b = 0$, ou M_b est le moment non local de flexion donné à partir des équations (IV-12a et IV-13a) comme suit :

$$M_b = -D \frac{d^2 w_b}{dx^2} - D_s \frac{d^2 w_s}{dx^2} + \mu \left[-q + f_e + N_0 \frac{d^2 (w_b + w_s)}{dx^2} + I_0 (\ddot{w}_b + \ddot{w}_s) - I_2 \frac{d^2 \ddot{w}_b}{dx^2} - J_2 \frac{d^2 \ddot{w}_s}{dx^2} \right] = 0 \quad \text{at } x = 0, L \quad (\text{IV-15b})$$

La charge transversale q est aussi exprimée en sous forme de série de Fourier comme suit :

$$q(x) = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \sin \alpha x, Q_n = \frac{2}{L} \int_0^L q(x) \sin(\alpha x) dx \quad (\text{IV-16})$$

Les coefficients de Fourier Q_n associés avec quelques types de charge sont donnés par :

$$Q_n = q_0, \quad n = 1 \quad \text{Une charge sinusoïdale} \quad (\text{IV-17a})$$

$$Q_n = \frac{4q_0}{n\pi}, \quad n = 1,3,5,\dots \quad \text{Une charge uniforme} \quad (\text{IV-17b})$$

Substituant les expressions de w_b , w_s , et q à partir des équations (IV-15) et (IV-16) dans l'équation (IV-14), des solutions analytiques peuvent être obtenues à partir des équations suivantes:

$$\left(\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12} & S_{22} \end{bmatrix} + \lambda (k_w + k_s \alpha^2) \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} - \lambda N_0 \alpha^2 \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} - \lambda \omega^2 \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{12} & m_{22} \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} W_{bn} \\ W_{sn} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \lambda Q_n \\ \lambda Q_n \end{Bmatrix} \quad (\text{IV-18})$$

Où

$$S_{11} = D \alpha^4, \quad S_{12} = D_s \alpha^4, \quad S_{22} = H_s \alpha^4 + A_s \alpha^2, \quad \lambda = 1 + \mu \alpha^2$$

(IV-19)

$$m_{11} = I_0 + I_2 \alpha^2, \quad m_{12} = I_0 + J_2 \alpha^2, \quad m_{22} = I_0 + K_2 \alpha^2$$

IV.4.1 La flexion:

La flèche statique est obtenue à partir de l'équation (IV-18), en mettant N_0 et toutes les dérivées par rapport au temps égales à 0.

$$w(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(S_{11} + S_{22} - 2S_{12})}{(S_{11}S_{22} - S_{12}^2)} \lambda Q_n \sin \alpha x \quad (\text{IV-20})$$

IV.4.2 Le flambement :

La charge critique du flambement est obtenue à partir de l'équation (IV-18) en mettant q et toutes les dérivées par rapport au temps égales à 0.

$$N_0 = \frac{S_{11}S_{22} - S_{12}^2}{\lambda \alpha^2 (S_{11} - 2S_{12} + S_{22})} \quad (\text{IV-21})$$

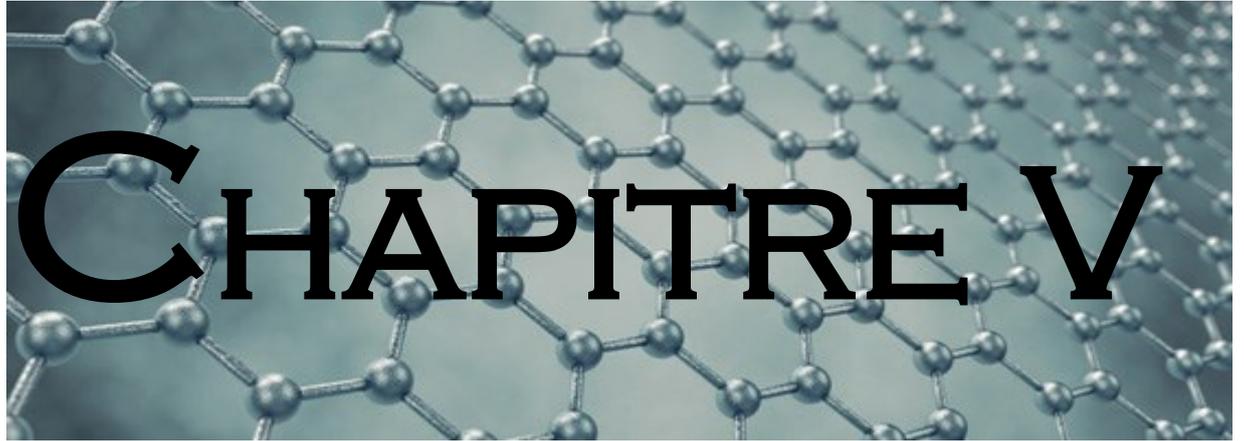
IV.4.3 La vibration :

En annulant q et N_0 dans l'équation (IV-18), la fréquence naturelle peut être obtenue à partir de l'équation suivante :

$$(m_{11}m_{22} - m_{12}^2)\lambda^2 \omega^4 + (2S_{12}m_{12} - S_{11}m_{22} - S_{22}m_{11})\lambda \omega^2 + (S_{11}S_{22} - S_{12}^2) = 0 \quad (\text{IV-22})$$

IV.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons proposé une solution générale du comportement en flexion, en flambement et en vibration des nano-poutres basées sur une fondation élastique en proposant une nouvelle théorie de déformation de cisaillement hyperbolique avec la prise en compte de l'effet d'échelle, la formulation proposée est basée sur le principe d'Hamilton. Elle n'exige pas de facteur de correction de cisaillement et donne une description parabolique de la contrainte de cisaillement transverse à travers l'épaisseur tout en respectant la condition de la contrainte de cisaillement nulle sur les deux bords supérieur et inférieur de la poutre.



V.1 Introduction :

Dans ce dernier chapitre, différents exemples numériques ont été présentés et discutés pour vérifier l'exactitude de la présente théorie.

A titre de vérification, les résultats obtenus sont comparés avec ceux rapportés dans la littérature.

Les résultats numériques illustrés dans cette partie démontrent l'influence des fonctions de la déformation du cisaillement, le paramètre non local, l'élanement, les deux paramètres de fondation sur les flèches, les charges critiques du flambement et les fréquences des nanopoutres. Pour tous les calculs, le coefficient de Poisson est pris égal à 0,3.

Toutefois, pour le calcul effectué en utilisant la théorie de Timoshenko (TBT), qui se traduit par une déformation en cisaillement transverse constante dans l'épaisseur. Cependant du fait que les contraintes ainsi calculées ne s'annulent pas sur les surfaces extrêmes, cette théorie nécessite l'introduction d'un facteur de correction de cisaillement pris égal à 5/6.

Cependant pour éviter l'introduction de ce facteur, des théories de déformation en cisaillement d'ordre élevée (HSDTs) ont été développées comme la présente théorie non locale de déformation de cisaillement hyperbolique. Ces théories sont particulièrement bien adaptées à la modélisation du comportement des plaques épaisses ou les poutres courtes, où la déformation transverse joue un rôle prédominant.

Ces hypothèses considèrent que la contrainte de cisaillement s'annule sur les surfaces supérieures et inférieures de la plaque ou de la poutre dans la direction transverse

La longueur de la nano-poutre L est égale à 10 nm. Pour faciliter l'étude les quantités non dimensionnelles suivantes sont employées.

$\bar{w} = 100 w \frac{EI}{q_0 L^4}$	Pour les charges uniformes ;
$\bar{N} = N_{cr} \frac{L^2}{EI}$	La charge critique du flambement ;
$\bar{\omega} = \omega L \sqrt{\frac{I_0}{EI}}$	Le paramètre de fréquence ;
$K_w = \frac{k_w L^4}{EI}$	Le paramètre du module de Winkler ;
$K_s = \frac{k_s L^4}{EI}$	Le paramètre du module de Pasternak ;

V.2 Validation des résultats :

Pour démontrer la validité et la précision des présentes formules, les résultats de la flexion, du flambement et des vibrations libres en utilisant la nouvelle présente théorie sont comparés avec ceux des travaux déjà publiés.

Le tableau V.1 montre les flèches maximales adimensionnelles \bar{w} d'une nano-poutre simplement appuyée soumise à un chargement uniforme, les valeurs sont calculées en utilisant 100 termes dans l'équation (IV-20), les résultats obtenus sont comparés avec ceux de la théorie d'Euler Bernoulli (EBT), la théorie des poutres de Timoshenko (TBT) et la théorie des poutres de Reddy (RBT). On peut observer que les résultats calculés sont en bon accord avec ceux prédits par les deux théories TBT et RBT pour toutes les valeurs des rapports d'épaisseur $\frac{L}{h}$ et les valeurs du paramètre non-local $(e_0 a)$.

