

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique
جامعة مصطفى اسطمبولي معسكر
Université Mustapha STAMBOULI de Mascara



Faculté des Sciences et de la Technologie
Domaine : Sciences et Technologie
Département de Génie Civil
Filière : Génie Civil

**THESE DE DOCTORAT EN VUE D'OBTENTION D'UN DIPLOME DE DOCTORAT
EN SCIENCE EN GENIE CIVIL**

THEME

**Contribution à l'étude du comportement vibratoire des
structures en matériaux composites
avancés avec la prise en compte de l'effet d'échelle**

Présentée par:

- **Mr : LADMEK Miloud**

Soutenue le 08/07/2024 Devant le jury composé de :

Président :	Pr. Hebali Habib	UMS Mascara
Directeur de thèse :	Pr. Houari Mohammed Sid Ahmed	UMS Mascara
Co-Directeur de thèse :	MCA. Sadoun Mohamed	UMS Mascara
Examineur :	MCA. Draï Ahmed	UMS Mascara
Examineur :	Pr. Ait Atmane hassen	UHB Chlef
Examineur :	Pr. Riadh Bennai	UHB Chlef
Invité :	Pr. Tounsi Abdelouahed	UDL SBA

Année universitaire : 2023/2024

Dédicaces

À mon père chéri,

Je dédie cette thèse à ton âme pure, qui a été une source d'inspiration pour moi toute ma vie. Tu m'as appris beaucoup sur la vie, l'amour et la patience. Tu as toujours été mon soutien dans les moments difficiles, et ma joie dans les moments heureux.

Je sais que tu me regardes d'en haut, et que tu es fier de ce que j'ai accompli.

"À ma mère, qui m'a appris le sens de l'amour et de la compassion."

À tous mes frères et ma Sœurs, mes souhaits de bonheur de santé et de succès.

À ma Femme ton profond attachement m'ont permis de réussir mes études et que ce travail soit témoignage de ma reconnaissance.

*A mes enfants **Abderrahim , Mustapha et Yasser .***

Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur et de santé.

A tous les membres de ma famille.

*À mes amis, qui sont ma famille de cœur. et spécialement **Morade , chahrelddine, Ahmed , Bensawag , Hamza et AeK***

A tous mes chers professeurs et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail.

Remerciements

Tout d'abord, je remercie le bon Dieu qui m'a doté de la volonté, du courage et surtout de la patience pour produire ce modeste travail et qui m'a aidé à faire face à toutes les difficultés rencontrées lors de son élaboration.

*Je remercie profondément mon encadreur, **Mr HOUARI Mohamed Sid Ahmed** Professeur auprès de l'université Mustapha STAMBOULI de Mascara, pour m'avoir fait confiance et avoir bien voulu se lancer avec moi . Merci pour ta disponibilité et tes conseils avisés, sans lesquels ce travail ne serait pas arrivé là ou il en est aujourd'hui.*

*Je tiens à remercier sincèrement mon Co-Directeur de thèse **Mr Sadoun .M** Maître de conférences de l'université Mustapha STAMBOULI de Mascara, pour la confiance et l'attention qu'il m'a accordé.*

Je tiens également à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'examiner ce mémoire de doctorat.

*Je n'oublie pas de remercier chaleureusement mon collègue, **Dr. Daikh Ahmed Amine**, pour ses conseils judicieux, son soutien inestimable, sa motivation constante, ses conseils éclairés et sa grande disponibilité, qui ont été essentiels pour mener à bien ce travail.*

Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Abstract

This thesis introduces an analytical method for studying the vibration behavior of innovative functionally graded carbon (FG) nanotube-reinforced composite beams (CNTRC) supported on a Winkler/Pasternak elastic foundation. Material gradation and properties across the beam thickness are described using two new cosine functions. A novel trigonometric (inverse tangent) higher-order shear deformation theory (HSDT) is proposed to account for the parabolic variation of shear stress through the thickness, ensuring zero shear stress at both beam surfaces. The nonlocal strain gradient theory (NSGT) is employed to examine material and geometric characteristics at nanoscale length scales. The comprehensive model and equations of motion for the nanobeam are derived using Hamilton's principle and solved analytically via Navier's method for a simply supported beam. The proposed analytical model is benchmarked against existing theories in the literature. The study conducts a thorough parametric analysis to explore the influence of factors including nonlocal length scale, strain gradient microstructure scale, material distribution, elastic foundation parameters, and geometric parameters.

In conclusion, this study makes significant contributions to the field by tackling the issue of free vibration in simply supported FG-CNTRC beams. It introduces innovative types of FG-CNTRC beams, proposes a new higher-order shear deformation theory, and develops an advanced analytical model that considers small-scale effects. These contributions enhance understanding and pave the way for more accurate predictions of the dynamic behavior of composite structures under varying conditions.

Keywords: New HSDT; NSGT; vibration; nanobeams ; Navier's solution; novel function of FGM distribution ;

Résumé

Cette thèse présente une méthode analytique pour étudier le comportement vibratoire des poutres composites innovantes renforcées par des nanotubes de carbone fonctionnellement gradés (FG-CNTRC), supportées sur une fondation élastique de Winkler/Pasternak. La gradation et les propriétés des matériaux à travers l'épaisseur de la poutre sont décrites à l'aide de deux nouvelles fonctions cosinus. Une nouvelle théorie de déformation par cisaillement d'ordre supérieur trigonométrique (arc tangent inverse) (HSDT) est proposée pour prendre en compte la variation parabolique des contraintes de cisaillement à travers l'épaisseur, assurant une contrainte de cisaillement nulle aux surfaces de la poutre. La théorie des gradients de contrainte non locaux (NSGT) est utilisée pour examiner les caractéristiques matérielles et géométriques à l'échelle nanométrique. Les équations de mouvement de la nanopoutre sont dérivés en utilisant le principe de Hamilton et résolus analytiquement par la méthode de Navier pour une poutre simplement supportée. Le modèle analytique proposé est comparé aux théories existantes dans la littérature. L'étude mène une analyse paramétrique approfondie pour explorer l'influence de facteurs tels que l'échelle de longueur non locale, l'échelle de microstructure de gradient de contrainte, la distribution des matériaux, les paramètres de fondation élastique et les paramètres géométriques.

En conclusion, cette étude apporte une contribution significative au domaine en abordant la problématique de la vibration libre des poutres FG-CNTRC simplement supportées. Elle introduit de nouveaux types innovants de poutres FG-CNRC, propose une nouvelle théorie de déformation par cisaillement d'ordre supérieur et développe un modèle analytique avancé qui prend en compte les effets à petite échelle. Ces contributions améliorent la compréhension et ouvrent la voie à des prédictions plus précises du comportement dynamique des structures composites dans des conditions variées.

Mots-clés : Nouvelle HSDT ; NSGT ; Vibration ; Nanopoutres ; Solution de Navier ; Nouvelle fonction de distribution FGM.

ملخص

يقدم هذا العمل طريقة تحليلية لدراسة سلوك الاهتزاز للروافد المركبة المبتكرة المدعمة بأنايب الكربون المتدرجة وظيفيًا (FG-CNTRC) الموجودة على أساس مؤسسة مرنة من وينكلر/باسترنالك. تم تقديم تدرج خصائص المادة المتدرجة وظيفيا عبر السمك باستخدام تركيبين جديدين، هندسية مثلثية. تم اقتراح نظرية جديدة للتشوه بالقص ذات ترتيب عالٍ للتعامل مع التباين القوسي للإجهادات القصية عبر السمك، مما يضمن عدم وجود إجهاد قصي عند سطحي الشريحة. تم استخدام نظرية تدرج الإجهاد غير المحلية لفحص الخصائص المادية والهندسية على مقاييس النانو. تم استنتاج معادلات الحركة للنانو رافدة بمسند بسيط باستخدام مبدأ هاملتون وحلها تحليلياً بطريقة نافيه. تم مقارنة النموذج التحليلي المقترح مع النظريات الحالية في الأدب. تم تقديم دراسة تحليلية معمقة لاستكشاف تأثيرات عامل مقياس الطول غير المحلي، مقياس تدرج الاجهاد للبنية المجهرية، توزيع المواد، معلمات الأساس المرن، والمعلمات الهندسية.

في الختام، تقدم هذه الدراسة مساهمات هامة من خلال معالجة مشكلة الاهتزاز الحر في الروافد المركبة المدعمة ببساطة. فهي تقدم أنواعاً مبتكرةً من الهياكل المركبة المبتكرة المدعمة بأنايب الكربون، تقترح نظرية جديدة للتشوه بالقص ذات ترتيب عالٍ، وتطور نموذجاً تحليلياً متقدماً يأخذ في اعتباره تأثيرات الحجم الصغير. هذه المساهمات تعزز الفهم وتمهد الطريق لتوقعات أكثر دقة للسلوك الديناميكي للهياكل المركبة تحت ظروف متفاوتة.

الكلمات المفتاحية: نظرية الانحناء بالقص ذات الرتبة العالية، نظرية التدرج غير المحلي، الاهتزاز، الروافد النانوية، دالة جديدة لتوزيع المواد، طريقة "نافيه".

