

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES



FACULTE DES SCIENCES EXACTES

DEPARTEMENT MATERIAUX ET DEVELOPPEMENT DURABLE

THESE DE DOCTORAT

Filière : Physique

Spécialité : Physique Energétique et sciences des Matériaux

Sujet de thèse

*Formalisme unifié pour l'étude de la stabilité
des nanotubes de carbone et des microtubules*

Présentée par : M^{lle} BENMANSOUR Leila Djazia

Soutenue le 07/ 03 / 2021 devant le jury composé de :

Président :	BENZAIR Abdelnour	Professeur	UDL SIDI BEL ABBES
Directeur de thèse :	HEIRECHE Houari	Professeur	UDL SIDI BEL ABBES
CO- Directeur de thèse :	TOUNSI Abdelouahed	Professeur	UDL SIDI BEL ABBES
Examineur :	BOUMIA Lakhdar	MCA	CU TISSEMSILT

Année universitaire 2020-2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la foi et de m'avoir permis d'en arriver là.

*Ce parcours, en effet, n'aurait pas pu être réalisé sans l'aide de nos nombreux professeurs, pour cela j'adresse mes profonds remerciements au Professeur **HEIRECHE Houari** et au Professeur **TOUNSI Abdelouahed**, mes encadrateurs qui ont été attentifs à l'évolution de mes recherches et qui ont apporté toute leur contribution pour mener à bien ce travail. Leurs qualités humaines et scientifiques, leurs conseils ainsi que leurs enthousiasmes m'ont été très bénéfiques durant mon parcours d'étude.*

*J'adresse également mes remerciements les plus vifs au Professeur **BENZAIR Abdelnour** pour avoir accepté de présider le jury de la thèse.*

*Mes ardents remerciements s'adressent aussi au Docteur **BOUMIA Lakhdar**, de m'avoir fait l'honneur d'être l'examineur de cette thèse.*

*J'exprime également toute ma reconnaissance à l'égard du Docteur **BOURADA Fouad** qui a apporté un soutien scientifique constant à mon travail de recherche, sa disponibilité et ses précieux conseils qui m'ont permis d'aplanir bien les différentes difficultés trouvées.*

A toutes les personnes qui ont aidé de près ou de loin par le fruit de leur connaissance pendant toute la durée de mon parcours éducatif.

Dédicace

Dédicace

Je dédie cette thèse à ma famille, ainsi qu'à tous mes enseignants

Résumé

Résumé

Dans cette étude, la première partie est réservée à La stabilité thermique du nitrure de bore et de nanotube de carbone à une seule paroi en développant une nouvelle théorie de déformation de cisaillement de premier ordre intégrale, la structure est considérée comme une poutre circulaire creuse, les équations d'équilibre non locales sont déterminées à l'aide du principe du travail virtuel. Les résultats de la température critique de flambement sont comparés à ceux trouvés dans la littérature, plusieurs études paramétriques sont présentées et discutées en détail pour montrer les effets de la déformation de cisaillement transversal et du paramètre à petite échelle sur la température critique de flambement du SWBNNT et du SWCNT.

La deuxième partie s'est concentrée sur l'analyse du comportement dynamique et de la flexion des microtubules. Les microtubules (MT_s) peuvent être considérés comme des structures bio-composites qui sont des éléments du cytosquelette dans les cellules eucaryotes et possèdent des rôles considérables dans les activités cellulaires. Ils ont des caractéristiques mécaniques élevées telles qu'une flexibilité et une rigidité supérieures. Dans le but de modéliser les microtubules selon un élément de poutre creuse, un nouveau modèle sinusoïdale de poutre à une seule variable est proposé avec la conjonction de la théorie du gradient de déformation modifiée. L'avantage de ce modèle se trouve dans son nouveau champ de déplacement impliquant une seule inconnue comme la théorie des poutres d'Euler-Bernoulli, qui est encore moins que la théorie des poutres de Timoshenko. Les équations du mouvement sont construites en considérant le principe d' Hamilton. Les résultats obtenus sont validés en les comparants à ceux donnés sur la base de la théorie des poutres de déformation de cisaillement d'ordre élevée contenant un nombre de variables important. Une étude paramétrique est établie pour examiner les impacts de la déformation de cisaillement, du coefficient de longueur d'échelle, du rapport d'aspect et du rapport du module de cisaillement sur les comportements dynamiques et de la flexion des microtubules. On remarque que lorsque les coefficients d'échelle de longueur sont presque identiques au diamètre extérieur des MT, le comportement dépendant de la microstructure devient plus important.

Mots clés : Stabilité thermique ; FSDT intégrale ; SWBNNT ; SWCNT ; Microtubules ; La théorie du gradient de déformation modifié ; Théorie de poutre à une seule variable ; Flexion ; Vibration.

Abstract

Abstract

In this investigation, the first part is reserved for the thermal stability of single-walled boron nitride and carbon nanotube by developing an integral first order shear deformation theory, the structure is considered as a hollow circular beam, the non-local equilibrium equations are determined using the principle of virtual work. The results of the critical buckling temperature are compared with those found in the literature. Several parametric studies are presented and discussed in detail to show the effects of the transverse shear deformation and the small scale parameter on the critical buckling temperature of the SWBNNT and SWCNT.

The second part focused on the analysis of the dynamic and bending behaviors of isolated protein microtubules. Microtubules (MTs) can be considered as bio-composite structures that are elements of the cytoskeleton in eukaryotic cells and possess considerable roles in cellular activities. They have higher mechanical characteristics such as superior flexibility and stiffness. In the modeling purpose of microtubules according to a hollow beam element, a novel single variable sinusoidal beam model is proposed with the conjunction of modified strain gradient theory. The advantage of this model is found in its new displacement field involving only one unknown as the Euler-Bernoulli beam theory, which is even less than the Timoshenko beam theory. The equations of motion are constructed by considering Hamilton's principle. The obtained results are validated by comparing them with those given based on higher shear deformation beam theory containing a higher number of variables. A parametric investigation is established to examine the impacts of shear deformation, length scale coefficient, and aspect ratio and shear modulus ratio on dynamic and bending behaviors of microtubules. It is remarked that when length scale coefficients are almost identical of the outer diameter of MTs, microstructure-dependent behavior becomes more important.

Keywords: Thermal stability; integral FSDT; SWBNNT; SWCNT; Microtubules; Modified strain gradient theory; Single variable beam theory; Bending; Vibration.

ملخص

ملخص

في هذا البحث، تم حجز الجزء الأول للانبعاج الحراري لنتريد البورون أحادي الجدار والأنبوب النانوي الكربوني من خلال تطوير نظرية جديدة لتشوه القص من الدرجة الأولى المتكاملة، ويعتبر الهيكل بمثابة عارضة دائرية مجوفة، ويتم تحديد معادلات التوازن غير المحلية باستخدام مبدأ العمل الافتراضي. تتم مقارنة نتائج درجة الحرارة الحرجة للانبعاج مع تلك الموجودة من قبل. تم تقديم العديد من الدراسات للعوامل ومناقشتها بالتفصيل لإظهار تأثيرات تشوه القص وعامل الحجم الصغير على درجة الحرارة الحرجة للانبعاج لنتريد البورون أحادي الجدار والأنبوب النانوي الكربوني.

يركز الجزء الثاني على تحليل السلوك الديناميكي والانحناء لأنابيب البروتين المعزولة. يمكن اعتبار الأنابيب الدقيقة هياكل مركبة بيولوجية التي تعتبر عناصر من الهيكل الخلوي في الخلايا حقيقية النواة ولها أدوار كبيرة في الأنشطة الخلوية. لديهم خصائص ميكانيكية أعلى مثل المرونة والصلابة الفائقة. في غرض النمذجة للأنابيب الدقيقة وفقاً لعنصر العارضة المجوفة، تم اقتراح نموذج جديد للعوارض جيبية بمتغير واحد مع اقتران نظرية تدرج التشوه المعدل. تم العثور على ميزة هذا النموذج في حقل النزوح الجديد الذي يتضمن مجهول واحداً فقط مثل نظرية العوارض لأويلر-برنولي، وهو أقل من نظرية عوارض تيموشينكو. يتم بناء معادلات الحركة من خلال مبدأ هاملتون. يتم التحقق من صحة النتائج التي تم الحصول عليها من خلال مقارنتها مع تلك المعطاة بناءً على نظرية تشوه القص الأعلى التي تحتوي على عدد أكبر من المتغيرات. تم إجراء دراسة العوامل لفحص تأثيرات تشوه القص ومعامل مقياس الطول ونسبة العرض إلى الارتفاع ونسبة معامل القص على السلوكيات الديناميكية والانحناء للأنابيب الدقيقة. من الملاحظ أنه عندما تكون معاملات مقياس الطول متطابقة تقريباً مع القطر الخارجي للأنابيب البروتين المعزولة، يصبح السلوك المعتمد على البنية المجهرية أكثر أهمية.

الكلمات الرئيسية: الاستقرار الحرار؛ نظرية تشوه القص درجة اولى المتكاملة؛ لنتريد البورون أحادي الجدار؛ الأنبوب النانوي الكربوني؛ الأنابيب الدقيقة البروتينية؛ نظرية تدرج التشوه المعدلة؛ نظرية العوارض بمتغير واحد فقط؛ الانحناء؛ اهتزاز.

Table des matières

Tables des matières

Remerciements	i
Dédicace	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
ملخص	v
Table des matières	vi
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	x
Liste des abréviations	xi
Liste des notations et symboles	xii
Introduction générale	01
CHAPITRE I : Généralités sur les nanotubes de carbone	07
I.1. Introduction	08
I.2. Les nanocarbone	09
I.3. Structure géométrique des nanotubes de carbone	10
I.4. Voie de synthèse des nanotubes de carbone	11
I.4.1. Voie de synthèse à haute température	11
I.4.2. Voie de synthèse à moyenne température	14
I.5. Purification des NTC	17
I.6. Propriétés des nanotubes de carbone	17
I.6.1. Propriétés électriques	17
I.6.2 Propriétés mécaniques	18
I.6.3. Propriétés thermiques	19
I.6.4. Propriétés d'émission de champ	19
I.6.5. Propriétés chimiques	20
I.7. Applications	21
I.8 Toxicité des NTC et son contrôle	22
I.9. Conclusion	23

CHAPITRE II : <i>Les microtubules</i>	24
II.1. Introduction	25
II.2. Les microtubules	26
II.2.1. Découverte des microtubules	26
II.2.2. Structure des microtubules	27
II.2.3. L'assemblage des microtubules in vitro	28
II.2.4. Dynamique des microtubules in vivo	30
II.2.5. Rôles des microtubules	30
II.2.6. L'instabilité dynamique	31
II.2.7. Propriétés mécaniques des microtubules	32
II.3. Conclusion	34
CHAPITRE III : <i>Etude bibliographique sur les méthodes de monocouches équivalentes</i>	35
III.1. Introduction	36
III.2. Les modèles analytiques des monocouches équivalentes	36
III.2.1. Le modèle d'Euler Bernoulli (EBT)	36
III.2.1.1 Hypothèses de base (EBT)	36
III.2.1.2 Cinématique et déformation (EBT)	37
III.2.2. Le modèle de déformation de cisaillement de premier ordre (Timoshenko)	38
III.2.2.1 Hypothèses de base de la théorie de déformation de cisaillement de 1 ^{er} ordre (FSDT)	38
III.2.2.2 Cinématique et déformation (FSDT)	39
III.2.3. La théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé (HSDT)	42
III.2.3.1 Hypothèses de base (HSDT)	42
III.2.3.2 Cinématique et déformation (HSDT)	43
III.3. Conclusion	47
CHAPITRE IV : <i>Etude de la stabilité des nanotubes de carbone et de nitrure de bore en utilisant une nouvelle I-FSDT</i>	48
IV.1. Introduction	49
IV.2. Etude de la stabilité thermique des SWBNNTs et SWCNTs	49
IV.2.1. Propriétés mécaniques des SWCNTs et SWBNNTs	49
IV.2.2. Champ de déplacement I-FSDT	50
IV.2.3. Relations constitutives	50
IV.2.4. Les équations non locales d'équilibre	51

IV.2.5. Solutions analytiques	53
IV.2.6. Résultats et discussions	54
IV.2.7. Flambement des SWBBNTs	54
IV.2.8. Flambement des SWCNTs	57
IV.2.9. Conclusion	60
CHAPITRE V : <i>Analyse du comportement statique et dynamique des microtubules en utilisant SVSBT</i>	61
V.1. Introduction	62
V.2. La théorie modifiée du gradient de déformation d'élasticité	62
V.3. Formulation de la théorie des poutres sinusoïdale à une seule variable (SVSBT)	64
V.4. Solution analytique	69
V.4.1. Analyse de la flexion	69
V.4.2. Analyse de la vibration libre	70
V.5. Résultats et discussion	70
V.6. Conclusion	76
Conclusion générale	79
Références bibliographiques	82

Liste des figures

Liste des figures

INTRODUCTION GENERALE

Figure 1 : *Structure typique d'un microtubule (Akgöz and Civalek 2014a).* 2

CHAPITRE I : Généralités sur les nanotubes de carbone

Figure I.1 : *Les nanocarbones A) Graphite, (B) Diamant (C) Fullerène, (D) Nanotube de Carbone et (E) Graphene (Nayfeh 2008)* 9

Figure I.2 : *Représentation schématique de l'enroulement d'un feuillet de graphène pour obtenir un NTC (Mbitsi 2010)* 10

Figure I.3 : *Représentation des trois types du NTC (Mbitsi 2010)* 11

Figure I.4 : *Procédé d'ablation par arc électrique* 12

Figure I.5 : *Procédé d'ablation par laser* 13

Figure I.6 : *Procédé par réacteur solaire* 14

Figure I.7 : *Contrainte mécanique qui induit une flexion dans un nanotube de carbone (Nguyen 2013)* 18

Figure I.8 : *Nanotubes de carbone multi- feuillets observés en microscopie électronique en transmission (Ricaud et al. 2008)* 20

CHAPITRE II : Les microtubules

Figure II.1 : *Micrographie fluorescente des filaments du cytosquelette (Arslan 2010)* 25

Figure II.2 : *Structure des microtubules (Windscheid 2008).* 28

Figure II.3 : *Modèle de la nucléation des microtubules in vitro (Job et al., 2003)* 29

Figure II.4 : *Dynamique des microtubules (Windscheid 2008).* 32

CHAPITRE III : Etude bibliographique sur les méthodes de monocouches équivalentes

Figure III.1 : *Déformation selon le modèle Euler-Bernoulli.* 36

Figure III.2 : *Déformation selon la théorie FSdT.* 39

Figure III.3 : *Variation de la fonction de gauchissement $f(z) = z$ et $f'(z)$ suivant l'épaisseur.* 40

Figure III.4 : *Déformation selon la théorie HSdT.* 42

Figure III.5 : <i>Variation de la fonction de gauchissement $f(z)$ et sa première dérivée des différents modèles des fonctions polynomiales.</i>	44
Figure III.6 : <i>Variation de la fonction de gauchissement $f(z)$ et sa première dérivée des différents modèles des fonctions trigonométriques.</i>	45
Figure III.7 : <i>Variation de la fonction de gauchissement $f(z)$ et sa première dérivée des différents modèles des fonctions hyperboliques.</i>	46
Figure III.8 : <i>Variation de la fonction de gauchissement $f(z)$ et sa première dérivée des différents modèles des fonctions exponentielles.</i>	47
 CHAPITRE IV : Etude de la stabilité des nanotubes de carbone et de nitrure de bore en utilisant une nouvelle I-FSDT	
Figure IV.1 : <i>Géométrie d'un nanotube de carbone soumis à un chargement thermique.</i>	49
Figure IV. 2 : <i>La température critique adimensionnelle du flambement des SWBNNTs en fonction du nombre de mode n et le paramètre (e_0a) avec $L/Dm = 20$.</i>	55
Figure IV. 3 : <i>La température critique adimensionnelle du flambement des SWBNNTs en fonction du nombre de mode n et rapport d'élanement L/Dm avec $e_0a = 0.4\text{ nm}$.</i>	55
Figure IV. 4 : <i>La température critique adimensionnelle du flambement des SWBNNTs en fonction du rapport d'élanement L/Dm et le paramètre d'échelle (e_0a) avec $n = 1$.</i>	56
Figure IV. 5 : <i>Le rapport de la température critique adimensionnelle du flambement (Pcr / Pcr_{EBT}) locale et non locale des SWCNTs en fonction du rapport d'élanement L/Dm et le mode de flambement avec $e_0a = 0.5\text{ nm}$.</i>	57
Figure IV. 6 : <i>Comparaison de la température critique adimensionnelle du flambement local et non local des SWCNTs en fonction du rapport d'élanement L/Dm pour les différents paramètres d'échelle e_0a avec $n = 1$.</i>	58
Figure IV. 7 : <i>Comparaison de la température critique adimensionnelle non local du flambement des SWCNTs en fonction du mode n pour les différentes valeurs de L/Dm avec $e_0a = 1.5\text{ nm}$.</i>	58
Figure IV.8 : <i>Le rapport de la température critique adimensionnelle du flambement (Pcr / Pcr_{EBT}) des SWCNTs en fonction de L/Dm et le paramètre e_0a avec $n = 1$.</i>	59

CHAPITRE V : Analyse du comportement statique et dynamique des microtubules en utilisant SVSBT

- Figure V.1 :** *Modélisation continue d'un microtubule isolé comme un élément poutre creuse simplement appuyé (Akgöz and Civalek 2014a).* **64**
- Figure V.2 :** *Variation du rapport de déflexion maximale pour les différents rapports de géométrie et de modules de cisaillement.* **74**
- Figure V.3 :** *Variation du rapport de fréquence naturelle pour les différents rapports de géométrie et de modules de cisaillement.* **75**
- Figure V.4 :** *Influence du paramètre de longueur d'échelle sur le rapport de la déflexion maximale pour les différents rapports du module de cisaillement* **76**
(a) $L/Do = 50$ (b) $L/Do = 500$.
- Figure V.5 :** *Influence du paramètre de longueur d'échelle sur le rapport de fréquence naturelle pour les différents rapports du module de cisaillement $L/Do = 500$* **76**

Liste des tableaux

Liste des tableaux

CHAPITRE IV : *Etude de la stabilité des nanotubes de carbone et de nitrure de bore en utilisant une nouvelle I-FSDT*

Tableau IV.1. Propriétés des SWCNTs et SWBNNTs utilisées **49**

CHAPITRE V : *Analyse du comportement statique et dynamique des microtubules en utilisant SVSBT*

Tableau V.1. La déflexion maximale (μm) des microtubules simplement appuyés sous chargement ponctuel ($Q_0 = 0.01 \text{ nN}, l = D_0$). **71**

Tableau V.2. Fréquences fondamentales (MHz) des microtubules simplement appuyés ($l = D_0$). **72**

Tableau V.3. Deuxième fréquences naturelles (MHz) des microtubules simplement appuyés ($l = D_0$). **72**

Tableau V.4. Troisième fréquences naturelles (MHz) des microtubules simplement appuyés ($l = D_0$). **73**

Liste des abréviations

Liste des abréviations

CT	The Classical Theory
CVD	Chemical Vapor Deposition
DWCNT	Double walled carbon nanotube
EBT	Euler Benroulli theory
ESL	Equivalent Single Layer
FSDT	First Shear Deformation Theory
GDP	Guanosine diphosphate
GTP	Guanosine triphosphate
HSDT	High Shear Deformation Theory
LCVD	Laser Enhanced Chemical Vapor Deposition
MAP	Microtubule Associated Protein
MCST	The Modified Couple Stress Theory
MET	Microscopie électronique en transmission
MSGT	The Modified Theory of Strain Gradient Elasticity
MWCNT	Multi walled carbon nanotube
NTC	Nanotube de carbone
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
SVSBT	The single variable sinusoidal beam theory
SWBNNT	Single walled boron nitride nanotube
SWCNT	Single walled carbon nanotube
TWCNT	Third walled carbon nanotube

*Liste des notations
et symboles*

Liste des notations et symboles

G	Module de cisaillement dans le plan (x, z)
E	Module de Young
ν	Coefficient de Poisson
u_0, w_0	Les composantes du champ de déplacement sur le plan moyen de la poutre
u, w	Les déplacements dans les directions x, z .
μ	Paramètre non local
N_0	Charge axiale
T	Température
α_x	Dilatation thermique
N_{th}	Charge axiale thermique
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Contraintes normales
D_i	Diamètre intérieur
D_0	Diamètre extérieur
L	Longueur du microtubule
A	Section transversale
I	Moment de l'aire de la section transversale
h	L'épaisseur de la poutre
λ	Constante de Lamé

γ_i	Vecteur du gradient de dilatation
θ	Vecteur de rotation
e	L'épaisseur de la poutre
η_{ijk}	Tenseur du gradient d'étirement déviatorique
χ^s	Tenseur du gradient de rotation symétrique
τ_{xz}	Contraintes de cisaillement
ε_x	Déformation dans la direction x
γ_{xz}	Déformations de distorsion
$\delta u, \delta w$	Champ virtuel de déplacement
δU	La variation de l'énergie de déformation
δV	La variation du travail extérieur
$\delta \varepsilon_x, \delta \varepsilon_z$	Champ de déformation longitudinal virtuel
$\delta \gamma_{xz}$	Champ de déformation transversal virtuel
N_x, N_y, N_{xy}	Efforts internes
∂	Dérivée partielle
i et j	Des nombres naturels.
$\{ \}$	Vecteur colonne
$[]$	Matrice
q	Charge transversale

ρ	Densité de masse
r_i	Rayon intérieur
r_0	Rayon extérieur
r	Rapport de module de cisaillement
K_s	Facteur de correction
P_{cr}	Température critique non dimensionnelle
T_{cr}	Température critique

Introduction générale

Les microtubules (MT) sont l'un des éléments essentiels qui composent le cytosquelette dans les cellules eucaryotes. Ils jouent un rôle majeur dans plusieurs processus biologiques, tels que la division cellulaire, le transport intracellulaire, la motilité cellulaire, le mouvement des protéines motrices et la formation des noyaux mobiles des flagelles et des cils (Scholey et al.2003, Schliwa et Woehlke 2003, Carter et Cross 2003). Les MT sont constitués à la fois d' α -tubuline et de β -tubuline (voir figure 1).

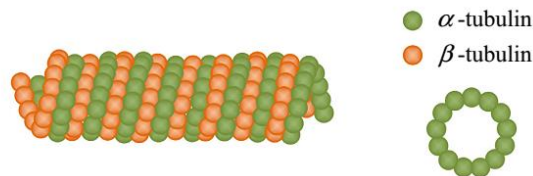


Figure 1 : Structure typique d'un microtubule (Akgöz and Civalek 2014a).

Ils sont environ cent fois plus rigides que les autres filaments et sont également très flexibles. Ces propriétés sont dues à leur structure composite et à la navette moléculaire considérée également comme structure anisotrope. Les microtubules possèdent une structure cylindrique creuse et proviennent généralement de 13 protofilaments parallèles in vivo mais ce nombre peut varier dans une plage de 9 à 16 in vitro (Chretien et Wade 1991). Généralement, les MT se trouvent avec des diamètres intérieur et extérieur d'environ 15 nm et 25 nm, respectivement, et une longueur comprise entre 10 nm et 100 μ m (Amos et Amos 1991, Howard et Hyman 2003).

Après avoir su que les fonctions indiquées ci-dessus des microtubules dépendent de leurs caractéristiques mécaniques, le comportement mécanique des MTs est devenu un sujet d'intérêt essentiel dans de nombreuses investigations théoriques et expérimentales (Venier et al.1994, Gittes et al.1993, Kurachi et al.1995, Felgner et al.1996, Vinckier et al.1996, Kis et al.2002, Kikumoto et al.2006, Akgöz et Civalek 2014a). Ainsi, les modèles mathématiques ont été largement utilisés pour examiner les caractéristiques élastiques et les réponses mécaniques des MTs ces dernières années. Les observations expérimentales ont indiqué que les liaisons entre les protofilaments adjacents dans la direction longitudinale sont plus fortes que celles dans la direction transversale à l'intérieur des protofilaments (Nogales et al.1999, Van-Buren et al.2002, Needleman et al.2004). De plus, le module de Young longitudinal des MTs est beaucoup plus élevé que le module circonférentiel et de cisaillement (Pampaloni et al. 2006, Tuszynski et al. 2006, Portet et al. 2005).

Ces remarques primaires ainsi que la présence de deux tubulines démontrent que les MTs ont une structure hétérogène et des caractéristiques anisotropes. Par conséquent, les influences de cisaillement transverse deviennent plus importantes sur les comportements mécaniques des MTs, en particulier pour les microtubules courts. Kis et al. (2002) ont examiné les caractéristiques anisotropes d'un seul microtubule et ils ont observé que la magnitude du module de cisaillement est de deux ordres inférieure à celle du module de Young. En utilisant la méthode des éléments finis, Kasas et al. (2004) ont étudié les caractéristiques mécaniques des MTs. Un modèle de coque élastique orthotrope pour les MTs est introduit par Li et al. (2004) et Wang et al. (2006) et ils ont vu que la dépendance à la longueur de la rigidité flexionnelle dépend des caractéristiques élastiques anisotropes des MTs. Ghavanloo et al. (2010) et Daneshmand et Amabili (2012) proposent une théorie des poutres d'Euler-Bernoulli et une théorie des coque élastique orthotrope incorporant les influences du cytosol visqueux et des filaments environnants pour évaluer respectivement les oscillations couplées d'un seul MT intégré dans le cytoplasme, respectivement.

Shi et al. (2008) et Tounsi et al. (2010) ont développé la théorie des poutres de déformation de cisaillement de premier ordre et parabolique respectivement pour considérer les impacts de la déformation de cisaillement transverse sur les caractéristiques mécaniques des MTs. Akgöz et Civalek (2014a) ont présenté une théorie de poutre de déformation de cisaillement dépendante de la microstructure pour l'étude de la flexion et la vibrations des MTs sur la base de la théorie modifiée de l'élasticité du gradient de déformation. En outre, des approches de milieu continu atomistique pour les investigations mécaniques des MTs peuvent être trouvées dans des revues de littérature (Xiang et Liew 2011 et 2012ab, Xiang et Liew 2013).

Il convient de noter que certaines études expérimentales ont montré que les influences de la taille existantes jouent un rôle considérable sur les réponses mécaniques des structures à petite échelle (Poole et al. 1996, Lam et al. 2003, McFarland et Colton 2005). Les modèles des milieux continue classiques (conventionnels) n'ont pas de coefficients de longueur de taille de matériau et ne parviennent pas à évaluer les réponses dépendantes de l'échelle des structures micro et nanométriques. Ainsi, de nombreux modèles des milieux continus non conventionnels (d'ordre supérieur) ont été développés pour étudier les réponses mécaniques de structures à petite échelle comme le modèle de contrainte couplé.

(Mindlin et Tiersten 1962, Koiter 1964, Toupin 1964, Akbaş 2018), le modèle micropolaire (Eringen 1967), modèle d'élasticité nonlocal (Eringen 1972 et 1983, Belkorissat et al. 2015, Zemri et al. 2015, Larbi Chaht et al. 2015, Eltaher et al. 2016, Bounouara et al. 2016, Ahouel et al. 2016, Elmerabet et al. 2017, Khetir et al. 2017, Bellifa et al. 2017a, Bouafia et al. 2017, Besseghier et al. 2017, Jandaghian et Rahmani 2017, Mouffoki et al. 2018, Bouadi et al. 2018, Mokhtar et al. 2018, Yazid et al. 2018), et les modèles de gradient de déformations (Fleck and Hutchinson 1993, Vardoulakis and Sulem 1995, Aifantis 1999, Karami et al. 2017, Bensaid et al. 2018, Karami *et al.* 2018abcde, Arefi et al. 2018, Karami et al. 2019a).

La théorie basée sur le gradient de déformation modifiée (Lam et al. 2003) est l'un des modèles d'ordre supérieur indiqués ci-dessus dans lequel la densité d'énergie de déformation possède des gradients de déformation du second ordre en plus du gradient de déformation du premier ordre. Pour les matériaux isotropes élastiques linéaires, l'approche mathématique et les équations d'équilibre considèrent trois paramètres d'échelle de longueur de matériaux supplémentaires liés aux gradients de déformation d'ordre supérieur en plus de deux paramètres classiques.

Ce modèle populaire a été utilisé pour examiner les réponses mécaniques des microbars (Kahrobaiyan et al.2011a, Narendar et al.2012, Kahrobaiyan et al.2013, Akgöz et Civalek 2013a et 2014b, Güven 2014) et des micro-poutre (Wang et al. 2010, Akgöz et Civalek 2011a et 2012a, Ansari et al.2011, Asghari et al.2012, Akgöz et Civalek 2013bc, Artan et Toksöz 2013, Ghayesh et al.2013, Kahrobaiyan et al.2011b et 2012, Zhao et al.2012 , Lei et al.2013, Tajalli et al.2013, Akgöz et Civalek 2014c, Al-Basyouni et al.2015).

Comme indiqué ci-dessus, le diamètre et la longueur des microtubules sont respectivement de l'ordre du nanomètre et du micromètre. Ainsi, la modélisation et l'étude des MTs en considérant des modèles de milieu continu non conventionnel ont récemment attiré de nombreux scientifiques. La longueur de persistance et les comportements de stabilité des MTs ont été étudiés par Gao et Lei (2009) et Fu et Zhang (2010) en considérant respectivement le modèle d'élasticité non locale et le modèle modifié des contraintes couplés.

Heireche et al. (2010) ont utilisé une théorie non locale des poutres de Timoshenko pour l'étude dynamique des microtubules en considérant un cytoplasme environnant viscoélastique. Les comportements de stabilité des MTs dans les cellules

vivantes sont examinés et discutés par Gao et An (2010) en utilisant un modèle de coque anisotrope non local.

Shen (2010abc) a proposé des théories de coque de déformation de cisaillement non local pour les études linéaires et non linéaires des MTs. En outre, les réponses à la flexion et aux vibrations des MTs ont été examinées sur la base de modèles de poutre Euler – Bernoulli et de milieux continue non conventionnels (Civalek et Akgöz 2010, Civalek et al.2010, Akgöz et Civalek 2011b, Akgöz et Civalek 2012b, Zeverdejani et Beni 2013).

Plusieurs travaux scientifiques sur l'étude du comportement des structures en tenant compte de l'effet de petite échelle sont publiés, tels que Dihaj et al., (2018) qui ont étudié la vibration libre transversale du nanotube de carbone à double paroi (DWCNT) incorporé dans le milieu élastique est modélisée par la théorie de l'élasticité non locale et le modèle de poutre d'Euler Bernoulli. Shakouri et al. (2009), Ehteshami et Hajabasi (2011), Khosrozadeh et Hajabasi (2012) et Fang et al. (2013) ont étudié les vibrations des DWCNT modélisées par la méthode EBT incluant la force van der Waals.

Heireche et al. (2008 a,b) et Wang et al. (2012) ont étudié l'effet de la contrainte axiale initiale sur la propagation des ondes sonores des SWCNT selon la théorie d'Euler Bernoulli. Dans le cadre de la thermo-élasticité, Benzair et al. (2008), Ansari et Ramezannezhad (2011) et Zidour et al. (2012) ont étudié les effets thermiques sur les vibrations des SWCNT en utilisant la théorie non locales TBT.

Dans cette thèse, l'étude de la stabilité thermique des nanotubes de nitrure de bore et de nanotube de carbone à une seule paroi est examiné en utilisant la théorie de déformation de cisaillement de premier ordre intégrale, le modèle proposé tient en compte la déformation de cisaillement et l'effet de la petite échelle. Les résultats de la température critique du flambement sont comparé à ceux trouvés dans la littérature, des études paramétriques sont présentés et discutés en détail.

Aussi le comportement statique et dynamique des MTs, l'un des principaux éléments du cytosquelette dans les cellules vivantes, sont examinés. Afin de modéliser les microtubules tels qu'une poutre cylindrique creuse, une théorie de poutre de déformation de cisaillement à une seule variable est proposée en considérant le modèle d'élasticité du gradient de déformation modifié.

Cette théorie est construite sur la base de la poutre d'Euler – Bernoulli (EBT) incluant la fonction sinusoidale en termes de coordonnées d'épaisseur pour considérer l'influence de la déformation de cisaillement et elle n'implique qu'une seule équation de mouvement. Le modèle développé dans cette étude attirera la grande communauté de biophysiciens étudiant dans le domaine du filament mécanique, plutôt que dans la communauté de l'ingénierie.

Chapitre I :

Généralités sur les

nanotubes de carbone

I.1. Introduction

C'est au 20^e siècle que le développement de la science et de la technologie s'est accéléré. De nouveaux matériaux, comme les polymères, les céramiques, etc., ont donné naissance à de nouvelles machines qui facilitent la vie. Cependant, les machines sont généralement de taille énorme lorsqu'elles sont inventées. Par exemple, les premières machines informatiques telles que les ordinateurs étaient très énormes en taille et elles remplissaient des salles.

Ces appareils étaient très utiles, mais leur grande taille était le problème majeur de leur utilisation dans différents endroits ou zones. La miniaturisation n'est pas, bien sûr, une idée nouvelle. L'un des objectifs les plus importants et les plus cohérents de l'innovation a été de rendre les choses aussi petites que possible, car la petite taille permet de gagner de la place et d'accroître la mobilité des appareils. Elle apporte la probabilité, la possibilité d'assembler plus de composants afin d'obtenir des résultats plus sophistiqués et une économie de matériaux utilisés et donc du coût.

C'est Richard Feynman, l'un des physiciens les plus célèbres et les plus éclectiques du XX^e siècle, qui a émis l'idée que la miniaturisation pourrait aller jusqu'au niveau moléculaire et que l'on pourrait fabriquer des appareils dont les composants seraient fabriqués à partir d'un nombre défini et quantifiable d'atomes.

Cependant, ce n'était qu'un rêve à la fin des années 1950, mais cette vision a suscité l'intérêt d'Eric Drexler qui a fait ses recherches à l'institut de technologie du Massachusetts à la fin des années 1970 et ça s'est transformé ensuite en une thèse de doctorat et un livre intitulé "Engines of Creation", qui a été publié en 1986. C'était une vision révolutionnaire dans la technologie de fabrication. Au lieu d'être construit de haut en bas, par moulage et en transformant de grandes choses en petites, les objets seraient construits de bas en haut, à partir de leurs atomes constitutifs.

Cependant, de telles constructions ne pouvaient pas être faites par les processus connus de la chimie. Les processus chimiques impliquent des réactions dans des solutions, liquides ou gazeuses. M. Drexler a plutôt imaginé un monde d'assembleurs moléculaires, des machines de la taille d'une molécule qui prendraient des atomes individuels et les placeraient exactement à l'endroit voulu dans l'appareil en construction. C'est en suivant ces idées qu'il a pensé à un nom pour cette nouvelle technologie et a créé le nom de "Nanotechnologie" (Ayhan 2004).