Toutes fois les petites différences entre les résultats obtenus par la présente théorie et la théorie RBT sont dues à la fonction utilisée. Cela peut être expliqué que la fonction

hyperbolique est beaucoup plus riche que la fonction utilisée par la théorie RBT. Ce point est déjà discuté par IdIbi et al. (1997) pour la fonction cubique.

Nos résultats sont également en bon accord avec ceux obtenus par Berrabah et al. (2013). Pour toutes les théories, Il est observé que les valeurs des flèches \bar{w} augmentent avec l'augmentation du paramètre non-local pour chaque élancement spécifique. De plus, pour un rapport d'épaisseur $\frac{L}{h}$ élevé, toutes les théories sont approximativement identiques dans la prédiction de la flèche, ce qui confirme la précision de la théorie d'Euler Bernoulli dans le cas des nano-poutres élancées, il est noté que pour les poutres très minces le problème de cisaillement est trouvé souvent quand les approches numériques sont utilisées. Ce problème est résolu par plusieurs chercheurs tels que Reddy (1997).

Tableau V.1: Comparaison des flèches maximales non dimensionnelle \bar{w} pour des nano-poutres simplement appuyées sous un chargement uniforme ($K_w = K_s = 0$).

$K_w = \mu K_s = 0$	L / h	EBT	TBT	RBT	Present
0	5	1.302083332	1.432083343	1.43195457	1.428485570
	10	1.302083332	1.334583333	1.33457528	1.333693217
	20	1.302083332	1.310208335	1.31020782	1.309986384
	100	1.302083332	1.310208332	1.30240832	1.302399463
1	5	1.427083338	1.567516123	1.56735522	1.563603269
	10	1.427083338	1.462191536	1.46217859	1.461223604
	20	1.427083338 ²	1.435860392	1.43585833	1.4356195420
	100	1.427083338	1.427434425	1.42743441	1.427424835
2	5	1.552083348	1.702948909	1.70275587	1.698720972
	10	1.552083348	1.589799737	1.58977651	1.588753993
	20	1.552083348	1.561512444	1.56150884	1.561252708
	100	1.552083348	1.552460510	1.55246049	1.552450205
3	5	1.677083354	1.838381690	1.83815652	1.833838667
	10	1.677083354	1.717407940	1.71737713	1.716284376
	20	1.677083354	1.687164510	1.68715934	1.686885860
	100	1.677083354	1.677486600	1.67748656	1.677475585
4	5	1.802083363	1.973814474	1.97355717	1.968956364
	10	1.802083363	1.845016141	1.84497774	1.843814764
	20	1.802083363	1.821816558	1.81280985	1.812519017
	100	1.802083363	1.802512690	1.80251265	1.802500960

Les deux tableaux V.2 et V.3 représentent respectivement les variations de la charge critique du flambement \bar{N} et de la fréquence $\bar{\omega}$ pour plusieurs valeurs du paramètre non-local $(e_0 a)$ et du rapport d'épaisseur $\frac{L}{h}$. Les résultats obtenus sont toujours comparés avec ceux trouvés par la théorie d'Euler Bernoulli EBT, la théorie de Timoshenko TBT et la Théorie de Reddy RDT. On peut noter de cette étude que les résultats trouvés par la présente théorie sont en excellent accord avec les autres théories. Pour toutes les théories, il est observé que pour une même valeur du rapport d'épaisseur $\frac{L}{h}$ la fréquence non dimensionnelle et la charge critique du flambement décroissent quand le paramètre non-local augmente. Toutefois pour un rapport d'épaisseur $\frac{L}{h}$ élevé toutes les théories sont approximativement identiques dans la prédiction du flambement et de la fréquence .ce qui confirme l'exactitude de la théorie d'Euler Bernoulli dans le cas des poutres élancées. encore une fois nos résultats sont en bon accord avec ceux obtenus par Berrabah et al.(2013).

Tableau V.2: Comparaison de la charge critique du flambement non dimensionnelle \bar{N} pour des nano-poutres simplement appuyées ($K_w = K_s = 0$).

μ	L/h	EBT	TBT	RBK _w = K _s = 0 Present	
0	5	9.869604404	8.950853970	8.951871004	8.974047798
	10	9.869604404	9.622677158	9.622750681	9.629280748
	20	9.869604404	9.806692087	9.806696870	9.808400323
	100	9.869604404	9.867072414	9.867072422	9.867141506
1	5	8.983016238	8.146797307	8.147722982	8.167907631
	10	8.983016238	8.758270509	8.758337429	8.764280898
	20	8.983016238	8.925755354	8.925759696	8.927310132
	100	8.983016238	8.980711698	8.980711706	8.980774586
2	5	8.242583614	7.475290722	7.476140097	7.494661010
	10	8.242583614	8.036362732	8.036424136	8.041877711
	20	8.242583614	8.190042498	8.190046485	8.191469124
	100	8.242583614	8.240469024	8.240469030	8.240526726
3	5	7.614917659	6.906053489	6.906838185	6.923948745
	10	7.614917659	7.424400328	7.424457054	7.429495345
	20	7.614917659	7.566377508	7.566381185	7.567695495
	100	7.614917659	7.612964091	7.612964099	7.613017402
4	5	7.076079994	6.417375620	6.418104790	6.434004594
	10	7.076079994	6.899043823	6.899096537	6.903778313
	20	7.076079994	7.030974581	7.030978001	7.032199309
	100	7.076079994	7.074264665	7.074264671	7.074314201

Tableau V.3: Comparaison de la fréquence non dimensionnelle $\bar{\omega}$ pour des nano-poutres simplement appuyées ($K_w = K_s = 0$).

μ	L/h	EBT	TBT	RBT	Present
$K_w = 0, K_s = 0$	5	9.711154959	9.274039718	9.274524576	9.285413206
	10	9.829265945	9.707477241	9.707513458	9.710755916
	20	9.859473249	9.828127157	9.828129833	9.828979632
	100	9.869198561	9.867932739	9.867932748	9.867967287
1	5	9.264715845	8.847695570	8.848158141	8.858546197
	10	9.377397054	9.261207197	9.261241753	9.264335148
	20	9.406215678	9.376310614	9.376312881	9.377123898
	100	9.415493897	9.414286272	9.414286280	9.414319232
2	5	8.874679788	8.475215682	8.475658783	8.485609512
	10	8.982617220	8.871318852	8.871351954	8.874315118
	20	9.010222607	8.981576525	8.981578701	8.982355570
	100	9.019110221	9.017953440	9.017953449	9.017985006
3	5	8.530090071	8.146136526	8.146562422	8.156126778
	10	8.633836471	8.526859633	8.526891455	8.529739564
	20	8.660369980	9.632836179	8.632838264	8.633584980
	100	8.668912503	8.667800637	8.667800645	8.667830981
4	5	8.222755525	7.852635618	7.853046169	7.862265926
	10	8.322763999	8.219641480	8.219672150	8.222417645
	20	8.348341519	8.321799749	8.321801759	8.322521570
	100	8.356576261	8.355504449	8.355504457	8.355533705

Le tableau V.4 illustre les variations des trois premières fréquences naturelles $\bar{\omega}$ de la nano-poutre pour un rapport d'épaisseur $\frac{L}{h} = 5$ et qui sont comparés pour différentes valeurs du paramètre non local (μ), avec ceux donnés par la théorie d'Euler Bernoulli, la théorie des poutres de Timoshenko (TBT) et la théorie des poutres de Reddy (RBT).. Pour toutes les théories, On note que l'augmentation du paramètre non local conduit à une diminution de la fréquence.

Il est observé que l'effet du paramètre non local sur le rapport de fréquence est plus important pour les modes de vibrations les plus élevés. Ceci est interprété par l'influence de la longueur de petite onde. Si le nombre de mode augmente la longueur d'onde diminue et les interactions entre les atomes augmentent et cela conduit à une augmentation de l'effet non local.

Tableau V.4: Comparaison des trois premières fréquences naturelles $\bar{\omega}$ des nano-poutres simplement appuyées ($\frac{L}{h} = 5, K_w = K_s = 0$).