Table des matières

Dédicace	(i)
Remerciement	(ii)
Abstract	(iii)
Résumé	(iv)
ملخص	(v)
Table des matières	(vi)
Liste des figures	(x)
Liste des Tableaux	(xii)
Nomenclatures.....	(xiii)

INTRODUCTION GENERABLE

INTRODUCTION GENERABLE	01
------------------------------	----

Chapitre I

Généralité sur les matériaux à gradient de propriétés

I.1 Introduction.....	04
I.2. Concept des matériaux à gradient de propriétés.....	05
I.3.Domains d'applications des matériaux fonctionnellement gradués.....	08
I.4. Comparaison des matériaux FGM et les matériaux traditionnels.....	09
I.5.Inconvénients des FGM.....	10
I.6. Techniques de fabrication des matériaux fonctionnellement gradués (FGM).....	10
I.6.1. Procédé de poudre sèche.....	10
I.6.2. Coulage séquentiel en barbotine (Slip Casting).....	11
I.6.3. Dépôt par électrophorèse.....	11
I.6.4. Projection plasma.....	11
I.6.5. Dépôt chimique en phase vapeur et dépôt physique en phase vapeur.....	11
I.6.6. Frittage et infiltration.....	11
I.6.7. Implantation ionique.....	12
I.6.8. Dépôt par centrifugation.....	12
I.7. Les propriétés matérielles effectives des matériaux à gradient de propriétés.....	12
I.7.1. Propriétés matérielles d'une poutre P-FGM.....	13
I.7.2 Propriétés matérielles de la poutre S-FGM.....	14
I.7.3 Propriétés matérielles de la poutre E-FGM.....	15
I.8. Développements récents et défis des FGM.....	15
I.9. Conclusion.....	16

Chapitre II Les nanomatériaux

II .1.Introduction	17
II .2.Types et classification des nanomatériaux.....	17
II .3.Classification des nanomatériaux en fonction de leurs dimensions.....	19
II .4.Classification des nanomatériaux en fonction de leur origine.....	20
II .5.Histoire et développement des nanomatériaux.....	20
II .6.Caractéristiques uniques des nanomatériaux.....	21
II .6.1. Surface.....	22
II .6.2. Magnétisme.....	22
II .6.3. Effets quantiques.....	22
II .6.4. Conductivité thermique et électrique élevée.....	22
II .6.5. Excellentes propriétés mécaniques.....	22
II .6.6. Excellent support pour les catalyseurs.....	22
II .6.7. Activité antimicrobienne.....	23
II .7. Nanomatériaux, caractéristiques et applications.....	23
II .7.1. Les nanomatériaux à base de carbone	23
II .7.1.1. Fullerènes. Les fullerènes	23
II .7.1.2. Nanotubes de carbone (CNT)	24
II .7.1.3. Graphène	25
II .7.1.4. Nanodiamants	25
II .7.1.5. Points quantiques à base de carbone	26
II .7.1.6. Nanocornets à base de carbone/nano-cones	26
II .7.2. Matériaux nanoporeux	27
II.7.2.1. Matériaux macroporeux	27
II.7.2.2. Matériaux mésoporeux	27
II.7.2.3. Matériaux microporeux	27
II.8. Introduction à l'échelle nanométrique.....	27
II.8.1. Types de nanotechnologie.....	29
II.8.2.Nano dans l'histoire.....	29
II.8.3 Applications de la nanotechnologie.....	31
II.8.3.1 Aviation et espace.....	31
II.8.3.2 Médecine.....	31

II.8.3.3 Alimentation.....	34
II.8.3.4 Électronique.....	35
II.8.3.5 Énergie.....	36
II.8.3.6 Pollution de l'air et de l'eau.....	37
II.8.3.7 Textiles.....	38
II.8.3.8 Sports.....	38
II.8.4.Nanoscience et nanotechnologie : Un regard vers l'avenir.....	39
II.9.conclusion	40

Chapitre III

Les Nanotubes de Carbone : Propriétés, Synthèse et Applications

III.1. Introduction	42
III.2. L'historique des nanotubes de carbone.....	42
III.3. Structures des nanotubes de carbone.....	49
III.3.1. Nanotubes de carbone à parois simples.....	49
III.3.2. Nanotubes de carbone à parois doubles.....	50
III.3.3. Nanotubes de carbone à parois multiples.....	50
III.3.4. Base de la chiralité.....	50
III.4. Synthèse des nanotubes de carbone.....	53
III.4.1 Méthode de Dépôt chimique en phase vapeur(CVD - Chemical Vapor Deposition).....	53
III.4.2 Procédure de synthèse des CNT par la méthode de CVD thermique.....	54
III.4.3 Méthode de décharge à arc électrique.....	54
III.4.4 Procédure de synthèse des CNT par la méthode de décharge à arc électrique.....	54
III.4.5 Méthode d'ablation au laser.....	55
III.4.6 Procédure de synthèse des CNT par la méthode d'ablation au laser.....	56
III.4.6.1 Procédure pour la méthode de dépôt au laser pulsé.....	56
III.4.6.2 Purification des CNT.....	57
III.4.6.3.Purification par intercalation des CNT	57
III.5. Application des nanotubes de carbone.....	58
III.5.1.Composites à base de CNT.....	58
III.5.2.Applications mécaniques.....	58
III.5.3.Applications thermiques.....	59
III.5.4.Dispositifs photoniques et optoélectroniques.....	59
III.5.5 Dispositifs d'émission de champ.....	60
III.5.6 Dispositifs électroniques.....	61

III.5.7. Capteurs et sondes.....	62
III.5.8. Dispositifs électrochimiques.....	63
III.6. Inconvénients des Nanotubes de Carbone.....	64
III.6.1. Effets Environnementaux.....	64
III.6.2. Effets sur la Santé.....	64
III.7 conclusion	65

Chapitre IV

Vibrations des nanopoutres FG-CNTRC en utilisant le modèle troisième ordre

IV. 1. Introduction	66
IV.2. Propriétés mécaniques des poutres CNTRC	66
IV.3. Théorie des poutres	69
IV.3.1. Théorie d'Euler-Bernoulli (Classical beam Theory CBT)	69
IV.3.2. Théorie de premier ordre (First-order Shear Deformation Beam Theory FSDPT).....	70
IV.3.3. Théorie d'ordre supérieur (high-order shear deformation beam theory HSDPT).....	72
IV.4. Formulation mathématique	75
IV.5. Théorie des déformations non locales à gradient.....	78
IV.6. Solutions exactes pour les nanopoutres FG-CNTRC.....	80
IV.7. Résultats et discussions	81
IV.7.1. Résultats numériques	81
IV.7. conclusion	87

Chapitre V

Analyse vibratoire des nanopoutres en FG-CNTRC reposants sur des fondations élastique

V.1. Introduction	88
V.2. Formulation mathématique	88
V.3. Théorie des déformations non locales à gradient.....	91
V.4. Solutions exactes pour les nanopoutres FG-CNTRC.....	93
V.5. Résultats et discussions	94
V.6. conclusion	99

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Conclusion et Perspectives.....	101
---------------------------------	-----

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques.....	103
----------------------------------	-----

Liste des Figures

Figure I.1	Un FGM avec les fractions de volume de phases constitutives graduées dans la direction verticale	05
Figure I.2	(a) Variation continue des propriétés (b) Variation discrète des propriétés.....	05
Figure I.3	Variation continue de la microstructure (schématisée) (Amale2012).....	06
Figure I.4	Variation continue la microstructure (photo) (Amale2012).....	06
Figure I.5	Concept des matériaux à gradient de propriétés.....	7
Figure I.6	Les différents domaines d'application des FGMs.....	9
Figure I.7	La distribution des composantes des matériaux.....	10
Figure I.8	Géométrie d'une poutre en FGM.....	12
Figure I.9	Variation de la fraction volumique à travers l'épaisseur P-FGM.....	13
Figure I.10	Variation de la fraction volumique à travers l'épaisseur S-FGM.....	14
Figure I.11	Module de Young à travers l'épaisseur E-FGM.....	15
Figure II .1	Nanomatériaux avec différentes morphologies :.....	18
Figure II .2	Taille de différents objets et organismes naturels.....	28
Figure II.3	Représentation de l'ascenseur spatial conçu pour transporter des marchandises depuis la surface de la Terre jusqu'à l'espace.....	32
Figure II.4	Principe de l'utilisation de nanocapsules pour le traitement du cancer Figure aimablement fournie par l'Institut National du Cancer	33
FIGURE II.5	Représentation d'un micro-robot fonctionnant de manière similaire aux anticorps dans notre processus de guérison.....	33
FIGURE II.6	Film plastique (durethan) contenant du silicate agissant comme une barrière à l'oxygène	34
FIGURE II.7	Moniteur d'affichage couleur flexible développé par LG.Philips.....	36
FIGURE II.8	Système de transmission typique d'une voiture hybride.....	37
	Les voitures hybrides deviennent de plus en plus courantes, principalement en raison de leur capacité à réduire les émissions de dioxyde de carbone (CO ₂).	
FIGURE II.9	Principe de fonctionnement d'un processus de dessalement de l'eau.....	38
Figure. III.1	Comparaison structurelle des allotropies du carbone : (a) graphite, (b) diamant (adamantane), (c) fullerène, et (d) nanotubes de carbone.....	43
Figure III.2	Empreintes de pas prouvant l'existence de nanotubes de carbone dans la nature et (encadré) leur année de découverte.....	43
Figure III.3	Images de microscopie électronique en transmission à faible résolution des nanotubes de carbone rapporté par Radushkevich et Lukyanovich (1950) (MAG 20 000).....	44