I.2. Les nanocarbone

Le carbone est le quatrième élément le plus abondant dans l'univers après l'hydrogène, l'hélium et l'oxygène. Sur Terre, le carbone représente le 15^e élément le plus abondant (Nayfeh 2008) dont il représente 0,032% de la croûte, (Aubouin 1968).

Le carbone se trouve sous différentes formes allotropiques. Tout d'abord, le diamant en trois dimensions, est la forme de carbone la plus connue ensuite le graphène, en deux dimensions, est la forme la plus courante de carbone pur.

En 1985, une nouvelle forme à zéro dimension était découverte, les fullerènes (Kroto 1985) Ce sont des molécules composées de carbone pouvant prendre une forme sphérique, ellipsoïdale, qui empêche la feuille d'être plate.

Et ce n'est qu'en 1991 que les nanotubes de carbone ont été identifiés pour la première fois par Sumio Iijima (1991) alors qu'il observait par microscopie électronique à transmission à haute résolution les sous-produits, présents sous forme de suie, de fullerènes synthétisés par la méthode dite de l'arc électrique par Bacon et Krätschmer (1960, 1990). Ce sont donc la forme allotropique du carbone la plus récemment identifiée (Iijima 1991, Salem 2012).

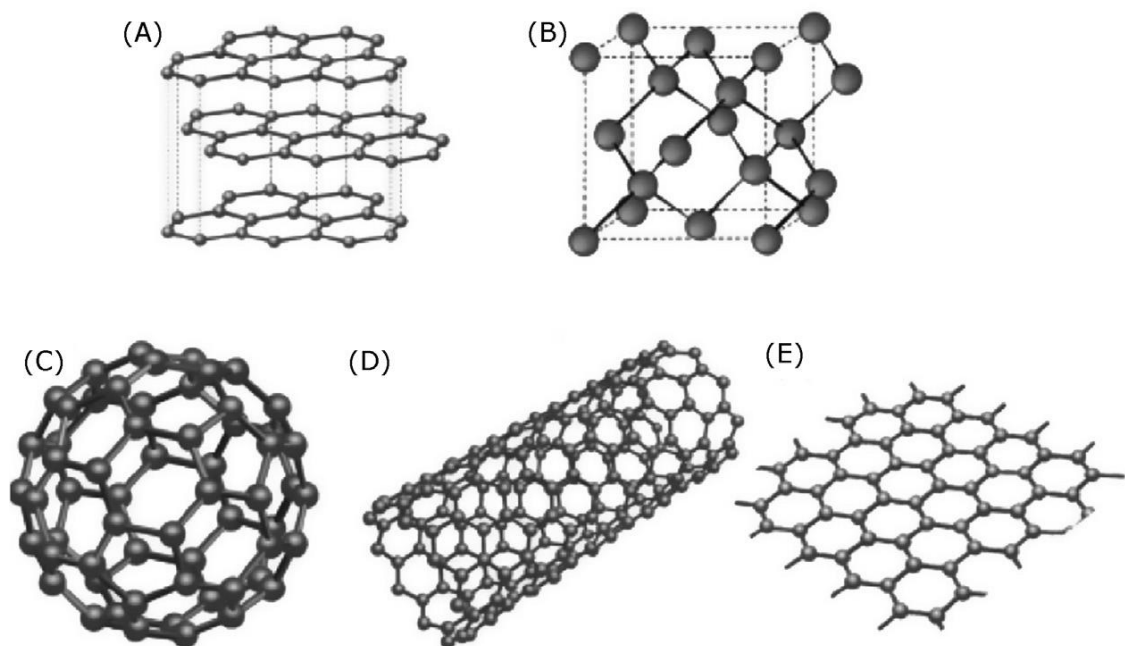


Figure I.1 : Les nanocarbone (A) Graphite, (B) Diamant (C) Fullerène, (D) Nanotube de Carbone et (E) Graphene (Nayfeh 2008)

I.3. Structure géométrique des nanotubes de carbone

Le NTC, se présente sous la forme d'un feuillet de graphène, enroulé sur lui-même, tout en décrivant une géométrie tubulaire (cf. figure 2). Ainsi, à partir de la structure 2D du feuillet de graphène, qu'un NTC avec une structure cylindrique unidimensionnelle (1D) en résulte.

Si le NTC est constitué d'un seul feuillet de graphène, on parle alors de nanotube mono-feuillet (SWCNTs, pour Single Walled Carbon Nanotubes ou nanotube mono paroi), et s'il est constitué de deux nanotubes de carbone concentriques dans lesquels le tube extérieur enferme le tube intérieur il s'agit du nanotube double paroi (DWCNTs, pour Double Walled Carbon Nanotubes de plusieurs couches, il s'agit de nanotubes multi-parois (MWCNTs, pour Multi Walled Carbon Nanotubes ou nanotube multi- feuillets) (Mbitsi 2010).

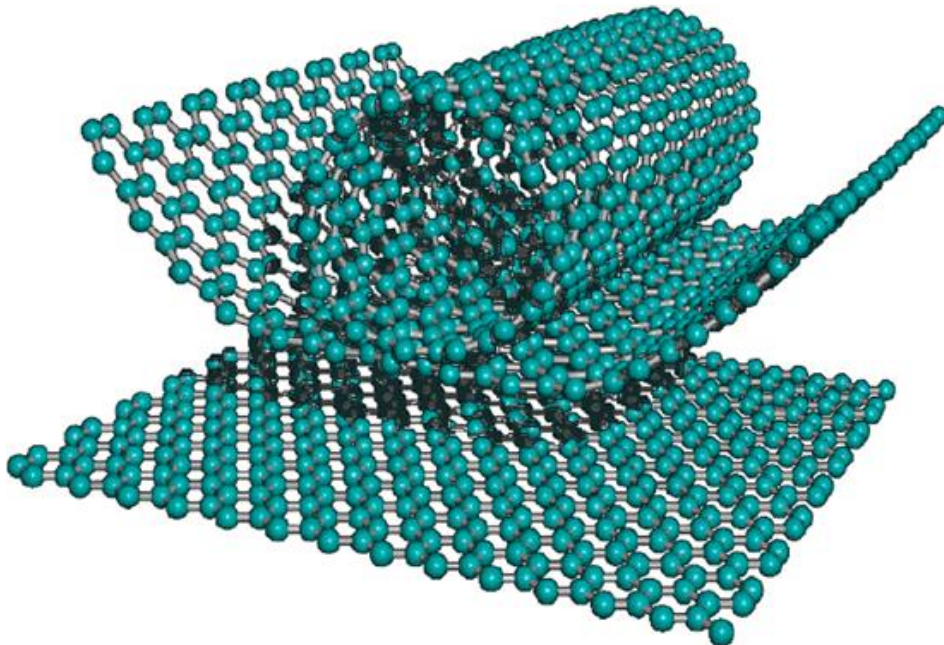


Figure I.2 : Représentation schématique de l'enroulement d'un feuillet de graphène pour obtenir un NTC. (Mbitsi 2010)

Les nanotubes de carbone multi-feuillets sont constitués de plusieurs parois espacées de 0,34 à 0,40 nm (Iijima-1991). Il y'a deux configurations différentes permettant d'envisager ce type de structure. Elles sont basées soit sur un emboîtement de tubes concentriques, ou bien sur l'enroulement d'un unique feuillet graphitique en

spirale. L'orientation des motifs hexagonaux de carbone par rapport à l'axe du tube, fixe la structure du nanotube et permet de caractériser les différents types de nanotubes. On obtient de ce fait trois principaux types d'arrangements seront distingués (figure 3)

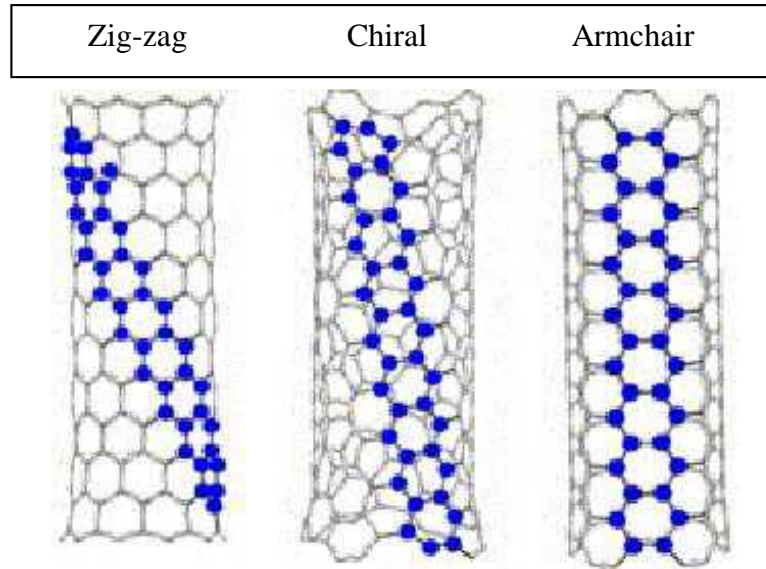


Figure I.3 : Représentation des trois types du NTC (Mbitsi 2010)

- Lorsque les motifs hexagonaux de carbone décrivent un cercle perpendiculaire à l'axe du tube, le NTC a une structure de type « zigzag ».
- Pour des motifs hexagonaux de carbone alignés parallèlement à l'axe du tube on dira que le NTC a une structure de type « armchair » ou « chaise ».
- Lorsque les cycles forment une hélicité intermédiaire entre zigzag et armchair. Le nanotube est alors qualifié de « chiral » ou « hélicoïdal ».

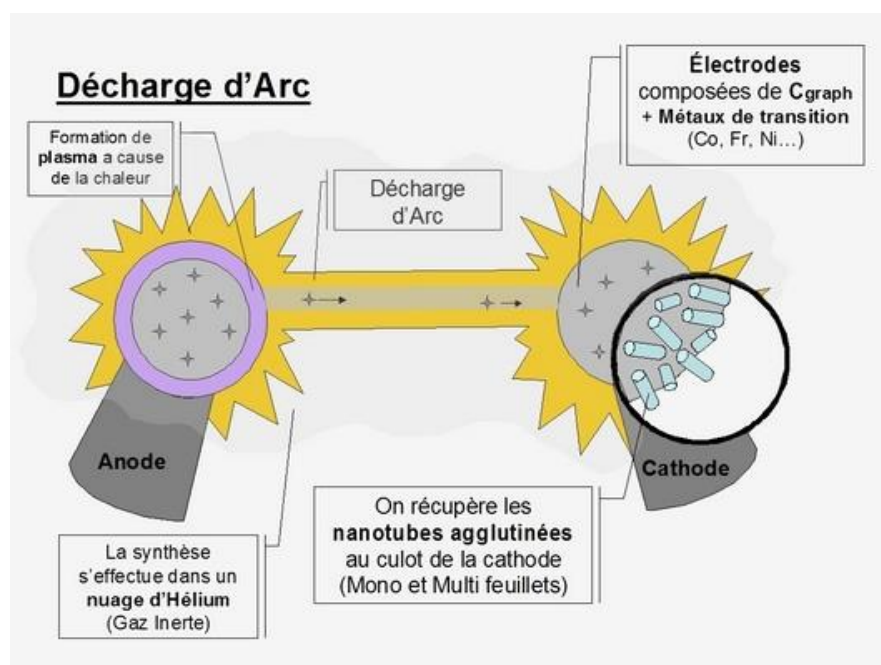
I.4. Voie de synthèse des nanotubes de carbone

I.4.1. Voie de synthèse à haute température

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

utilisant ce principe se distinguent par le procédé de vaporisation du graphite mis en jeu (Mbitsi 2010). Il s'agit de :

- L'arc électrique : initialement développé pour la synthèse de fullerènes (Krätschmer 1990), cette technique consiste à établir un arc électrique entre deux électrodes de graphite dans une enceinte remplie d'un gaz inerte. En général, la synthèse des MWCNTs peut être obtenue sans l'utilisation d'un catalyseur, alors que la synthèse des SWCNTs nécessite l'utilisation de différents précurseurs, qui sont soit un métal pur, soit un mélange de métaux (Iijima et Ichihashi 1993, Bethune et al. 1993, Journet et al. 1997, Harlem et al. 2019). Ce procédé très simple et peu coûteux présentait à l'origine un rendement faible et un taux d'impuretés très important. La teneur en nanotubes mono parois avoisinait 30 à 50 % en masse au niveau du collecteur et 10 % en masse au niveau des parois du réacteur. Depuis ces résultats ont été améliorés (Tarasov et al. 2003, Ando et al. 2000).



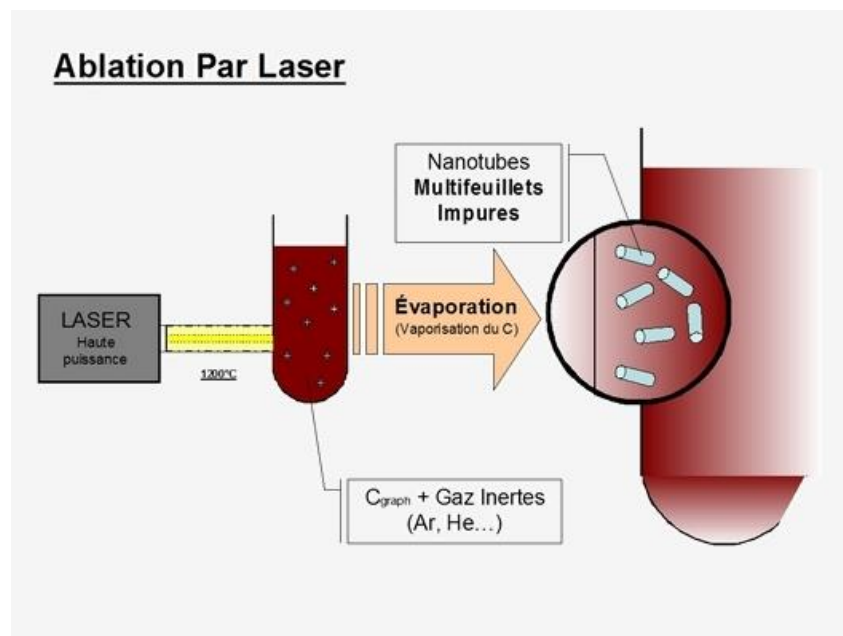
<http://nanotubes.carbone.free.fr/elaboration.html>

Figure I.4 : Procédé d'ablation par arc électrique

- L'ablation laser : cette technique (Guo et al. 1995, Thess et al. 1996) consiste à ablater une cible de graphite avec un rayonnement laser impulsionnel ou continu de forte énergie. pour sublimer ou expulser les atomes de carbone (Maser et al. 1998, Yudasaka et al. 1990). Ceux-ci sont ensuite condensés sous forme de nanotubes sur

une tige de cuivre refroidie par de l'eau glacée. Lorsque des particules métalliques sont ajoutées comme catalyseurs à la cible de graphite, la technique de vaporisation laser est capable de créer de grandes quantités de SWCNT, avec une grande pureté et qualité. Cependant, en raison du coût et de l'énergie du laser, cette technique est la plus chère. Ce procédé, certes plus coûteux que le précédent, produit des NTC avec un très bon rendement car entre 70 et 90% de la masse de graphite de départ est convertie en nanotubes.

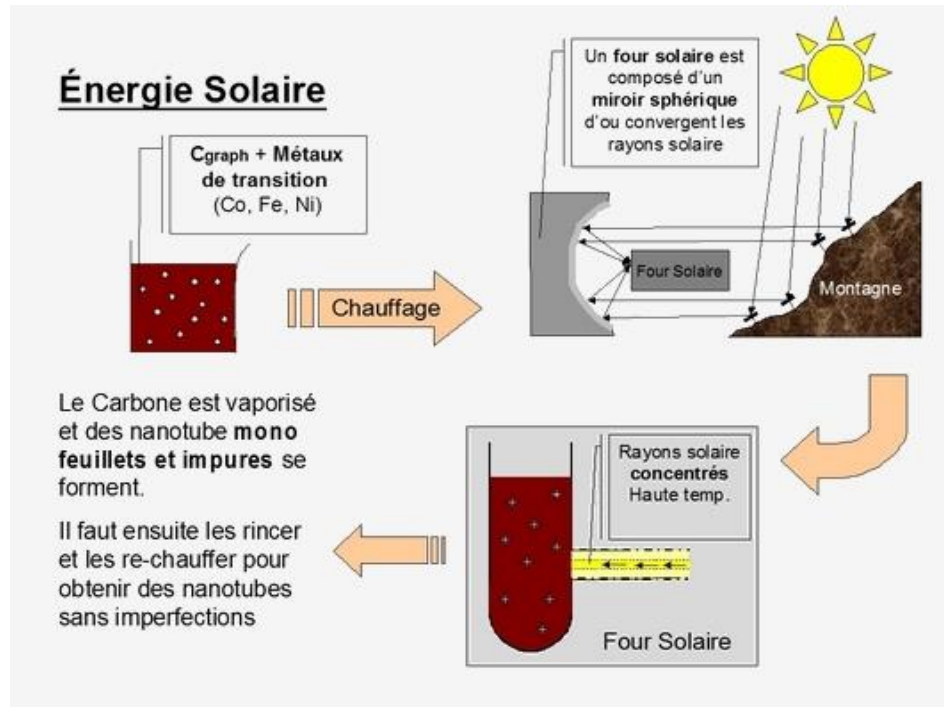
Ces études ont montré que les NTC produits par ces techniques possèdent un fort degré de cristallinité, cependant ces synthèses s'accompagnent de la production d'un grand nombre de sous-produits carbonés (coques graphitiques, fullerènes, carbone amorphe) ou catalytiques (particules encapsulées). Bien que des techniques de purification aient été mises au point pour diminuer la quantité de ces impuretés (Liu et al. 1998). Cependant ces diverses étapes de purification endommagent souvent les nanotubes et conduisent à une perte en masse des produits. Pour ces raisons, les procédés par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) apparaissent beaucoup plus appropriés pour la production de NTC et leur intégration dans des dispositifs de microélectronique.



<http://nanotubes.carbone.free.fr/elaboration.html>

Figure I.5 : Procédé d'ablation par laser

- Réacteur solaire : cette méthode consiste pour sublimer le graphite, à utiliser l'énergie solaire. Le rayonnement est ainsi concentré sur une cible de façon à atteindre la température de sublimation du graphite. Le mode de fonctionnement du four solaire est voisin de celui de la sublimation par laser continu (Ricaud et al. 2008).



<http://nanotubes.carbone.free.fr/elaboration.html>

Figure I.6 : Procédé par réacteur solaire

I.4.2. Voie de synthèse à moyenne température

La méthode CVD est devenue la technique standard pour la synthèse des NTC. Mentionnée pour la première fois en 1993 comme moyen de synthèse de MWCNTs par CVD d'acétylène à 1000 °C (Yacaman et al. 1993) ou de benzène à 1400°C (Endo et al. 1993) sur des particules de fer, cette méthode, basée sur l'excitation d'atomes de carbone au contact de particules métalliques, a été largement adaptée pour produire des NTC en utilisant d'autres particules de catalyseur telles que le nickel ou le cobalt (Ren et al. 1998). Il a été constaté que la taille des particules métalliques était directement liée à la taille des NTC ainsi produits.

Par rapport aux deux méthodes précédentes, celle de CVD est plutôt économique et produit des NTC assez purs. Une technique a été développée par Smalley et al., d'après la décomposition du monoxyde de carbone en présence de

métallocène ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) (Nikolaev et al. 1999). Cette méthode conduit à la production en continu des SWCNT. Le procédé par CVD a également été utilisé pour produire des DWCNT relativement purs et bien définis, qui forment une classe spéciale des tubes car leur morphologie et leurs propriétés les rendent plus résistants à la fonctionnalisation et aux produits chimiques en général (Bandow et al. 2001, Pfeiffer et al. 2006). Aussi bien des MWCNT que des SWCNT peuvent être synthétisés par CVD. Plusieurs méthodes ont été développées. Elles diffèrent par le moyen dont les réactions chimiques sont initiées et par les conditions du procédé.

On en distingue 3 principales méthodes : la CVD thermique, la CVD assistée par plasma (PECVD) et la CVD assistée par laser (LCVD).

- **La CVD thermique**

C'est la voie la plus utilisée. Elle est basée sur la décomposition thermique d'hydrocarbures, de monoxyde de carbone (procédé HiPCO, High-Pressure CO Conversion) ou d'alcools (méthanol, éthanol,... (Wang et al. 2009, Maruyama et al. 2002). La décomposition de monoxyde de carbone à haute température a été la première à être utilisée pour former des NTC. Dès 1992, Dai *et al.* réussissent à obtenir des SWCNT sur des nanoparticules de Mo par décomposition du CO à 1200 °C.

Cette méthode fut par la suite améliorée par Smalley *et al.* pour aboutir au développement du procédé HiPCO (Nikolaev et al. 1999). Celui-ci consiste en la décomposition du monoxyde de carbone mélangé à de l'hydrogène à haute température et haute pression. Le catalyseur est un composé organométallique ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) qui se décompose à haute température, formant ainsi des nanoparticules métalliques de Fe sur lesquelles les SWCNT croissent. C'est le seul procédé qui permet actuellement de synthétiser plusieurs kilogrammes de SWCNT par jour.

La décomposition thermique d'hydrocarbures a été développée par Dai *et al.*. De cette manière, ils sont parvenus à synthétiser des SWCNT par décomposition du méthane à 900 °C (Cassel et al. 1999, Kong et al. 1998, Kong et al. 1998). Su *et al.* ont réussi à améliorer le rendement en utilisant un support d'alumine imprégné de nanoparticules de Fe et de Mo comme catalyseurs (Su et al. 2000). Cette méthode est particulièrement utilisée avec du méthane.

Cependant il est possible d'utiliser d'autres gaz comme l'éthane dilué dans de l'argon qui se décompose entre 700 et 750 °C (Hafner et al. 1998). Que ce soit à partir

de monoxyde de carbone ou d'hydrocarbures, à l'échelle du laboratoire, la CVD thermique permet de produire des NTC bien alignés (Dai 2002a,b, Dai et al. 1999).

En utilisant une silice mésoporeuse comme substrat, dont les pores sont enduits de nanoparticules de fer (catalyseur), les NTC croissent à l'intérieur de manière alignés (Pan et al. 1998). Il est aussi possible d'utiliser des substrats sur lesquels du fer est déposé en forme de carré. Les NTC croissent bien alignés sous forme de tours perpendiculaires au substrat. Les NTC sont maintenus entre eux par des forces de Van der Waals permettant ainsi une croissance orientée (Fan et al. 1999).

- **La CVD assistée par plasma (PECVD)**

La CVD assistée par plasma ou PECVD (« Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition » en anglais) offre l'avantage de pouvoir produire des NTC à faible température. En effet, il est possible de produire des NTC à 120 °C (Hofmann et al. 2003) et même à température ambiante (Minea et al. 2004). Les sources de chaleur utilisées sont le courant continu, les ondes radioélectriques ou les micro-ondes. Ces sources sont capables d'ioniser des gaz réactifs et ainsi générer un plasma d'électrons, d'ions et de radicaux. En général, par PECVD, il est possible d'obtenir des NTC alignés verticalement sur une large surface ($> 10 \text{ cm}^2$) (Penza et al. 2009, Jang et al. 2007).

- **La CVD assistée par laser**

La CVD assistée par laser ou LCVD (« Laser Enhanced Chemical Vapor Deposition, en anglais) est un procédé permettant de déposer toutes sortes de matériaux (Duty et al. 2001). Un laser est utilisé pour chauffer localement une petite zone du substrat à la température requise pour le dépôt. Le dépôt chimique en phase vapeur se fait alors à l'interface gaz-substrat. Lorsque la température augmente et que la réaction se produit, une fibre germe au point d'impact du laser et croît dans la direction du rayon laser.

La LCVD a généralement un rendement de dépôt plus élevé qu'une CVD conventionnelle, offrant ainsi la possibilité de produire des NTC en grande quantité. Cependant, l'utilisation de la LCVD pour la production de NTC n'en est encore qu'aux premières étapes de développement. Comparé à la PECVD et la CVD thermique, peu d'études ont été faites sur la croissance des NTC par LCVD (Bondi et al. 2006).

Comparée aux méthodes de synthèse par arc électrique et ablation laser, la synthèse de NTC par voie chimique en phase vapeur permet d'avoir un meilleur contrôle de la croissance des NTC puisque qu'en plus de la morphologie, il est possible de maîtriser leur orientation.

Cependant, les techniques de PECVD et LCVD bien que prometteuses en sont encore au stade de développement par rapport à la CVD thermique, qui permet, en plus, une production de NTC de plusieurs kilogrammes par jour. Elle est donc la plus apte à être transposée à l'échelle industrielle.

I.5. Purification des NTC

Les NTC produits par les méthodes décrites dans ce chapitre contiennent des impuretés, notamment des particules de catalyseurs métalliques et différentes formes de carbone amorphe. Bien qu'il soit toujours un objectif de produire des NTC aussi purs que possible, plusieurs chercheurs ont développé des méthodes de purification (Thess et al. 1996, Huang et al. 2002, Bandow et al. 1997).

Ces méthodes chimiques et physiques sont consacrées à l'élimination des catalyseurs métalliques et d'autres impuretés, telles que le carbone amorphe, les nanosphères de carbone contenant des catalyseurs métalliques et les carbones polyaromatiques, y compris les fullerènes (Malekimoghadam et Rafiee 2018).

Certaines techniques communes rapportées dans la littérature incluent l'oxydation thermique dans l'air (Thess et al. 1996), le traitement hydrothermal (Huang et al. 2002), l'oxydation de H₂O-plasma (Chiang et al. 2001), l'oxydation acide (Bandow et a. 1997), la séparation de dispersion par microfiltration (Niyogi et al. 2001) comme purification chimique et chromatographie liquide à haute performance (Murphy et al. 2002) et la filtration (Berhan et al. 2016) comme purification physique, et un certain nombre de combinaison de ces techniques.

I.6. Propriétés des nanotubes de carbone

I.6.1. Propriétés électriques

L'orientation des motifs hexagonaux de carbone par rapport à l'axe du tube détermine le comportement métallique ou semi-conducteur théorique des SWCNT (Saito 1992). Les nanotubes de configuration dite « Armchair » ont des propriétés électroniques comparables à celles des conducteurs métalliques, alors qu'une

configuration « Zigzag » ou « Chiral » engendre un comportement semi-conducteur. De ces règles de construction, lors de la synthèse des NTC mono-feuillets et en tenant compte de toutes les chiralités possibles, 1/3 des NTC auront un comportement métallique et 2/3 un comportement semi-métallique ou semi-conducteur (Saito et al. 1992). Du fait de leur structure électronique unidimensionnelle, le transport électronique est dit balistique sur de longues distances dans les NTC (Frank et al. 1998) (Chiu et al. 2005). D'après ces auteurs, l'électron traverse le NTC (selon l'axe) sans subir de collisions et sans dissiper d'énergie.

I.6.2 Propriétés mécaniques

La présence de fortes liaisons chimiques C-C dans le graphite rend les propriétés des nanotubes de carbone exceptionnelles. La dissociation d'une telle liaison nécessite une importante énergie, équivalente à 348 kJ.mol^{-1} . Grâce à ces liaisons fortes entre les atomes, les nanotubes de carbone présente un module d'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 (1996) montrent un module d'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 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 sp^2 et passer à une géométrie tétraogonale caractéristique d'une hybridation sp^3 et inversement. Le nanotube possède ainsi une grande facilité à se courber ou se tordre selon leur axe.



Figure I.7 : *Contrainte mécanique qui induit une flexion dans un nanotube de carbone (Nguyen 2013)*

Selon les calculs du module d'Young réalisés par l'équipe de Overney (Overney et al. 1993) sur un SWCNT, le résultat est similaire à celui de Yakobson. En utilisant un modèle empirique (Lu et al. 1997), Lu quant à lui, prévoit un module d'Young de 0.97 TPa pour les MWCNTs et de 1.1 TPa pour les SWCNTs. 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 MET, 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-paroi. Récemment, Huang *et al.* (2006) ont montré expérimentalement que des SWCNTs pouvaient présenter des caractéristiques de superplasticité. Un nanotube peut ainsi s'étendre jusqu'à 80% de sa longueur.

I.6.3. Propriétés thermiques

La conductivité thermique d'un matériau résulte de l'échange de phonons (générés par vibrations moléculaires) et du déplacement d'électrons dans le matériau. Dans le cas des NTCs, c'est le déplacement d'électrons qui est le principal responsable de la conductivité thermique. Comme dans le cas de la conductivité électrique, la conductivité thermique des NTCs est linéaire et elle est liée à la courbure des NTCs. la chiralité est donc importante. La conductivité thermique des NTCs (de 3000 à 6600 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) est supérieure à celle du graphite ou du diamant, ce dernier étant connu pour être un excellent conducteur thermique (de 1000 à 2600 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) (Itkis et al. 2006).

I.6.4. Propriétés d'émission de champ

Les nanotubes de carbone sont capables d'émettre des électrons par effet tunnel via leur pointe lorsqu'ils sont placés parallèlement aux lignes d'un champ électrique. Avec des tensions relativement faibles, il est possible de générer à leurs extrémités des champs électriques colossaux, capables d'arracher les électrons de la matière et de les émettre vers l'extérieur (Houdy et al. 2006a). Cette émission est extrêmement localisée (à l'extrémité du tube) et peut servir à envoyer des électrons sur un endroit bien précis. L'émission électronique des nanotubes de carbone (assemblés sous forme de films) est de :

- 10^7 A/cm² pour les nanotubes de carbone mono-feuillet.
- 10^6 à 10^8 A/cm² pour les nanotubes de carbone multi-feuillets.

I.6.5. Propriétés chimiques

Les nanotubes de carbone possèdent des propriétés chimiques très attrayantes (Houdy et al. 2006a). Il est en effet possible de fonctionnaliser leur surface par greffage moléculaire afin, par exemple, de procéder au tri des nanotubes selon leurs caractéristiques électroniques, d'intercaler des atomes ou des molécules (dopage) entre les nanotubes mono-feuillet d'un faisceau (intercalation inter-tubulaire) ainsi qu'entre les différentes parois d'un nanotube multi-feuillets (intercalation inter-planaire) afin par exemple de contrôler les propriétés électroniques des nanotubes semi-conducteurs.

Il est aussi possible de remplir par capillarité le canal central des nanotubes de carbone mono et multi-feuillets par des atomes ou des composés cristallins de façon à obtenir des nanofils encapsulés.

La surface spécifique des nanotubes de carbone est de surcroît élevée, ce qui leur confère une très bonne capacité d'adsorption. Elle est voisine de 2700 m²/g pour les nanotubes mono-feuillet et est généralement inférieure à 1300 m²/g pour les nanotubes multi-feuillets (cf. Figures 8).

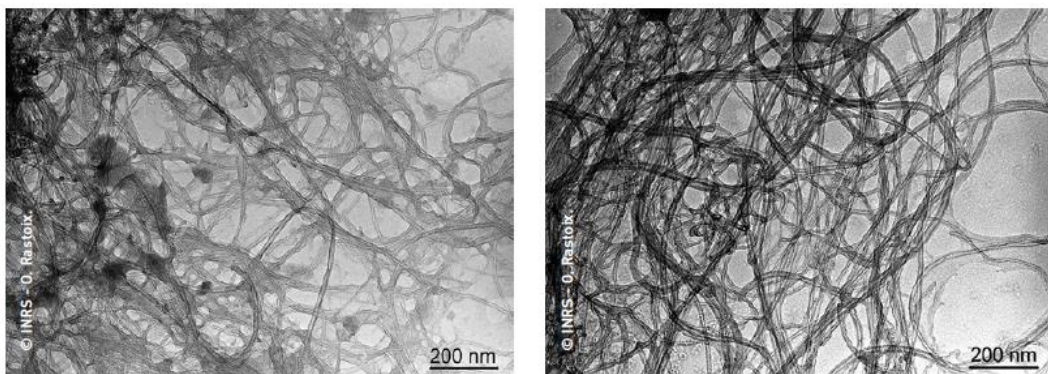


Figure I.8 : *Nanotubes de carbone multi-feuillets observés en microscopie électronique en transmission (Ricaud et al. 2008)*

Par ailleurs, les nanotubes de carbone présentent une excellente inertie chimique et une très bonne stabilité à haute température sous atmosphère inerte. Ils sont ainsi insolubles dans les solvants organiques et dans l'eau.

I.7. Applications

Du fait de leurs propriétés exceptionnelles, les nanotubes de carbone recèlent de potentialités très diverses 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) (Houdy et al. 2006b). Les propriétés spécifiques des nanotubes de carbone peuvent ainsi être transposées 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.), les composants électroniques (diodes, transistors, etc.), la défense, les équipements sportifs (raquettes de tennis, vélos, kayaks, clubs de golf, etc.), la médecine, les textiles techniques (vêtements plus résistants), 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 (Houdy et al. 2006a). Les nanotubes de carbone conducteurs peuvent être considérés comme un modèle de ce que seront les fils conducteurs utilisés notamment en connectique dans les années 2010-2015 (un nanotube peut supporter des courants qui font fondre un fil de cuivre de même dimension). Les nanotubes de carbone semi-conducteurs devraient permettre, quant à eux, d'élaborer des composants électroniques fonctionnels et logiques tels que des transistors ou des diodes avec des performances supérieures à celles du silicium.

Les nanotubes de carbone utilisés comme émetteurs ou générateurs d'électrons semblent parfaitement adaptés pour concevoir la nouvelle génération d'écrans plats de télévision à effet de champ (Houdy et al. 2006a). 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 inertie chimique et de leur stabilité à haute température sous atmosphère inerte. À ces propriétés similaires aux charbons actifs s'ajoute leur très grande surface externe. L'absence de microporosité permet, de surcroît, l'accès rapide aux sites. Ils permettent une activité augmentée et une meilleure sélectivité.

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 agro- alimentaire 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 (Houdy et al. 2006a).

I.8 Toxicité des NTC et son contrôle

En raison des propriétés physiques et chimiques extraordinaires des NTC, leur utilisation dans l'industrie a été sérieusement envisagée, mais il existe certains problèmes liés à leur utilisation, notamment des problèmes liés à leur toxicité (Ibrahim 2013). Les NTC peuvent avoir des effets néfastes sur la santé humaine, en particulier sur le système pulmonaire, qui est une des principales voies d'exposition (Satishkumar et al. 2000). Les chercheurs s'en préoccupent beaucoup à l'heure actuelle (Helland et al. 2007, Choi et al. 2003, Nemmar et al. 2002).