Modes (n)	μ	EBT	TBT	RBT	Present
1	0	9.711154958	9.274039718	9.274524576	9.285413206
	1	9.264715840	8.847695570	8.848158141	8.858546197
	2	8.874679787	8.475215682	8.475658783	8.485609512
	3	8.530090070	8.146136526	8.146562422	8.156126778
	4	8.222755528	7.852635618	7.853046169	7.862265926
2	0	37.11199316	32.16650095	32.18471414	32.28600171
	1	31.42394991	27.23643837	27.25186007	27.33762361
	2	27.74215119	24.04527099	24.05888581	24.13460082
	3	25.11035858	21.76418739	21.77651062	21.84504284
	4	23.10878430	20.02934007	20.04068100	20.10375044
3	0	78.02342092	61.45806331	61.57462785	61.84593057
	1	56.77976434	44.72470331	44.80953050	45.00696486
	2	46.82458071	36.88313089	36.95308533	37.11590358
	3	40.75681631	32.10362950	32.16451890	32.30623834
	4	36.56566000	28.80230858	28.85693653	28.98408249

V.3 Résultats de l'effet du paramètre du module de Winkler :

Pour étudier l'effet du milieu élastique entourant les nano-poutres sur leurs réponses en flexion, en flambement et en vibration, les variations de la flèche, la charge critique du flambement et le rapport de la fréquence avec les paramètres de fondation sont tracées dans des courbes. Les rapports de ces quantités servent comme des indices pour évaluer quantitativement l'effet du paramètre non local sur la flexion, le flambement et la vibration des nano-poutres.

Les rapports de flexion, de la charge de flambement et de la fréquence sont définis comme suit :

$$\begin{aligned}
 \text{Le rapport de la flèche} &= \frac{w_{NL}}{w_L} \\
 \text{Le rapport de la charge de flambement} &= \frac{N_{NL}}{N_L} \\
 \text{Le rapport de fréquence} &= \frac{\omega_{NL}}{\omega_L}
 \end{aligned}
 \tag{V-1}$$

Où les indices NL et L montrent les quantités calculées en utilisant respectivement le modèle non local et le modèle local.

Pour décrire les interactions entre les nano-poutres et le milieu élastique, les chercheurs ont proposé divers genres de modèles du milieu élastique tel que: (i) fondation de type Winkler (ii) fondation de type Pasternak.

Les fondations de types Winkler et Pasternak sont caractérisées respectivement par les rigidités K_w et K_s .

Pour ce présent travail, les valeurs des paramètres non local des nano-poutres sont considérées égales à 0,1,2,3 et 4 nm² et les valeurs des paramètres du module de Winkler K_w sont prises dans l'intervalle [0,400]

La figure V.1 démontre l'effet du paramètre non local sur les réponses de la flexion d'une nano-poutre noyée dans un milieu élastique modélisée comme une fondation élastique de type Winkler. De cette figure on peut observer qu'il y a un effet considérable de l'effet d'échelle sur la réponse de la flexion des nano-poutres noyées dans un milieu élastique. La flèche calculée par le modèle non local est toujours plus élevée que celle calculée par le modèle classique ($\mu=0$). Cela veut dire que l'utilisation de la théorie non-locale de déformation de cisaillement hyperbolique pour l'analyse des nano-poutre conduit à une sous-estimation de la flèche dans le cas où la distance "a" entre les deux atomes est négligée. On outre, avec l'augmentation de la valeur du paramètre d'échelle μ , la flèche calculée par la théorie non-locale de déformation de cisaillement hyperbolique devient plus élevée par rapport à la théorie classique ($\mu=0$). On supposant que notre nano-poutre est posée sur une fondation élastique de type Winkler avec une rigidité K_w , l'augmentation de ce module conduit à une diminution du rapport de la flèche, cette diminution indique que la nano-poutre devient plus rigide en introduisant le milieu élastique. Avec des valeurs plus élevées du module de Winkler le taux de diminution du rapport de la flèche diminue.

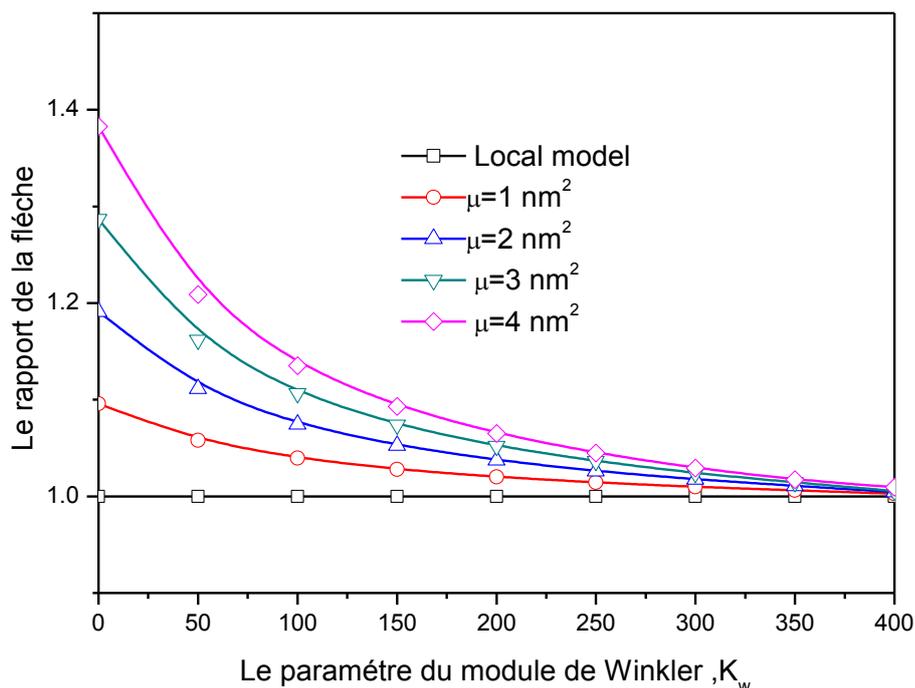


Fig.V.1: L'effet du module de Winkler sur le rapport de la flèche des nano-poutres pour différentes valeurs du paramètre non-local (e_0a) ($K_s = 0$, $L/h = 10$).

$$K_s = 0 \quad L/h = 10$$

Les deux figures V.2 et V.3 montrent l'allure de la variation des rapports du flambement et de la fréquence des nano-poutres noyées dans un milieu élastique de type Winkler en fonction du paramètre non local, Les résultats montrent que la charge critique du flambement et la fréquence sont toujours plus petites par rapport au modèle local (classique).

Cela veut dire que l'utilisation de la théorie de déformation de cisaillement hyperbolique pour l'étude des nano-poutres mènera à une sur estimation de la charge critique du flambement et la fréquence si les effets du paramètre non local entre les atomes individuelles de la nano-poutre sont négligés.

On voit aussi que le rapport de fréquence augmente si le paramètre du rapport Winkler K_w augmente. Cette augmentation est attribuée à la rigidité du milieu élastique. Pour les valeurs élevées du paramètre Winkler le taux d'augmentation du rapport de fréquences diminue. De plus la linéarité et la variation des résultats pour les valeurs élevées du paramètre Winkler signifie que l'effet de petite échelle existe sans la présence d'un milieu élastique.

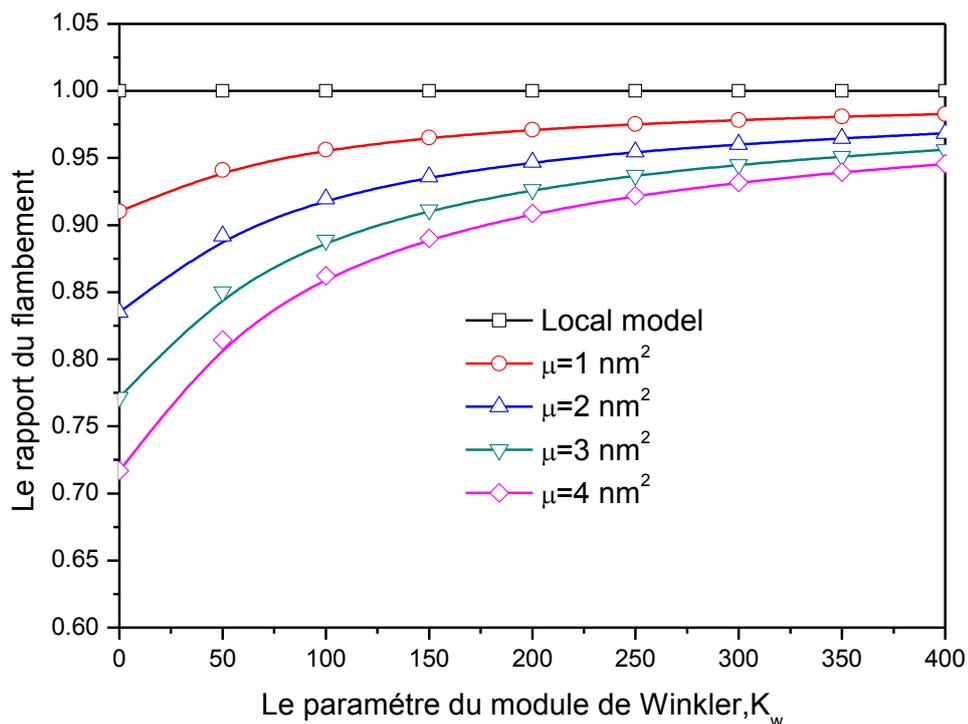


Fig.V.2: L'effet du module de Winkler sur le rapport de la charge critique du flambement des nano-poutres pour différentes valeurs du paramètre non-local ($e_0 a$) ($K_s = 0$, $L/h = 10$)