Figure III.4	Différence de taille et de structure entre la fibre de carbone conventionnelle, la nanofibre et les nanotubes (Endo et Dresselhaus 2003).....	45
Figure III.5	Micrographies électroniques en transmission des tubes d'Iijima.....	46
Figure III.6	Découverte et première histoire des CNT (nanotubes de carbone)	48
Figure III.7	Vue externe et interne des nanotubes de carbone monoparoi.....	49
Figure III.8	Vue externe et interne d'un nanotube de carbone bi-paroi.....	50
Figure III.9	Vue externe et interne d'un nanotube de carbone à parois multiples.....	50
Figure III.10	Une feuille de graphène à partir de graphite avec chiralité (n, m).....	51
Figure III.11	CNT en zigzag ($n, m = 10, 0$) à partir d'une feuille de graphène ($n, m = 12, 0$).....	52
Figure III.12a.	Les bases de la chiralité des CNT (nanotubes de carbone).....	52
Figure III.12b	Chiralité en zigzag ($n, m = 10, 0$ /Longueur = 20 Å/Longueur de liaison = 1,5 Å).....	52
Figure III.12c	Chiralité en fauteuil ($n, m = 5, 5$ /Longueur = 20 Å/Longueur de liaison = 1,5 Å).....	52
Figure III.12d	Chiralité chirale ($n, m = 8, 6$ /Longueur = 20 Å/Longueur de liaison = 1,5 Å).....	52
Figure III.13	Méthode de Dépôt chimique en phase vapeur.....	53
Figure III.14	Méthode de décharge à arc électrique.....	55
Figure III.15	Méthode d'ablation au laser - Représentation schématique.....	56
Figure III.16	Méthode d'ablation au laser - Représentation schématique.....	57
Figure IV. 1	Géométrie et sections transversales d'une poutre FG-CNTRC.....	67
Figure. IV. 2	distribution de nanotubes de carbone CNTs à gradient de fonctionnalité.....	68
Figure IV. 3	Cinématique de la déformation de la poutre d'Euler-Bernoulli.....	70
Figure IV. 4	Cinématique de la théorie du premier ordre.....	71
Figure IV. 5	Cinématique de la théorie d'ordre supérieur.....	73
Figure IV. 6	Variation de la fonction de forme $f(z)$ des différents modèles en fonction de l'épaisseur	74
Figure IV. 7	Variation de la dérivée de la fonction de forme $f(z)$ des différents modèles en fonction de l'épaisseur.	74
Figure IV.8	Effet du rapport d'épaisseur sur la fréquence sans dimension. ($V_{cnt}^* = 0.12, \mu = \lambda = 0$)	84
Figure. IV.9	Effet des paramètres non locaux et d'échelle de longueur sur la fréquence sans dimension de la poutre CNTRC(A).....	85
Figure. IV.10	Effet des paramètres non locaux et de l'échelle de longueur sur la fréquence sans dimension de la poutre CNTRC(B).....	85
Figure. IV.11	Effet du nombre de modes sur la fréquence sans dimension de la poutre CNTRC(A)...	86

Figure IV.12	Effet du nombre de modes sur la fréquence sans dimension de la poutre CNTRC(B)...	86
Figure.V.1	Effet du paramètre non local et de l'échelle de longueur sur les fréquences fondamentales adimensionnelles de la poutre en X sur une fondation élastique ($k_w = 0,1, k_s = 0,02, \mu = 2$).....	98
Figure.V.2	Effet du paramètre non local et de l'échelle de longueur sur les fréquences fondamentales adimensionnelles de la poutre en X sur une fondation élastique ($k_w = 0,1, k_s = 0,02, \lambda = 2$).....	98
Figure.V.3	Fréquences fondamentales adimensionnelles de la poutre en X sur une fondation élastique avec différents facteurs de constante de ressort. ($L/h=15, V_{cnt}^* = 0.12, \mu = \lambda$)	99

Liste des Tableaux

Tableau I.1	Comparaison entre les propriétés de la céramique et du métal.....	8
Tableau II.1	Préfixes pour le Système International d'Unités (SI).....	28
Tableau II.2	Chronologie des événements pertinents pour la nanoscience et la nanotechnologie.....	30
Tableau IV.1	Comparaison de la fréquence adimensionnelle de diverses distributions de nanotubes de carbone (CNT) à simple support ($L/h=15$, $V_{cnt}^* = 0.12$).....	81
Tableau IV.2	Effet de la fraction volumique des nanotubes de carbone (CNT) et du rapport d'épaisseur sur les fréquences adimensionnelles	82
Tableau IV.3	Effet des paramètres non locaux et de l'échelle de longueur sur les fréquences adimensionnelles ($L/h=10$).....	83
Tableau V.1	Comparaison de la fréquence adimensionnelle de diverses distributions de (CNT) à simple support avec et sans fondation élastique ($L/h=15$, $V_{cnt}^* = 0.12$).....	96
Tableau V.2	Effet de la fraction volumique des nanotubes de carbone (CNT) et du rapport d'épaisseur sur les fréquences adimensionnelle. ($k_w = 0, k_s = 0$)	97
Tableau V.3	Effet des paramètres non locaux et de l'échelle de longueur sur les fréquences adimensionnelle ($L/h=15$).....	97

Nomenclatures

$P(z)$	Propriété typique du matériau
E	Module d'élasticité de Young
G	Module de cisaillement transversal
ν	Coefficient de Poisson
h	Epaisseur de la poutre
$V(z)$	Fraction volumique totale
V_{cnt}^*	Fraction volumique des nanotubes de carbone.
ρ_{cnt}	Masse volumique des cnts
ρ_m	Masse volumique de la matrice polymère
E_{11}, E_{22}	Modules d'Young dans les directions du plan (x, z)
$\eta_i (i = 1, 2, 3)$	Paramètres d'efficacité des CNT
L	Longueur de la poutre
h	Epaisseur de la poutre
u, v et w	Déplacements de la poutre
u_0, v_0 et w_0	Composantes du champ de déplacement sur le plan moyen
φ_x et φ_y	Rotations autour des axes x et y
$\varepsilon_{xx}, \gamma_{xz}$	Composantes de déformation
$f(z)$,	Fonction trigonométrique
δU	Energie totale de déformation
δK	Energie cinétique
δU_F	Variation de l'énergie potentielle de la fondation élastique
k_w	Raideur de la fondation de Winkler
k_s	Raideur en cisaillement de la fondation élastique
N_{xx}, M_{xx}, P_{xx} et Q_x	Résultantes de contrainte
I_i	Moments d'inertie massiques
σ_{xx}	Contraintes normales axiales
τ_{xz}	Contraintes de cisaillements transversaux
Q_{ij}	Coefficients de rigidité
$\sigma_{ij}^{(0)}$	Contraintes classiques correspondant à la déformation ε_{kl}
$\sigma_{ij}^{(1)}$	Contraintes correspondant au gradient de déformation $\varepsilon_{kl,x}$
C_{ijkl}	Constante élastique
l	Paramètre d'échelle de longueur
$e_0 a, e_1 a$	Paramètres non locaux
$\alpha_0(x, x', e_0 a), \alpha_0(x, x', e_1 a)$	Fonctions noyau non locales
∇^2	Opérateur laplacien
$U_{mn}, V_{mn},$ et $X_{mn},$	Paramètres arbitraires
$\bar{\omega}$	Fréquence adimensionnelle

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La conception et l'analyse des structures modernes sont des aspects cruciaux de l'ingénierie, et elles nécessitent une compréhension approfondie du comportement mécanique de ces structures. Parmi les aspects importants du comportement mécanique figurent la flexion, le flambement et les vibrations libres. Cependant, avec l'introduction de nouveaux matériaux innovants, tels que les matériaux à gradient de propriétés et les matériaux composites renforcés par des nanotubes de carbone, la complexité de l'analyse mécanique a considérablement augmenté.

Ces nouveaux matériaux offrent des opportunités uniques pour améliorer les performances structurelles dans diverses applications industrielles, de l'aérospatiale à l'ingénierie civil, surtout pour étudier la phénomène de la vibration et ces inconvénients sur les structures. La demande croissante de structures légères et résistantes, et puis les nano structure, capables de supporter des charges variées dans des environnements et des conditions opérationnelles diverses, a nécessité l'exploration de nouvelles théories et modèles pour décrire de manière précise le comportement mécanique de ces matériaux avancés.

Parmi les approches émergentes, deux théories se sont avérées particulièrement importantes : la théorie des contraintes non locales et la théorie d'ordre supérieur. Ces théories sont devenues des outils essentiels pour capturer les phénomènes subtils qui se produisent à des échelles fines et dans des conditions non classiques.

La théorie des contraintes non locales reconnaît que le comportement mécanique des matériaux à l'échelle nanométrique peut être très différent de celui des matériaux macroscopiques. Elle prend en compte les effets à longue portée des contraintes et des déformations, qui sont souvent négligés dans les approches classiques. Cette théorie est essentielle pour modéliser de manière précise les matériaux composites renforcés par des nanotubes de carbone, car elle tient compte des interactions à l'échelle nanométrique.

La théorie d'ordre supérieur va encore plus loin en intégrant des termes d'ordre supérieur dans les équations de comportement mécanique. Elle permet de représenter des phénomènes complexes tels que les déformations non linéaires et les instabilités de flambement. Cette

théorie est essentielle pour analyser les structures modernes soumises à des charges variables et dans des conditions non classiques.