Ainsi, certaines mesures sont nécessaires pour minimiser la toxicité des NTC. La surexposition aux poussières de NTC provoque également une inflammation et un stress oxydatif (Nemmar et al. 2001). Une étude récente sur les NTC a montré que la longueur et la rigidité des nanotubes influencent grandement l'effet pro-inflammatoire des NTC (Poland et al. 2008). Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour déterminer l'influence possible d'autres propriétés physico-chimiques (Lam et al. 2006).

Comme leurs caractéristiques de surface ont une influence sur l'effet pro-inflammatoire des nanoparticules sphériques (Stern et al. 2008), on peut s'attendre à ce que l'incorporation de NTC dans des matériaux polymères modifie les propriétés de surface des NTC, ce qui pourrait modifier leur toxicité sans affecter leurs propriétés spécifiques et leur potentiel pour utilisation dans des applications futures.

I.9. Conclusion

Découverts depuis plus d'une vingtaine 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.

Chapitre II :
Les microtubules

II.1. Introduction

L'existence de la cellule fut découverte en 1665 par le naturaliste anglais Robert Hook, qui leur a attribué le nom latin *cellula* qui fait référence aux petites chambres occupées par les moines dans les monastères. La formulation de la théorie cellulaire a été présentée pour la première fois en 1839 par le botaniste allemand Matthias Jakob Schleiden et l'historien allemand Theodor Schwann, elle expose que (Mazzarello 1999) :

- tous les êtres vivants sont constitués d'une ou plusieurs cellules.
- que les cellules sont les unités fondamentales de toutes les structures biologiques.
- qu'elles dérivent toujours d'autres cellules préexistantes.
- et qu'elles contiennent l'information génétique nécessaire à leur fonctionnement ainsi qu'à la transmission de l'hérédité aux générations de cellules suivantes.

Il existe deux types de cellule, tout d'abord les cellules procaryotes qui ont leur ADN dans le cytoplasme de la cellule ainsi que les cellules eucaryotes qui possèdent un noyau, compartiment séparé du reste du contenu cellulaire, qui contient l'ADN, dépendent d'un système remarquable de filaments qu'on appelle le cytosquelette (Greenwood 2018).

Le cytosquelette est un réseau filamenteux à l'intérieur d'une cellule, lui conférant ses propriétés mécaniques. Il est composé de plusieurs types de filaments les filaments d'actines (Arslan 2010), les microtubules et les filaments intermédiaires

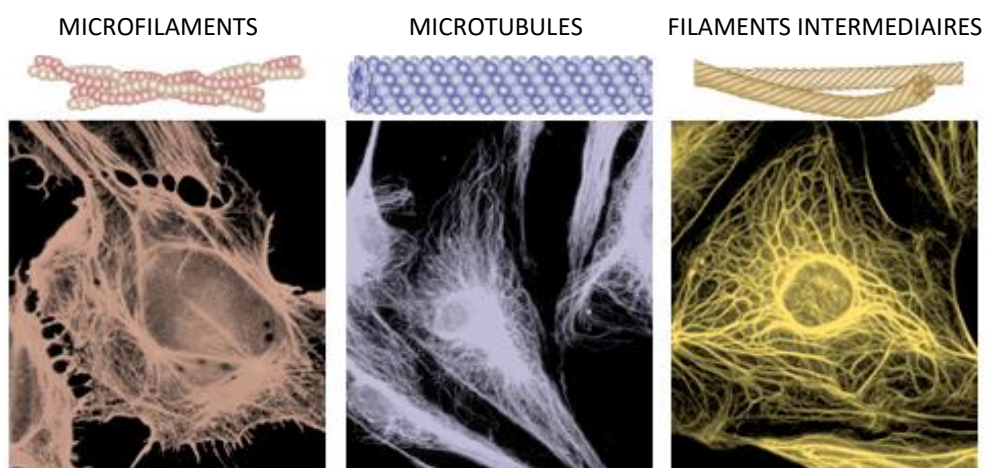


Figure II.1 : Micrographie fluorescente des filaments du cytosquelette (Arslan 2010)

Il est composé de différents réseaux fibreux identifiés en microscopie électronique par le diamètre des fibres. Il s'agit des microfilaments d'actine (7 nm de diamètre), des filaments intermédiaires (10 nm de diamètre) et des microtubules (25 nm de diamètre). Les microfilaments d'actine sont des polymères hélicoïdaux formés par l'assemblage de l'actine, une protéine globulaire de 43 kDa. Ils sont importants dans la contraction musculaire, la motilité cellulaire, les mécanismes d'endocytose, le mouvement d'organites ou encore le positionnement du noyau dans la levure.

A la différence des microfilaments et des microtubules, les protéines constituant les filaments intermédiaires sont extrêmement variées et dépendent du type cellulaire. Ce sont des protéines fibreuses qui forment des filaments non polarisés. On peut citer les lamines, qui servent à l'architecture de l'enveloppe nucléaire, les kératines qui forment un réseau s'ancrant dans les desmosomes et héli-desmosomes participant ainsi à l'architecture des épithélia ou encore les neurofilaments qui sont déterminants dans le calibre axonal des neurones (Hoffman et al., 1987).

Les microtubules sont des tubes creux formés par l'assemblage d'hétérodimères de tubuline α/β . Ce sont des structures hautement dynamiques qui organisent le cytoplasme, participent au transport intracellulaire, à la morphogénèse, au positionnement du noyau. En mitose les microtubules forment le fuseau mitotique, appareil servant à ségréger fidèlement le matériel génétique (Caudron 2007).

II.2. Les microtubules

II.2.1. Découverte des microtubules

Il y'a plus de 70 ans que l'étude des polymères du cytosquelette fut entamée (Fischer and Fowler, 2015). Ainsi la découverte des MTs date d'il y a plus de 50 ans. En 1963, le terme « microtubule » a été utilisé pour la première fois, cependant leur structure dans toutes les cellules n'a pas été observée, en raison des méthodes de fixation utilisées (Henrie 2017). L'utilisation du glutaraldéhyde comme fixateur a permis d'identifier les MTs comme une structure du cytosquelette ubiquitaire en 1965 (Borisy et al., 2016). La tubuline a été identifiée par la suite, grâce aux travaux portant sur la mitose (Borisy et Taylor, 1967a ; Borisy et Taylor, 1967b). Et c'est en 1980 que le mécanisme physico-chimique de l'assemblage des MTs a été découvert (Fischer and Fowler, 2015 ; Larousserie, 2016).

II.2.2. Structure des microtubules

Les microtubules sont des polymères composés de dimère alpha/béta tubuline qui apparaissent sous la forme de cylindres creux. Les tubulines α et β sont des petites protéines G (petites GTPases) de 450 acides aminés ayant chacune un site de fixation au GTP. Avant de pouvoir se polymériser en microtubules, les tubulines α et β forment un hétérodimère. Lors de cette étape, le GTP lié à la tubuline α est bloqué dans son site de liaison par la formation du dimère et ne sera ni hydrolysé ni échangé.

Ce sont ces hétérodimères de tubulines α et β qui polymérisent pour former le microtubule (Molines 2016), et qui s'assemblent longitudinalement par interaction non-covalente formant ainsi une chaîne linéaire appelée protofilament. La structure du microtubule résulte de l'interaction latérale entre plusieurs protofilaments.

In vivo, la majorité des microtubules est composée de 13 protofilaments (Conde et Càceres 2009 ; Mandelkow et al. 1986 ; Mandelkow et Mandelkow 1994 ; Sept et al. 2003) mais ce nombre peut varier de 9 à 16 in vitro (Pampaloni et Florin 2008, Chrétien et Wade 1991). Le microtubule possède une structure hélicoïdale qui résulte d'un léger décalage longitudinal de 0.92 nm entre les protofilaments (Chrétien et Wade 1991 ; Chrétien et Fuller 2000 ; Hyman et al. 1995). Ainsi, si l'on suit une hélice de monomères, on se retrouve décalé longitudinalement de 3 monomères après un tour complet du microtubule.

Par conséquent, au minimum trois hélices de monomères sont nécessaires afin de maintenir et d'assurer la structure du microtubule. Cette configuration avec 13 protofilaments et un pas d'hélice de 3 monomères est souvent dénotée 13 : 3 dans la littérature (Hervy 2018). Les protofilaments étant tous orientés de la même façon, le microtubule est une structure polarisée ; une extrémité expose la tubuline α des premiers dimères de la structure et l'autre expose la tubuline β des derniers dimères ajoutés. L'extrémité exposant la tubuline β est aussi appelée extrémité (+) et celle exposant la tubuline α extrémité (-) (Molines 2016).

Les microtubules sont stabilisés par des liens longitudinaux et latéraux non-covalents entre les sous-unités α / β -tubulines (Kononova *et al.*, 2015). Les microtubules sont principalement organisés en « *lattice B* », c'est-à-dire une structure dans laquelle les sous unités les plus proches entre deux protofilaments adjacents sont identiques (α -tubuline/ α - tubuline et β -tubuline/ β -tubuline) (Song

et Mandelkow, 1993). Néanmoins, au niveau du sillon qui résulte du rapprochement des protofilaments externes du feuillet lors de la formation du tube, les MTs adoptent une conformation en « *lattice A* » dans laquelle les sous-unités voisines entre les protofilaments adjacents sont différentes (α -tubuline/ β -tubuline et β -tubuline/ α -tubuline).

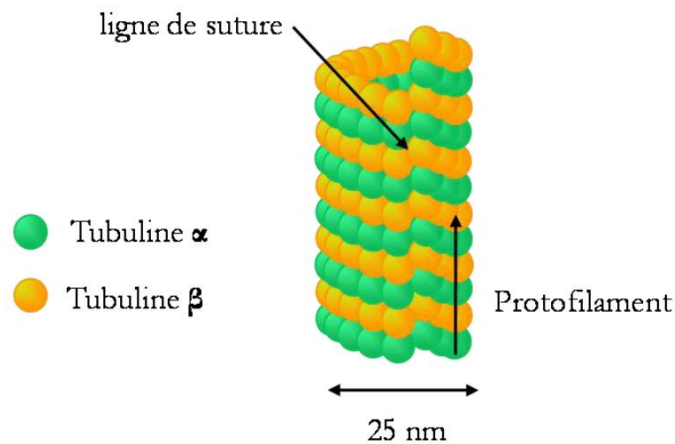


Figure II.2 : Structure des microtubules. Les hétérodimères de tubuline α et β s'associent entre eux pour former les protofilaments. 13 protofilaments interagissent latéralement pour former un tube creux de 25 nm appelé microtubule. Ce MT présente une irrégularité dans l'arrangement des dimères au niveau de la ligne de suture (Windscheid 2008).

II.2.3. L'assemblage des microtubules in vitro

Les hétérodimères de tubuline α et β sont capables de s'auto-assembler in vitro sous certaines conditions : en présence d'une concentration suffisante de tubuline pure dite « concentration critique », de molécules de GTP, de magnésium et d'une température supérieure à 20°C. Cet assemblage se déroule en différentes étapes : nucléation, élongation et désassemblage.

- **Nucléation**

Lors de la nucléation, les hétérodimères de tubuline s'associent entre eux. Deux hypothèses sont proposées pour expliquer cette nucléation. - Soit les dimères de tubuline forment des protofilaments qui interagissent latéralement pour constituer les MTs (Flyvbjerg et al., 1996 ; Figure II.3A). - Soit la nucléation des MTs a lieu en deux étapes avec la formation de complexes intermédiaires (Caudron et al., 2002 ; Job et al., 2003 ; Figure II.3B). Ces complexes contiendraient un nombre limité de dimères et sont appelés pour cela oligomères de tubuline. Certains dimères ne sont

pas complexés au sein des oligomères et restent disponibles. Ces oligomères constituent un noyau actif sur lequel les dimères de tubuline libres vont s'associer pour former des feuillets de tubuline qui aboutiront enfin à la constitution des MTs (Figure II.3).

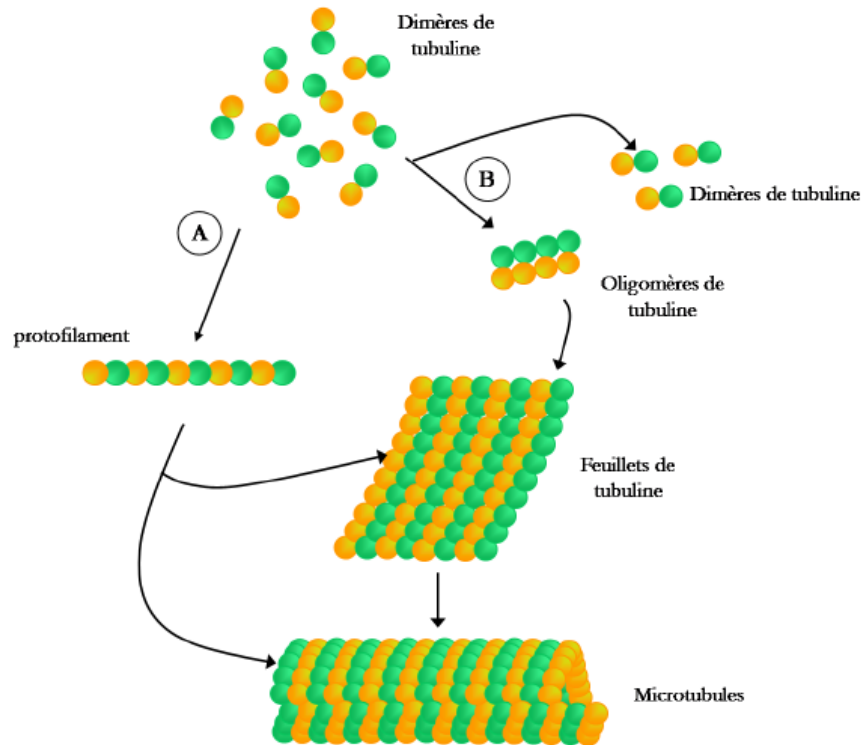


Figure II.3 : Modèle de la nucléation des microtubules in vitro. La nucléation est l'étape de formation des MTs. Différents modèles ont été proposés : en A/, les MTs se forment à partir d'un arrangement régulier d'hétérodimère de tubuline appelé protofilament. En B/, les MTs se forment à partir des oligomères de tubuline qui forme un noyau sur lequel les dimères de tubuline libres vont s'ajouter. D'après Job et al., 2003.

- **Elongation**

Les MTs vont ensuite polymériser par addition d'hétérodimères de tubuline-GTP aux extrémités du MT. Au cours de cette étape, la molécule de GTP associée à la tubuline β est hydrolysée (Hyman et al., 1992). La conséquence de l'hydrolyse du GTP est le désassemblage des MTs. Le MT s'allonge alors quand la vitesse

d'addition de la tubuline-GTP sur une des extrémités est plus rapide que la vitesse d'hydrolyse du GTP.

- **Désassemblage**

Le désassemblage se produit spontanément après l'hydrolyse du GTP. Des dimères de tubuline sont alors libérés. Une dilution de la tubuline, une exposition au froid, un ajout de calcium dans la solution ou une incubation avec des drogues anti-microtubulaire comme la colchicine (alcaloïde se fixant lentement et irréversiblement aux dimères de tubuline, causant ainsi le désassemblage des MTs) ou le nocodazole (substance inhibitrice de la polymérisation des MTs) entraîne le désassemblage des MTs en tubuline-GDP au niveau de leur extrémité.

II.2.4. Dynamique des microtubules in vivo

Dans la cellule les microtubules sont le plus souvent nucléés à partir d'un centre organisateur des microtubules. Il s'agit des centrosomes dans les cellules des eucaryotes. Les microtubules sont nucléés à partir des corps basaux. Les bouts moins des microtubules sont ancrés dans ce centre organisateur alors que les bouts plus irradiant dans la cellule. Le bout plus est très nettement l'extrémité la plus dynamique. Ceci permet aux bouts plus des microtubules d'interagir avec leurs cibles. Par exemple, dans la cellule mitotique, les microtubules explorent le cytoplasme et peuvent contacter un kinétochore et capturer alors un chromosome. Ce type de mécanisme est très contrôlé dans la cellule. Par exemple les catastrophes dans une cellule en interphase se font le plus souvent à proximité du cortex cellulaire.

Dans ces cellules, les catastrophes se font lorsque le microtubule arrive à l'extrémité de la cellule. Ainsi, si les propriétés intrinsèques des microtubules peuvent expliquer leur comportement dans la cellule, ce comportement est régulé. Cette régulation fait intervenir les protéines associées aux microtubules (MAP) (Caudron 2007).

II.2.5. Rôles des microtubules

Les microtubules des cellules eucaryotes peuvent être classées en deux groupes généraux : les groupes axonémaux et les microtubules cytoplasmiques. Le premier groupe, les microtubules axonémales, comprend les microtubules hautement organisées et stables que l'on trouve dans des structures spécifiques associées au

mouvement cellulaire, les cils, les flagelles et le corps basal auxquels ces appendices sont fixés. La tige ou l'axone central d'un cil ou d'un flagelle se compose d'un faisceau très ordonné de microtubules axonémaux. Le deuxième groupe est le réseau dynamique de microtubules cytoplasmiques moins organisé. Le deuxième groupe de microtubules n'a été reconnu qu'au début des années 1960.

Les microtubules cytoplasmiques sont responsables de diverses fonctions. Ils maintiennent les axones, extensions des cellules nerveuses dans les cellules mammaliennes. Certaines cellules de mammifères en migration ont besoin de microtubules cytoplasmiques pour maintenir leur forme polarisée. Les microtubules cytoplasmiques forment les broches mitotiques et méiotiques qui sont essentielles au mouvement des chromosomes pendant la mitose et la méiose.

II.2.6. L'instabilité dynamique

L'instabilité dynamique a été pour la première fois décrite par Mitchison et Kirschner (1984). Ces auteurs ont observé qu'à l'état stationnaire (en concentration à l'équilibre de tubuline libre) et pour une masse de tubuline donnée, le nombre de MTs diminue dans le temps alors que leurs longueurs augmentent. Ils en ont déduit l'existence de deux phases dynamiques : une phase où une majorité de MTs vont polymériser lentement et une deuxième phase où ils vont rapidement dépolymériser.

Ce comportement d'instabilité dynamique a été par la suite directement observé par Horio et Hotami (1986), qui ont décrit des phases d'élongation et de raccourcissement aléatoires. La transition entre les phases de polymérisation et dépolymérisation est appelée catastrophe et inversement, la transition entre les phases de dépolymérisation et de polymérisation est appelée sauvetage. Les fréquences de ces événements sont différentes entre les extrémités (+) et (-) des MTs.

Les paramètres exacts conduisant à ce comportement d'instabilité dynamique sont encore mal connus et semblent aléatoires. Cependant, l'étude de Walkers et al., (1988) a mis en évidence que la dynamique des MTs est dépendante de la concentration de tubuline libre. Ils ont montré que la vitesse d'élongation aux deux extrémités du MT augmente avec la concentration de tubuline. Lorsque la concentration de tubuline augmente, on observe également une diminution des fréquences de catastrophes qui s'accompagne d'une augmentation des événements de sauvetages. Walker et al., (1988) ont également décrit *in vitro* des « pauses » dans la

dynamique des MTs sans élongation ni raccourcissement. Ces comportements de pauses des MTs semblent rares *in vitro* et de courte durée mais semblent persistants (quelques minutes) *in vivo* (Shulze et Kirschner 1988).

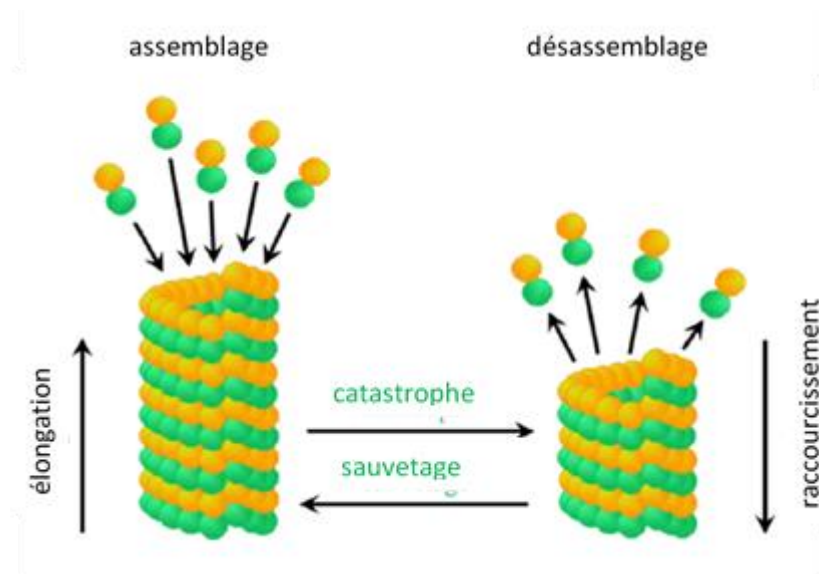


Figure II.4 : *Dynamique des microtubules (Windscheid 2008).*

In vivo l'instabilité dynamique des MTs est impliquée dans de nombreux phénomènes physiologiques, notamment le mécanisme de recherche et de capture des chromosomes lors de la division cellulaire (Mitchison and Kirschner 1984).

Ce mécanisme peut permettre également aux MTs de se réorienter dans la cellule face à un obstacle (comme un organe ou la membrane) ou encore de remodeler la structure du réseau de MTs très rapidement. L'instabilité dynamique des MTs peut être régulée par différentes protéines telles que les MAPs.

II.2.7. Propriétés mécaniques des microtubules

Les microtubules sont des biopolymères très rigides. Leur rigidité flexionnelle, définie comme leur résistance à la flexion, est comparable à celle des nanotubes de carbone (Hawkins et al., 2010). Si la tubuline était un matériau homogène et isotrope, son module d'Young serait d'environ 1,2 GPa, similaire au plastique rigide (Gittes et al., 1993).

Cependant, en raison de l'anisotropie des liaisons tubulines, les microtubules présentent à la fois une déformabilité latérale élevée et une rigidité longitudinale élevée (Sui et al, 2010; Huber et al., 2013). Cette propriété peut être observée dans

d'autres matériaux biologiques, tels que le bambou et le bois, qui sont également plus rigides longitudinalement afin d'augmenter la résistance à la rupture par des forces externes (Hawkins et al., 2010). En raison des difficultés à mesurer les propriétés mécaniques des microtubules dans les cellules vivantes, la plupart des connaissances sur la mécanique des microtubules proviennent d'expériences *in vitro*.

De nombreux groupes différents ont mesuré la rigidité de flexion des microtubules *in vitro* avec différentes techniques. La plupart des techniques exercent directement une force pour mesurer la rigidité des microtubules, par exemple en utilisant un flux, des pincettes optiques, une microscopie à force atomique ou des trajectoires de microtubules transportés par des molécules de kinésine attachées en surface (Hawkins et al., 2010;).

Les fluctuations thermiques sont utilisées comme moyen passif pour sonder la rigidité des microtubules, en s'appuyant uniquement sur une légère flexion induite par l'énergie thermique. En raison de la rigidité inhérente des microtubules, cette approche est limitée aux microtubules longs.

Étonnamment, les valeurs de rigidité trouvées par les différents groupes varient considérablement : les estimations de longueur de persistance varient de 0,03 mm à 46,8 mm (Hawkins et al., 2010). Cette variabilité est susceptible de refléter l'influence de la technique de mesure ainsi que la façon dont les microtubules sont cultivés. En effet, les propriétés mécaniques des microtubules sont influencées par un certain nombre de facteurs.

Par exemple, certaines MAP neuronales sont capables d'augmenter la rigidité des microtubules (Mickey et Howard 1995), tandis que MAP65, qui est associée à la formation et à la stabilisation du fuseau, favorise la flexibilité (Portran et al., 2013). Taxol, un médicament connu pour stabiliser les microtubules contre la dépolymérisation, rend les microtubules moins rigides (Dye et al., 1993).

Il a été démontré que même la vitesse de croissance affecte la rigidité des microtubules, les microtubules qui poussent plus vite sont plus flexibles, probablement en raison de défauts structurels dans le réseau qui sont plus susceptibles de se produire lors d'une polymérisation rapide (Kurachi et al., 1995; Janson et Dogterom 2004). Ces défauts ont été visualisés par force atomique et microscopie électronique, révélant différents types d'irrégularités du réseau

mésappariements de protofilaments, où un changement entre différents nombres de protofilaments se produit dans un microtubule (Chretien et al., 1992), dimères de tubuline manquants, correspondant à des défauts ponctuels dans un réseau par ailleurs parfait, et des séparations entre les protofilaments voisins (Schaap et al., 2004). La fréquence d'apparition de ces défauts est largement inconnue ; seules les transitions de protofilaments ont été caractérisées à cet égard.

Fait intéressant, les microtubules présentent une rigidité dépendante de la longueur ; les filaments courts sont plus flexibles que les plus longs (Pampaloni et al., 2006; Taute et al., 2008). La raison de cette observation n'est pas claire, mais a été liée à l'anisotropie des liaisons tubulines.

Les microtubules peuvent être déformés latéralement, comme le montre une étude utilisant un appauvrissant pour exercer une pression osmotique (Needleman et al., 2005), mettant en évidence la flexibilité des liaisons latérales. Une indentation ponctuelle avec la microscopie à force atomique a révélé que les microtubules peuvent se déformer élastiquement jusqu'à 15% de déformation latérale, avant l'effondrement du réseau (Schaap 2006). Prises ensemble, ces observations suggèrent que les microtubules sont des structures intrinsèquement diverses et adaptables.

II.3. Conclusion

Les microtubules constituent l'un des éléments essentiels du cytosquelette et donc du fonctionnement de la cellule eucaryote. Suite aux informations recueillies ci-dessus telle que leurs structure leur dynamique leur propriété... ; il semble très intéressant de les étudier de plus près et c'est ce qu'on verra dans les chapitres à suivre.

Chapitre III :

*Etude bibliographique sur les
méthodes de monocouches
équivalentes*

III.1. Introduction

Afin de résoudre les problèmes des structures dans le domaine élastique, il est nécessaire de bien choisir la bonne théorie décrivant correctement le comportement statique et dynamique de la structure ainsi que la méthode de résolution à appliquer.

Nous présentons dans ce chapitre une revue sur les modèles analytique existant dans la littérature.

III.2. Les modèles analytiques des monocouches équivalentes

Il existe trois modèles analytiques des monocouches équivalentes (Equivalent Single Layer) à savoir la méthode classique qui néglige l'effet de déformation de cisaillement transverse, la théorie de déformation de cisaillement de premier ordre (FSDT) et la méthode de déformation de cisaillement d'ordre élevé (HSDT). Dans ce qui suit les différents modèles ESL seront présenté en détails.

III.2.1. Le modèle d'Euler Bernoulli (EBT)

Ce premier modèle néglige l'effet de la déformation de cisaillement transverse et il est basé sur les hypothèses d'Euler-Bernoulli des contraintes planes. Plusieurs chercheurs ont examiné les comportements des différentes structures dans le domaine élastique en se basant sur ce premier modèle d'Euler-Bernoulli.

III.2.1.1 Hypothèses de base (EBT)

- La section plane et perpendiculaire à l'axe neutre avant déformation reste plane et perpendiculaire à l'axe neutre après déformation (Figure III.1).
- Les normales ne changent pas de longueur.

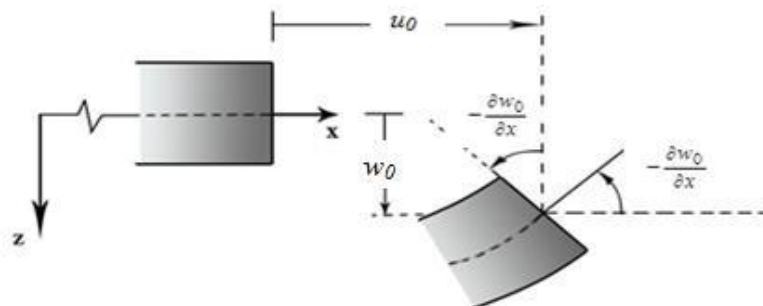


Figure III.1 : Déformation selon le modèle Euler-Bernoulli.

III.2.1.2 Cinématique et déformation (EBT)

En se basant sur les hypothèses précédentes (Euler-Bernoulli), le champ de déplacement de la théorie classiques est exprimé par :

$$u(x, z) = u_0(x) - z \frac{\partial w_0}{\partial x}, \quad (\text{III.1a})$$

$$w(x, z) = w_0(x), \quad (\text{III.1b})$$

Avec (u_0, w_0) sont les composantes du champ de déplacement sur le plan moyen.

Le champ de déformation associé au champ de déplacement de la théorie classique (EBT) est obtenu comme suit

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x^0 + z k_x^b, \quad \gamma_{xz} = 0 \quad (\text{III.2a})$$

Avec :

$$\varepsilon_x^0 = \frac{\partial u_0}{\partial x}, \quad k_x^b = -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \quad (\text{III.2b})$$

Quelques chercheurs ont utilisé la théorie des poutres classique pour étudier le comportement physique nanotubes de carbone et des microtubules tel que Dihaj et al. (2018) ainsi que Rakrak et al. (2016) ont étudié la vibration libre transversale du nanotube de carbone chiral à double paroi (DWCNTs) incorporé dans le milieu élastique. Sudak (2003) a étudié les déformations axiales critiques sur des nanotubes de carbone à parois multiples, y compris l'effet de van der Waals. Ansari et al. (2013) ont étudié le flambement des SWCNTs dans un environnement thermique.

Wang et Varadan (2006), Wang et al. (2007) et Zhang et al. (2009) ont présenté un modèle non local de mécanique pour étudier les vibrations des NTC à simple et double parois. Atabakhshian et al. (2015). Zhang et al. (2005) ont dérivé des expressions explicites pour les fréquences naturelles et les rapports d'amplitude correspondants des tubes intérieurs et extérieurs pour les NTC à double paroi à simple support.

Shakouri et al. (2009), Ehteshami et Hajabasi (2011), Khosrozadeh et Hajabasi (2012) et Fang et al. (2013) ont étudié les vibrations des DWCNT incluant la force van der Waals. Yan et al. (2009) et Wang (2009 a, b) ont étudié l'instabilité dynamique des nanotubes de carbone à parois triples (Twcnts) transportant le fluide et ont discuté des effets de la vitesse d'écoulement et des forces de van der Waals sur

Chapitre III : Etude bibliographique sur les méthodes de monocouches équivalentes

les instabilités. Zhen et al. (2011) et Atabakhshian et al. (2013) ont étudié les vibrations et l'instabilité du fluide transportant les DWCNT enfouis dans les tissus mous biologiques. Wang (2005), Wang et Hu (2005), Wang et al. (2006), Lu et al. (2007) et Liew et al. (2008) ont étudié la propagation des vagues dans les NTC.

Heireche et al. (2008 a,b) et Wang et al. (2012) ont étudié l'effet de la contrainte axiale initiale sur la propagation des ondes sonores des SWCNT. Li et al. (2008) ont étudié les effets sur les ondes fléchissantes se propageant dans les NTC par le milieu élastique environnant. Akgoz et Civalek ont étudié le flambement des microtubules (MT). Civalek et Demir (2011) ont développé un modèle de poutre utilisant la théorie d'élasticité non locale d'Eringen pour l'analyse de flexion des microtubules (MT).

Karimi Zeverdejani et Tadi Beni ont étudié le comportement en vibration libre des microtubules. Ghorbanpour et al. (2015) ont étudié le comportement vibratoire des microtubules (MTs) remplis de bioliquide intégrés dans le cytoplasme en tenant compte des effets de surface.

A partir des recherches déjà effectuées, on peut conclure que le modèle d'Euler Bernoulli est applicable seulement pour les structures minces élancées et surestime les résultats pour les structure courtes, semi-épaisses et épaisses, pour cela Timoshenko a amélioré le modèle précédent en tenant compte de l'effet de cisaillement transverse.

III.2.2. Le modèle de déformation de cisaillement de premier ordre (Timoshenko)

Ce deuxième modèle tient en considération l'effet de cisaillement transverse à l'aide de la distribution linéaire des déplacements à travers l'épaisseur (Reissner 1945 et Mindlin 1951).

III.2.2.1 Hypothèses de base de la théorie de déformation de cisaillement de 1^{er} ordre (FSDT)

- La section plane et perpendiculaire à l'axe neutre avant déformation reste plane et perpendiculaire à l'axe neutre après déformation (Figure III.2).
- Les normales ne changent pas de longueur.

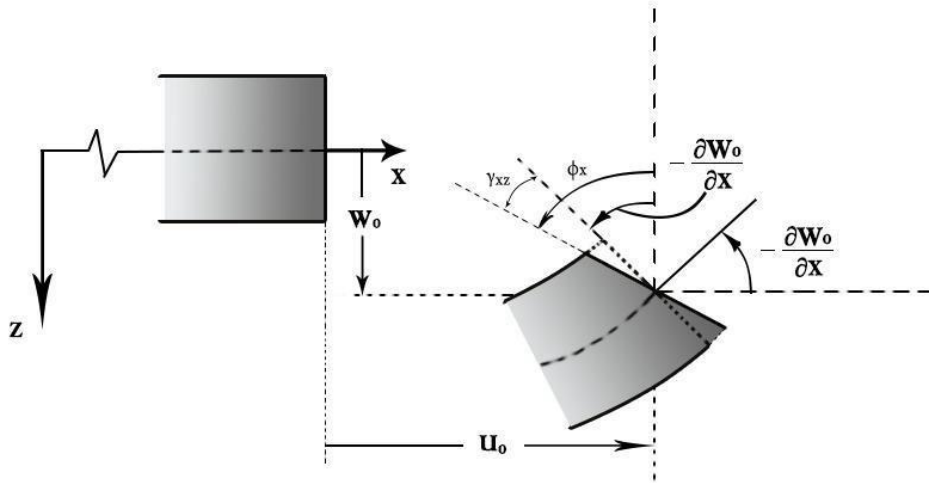


Figure III.2 : Déformation selon la théorie FSDT.

III.2.2.2 Cinématique et déformation (FSDT)

Le champ de déplacement de la théorie de déformation de cisaillement de premier ordre (FSDT) qui se base les hypothèses cité auparavant est obtenu comme suit :

$$u(x, z) = u_0(x) - z\phi_x(x), \quad (\text{III.3a})$$

$$w(x, z) = w_0(x), \quad (\text{III.3b})$$

Avec : (u_0, w_0) et (ϕ_x) sont les déplacements en membrane et la rotation autour de axe x , respectivement.