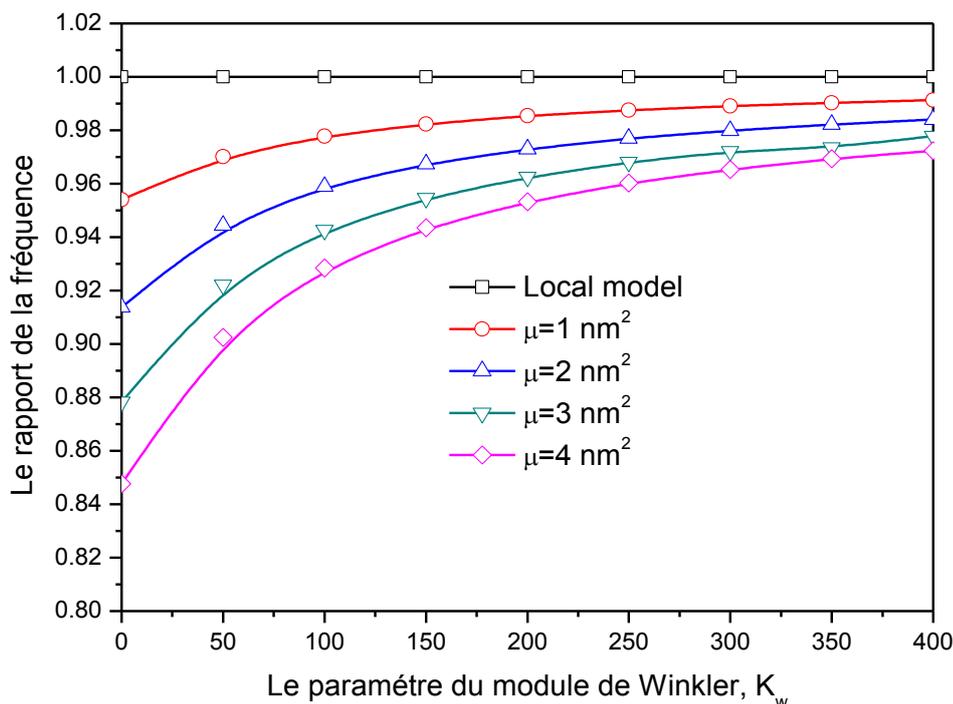


Fig.V.3: L'effet du module de Winkler sur le rapport de la fréquence des nano-poutres pour différentes valeurs du paramètre non-local($e_0 a$) ($K_s = 0$, $L/h = 10$, $\mu = 2$).

La figure V.4 montre la variation du rapport de la fréquence avec le paramètre de Winkler pour différents modes de vibration. Dans cette étude quatre modes de vibration (n) sont considérés. On a constaté que l'effet d'échelle sur le comportement dynamique est plus significatif pour le mode élevé de vibration. En outre, on constate aussi qu'au fur et à mesure que le paramètre de Winkler augmente, le rapport de fréquence augmente légèrement pour les modes élevés à l'exception du premier mode. Cela montre qu'il existe une influence légère du milieu élastique sous la fréquence du mode élevé de vibration.

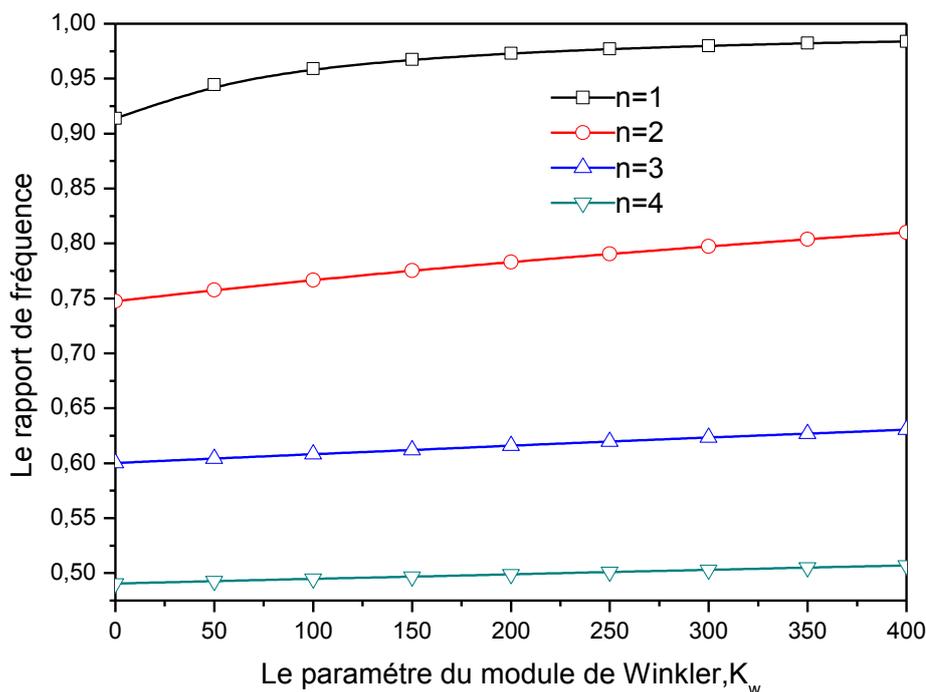


Fig.V.4: L'effet du module de Winkler sur le rapport de la fréquence des nano-poutres pour différents modes n de vibration ($K_s = 0$, $L/h = 10$, $\mu = 2$).

V.4 Les résultats de l'effet du paramètre du module de Pasternak :

Pour la présente étude, les valeurs du paramètre non local (μ) sont considérées égale à 0, 1, 2, 3, et 4 nm². Les valeurs du paramètre du module de cisaillement de Pasternak (K_s) sont prises dans l'intervalle [0-10]. Le paramètre du module de Winkler est pris égale à 100 ($K_w = 100$).

La figure V.5 illustre l'influence du paramètre non local sur les réponses de la flexion d'une nano-poutre posée sur une fondation élastique de type Pasternak. Lorsque le paramètre du module de cisaillement K_s augmente, le rapport de la flèche diminue. Toutefois la flèche calculée par le modèle non local est toujours plus élevée que celle calculée par le modèle classique. Avec des valeurs élevées du paramètre non local (μ), la variation du rapport de la

flèche avec le module de Winkler, est non linéaire, alors que la variation du rapport de la flèche considère la fondation de type Pasternak est toujours linéaire.

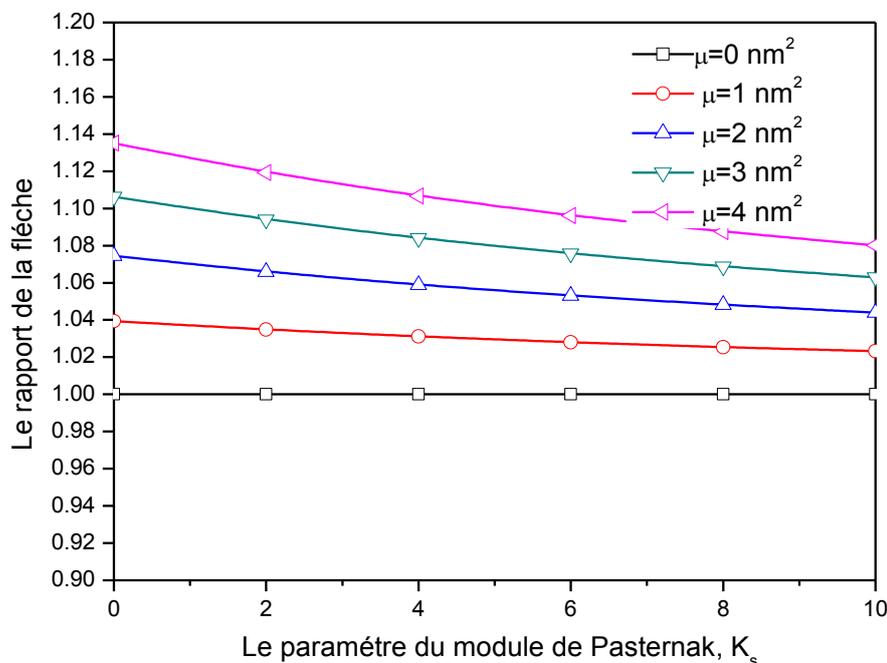


Fig.V.5: L'effet du module de cisaillement de Pasternak sur le rapport de la flèche d'une nano-poutre pour plusieurs valeurs du paramètre non local ($K_w = 100$, $L/h = 10$).