Les FGM sont des matériaux dont les propriétés varient continuellement le long d'une direction particulière. Cela peut être réalisé en changeant progressivement la composition du matériau ou en utilisant différents matériaux ayant des propriétés différentes. Les FGM sont souvent utilisés dans des applications où il est nécessaire d'ajuster les propriétés du matériau pour répondre à des exigences spécifiques.

Les théories de la déformation par cisaillement tiennent compte de la déformation transversale de la poutre, ce qui est important pour prédire le comportement de vibration libre des poutres élancées. Les théories classiques des poutres, telles que les théories des poutres d'Euler-Bernoulli et de Timoshenko, supposent que la poutre reste plane pendant la déformation. Cependant, ce n'est pas le cas pour les poutres élancées, qui peuvent subir une déformation transversale significative. Les théories de la déformation par cisaillement tiennent compte de cette déformation transversale en introduisant des degrés de liberté supplémentaires dans les équations gouvernantes.

Rapport d'épaisseur est le rapport de l'épaisseur de la poutre composite à sa largeur. C'est un paramètre important qui influence le comportement de vibration libre de la poutre. Pour les poutres élancées, le rapport d'épaisseur est généralement faible. Dans ce cas, la déformation par cisaillement de la poutre peut avoir un effet significatif sur le comportement de vibration libre.

La distribution des matériaux fait référence à la manière dont les nanotubes de carbone (CNT) sont répartis dans toute la poutre composite. La distribution des matériaux peut avoir un effet significatif sur le comportement de vibration libre de la poutre. Par exemple, une distribution uniforme des CNT donnera généralement une fréquence fondamentale plus basse qu'une distribution non uniforme.

Les caractéristiques non locales et de l'échelle de longueur sont des paramètres importants dans l'analyse des nanostructures. La non-localité fait référence au fait que la contrainte en un point d'une nanostructure dépend non seulement des déformations à ce point, mais aussi des déformations à d'autres points de la structure. Les caractéristiques de l'échelle de longueur

font référence au fait que la taille de la nanostructure peut avoir un effet significatif sur son comportement mécanique.

Ce passage offre un aperçu complet de l'état de l'art dans l'analyse de la vibration libre des poutres FG-CNTRC. Il traite des différentes méthodes analytiques et numériques qui ont été utilisées pour étudier le problème, ainsi que des paramètres clés qui influencent le comportement de vibration libre de ces poutres. Le passage est bien rédigé et informatif, et il constitue une ressource précieuse pour les chercheurs et les ingénieurs travaillant dans le domaine des matériaux composites .

Dans le premier chapitre, nous commencerons par définir les matériaux fonctionnellement graduée, leurs propriétés, l'historique de leur développement, les méthodes de fabrication et leurs domaines d'application.

Dans le deuxième chapitre, représente des différents types et classification des nanomatériaux , l'historique de leur développement , caractéristiques et applications .

Le troisième chapitre définir les Nanotubes de carbone (CNT) leur propriétés, synthèses et applications .

Le quatrième et le cinquième chapitre sera consacré à la formulation d'un modèle numérique des nanopoutre en FG-CNTRC basé sur une nouvelle théorie de déformation par cisaillement d'ordre supérieur et deuxième modèle des nanopoutre FG-CNTRC reposant sur des fondations élastique . Les résultats numériques seront présentés sous forme de figures et de tableaux pour illustrer l'influence des différents paramètres matériels et géométriques sur la réponse vibratoire des nanopoutre FG-CNTRC.

Ce travail de thèse se conclura par les résultats et les conclusions liés à cette recherche.

CHAPITRE I

GENERALITE SUR LES MATERIAUX A GRADIENT DE PROPRIETES

Chapitre I

GENERALITE SUR LES MATERIAUX A GRADIENT DE PROPRIETES

I.1 Introduction

Les matériaux composites légers, avec des rapports de résistance/poids et épaisseur/poids très grandes, ont été utilisés avec succès dans l'industrie aéronautique et dans d'autres applications technologiques. Cependant, les matériaux composites traditionnels sont inutilisables sous un environnement à hautes températures. Les métaux ont été Généralement utilisés dans le domaine de la technologie pendant plusieurs années grâce à leur excellente résistance mécanique et dureté. Mais dans des conditions de hautes températures, la résistance Mécanique du métal devient faible comme pour les matériaux composites traditionnels. Les matériaux en céramique ont d'excellentes caractéristiques en résistance thermique.

Cependant, les applications de la céramique sont habituellement limitées dues à leur faible dureté. Récemment, une nouvelle classe de matériaux composites connue sous le nom de matériaux fonctionnellement gradués (FGM), ou matériaux à gradient de propriétés, a attiré une attention particulière. Le concept de "Matériaux à Gradient de propriétés" a été développé dans le laboratoire national d'aérospatial en 1984 par un groupe de scientifiques au Japon (M. Niino et ses collègues à Sendai). L'idée est de réaliser des matériaux utilisés comme barrière thermique dans les structures spatiales et les réacteurs à fusion (Hirai 1999, Chan 2001, Uemura 2003). Un exemple d'un tel matériau est montré sur la Figure I.1 (Yin 2004) où des particules sphériques ou presque sphériques sont incrustées dans une matrice isotrope. En variant graduellement la fraction de volume des matériaux constitutifs, leurs propriétés matérielles montrent un changement minime et continu d'un point à un autre, de ce fait en remédient aux problèmes d'interface et en atténuant des concentrations de contraintes thermique. C'est dû au fait que les constituants en céramique de FGM peuvent résister aux hautes températures que le produit final possède de meilleures caractéristiques de résistance thermique, tandis que les constituants métalliques fournissent une résistance mécanique plus forte et réduisent la possibilité de rupture catastrophique. Donc un FGM (Functionally Graded Material) typique est un composé non homogène constitué de différentes phases matérielles (habituellement en céramique-métal). Cette solution permet une transition continue des propriétés recherchées, par un gradient de composition, en vue d'atténuer les singularités prédites ci-dessous.

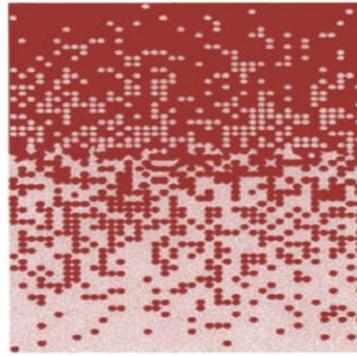
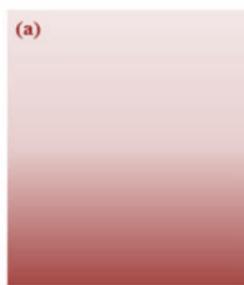


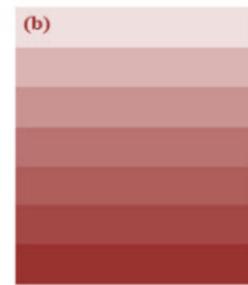
Figure I.1. Un FGM avec les fractions de volume de phases constitutives graduées dans la direction verticale (Yin 2004).

I.2. Concept des matériaux à gradient de propriétés

L'invention du matériau à gradient de fonction (FGM) est attribuée à M. Niino et ses collègues à Sendai en 1984 dans le cadre de son travail sur les barrières thermiques (Yamanouchi *et al.* 1990). Il s'agit d'une classe de composites constitués de deux matériaux ou plus avec des propriétés physico-chimiques différentes. Un FGM est caractérisé par un changement graduel et continu des propriétés du matériau (Bohidar *et al.* 2014). Ils présentent donc une microstructure hétérogène et contrôlée, modulée par un gradient de composition, de porosité, de distribution de phase ou de texture qui induit des différences de propriétés (densité, dureté, conductivité thermique, conductivité électrique...). Dans l'absolu, un FGM peut être fabriqué avec n'importe quelle combinaison de matériaux adaptée à l'application visée. Les FGM sont classés en deux catégories : les FGM continus (Figure (I.2.a)) et les FGM discontinus sous forme de multicouche (Figures (I.2.b)).



(a) Variation continue des propriétés



(b) Variation discrète des propriétés.

Figure I.2: différentes distributions des matériaux FGM

La variation continue des propriétés (Figures (I.3) et (I.4)) trouve son application lorsque, par exemple, la face supérieure est exposée à une haute température alors que la face inférieure est exposée à une basse température. Dans ce cas, la face supérieure est à 100% céramique et la face inférieure est à 100% métal, avec une transition graduelle entre les deux



Figure I.3 . Variation continue de la microstructure (Aboudi 1999). (schématisée)

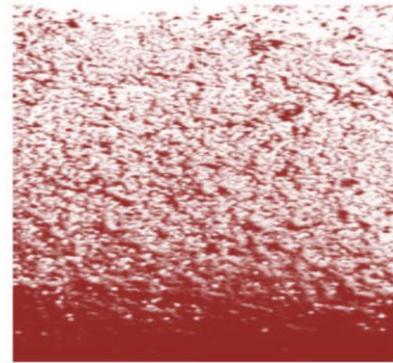


Figure I.4 . Variation continue la microstructure (Aboudi 1999). (photo)