Le champ de déformation associé au champ de déplacement de la théorie de déformation de cisaillement de premier ordre (FSDT) (équation III.3) est obtenu comme suit :

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x^0 + z k_x^s, \quad \text{avec} \quad \varepsilon_x^0 = \frac{\partial u_0}{\partial x}, \quad k_x^s = -\frac{\partial \phi_x}{\partial x} \quad (\text{III.4a})$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial w_0}{\partial x} - \phi_x \quad (\text{III.4b})$$

A partir des hypothèses de la théorie de déformation de cisaillement de premier ordre (FSDT), on peut constater que les contraintes et les déformations sont

Chapitre III : Etude bibliographique sur les méthodes de monocouches équivalentes

uniformes et constantes à travers l'épaisseur (voir figure III.2). Ce qui nécessite l'introduction des facteurs de correction de cisaillement.

Il existe plusieurs facteurs de correction :

$K_s=1$: sans correction

$K_s=2/3$: pour une géométrie circulaire.

$K_s=10/9$

$K_s=5/6$: pour une géométrie rectangulaire.

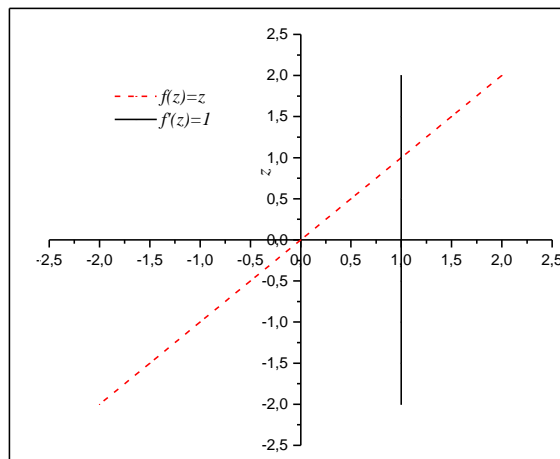


Figure III.3 : Variation de la fonction de gauchissement $f(z) = z$ et $f'(z)$ suivant l'épaisseur.

Demir et al. (2010) ont proposé une méthode de convolution discrète au singulier pour étudier les vibrations libres des nanotubes de carbone. Ansari et Ramezannezhad (2011) ont étudié les vibrations de grande amplitude des nanotubes de carbone multicolores intégrés, y compris les effets thermiques.

Ansari et al. (2011a) ont étudié le flambement thermique du SWCNT avec différentes conditions limites en utilisant la méthode de quadrature généralisée. Shen et al. (2012a-d) ont étudié les vibrations transversales du capteur micro/nano-masse à base de nanotubes avec une contrainte axiale initiale Semmah et al. (2015) ont étudié la chiralité et les effets à petite échelle sur les propriétés de flambement thermique du SWCNT. Yang et Lim (2012a) et Lim et al. (2012c) ont étudié le flambement thermique du SWCNT où la non-linéarité géométrique a été prise en compte. Tounsi

Chapitre III : Etude bibliographique sur les méthodes de monocouches équivalentes

et al. (2013b) ont étudié le flambage thermique des DWCNT, y compris les effets de la déformation transversale du cisaillement et de l'inertie rotative. Wang et Varadan (2006), Wang et al. (2007) et Zhang et al. (2009) ont présenté un modèle non local de mécanique du continuum pour étudier les vibrations des NTC à simple et double parois. Wang et al. (2013a) ont étudié les vibrations non linéaires des SWCNT imparfaits sous une charge harmonique. Dans le cadre de la thermo-élasticité, Benzair et al. (2008), Ansari et Ramezannezhad (2011) et Zidour et al. (2012) ont étudié les effets thermiques sur les vibrations des SWCNT. Pradhan et Mandal (2013) ont étudié les effets thermiques sur la réponse des NTC.

Ece et Aydogdu (2007), Murmu et Adhikari (2012b) et Kiani (2013b) ont étudié les vibrations transversales des CNT à double paroi sous des charges axiales. Ke et al. (2009) et Ansari et al. (2012c) ont étudié les vibrations non linéaires des DWNT intégrés, y compris la non-linéarité géométrique de von Kármán. Wang (2005), Wang et Hu (2005), Wang et al. (2006), Lu et al. (2007) et Liew et al. (2008) ont étudié la propagation des vagues dans les NTC.

Heireche et al. (2008 a,b) et Wang et al. (2012) ont étudié l'effet de la contrainte axiale initiale sur la propagation des ondes sonores des SWCNT. Narendar et Gopalakrishnan (2009), Hu et al. (2009) et Shi et al. (2011) ont étudié la propagation des ondes des nanotubes de carbone à double paroi. Yang et al. (2011) ont pour étudier la propagation des ondes dans les DWCNT en tenant compte de l'interaction van der Waals entre les tubes intérieurs et extérieurs. Bensattalah et al. (2020) ont examiné le flambement des nanotubes de carbone à triple paroi (TWCNT) zigzag sous compression axiale avec à la fois chiralité et des effets à petite échelle.

Chemi et al. (2015) ont étudié le flambement des nanotubes de carbone à double paroi chirale (DWCNT) sous compression axiale. Shi et al. (2008) ont étudié les effets du cisaillement transverse dû au faible module de cisaillement des microtubules sont étudiés à l'aide d'un modèle de poutre de Timoshenko.

Heireche et al. (2010) ont examiné, les caractéristiques de vibration des microtubules de protéines (MT) sont examinées en utilisant l'approche de propagation des ondes. Ghorbanpour et al. (2015) ont étudié le comportement vibratoire des microtubules (MT) remplis de bioliquide intégrés dans le cytoplasme

Chapitre III : Etude bibliographique sur les méthodes de monocouches équivalentes

en tenant compte des effets de surface. Imani Aria, A., & Biglari (2017) ont analysé la stabilité de la vibration des microtubules en se basant sur la théorie de déformation non locale. Afin d'éviter d'introduire les facteurs de correction de cisaillement « K_s » à chaque fois pour la correction des contraintes de cisaillement au surfaces libres de la structure, plusieurs chercheurs scientifiques proposent des théories de déformation de cisaillement d'ordre supérieur (HSDT).

III.2.3. La théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé (HSDT)

La théorie d'ordre élevé (HSDT) est basée sur une distribution non linéaire des champs à travers l'épaisseur. Par conséquent, on tient compte des effets de la déformation transversale de cisaillement.

Ces modèles n'exigent pas des facteurs de correction de cisaillement. La théorie d'ordre élevé (HSDT) peut se trouvées dans les travaux tels que Tounsi et al. (2010) qui ont rapporté la rigidité en flexion dépendante de la longueur et le module de Young des microtubules. Akgöz et Civalek (2014) ont étudié les réponses mécaniques des microtubules isolés et Huang et al. (2013) ont étudié le comportement des ondes voyageant en CNT dans un espace libre et intégrées dans une matrice élastique.

III.2.3.1. Hypothèses de base (HSDT)

- La section plane et perpendiculaire à l'axe neutre avant déformation perte sa perpendicularité et sa planéité après déformation (Figure III.4).
- Les normales ne changent pas de longueur.

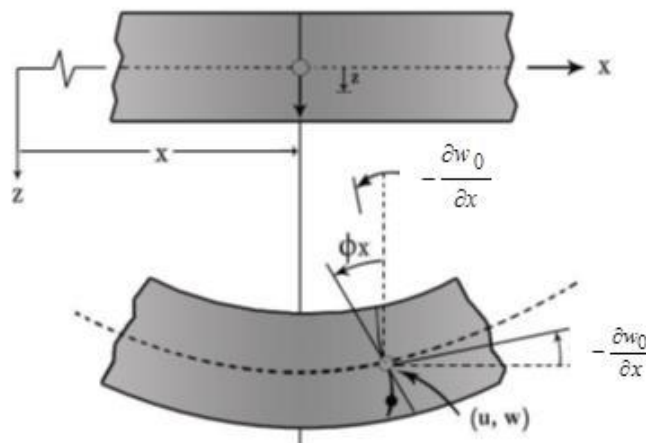


Figure III.4 : Déformation selon la théorie HSDT.

Chapitre III : Etude bibliographique sur les méthodes de monocouches équivalentes

III.2.3.2 Cinématique et déformation (HSDT)

Le champ de déplacement de la théorie de déformation de cisaillement d'ordre élevé (HSDT) qui se base des hypothèses citées auparavant est obtenu comme suit :

$$u(x, z) = u_0(x) - z \frac{\partial w_0}{\partial x} + f(z) \phi_x(x) \quad (\text{III.5a})$$

$$w(x, z) = w_0(x) \quad (\text{III.5b})$$

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

Le champ de déformation associé au champ de déplacement de la théorie de déformation de cisaillement d'ordre élevé HSDT (l'équation III.5) est obtenu comme suit :

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x^0 + z k_x^b + f(z) k_x^s, \quad (\text{III.6a})$$

$$\gamma_{xz} = g(z) \gamma_{xz}^0,$$

Où

$$\varepsilon_x^0 = \frac{\partial u_0}{\partial x}, \quad k_x^b = -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}, \quad (\text{III.6b})$$

$$k_x^s = \frac{\partial \phi_x}{\partial x}, \quad \gamma_{xz}^0 = \phi_x,$$

Et

$$g(z) = \frac{df(z)}{dz} \quad (\text{III.6c})$$

Plusieurs modèles de fonction de gauchissement ont été proposés tels que :

Chapitre III : Etude bibliographique sur les méthodes de monocouches équivalentes

- Fonctions polynomiales

Ambartsumain (1960)

$$f(z) = \frac{h^2}{8} z - \frac{z^3}{6}$$

Kaczkowski (1968), Panc (1975) and Reissner (1975) (KPR)

$$f(z) = \frac{5z}{4} - \frac{5z^3}{3h^2}$$

Levinson (1980), Murthy (1981) and Reddy (1984) (LMR)

$$f(z) = z - \frac{4z^3}{3h^2}$$

Nguyen-Xuan (2013)

$$f(z) = \frac{7z}{8} - \frac{2z^3}{h^2} + \frac{2z^5}{h^4}$$

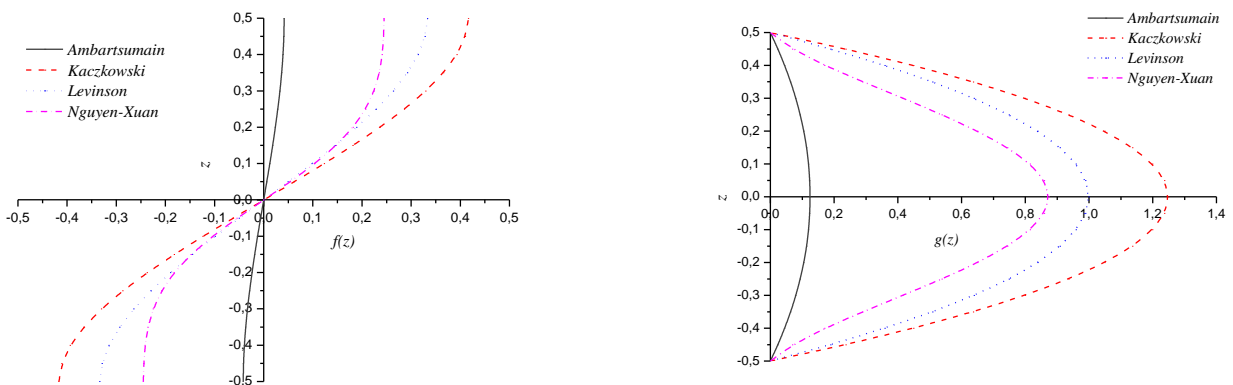


Figure III.5 : Variation de la fonction de gauchissement $f(z)$ et sa première dérivée des différents modèles des fonctions polynomiales.

Chapitre III : Etude bibliographique sur les méthodes de monocouches équivalentes

- Fonctions trigonométriques

Levy (1877), Stein (1986) and Touratier (1991) (LST)

$$f(z) = \frac{n}{\pi} \sin\left(\frac{\pi z}{h}\right)$$

Arya (2002)

$$f(z) = \sin\left(\frac{\pi z}{h}\right)$$

Mantari1 (2012)

$$f(z) = \tan(mz) - mz \sec^2 \frac{mh}{2}; m = \frac{1}{5h}$$

Mantari2 (2012)

$$f(z) = \tan(mz) - mz \sec^2 \frac{mh}{2}; m = \frac{\pi}{2h}$$

Grover2 (2013)

$$f(z) = z \sec\left(\frac{rz}{h}\right) - z \sec\left(\frac{r}{2}\right) \left[1 + \frac{r}{2} \tan \frac{r}{2}\right]; r = 0.1$$

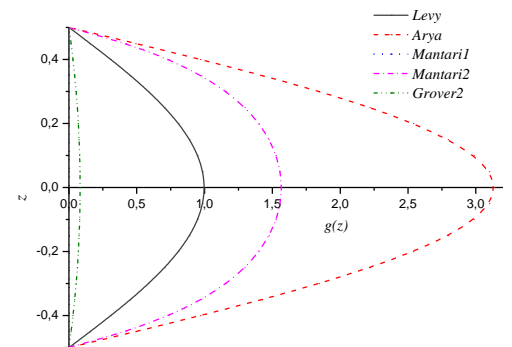
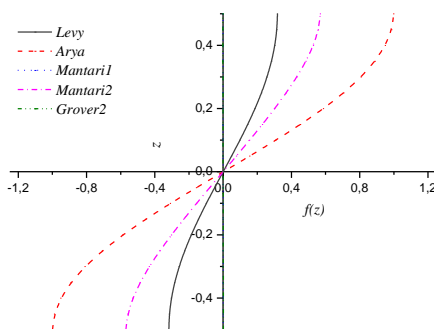


Figure III.6 : Variation de la fonction de gauchissement $f(z)$ et sa première dérivée des différents modèles des fonctions trigonométriques.

Chapitre III : Etude bibliographique sur les méthodes de monocouches équivalentes

- Fonctions hyperboliques

Soldatos (1992)

$$f(z) = h \sinh\left(\frac{z}{h}\right) - z \cosh\left(\frac{1}{2}\right)$$

Meiche (2011)

$$f(z) = \frac{\frac{h}{\pi} \sinh\left(\frac{\pi z}{h}\right) - z}{\cosh\left(\frac{\pi}{2}\right) - 1} - z$$

Akavci2 (2008)

$$f(z) = z \operatorname{sech}\left(\frac{\pi z^2}{h^2}\right) - z \operatorname{sech}\left(\frac{\pi}{4}\right) \left[1 - \frac{\pi}{2} \tanh\left(\frac{\pi}{4}\right)\right]$$

Mahi (2015)

$$f(z) = \frac{h}{2} \tanh\left(\frac{2z}{h}\right) - \frac{4}{3 \cosh^2(1)} \frac{z^3}{h^2}$$

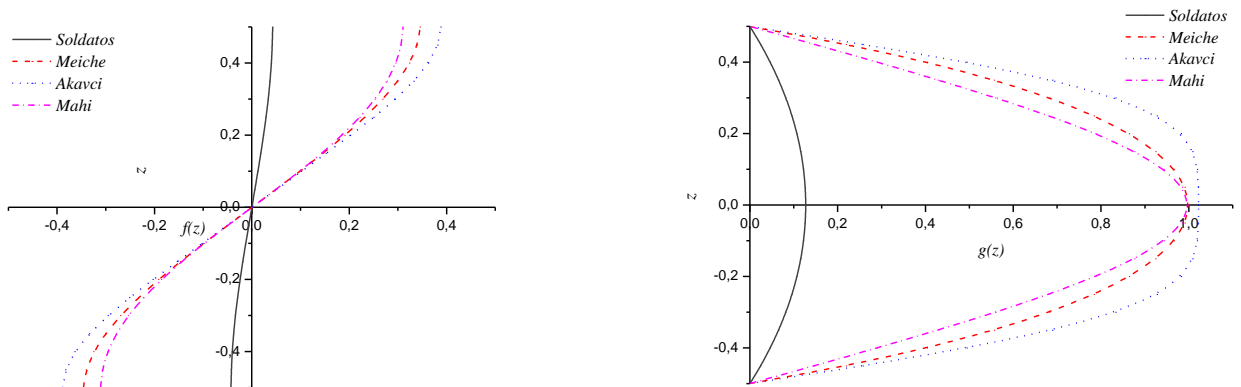


Figure III.7 : Variation de la fonction de gauchissement $f(z)$ et sa première dérivée $g(z)$ des différents modèles des fonctions hyperboliques.

Chapitre III : Etude bibliographique sur les méthodes de monocouches équivalentes

- Fonctions exponentielles

Karama (2003)

$$f(z) = z \times e^{-2\left(\frac{z}{h}\right)^2}$$

Aydogdu (2009)

$$f(z) = z \times 3^{\frac{-2\left(\frac{z}{h}\right)^2}{\log 3}}$$

Mantari3 (2011)

$$f(z) = z \times 2.85^{-2\left(\frac{z}{h}\right)^2} + 0.028z$$

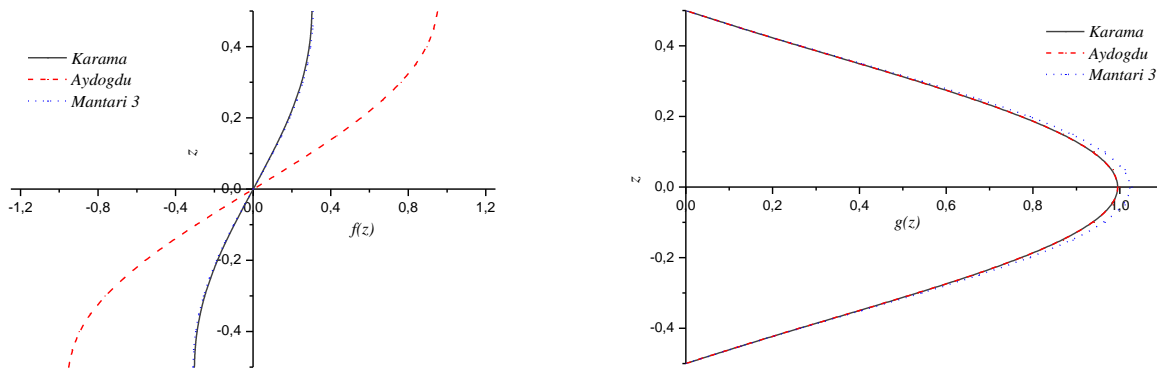


Figure III.8 : Variation de la fonction de gauchissement $f(z)$ et sa première dérivée des différents modèles des fonctions exponentielles.

III.3. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté une revue bibliographique sur les différents modèles analytique des monocouches équivalentes existante dans la littérature, ces hypothèses, leurs champs de déplacement et leurs déformations.

A travers notre lecture de la littérature en matière de théories d'ordre élevé, il apparaît que celles-ci sont certes intéressantes du point de vue précision, mais demeurent néanmoins coûteuses en temps de calcul et assez complexes en termes de formulations.

Chapitre IV :

***Etude de la stabilité des
nanotubes de carbone et de
nitrure de bore en utilisant
une nouvelle I-FSDT***

Chapitre IV : Etude de la stabilité des nanotubes de carbone et de nitrure de bore en utilisant une nouvelle I-FSDT

IV.1. Introduction

Ce chapitre présente l'étude de la stabilité thermique des nitrure de bore et de nanotube de carbone mono paroi en utilisant une nouvelle théorie de déformation de cisaillement de premier ordre intégrale. Les équations non locales d'équilibre sont dérivées par le principe des travaux virtuel et la théorie non locale d'Engin. La résolution du problème est effectuée à l'aide de la solution du Navier. L'exactitude du présent modèle est vérifiée en comparant les résultats avec ceux trouvées dans la littérature.

IV.2. Etude de la stabilité thermique des SWBNNTs et SWCNTs

IV.2.1. Propriétés mécaniques des SWCNTs et SWBNNTs

La modélisation de la structure des SWCNTs et SWBNNTs est supposée comme une poutre circulaire creuse avec une longueur L , une épaisseur équivalente h , et un diamètre moyen D (figure IV.1).

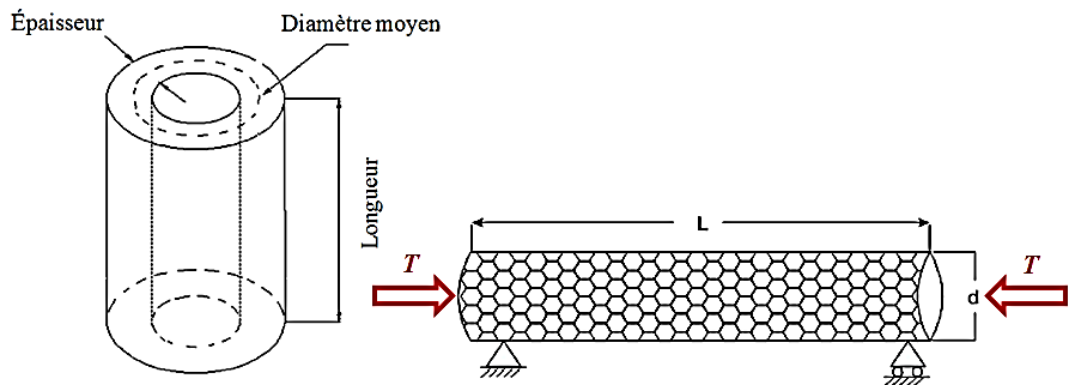


Figure IV.1 : Géométrie d'un nanotube de carbone soumis à un chargement thermique.

Les propriétés des matériaux utilisées (SWCNT et SWBNNT) telles que le module de Young E , la dilatation thermique α_x , le coefficient de Poisson ν , le diamètre D et l'épaisseur e sont résumées dans le tableau IV.1. (Benzair et al. 2013 et Hadj Elmerabet et al. 2017).

Tableau IV.1. Propriétés des SWCNTs et SWBNNTs utilisées					
Propriétés	E (TPa)	α_x (K^{-1})	ν	D (nm)	e (nm)
Carbone	1	$1.1 \cdot 10^{-6}$	0.19	0.7	0.35
Nitrure de bore	1.8	$1.2 \cdot 10^{-6}$	0.34	0.5	0.075

Chapitre IV : Etude de la stabilité des nanotubes de carbone et de nitrure de bore en utilisant une nouvelle I-FSDT

IV.2.2. Champ de déplacement I-FSDT

Dans le présent travail les hypothèses de la théorie des poutres de déformation de cisaillement du premier ordre conventionnelle sont conservées et modifiées afin de réduire le nombre de variable inconnue. Le modèle FSDT conventionnelle est donné sous la forme suivante :

$$u(x, z) = u_0(x) - z \frac{\partial w_0(x)}{\partial x} + z \varphi_x(x) \quad (\text{IV.1a})$$

$$w(x, z) = w_0(x) \quad (\text{IV.1b})$$

Tel que u_0, w_0 et φ_x sont les trois variables inconnus.

Après simplification en éliminant le déplacement membranaire u_0 et en remplaçant $\varphi_x = \int \theta dx$, le champ de déplacement de la présente théorie avec seulement deux variables prend la forme suivante :

$$u(x, z) = -zk_1 \int \theta dx \quad (\text{IV.2a})$$

$$w(x, z) = w_0(x) \quad (\text{IV.2b})$$

$$\text{Avec } \int \theta dx = A \frac{\partial w_0}{\partial x}.$$

Les déformations non nulles associées aux déplacements dans l'équation (2) sont obtenues comme suit :

$$\varepsilon_x = -zk_1 \theta \quad \text{et} \quad \gamma_{xz} = -k_1 \int \theta dx + \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (\text{IV.3})$$

Où ε_x est la déformation axiale et γ_{xz} la déformation de cisaillement.

IV.2.3. Relations constitutives

Dans le travail actuel la théorie d'élasticité non locale d'Eringen (1983) est considérée. Ce modèle (Boumia *et al.* 2014 ; Tounsi *et al.* 2013 ; Semmah *et al.* 2014, Zidour *et al.* 2014) suppose que la contrainte à un point de référence est en fonction du champ de déformation à chaque point du corps. Eringen (1983) a proposé une forme différentielle de la relation constitutive non locale comme :

Chapitre IV : Etude de la stabilité des nanotubes de carbone et de nitrure de bore en utilisant une nouvelle I-FSDT

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

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

Où σ_x , τ_{xz} et $\mu = (e_0 a)^2$ sont la contrainte axiale, la contrainte de cisaillement et le paramètre non local, respectivement e_0 est une constante appropriée à chaque matériau et a est une longueur caractéristique interne.

IV.2.4. Les équations non locales d'équilibre

Le principe des travaux virtuels est utilisé ici pour déterminer les équations d'équilibre associées au champ de déplacement du présent modèle. Le principe est exprimé sous la forme analytique suivante (Belabed et al., 2014; Bourada et al., 2015; Ait Yahia et al., 2015; Bourada et al., 2016):

$$\delta U + \delta V = 0 \quad (\text{IV.5})$$

Où δU est l'énergie de déformation virtuelle associée à l'équation (2a) :

$$\begin{aligned} \delta U &= \int_0^L \int_A (\sigma_x \delta \varepsilon_x + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz}) dA dx \\ &= \int_0^L \left(-M \delta k_1 \theta - Q k_1 A \frac{\delta \theta}{\partial x} + Q \frac{\delta w_0}{\partial x} \right) dx \end{aligned} \quad (\text{IV.6})$$

Où M_b et Q sont les contraintes résultantes définies comme :

$$M = \int_A z \sigma_x dA \quad \text{et} \quad Q = \int_A \tau_{xz} dA \quad (\text{IV.7})$$

Et δV le travail dues à la charge externe appliquée à la poutre exprimé par :

$$\delta V = - \int_0^L N_0 \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\delta \partial w_0}{\partial x} dx \quad (\text{IV.8})$$

Où N_0 est la charge axiale.

En substituant les expressions de l'énergie de déformation virtuelle δU de l'équation (6) et travail dues à la charge externe appliquée à la poutre δV de l'équation (8) dans le principe des travaux virtuels de l'équation (5) et en intégrant

Chapitre IV : Etude de la stabilité des nanotubes de carbone et de nitrure de bore en utilisant une nouvelle I-FSDT

par parties, et en collectant les coefficients de, δw_0 et, $\delta \theta$. Les équations d'équilibres de la théorie des poutres proposée sont obtenues comme suit :

$$\delta w_0 : -\frac{\partial Q}{\partial x} + N_0 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} = 0 \quad (IV.9a)$$

$$\delta \theta : -k_1 M + k_1 A \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (IV.9b)$$

Les contraintes résultantes non locales sont obtenues en remplaçant l'équation (3) dans l'équation (4) et les résultats ultérieurs dans l'équation (7) comme suit :

$$M - \mu \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} = -Dk_1 \theta \quad (IV.10a)$$

$$Q - \frac{d^2 Q}{dx^2} = A_s \left(-k_1 A \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \right) \quad (IV.10b)$$

Où

$$D = \int_A z^2 E dA, \quad A_s = K_s \int_A G dA \quad (IV.11)$$

Et K_s est le facteur de correction de cisaillement.

Les équations non locales d'équilibre exprimées en termes de déplacements (w_0 et θ) sont déterminées en remplaçant l'équation (10) dans l'équation (9) comme :

$$A_s \left(k_1 A \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \right) + N_0 \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} - \mu \frac{d^4 w_0}{dx^4} \right) = 0 \quad (IV.12a)$$

$$k_1^2 D \theta + k_1 A A_s \left(k_1 A \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial w_0^2}{\partial x^2} \right) = 0 \quad (IV.12b)$$

Les équations d'équilibre de la théorie des poutres locales peuvent être obtenues à partir de l'Eq. (12) en mettant le paramètre d'échelle μ égal zéro ($\mu = 0$).

Pour le modèle actuel, les équations non locales de flambement de SWCNT et SWBNNT en tenant compte des effets thermiques peuvent être réécrites comme :

$$A_s \left(k_1 A \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \right) + N_{th} \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} - \mu \frac{d^4 w_0}{dx^4} \right) = 0 \quad (IV.13a)$$

Chapitre IV : Etude de la stabilité des nanotubes de carbone et de nitrure de bore en utilisant une nouvelle I-FSDT

$$k_1^2 D \theta + k_1 A' A_s \left(k_1 A' \frac{\partial \theta^2}{\partial x^2} + \frac{\partial w^2}{\partial x^2} \right) = 0 \quad (\text{IV.13b})$$

La charge axiale thermique peut être exprimée comme :

$$N_{th} = \frac{EA}{1-2\nu} \alpha_x T \quad (\text{IV.14})$$

Où ν et T sont le coefficient de Poisson et le changement de température, respectivement, α_x est le coefficient de dilatation thermique dans la direction de l'axe des x , supposant que seule la force axiale due au changement de température existe sur le SWCNT et SWBNNT.

IV.2.5. Solutions analytiques

Dans cette partie la procédure de Navier est utilisée pour déterminer la solution explicite de la température critique de flambement. Le SWCNT et SWBNNT sont supposé simplement appuyés aux deux extrémités, dans ce cas les déplacements (w_0 et θ) sont décrits par les fonctions harmoniques suivantes qui respectent les conditions aux limites :

$$\begin{Bmatrix} w_0 \\ \theta \end{Bmatrix} = \sum_{n=1}^{\infty} \begin{Bmatrix} W_n \sin(\beta x) \\ X_n \sin(\beta x) \end{Bmatrix} \quad (\text{IV.15})$$

Où, w_n et X_n sont des paramètres arbitraires à déterminer, et $\beta = n\pi/L$. En remplaçant les extensions de (w_0 et θ) de l'équation (15) dans l'équation (13), les solutions peuvent être obtenues à partir des équations suivantes :

$$\left(\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12} & S_{22} \end{bmatrix} - \lambda N_{th} \alpha^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} W_{bn} \\ X_{sn} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (\text{IV.16})$$

Où

$$S_{11} = -A_s \beta^2 + N_{th} (-\beta^2 - \mu \beta^4), \quad S_{12} = -k_1 A' A_s \beta^2, \quad S_{22} = -k_1^2 D - (k_1 A')^2 A_s \beta^2, \\ \lambda = 1 + \mu \beta^2 \quad (\text{IV.17})$$

Chapitre IV : Etude de la stabilité des nanotubes de carbone et de nitrure de bore en utilisant une nouvelle I-FSDT

La charge critique de flambement thermique est dérivée en mettant le déterminant de système matriciel précédent égal à zéro. La charge critique peut être obtenue comme :

$$N_{th} = \frac{S_{11}S_{22}}{\lambda\beta^2(S_{11} + S_{22})} \quad (IV.18)$$

En remplaçant la charge axiale thermique de l'équation (18) dans l'équation (14). La température critique de la théorie non locale peut être obtenue comme :

$$T_{cr} = \frac{\beta^2 K_s GI(1 - 2\nu)}{\alpha_x (1 + \mu\beta^2)(\beta^2 EI + K_s GA)} \quad (IV.19)$$

Où I représente le moment de l'aire de la section transversale.

IV.2.6. Résultats et discussions

Dans cette section, divers exemples sont présentés et discutés pour vérifier l'exactitude de la présente théorie pour la prédiction de la température critique du flambement. Les résultats issus du présent modèle seront comparés à ceux obtenus par Hadj Elmerabet et al. (2017). Pour plus de commodité, la température critique du flambement est calculée par la forme non dimensionnelle suivante :

$$P_{cr} = \alpha_x \frac{AL^2}{I} T_{cr} \quad (IV.20)$$

IV.2.7. Flambement des SWBBNTs

La figure IV.2 présente la comparaison des valeurs de la température critique adimensionnelle du flambement des SWBNNTs pour les différentes valeurs de paramètre non local ($e_0 a$) et le mode n . Les courbes trouvées montrent que les présents résultats sont en bon accord avec ceux donnés par Hadj Elmerabet et al. (2017). On peut constater aussi que l'augmentation du paramètre d'échelle ($e_0 a$) conduit à une réduction des valeurs de la température critique du flambement. Par contre ce dernier est en relation de corrélation directe avec le nombre de mode n .

Chapitre IV : Etude de la stabilité des nanotubes de carbone et de nitrure de bore en utilisant une nouvelle I-FSDT

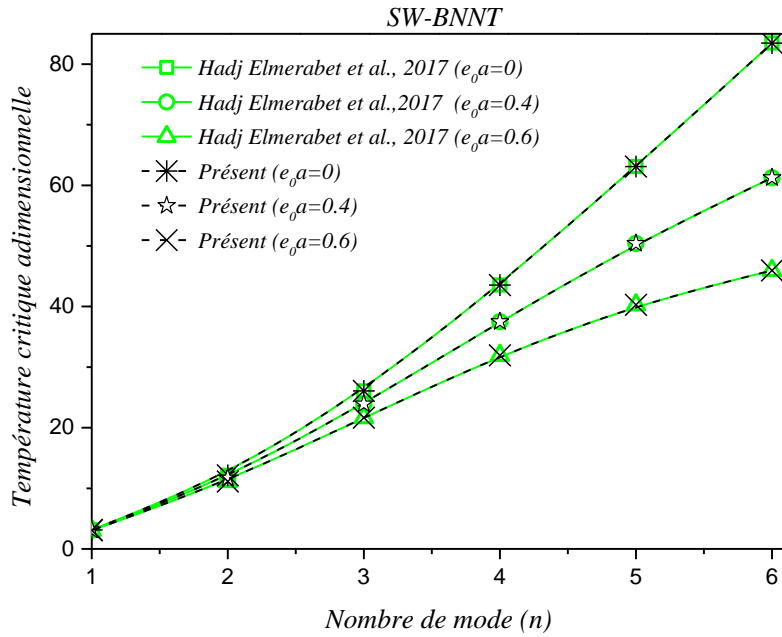


Figure IV. 2 : La température critique adimensionnelle du flambement des SWBNNTs en fonction du nombre de mode n et le paramètre (e_0a) avec $L/Dm = 20$.

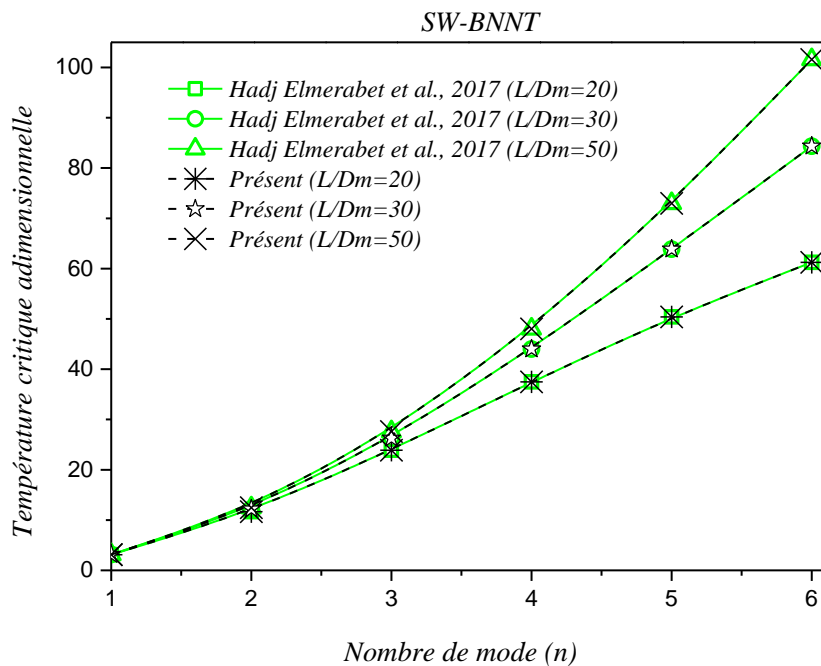


Figure IV. 3 : La température critique adimensionnelle du flambement des SWBNNTs en fonction du nombre de mode n et rapport d'élongement L/Dm avec $e_0a = 0.4 \text{ nm}$.