Les figures V.6 et V.7 illustrent l'allure de la variation des rapports du flambement et de la fréquence des nano-poutres en fonction du module de Pasternak pour plusieurs valeurs du paramètre non local (μ). L'augmentation du module de Pasternak conduit à une augmentation des rapports de la charge de flambement et de la fréquence.

La charge du flambement et de la fréquence calculée par le modèle non local est toujours moins élevée que celle calculée par le modèle classique ($\mu=0$). Avec des valeurs élevées du paramètre non local μ , la charge de flambement et la fréquence sont comparativement faibles contrairement à la variation de la charge du flambement et de la fréquence avec le module de Winkler.

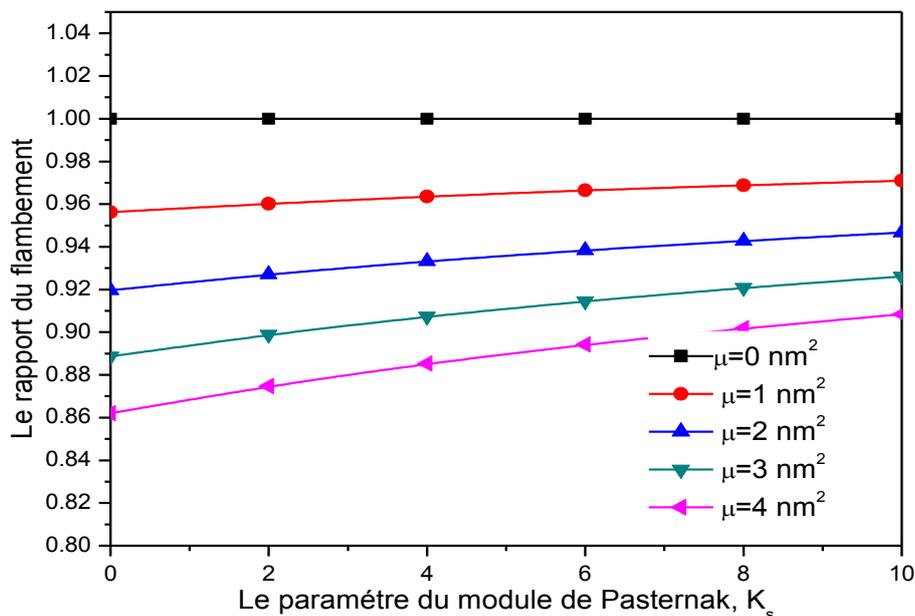


Fig.V.6: L'effet du module de cisaillement de Pasternak sur le rapport de la charge de flambement d'une nano-poutre pour plusieurs valeurs du paramètre non local. ($K_w = 100$, $L/h = 10$).

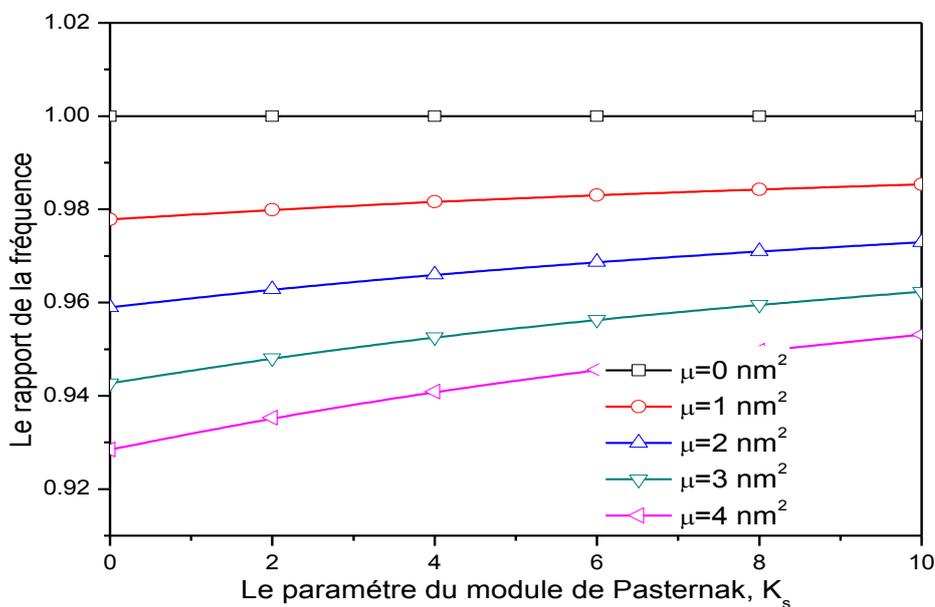


Fig.V.7: L'effet du module de cisaillement de Pasternak sur le rapport de la fréquence d'une nano-poutre pour plusieurs valeurs du paramètre non local. ($K_w = 100$, $L/h = 10$).

La figure V.8 montre la variation du rapport de la fréquence avec le paramètre du module de cisaillement Pasternak pour différents mode de vibration n , il est observé de la figure que l'effet non local sur la réponse de la flexion est plus considérable pour les modes élevés de vibration. En outre, l'augmentation du module de Pasternak engendre des rapports élevés de fréquence. On a constaté que l'allure du rapport de fréquence est linéaire pour tous les modes de vibration considérés.

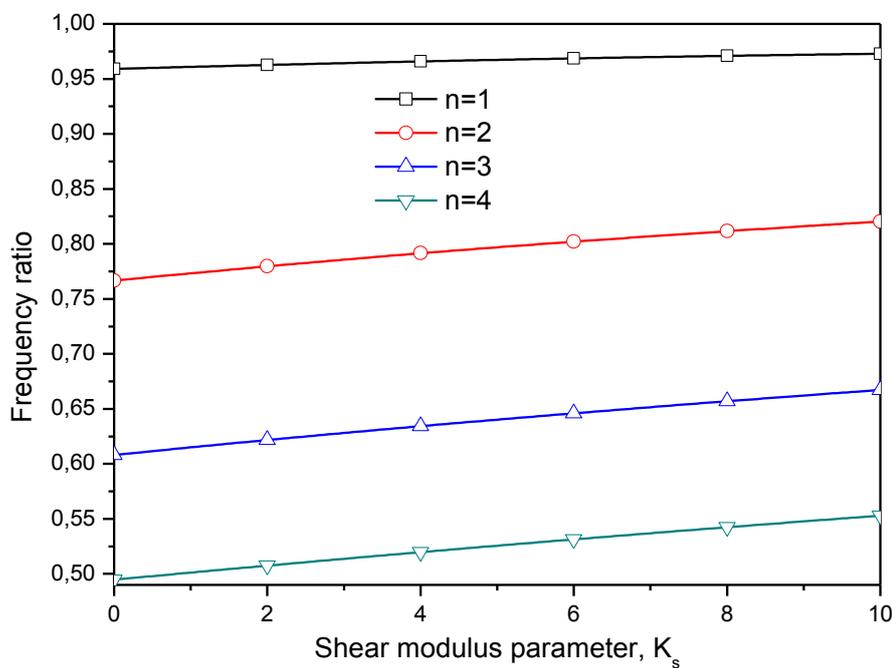


Fig.V.8: L'effet du module de cisaillement de Pasternak sur le rapport de la fréquence d' une nano-poutre pour plusieurs mode de vibration n .

($K_w = 100$, $L / h = 10$, $\mu = 2$).

V.5 Conclusion :

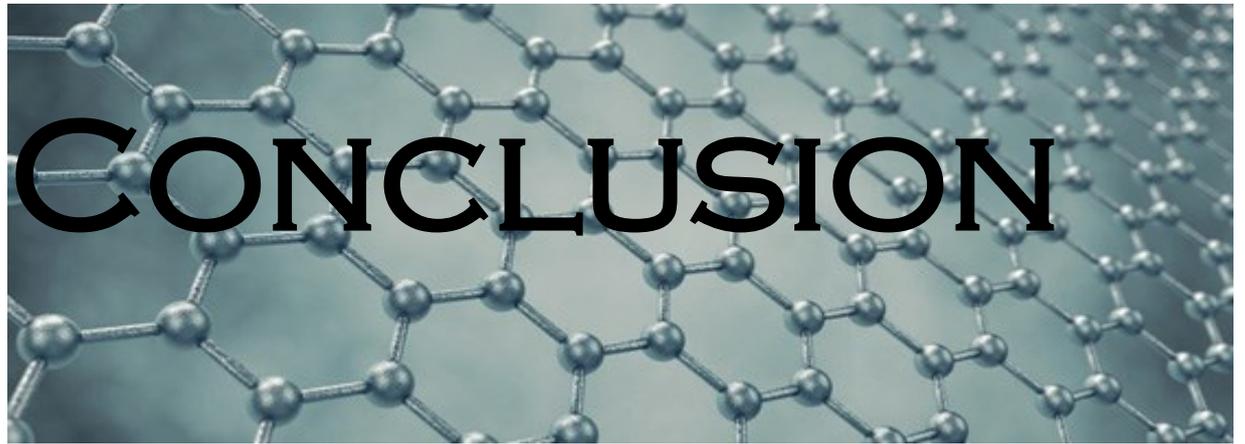
Dans cette étude, les comportements statiques, dynamiques et de stabilité des nano-poutres noyées dans un milieu élastique sont examinés en proposant une nouvelle théorie non locale hyperbolique de déformation de cisaillement.