La loi de distribution de puissance (Chiet *et al.* 2006), (Jin *et al.* 2001) et les fonctions exponentielles (Guet *et al.* 1997), (Nejad *et al.* 2013), (Helal *et al.* 2014) sont fréquemment utilisées pour décrire l'évolution des propriétés dans le FGM. Dans la pratique, les FGM trouvent leurs applications dans de nombreux domaines : les biomatériaux (par exemple Ti-Co pour les implants dentaires), l'ingénierie, l'optique (matériau à indice de réfraction graduel), l'aérospatial, l'électronique, les outils de coupe (WC-Co) (Bohidar *et al.* 2014), (Udupa *et al.* 2014), (Kieback *et al.* 2003). En prenant l'exemple des navettes spatiales ou des avions supersoniques dans le domaine aérospatial, leurs composants sont soumis à des températures élevées, sur les parties les plus exposées tel le cône d'entrée, où les matériaux doivent supporter une température de 1800C° en atmosphère sur une face, et résister à un gradient thermique d'environ 1300C° pour une épaisseur d'une dizaine de millimètres. A ce jour il n'y a aucuns matériaux monolithiques pouvant supporter une telle contrainte thermique (Koizumi 1993). La solution envisagée est la mise en œuvre de matériaux dont la face exposée à très haute température posséderait des propriétés de résistance aux fortes chaleurs et à l'oxydation, tel que la céramique, et dont la face intérieure serait très bonne conductrice de la chaleur et posséderait une bonne résistance mécanique et une meilleure ténacité, comme le métal. Cependant, si l'on considère un simple assemblage de ces deux matériaux, ils présentent immédiatement une rupture due aux contraintes thermiques exercées à l'interface entre les deux types de matériaux ayant des propriétés thermiques différentes. L'idéal serait de supprimer cette interface en créant une transition continue entre les deux faces. Vient alors le concept de matériau à gradient de fonction. Le FGM consiste en l'association de deux matériaux aux propriétés structurales et fonctionnelles différentes avec une transition idéalement continue de la composition, de la structure et de la distribution des porosités entre ces matériaux. Le changement continu dans la composition et donc dans la microstructure

d'un matériau FGM est illustré dans la (Figure I.5). Il en résulte un gradient qui déterminera les propriétés du FGM. Dans certains cas, on peut avoir un FGM constitué d'un même matériau mais de microstructure différente (Boch *et al.* 1986).

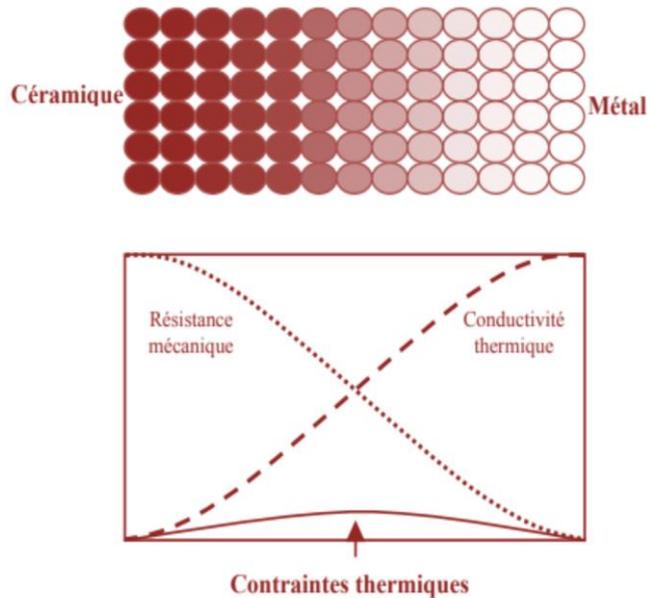


Figure I.5. Concept des matériaux à gradient de propriétés.

L'utilisation de la céramique n'est pas fortuite. Ce matériau est choisi grâce à ses caractéristiques exceptionnelles qui sont énumérées comme suit :

- * Faible réactivité chimique (bonne tenue à la corrosion).
- * Haut module d'élasticité haute dureté.
- * Charge à la rupture élevée.
- * Bas coefficient de frottement (bonne résistance à l'usure).
- * Conservation des propriétés à haute température.
- * Faible coefficient de dilatation thermique (bonne résistance aux chocs thermiques).
- * Faible conductivité thermique (bonne résistance à la température).

Cependant les céramiques sont réputées être fragiles et très vulnérables aux défauts de petites tailles. Les caractéristiques du métal sont données comme suit :

- * Bonne résistance mécanique ;
- * Conductivité thermique élevée,
- * Très bonne ténacité.

Tableau I.1. Comparaison entre les propriétés de la céramique et du métal.

Céramique	La face à basse température	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne résistance thermique. • Bonne résistance à l'oxydation. • Faible conductivité thermique
Céramique-métal	Continuité du matériau d'un point à l'autre « Couches intermédiaires »	<ul style="list-style-type: none"> • Élimination des problèmes de l'interface. • Relaxer les contraintes thermiques
Métal	La face à haute température	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne résistance mécanique. • Conductivité thermique élevée. • Très bonne ténacité.

En ajustant la microstructure de transition d'une façon appropriée, il est possible d'obtenir une distribution optimale de la déformation et des contraintes. Cette possibilité d'ajustement est demandée lors de la conception des structures thermiques aéronautique que set spatiales (moteurs, tuyères, revêtements thermiques, etc.). Ce concept a aussi été utilisé pour améliorer la résistance à la fatigue thermique et la durée de vie des revêtements pare-feu (Jianet *al.* 1995), (Kawasak et Watanabe 1997).

I.3. Domaines d'applications des matériaux fonctionnellement gradués

Le concept des matériaux à gradient de propriétés est applicable dans des nombreux domaines, comme il est illustré dans la Figure I.6. Il a été initialement conçu pour l'industrie de l'aéronautique, où les FGM ont fournis deux propriétés contradictoires telles que la conductivité thermique et d'isolation thermique dans un matériau. Actuellement, elles permettent la production des matériaux légers, forts et durables, et elles sont applicables dans un large intervalle des domaines tels que les matériaux de construction, matériaux de conversion d'énergie, nucléaire et semi-conducteurs.

Applications potentielles des FGM dans le Génie Civil

- Les chaussées rigides (Functionally Graded Concrete Materials for Rigid Pavemen
- Les chaussées souple;
- Les grands vitrages dans les zones chaudes;
- Les tunnel;
- Protection des structures métalliques soumises à un environnement thermique sévère;
- Les centrales nucléaires.



Figure I.6. Les différents domaines d’application des FGMs.

I.4. Comparaison des matériaux FGM et les matériaux traditionnels

Le modèle le plus simple illustrant les différences entre les matériaux à gradient de propriétés (FGM) et les matériaux plus conventionnels sont représentées dans la Figure I.7. Le matériau plan composé a une caractéristique plane, et le matériau relié a une frontière sur l’interface de deux matériaux. Les FGM ont d’excellentes caractéristiques qui diffèrent de ceux des matériaux plans composés et reliés. Par conséquent, les FGM attirent l’attention en matière de leur application dans les domaines industriels puisque ils ont une double propriété des deux matières premières qui sont mélangées ensemble, et la distribution des composants est graduée sans interruption. Par exemple, l’indice qui se compose du métal et de la céramique a la caractéristique de la conductivité thermique et de la force métallique dans le côté métal et la résistance aux hautes températures dans le côté céramique.

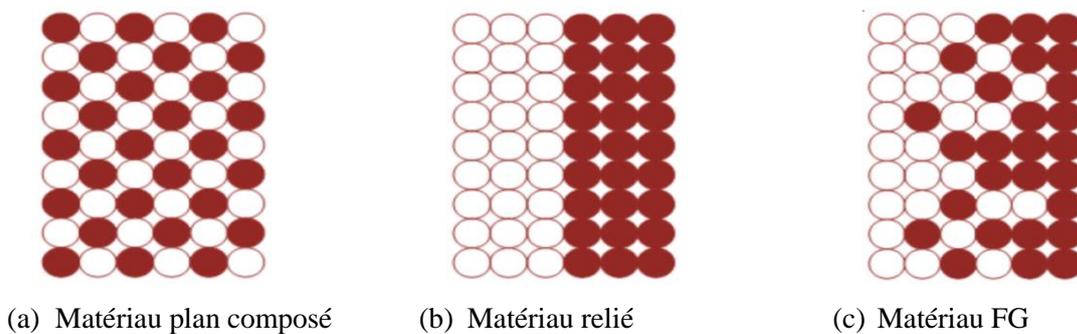


Figure I.7. La distribution des composants des matériaux.

I.5. Inconvénients des FGM

Les matériaux à gradient fonctionnel (FGM) offrent des avantages en adaptant les propriétés des matériaux aux exigences spécifiques de l'ingénierie. Cependant, ils présentent également plusieurs défis et inconvénients notables. Parmi ceux-ci :

- **Processus de fabrication complexe** : Les FGM nécessitent souvent des techniques de fabrication sophistiquées, qui peuvent être coûteuses et difficiles à mettre en œuvre.
- **Difficultés de contrôle qualité** : Assurer l'uniformité et la cohérence à travers la structure graduée peut être difficile, ce qui peut entraîner des variations potentielles dans les propriétés des matériaux.
- **Coût** : Les coûts de production des FGM sont généralement plus élevés par rapport aux matériaux homogènes conventionnels en raison des processus et des matériaux spécialisés impliqués.
- **Complexité de conception** : La conception de composants avec des FGM nécessite une réflexion minutieuse sur les gradients de matériaux, ce qui peut compliquer le processus de conception et augmenter l'effort d'ingénierie.
- **Réparation et recyclage** : La réparation ou le recyclage des composants FGM peut être difficile en raison de la nature hétérogène du matériau, ce qui peut limiter leur durabilité.