Chapitre IV : Etude de la stabilité des nanotubes de carbone et de nitrure de bore en utilisant une nouvelle I-FSDT

La figure IV.3 montre les valeurs de la température critique non dimensionnelle du flambement des SWBNNTs en fonction du nombre de mode n et le rapport d'élanement L/Dm . Il est clair dans la figure que les présents résultats obtenus par la nouvelle théorie de déformation de cisaillement du premier ordre intégral sont confondus avec ceux de Hadj Elmerabet et al. (2017) calculés par la théorie FSDT. Il est a noté que la température critique du flambement augmente avec l'augmentation de rapport L/Dm et le mode n . Il est remarquable que pour les plus grandes valeurs du nombre n , l'influence du rapport L/Dm sur la température critique du flambement est importante.

L'effet du paramètre non local (e_0a) et le rapport d'élanement L/Dm sur la variation de la température critique du flambement des SWBNNTs est présenté dans la figure IV.4. Les résultats trouvés par le présent modèle sont identiques à ceux de Hadj Elmerabet et al. (2017). On peut observer à partir des courbes tracées que la température critique adimensionnelle du flambement des SWBNNTs est en relation inverse avec le paramètre (e_0a). On peut remarquer aussi que pour les structures SWBNNTs élancées ($L/Dm \gg \gg$) l'effet du paramètre d'échelle (e_0a) devient négligeable.

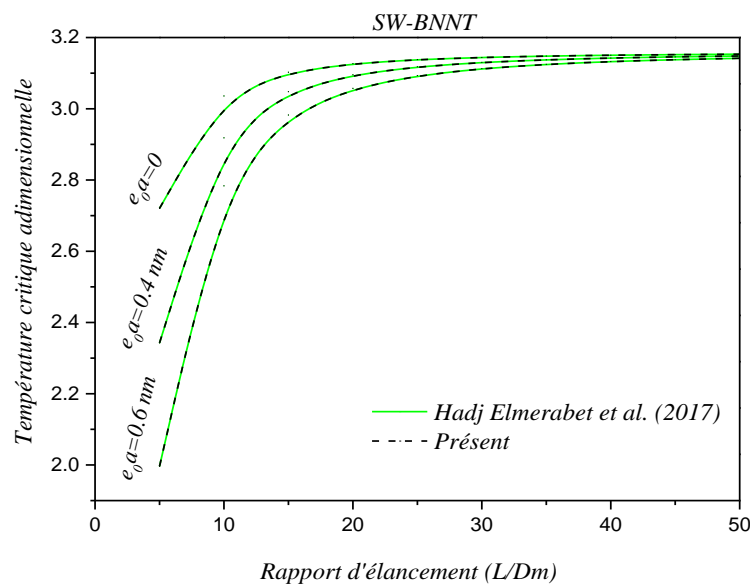


Figure IV. 4 : La température critique adimensionnelle du flambement des SWBNNTs en fonction du rapport d'élanement L/Dm et le paramètre d'échelle (e_0a) avec $n = 1$.

IV.2.8. Flambement des SWCNTs

La figure IV.5 illustre la variation du rapport de la température critique du flambement adimensionnelle ($P_{cr} / P_{cr_{EBT}}$) des nanotubes de carbone à une seule paroi en utilisant la théorie locale et non locale en fonction du mode de flambement et le rapport d'élanement L / Dm . A partir des graphes obtenus, on peut constater que la différence du rapport de la température critique du flambement adimensionnelle locale et non locale est remarquable dans les modes de flambement les plus élevés par contre cette différence est négligeable pour le premier mode de flambement.

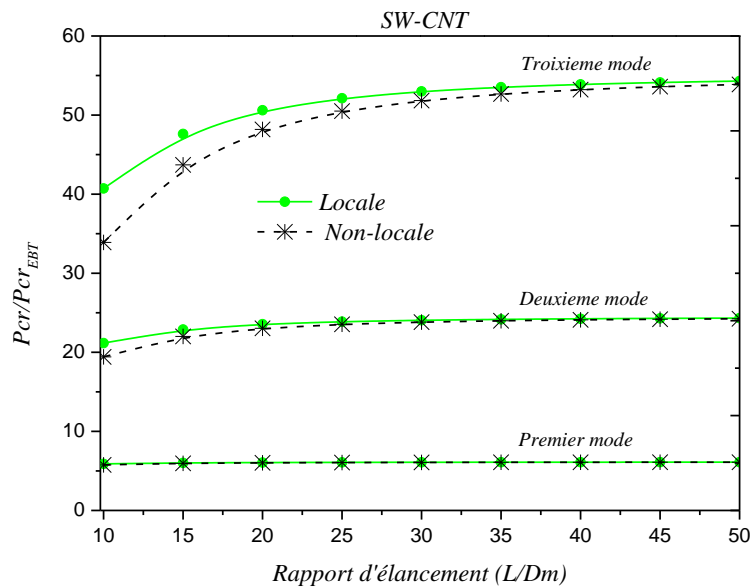


Figure IV. 5 : Le rapport de la température critique adimensionnelle du flambement ($P_{cr} / P_{cr_{EBT}}$) locale et non locale des SWCNTs en fonction du rapport d'élanement L / Dm et le mode de flambement avec $e_0a = 0.5 \text{ nm}$.

L'effet du paramètre non local (e_0a) et le rapport L / Dm sur la variation de la température critique adimensionnelle du flambement des nanotubes de carbone à une seule paroi est illustré dans la figure IV.6. On peut voir à partir des résultats trouvés que la température critique du flambement est en relation inverse avec le paramètre d'échelle (e_0a), l'effet de ce dernier sur la température critique devient moins important pour les structures SWCNTs élancées car la structure devient souple et l'effet de la déformation de cisaillement est négligé.

Chapitre IV : Etude de la stabilité des nanotubes de carbone et de nitrure de bore en utilisant une nouvelle I-FSDT

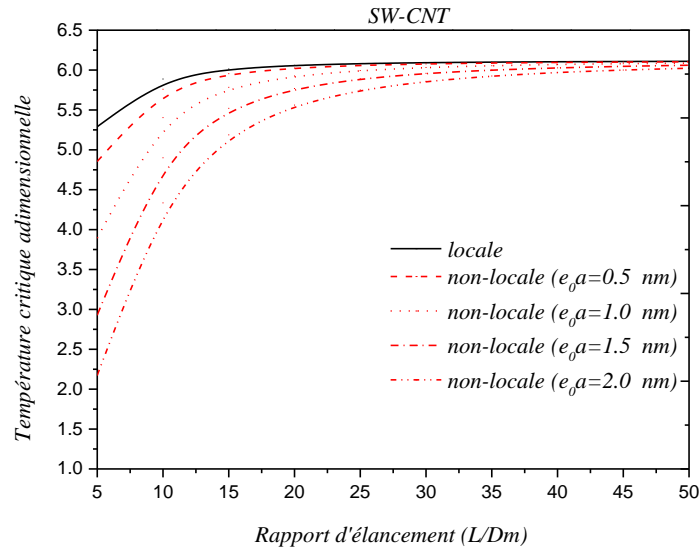


Figure IV. 6 : Comparaison de la température critique adimensionnelle du flambement local et non local des SWCNTs en fonction du rapport d'élongement L/Dm pour les différents paramètres d'échelle e_0a avec $n=1$.

La figures IV.7 présente l'effet du nombre du mode n et le rapport d'élongement L/Dm sur la variation de la température critique adimensionnelle du flambement des SWCNTs avec $e_0a = 1.5$.

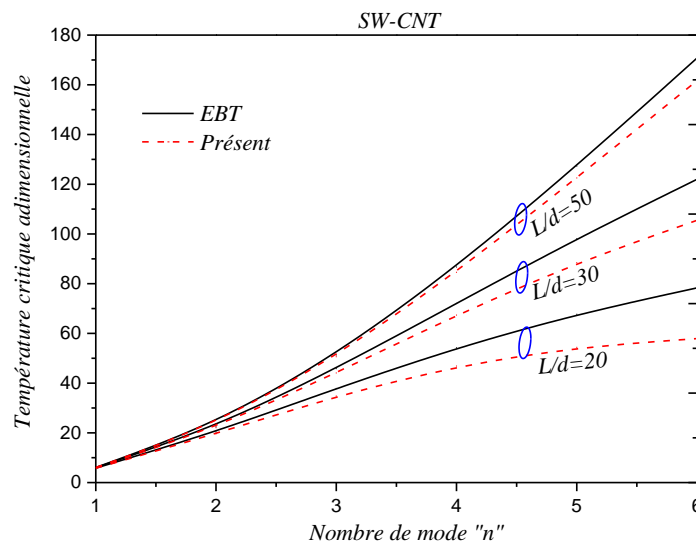


Figure IV. 7 : Comparaison de la température critique adimensionnelle non local du flambement des SWCNTs en fonction du mode n pour les différents valeurs de L/Dm avec $e_0a = 1.5nm$.

Chapitre IV : Etude de la stabilité des nanotubes de carbone et de nitrure de bore en utilisant une nouvelle I-FSDT

Une comparaison est effectuée entre les résultats trouvés en utilisant la théorie classique des poutres et la théorie de déformation de cisaillement du premier ordre intégrale. La différence des résultats des deux théories est significative pour les structures SWCNTs courtes et cela est dû à l'omission de l'effet de déformation de cisaillement transverse par la théorie classique des poutres. On peut conclure une autre fois que l'augmentation du nombre n conduit à une augmentation des valeurs de la température critique.

La figure IV.8 montre les valeurs du rapport ($P_{cr} / P_{cr_{EBT}}$) de la température critique adimensionnelle pour le premier mode de flambement en fonction du rapport L / D_m et le paramètre d'échelle $e_0 a$. Il est clair dans les résultats que le rapport température critique du flambement pour les structures élancées est presque 1 cela est due à l'omission de l'effet de déformation de cisaillement. ($P_{cr} = P_{cr_{EBT}}$). On peut remarquer aussi que le rapport des températures critique est le même pour les différentes valeurs du paramètre d'échelle $e_0 a$.

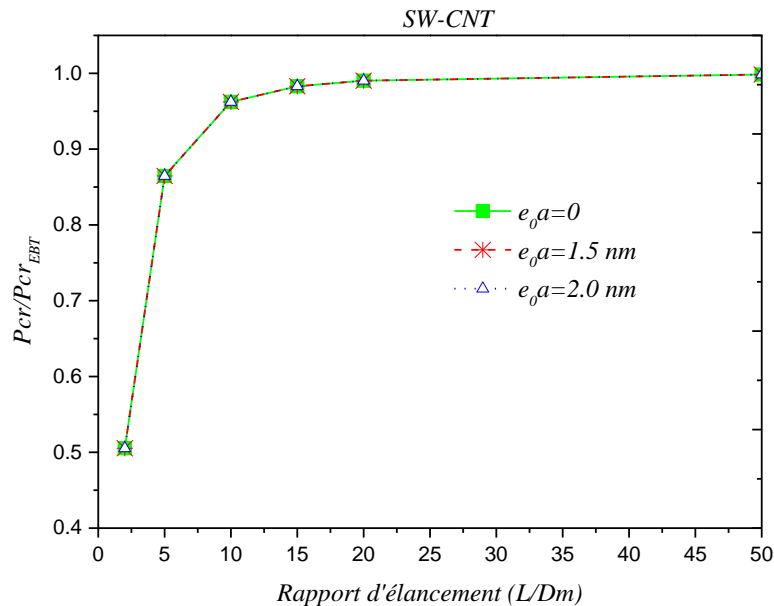


Figure IV. 8 : Le rapport de la température critique adimensionnelle du flambement ($P_{cr} / P_{cr_{EBT}}$) des SWCNTs en fonction de L / D_m et le paramètre $e_0 a$ avec $n = 1$.

Chapitre IV : Etude de la stabilité des nanotubes de carbone et de nitrure de bore en utilisant une nouvelle I-FSDT

IV.2.9. Conclusion

Dans ce travail, la température critique de flambement des SWCNTs et SWBNNTs soumis à une élévation uniforme de température est étudiée en utilisant une nouvelle théorie de poutre de déformation de cisaillement non locale du premier ordre intégral à deux variables. Une solution analytique est dérivée et une équation explicite pour la prédiction de la température critique de flambement est obtenue.

À partir des exemples examinés, on peut conclure que les effets non local d'échelle doivent être pris en compte pour les réponses de flambement thermique, en particulier pour les nombres de mode plus élevés et les SWCNTs et SWBNNTs courts. La température critique de flambement non dimensionnelle peut être modifiée par différents rapports d'élanement des SWCNTs et SWBNNTs.

Les résultats démontrés dans ce travail peuvent fournir des conseils utiles pour l'étude et la conception de la prochaine génération de nanodispositifs qui utilisent les caractéristiques du flambement thermique des SWCNTs et SWBNNT.

Chapitre V :
Analyse du comportement
statique et dynamique des
microtubules en utilisant
SVSBT

Chapitre V : Analyse du comportement statique et dynamique des microtubules en utilisant SVSBT

V.1. Introduction

Dans ce chapitre, le comportement dynamique et de la flexion des microtubules isolés est étudié. Dans le but de modéliser les microtubules selon un élément de poutre creuse, un nouveau modèle sinusoïdale de poutre à une seule variable est proposé avec la conjonction de la théorie du gradient de déformation modifiée.

V.2. La théorie modifiée du gradient de déformation d'élasticité

La théorie modifiée du gradient de déformation d'élasticité connue généralement par MSGT (Lam et al. 2003) est l'un des modèles continus d'ordre élevé les plus utilisés. Contrairement au modèle continu conventionnel, ce modèle considère un gradient de déformation d'ordre élevé avec un tenseur de déformation conventionnel dans les approches théoriques comme vecteur du gradient de dilatation, du gradient d'étirement déviatorique et des tenseurs du gradient de rotation symétriques. L'énergie de déformation pour la théorie modifiée du gradient de déformation peut être exprimée en utilisant des déformations infinitésimales (Lam et al.2003) comme :

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L \int_A \left(\sigma_{ij} \varepsilon_{ij} + p_i \gamma_i + \tau_{ijk}^{(1)} \eta_{ijk}^{(1)} + m_{ij}^s \chi_{ij}^s \right) dA dx \quad (V.1)$$

Avec $\varepsilon_{ij}, \gamma_i, \eta_{ijk}^{(1)}$ et χ_{ij}^s sont les composantes du tenseur de déformation $[\varepsilon]$, vecteur du gradient de dilatation, tenseur du gradient d'étirement déviatorique $[\eta]^{(1)}$ et le tenseur du gradient de rotation symétrique χ^s , respectivement et sont exprimées comme suit :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (V.2)$$

$$\gamma_i = \frac{\partial \varepsilon_{mm}}{\partial x_i} \quad (V.3)$$

Chapitre V : Analyse du comportement statique et dynamique des microtubules en utilisant SVSBT

$$\eta_{ijk}^{(1)} = \frac{1}{3} \left(\frac{\partial \varepsilon_{jk}}{\partial x_i} + \frac{\partial \varepsilon_{ki}}{\partial x_j} + \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial x_k} \right) - \frac{1}{15} \left[\delta_{ij} \left(\frac{\partial \varepsilon_{mm}}{\partial x_k} + 2 \frac{\partial \varepsilon_{mk}}{\partial x_m} \right) + \delta_{jk} \left(\frac{\partial \varepsilon_{mm}}{\partial x_i} + 2 \frac{\partial \varepsilon_{mi}}{\partial x_m} \right) + \delta_{ki} \left(\frac{\partial \varepsilon_{mm}}{\partial x_j} + 2 \frac{\partial \varepsilon_{mj}}{\partial x_m} \right) \right] \quad (V.4)$$

$$\theta_i = \frac{1}{2} e_{ijk} \frac{\partial u_k}{x_j} \quad (V.5)$$

$$\chi_{ij}^s = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \theta_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \theta_j}{\partial x_i} \right) \quad (V.6)$$

Où u_i présente les composantes du vecteur de déplacement u et θ_i présente les composantes du vecteur de rotation θ , aussi δ et e_{ijk} sont les symboles de Kronecker delta et de permutation, respectivement. De plus, les composantes du tenseur de contrainte de Cauchy $[\sigma]$ et des tenseurs de contrainte d'ordre supérieur p , $\tau^{(1)}$ et m^s (conjuguées respectivement par $\varepsilon_{ij}, \gamma_i, \eta_{ijk}^{(1)}$ et χ_{ij}^s) s'écrit comme suit (Lam et al.2003) :

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{mm} + 2G \varepsilon_{ij} \quad (V.7)$$

$$p_i = 2Gl_0^2 \gamma_i \quad (V.8)$$

$$\tau_{ijk}^{(1)} = 2Gl_1^2 \eta_{ijk}^{(1)} \quad (V.9)$$

$$m_{ij}^s = 2Gl_2^2 \chi_{ij}^s \quad (V.10)$$

Où l_0, l_1, l_2 sont des paramètres supplémentaires de longueur de taille de matériau liés respectivement aux gradients de dilatation, aux gradients d'étirement déviatorique et aux gradients de rotation. De plus, λ et G les constantes de Lamé exprimées par :

$$\lambda = \frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)} \text{ et } G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (V.11)$$

Chapitre V : Analyse du comportement statique et dynamique des microtubules en utilisant SVSBT

V.3. Formulation de la théorie des poutres sinusoidale à une seule variable (SVSBT)

Les MTs peuvent être considérés comme un élément de poutre creux. La modélisation d'un microtubule isolé comme un élément poutre creuse cylindrique simplement appuyées est représentée sur la figure 2 sur laquelle, D_i , D_o et L désignent les diamètres intérieur, extérieur et la longueur du MT, respectivement.

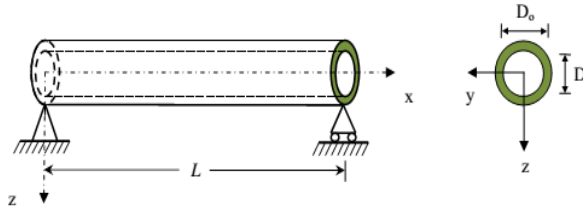


Figure V. 1 : Modélisation continue d'un microtubule isolé comme un élément poutre creuse simplement appuyée (Akgöz and Civalek 2014a).

Le champ de déplacement de la présente SVSDT peut être décrit par :

$$\begin{aligned} u(x, z) &= -z \frac{\partial w}{\partial x} - \beta f(z) \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \\ v(x, z) &= 0 \\ w(x, z) &= w(x) \end{aligned} \tag{V.12}$$

Où w est le déplacement vertical le long du plan médian de la poutre. β est un coefficient défini dans Refs (Zidi et al.2017, Hachemi et al.2017) et est donnée par l'équation (31). $f(z)$ est une fonction de forme et est utilisée pour déterminer la déformation de cisaillement transversale et la variation de contrainte dans l'épaisseur de la poutre (ou le diamètre extérieur des MTs). $f(z)$ est donné par :

$$f(z) = \frac{h}{\pi} \sin\left(\frac{\pi z}{h}\right) \tag{V.13}$$

Où h présente l'épaisseur de la poutre (D_o). En substituant l'équation (12) dans l'équation (2) donne les composantes de déformation non nulle comme :

Chapitre V : Analyse du comportement statique et dynamique des microtubules en utilisant SVSBT

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - f(z) \beta \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \\ \varepsilon_{xz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) = -\frac{1}{2} f'(z) \beta \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \end{aligned} \right\} \quad (\text{V.14})$$

Avec :

$$f'(z) = \frac{df}{dz} = \cos\left(\frac{\pi z}{h}\right) \quad (\text{V.15})$$

En utilisant l'équation (14) dans les équations (3)-(5), les composantes non nulles du gradient de déformation d'ordre élevé sont déterminées comme:

$$\gamma_x = \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial x} = -z \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - f(z) \beta \frac{\partial^5 w}{\partial x^5}, \quad (\text{V.16a})$$

$$\gamma_z = \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial z} = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - f'(z) \beta \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \quad (\text{V.16b})$$

Et

$$\eta_{111}^{(1)} = \frac{1}{5} \left[2 \left(-z \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - f(z) \beta \frac{\partial^5 w}{\partial x^5} \right) - \frac{\pi^2}{h^2} f(z) \beta \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \right] \quad (\text{V.17a})$$

$$\eta_{113}^{(1)} = \eta_{131}^{(1)} = \eta_{311}^{(1)} = -\frac{4}{15} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2f'(z) \beta \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right) \quad (\text{V.17b})$$

$$\eta_{122}^{(1)} = \eta_{212}^{(1)} = \eta_{221}^{(1)} = -\frac{1}{5} \left[-z \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - f(z) \beta \frac{\partial^5 w}{\partial x^5} + \frac{\pi^2}{3h^2} f(z) \beta \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \right] \quad (\text{V.17c})$$

$$\eta_{133}^{(1)} = \eta_{313}^{(1)} = \eta_{331}^{(1)} = -\frac{1}{5} \left(-z \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - f(z) \beta \frac{\partial^5 w}{\partial x^5} - \frac{4}{3} \frac{\pi^2}{h^2} f(z) \beta \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \right) \quad (\text{V.17d})$$

$$\eta_{223}^{(1)} = \eta_{232}^{(1)} = \eta_{322}^{(1)} = \frac{1}{15} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2f'(z) \beta \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right) \quad (\text{V.17e})$$

$$\eta_{333}^{(1)} = \frac{1}{5} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2f'(z) \beta \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right) \quad (\text{V.17f})$$

Chapitre V : Analyse du comportement statique et dynamique des microtubules en utilisant SVSBT

$$\chi_{xy}^s = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \theta_x}{\partial y} + \frac{\partial \theta_y}{\partial x} \right) = -\frac{1}{2} \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{1}{2} \beta f'(z) \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right] \quad (\text{V.18a})$$

$$\chi_{yz}^s = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \theta_y}{\partial z} + \frac{\partial \theta_z}{\partial y} \right) = \frac{\pi^2}{4h^2} \beta f(z) \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \quad (\text{V.18b})$$

En employant l'équation (14) dans l'équation (7), les composantes non nulle du tenseur de contrainte conventionnel σ peut être exprimé par :

$$\sigma_x = E\eta \left(-z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - f(z) \beta \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right), \quad (\text{V.19a})$$

$$\tau_{xz} = -Gf'(z) \beta \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \quad (\text{V.19b})$$

$$\sigma_y = \sigma_z = \lambda \left(-z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - f(z) \beta \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right) \quad (\text{V.19c})$$

Où

$$\eta = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \text{et} \quad \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (\text{V.20})$$

Aussi, substitution d'équations (16)-(18) dans les équations (8)-(10) donne les composantes non nulle des contraintes tel que :

$$p_x = 2Gl_0^2 \gamma_x = 2Gl_0^2 \left(-z \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - f(z) \beta \frac{\partial^5 w}{\partial x^5} \right) \quad (\text{V.21a})$$

$$p_z = 2Gl_0^2 \gamma_z = -2Gl_0^2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + f'(z) \beta \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right) \quad (\text{V.21b})$$

$$\begin{aligned} \tau_{111}^{(1)} &= 2Gl_1^2 \eta_{111}^{(1)} = \\ & \frac{2}{5} Gl_1^2 \left[2 \left(-z \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - f(z) \beta \frac{\partial^5 w}{\partial x^5} \right) - \frac{\pi^2}{h^2} f(z) \beta \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \right] \end{aligned} \quad (\text{V.22a})$$

Chapitre V : Analyse du comportement statique et dynamique des microtubules en utilisant SVSBT

$$\tau_{113}^{(i)} = \tau_{131}^{(i)} = \tau_{311}^{(i)} = -\frac{8}{15} Gl_1^2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2f'(z)\beta \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right) \quad (V.22b)$$

$$\tau_{122}^{(i)} = \tau_{212}^{(i)} = \tau_{221}^{(i)} = -\frac{2}{5} Gl_1^2 \left[-z \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - f(z)\beta \frac{\partial^5 w}{\partial x^5} + \frac{\pi^2}{3h^2} f(z)\beta \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \right] \quad (V.22c)$$

$$\tau_{133}^{(i)} = \tau_{313}^{(i)} = \tau_{331}^{(i)} = -\frac{2}{5} Gl_1^2 \left(-z \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - f(z)\beta \frac{\partial^5 w}{\partial x^5} - \frac{4\pi^2}{3h^2} f(z)\beta \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \right) \quad (V.22d)$$

$$\tau_{223}^{(i)} = \tau_{232}^{(i)} = \tau_{322}^{(i)} = \frac{2}{15} Gl_1^2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2f'(z)\beta \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right) \quad (V.22e)$$

$$\tau_{333}^{(i)} = \frac{2}{5} Gl_1^2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2f'(z)\beta \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right) \quad (V.22f)$$

$$m_{xy}^s = 2Gl_2^2 \chi_{xy}^s = -Gl_2^2 \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{1}{2} \beta f'(z) \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right] \quad (V.23a)$$

$$m_{yz}^s = 2Gl_2^2 \chi_{yz}^s = \frac{Gl_2^2 \pi^2}{2h^2} \beta f(z) \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \quad (V.23b)$$

La première variation de l'énergie de déformation pour les MTs peut être écrite en utilisant les composantes de contrainte et de déformation conventionnelles et non conventionnelles (d'ordre supérieur) ci-dessus dans l'équation (1) (en négligeant l'influence du coefficient de Poisson) comme :

$$\begin{aligned} \delta U &= \int_0^L \int_A \left(\sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} + p_{ij} \delta \gamma_{ij} + \tau_{ijk}^{(1)} \delta \eta_{ijk}^{(1)} + m_{ij}^s \delta \chi_{ij}^s \right) dA dx \\ &= \int_0^L \left[\left(-\frac{6BI}{\pi^2} \beta^2 \frac{\partial^{10} w}{\partial x^{10}} + \left(S_4 \beta^2 - 4BA\beta \frac{h^2}{\pi^3} \right) \frac{\partial^8 w}{\partial x^8} + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \left(2S_3 \beta - S_1 \beta^2 - BI \right) \frac{\partial^6 w}{\partial x^6} + S_2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right) \delta w \right] dx \end{aligned} \quad (V.24)$$

Chapitre V : Analyse du comportement statique et dynamique des microtubules en utilisant SVSBT

Où

$$\begin{aligned}
 B &= 2G\left(l_0^2 + \frac{2}{5}l_1^2\right), & S_1 &= GA\left(\frac{1}{2} + \frac{\pi^2}{h^2}\left(\frac{4}{15}l_1^2 + \frac{1}{8}l_2^2\right)\right), \\
 S_2 &= EI + GA\left(2l_0^2 + \frac{8}{15}l_1^2 + l_2^2\right), & S_3 &= \frac{24EI}{\pi^3} + \frac{GA}{\pi}\left(4l_0^2 + \frac{4}{3}l_1^2 + l_2^2\right), \\
 S_4 &= \frac{6EI}{\pi^2} + GA\left(l_0^2 + \frac{2}{3}l_1^2 + \frac{1}{8}l_2^2\right)
 \end{aligned} \tag{V.25}$$

Où A et I sont respectivement la "section transversale" et le "deuxième moment" de la surface. D'autre part, la variation de «l'énergie potentielle» des charges appliquées peut s'écrire comme (Zidi et al.2014, Bellifa et al.2016, Younsi et al.2018, Meksi et al.2019, Zarga et al.2019)

$$\delta V = \int_A q \delta w dA \tag{V.26}$$

Où q est la charge transversale répartie.

La variation d'énergie cinétique de la poutre peut s'écrire sous la forme (Bessaim et al. 2013, Meziane et al. 2014, Attia et al. 2015, Yahia et al. 2015, Bourada et al. 2015, Bennoun et al. 2016, Boukhari et al. 2016, Abdelaziz et al. 2017, Abualnour et al. 2018, Bouhadra et al. 2018, Fourn et al. 2018, Belabed et al. 2018, Yeghnem et al. 2019, Zaoui et al. 2019, Bourada et al. 2019):

$$\delta K = \frac{1}{2} \int_0^L \int_A \rho \left(\left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right) dA dx \tag{V.27}$$

Où ρ est la masse volumique. À partir des équations (12) et (27), la première variation de l'énergie cinétique peut être donnée comme :

$$\begin{aligned}
 \delta K &= \int_0^L \left\{ \rho A [\dot{w}_0 \delta \dot{w}_0] + \rho I \left(\frac{\partial \dot{w}_0}{\partial x} \frac{\partial \delta \dot{w}_0}{\partial x} \right) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{6}{\pi^2} \rho I \beta^2 \left(\frac{\partial^3 \dot{w}_0}{\partial x^3} \frac{\partial^3 \delta \dot{w}_0}{\partial x^3} \right) + \frac{24}{\pi^3} \rho I \beta \left(\frac{\partial \dot{w}_0}{\partial x} \frac{\partial^3 \delta \dot{w}_0}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \dot{w}_0}{\partial x^3} \frac{\partial \delta \dot{w}_0}{\partial x} \right) \right\} dx
 \end{aligned} \tag{V.28}$$

Le principe de Hamilton est utilisé ici pour dériver les équations du mouvement. Le principe peut être énoncé sous la forme analytique comme (Tounsi et al. 2013, Belabed et al. 2014, Hebali et al. 2014, Bousahla et al. 2014, Mahi et al. 2015, Hamidi et al. 2015, Beldjelili et al. 2016, Houari et al. 2016, Boudierba et al. 2016, Bellifa et al. 2017b, Ait Atmane et al. 2017, Sekkal et al. 2017, Menasria et al.

Chapitre V : Analyse du comportement statique et dynamique des microtubules en utilisant SVSBT

2017, Attia et al. 2018, Benchohra et al. 2018, Tounsi et al. 2019, Khiloun et al. 2019) :

$$0 = \int_0^T (\delta U + \delta V - \delta K) dt \quad (V.29)$$

$$\begin{aligned} \delta w : & -\frac{6BI}{\pi^2} \beta^2 \frac{\partial^{10} w}{\partial x^{10}} + \left(S_4 \beta^2 - 4BA\beta \frac{h^2}{\pi^3} \right) \frac{\partial^8 w}{\partial x^8} \\ & + (2S_3 \beta - S_1 \beta^2 - BI) \frac{\partial^6 w}{\partial x^6} + S_2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + q = \\ & \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \rho I \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial t^2} - \beta \frac{48I}{\pi^3} \frac{\partial^6 w}{\partial x^4 \partial t^2} - \beta^2 \frac{6I}{\pi^2} \frac{\partial^8 w}{\partial x^6 \partial t^2} \end{aligned} \quad (V.30)$$

Et

$$\beta = \frac{S_3 \pi^3 + 2\alpha^2 BA h^2}{\pi (S_1 \pi^2 + S_4 \alpha^2 \pi^2 + 6BI \alpha^4)} \quad (V.31)$$

V.4. Solution analytique

Dans cette section, la procédure de solution Navier est utilisée pour déterminer les solutions analytiques pour les problèmes de flexion et de dynamique des MTs simplement appuyées. Les extensions suivantes de déplacements généralisés qui incluent des coefficients de Fourier indéterminés et certaines fonctions trigonométriques peuvent être utilisées comme :

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} W_m e^{i\omega_m t} \sin(\alpha x) \quad (V.32)$$

Où $\alpha = m\pi/a$ et W_m sont des paramètres arbitraires à déterminer ; ω_m est la fréquence propre associée à m^{th} mode propre.

V.4.1. Analyse de la flexion

La charge transversale q est également étendue dans la série de Fourier comme :

$$q(x) = \sum_{m=1}^{\infty} q_m \sin(\alpha x) \quad (V.33)$$

$$Q_m = \frac{2}{L} \int_0^L q(x) \sin(\alpha x) dx \quad (V.34)$$

Chapitre V : Analyse du comportement statique et dynamique des microtubules en utilisant SVSBT

Et Q_m peut être exprimée pour la charge ponctuelle exercée sur le milieu des MT.

$$Q_m = \frac{2Q_0}{L} \sin \frac{m\pi}{2} \text{ pour } m = 1, 2, 3 \quad (\text{V.35})$$

En substituant l'équation (33) dans l'équation. (30), les solutions analytiques peuvent être obtenues à partir de :

$$= 2Gl_1^2 \eta_{111}^{(1)} = \frac{2}{5} Gl_1^2 \left[2 \left(-z \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - f(z) \beta \frac{\partial^5 w}{\partial x^5} \right) - \frac{\pi^2}{h^2} f(z) \beta \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \right] \quad (\text{V.36})$$

En résolvant l'équation algébrique ci-dessus définie dans l'équation (36), le coefficient de Fourier peut être déterminé. L'expression analytique de $w(x)$ obtenue pour les MTs simplement appuyées en flexion en substituant ce coefficient dans l'équation (32).

V.4.2. Analyse de la vibration libre

En remplaçant l'équation (32) dans l'équation (30) en tant qu'équations de mouvement pour une vibration libre sans charge externe appliquée, l'équation suivante est déterminée comme :

$$(K - \omega^2 M)W_m = 0 \quad (\text{V.37})$$

Où

$$K = \alpha^4 \left[\frac{6BI}{\pi^2} \beta^2 \alpha^6 + \left(S_4 \beta^2 - 4BA\beta \frac{h^2}{\pi^3} \right) \alpha^4 + (S_1 \beta^2 + BI - 2S_3 \beta) \alpha^2 + S_2 \right] \quad (\text{V.38a})$$

$$M = \rho A + \rho I \alpha^2 - \frac{48I}{\pi^3} \rho \beta \alpha^4 + \frac{6I}{\pi^2} \rho \beta^2 \alpha^6 \quad (\text{V.38b})$$

V.5. Résultats et discussion

Afin de démontrer les influences des paramètres de longueur d'échelle du matériau et de la déformation de cisaillement, quelques exemples numériques sur les réponses statiques et dynamiques du microtubule sont présentés.