Le modèle d'élasticité non local d'Eringen est considéré pour introduire les effets d'échelle.

Les deux modèles de type Winkler et Pasternak sont utilisés pour simuler l'interaction des nano-poutre avec le milieu élastique.

Les résultats ont démontré que le paramètre non local a un effet considérable sur la réponse statique, dynamique et de stabilité des nano-poutres.

Les flèches, les charges critiques du flambement et les fréquences des nano-poutres varient d'une façon non linéaire lorsque le milieu élastique est modélisé comme une fondation de type Winkler. Par contre ces quantités varient d'une façon linéaire lorsque le milieu élastique est modélisé comme une fondation de type Pasternak.



Au terme du travail effectué au sein du laboratoire portant sur l'étude des comportements statiques, dynamiques et de stabilité des nano-poutres noyées dans un milieu élastique, ces comportements sont examinés en proposant une nouvelle théorie non locale hyperbolique de déformation de cisaillement.

Le modèle d'élasticité non local d'Eringen est considéré en introduisant des effets d'échelle. Les solutions analytiques pour les flèches, les charges critiques du flambement et les fréquences des nano-poutres sont présentées pour une nano-poutre simplement appuyées et les résultats trouvés sont comparés avec ceux trouvés dans les littératures, cela nous a montré l'efficacité de notre théorie, nous avons aussi comparé ses résultats par ceux trouvés par la théorie d'Euler Bernoulli pour voir les effets de cisaillement sur les poutres courtes surtout, et avec la théorie locale classique pour voir les effets d'échelle sur les nano-poutres le présent modèle non local produits une large flèche et une charge de flambement inférieure ainsi que la fréquence comparativement au modèle classique.

Les deux modèles de type Winkler et Pasternak sont utilisés pour simuler l'interaction des nano-poutres avec le milieu élastique. L'exactitude du modèle présent est déterminée par comparaison de ces résultats avec d'autres théories de déformations de cisaillement où un excellent accord a été observé, on peut conclure que l'introduction des deux paramètres du module de Winkler et Pasternak diminuent la flèche et augmentent la charge de flambement ainsi que les fréquences cela rend la nano-poutre plus rigide.

References:

A

- Adda Bedia** Adda Bedia, W., Benzair, A., Semmah, A., Tounsi, A. and Mahmoud, S.R. (2015), "On the thermal buckling characteristics of armchair single-walled carbon nanotube embedded in an elastic medium based on nonlocal continuum elasticity", *Brazil. J. Phys.*, **45**, 225-233.
- Ait Amar Meziane** Ait Amar Meziane, M., Abdelaziz, H.H. and Tounsi, A. (2014), "An efficient and simple refined theory for buckling and free vibration of exponentially graded sandwich plates under various boundary conditions", *J. Sandw. Struct. Mater.*, **16**(3), 293-318.
- AitAtmane** AitAtmane, H., Tounsi, A., Mechab, I. and AddaBedia, E.A. (2010), "Free vibration analysis of functionally graded plates resting on Winkler-Pasternak elastic foundations using a new shear deformation theory", *Int. J. Mech. Mater. Des.*, **6**, 113-121.
- AitYahia** AitYahia, S., AitAtmane, H., Houari, M.S.A. and Tounsi, A. (2015), "Wave propagation in functionally graded plates with porosities using various higher-order shear deformation plate theories", *Struct. Eng. Mech.*, **53**(6), 1143-1165.
- Al-Basyouni** Al-Basyouni, K.S., Tounsi, A. and Mahmoud, S.R. (2015), "Size dependent bending and vibration analysis of functionally graded micro beams based on modified couple stress theory and neutral surface position", *Compos. Struct.*, **125**, 621-630.
- Amara** Amara, K., Tounsi, A., Mechab, I. and Adda-Bedia, E.A. (2010), "Nonlocal elasticity effect on column buckling of multiwalled carbon nanotubes under temperature field", *Appl. Math. Model.*, **34**, 3933-3942.
- ### B
- Belabed** Belabed, Z., Houari, M.S.A., Tounsi, A., Mahmoud, S.R. and Anwar Bég, O. (2014), "An efficient and simple higher order shear and normal deformation theory for functionally graded material (FGM) plates", *Compos. Part B*, **60**, 274-283.
- Belkorissat** Belkorissat, I., Houari, M.S.A., Tounsi, A., AddaBedia, E.A. and Mahmoud, S.R. (2015), "On vibration properties of functionally graded nano-plate using a new nonlocal refined four variable model", *Steel Compos. Struct.*, **18**(4), 1063-1081.
- Benachour** Benachour, A., Daouadji, H.T., AitAtmane, H., Tounsi, A. and Mestah, S.A. (2011), "A four variable refined plate theory for free vibrations of functionally graded plates with arbitrary gradient", *Compos. Part B*, **42**, 1386-1394.
- Benguediab** Benguediab, S., Tounsi, A., Zidour, M. and Semmah, A. (2014a),

“Chirality and scale effects on mechanical buckling properties of zigzag double-walled carbon nanotubes”, *Compos. Part B*, **57**, 21-24.

Benguediab

Benguediab, S., Semmah, A., LarbiChaht, F., Mouaz, S. and Tounsi, A. (2014b), *“An investigation on the characteristics of bending, buckling and vibration of nanobeams via nonlocal beam theory”*, *Int. J. Comput. Meth.*, **11**(6), 1350085

Bennai

Bennai, R., AitAtmane, H. and Tounsi, A. (2015), *“A new higher-order shear and normal deformation theory for functionally graded sandwich beams”*, *Steel Compos. Struct. (In press)*

Benzair

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

Bernard

[Bernard 2007] C. Bernard, *Propriétés mécaniques des nanotubes de carbone en tant que nanosondes et leur fonctionnalisation par bio-nanoparticules*, thèse de doctorat, l'Université Bordeaux I, (2007).

Berrabah

Berrabah, H.M., Tounsi, A., Semmah, A. and AddaBedia, E.A. (2013), *“Comparison of various refined nonlocal beam theories for bending, vibration and buckling analysis of nanobeams”*, *Struct. Eng. Mech.*, **48**(3), 351-365.

Bessaim

Bessaim, A., Houari, M.S.A., Tounsi, A., Mahmoud, S.R. and AddaBedia, E.A. (2013), *“A new higherorder shear and normal deformation theory for the static and free vibration analysis of sandwich plates with functionally graded isotropic face sheets”*, *J. Sandw. Struct. Mater.*, **15**, 671-703.

Besseghier

Besseghier, A., Tounsi, A., Houari, M.S.A., Benzair, A., Boumia, L. and Heireche, H. (2011), *“Thermal effect on wave propagation in double-walled carbon nanotubes embedded in a polymer matrix using nonlocal elasticity”*, *Physica E*, **43**, 1379-1386.

Besseghier

Besseghier, A., Heireche, H., Bousahla, A.A., Tounsi, A. and Benzair, A. (2015), *“Nonlinear vibration properties of a zigzag single-walled carbon nanotube embedded in a polymer matrix”*, *Adv. Nano Res.*, **3**(1), 29-37.

Bethune

[Bethune 1993] D. S. Bethune, C. H. Kiang, M. S. de Vries, G. Gorman, R. Savoy, J. Vazquez, R. Beyers, *Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer wall*, *Nature*, **363**, 605 (1993).

Bouchafa

Bouchafa, A., BachirBouiadjra, M., Houari, M.S.A. and Tounsi, A.

(2015), "Thermal stresses and deflections of functionally graded sandwich plates using a new refined hyperbolic shear deformation theory", *Steel Compos. Struct.*,**18**(6), 1493-1515.

Bouderba

Bouderba, B., Houari, M.S.A. and Tounsi, A. (2013) "Thermomechanical bending response of FGM thick plates resting on Winkler-Pasternak elastic foundations", *Steel Compos. Struct.*, **14**(1), 85-104.

Bourada

Bourada, M., Tounsi, A., Houari, M.S.A. and AddaBedia, E.A. (2012), "A new four-variable refined plate theory for thermal buckling analysis of functionally graded sandwich plates", *J. Sandw. Struct. Mater.*,**14**, 5-33.