I.6. Techniques de fabrication des matériaux fonctionnellement gradués (FGM)

Le processus de fabrication est l'un des domaines les plus importants de la recherche sur les FGM. Une grande partie des travaux a été consacrée au développement des méthodes de production et traitement des FGM. La plupart des procédés de production de FGM sont basés sur une variante de procédés de traitement classiques déjà bien établis. Plusieurs techniques de fabrications sont disponibles pour produire des matériaux fonctionnalisés. Les procédés existants et les plus à jour pour la fabrication des FGM seront expliqués ci-après :

I.6.1. Procédé de poudre sèche

Pour la fabrication des matériaux à gradient de propriété utilisant des matériaux solides on fait appel à la technique de PM (métallurgie des poudres)

Ce procédé de fabrication se présente sous trois phases qui sont structurées de la manière suivante : premièrement le panachage de poudre et ceci en fonction de la répartition spatiale de telle façon à respecter l'exigence appropriée, en second l'empilage et damage des poudres pré-mélangées et finalement le frittage.

I.6.2. Coulage séquentiel en barbotine (Slip Casting)

Le coulage en barbotine (slip casting) consiste à couler une suspension dans un moule poreux qui va drainer le liquide grâce aux forces capillaires, laissant un tesson (couche de poudre compacte) sur la surface du moule. Après séchage, on obtient le corps en cru. Donc le coulage se décompose en deux étapes essentielles : -formation du tesson ou “prise” ; - consolidation du tesson ou “raffermissement”.

I.6.3. Dépôt par électrophorèse

Le dépôt par électrophorèse est un processus où une suspension colloïdale stable est introduite dans une cellule munie de deux électrodes. Les particules chargées se déplacent à travers la solution en direction de la cathode ou de l'anode en réponse au champ électrique, selon la polarité de leur charge.

I.6.4. Projection plasma

La projection plasma est un processus où un gaz soumis à une température élevée devient ionisé, générant ainsi une importante libération de chaleur. Lorsque des particules de céramique sont présentes dans cet environnement, elles fondent totalement ou superficiellement, leur permettant ainsi d'être déposées sur un substrat. La projection plasma des particules est devenue une méthode très répandue pour la fabrication de matériaux fonctionnellement gradués (FGM). Les principaux avantages de cette technique sont la simplicité de l'équipement, le dépôt efficace des particules sur des substrats de géométrie complexe, les performances des surfaces en service et la compatibilité entre les céramiques et les métaux.

I.6.5. Dépôt chimique en phase vapeur et dépôt physique en phase vapeur

Le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) et le dépôt physique en phase vapeur (PVD) sont des techniques où les atomes du matériau source sont déposés sur la surface du substrat. Ces méthodes peuvent être employées pour la préparation de matériaux fonctionnellement gradués (FGM) sur des substrats présentant des formes complexes.

I.6.6. Frittage et infiltration

La technique de frittage et d'infiltration est un processus en deux étapes adapté à la fabrication de composites à gradient de fonction, constitués de deux matériaux ayant des températures de fusion très différentes. Dans la première étape, une matrice frittée est produite à partir du matériau à haute température de fusion, avec un gradient de porosité contrôlé. Dans la seconde étape, ces porosités sont remplies par infiltration avec le deuxième matériau fondu. Ce processus permet de réduire efficacement les contraintes thermiques. Il est généralement

applicable à diverses combinaisons de matériaux qui sont chimiquement inertes et qui présentent des points de fusion significativement différents les uns des autres

I.6.7. Implantation ionique

L'implantation ionique est une technique de pointe pour la fabrication de matériaux fonctionnellement gradués (FGM), permettant la création de couches très minces ($<1\mu\text{m}$) sur divers substrats tels que les plastiques, les céramiques et les métaux. Ce processus implique l'utilisation de faisceaux ioniques énergétiques ou de gaz réactifs pour traiter la surface, créant ainsi des couches avec un gradient de composition finement contrôlé.

I.6.8. Dépôt par centrifugation

Cette méthode implique le versement d'une suspension colloïdale relativement diluée dans des flacons cylindriques, suivie d'une centrifugation. La sédimentation des particules se produit et le liquide excédentaire est retiré. Ce processus est répété pour former des multicouches, avec des variations dans la composition ou la concentration contrôlées par la centrifugation.

I.7. Les propriétés matérielles effectives des matériaux à gradient de propriétés

Les matériaux à gradient de propriétés « FGM » consistent en l'association de deux matériaux aux propriétés structurales et fonctionnelles différentes avec une transition idéalement continue de la composition, de la structure et de la distribution des porosités entre ces matériaux de manière à optimiser les performances de la structure qu'ils constituent. Les caractéristiques les plus distinctes des matériaux FGM sont leurs microstructures non-uniformes avec des macro-propriétés graduées dans l'espace. Un FGM peut être définie par la variation des fractions de volume. La plupart des chercheurs emploient la fonction de puissance ou polynômiale (P-FGM), la fonction exponentielle (E-FGM), ou la fonction sigmoïde (S-FGM) pour décrire les fractions de volume.

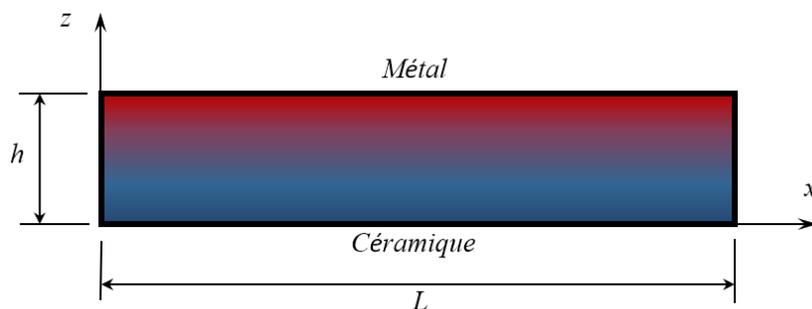


Figure I.8. Géométrie d'une poutre en FGM.

La coordonnée x définit la longueur de la poutre, tandis que l'axe z perpendiculaire à l'axe neutre de la poutre et dans la direction de l'épaisseur. Les propriétés du matériau dont le module de Young et le coefficient de Poisson sur les surfaces supérieures et inférieures sont différentes mais sont déterminés selon les besoins.

Toutefois le module de Young et le coefficient de Poisson varient de façon continue, dans le sens de l'épaisseur de la poutre. Dans la pratique, la plupart des structures FGM sont généralement à deux constituants : de la céramique et du métal inoxydable. Dans ce cas, la loi des mélanges (loi de Voigt) se réduit par la relation suivante :

$$P = P_m V_m + P_c V_c \quad , \quad V_m + V_c = 1 \tag{I.1}$$

Où $P(z)$ désigne une propriété typique du matériau, à savoir, le module d'élasticité de Young E , le module de cisaillement transversal G , le coefficient de Poisson ν , la densité de matériau ρ , ...etc.

I.7.1. Propriétés matérielles d'une poutre P-FGM

La fraction volumique de la propriété du matériau P-FGM en fonction de l'épaisseur obéit à une fonction en loi de puissance comme suit :

$$V(z) = \left(\frac{z + h/2}{h} \right)^k \tag{I.2}$$

Où k est un paramètre matériel et h est l'épaisseur de la poutre. Une fois la fraction volumique $V(z)$ a été définie, les propriétés matérielles d'une poutre P-FGM peuvent être déterminées par la loi des mélanges :

$$E(z) = (E_c - E_m)V(z) + E_m \tag{I.3}$$

Où E_c et E_m sont respectivement les modules de Young de la surface supérieure $z=h/2$ et de la surface inférieure $z = -h/2$ de la poutre FGM.

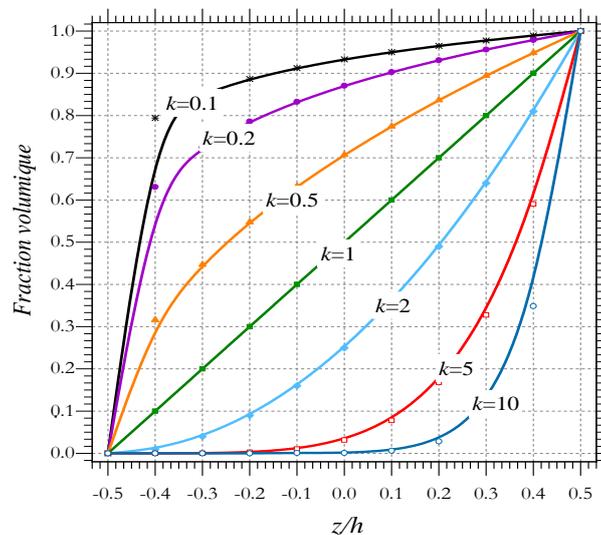


Figure I.9. Variation de la fraction volumique à travers l'épaisseur P-FGM.

La variation de $V(z)$ dans la direction d'épaisseur de la poutre P-FGM est représentée sur la Figure (I.9). Il apparaît clairement que ce dernier change rapidement près de surface Inférieure pour $p < 1$, et augmenté rapidement près de la surface supérieure pour $p > 1$.