À des fins d'illustration, un MT simplement appuyé est pris comme exemple avec les propriétés matérielles et géométriques suivantes (Heireche et al.2010):

Chapitre V : Analyse du comportement statique et dynamique des microtubules en utilisant SVSBT

module de Young $E = 1 \text{ GPa}$, coefficient de Poisson $\nu = 0.3$, densité de masse par unité de volume $\rho = 1470 \text{ kg/m}^3$, rapport de module de cisaillement $r = G/E$ variant entre 10^{-6} et 10^{-4} , rayon intérieur $r_i = 7.5 \text{ nm}$, rayon extérieur $r_o = 12.5 \text{ nm}$ et la longueur de MT, L variant entre $1,25 \text{ }\mu\text{m}$ et $12,5 \text{ }\mu\text{m}$.

Tous les paramètres de longueur d'échelle de matériau sont considérés comme égaux les uns aux autres comme $l_0 = l_1 = l_2$. Si deux paramètres de longueur d'échelle (l_0 et l_1) ou tous sont nuls, le modèle proposé sera transformé respectivement en couple de contraintes modifiées (MCST) et en modèles classiques (CT).

Les résultats obtenus par le présent modèle de poutre sinusoïdal à une seule variable sont comparés à ceux obtenus par Akgöz et Civalek (2014a) et la théorie des poutres d'Euler (EBT). De plus, il convient de noter que les lignes pleines, les lignes pointillées et les lignes discontinues des figures indiquent les résultats pour CT, MCST et MSGT, respectivement.

Les comparaisons des déflexions maximales sous charge ponctuelle agissant sur le milieu du MT, la première, deuxième et troisième fréquence propre avec différents rapports de modules de cisaillement et le rapport géométrique correspondant à diverses théories et modèles de poutre sont présentés dans les tableaux 1 à 4, respectivement.

Tableau V.1. La déflexion maximale (μm) des microtubules simplement appuyés sous chargement ponctuel ($Q_0 = 0.01 \text{ nN}, l = D_0$).

r	Théorie de poutre	$L = 50D_0$			$L = 500D_0$		
		CT	MCST	MSGT	CT	MCST	MSGT
Isotrope	EBT	0.0244	0.0044	0.0014	24.3803	4.4128	1.4351
	Akgöz and Civalek (2014a)	0.0244	0.0044	0.0014	24.3806	4.4128	1.4352
	présente	0.0244	0.0044	0.0014	24.3806	4.4128	1.4352
10^{-4}	EBT	0.0244	0.0244	0.0243	24.3803	24.3516	24.2794
	Akgöz and Civalek (2014a)	0.1251	0.0558	0.0372	25.5537	24.6920	24.4148
	présente	0.1251	0.0558	0.0371	25.5536	24.6919	24.4147
10^{-5}	EBT	0.0244	0.0244	0.0244	24.3803	24.3774	24.3702
	Akgöz and Civalek (2014a)	0.6526	0.2778	0.1381	35.7165	27.7240	25.7122

Chapitre V : Analyse du comportement statique et dynamique des microtubules en utilisant SVSBT

	présente	0.6525	0.2778	0.1381	35.7164	27.7239	25.7121
10 ⁻⁶	EBT	0.0244	0.0244	0.0244	24.3803	24.3800	24.3793
	Akgöz and Civalek (2014a)	1.4478	1.0780	0.7053	125.1389	55.8992	37.3154
	présente	1.4478	1.0780	0.7053	125.1393	55.8992	37.3153

Tableau V.2. Fréquences fondamentales (MHz) des microtubules simplement appuyés ($l = D_0$).

r	Théorie de poutre	$L = 50D_0$			$L = 500D_0$		
		CT	MCST	MSGT	CT	MCST	MSGT
Isotrope	EBT	6.0425	14.2030	24.9082	0.0604	0.1421	0.2491
	Akgöz and Civalek (2014a)	6.0394	14.1998	24.8939	0.0604	0.1421	0.2491
	présente	6.0393	14.1998	24.8938	0.0604	0.1420	0.2491
10 ⁻⁴	EBT	6.0425	6.0461	6.0551	0.604	0.0605	0.0606
	Akgöz and Civalek (2014a)	2.7594	4.1341	5.0151	0.0593	0.0601	0.0604
	présente	2.7593	4.1341	5.0150	0.0592	0.0601	0.0604
10 ⁻⁵	EBT	6.0425	6.0429	6.0438	0.0604	0.0604	0.0604
	Akgöz and Civalek (2014a)	1.1788	1.8302	2.6228	0.0511	0.0572	0.0591
	présente	1.1787	1.8302	2.6227	0.0510	0.0572	0.0591
10 ⁻⁶	EBT	6.0425	6.0426	6.0426	0.0604	0.0604	0.0604
	Akgöz and Civalek (2014a)	0.7851	0.9121	1.1327	0.0276	0.0413	0.0501
	présente	0.7851	0.9120	1.1327	0.0275	0.0413	0.0500

Tableau V.3. Deuxième fréquence naturelle (MHz) des microtubules simplement appuyés ($l = D_0$).

R	Théorie de poutre	$L = 50D_0$			$L = 500D_0$		
		CT	MCST	MSGT	CT	MCST	MSGT
Isotrope	EBT	24.1579	56.7834	99.6201	0.2417	0.5682	0.9964
	Akgöz and Civalek (2014a)	24.1077	56.7330	99.3923	0.2417	0.5682	0.9963
	présente	24.1077	56.7329	99.3922	0.2417	0.5682	0.9963
10 ⁻⁴	EBT	24.1579	24.1721	24.2081	0.2417	0.2419	0.2422
	Akgöz and Civalek (2014a)	6.4580	10.4734	14.4957	0.2244	0.2365	0.2400
	présente	6.4579	10.4734	14.4957	0.2244	0.2365	0.2400
10 ⁻⁵	EBT	24.1579	24.1593	24.1629	0.2417	0.2418	0.2418
	Akgöz and Civalek (2014a)	3.4584	4.5236	6.1472	0.1508	0.2000	0.2222
	présente	3.4584	4.5235	6.1472	0.1507	0.2000	0.2222
10 ⁻⁶	EBT	24.1579	24.1581	24.1584	0.2417	0.2417	0.2417

Chapitre V : Analyse du comportement statique et dynamique des microtubules en utilisant SVSBT

	Akgöz and Civalek (2014a)	2.9675	3.1108	3.3952	0.0646	0.1046	0.1446
	présente	2.9675	3.1108	3.3951	0.0646	0.1046	0.1446

Tableau V.4. Troisième fréquence naturelle (MHz) des microtubules simplement appuyés ($l = D_0$).

R	Théorie de poutre	$L = 50D_0$			$L = 500D_0$		
		CT	MCST	MSGT	CT	MCST	MSGT
Isotrope	EBT	54.3098	127.6557	224.0976	0.5439	1.2785	2.2418
	Akgöz and Civalek (2014a)	54.0576	127.4031	222.9556	0.5439	1.2784	2.2417
	présente	54.0576	127.4031	222.9555	0.5439	1.2784	2.2417
10^{-4}	EBT	54.3098	54.3418	54.4228	0.5439	0.5442	0.5450
	Akgöz and Civalek (2014a)	10.9585	17.1998	24.6428	0.4664	0.5179	0.5341
	présente	10.9585	17.1998	24.6428	0.4664	0.5179	0.5341
10^{-5}	EBT	54.3098	54.3130	54.3211	0.5439	0.5439	0.5440
	Akgöz and Civalek (2014)	7.1213	8.3789	10.5337	0.2582	0.3820	0.4578
	présente	7.1213	8.3789	10.5337	0.2582	0.3820	0.4578
10^{-6}	EBT	54.3098	54.3101	54.3109	0.5439	0.5439	0.5439
	Akgöz and Civalek (2014a)	6.6021	6.7497	7.0538	0.1096	0.1716	0.2455
	présente	6.6021	6.7497	7.0537	0.1096	0.1716	0.2455

On voit que les résultats obtenus par la présente théorie sinusoïdale à variable unique sont en excellent accord avec ceux obtenus par Akgöz et Civalek (2014a). Cependant, il convient de noter que la théorie actuelle n'utilise qu'une seule variable alors que la théorie d'Akgöz et Civalek (2014a) utilise trois variables. On peut voir que les déflexions maximales calculées par la théorie actuelle et CT sont plus élevées que celles données par EBT et MSGT tandis que les fréquences propres calculées par la théorie actuelle et CT sont plus petites que celles données par EBT et MSGT et aussi ces situations sont plus fréquentes pour des rapports de module de cisaillement plus petits et des rapports géométriques comme $r = 10^{-6}$ et $L/D_0 = 50$.

On peut observer que les résultats obtenus par EBT et la théorie actuelle sont presque égaux pour le cas isotrope et $L/D_0 = 500$. En revanche, les différences entre les résultats correspondant à EBT et la théorie actuelle sont plus évidentes pour les

Chapitre V : Analyse du comportement statique et dynamique des microtubules en utilisant SVSBT

plus petits rapports géométriques ($L/D_0 = 50$), mais elles diminuent pour les plus grands, comme $L/D_0 = 500$. De plus, on peut conclure que l'effet de déformation de cisaillement devient plus important pour les petits microtubules. Les variations des rapports de déflexion maximale et de fréquence naturelle par rapport à divers rapports géométriques et différents rapports de module de cisaillement sont présentés sur les Figures 2 et 3, respectivement.

On observe à partir de ces figures que le rapport de «déflexion maximale» est beaucoup plus grand à un tandis que les rapports de fréquence naturelle sont beaucoup plus petits que un pour des rapports géométriques plus petits. Cependant, ces rapports ont tendance à être plus proches à un avec l'augmentation des rapports de dimensions et de module de cisaillement, en particulier pour le MSGT. On peut également souligner que ces rapports sont presque égaux à un dans le cas isotrope. On peut déduire à partir des résultats que la différence entre les modules d'élasticité et de cisaillement, résultant de la structure composite et de l'architecture moléculaire anisotrope des MT, joue un rôle considérable sur les propriétés dynamiques et de flexion des MTs.

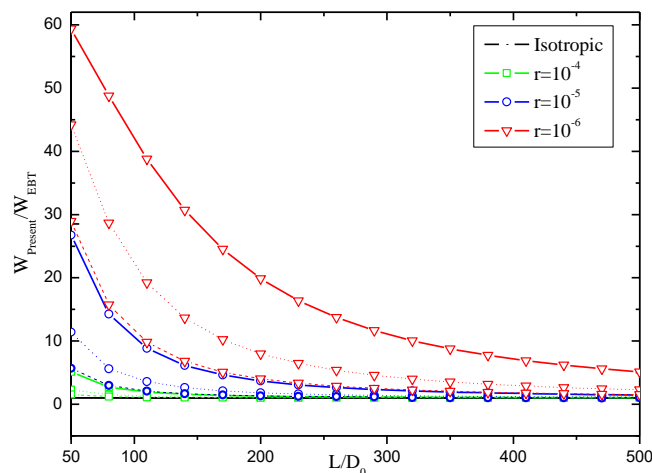


Figure V.2: Variation du rapport de déflexion maximale pour les différents rapports de géométrie et de modules de cisaillement.

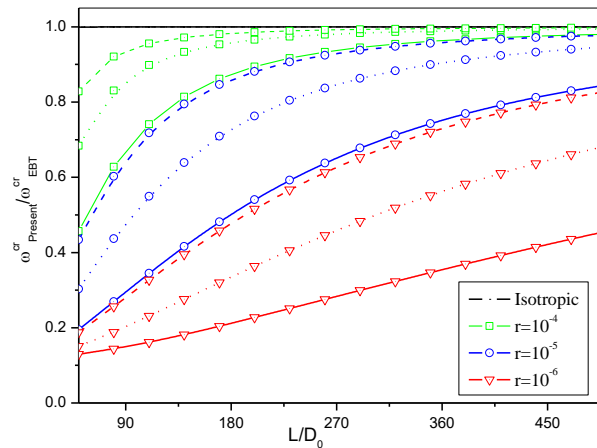


Figure V.3: Variation du rapport de fréquence naturelle pour les différents rapports de géométrie et de modules de cisaillement.

Les influences du rapport du coefficient de longueur d'échelle du matériau /diamètre extérieur sur les rapports de déflexion maximale et les premières fréquences naturelle des MTs simplement supportés correspondant à divers rapports de module de cisaillement pour $L/D_0 = 50$ et $L/D_0 = 500$ sont illustrées dans les Figures 4 et 5, respectivement.

On voit qu'une augmentation du rapport du coefficient de longueur d'échelle du matériau /diamètre extérieur sur conduit à une diminution des influences de la déformation de cisaillement tandis que les influences de la déformation de cisaillement deviennent plus fréquentes en diminuant le rapport du module de cisaillement.

De plus, il est clair que ces rapports sont plus proches de un pour le MSGT en fonction de l'augmentation du rapport du coefficient de longueur d'échelle du matériau /diamètre extérieur. On constate également que les rapports de déflexion maximale et de fréquence propre pour $L/D_0 = 50$ sont toujours plus éloignés que ceux pour $L/D_0 = 500$.

Chapitre V : Analyse du comportement statique et dynamique des microtubules en utilisant SVSBT

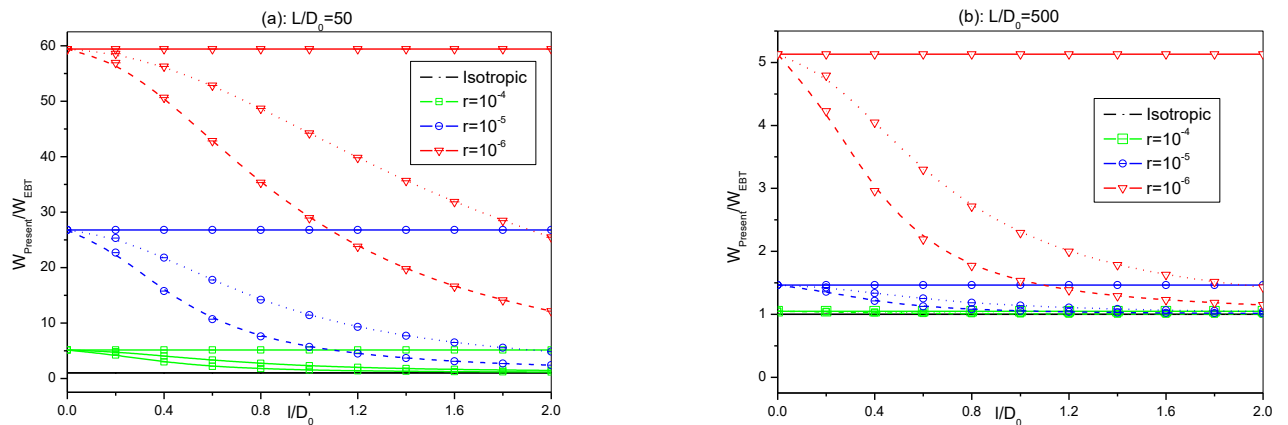


Figure V.4 : Influence du paramètre de longueur d'échelle sur le rapport de la déflexion maximale pour les différents rapports du module de cisaillement

(a) $L/Do = 50$ (b) $L/Do = 500$.

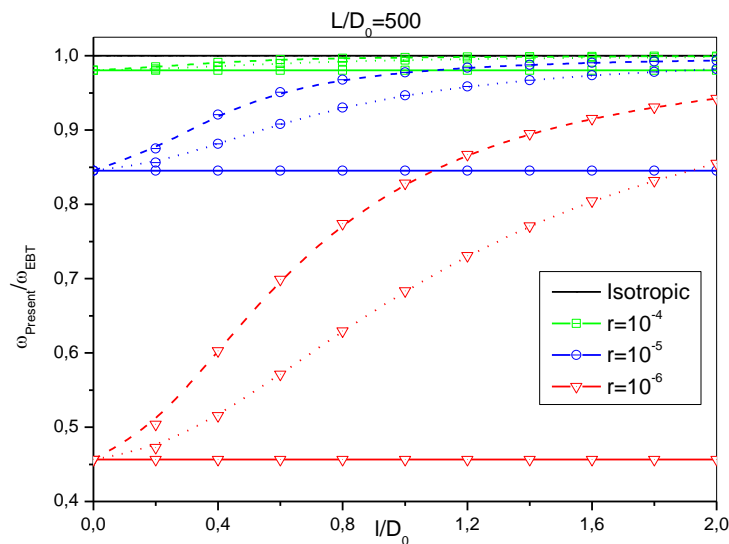


Figure V.5 : Influence du paramètre de longueur d'échelle sur le rapport de fréquence naturelle pour les différents rapports du module de cisaillement $L/Do = 500$

V.6. Conclusion

Dans ce travail, un "modèle de poutre de déformation de cisaillement" dépendant de la microstructure est établi pour l'étude de la flexion et des vibrations libres des microtubules sur la base de la "théorie de l'élasticité du gradient de

Chapitre V : Analyse du comportement statique et dynamique des microtubules en utilisant SVSBT

déformation modifiée". La théorie actuelle des poutres sinusoïdales à une seule variable capture les influences de la déformation de cisaillement sans avoir besoin des "facteurs de correction de cisaillement" et ceci en utilisant qu'une seule variable comme la théorie des poutres d'Euler-Bernoulli.

Les équations de mouvement sont déterminées en utilisant le principe de Hamilton. La flexion et les réponses dynamiques de microtubules isolés simplement supportés sont étudiées. Des solutions analytiques de la déflexion pour la charge ponctuelle au milieu des MTs et les trois premières fréquences naturelles sont obtenues à l'aide de la technique de solution de Navier.

Les influences de la déformation de cisaillement, le paramètre de longueur d'échelle du matériau, le rapport géométrique et le rapport du module de cisaillement sur les déflexions et les fréquences propres des microtubules sont examinés et discutés en détail. Les résultats sont comparés aux résultats disponibles dans littérature ouverte en conjonction avec CT et MCST.

Il est à noter que la réponse de la microstructure dépendante est plus importante lorsque les paramètres de longueur d'échelle du matériau sont proches du diamètre extérieur des MTs. Les modèles des poutres classiques surestiment les «déflexions» alors qu'ils sous-estiment les «fréquences naturelles».

De même, la théorie de poutres sinusoïdales à une seule variable surestime les «déflexions» tout en sous-estimant les «fréquences naturelles», en particulier pour des rapports géométriques plus petits. On peut observer que les modèles de poutre basés sur des modèles d'élasticité d'ordre supérieur et le modèle de poutre simple sont plus rigides que ceux basés sur la théorie classique et les modèles de poutre de déformation de cisaillement.

De plus, on peut soutenir que les influences de la déformation de cisaillement deviennent plus importantes en raison de la structure composite et de l'architecture moléculaire anisotrope des MTs, en particulier pour des rapports géométriques plus petits. Une amélioration de la formulation actuelle sera envisagée dans les travaux futurs pour prendre en compte d'autres modèles de déformation de cisaillement et d'autres types de matériaux (Bouderba et al. 2013, Avcar 2015 and 2016, Draiche et al. 2016, Bousahla et al. 2016, Daouadji 2017, Kar *et al.* 2017, Chikh et al. 2017, El-

Chapitre V : Analyse du comportement statique et dynamique des microtubules en utilisant SVSBT

Haina et al. 2017, Lal et al. 2017, Bensattalah *et al.* 2018, Eltaher *et al.* 2018, Fakhhar and Kolahchi 2018, Bourada et al. 2018, Ayat et al. 2018, Behera and Kumari 2018, Bakhadda et al. 2018, Faleh *et al.* 2018, Cherif et al. 2018, Panjehpour *et al.* 2018, Youcef et al. 2018, Rezaiee-Pajand et al. 2018, Kaci et al. 2018, Kadari et al. 2018, Selmi and Bisharat 2018, Narwariya et al. 2018, Avcar 2019, Bendaho et al. 2019, Boukhlif et al. 2019, Hellal et al. 2019, Draoui et al. 2019, Boutaleb et al. 2019, Zine et al. 2019, Adda Bedia et al. 2019, Bensattalah et al. 2019, Draiche et al. 2019, Hussain et al. 2019, Addou et al. 2019, Medani et al. 2019, Chaabane et al. 2019, Boulefrakh et al. 2019).

Conclusion générale

Ce travail de thèse présente l'analyse de la stabilité thermique des nanotubes de carbone et nitrure de bore à une seule paroi et l'étude du comportement statique et dynamique des microtubule en utilisant des nouvelle théorie FSDT et HSDT respectivement.. Les équations d'équilibre et du mouvement des deux modèles sont dérivées en utilisant le principe travaux virtuels et d'Hamilton, respectivement.

Ces équations sont résolues par la procédure de Navier. Les résultats sont comparés avec des solutions de plusieurs théories existant dans la littérature. En conclusion, on peut dire que les présentes théories ne pas seulement exactes mais aussi efficaces pour prédire les caractéristique de flambement thermique des SWCNTs et SWBNNTs et les déplacements transversal et les fréquences fondamentales des microtubules simplement appuyées.

A travers ce travail on peut conclure :

- l'augmentation du paramètre d'échelle ($e_0 a$) conduit à une réduction des valeurs de la température critique du flambement des SWBNNTs.
- la température critique du flambement des SWBNNTs augmente avec l'augmentation de rapport L/Dm et le mode n .
- La différence des résultats de la théorie EBT et I-FSDT est significatives pour les structures SWCNTs courte à cause l'omission de l'effet de déformation de cisaillement transverse par la théorie classique des poutres
- Les déflexions maximales calculées par la théorie actuelle et CT sont plus élevées que celles données par EBT et MSGT
- L'augmentation du rapport du coefficient de longueur d'échelle du matériau sur diamètre extérieur conduit à une diminution des influences de la déformation de cisaillement tandis que les influences de la déformation de cisaillement deviennent plus fréquentes en diminuant le rapport du module de cisaillement.

Enfinement, nous pouvons dire que les présentes théories sont exactes pour résoudre les problèmes du flambement thermique des SW-CNTS et SW-BNNTs et la flexion et vibration libre des microtubules simplement appuyées.

Le travail présenté dans le cadre de cette thèse de doctorat peut être développé et enrichi. Nous envisageons, par exemple, en perspective, d'appliquer le présent modèle pour l'étude des différentes formes de structures et de matériaux avec les

différentes conditions aux limites sous les différents types de chargement (mécanique, thermique, dynamique et hygrothermique).

Références bibliographiques

- A Benzair *et al.* (2008), “The thermal effect on vibration of single-walled carbon nanotubes using nonlocal Timoshenko beam theory”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41**(22).
- A. A. Hyman, D. Chretien, I. Arnal, and R. H. Wade, (1995), “Structural changes accompanying GTP hydrolysis in microtubules: Information from a slowly hydrolysable analogue guanylyl-methylene- diphosphonate”, *Journal of Cell Biology*, **128**(1-2), 117–125.
- A. Krishnan, E. Dujardin, T.W. Ebbesen, P.N. Yianilos, M. Treacy (1998), *Phys. Rev. B*, **58**,14013-14019.
- A. Thess, R. Lee, P. Nikolaev, H. Dai, P. Petit, J. Robert, C. Xu, Y.H. Lee, S.G. Kim, A.G. Rinzler, D.T. Colbert, G.E. Scuseria, D. Tomanek, J.E. Fischer, R.E. Smalley (1996), “Crystalline ropes of metallic carbon nanotubes”, *Science* **273**, 483–487.
- A. Tounsi, H. Heireche, H. Benhassaini, M. Missouri, 2010, “Vibration and length-dependent flexural rigidity of protein microtubules using higher order shear deformation theory”, *Journal of Theoretical Biology*, **266**, 250-255.
- Abdelaziz, H.H., Meziane, M.A.A, Bousahla, A.A., Tounsi, A., Mahmoud, S.R. and Alwabli, A.S. (2017), “An efficient hyperbolic shear deformation theory for bending, buckling and free vibration of FGM sandwich plates with various boundary conditions”, *Steel Compos. Struct.*, **25**(6), 693-704.
- Abualnour, M., Houari, M.S.A., Tounsi, A., Adda Bedia, E.A., Mahmoud, S.R. (2018) , “A novel quasi 3D trigonometric plate theory for free vibration analysis of advanced composite plates”, *Compos. Struct.*, 184, 688-697.
- Adda Bedia, W., Houari, M.S.A., Bessaim, A., Bousahla, A.A., Tounsi, A., Saeed, T., Alhodaly, M.S. (2019), “A new hyperbolic two-unknown beam model for bending and buckling analysis of a nonlocal strain gradient nanobeams”, *Journal of Nano Research*, **57**, 175–191.
- Addou, F.Y., Meradjah, M., M.A.A, Bousahla, Benachour, A., Bourada, F., Tounsi, A., Mahmoud, S.R. (2019), “Influences of porosity on dynamic response of FG plates resting on Winkler/Pasternak/Kerr foundation using quasi 3D HSDT”, *Computers and Concrete*, (submitted).
- Ahouel, M., Houari, M.S.A., Adda Bedia, E.A. and Tounsi, A. (2016), “Size-dependent mechanical behavior of functionally graded trigonometric shear deformable nanobeams including neutral surface position concept”, *Steel Compos. Struct.*, **20**(5), 963–981.

- Aifantis, EC. (1999), "Gradient deformation models at nano, micro, and macro scales", *J Eng Mater Technol*, **121**, 189–202.
- Ait Atmane, H, Tounsi, A., Bernard, F. (2017), "Effect of thickness stretching and porosity on mechanical response of a functionally graded beams resting on elastic foundations", *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, **13**(1), 71-84.
- Ait Yahia, S., Ait Atmane, 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., Int. J.*, **53**(6), 1143-1165.
- Akavci SS, Tanrikulu AH. (2008), "Buckling and free vibration analyses of laminated composite plates by using two new hyperbolic shear-deformation theories", *Mech Compos Mater*, **44**(2), 145–154.
- Akbaş, Ş.D. (2018), "Bending of a cracked functionally graded nanobeam", *Advances in Nano Research*, **6**(3), 219-243.
- Akgöz, B, Civalek, Ö. (2011a), "Strain gradient elasticity and modified couple stress models for buckling analysis of axially loaded micro-scaled beams", *Int J Eng Sci*, **49**, 1268–1280.
- Akgöz, B, Civalek, Ö. (2011b), "Application of strain gradient elasticity theory for buckling analysis of protein microtubules", *Curr Appl Phys*, **11**, 1133–1138.
- Akgöz, B, Civalek, Ö. (2012a), "Analysis of micro-sized beams for various boundary conditions based on the strain gradient elasticity theory", *Arch Appl Mech*, **82**, 423–443.
- Akgöz, B, Civalek, Ö. (2012b), "Analysis of microtubules based on strain gradient elasticity and modified couple stress theories", *Advances in Vibration Engineering*, **11**(4), 385-400.
- Akgöz, B, Civalek, Ö. (2013a), "Longitudinal vibration analysis of strain gradient bars made of functionally graded materials (FGM)", *Compos Part B-Eng*, **55**, 263–268.
- Akgöz, B, Civalek, Ö. (2013b), "A size-dependent shear deformation beam model based on the strain gradient elasticity theory", *Int J Eng Sci*, **70**, 1–14.
- Akgöz, B, Civalek, Ö. (2013c), "Buckling analysis of functionally graded microbeams based on the strain gradient theory", *Acta Mech*, **224**, 2185–2201.
- Akgöz, B, Civalek, Ö. (2014a), "Mechanical analysis of isolated microtubules based on a higher-order shear deformation beam theory", *Composite Structures*, **118**, 9–18.
- Akgöz, B, Civalek, Ö. (2014b), "Longitudinal vibration analysis for microbars based on strain gradient elasticity theory", *J Vibr Control*, **20**, 606–616.

- Akgöz, B, Civalek, Ö. (2014c), "Shear deformation beam models for functionally graded microbeams with new shear correction factors", *Compos Struct*, **112**, 214–225.
- 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.
- Ambartsumian SA. (1960), "On the theory of bending of anisotropic plates and shallow shells". *J Appl Math Mech*, **24**(2), 500–514.
- Amos, LA, Amos, WB. (1991), "Molecules of the cytoskeleton", *London: MacMillan*.
- Ando Y., Zhao X., Hirahara K. (2000)," Mass production of single-wall carbon nanotubes by the arc plasma jet method " *Chemical Physics Letters*, **323**, 580-585
- Ansari R, Ramezannezhad H. (2011) "Nonlocal Timoshenko beam model for the large-amplitude vibrations of embedded multiwalled carbon nanotubes including thermal effects", *Low Dimens Syst Nanostruct*, **43**, 1171–1178.
- Ansari, R, Gholami, R, Sahmani, S. (2011), "Free vibration analysis of size-dependent functionally graded microbeams based on the strain gradient Timoshenko beam theory", *Compos Struct*, **94**, 221–228.
- Ansari, R. and Ramezannezhad, H., (2011), "Nonlocal Timoshenko beam model for the largeamplitude vibrations of embedded multiwalled carbon nanotubes including thermal effects", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, **43**(6), 1171-1178.
- Ansari, R., Gholami, R., and Darabi, M., (2011a), "Thermal buckling analysis of embedded single- walled carbon nanotubes with arbitrary boundary conditions using the nonlocal Timoshenko beam theory" *Journal of Thermal Stresses*, **34**(12), 1271–1281.
- Ansari, R., Gholami, R., and Darabi, M., (2012c), "Nonlinear free vibration of embedded double- walled carbon nanotubes with layerwise boundary conditions", *Acta Mechanica*, **223**(12), 2523–2536.
- Ansari, R., Gholami, R., and Sahmani, S., (2013), "Prediction of compressive post-buckling behavior of single-walled carbon nanotubes in thermal environments", *Applied Physics A*, **113**, 145-153.
- Arefi, M., Bidgoli, E.M.R., Zenkour, A.M. (2018), "Size-dependent free vibration and dynamic analyses of a sandwich microbeam based on higher-order sinusoidal shear deformation theory and strain gradient theory", *Smart Structures and Systems*, **22**(1), 27-40.

- Artan, R, Toksöz, A. (2013), "Stability analysis of gradient elastic beams by the method of initial value", *Arch Appl Mech*, **83**, 1129–1144.
- Arthur Molines. Organisation du réseau cortical de microtubules chez *Arabidopsis thaliana* : contribution des protéines EB1 et MAP65-1. Biologie cellulaire. Université Paris-Saclay, 2016.
- Arya H, Shimpi RP, Naik NK. (2002), "A zigzag model for laminated composite beams", *Compos Struct*, **56**(1), 21–24.
- Asghari, M, Kahrobaian, MH, Nikfar, M, Ahmadian, MT. (2012), "A size-dependent nonlinear Timoshenko microbeam model based on the strain gradient theory", *Acta Mech*, **223**, 1233–1249.
- Atabakhshian, V., Arani, A. G., and Shajari, A., (2013), "Flow-induced instability smart control of elastically coupled double-nanotube-systems", *Journal of Solid Mechanics*, **5**(1), 22-34.
- Atabakhshian, V., Shooshtari, A., and Karimi, M., (2015), "Electro-thermal vibration of a smart coupled nanobeam system with an internal flow based on nonlocal elasticity theory. *Physica B: Condensed Matter*, **456**,375-382.
- Attia, A., Bousahla, A.A., Tounsi, A., Mahmoud, S.R., Alwabli, A.S. (2018), "A refined four variable plate theory for thermoelastic analysis of FGM plates resting on variable elastic foundations", *Struct. Eng. Mech.*, **65**(4), 453-464.
- Attia, A., Tounsi, A., Adda Bedia, E.A. and Mahmoud, S.R. (2015), "Free vibration analysis of functionally graded plates with temperature-dependent properties using various four variable refined plate theories", *Steel Compos. Struct.*, **18**(1),187-212.
- Aubouin, J., Brousse, R., Lehman, J. P.(1968) , *Précis de Géologie, Ed. Dunod, Paris*.
- Avcar, M. (2015), "Effects of rotary inertia shear deformation and non-homogeneity on frequencies of beam", *Structural Engineering and Mechanics*, **55**(4), 871-884.
- Avcar, M. (2016), "Effects of material non-homogeneity and two parameter elastic foundation on fundamental frequency parameters of Timoshenko beams", *Acta Physica Polonica A*, **130**(1), 375-378.
- Avcar, M. (2019), "Free vibration of imperfect sigmoid and power law functionally graded beams", *Steel and Composite Structures*, **30**(6), 603-615.

- Ayat, H., Kellouche, Y., Ghrici, M., Boukhatem, B. (2018), "Compressive strength prediction of limestone filler concrete using artificial neural networks", *Advances in Computational Design*, **3**(3), 289-302.
- Aydogdu M. (2009), "A new shear deformation theory for laminated composite plates", *Compos Struct.*, **89**(1), 94–101.
- B. Akgoz, O. Civalek, (2011), "Application of strain gradient elasticity theory for buckling analysis of protein microtubules", *Curr. Appl. Phys.* **11**(5) 1133– 1138.
- B.I. Yakobson, C.J Brabec, J. Bernholc (1996), "Nanomechanics of Carbon Tubes: Instabilities beyond Linear Response" *Phys. Rev. Lett.* **76**, 2511-2514.
- Bacon, R. (1960), "Growth, structure, and properties of graphite whiskers", *Journal of Applied Physics*, **31**, 283-290.
- Bakhadda, B., Bachir Bouiadjra, M., Bourada, F., Bousahla, A.A., Tounsi, A., Mahmoud, S.R. (2018), "Dynamic and bending analysis of carbon nanotube-reinforced composite plates with elastic foundation", *Wind and Structures*, **27**(5), 311-324.
- Bandow S, et al. (2001), "Raman scattering study of double-wall carbon nanotubes derived from the chains of fullerenes in single-wall carbon nanotubes", *Chem Phys Lett*, **337**(1):48-54.
- Behera, S., Kumari, P. (2018), "Free vibration of Levy-type rectangular laminated plates using efficient zig-zag theory", *Advances in Computational Design*, **3**(3), 213-232.
- Belabed, Z, Houari , MSA, Tounsi, A, Mahmoud, SR, Anwar Bég, O. (2014), "An efficient and simple higher order shear and normal deformation theory for functionally graded material (FGM) plates", *Compos. B Eng.*, **60**, 274–283.
- Belabed, Z., Bousahla, A.A., Houari, M.S.A., Tounsi, A., Mahmoud, S.R. (2018), "A new 3-unknown hyperbolic shear deformation theory for vibration of functionally graded sandwich plate", *Earthquakes and Structures*, **14**(2), 103-115.
- 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.
- Beldjelili, Y., Tounsi, A. and Mahmoud, S.R. (2016), "Hygro-thermo mechanical bending of S-FGM plates resting on variable elastic foundations using a four-variable trigonometric plate theory", *Smart Struct. Syst.*, **18**(4), 755-786.