Bourada

Bourada, M., Kaci, A., Houari, M.S.A. and Tounsi, A. (2015), "A new simple shear and normal deformations theory for functionally graded beams", *Steel Compos. Struct.*,**18**(2), 409-423.

Bousahla

Bousahla, A.A., Houari, M.S.A., Tounsi, A. and AddaBedia, E.A., (2014), "A novel higher order shear and normal deformation theory based on neutral surface position for bending analysis of advanced composite plates", *Int. J. Comput. Meth.*,**11**(6), 1350082.

Bower

Bower, C., Rosen, R., Jin, L., Han, J. and Zhou, O. (1999), "Deformation of carbon nanotubes in nanotube polymer composites", *Appl. Phys. Lett.* **74**, 3317.

C

Chattibi

Chattibi, F., Benrahou, K.H., Benachour, A., Nedri, K. and Tounsi, A. (2015), "Thermomechanical effects on the bending of antisymmetric cross-ply composite plates using a four variable sinusoidal theory", *Steel Compos. Struct.*,**19**(1), 93-110.

Civalek

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

C

Draiche

Draiche, K., Tounsi, A. and Khalfi, Y. (2014), "A trigonometric four variable plate theory for free vibration of rectangular composite plates with patch mass", *Steel Compos. Struct.*,**17**(1), 69-81.

E

Eisenberger

Eisenberger, J. and buckling of a beam on a variable Winkler elastic foundation. *Journal of Sound and Vibration* 115 (Clastornik, Vibratio1987), 233ns1 -24.

El Meiche

El Meiche, N., Tounsi, A., Ziane, N., Mechab, I. and AddaBedia, E.A. (2011), "A new hyperbolic shear deformation theory for buckling and vibration of functionally graded sandwich plate", *Int. J. Mech. Sci.*,

53 , 237-247.

- Eltaher** *Eltaher, M.A., Alshorbagy, A.E. and Mahmoud, F.F. (2013), "Vibration analysis of Euler-Bernoulli nanobeams by using finite element method", Appl. Math. Model.,37(7), 4787-4797.*
- Eltaher** *Eltaher, M.A., Emam, S.A. and Mahmoud, F.F., (2012), "Free vibration analysis of functionally graded size-dependent nanobeams", Appl. Math. Comput.,218(14), 7406-7420.*
- Eltaher** *Eltaher, M.A., Khairy, A., Sadoun, A.M. and Omar, F.A., (2014), "Static and buckling analysis of functionally graded Timoshenko nanobeams", Appl. Math. Comput.,229, 283-295.*
- Endo** *Endo et al. Carbon, 33 :873, (1995).*
- Eringen** *Eringen, A.C. (1972), "Nonlocal polar elastic continua", Int. J. Eng. Sci., 10, 1-16.*
- Eringen** *Eringen, A.C. (1983), "On differential equations of nonlocal elasticity and solutions of screw dislocation and surface waves", J. Appl. Phys., 54(9), 4703-4710.*
- F**
- Fekrar** *Fekrar, A., Houari, M.S.A., Tounsi, A. and Mahmoud, S.R. (2014), "A new five-unknown refined theory based on neutral surface position for bending analysis of exponential graded plates", Meccanica, 49, 795810.*
- Fleck** *Fleck, N.A. and Hutchinson, J.W. (1997), "Strain gradient plasticity", Adv. Appl. Mech., 33, 296.*
- J**
- Journet** *Journet, W. K. Maser, P. Bernier, A. Loiseau, M. Lamy de la Chapelle, S. Lefrant, P.*
- H**
- Hamidi** *Hamidi, A., Houari, M.S.A., Mahmoud, S.R. and Tounsi, A. (2015), "A sinusoidal plate theory with 5-unknowns and stretching effect for thermomechanical bending of functionally graded sandwich plates", Steel Compos. Struct.,18(1), 235-253.*
- Hebali** *Hebali, H., Tounsi, A., Houari, M.S.A., Bessaim, A. and AddaBedia, E.A. (2014), "A new quasi-3D hyperbolic shear deformation theory for the static and free vibration analysis of functionally graded plates", ASCE J. Eng. Mech., 140, 374-383.*
- Heireche** *Heireche, H., Tounsi, A., Benzair, A., Maachou, M. and AddaBedia, EA. (2008a), "Sound wave propagation in single-walled carbon nanotubes using nonlocal elasticity", Physica E.,*

40,2791-2799.

Heireche Heireche, H., Tounsi, A. and Benzair, A. (2008b), "Scale effect on wave propagation of double-walled carbon nanotubes with initial axial loading", *Nanotechnology*, **19**, 185703.

Houari Houari, M.S.A., Tounsi, A. and Anwar Bég, O. (2013), "Thermoelastic bending analysis of functionally graded sandwich plates using a new higher order shear and normal deformation theory", *Int. J. Mech. Sci.*, **76**, 467-479.

Huang Huang, D.Z. Wang, J.G. Wen, M. Sennett, H. Gibson, Z.F. Ren, *Effect of nickel, iron and cobalt on growth of aligned carbon nanotubes*, *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, (2002).

I

Idlbi Idblbi, A., Karama, M. and Touratie, M. (1997), "Comparison of various laminated plate theories", *Compos. Struct.*, **37**, 173-184.

Iijima Iijima, *Nature*, 354 :56 (1991).

Iijima Iijima, *Helical microtubules of graphitic carbon*, *Nature*, 354, 56 (1993)..

Izard Izard, *nanotubes de carbone : Systèmes pour la limitation optique*, thèse de doctorat, l'Université Montpellier] N. II, (2004).

K

Khalfi Khalfi, Y., Houari, M.S.A. and Tounsi, A. (2014), "A refined and simple shear deformation theory for thermal buckling of solar functionally graded plates on elastic foundation", *Int. J. Comput. Meth.*, **11(5)**, 135007.

Krätschmer Krätschmer, L. D. Lamb, K. Fostiropoulos, D. R. Huffman, *Nature*, 347, 354 .1990

Kroto Kroto, J. R. Heath, S. C. O'brien, R. F. Curl, R. E. Smalley, *Nature*, 318 162 (1985).

Kuzumaki Kuzumaki, T., Miyazawa, K., Ichinose, H. and Ito, K. (1998), "Processing of carbon nanotube reinforced aluminum composite", *J. Mater. Res.*, **13**, 2445.

L

Larbi Chaht Larbi Chaht, F., Kaci, A., Houari, M.S.A., Tounsi, A., Anwar Bég, O. and Mahmoud, S.R. (2015), "Bending and buckling analyses of functionally graded material (FGM) size-dependent nanoscale beams including the thickness stretching effect", *Steel Compos. Struct.*,

18(2), 425-442.

Lee Lee, M. W. Kim, S. H. Kim and J. R. Youn, *European Polymer Journal*, vol. 44, 2008

Lee Lee, *Dynamic response of a Timoshenko beam on a Winkler foundation subjected to a moving mass. Applied Acoustics 55 (1998), 203-215.*

Li Li, H.M. Cheng, Y.T. Xing, P.H. Tan, G. Carbon, 38 2041 (2000).

Lu Lu, P., Lee, H.P., Lu, C. and Zhang, P.Q. (2007), "Application of nonlocal beam models for carbon nanotubes", *Int. J. Solid. Struct.*,**44**, 5289-5300.

Lu Lu, P. (2007), "Dynamic analysis of axially prestressed micro/nanobeam structures based on nonlocal beam theory", *J. Appl. Phys.*, **101** , 073504.

Lu Lu, *Elastic properties of carbon nanotubes and nanoropes. Phys Rev Lett 1997;79:1297–300.*

M

Ma Ma, J.W. Butterworth, G.C. Clifton, *Static analysis of an infinite beam resting on a tensionless Pasternak foundation. European Journal of Mechanics A/Solids 28 (2009), 697-703.*

Mahi Mahi, A., AddaBedia, E.A. and Tounsi, A. (2015), "A new hyperbolic shear deformation theory for bending and free vibration analysis of isotropic, functionally graded, sandwich and laminated composite plates", *Appl. Math. Model.*,**39**, 2489-2508.

Murmu Murmu, T. and Pradhan, S.C. (2009a), "Buckling analysis of a single-walled carbon nanotube embedded in an elastic medium based on nonlocal elasticity and Timoshenko beam theory and using DQM", *Physica E*, **41** , 1232-1239.

Murmu Murmu, T. and Pradhan, S.C. (2009b), "Thermo-mechanical vibration of a single-walled carbon nanotube embedded in an elastic medium based on nonlocal elasticity theory", *Comput. Mater. Sci.*, **46**, 854-859.