I.7.2 Propriétés matérielles de la poutre S-FGM

Chung et Chi (Chung and Chi 2001) ont défini la fraction de volume de la poutre FGM en utilisant deux fonctions de loi de puissance pour assurer une bonne distribution des contraintes parmi toutes les interfaces. Les 02 fonctions de loi de puissance sont définies par :

$$v_{c1}(z) = \frac{1}{2} \left(\frac{z + h/2}{h/2} \right)^k \quad \text{pour } h/2 \leq z \leq 0 \quad (I.4)$$

$$v_{c2}(z) = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{z + h/2}{h/2} \right)^k \quad \text{pour } 0 \leq z \leq h/2 \quad (I.5)$$

En utilisant la loi des mélanges, le module de Young de la poutre S-FGM peut être calculé par

$$E(z) = v_{c1}(z)E_c + [1 - v_{c1}(z)]E_m \quad \text{pour } h/2 \leq z \leq 0 \quad (I.6)$$

$$E(z) = v_{c2}(z)E_c + [1 - v_{c2}(z)]E_m \quad \text{pour } 0 \leq z \leq h/2 \quad (I.7)$$

La (Figure I.10) montre que la variation de la fraction volumique définie par les équations(I.3) représente les distributions sigmoïdes, et cette poutre FGM est appelée (Poutre S-FGM).

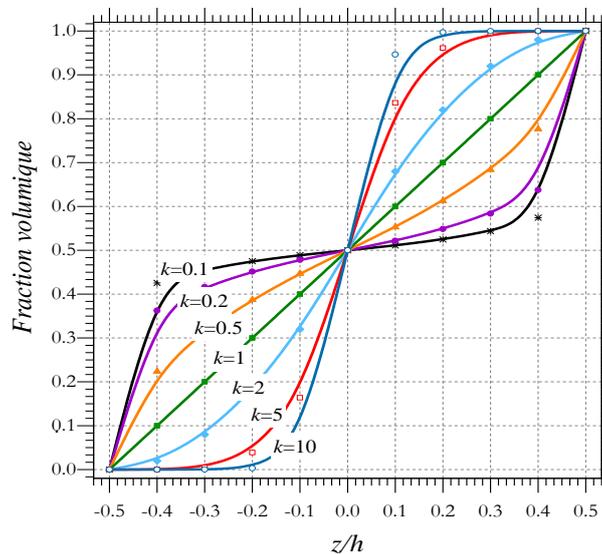


Figure I.10. Variation de la fraction volumique à travers l'épaisseur S-FGM.

I.7.3 Propriétés matérielles de la poutre E-FGM

Plusieurs chercheurs ont adopté la fonction exponentielle pour prédire le comportement statique et dynamique des structures en FGM. Pour une structure en FGM d'épaisseur uniforme h , les propriétés typiques du matériau en tout point situé à une distance z de la surface de référence sont données sous la forme :

$$E(z) = E_m e^{B\left(z+\frac{h}{2}\right)} \quad (I.8)$$

$$B = \frac{1}{h} \ln\left(\frac{E_C}{E_m}\right) \quad (I.9)$$

La variation du module de Young à travers l'épaisseur de la poutre E-FGM est représentée sur la (Figure I.11).

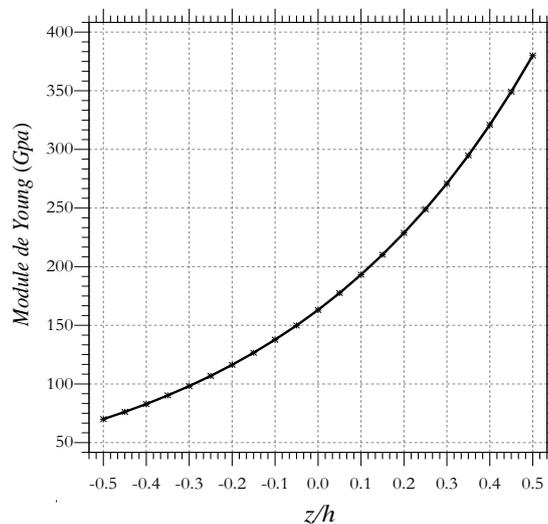


Figure I.11. Module de Young à travers l'épaisseur E-FGM.

I.8. Développements récents et défis des FGM

Dans le cas de la plupart des FGM, une propriété matérielle varie dans le sens de l'épaisseur. Cependant, les applications modernes peuvent exiger des matériaux FGM dans lesquels les propriétés du matériau varient à la fois dans l'épaisseur et dans les directions axiales. Récemment, un matériau à gradient dont les propriétés varient dans les deux sens a également été développé et étudié de manière approfondie. Ces matériaux intelligents sont connus sous le nom de matériaux à gradient fonctionnel bidirectionnel (2-D-FGM). La technique AM basée sur le dépôt de métal par laser est la plus appropriée pour produire de tels 2-D-FGM. Bien que des progrès technologiques substantiels aient été réalisés dans le domaine des FGM, peu de problèmes critiques doivent encore être résolus. Une base de données appropriée des FGM en termes de paramètres et de tests n'est toujours pas disponible. Les méthodes de test et de mesure conventionnelles peuvent ne pas convenir pour évaluer les

performances des FGM modernes, de sorte que le développement de méthodes de test avancées est nécessaire. La plupart des techniques de traitement des FGM étant très coûteuses, la technique de traitement à faible coût qui peut produire en masse des FGM de grande taille et de forme complexe reste un défi. La sélection du matériau approprié adapté à l'application prévue est le défi immédiat et direct du développement technologique futur dans le domaine de la recherche sur les FGM.

I.9. Conclusion

Ce chapitre est dédié à une présentation générale des matériaux fonctionnellement gradués, également appelés matériaux à gradient de propriété. Nous avons entrepris une introduction approfondie sur ces matériaux innovants, qui représentent une avancée majeure. Nous avons débuté par une étude bibliographique ainsi qu'une conceptualisation de ces matériaux à gradient de propriété. Chaque matériau possède un élément déclencheur ayant permis son apparition, exploré de manière subséquente à travers un aperçu des méthodes d'élaboration disponibles. Cela inclut le procédé de poudre sèche, le frittage, l'infiltration, ainsi que le coulage séquentiel, centrifuge et en bande, le pressage à chaud, et enfin la projection thermique. Et afin d'éviter de se contenter des informations stériles on s'est penché sur des informations distinctives sur ces matériaux dans la diversification qui existe avec les matériaux composites traditionnels, et vu que ces matériaux fonctionnellement gradués montrent des avantages et des inconvénients de plusieurs phénomènes, en conséquence nous avons jugé nécessaire de présenter cette partie et de l'articuler par une présentation sur leurs domaines d'exploitations puisque ces matériaux sont actuellement introduits dans des champs d'applications vastes et sensibles, à titre d'exemple le domaine médical qui est en relation direct avec la survivance de l'humanité.

CHAPITRE II
LES NANOMATERIAUX

CHAPITRE II

LES NANOMATERIAUX

II .1.Introduction

Les nanoparticules (NP) et les matériaux nanostructurés (NSM) sont des sujets de recherche actifs et un secteur technico-économique en croissance dans de nombreux domaines d'application. Leur importance dans les avancées technologiques est due à leurs caractéristiques ajustables telles que le point de fusion, la mouillabilité, la conductivité électrique et thermique, etc., ce qui entraîne des performances améliorées par rapport aux matériaux en vrac. Un nanomètre (nm) représente 10^{-9} mètre en longueur selon le Système international d'unités (SI). Les NP/NSM sont généralement définis comme des matériaux ayant une dimension de 1 à 1000 nm, bien que souvent définis comme ayant un diamètre de 1 à 100 nm.

Les définitions des NP/NSM varient selon les organisations. Par exemple, l'Agence de protection de l'environnement (EPA) les considère comme ayant des propriétés uniques différentes de celles des composés chimiques de plus grande dimension. Différentes définitions existent également au sein de l'Union européenne (UE) et des États-Unis, ce qui complique la réglementation. L'absence d'une définition internationale unique pour les NP/NSM constitue un défi majeur dans le développement de réglementations uniformes.

II .2.Types et classification des nanomatériaux

La plupart des NP et des NSM actuels peuvent être regroupés en quatre catégories basées sur les matériaux (les références renvoient à des revues récentes sur ces différentes catégories de NM).

- **Nanomatériaux à base de carbone**: Généralement, ces NM contiennent du carbone et se présentent sous des formes telles que des tubes creux, des ellipsoïdes ou des sphères. Les fullérènes (C₆₀), les nanotubes de carbone (CNT), les nanofibres de carbone, le noir de carbone, le graphène (Gr) et les oignons de carbone sont inclus dans la catégorie des NM à base de carbone. L'ablation laser, la décharge à arc et le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) sont les principales méthodes de production de ces matériaux à base de carbone (à l'exception du noir de carbone) (Kumar et al. 2016).

Nanomatériaux à base d'inorganiques : Ces NM comprennent des NP et des NSM de métaux et d'oxydes métalliques. Ces NM peuvent être synthétisés en métaux tels que les NP

d'or ou d'argent, en oxydes métalliques tels que les NP de TiO_2 et de ZnO , et en semi-conducteurs tels que le silicium et les céramiques.

- **Nanomatériaux à base d'organiques**: Ils comprennent principalement des NM fabriqués à partir de matière organique, à l'exclusion des NM à base de carbone ou d'inorganiques. L'utilisation d'interactions non covalentes (faibles) pour l'auto-assemblage et la conception de molécules contribue à transformer les NM organiques en structures souhaitées telles que des dendromètres, des micelles, des liposomes et des NP polymères.