- Belkorissat, I., Houari, M.S.A., Tounsi, A., Adda Bedia, 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.
- Bellifa, H., Bakora, A., Tounsi, A., Bousahla, A.A. and Mahmoud, S.R. (2017b), "An efficient and simple four variable refined plate theory for buckling analysis of functionally graded plates", *Steel Compos. Struct.*, **25**(3), 257-270.
- Bellifa, H., Benrahou, K.H., Bousahla, A.A., Tounsi, A. and Mahmoud, S.R. (2017a), "A nonlocal zeroth-order shear deformation theory for nonlinear postbuckling of nanobeams", *Struct. Eng. Mech.*, **62**(6), 695-702.
- Bellifa, H., Benrahou, K.H., Hadji, L., Houari, M.S.A. and Tounsi, A. (2016), "Bending and free vibration analysis of functionally graded plates using a simple shear deformation theory and the concept the neutral surface position", *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, **38**, 265-275.
- Benchohra, M., Driz, H., Bakora, A., Tounsi, A., Adda Bedia, E.A. and Mahmoud, S.R. (2018), "A new quasi-3D sinusoidal shear deformation theory for functionally graded plates", *Struct. Eng. Mech.*, **65**(1), 19-31.
- Bendaho, B., Belabed, Z., Bourada, M., Benatta, M.A., Bourada, F., Tounsi, A. (2019), "Assessment of new 2D and quasi-3D Nonlocal theories for free vibration analysis of size-dependent functionally graded (FG) nanoplates", *Advances in Nano Research*, **7**(4), 279-294.
- Bennoun, M., Houari, M.S.A., Tounsi, A. (2016), "A novel five variable refined plate theory for vibration analysis of functionally graded sandwich plates", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, **23**(4), 423 – 431.
- Bensaid, I., Bekhadda, A., Kerboua, B. (2018), "Dynamic analysis of higher order shear-deformable nanobeams resting on elastic foundation based on nonlocal strain gradient theory", *Advances in nano research*, **6**(3), 279-298.
- Bensattalah, T., Bouakkaz, K., Zidour, M., Daouadji, T.H. (2018), "Critical buckling loads of carbon nanotube embedded in Kerr's medium", *Advances in Nano Research*, **6**(4), 339-356.
- Bensattalah, T., Zidour, M., Daouadji, T.S. (2019), "A new nonlocal beam model for free vibration analysis of chiral single-walled carbon nanotubes", *Composite Materials and Engineering*, **1**(1), 21-31.
- Bensattalah, Tayeb, et al. (2020), "Critical Buckling Load of Triple-Walled Carbon Nanotube Based on Nonlocal Elasticity Theory." *Journal of Nano Research*, **62**, 108–119.

- 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", *Journal of Physics D: Applied Physics*, **41**(22), 225404.
- Bessaim, A., Houari, M.S.A., Tounsi, A., Mahmoud, S.R, Adda Bedia, E.A. (2013), "A new higher order shear and normal deformation theory for the static and free vibration analysis of sandwich plates with functionally graded isotropic face sheets", *J. Sandwich Struct. Mater.*, **15**(6), 671–703.
- Besseghier, A, Houari, MSA, Tounsi, A, Mahmoud, SR. (2017), "Free vibration analysis of embedded nanosize FG plates using a new nonlocal trigonometric shear deformation theory", *Smart Struct. Syst.*, **19**(6), 601–614.
- Bethune DS, et al. (1993), "Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layers walls", *Nature*, 363:605-7
- Bondi, S.; Lackey, W.; Johnson, R.; Wang, X.; Wang, Z. (2006)," Laser assisted chemical vapor deposition synthesis of carbon nanotubes and their characterization", *Carbon*, **44**, 1393–1403.
- Borisy G., Heald R., Howard J., Janke C., Musacchio A., Nogales E., (2016), "Microtubules : 50 years on from the discovery of tubulin", *Nat. Rev. Mol. Cell. Biol.* **22**, **17**(5), 322-28.
- Borisy G.G. and Taylor E.W., (1967a)," The mechanism of action of colchicine. Binding of colchicine- 3H to cellular protein", *J. Cell Biol.* **34**(2), 525-33.
- Borisy G.G. and Taylor E.W., (1967b), "The mechanism of action of colchicine. Colchicine binding to sea urchin eggs and the mitotic apparatus", *J. Cell Biol.* **34**(2), 535-48.
- Bouadi, A., Bousahla, A.A., Houari, M.S.A., Heireche, H., Tounsi, A. (2018), "A new nonlocal HSDT for analysis of stability of single layer graphene sheet", *Advances in Nano Research*, **6**(2), 147-162.
- Bouafia, K., Kaci, A., Houari, M. S. A., Benzair, A., Tounsi, A. (2017), "A nonlocal quasi-3D theory for bending and free flexural vibration behaviors of functionally graded nanobeams", *Smart Structures and Systems*. **19**(2), 115-126.
- Bouderba, B., Houari, M. S. A., Tounsi, A. and Mahmoud, S.R. (2016), "Thermal stability of functionally graded sandwich plates using a simple shear deformation theory", *Struct. Eng. Mech.*, **58**(3), 397-422.

- Bouderba, B., Houari, M.S.A. and Tounsi, A. (2013), “Thermomechanical bending response of FGM thick plates resting on Winkler-Pasternak elastic foundations”, *Steel Comp. Struct.*, **14**(1), 85-104.
- Bouhadra, A., Tounsi, A., Bousahla, A.A., Benyoucef, S., Mahmoud, S.R. (2018), “Improved HSDT accounting for effect of thickness stretching in advanced composite plates”, *Struct. Eng. Mech.*, **66**(1), 61-73.
- Boukhari, A., Ait Atmane, H., Houari, M.S.A., Tounsi, A., Adda Bedia, E.A. and Mahmoud, S.R. (2016), “An efficient shear deformation theory for wave propagation of functionally graded material plates”, *Struct. Eng. Mech.*, **57**(5), 837-859.
- Boukhelif, Z., Bouremana, M., Bourada, F., Bousahla, A.A., Bourada, M., Tounsi, A., Al-Osta, M.A. (2019), “A simple quasi-3D HSDT for the dynamics analysis of FG thick plate on elastic foundation”, *Steel and Composite Structures*, **31**(5), 503-516.
- Boulefrakh, L., Hebali, H., Chikh, A., Bousahla, A.A., Tounsi, A., Mahmoud, S.R. (2019), "The effect of parameters of visco-Pasternak foundation on the bending and vibration properties of a thick FG plate", *Geomechanics and Engineering*, **18**(2), 161-178.
- Bounouara, F., Benrahou, K.H., Belkorissat, I. and Tounsi, A. (2016), “A nonlocal zeroth-order shear deformation theory for free vibration of functionally graded nanoscale plates resting on elastic foundation”, *Steel Compos. Struct.*, **20**(2), 227-249.
- Bourada, F., Amara, K., Bousahla, A.A., Tounsi, A., Mahmoud, S.R. (2018), “A novel refined plate theory for stability analysis of hybrid and symmetric S-FGM plates”, *Structural Engineering and Mechanics*, **68**(6), 661-675.
- Bourada, F., Amara, K., Tounsi, A. (2016), “Buckling analysis of isotropic and orthotropic plates using a novel four variable refined plate theory”, *Steel and Composite Structures*, **21**(6), 1287 – 1306.
- Bourada, F., Bousahla, A.A., Bourada, M., Azzaz, A., Zinata, A., Tounsi, A. (2019), “Dynamic investigation of porous functionally graded beam using a sinusoidal shear deformation theory”, *Wind and Structures*, **28**(1), 19-30.
- 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.

- Bourada, M., Kaci, A., Houari, M.S.A., Tounsi, A. (2015), "A new simple shear and normal deformations theory for functionally graded beams", *Steel and Composite Structures*, **18**(2), 409 – 423.
- Bousahla, A.A., Benyoucef, S., Tounsi, A. and Mahmoud, S.R. (2016), "On thermal stability of plates with functionally graded coefficient of thermal expansion", *Struct. Eng. Mech.*, **60**(2), 313-335.
- Bousahla, A.A., Houari, M.S.A., Tounsi, A. and Adda Bedia, 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. Computat. Methods*, **11**(6), 1350082.
- Boutaleb, S., Benrahou, K.H., Bakora, A., Algarni, A., Bousahla, A.A., Tounsi, A., Mahmoud, S.R., Tounsi, A. (2019), "Dynamic Analysis of nanosize FG rectangular plates based on simple nonlocal quasi 3D HSDT", *Advances in Nano Research*, **7**(3), 189-206.
- C. Demir, Ö. Civalek, B. Akgöz, (2010), "Free vibration analysis of carbon nanotubes based on shear deformable beam theory by discrete singular convolution technique", *Math. Comput. Appl.* **15**(1), 57–65.
- Carter, N.J., Cross, R.A. (2005), "Mechanics of the kinesin step", *Nature*, **435**, 308-312.
- Cassell, A. M.; Raymakers, J. A.; Kong, J.; Dai, H. (1999), *The Journal of Physical Chemistry B*, **103**, 6484–6492.
- Caudron N, Arnal I, Buhler E, Job D, Valiron O. (2002), "Microtubule nucleation from stable tubulin oligomers", *The Journal of biological chemistry*, **277**(52), 50973-50979.
- Cecilia Conde and Alfredo Cáceres (2009), "Microtubule assembly, organization and dynamics in axons and dendrites", *Nature reviews. Neuroscience*, **10**(5), 319–332.
- Chaabane, L.A., Bourada, F., Sekkal, M., Zerouati, S., Zaoui, F.Z., Tounsi, A., Derras, A., Bousahla, A.A., Tounsi, A. (2019), "Analytical study of bending and free vibration responses of functionally graded beams resting on elastic foundation", *Structural Engineering and Mechanics*, **71**(2), 185-196.
- Chemi, A., Heireche, H., Zidour, M., Rakrak, K. and Bousahla, A.A. (2015), "Critical buckling load of chiral double-walled carbon nanotube using non-local theory elasticity", *Adv. Nano Res.*, **3**(4), 193-206.
- Cherif, R.H., Meradjah, M., Zidour, M., Tounsi, A., Belmahi, H., Bensattalah, T. (2018), "Vibration analysis of nano beam using differential transform method including thermal effect", *Journal of Nano Research*, **54**, 1-14.

- Chikh, A., Tounsi, A., Hebali, H. and Mahmoud, S.R. (2017), “Thermal buckling analysis of cross-ply laminated plates using a simplified HSDT”, *Smart Struct. Syst.*, **19**(3), 289-297.
- Choi YM, Lee DS, Czerw R, Chiu PW, Grobert N, Terrones M, Reyes-Reyes M, Terrones H, Charlier JC, Ajayan PM, Roth S, Carroll DL, Park YW. (2003), “Nonlinear behavior in the thermopower of doped carbon nanotubes due to strong, localized states”, *Nano Lett*, **3**, 839.
- Chrétien, D., Metoz, F., Verde, F., Karsenti, E., & Wade, R. H. (1992), “Lattice defects in microtubules: Protofilament numbers vary within individual microtubules”, *Journal of Cell Biology*, **117**(5), 1031–1040.
- Chretien, D, Wade, RH. (1991), "New data on the microtubule surface lattice", *Biol Cell*, **71**,161–74.
- Civalek, Ö, Akgöz, B. (2010), "Free vibration analysis of microtubules as cytoskeleton components: nonlocal Euler–Bernoulli beam modeling", *Sci Iran Trans B –Mech Eng*, **17**, 367–375.
- Civalek, Ö, Demir, Ç, Akgöz, B. (2010), "Free vibration and bending analyses of cantilever microtubules based on nonlocal continuum model", *Math Comput Appl*, **15**, 289–298.
- D Chrétien and S D Fuller, (2000), “Microtubules switch occasionally into unfavorable configurations during elongation”, *Journal of molecular biology*, **298**, 663–676.
- Dai, H. (2002), “Carbon nanotubes: opportunities and challenges” *Surface Science*, **500**, 218-241.
- Dai, H. (2002), “Carbon nanotubes: synthesis, integration, and properties” *Accounts of Chemical Research*, **35**, 1035–1044.
- Dai, H.; Kong, J.; Zhou, C.; Franklin, N.; Tomblor, T.; Cassell, A.; Fan, S.; Chapline, M. (1999), *The Journal of Physical Chemistry B*, **103**, 11246–11255.
- Daneshmand, F, Amabili, M. (2012), "Coupled oscillations of a protein microtubule immersed in cytoplasm: an orthotropic elastic shell modeling", *J Biol Phys*, **38**, 429–448.
- Daouadji, T.H. (2017), “Analytical and numerical modeling of interfacial stresses in beams bonded with a thin plate”, *Advances in Computational Design*, **2**(1), 57-69.
- David Sept, Nathan a Baker, and J Andrew McCammon (2003), “The physical basis of microtubule structure and stability”, *Protein science: a publication of the Protein Society*, **12**(10), 2257–2261.

- Denis Chrétien and Richard H. Wade (1991), “New data on the microtubule surface lattice”, *Biology of the cell / under the auspices of the European Cell Biology Organization*, **71**(1-2), 161–174.
- Dihaj, A., Zidour, M., Meradjah, M., Rakrak, K., Heireche, H., & Chemi, A. (2018), “Free vibration analysis of chiral double-walled carbon nanotube embedded in an elastic medium using non-local elasticity theory and Euler Bernoulli beam model”, *Structural Engineering and Mechanics*, **65**(3), 335–342.
- Draiche, K., Bousahla, A.A., Tounsi, A., Alwabli, A.S., Tounsi, A., Mahmoud, S.R. (2019), “Static analysis of laminated reinforced composite plates using a simple first-order shear deformation theory”, *Computers and Concrete*, (submitted).
- Draiche, K., Tounsi, A. and Mahmoud, S.R. (2016), “A refined theory with stretching effect for the flexure analysis of laminated composite plates”, *Geomech. Eng.*, **11**(5), 671-690.
- Draoui, A., Zidour, M., Tounsi, A., Adim, B. (2019), “Static and dynamic behavior of nanotubes-reinforced sandwich plates using (FSDT)”, *Journal of Nano Research*, **57**, 117-135.
- Duty, C.; Jean, D.; Lackey, W. (2001); *International Materials Reviews*, **46**, 271–287.
- Dye, R. B., Fink, S. P., & Williams, R. C. (1993), “Taxol-induced flexibility of microtubules and its reversal by MAP-2 and Tau”. *Journal of Biological Chemistry*, **268**(10), 6847–6850.
- E. M. Mandelkow, R. Schultheiss, R. Rapp, and M. Müller (1986), “On the surface lattice of microtubules: Helix starts, protofilament number, seam, and handedness”, *Journal of Cell Biology*, **102**(3), 1067–1073,
- Ece, M. and Aydogdu, M., (2007), “Nonlocal elasticity effect on vibration of in-plane loaded doublewalled carbon nano-tubes”, *Acta Mechanica*, **190**(1-4), 185-195.
- Eckhard Mandelkow and Eva-Maria Mandelkow (1994), “Microtubule structure”, *Current Opinion in Structural Biology*, **4**(2), 171–179.
- Ehteshami, H. and Hajabasi, M., (2011), “Analytical approaches for vibration analysis of multiwalled carbon nanotubes modeled as multiple nonlocal Euler beams”, *Physica E: Low dimensional Systems and Nanostructures*, **44**(1), 270-285.
- El Meiche N, Tounsi A, Ziane N, Mechab I, Adda Bedia EA. (2011), “A new hyperbolic shear deformation theory for buckling and vibration of functionally graded sandwich plate”, *Int J Mech Sci*, **53**(4), 237–247 .

- El-Haina, F., Bakora, A., Bousahla, A.A., Tounsi, A. and Mahmoud, S.R. (2017), "A simple analytical approach for thermal buckling of thick functionally graded sandwich plates", *Struct. Eng. Mech.*, **63**(5), 585-595.
- Elmerabet, A.H., Heireche, H., Tounsi, A., Semmah, A. (2017), "Buckling temperature of a single-walled boron nitride nanotubes using a novel nonlocal beam model", *Advances in Nano Research*, **5**(1), 1-12.
- Elmerabet, Abderrahmane Hadj, Heireche, Houari, Tounsi, Abdelouahed, & Semmah, Abdelwahed. (2017), "Buckling temperature of a single-walled boron nitride nanotubes using a novel nonlocal beam model", *Advances in Nano Research*, **5**(1), 1–12.
- Eltaher, M.A., Fouda, N., El-midany, T., Sadoun, A.M. (2018), "Modified porosity model in analysis of functionally graded porous nanobeams", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **40**(3), 141.
- Eltaher, M.A., Khater, M.E., Park, S., Abdel-Rahman, E., Yavuz, M. (2016), "On the static stability of nonlocal nanobeams using higher-order beam theories", *Adv. Nano. Res*, **4**(1), 51-64.
- Endo M, et al. (1993), "The production and structure of pyrolytic carbon nanotubes (PCNTs)", *J Phys Chem Solid*, **54**:1841-8.
- Eringen, A.C. (1983), "On differential equations of nonlocal elasticity and solutions of screw dislocation and surface waves", *Journal of Applied Physics*, **54**, 4703–4710.
- Eringen, AC. (1967), "Theory of micropolar plates", *Z Angew Math Phys*, **18**, 12–30.
- Eringen, AC. (1972), "Nonlocal polar elastic continua", *Int J Eng Sci*, **10**, 1–16.
- Eringen, AC. (1983), "On differential equations of nonlocal elasticity and solutions of screw dislocation and surface waves", *J Appl Phys*, **54**, 4703–4710.
- Fakhar, A., Kolahchi, R. (2018), "Dynamic buckling of magnetorheological fluid integrated by visco-piezo-GPL reinforced plates", *International Journal of Mechanical Sciences*, **144**, 788–799.
- Faleh, N.M., Ahmed, R.A., Fenjan, R.M. (2018), "On vibrations of porous FG nanoshells", *International Journal of Engineering Science*, **133**, 1-14.
- Fan, S.; Chapline, M. G.; Franklin, N.; Tomblor, T. W.; Cassell, A. M.; Dai, H. (1999) , *Science*, **283**, 512–514.

- Felgner, H, Frank, R, Schliwa, M. (1996), "Flexural rigidity of microtubules measured with the use of optical tweezers", *J Cell Sci*, **109**, 509–516.
- Fischer R.S. and Fowler V.M., (2015), "Thematic minireview series: the state of the cytoskeleton", *J. Biol. Chem.* **290**(28), 17133-17136.
- Fleck, NA, Hutchinson, JW. (1993), "A phenomenological theory for strain gradient effects in plasticity", *J Mech Phys Solids*, **41**, 1825–1857.
- Flyvbjerg H, Jobs E, Leibler S. (1996), "Kinetics of self-assembling microtubules: an "inverse problem" in biochemistry", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **93**(12), 5975-5979.
- Fourn, H., Ait Atmane, H., Bourada, M., Bousahla, A.A., Tounsi, A., Mahmoud, S.R. (2018), "A novel four variable refined plate theory for wave propagation in functionally graded material plates", *Steel and Composite Structures*, **27**(1), 109-122.
- Francesco Pampaloni, Ernst-Ludwig Florin, (2008), "Microtubule architecture: inspiration for novel carbon nanotube-based biomimetic materials", *Trends in Biotechnology*, **26**(6), 302-310.
- Fu, Y, Zhang, J. (2010), "Modeling and analysis of microtubules based on a modified couple stress theory", *Physica E*, **42**, 1741–1745.
- Fu, Yiming & Zhang, Jin. (2010), "Modeling and analysis of microtubules based on a modified couple stress theory", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, **42**, 1741-1745.
- G. Overney, W. Zhong, D. Tománek, *Zeitschrift für Physik D.* (1993), "Atoms Molecules and Clusters". **27**, 93-96.
- Gao, Y, An, L. (2010), "A nonlocal elastic anisotropic shell model for microtubule buckling behaviors in cytoplasm", *Physica E*, **42**, 2406–2415.
- Gao, Y, Lei, FM. (2009), "Small scale effects on the mechanical behaviors of protein microtubules based on the nonlocal elasticity theory", *Biochem Biophys Res Commun*, **387**, 467–471.
- Ghavanloo, E, Daneshmand, F, Amabili, M. (2010), "Vibration analysis of a single microtubule surrounded by cytoplasm", *Physica E*, **43**, 192–198.
- Ghayesh, MH, Amabili, M, Farokhi, H. (2013), "Nonlinear forced vibrations of a microbeam based on the strain gradient elasticity theory", *Int J Eng Sci*, **63**, 52–60.

- Ghorbanpour Arani, Ali & Abdollahian, Mohammad & Jalaei, Mohammad. (2015), "Vibration of bioliquid-filled microtubules embedded in cytoplasm including surface effects using modified couple stress theory", *Journal of Theoretical Biology*, **367**, 29-38.
- Ghorbanpour Arani, Ali & Abdollahian, Mohammad & Jalaei, Mohammad. (2015), "Vibration of bioliquid-filled microtubules embedded in cytoplasm including surface effects using modified couple stress theory", *Journal of Theoretical Biology*, **367**, 29-38.
- Gittes, F, Mickey, B, Nettleton, J, Howard, J. (1993), "Flexural rigidity of microtubules and actin filaments measured from thermal fluctuations in shape", *J Cell Biol*, **120**, 923–934.
- Gittes, F., Mickey, B., Nettleton, J., & Howard, J. (1993), "Flexural rigidity of microtubules and actin filaments measured from thermal fluctuations in shape", *Journal of Cell Biology*, **120**(4), 923–934.
- Guillaume Herlem, Fabien Picaud, Claude Girardet, Olivier Micheau. (2019), "Chapter 16 - Carbon Nanotubes: Synthesis, Characterization, and Applications in Drug-Delivery Systems", *In Micro and Nano Technologies, Nanocarriers for Drug Delivery*, 469-529,
- Guo T, et al. (1995), "Catalytic growth of single-walled nanotubes by laser vaporization", *Chem Phys Lett*. **243**, 49-54.
- Güven, U. (2014), "Love–Bishop rod solution based on strain gradient elasticity theory", *C R Mecanique*, **342**, 8–16.
- H.-Y. Chiu, V.V. Deshpande, H.W. Ch. Postma, C. N. Lau, C. Miko, L. Forro, and M. Hafner, J. H.; Bronikowski, M. J.; Azamian, B. R.; Nikolaev, P.; Rinzler, A. G.; Colbert, D. T.; Smith, K. A.; Smalley, R. E. (1998), *Chemical Physics Letters*, **296**, 195–202.
- Hachemi, H., Kaci, A., Houari, M.S.A., Bourada, A., Tounsi, A., Mahmoud, S.R. (2017), "A new simple three-unknown shear deformation theory for bending analysis of FG plates resting on elastic foundations", *Steel and Composite Structures*, **25**(6), 717-726.
- 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 Comp. Struct.*, **18**(1), 235-253.
- Hawkins, T., Mirigian, M., Selcuk Yasar, M., & Ross, J. L. (2010), "Mechanics of microtubules", *Journal of Biomechanics*, **43**(1), 23–30.
- Hebali, H., Tounsi, A., Houari, M.S.A., Bessaim, A., Adda Bedia, E.A. (2014), "New quasi-3D hyperbolic shear deformation theory for the static and free vibration analysis of functionally graded plates", *J. Eng. Mech. (ASCE)*, **140**(2), 374–383.

- Heireche, H., Tounsi, A., Benhassaini, H., Benzair, A., Bendahmane, M., Missouri, M., et al. (2010), "Nonlocal elasticity effect on vibration characteristics of protein microtubules", *Physica E*, **42**, 2375–2379.
- Heireche, H., Tounsi, A., Benhassaini H., Benzair A., Bendahmane M., Missouri M., and Mokadem S., (2010), "Nonlocal elasticity effect on vibration characteristics of protein microtubules" *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 42(9), 2375-2379.
- Heireche, H., Tounsi, A., Benzair, A., and Mechab, I., (2008b), "Sound wave propagation in single walled carbon nanotubes with initial axial stress", *Journal of Applied Physics*, **104**(1).
- Heireche, H., Tounsi, A., Benzair, A., Maachou, M., and Adda Bedia, E., (2008a), "Sound wave propagation in single-walled carbon nanotubes using nonlocal elasticity", *Physica E: Low dimensional Systems and Nanostructures*, **40**(8), 2791-2799.
- Helène Henrie. Régulation de la dynamique des microtubules par la kinase de stress JNK dans les cellules épithéliales : caractérisation de CLIP-170 comme un nouveau substrat. Biologie moléculaire. Université Paris-Saclay, 2017.
- Hellal, H., Bourada, M., Hebali, H., Bourada, F., Tounsi, A., Bousahla, A.A., Mahmoud, S.R. (2019), "Dynamic and stability analysis of functionally graded material sandwich plates in hygro-thermal environment using a simple higher shear deformation theory", *Journal of Sandwich Structures & Materials*. <https://doi.org/10.1177/1099636219845841>.
- Helland A, Wick P, Koehler A, Schmid K, Som C. (2007), "Reviewing the environmental and human health knowledge base of carbon nanotubes", *Environ Health Perspect*, **115**, 1125.
- Hoffman, P.N., D.W. Cleveland, J.W. Griffin, P.W. Landes, N.J. Cowan, and D.L. Price (1987), "Neurofilament gene expression: a major determinant of axonal caliber", *Proc Natl Acad Sci U S A*. **84**, 3472-3476.
- Hofmann, S.; Ducati, C.; Robertson, J.; Kleinsorge, B. (2003), *Applied Physics Letters*, **83**, 135–137.
- Horio, T., and H. Hotani (1986), "Visualization of the dynamic instability of individual microtubules by dark-field microscopy", *Nature*, 321,605–607.
- Houari, M.S.A., Tounsi, A., Bessaim, A. and Mahmoud, S.R. (2016), "A new simple three – unknown sinusoidal shear deformation theory for functionally graded plates", *Steel Compos. Struct.*, **22** (2), 257-276.
- HOUDY P., BRÉCHIGNAC C., LAHMANI M. – Les nanosciences. 2- Nano- matériaux et nanochimie. La collection Échelles, Éditions Belin, 2006, 687 p.

- HOUDYP., DUPASC., LAHMANIM. – Les nanosciences. 1- Nanotechnologies et nano-physique. La collection Échelles, Éditions Belin, 2006, 735 p.
- Howard, J, Hyman, AA. (2003), "Dynamics and mechanics of the microtubule plus end", *Nature*, **422**, 753–758.
- Hu, Y., Liew, K., and Wang, Q., (2009), "Nonlocal elastic beam models for flexural wave propagation in double-walled carbon nanotubes", *Journal of Applied Physics*, **106**(4).
- Huang, Y., Luo, Q., and Li, X., (2013), "Transverse waves propagating in carbon nanotubes via a higher-order nonlocal beam model", *Composite Structures*, **95**, 328-336.
- Huber, F., Schnauß, J., Rönicke, S., Rauch, P., Müller, K., Fütterer, C., & Käs, J. (2013), "Emergent complexity of the cytoskeleton: From single filaments to tissue", *Advances in Physics*, **62**(1), 1–112.
- Hussain, M., Naeem, M.N., Tounsi, A., Taj, M. (2019), "Nonlocal effect on the vibration of armchair and zigzag SWCNTs with bending rigidity", *Advances in Nano Research*, (Accepted).
- Hyman, Anthony & Salser, S & Drechsel, David & Unwin, N & Mitchison, Timothy. (1992), "Role of GTP hydrolysis in microtubule dynamics: Information from a slowly hydrolyzable analogue, GMPCPP", *Molecular biology of the cell*. **3**, 1155-1167.
- I.W. Chiang, B.E. Brinson, R.E. Smalley, J.L. Margrave, R.H. Hauge (2001), "Purification and characterization of single-wall carbon nanotubes", *J. Phys. Chem. B* **105** 1157–1161.
- Ibrahim, K. S. (2013), "Carbon nanotubes-properties and applications: a review". *Carbon Letters*, **14**(3), 131–144.
- Iijima S, Ichihashi T. (1993), "Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter", *Nature*, **363**:603-605.
- Iijima, S. (1991), "Helical microtubules of graphitic carbon", *Nature* **354**, 56–58.
- Imani Aria, Arash & Biglari, Hasan. (2017), "Computational Vibration and Buckling Analysis of Microtubule Bundles based on Nonlocal Strain Gradient Theory", *Applied Mathematics and Computation*, **321**.
- J. Liu, A. Rinzler, H. Dai, J. Hafner, R. Bradley, P. Boul, A. Lu, T. Iverson, K. Shelimov, C. Huffman, F. Rodriguez-Macias, Y.-S. Shon, T. Lee, D. Colbert et R. Smalley (1998): *Science*, 280, 1253–1256.

J.P. Lu, (1997), "Elastic Properties of Carbon Nanotubes and Nanoropes" *Phys. Rev. Lett.* **79**, 1297-1300.

J.Y. Huang, S. Chen, Z.Q. Wang, K. Kempa, Y.M. Wang, S.H. Jo, G. Chen, M.S. Dresselhaus, Z.F. Ren (2006), *Nature*, **439**, 281-281.

Jandaghian, A.A., Rahmani, O. (2017), "Vibration analysis of FG nanobeams based on third-order shear deformation theory under various boundary conditions", *Steel and Composite Structures*, **25**(1), 67-78.

Jang, I.; Uh, H. S.; Cho, H. J.; Lee, W.; Hong, J. P.; Lee, N. (2007), "Characteristics of carbon nanotubes grown by mesh-inserted plasma-enhanced chemical vapor deposition", *Carbon*, **45**, 3015– 3021.

Janson, M. E., & Dogterom, M. (2004), "A bending mode analysis for growing microtubules: evidence for a velocity-dependent rigidity", *Biophysical Journal*, **87**(4), 2723–2736.

Jordan Hervy. Modélisation de l'interaction dynamique protéines Tau - microtubules. Biophysique, Université Grenoble Alpes, 2018.

Journet C, et al. (1997) "Large-scale production of SWNT by electric arc technique", *Nature*; **388**, 217-223.

Kaci, A., Houari, M.S.A., Bousahla, A.A., Tounsi, A., Mahmoud, S.R. (2018), "Post-buckling analysis of shear-deformable composite beams using a novel simple two-unknown beam theory", *Structural Engineering and Mechanics*, **65**(5), 621-631.

Kaczkowski Z. (1968), "Plates-statistical calculations", *Warsaw: Arkady*.

Kadari, B., Bessaim, A., Tounsi, A., Heireche, H., Bousahla, A.A., Houari, M.S.A. (2018), "Buckling analysis of orthotropic nanoscale plates resting on elastic foundations", *Journal of Nano Research*, **55**, 42-56.

Kahrobaian, MH, Asghari, M, Ahmadian, MT. (2013), "Longitudinal behavior of strain gradient bars", *Int J Eng Sci*, **66**, 44–59.

Kahrobaian, MH, Asghari, M, Rahaeifard, M, Ahmadian, MT. (2011b), "A nonlinear strain gradient beam formulation", *Int J Eng Sci*, **49**, 1256–1267.

Kahrobaian, MH, Rahaeifard, M, Tajalli, SA, Ahmadian, MT. (2012), "A strain gradient functionally graded Euler–Bernoulli beam formulation", *Int J Eng Sci*, **52**, 65–76.

Kahrobaian, MH, Tajalli, SA, Movahhedy, MR, Akbari, J, Ahmadian, MT. (2011a), "Torsion of strain gradient bars", *Int J Eng Sci*, **49**, 856–866.

- Kar, V.R., Mahapatra, T.R., Panda, S.K. (2017), "Effect of different temperature load on thermal postbuckling behaviour of functionally graded shallow curved shell panels", *Composite Structures*, **160**, 1236-1247.
- Karama M, Afaq KS, Mistou S. (2003), "Mechanical behaviour of laminated composite beam by the new multi-layered laminated composite structures model with transverse shear stress continuity", *Int J Solids Struct.*, **40**(6), 1525–1546.
- Karami, B., Janghorban, M. and Tounsi, A. (2018a), "Galerkin's approach for buckling analysis of functionally graded anisotropic nanoplates/different boundary conditions", *Engineering with Computers*. <https://doi.org/10.1007/s00366-018-0664-9>.
- Karami, B., Janghorban, M., Shahsavari, D., Tounsi, A. (2018c), "A size-dependent quasi-3D model for wave dispersion analysis of FG nanoplates", *Steel and Composite Structures*, **28**(1), 99-110.
- Karami, B., Janghorban, M., Tounsi, A. (2017), "Effects of triaxial magnetic field on the anisotropic nanoplates", *Steel and Composite Structures*, **25**(3), 361-374.
- Karami, B., Janghorban, M., Tounsi, A. (2018d), "Nonlocal strain gradient 3D elasticity theory for anisotropic spherical nanoparticles", *Steel and Composite Structures*, **27**(2), 201-216.
- Karami, B., Janghorban, M., Tounsi, A. (2018e), "Variational approach for wave dispersion in anisotropic doubly-curved nanoshells based on a new nonlocal strain gradient higher order shell theory", *Thin-Walled Structures*, **129**, 251–264.
- Karami, B., Janghorban, M., Tounsi, A. (2019a), "On exact wave propagation analysis of triclinic material using three dimensional bi-Helmholtz gradient plate model", *Structural Engineering and Mechanics*, **69**(5), 487-497.
- Karami, B., Shahsavari, D., Janghorban, M. (2018b), "Wave propagation analysis in functionally graded (FG) nanoplates under in-plane magnetic field based on nonlocal strain gradient theory and four variable refined plate theory", *Mech. Adv. Mat. Struct.*, **25**(12), 1047-1057.
- Kasas, S, Kis, A, Riederer, BM, Forro, L, Dietler, G, Catsicas, S. (2004), "Mechanical properties of microtubules explored using the finite elements method", *Chem Phys Chem*, **5**, 252–257.
- Ke, L., Xiang, Y., Yang, J., and Kitipornchai S., (2009), "Nonlinear free vibration of embedded double-walled carbon nanotubes based on nonlocal Timoshenko beam theory", *Computational Materials Science*, **47**(2), 409-417.