Murmu Murmu, T. and Pradhan, S. (2010), "Thermal effects on the stability of embedded carbon nanotubes", *Comput. Mater. Sci.*, **47(3)**, 721-726.

Mustapha Mustapha, K.B. and Zhong, Z.W. (2010), "The thermo-mechanical vibration of a single-walled carbon nanotube studied using the Bubnov-Galerkin method", *Physica E.*, **43**, 375-381.

N

Narendar Narendar, S. and Gopalakrishnan, S. (2011a), "Critical buckling temperature of single -walled carbon nanotubes embedded in a one-

parameter elastic medium based on nonlocal continuum mechanics”, *Physica E*, **43**, 1185-1191.

Narendar

Narendar, S. and Gopalakrishnan, S. (2011b), “Nonlocal wave propagation in rotating nanotube”, *Resul. Phys.*, **1**, 17-25.

Nedri

Nedri, K., El Meiche, N. and Tounsi, A. (2014), “Free vibration analysis of laminated composite plates resting on elastic foundations by using a refined hyperbolic shear deformation theory”, *Mech. Compos. Mater.*, **49**(6), 641-650.

Nikolaev

[Nikolaev 1999] P. Nikolaev, M.J. Bronikowski, R.K. Bradley, F. Rohmund, D.T. Colbert, K.A. Smith, R.E. Smalley, Gas-phase catalytic growth of single-walled carbon nanotubes from carbon monoxide, *Chemical Physics Letters*, 313 (1999) 91.

O

Ould Larbi

Ould Larbi, L., Kaci, A., Houari, M.S.A. and Tounsi, A. (2013), “An efficient shear deformation beam theory based on neutral surface position for bending and free vibration of functionally graded beams”, *Mech. Bas. Des. Struct. Mach.*, **41**, 421-433.

P

Pascale

Pascale Chenevier, 2013

Pasternak

Pasternak, P.L. (1954) “On a new method of analysis of an elastic foundation by means of two foundation constants”, *Cosudar strennoe Izdatelstvo Literaturipo Stroitelstvu i Arkhitekture, Moscow*, 1-56. (In Russian)

Pijaudier-Cabot

Pijaudier-Cabot, G. and Bazant, Z.P. (1987), “Nonlocal damage theory”, *ASCE J. Eng. Mech.*, **113**, 1512-1533.

Pradhan

Pradhan, S.C., Bazant, Z.P. and Murmu, T. (2009a), “Differential quadrature method for vibration analysis of beam on Winkler foundation based on nonlocal elastic theory”, *J. Inst. Eng. (India) Metallurgy Mater. Eng. Div.*, **89**, 3-12.

Pradhan

Pradhan, S.C., Bazant, Z.P. and Murmu, T. (2009b), “Small-scale effect on vibration analysis of singlewalled carbon nanotubes embedded In an elastic medium using nonlocal elasticity theory”, *J. Appl. Phys.*, **105**, 124306.

Q

Qian

Qian, D., Dickey, E.C., Andrews, R., Bazant, Z.P. and Rantell, T. (2000), *Appl. Phys. Lett.* **76**, 2868.

R

Reddy

Reddy, J.N. and Pang, S.D. (2008), “Nonlocal continuum theories of beams for the analysis of carbon nanotubes”, *J. Appl. Phys.*, **103**, 023511.

Reddy

Reddy, J.N. (1997), “On locking-free shear deformable beam finite elements”, *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.*, **149**, 113-132.

Ru Ru, C.Q. (2001), "Axially compressed buckling of a doublewalled carbon nanotube embedded in an elastic medium", *J. Mech. Phys. Solid.*, **49**, 1265.

Ruoff Ruoff, D. C. Lorents, *Carbon*, (1995), 33, 925.

S

Saidi Saidi, H., Houari, M.S.A., Tounsi, A., Bazant, Z.P. and AddaBedia, E.A. (2013), "Thermo-mechanical bending response with stretching effect of functionally graded sandwich plates using a novel sheardeformation theory", *Steel Compos. Struct.*, **15**, 221-245.

Schadler Schadler, L.S., Giannaris, S.C., Bazant, Z.P. and Ajayan, P.M. (1998), *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 3842.

Song Song, J., Shen, J. and Li, X.F. (2010), "Effects of initial axial stress on waves propagating in carbon nanotubes using a generalized nonlocal model", *Comput. Mater. Sci.*, **49**, 518-523.

T

Tounsi Tounsi, A., Semmah, A. and Bousahla, A.A. (2013a), "Thermal buckling behavior of nanobeams using an efficient higher-order nonlocal beam theory", *ASCE J. Nanomech. Micromech.*, **3**, 37-42.

Tounsi Tounsi, A., Benguediab, S., AddaBedia, E.A., Semmah, A. and Zidour, M. (2013b), "Nonlocal effects on thermal buckling properties of double-walled carbon nanotubes", *Adv. Nano Res.*, **1**(1), 1-11.

Tounsi Tounsi, A., Houari, M.S.A., Benyoucef, S. and AddaBedia, E.A. (2013c), "A refined trigonometric shear deformation theory for thermoelastic bending of functionally graded sandwich plates", *Aerosp. Sci. Tech.*, **24**, 209-220.

Tounsi Tounsi, A., Heireche, H., Berrabah, H.M., Benzair, A. and Boumia, L. (2008), "Effect of small size on wave propagation in double-walled carbon nanotubes under temperature field", *J. Appl. Phys.*, **104**, 104301.

Y

Yang Yang, F., Chong, A.C.M., Lam, D.C.C. and Tong, P. (2002), "Couple stress based strain gradient theory for elasticity", *Int. J. Solid. Struct.*, **39**, 2731.

Z

Zemri Zemri, A., Houari, M.S.A., Bousahla, A.A. and Tounsi, A. (2015), "A mechanical response of functionally graded nanoscale beam: an assessment of a refined nonlocal shear deformation theory beam theory", *Struct. Eng. Mech.*, **54**(4), 693-710.

- Zhang** Zhang, Y.Q., Liu, G.R. and Wang, J.S. (2004), "Small-scale effects on buckling of multiwalled carbon nanotubes under axial compression", *Phys. Rev. B.*, **70**, 205430.
- Zhang** Zhang, Y.Q., Liu, G.R. and Wang, J.S. (2004), "Small-scale effects on buckling of multiwalled carbon nanotubes under axial compression", *Phys. Rev. B.*, **70**, 205430.
- Zhang** Zhang, Y.Q., Liu, G.R. and Han, X. (2006), "Effect of small length scale on elastic buckling of multi-walled carbon nanotubes under radial pressure", *Phys. Lett. A*, **349**, 370-376.
- Zhang** Zhang, Y.Q., Liu, G.R. and Xie, X.Y. (2005), "Free transverse vibrations of double-walled carbon nanotubes using a theory of nonlocal elasticity", *Phys. Rev. B.*, **71**, 195404.
- Zhou** Zhou, S.J. and Li, Z.Q. (2001), *J. Shandong Univ. Sci. Technol, Nat. Sci.*, **31**, 401.
- Zhou** Zhou, R.M. Fleming, D.W. Murphy, C.H. Chen, R.C. Haddon, A.P. Ramirez et S Glarum, *Science*, 263 :1744 (1994).
- Zidi** Zidi, M., Tounsi, A., Houari, M.S.A., AddaBedia, E.A. and Anwar Bég, O. (2014), "Bending analysis of FGM plates under hygro-thermo-mechanical loading using a four variable refined plate theory", *Aerosp.Sci. Tech.*, **34**, 24-34.
- Zidour** Zidour, M., Daouadji, T.H., Benrahou, K.H., Tounsi, A., AddaBedia, E.A. and Hadji, L. (2014), "Buckling analysis of chiral single-walled carbon nanotubes by using the nonlocal Timoshenko beam theory", *Mech. Compos. Mater.*, **50**(1), 95-104.
- Zidour** Zidour, M., Benrahou, K.H., Semmah, A., Naceri, M., Belhadj, H.A. and Bakhti, K. et al. (2012), "The thermal effect on vibration of zigzag single walled carbon nanotubes using nonlocal Timoshenko beam theory", *Comput. Mater. Sci.*, **51**, 252-260.
- Wang** Wang, Q. and Liew, K.M. (2007), "Application of nonlocal continuum mechanics to static analysis of micro- and nano-structures", *Phys. Lett. A*, **363**, 236-242.
- Wang** Wang, Q., Varadan, V.K. and Quek, S.T. (2006), "Small scale effect on elastic buckling of carbon nanotubes with nonlocal continuum models", *Phys. Lett. A*, **357**, 130-135.
- Wagner** Wagner, H.D., Lourie, O., Feldman, Y. and Tenne, R. (1998), "Stress-induced fragmentation of multiwall carbon nanotubes in a polymer matrix", *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 188.