- Khetir, H., Bachir Bouiadjra, M., Houari, M.S.A., Tounsi, A. and Mahmoud, S.R. (2017), "A new nonlocal trigonometric shear deformation theory for thermal buckling analysis of embedded nanosize FG plates", *Struct. Eng. Mech., Int. J.*, **64**(4), 391-402.
- Khiloun, M., Bousahla, A.A., Kaci, A., Bessaim, A., Touns, A., Mahmoud, S.R. (2019), "Analytical modeling of bending and vibration of thick advanced composite plates using a four-variable quasi 3D HSDT", *Engineering with Computers.*, <https://doi.org/10.1007/s00366-019-00732-1>.
- Khosrozadeh, A. and Hajabasi, M., (2012), "Free vibration of embedded double-walled carbon nanotubes considering nonlinear interlayer van der Waals forces", *Applied Mathematical Modelling*, **36**(3), 997-1007.
- Kiani, K. (2013b), "Vibration analysis of elastically restrained double-walled carbon nanotubes on elastic foundation subjected to axial load using nonlocal shear deformable beam theories", *International Journal of Mechanical Sciences*, **68**, 16-34.
- Kikumoto, M, Kurachi, M, Tosa, V, Tashiro, H. (2006), "Flexural rigidity of individual microtubules measured by a buckling force with optical traps", *Biophys J*, **90**, 1687–1696.
- Kis, A, Kasas, S, Babic, B, Kulik, AJ, Benoit, W, Briggs, GAD, et al. (2002), "Nanomechanics of microtubules", *Phys Rev Lett*, **89**, 248101.
- Koiter, WT. (1964), "Couple-stresses in the theory of elasticity: I and II", *Proc K Ned Akad Wet B*, **67**, 17–44.
- Kong, J.; Cassell, A. M.; Dai, H. (1998), "Chemical vapor deposition of methane for single-walled carbon nanotubes" *Chemical Physics Letters*, **292**, 567–574.
- Kong, J.; Soh, H. T.; Cassell, A. M.; Quate, C. F.; Dai, H. (1998), "Multilayer Film Assembly of Carbon Nanotubes" *Nature*, **395**, 878– 881.
- Kononova O., Kholodov Y., Theisen K.E., Marx K.A, Dima R.I, Ataulakhanov F.I, Grishchuk E.L., Barsegov V., (2015), 'Tubulin bond energies and microtubule biomechanics determined from nanoindentation in silico', *J. Biomol. Struct. Dyn.* **33**, 35-36.
- Krätshmer, W., Lamb, L.D., Fostiropoulos, K., Huffman, D.R. (1960), "Solid C60: a new form of carbon", *Nature*, **347**, 354-358.
- Kroto, H.; Heath, J.; O'Brien, S.; Curl, R.; Smalley, R. 1985," C60: Buckminsterfullerene" *Nature*, **318**, 162–163.

- Kurachi, M, Hoshi, M, Tashiro, H. (1995), "Buckling of a single microtubule by optical trapping forces: direct measurement of microtubule rigidity", *Cell Motil Cytoskel*, **30**, 221–228.
- Kurachi, M., Hoshi, M., & Tashiro, H. (1995), "Buckling of a single microtubule by optical trapping forces: Direct measurement of microtubule rigidity", *Cell Motility and the Cytoskeleton*, **30**(3), 221–228.
- Lal, A., Jagtap, K.R., Singh, B.N. (2017), "Thermo-mechanically induced finite element based nonlinear static response of elastically supported functionally graded plate with random system properties", *Advances in Computational Design*, **2**(3), 165-194.
- Lam CW, James JT, McCluskey R, Arepalli S, Hunter RL. (2006), "A review of carbon nanotube toxicity and assessment of potential occupational and environmental health risks", *Crit Rev Toxicol*, **36**, 189.
- Lam, DCC, Yang, F, Chong, ACM, Wang, J, Tong, P. (2003), "Experiments and theory in strain gradient elasticity", *J Mech Phys Solids*, **51**, 1477–1508.
- 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.
- Larousserie D., (2016). Voyage au cœur des cellules : Microtubules, la vie ne tient qu'à leurs fils. *Le Monde – Science & Médecine*.
- Lei, J, He, Y, Zhang, B, Gan, Z, Zeng, P. (2013), "Bending and vibration of functionally graded sinusoidal microbeams based on the strain gradient elasticity theory", *Int J Eng Sci*, **72**, 36–52.
- Levinson M. (1980), "An accurate, simple theory of the statics and dynamics of elastic plates", *Mech Res Commun*, **7**(6), 343–50.
- Levy M. (1877), 'Mémoire sur la théorie des plaques élastiques planes', *J Math Pures Appl*, 219–306.
- Li, C, Ru, CQ, Mioduchowski, A. (2006), "Length-dependence of flexural rigidity as a result of anisotropic elastic properties of microtubules", *Biochem Biophys Res Commun*, **349**, 1145–1150.

- Li, X. F., Wang, B. L., & Mai, Y. W. (2008), “Effects of a surrounding elastic medium on flexural waves propagating in carbon nanotubes via nonlocal elasticity”, *Journal of Applied Physics*, **103**(7).
- Liew, K. M., Hu, Y., & He, X. Q. (2008), “Flexural wave propagation in single-walled carbon nanotubes”, *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, **5**(4), 581-586.
- Lim, C. W., Yang, Q., and Zhang, J. B., (2012c), “Thermal buckling of nanorod based on non-local elasticity theory”, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, **47**(5), 496–505.
- Lu, P., Lee, H. P., Lu, C., and Zhang, P. Q., (2007), “Application of nonlocal beam models for carbon nanotubes”, *International Journal of Solids and Structures*, **44**(16), 5289–5300.
- M. Karimi Zeverdejani, Y. Tadi Beni, (2013), “The nano scale vibration of protein microtubules based on modified strain gradient theory”, *Current Applied Physics*, **13**, 1566-1576.
- M.E. Itkis, F. Borondics, A. Yu, R.C. Haddon (2006), *Science*,” Bolometric infrared photoresponse of suspended single-walled carbon nanotube films” **312**, 413-416.
- Mahi A, Adda EA, Bedia, 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**(9), 2489–508.
- Mahi, A., Adda Bedia, E.A., Tounsi, A. (2015), “A new hyperbolic shear deformation theory for bending and free vibration analysis of isotropic, functionally graded, sandwich and laminated composite plates”, *Applied Mathematical Modelling*, **39**, 2489–2508.
- Mantari J, Oktem A, Guedes Soares C. (2011), “Static and dynamic analysis of laminated composite and sandwich plates and shells by using a new higher-order shear deformation theory”, *Compos Struct.*, **94**(1), 37–49.
- Mantari J, Oktem A, Guedes Soares C. (2012), “A new trigonometric shear deformation theory for isotropic, laminated composite and sandwich plates”, *Int J Solids Struct*, **49**(1), 43–53.
- Maruyama, S.; Kojima, R.; Miyauchi, Y.; Chiashi, S.; Kohno, M. (2002), *Chemical Physics Letters*, **360**, 229–234.
- Maser WK, et al. (1998), “Production of high-density single-walled nanotube material by a simple laser-ablation method”, *Chem Phys Lett*, **292**, 587-593.
- McFarland, AW, Colton, JS. (2005), "Role of material microstructure in plate stiffness with relevance to microcantilever sensors", *J Micromech Microeng*, **15**, 1060–1067.

- Medani, M., Benahmed, A., Zidour, M., Heireche, H., Tounsi, A., Bousahla, A.A., Tounsi, A., Mahmoud, S.R. (2019), “Static and dynamic behavior of (FG-CNT) reinforced porous sandwich plate”, *Steel and Composite Structures*, (Accepted).
- Meksi, R, Benyoucef, S., Mahmoudi, A., Tounsi, A., Adda Bedia, E.A. and Mahmoud, SR. (2019), “An analytical solution for bending, buckling and vibration responses of FGM sandwich plates”, *J. Sandw. Struct. Mater.*, **21**(2), 727-757.
- Melis Arslan. Micromechanical modeling of microtubules. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2010. Fabrice Caudron. Des microtubules détyrosinés : quelles conséquences pour la cellule ?. Biologie cellulaire. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2007.
- Menasria, A., Bouhadra, A., Tounsi, A., Bousahla, A.A. and Mahmoud, S.R. (2017), “A new and simple HSDT for thermal stability analysis of FG sandwich plates”, *Steel Comp. Struct.*, **25**(2), 157–175.
- Meziane, M.A.A., 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.
- Mickey, B., & Howard, J. (1995), “Rigidity of microtubules is increased by stabilizing agents”, *Journal of Cell Biology*, **130**(4), 909–917.
- Mindlin, RD, Tiersten, HF. (1962), "Effects of couple-stresses in linear elasticity", *Arch Ration Mech Anal*, **11**, 415–448.
- Minea, T.; Point, S.; Granier, A.; Touzeau, M. (2004), *Applied Physics Letters*, **85**, 1244–1246.
- Mitchison, T., and M. Kirschner. (1984). Dynamic instability of microtubule growth. *Nature*, **312**, 237–242.
- Mokhtar, Y., Heireche, H., Bousahla, A.A., Houari, M.S.A., Tounsi, A., Mahmoud, S.R. (2018), “A novel shear deformation theory for buckling analysis of single layer graphene sheet based on nonlocal elasticity theory”, *Smart Structures Systems*, **21**(4), 397-405.
- Mouffoki, A., Adda Bedia, E.A., Houari, M.S.A., Tounsi, A., Mahmoud, S.R. (2017), “Vibration analysis of nonlocal advanced nanobeams in hygro-thermal environment using a new two-unknown trigonometric shear deformation beam theory”, *Smart Structures Systems*, **20**(3), 369-383.
- Munir Nayfeh, In Micro and Nano Technologies (2008), “Chapter 10 – Nanocarbon” *Fundamentals and Applications of Nano Silicon in Plasmonics and Fullerenes*, 287-309.

- Murmu, T. and Adhikari, S., (2012b), “Nonlocal elasticity based vibration of initially pre-stressed coupled nanobeam systems”, *European Journal of Mechanics–A/Solids*, **34**, 52–62.
- Murthy M. An improved transverse shear deformation theory for laminated anisotropic plates; 1981
- Narendar, S, Ravinder, S, Gopalakrishnan, S. (2012), "Strain gradient torsional vibration analysis of micro/nano rods", *Int J Nano Dimens*, **3**, 1–17.
- Narendar, S. and Gopalakrishnan, S., (2009), “Nonlocal scale effects on wave propagation in multi-walled carbon nanotubes”, *Computational Materials Science*, **47**(2), 526–538.
- Narwariya, M., Choudhury, A., Sharma, A.K. (2018), “Harmonic analysis of moderately thick symmetric cross-ply laminated composite plate using FEM”, *Advances in Computational Design*, **3**(2), 113-132.
- Needleman, D. J., Ojeda-Lopez, M. A., Raviv, U., Ewert, K., Miller, H. P., Wilson, L., & Safinya, C. R. (2005). “Radial compression of microtubules and the mechanism of action of taxol and associated proteins”, *Biophysical Journal*, **89**(5), 3410–3423.
- Needleman, DJ, Ojeda-Lopez, MA, Raviv, U, Ewert, K, Jones, JB, Miller, HP, et al. (2004), "Synchrotron X-ray diffraction study of microtubules buckling and bundling under osmotic stress: a probe of interprotofilament interactions", *Phys Rev Lett*, **93**, 198104.
- Nemmar A, Hoylaerts MF, Hoet PH, Dinsdale D, Smith T, Xu H, Vermylen J, Nemery B. (2002), “Ultrafine particles affect experimental thrombosis in an in vivo hamster model”, *Am J Respir Crit Care Med*, **166**, 998.
- Nemmar A, Vanbilloen H, Hoylaerts MF, Hoet PH, Verbruggen A, Nemery B. (2001), “Passage of intratracheally instilled ultrafine particles from the lung into the systemic circulation in hamster”, *Am J Respir Crit Care Med*, **164**, 1665.
- Nikolaev P, et al. (1999), “Gas phase catalytic growth of single-walled carbon nanotubes from carbon monoxide”, *Chem Phys Lett* , 313:91-7.
- Nikolaev, P.; Bronikowski, M. J.; Bradley, R. K.; Rohmund, F.; Colbert, D. T.; Smith, K. A.; Smalley, R. E. (1999), *Chemical Physics Letters*, **313**, 91–97.
- Nogales, E, Whittaker, M, Milligan, RA, Downing, KH. (1999), "High-resolution model of the microtubule", *Cell*, **96**, 79–88.
- O. Civalek, C. Demir, (2011), “Bending analysis of microtubules using nonlocal Euler–Bernoulli beam theory”, *Appl. Math. Model*, **35**, 2053–2067.

- Pampaloni, F, Lattanzi, G, Jonas, A, Surrey, T, Frey, E, Florin, EL. (2006), "Thermal fluctuations of grafted microtubules provide evidence of a length-dependent persistence length", *Proc Natl Acad Sci USA*, **103**, 10248.
- Pampaloni, F., Lattanzi, G., Jon´as, A., Surrey, T., Frey, E., & Florin, E.-L. (2006), "Thermal fluctuations of grafted microtubules provide evidence of a length-dependent persistence length", *PNAS*, **103**(27), 10248–10253.
- Pan, Z. W. ; Xie, S. S. ; Chang, B. H. ; Wang, C. Y. ; Lu, L. ; Liu, W.; Zhou, W. Y.; Li, W. Z.; Qian, L. X. (1998), *Nature*, **394**, 631–632.
- Panc V. (1975), "Theories of elastic plates", *Leyden: Springer Science & Business Media*, **2**.
- Panjehpour, M., Eric Woo KeeLoh, Deepak TJ. (2018), "Structural Insulated Panels: State-of-the-Art", *Trends in civil Engineering and its architecture*, **3**(1) 336-340.
- Penza, M.; Rossi, R.; Alvisi, M.; Signore, M.; Cassano, G.; Dimaio, D.; Pentassuglia, R.; Piscopiello, E.; Serra, E.; Falconieri, M. (2009), *Thin Solid Films*, **517**, 6211–6216.
- Pfeiffer R, et al. (2006), "Tube-tube interaction in double-wall carbon nanotubes", *Phys Status Solidi (B)*, **243**(13):3268-3272.
- Poland CA, Duffin R, Kinloch I, Maynard A, Wallace WA, Seaton A, Stone V, Brown S, Macnee W, Donaldson K. (2008), "Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study", *Nat Nanotechnol*, **3**, 423.
- Poole, WJ, Ashby, MF, Fleck, NA. (1996), "Micro-hardness of annealed and workhardened copper polycrystals", *Scripta Mater*, **34**, 559–564.
- Portet, S, Tuszynski, JA, Hogue, CW, Dixon, JM. (2005), "Elastic vibrations in seamless microtubules", *Eur Biophys J*, **34**, 912–920.
- Portran, D., Gaillard, J., Vantard, M., & Thery, M. (2013), "Quantification of MAP and molecular motor activities on geometrically controlled microtubule networks". *Cytoskeleton*, **70**(1), 12–23.
- Pradhan, S. C. and Mandal, U., (2013), "Finite element analysis of CNTs based on nonlocal elasticity and Timoshenko beam theory including thermal effect", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, **53**, 223-232.
- R. Murphy, J.N. Coleman, M. Cadek, B. McCarthy, M. Bent, A. Drury, R.C. Barklie, W.J. Blau (2002), High yield nondestructive purification and quantification method for multiwalled carbon nanotubes, *J. Phys. Chem. B* **106**, 3087–3091.

- Rakrak, K., Zidour, M., Heireche, H., Bousahla, A.A. and Chemi, A. (2016), "Free vibration analysis of chiral double-walled carbon nanotube using non-local elasticity theory", *Adv. Nano Res.*, **4**(1), 31-44.
- Reddy JN. (1984), "A simple higher-order theory for laminated composite plates", *J Appl Mech*, **51**(4), 745–752.
- Reissner E. (1975), "On transverse bending of plates, including the effect of transverse shear deformation", *Int J Solids Struct.*, **11**(5), 569–573.
- Ren ZF, et al. (1998), "Synthesis of large arrays of well-aligned carbon nanotubes on Glass", *Science*, 282:1105-7.
- Reza Malekimoghadam, Roham Rafiee, (2018), "Carbon Nanotubes Processing", *Micro and Nano Technologies, Carbon Nanotube-Reinforced Polymers*, 41-59.
- Rezaiee-Pajand, M., Masoodi, A.R., Mokhtari, M. (2018), "Static analysis of functionally graded non-prismatic sandwich beams", *Advances in Computational Design*, **3**(2), 165-190.
- S. Bandow, A.W. Rao, K.A. Williams, A. Thess, R.E. Smalley, P.C. Eklund (1997), "Purification of single-wall carbon nanotubes by microfiltration", *J. Phys. Chem. B* **101**, 8839–8842.
- S. Frank, P. Poncharal, Z.L. Wang, and W.A de Heer (1998), "Carbon Nanotube Quantum Resistors" *Science*, **280**, 1744-1746.
- S. Huang, L. Dai. (2002), "Plasma etching for purification and controlled opening of aligned carbon nanotubes", *J. Phys. Chem. B*, **106**, 3543–3545.
- S. Niyogi, H. Hu, M.A. Hamon, P. Bhowmik, B. Zhao, S.M. Rozenzhak, J. Chen, M.E. Itkis, M.S. Meier, R.C. Haddon (2001), "Chromatographic purification of soluble single-walled carbon nanotubes", *J. Am. Chem. Soc.* **123**,733–734.
- Saito R, Fujita M, Dresselhaus M.S. (1992), "Electronic structure of chiral graphene tubules" *Appl. Phys. Lett.* **60**, 2204.
- Satishkumar BC, Govindaraj A, Nath M, Rao CNR. (2000), "Synthesis of metal oxide nanorods using carbon nanotubes as templates". *J Mater Chem*, **10**, 2115.
- Schaap, I. A. T. (2006). Nano-scale mechanics of protein and DNA assemblies. PhD thesis, Vrije University 2006.

- Schaap, I. A. T., de Pablo, J. J., & Schmidt C F. (2004), "Resolving the molecular structure of microtubules under physiological conditions with scanning force microscopy", *European Biophysics Journal*, **33**(5), 462–467.
- Schliwa, M., Woehlke, G. (2003), "Molecular motors", *Nature*, **422**, 759-765.
- Scholey, J.M., Mascher, I.B., Mogilner, A. (2003), "Cell division", *Nature*, **422**, 746-752.
- Schulze E, Kirschner M. (1988), "New features of microtubule behaviour observed in vivo", *Nature*, **334**(6180), 356-359.
- Sekkal, M., Fahsi, B., Tounsi, A., Mahmoud, S.R. (2017), "A novel and simple higher order shear deformation theory for stability and vibration of functionally graded sandwich plate", *Steel and Composite Structures*, **25**(4), 389-401.
- Selmi, A., Bisharat, A. (2018), "Free vibration of functionally graded SWNT reinforced aluminum alloy beam", *Journal of Vibro engineering*, **20**(5), 2151-2164.
- Semmah, A., Tounsi, A., Zidour, M., Heireche, H., Naceri, M., (2015), "Effect of the Chirality on Critical Buckling Temperature of Zigzag Single-walled Carbon Nanotubes Using the Nonlocal Continuum Theory", *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, **23**(6), 518-522.
- Shakouri, A., Lin, R. M., and Ng, T. Y., (2009), "Free flexural vibration studies of double-walled carbon nanotubes with different boundary conditions and modeled as nonlocal Euler beams via the Galerkin method", *Journal of Applied Physics*, **106**(9).
- Shen, HS. (2010a), "Nonlocal shear deformable shell model for postbuckling of axially compressed microtubules embedded in an elastic medium", *Biomech Model Mechanobiol*, **9**, 345–357.
- Shen, HS. (2010b), "Buckling and postbuckling of radially loaded microtubules by nonlocal shear deformable shell model", *J Theor Biol*, **264**, 386–394.
- Shen, HS. (2010c), "Nonlocal shear deformable shell model for bending buckling of microtubules embedded in an elastic medium", *Phys Lett A*, **374**, 4030.
- Shen, Z. B., Li, D. K., Li, D., and Tang, G. J. (2012d), "Frequency shift of a nanomechanical sensor carrying a nanoparticle using nonlocal Timoshenko beam theory", *Journal of mechanical science and technology*, **26**(5), 1577-1583.

- Shen, Z. B., Li, X. F., Sheng, L. P., Tang, G. J., (2012a), “Transverse vibration of nanotube-based micro-mass sensor via nonlocal Timoshenko beam theory”, *Computational Materials Science*, **53**(1), 340-346.
- Shen, Z. B., Tang, G. J., Zhang, L., Li, X. F., (2012b), “Vibration of double-walled carbon nanotube based nanomechanical sensor with initial axial stress”, *Computational Materials Science*, 5851-5858.
- Shen, Z. B., Sheng, L. P., Li, X. F., and Tang, G. J., (2012c), “Nonlocal Timoshenko beam theory for vibration of carbon nanotube-based biosensor”, *Physica E*, **44**(7), 1169–1175.
- Shi, J. X., Ni, Q. Q., Lei, X. W., Natsuki, T., (2011), “Wave propagation in embedded double-layer graphene nanoribbons as electromechanical oscillators”, *Journal of Applied Physics*, **110**(8).
- Shi, Y.J. & Guo, Wanlin & Ru, C.Q. (2008), “Relevance of Timoshenko-beam model to microtubules of low shear modulus”, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, **41**, 213-219.
- Shi, YJ, Guo, WL, Ru, CQ. (2008), "Relevance of Timoshenko-beam model to microtubules of low shear modulus", *Physica E*, **41**, 213–219.
- Soldatos KP. (1992), “A transverse shear deformation theory for homogeneous monoclinic plates”, *Acta Mech* **94**(3–4), 195–220.
- Song Y.H. and Mandelkow E., (1993), Recombinant kinesin motor domain binds to beta-tubulin and decorates microtubules with a B surface lattice. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. **90**(5)1671-1675.
- STEIN M. (1986), “Nonlinear theory for plates and shells including the effects of transverse shearing”, *AIAA J*, **24**(9), 1537–1544.
- Stern ST, McNeil SE. (2008), “Nanotechnology safety concerns revisited”, *Toxicol Sci*, **101**, 4.
- Su, M.; Zheng, B.; Liu, J. (2000), “A scalable CVD method for the synthesis of single walled carbon nanotubes with high catalyst productivity” *Chemical Physics Letters*, **322**, 321–326.
- Sudak, L. J., (2003), “Column buckling of multiwalled carbon nanotubes using nonlocal continuum mechanics”, *Journal of Applied Physics*, **94**(11), 7281–7287.
- T. Guo, P. Nikolaev, A. Thess, D. Colbert et R. Smalley (1995),” Catalytic growth of single-walled nanotubes by laser vaporization”, *Chem. Phys. Lett.*, **243**, 49–54.

- Tajalli, SA, Rahaeifard, M, Kahrobaiyan, MH, Movahhedy, MR, Akbari, J, Ahmadian, MT. (2013), "Mechanical behavior analysis of size-dependent micro-scaled functionally graded Timoshenko beams by strain gradient elasticity theory", *Compos Struct*, **102**, 72–80.
- Tarasov B. P. , Muradyan V. E. , Shul'ga Y.M. , Krinichnaya E. P. (2003),” Synthesis of carbon nanostructures by arc evaporation of graphite rods with Co-Ni and YNi₂ catalysts”, *Carbon*, **41**(7), 1357-1364
- Taute, K. M., Pampaloni, F., Frey, E., & Florin, E. L. (2008), “Microtubule dynamics depart from the wormlike chain model”, *Physical Review Letters*, **100**(2).
- Tounsi, A, Heireche, H, Benhassaini, H, Missouri, M. (2010), "Vibration and length dependent flexural rigidity of protein microtubules using higher order shear deformation theory", *J Theor Biol*, **266**, 250–255.
- Tounsi, A, Houari, MSA, Benyoucef, S., Adda Bedia, E.A. (2013), "A refined trigonometric shear deformation theory for thermoelastic bending of functionally graded sandwich plates", *Aerosp. Sci. Technol*, **24**(1), 209-220.
- Tounsi, A., Ait Atmane, H., Khiloun, M., Sekkal, M., Taleb, O., Bousahla, A.A. (2019), "On buckling behavior of thick advanced composite sandwich plates", *Composite Materials and Engineering*, **1**(1), 1-19.
- Tounsi, A., Benguediab S., Adda Bedia A., Semmah A., and Zidour M., (2013b), “Nonlocal effects on thermal buckling properties of double-walled carbon nanotubes”, *Advance in Nano Research*, **1**(1), 1–11.
- Tounsi, A., Benguediab, S., Adda Bedia, E.A., Semmah, A., Zidour, M. (2013), “Nonlocal effects on thermal buckling properties of double-walled carbon nanotubes”, *Advances in Nano Research*, **1**, 1-11.
- Toupin, RA. (1964), "Theory of elasticity with couple stresses", *Arch Ration Mech Anal*, **17**, 85–112.
- Touratier M. (1991), “An efficient standard plate theory”, *Int J Eng Sci*, **29**(8), 901– 916.
- Trends in Nanotechnology Research, Edited by Eugene V. Dirote, Nova Science Publishers, New York, 2004.
- Tuszynski, JA, Luchko, T, Portet, S, Dixon, JM. (2005), "Anisotropic elastic properties of microtubules", *Eur Phys J E*, **17**, 29–35.

- Van-Buren, V, Odde, DJ, Cassimeris, L. (2002), "Estimates of lateral and longitudinal bond energies within the microtubule lattice", *Proc Natl Acad Sci USA*, **99**, 6035–6040.
- Vanessa Windscheid. Caractérisation d'une nouvelle protéine associée aux microtubules, SL21. Biologie cellulaire. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2008.
- Vardoulakis, I, Sulem, J. (1995), "Bifurcation analysis in geomechanics", London: Blackie/Chapman & Hall.
- Venier, P, Maggs, AC, Carlier, MF, Pantaloni, D. (1994), "Analysis of microtubule rigidity using hydrodynamic flow and thermal fluctuations", *J Biol Chem*, **269**, 13353–13360.
- Vinckier, A, Dumortier, C, Engelborghs, Y, Hellemans, L. (1996), "Dynamical and mechanical study of immobilized microtubules with atomic force microscopy", *J Vac Sci Technol B*, **14**, 1427–1431.
- W. Krätschmer, L. Lamb, K. Fostiropoulos and D. Huffman (1990), 'Solid C60: A New Form of Carbon' *Nature*, **347** (38), 354–358.
- Walker RA, O'Brien ET, Pryer NK, Soboeiro MF, Voter WA, Erickson HP, Salmon ED, (1988), "Dynamic instability of individual microtubules analyzed by video light microscopy: rate constants and transition frequencies", *J Cell Biol*. **107**(4), 1437-1448.
- Wang, B, Zhao, J, Zhou, S. (2010), "A micro scale Timoshenko beam model based on strain gradient elasticity theory", *Eur J Mech A/Solids*, **29**, 591–599.
- Wang, B., Deng, Z. C., Zhang, K., (2013a), "Nonlinear vibration of embedded single-walled carbon nanotube with geometrical imperfection under harmonic load based on nonlocal Timoshenko beam theory", *Applied Mathematics and Mechanics*, **34**, 269–280.
- Wang, C. M., Zhang, Y. Y., He, X. Q., (2007) "Vibration of nonlocal Timoshenko beams", *Nanotechnology*, **18**(10), 105401.
- Wang, CY, Ru, CQ, Mioduchowski, A. (2006), "Orthotropic elastic shell model for buckling of microtubules", *Phys Rev E*, **74**, 052901.
- Wang, G.; Wang, H.; Tang, Z.; Li, W., Bai, J. (2009), "Simultaneous production of hydrogen and multi-walled carbon nanotubes by ethanol decomposition over Ni/Al₂O₃ catalysts " *Applied Catalysis B: Environmental*, **88**, 142–151.
- Wang, L., (2009a), "Dynamical behaviors of double-walled carbon nanotubes conveying fluid accounting for the role of small length scale", *Computational Materials Science*, **45**(2), 584–588.

- Wang, L., (2009b), “Vibration and instability analysis of tubular nano–and micro–beams conveying fluid using nonlocal elastic theory”, *Physica E*, **41**(10), 1835–1840.
- Wang, L., and Hu, H., (2005), “Flexural wave propagation in single–walled carbon nanotubes”, *Physical Review B*, **71**(19).
- Wang, Q. and Varadan, V. K., (2006) “Vibration of carbon nanotubes studied using nonlocal continuum mechanics”, *Smart Materials and Structures*, **15**(2), 659.
- Wang, Q., (2005), “Wave propagation in carbon nanotubes via nonlocal continuum mechanics”, *Journal of Applied Physics*, **98**(12).
- Wang, Q., Zhou, G. Y., Lin, K. C., (2006), “Scale effect on wave propagation of double-walled carbon nanotubes”, *International Journal of Solids and Structures*, **43**(20), 6071-6084.
- Wang, Y. Z., Li, F. M., and Kishimoto, K., (2012), “Effects of axial load and elastic matrix on flexural wave propagation in nanotube with nonlocal Timoshenko beam model”, *Journal of Vibration and Acoustics*, **134**(3).
- Xiang, P, Liew, KM. (2011), "Predicting buckling behavior of microtubules based on an atomistic-continuum model", *Int J Solids Struct*, **48**, 1730–1737.
- Xiang, P, Liew, KM. (2012a), "Free vibration analysis of microtubules based on an atomistic-continuum model", *J Sound Vibr*, **331**, 213–230.
- Xiang, P, Liew, KM. (2012b), "Dynamic behaviors of long and curved microtubules based on an atomistic-continuum model", *Comput Methods Appl Mech Eng*, **223**, 123–132.
- Xiang, P, Liew, KM. (2013), "A computational framework for transverse compression of microtubules based on a higher-order Cauchy–Born rule", *Comput Methods Appl Mech Eng*, **254**, 14–30.
- Y. Brhane, T. Gabriel (2016), “Production, purification and functionalization of carbon nanotubes for medical application”, *Int. Res. J. Pharm.* **7**(7), 19–27.
- Yacaman MJ, et al. (1993), “Catalytic growth of carbon microtubules with fullerene structure”, *Appl Phys Lett*, **62**:202-4.
- Yahia, S.A., Ait Atmane, 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.
- Yan, Y., Wang, W. Q., and Zhang, L. X., (2009) “Dynamical behaviors of fluid-conveyed multiwalled carbon nanotubes”, *Applied Mathematical Modelling*, **33**(3), 1430-1440.

- Yang, Y., Zhang, L., and Lim, C. W., (2012), “Wave propagation in fluid-filled single-walled carbon nanotube on analytically nonlocal Euler–Bernoulli beam model”, *Journal of Sound and Vibration*, **331**(7), 1567-1579.
- Yang, Q., and Lim, C. W., (2012a), “Thermal effects on buckling of shear deformable nanocolumns with von Kármán nonlinearity based on nonlocal stress theory”, *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, **13**(2), 905–922.
- Yazid, M., Heireche, H., Tounsi, A., Bousahla, A.A., Houari, M.S.A. (2018), “A novel nonlocal refined plate theory for stability response of orthotropic single-layer graphene sheet resting on elastic medium”, *Smart Structures and Systems*. **21**(1), 15-25.
- Yeghnem, R., Guerroudj, H.Z., Amar, L.H.H., Meftah, S.A., Benyoucef, S., Tounsi, A., Adda Bedia, E.A. (2017), "Numerical modeling of the aging effects of RC shear walls strengthened by CFRP plates: A comparison of results from different "code type" models", *Computers and Concrete*, **19**(5), 579-588.
- Youcef, D.O., Kaci, A., Benzair, A., Bousahla, A.A., Tounsi, A. (2018), “Dynamic analysis of nanoscale beams including surface stress effects”, *Smart Structures and Systems*. **21**(1), 65-74.
- Younsi, A., Tounsi, A., Zaoui, F.Z., Bousahla, A.A., Mahmoud, S.R. (2018), "Novel quasi-3D and 2D shear deformation theories for bending and free vibration analysis of FGM plates", *Geomechanics and Engineering*, **14**(6), 519-532.
- Yudasaka M, et al. (1990), “Mechanism of the effect of NiCo, Ni and Co catalysts on the yield of single-wall carbon nanotubes by pulsed Nd: YAG laser ablation”, *J Phys Chem B*, **103**(30), 6224-6229.
- Zaoui, F.Z., Ouinas, D., Tounsi, A. (2019), “New 2D and quasi-3D shear deformation theories for free vibration of functionally graded plates on elastic foundations”, *Compos. Part B*, **159**, 231-247.
- Zarga, D., Tounsi, A., Bousahla, A.A., Bourada, F., Mahmoud, S.R. (2019), "Thermomechanical bending study for functionally graded sandwich plates using a simple quasi-3D shear deformation theory", *Steel and Composite Structures*, **32**(3), 389-410.
- Zemri, A., Houari, M.S.A., Bousahla, A.A., Tounsi, A. (2015), “A mechanical response of functionally graded nanoscale beam: an assessment of a refined nonlocal shear deformation theory beam theory”, *Structural Engineering and Mechanics*, **54**(4), 693-710.

- Zeveerdejani, MK, Beni, YT. (2013), "The nano scale vibration of protein microtubules based on modified strain gradient theory", *Curr Appl Phys*, **13**, 1566–1567.
- Zeveerdejani, MK, Beni, YT. (2013), "The nano scale vibration of protein microtubules based on modified strain gradient theory", *Curr Appl Phys*, **13**, 1566–1567.
- Zhang, Y. Q., Liu, G. R., Xie, X. Y., (2005), "Free transverse vibrations of double-walled carbon nanotubes using a theory of nonlocal elasticity", *Physical Review B*, **71**(19).
- Zhang, Y. Y., Wang, C. M., and Tan, V. B. C., (2009) "Assessment of Timoshenko beam models for vibrational behavior of single-walled carbon nanotubes using molecular dynamics", *Advanced Applied Mathematics and Mechanics*, **1**(1),89-106.
- Zhao, J, Zhou, S, Wang, B, Wang, X. (2012), "Nonlinear microbeam model based on strain gradient theory", *Appl Math Model*, **36**, 2674–2686.
- Zhen, Y. X., Fang, B., Tang, Y., (2011), "Thermal–mechanical vibration and instability analysis of fluid-conveying double walled carbon nanotubes embedded in visco-elastic medium", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, **44**(2), 379-385.
- Zidi, M., Houari, M.S.A., Tounsi, A., Bessaim, A., Mahmoud, S.R. (2017),"A novel simple two-unknown hyperbolic shear deformation theory for functionally graded beams", *Struct. Eng. Mech.*, **64**(2), 145-153.
- Zidi, M., Tounsi, A., Houari, M.S.A., Adda Bedia, 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. Technol.*, **34**, 24-34.
- Zidour, M., Benrahou, K. H., Semmah, A., Naceri, M., Belhadj, H. A., Bakhti, K., Tounsi, A., (2012), "The thermal effect on vibration of zigzag single walled carbon nanotubes using nonlocal Timoshenko beam theory", *Computational Materials Science*, **51**(1), 252-260.
- Zine, A., Tounsi, A., Draiche, K., Sekkal, M., Mahmoud, S.R. (2018), "A novel higher-order shear deformation theory for bending and free vibration analysis of isotropic and multilayered plates and shells", *Steel and Composite Structures*, **26**(2), 125-137.