- **Nanomatériaux à base de composites**: Les NM composites sont des NP/NSM multi phases avec une phase à l'échelle nanométrique qui peut soit combiner des NP avec d'autres NP, soit combiner des NP avec des matériaux plus grands ou de type massif (par exemple, des nanofibres hybrides) ou des structures plus complexes, telles que des structures métal-organique. Les composites peuvent être des combinaisons de NM à base de carbone, de NM à base de métaux ou de NM à base d'organiques avec n'importe quelle forme de matériaux massifs en métal, céramique ou polymère. Les NM sont synthétisés dans différentes morphologies comme mentionné dans la Figure II. 1 en fonction des propriétés requises pour l'application souhaitée.

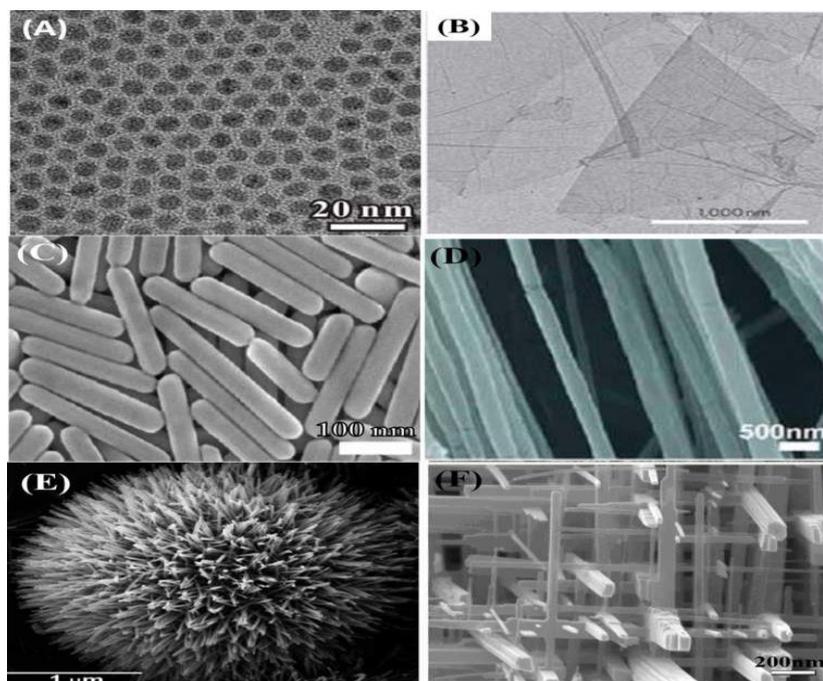


Figure II.1 : Nanomatériaux avec différentes morphologies :

- (A) NP de Pd non poreux (0D) (Zhang et al 2012), copyright Zhang et al. ; licencié par Springer, 2012,
- (B) Feuilles de graphène (2D) (Li et al 2012), copyright 2012, Springer Nature,
- (C) Nanobâtonnets d'argent (1D) (Zhang et al 2011), copyright 2011, American Chemical Society,
- (D) Nanofibres de polyéthylène oxyde (1D) (Badrossamay et al 2010) copyright 2010, American Chemical Society,
- (E) Nanofils d'oxyde de ZnO en forme d'oursin (3D), reproduit à partir de (Gokarnaet *al.* 2014) avec la permission de The Royal Society of Chemistry,
- (F) Réseau de nanofils de WO_3 (3D) (Zhou et *al.* 2005).

II.3. Classification des nanomatériaux en fonction de leurs dimensions

La production de produits conventionnels à l'échelle nanométrique aide actuellement et continuera d'aider au progrès économique de nombreux pays. De nombreux types de NP (nanoparticules) et de MN (matériaux nanostructurés) ont été signalés, et de nombreuses autres variétés sont prévues pour l'avenir. Par conséquent, la nécessité de les classer s'est affirmée. La première idée de classification des NM (nanomatériaux) a été donnée par (Gleiter et *al.*2000). Ici, les NM étaient classés en fonction de leurs formes cristallines et de leur composition chimique. Cependant, le schéma de Gleiter n'était pas entièrement complet car la dimensionnalité des NP et des MN n'était pas prise en compte (Tiwari et *al.*2012). En 2007, Pokropivny et Skorokhod ont proposé un nouveau schéma de classification des NM qui incluait les composites récemment développés tels que les NM 0D, 1D, 2D et 3D, comme le montre la Figure 1 (Pokropivny et *al.* 2007). Cette classification dépend fortement du mouvement des électrons le long des dimensions des NM. Par exemple, les électrons dans les NM 0D sont piégés dans un espace sans dimension, tandis que les NM 1D ont des électrons qui peuvent se déplacer le long de l'axe x, qui est inférieur à 100 nm. De même, les NM 2D et 3D ont un mouvement électronique le long des axes x-y et x, y, z respectivement.

La capacité à prédire les propriétés des NM détermine la valeur de classification des NM. Les propriétés des NM dépendent fortement des joints de grains, comme mentionné dans le concept d'« ingénierie des joints de grains » dans la classification de Gleiter. Par conséquent, les effets de taille interne classiques, tels que la réduction du point de fusion et l'amélioration de la diffusion, seront renforcés par l'ingénierie des joints de grains. La classification proposée par Pokropivny et Skorokhod suggère que les caractéristiques des NM sont attribuées à la forme des particules et à la dimensionnalité, conformément au concept d'« ingénierie de surface », et donc à la classe des NM. Ainsi, ces raisons mettent l'accent sur l'ingénierie de la forme et de la dimensionnalité des particules ainsi que sur l'ingénierie des joints de grains pour étendre l'application des MN.

II .4.Classification des nanomatériaux en fonction de leur origine

Outre les classifications basées sur la dimension et le matériau, les NP et les MN peuvent également être classés comme naturels ou synthétiques, en fonction de leur origine.

Les nanomatériaux naturels sont produits dans la nature soit par des espèces biologiques, soit par des activités anthropogéniques. La production de surfaces artificielles avec des modèles micro et nanométriques exclusifs et des propriétés pour des applications technologiques est facilement disponible à partir de sources naturelles. Les NM naturels se trouvent dans les sphères de la Terre (c'est-à-dire dans l'hydrosphère, l'atmosphère, la lithosphère et même dans la biosphère), indépendamment des actions humaines. La Terre est composée de NM qui se forment naturellement et sont présents dans les sphères de la Terre, telles que l'atmosphère, qui comprend l'ensemble de la troposphère, l'hydrosphère, qui comprend les océans, les lacs, les rivières, les eaux souterraines et les sources hydrothermales, la lithosphère, qui est constituée de roches, de sols, de magma ou de lave à des stades particuliers de l'évolution, et la biosphère, qui couvre les micro-organismes et les organismes supérieurs, y compris les humains (Hochella et al 2015).

Les nanomatériaux synthétiques (artificiels) sont produits par broyage mécanique, émissions de moteur et de fumée, ou sont synthétisés par des méthodes physiques, chimiques, biologiques ou hybrides. La question des stratégies d'évaluation des risques s'est posée ces derniers temps en raison de l'augmentation de la fabrication et de la libération ultérieure de NM fabriqués, ainsi que de leur utilisation dans des produits de consommation et des applications industrielles. Ces stratégies d'évaluation des risques sont très utiles pour prévoir le comportement et le destin des NM fabriqués dans divers milieux environnementaux. Le principal défi parmi les NM fabriqués réside dans le fait de savoir si les connaissances existantes sont suffisantes pour prévoir leur comportement ou s'ils présentent un comportement lié à l'environnement distinct, différent des NM naturels. Actuellement, différentes sources liées aux applications potentielles sont utilisées pour la production de NM fabriqués (Wagner et al. 2014).

II .5.Histoire et développement des nanomatériaux

Le renforcement des matrices céramiques avec des nanofibres d'amiante remonte à plus de 4500 ans, tandis que les anciens Égyptiens utilisaient des nanomatériaux il y a plus de 4000 ans pour teindre les cheveux et fabriquer des pigments synthétiques comme le bleu égyptien. Les premières synthèses de nanoparticules métalliques remontent au XIVE et XIIIe siècle av.

J.-C., avec des exemples de verre rouge contenant des nanoparticules de cuivre et d'oxyde cuivreux. Les découvertes archéologiques montrent également l'utilisation de nanoparticules métalliques dans les émaux celtiques et les coupes de Lycurgue romaines.

Michael Faraday a décrit la synthèse de nanoparticules d'or colloïdal en 1857, marquant le début de l'histoire des nanomatériaux. Les nanoparticules métalliques étaient utilisées dans la fabrication de verre et de vitraux médiévaux pour leurs propriétés optiques. Aujourd'hui, les nanomatériaux sont largement utilisés pour améliorer les propriétés des matériaux en vrac, comme la résistance, la conductivité et la légèreté, ainsi que pour créer des produits innovants tels que les vêtements antibactériens, les cellules solaires et les médicaments.

Les applications commerciales des nanomatériaux comprennent les technologies antibactériennes dans les appareils électroménagers, les améliorations de la sécurité automobile et les produits pharmaceutiques comme Abraxane™. En 2014, plus de 1814 produits de consommation basés sur la nanotechnologie étaient disponibles dans plus de 20 pays, témoignant de l'importance croissante des nanomatériaux dans notre vie quotidienne.

II .6.Caractéristiques uniques des nanomatériaux

Les propriétés de la matière à l'échelle nanométrique sont considérablement différentes par rapport à celles de leurs homologues à l'échelle macroscopique. Les effets dépendant de la taille deviennent plus prononcés à l'échelle nanométrique. Par exemple, une solution d'or (Au) semble jaune à l'échelle macroscopique, mais elle peut paraître violette ou rouge à l'échelle nanométrique (R. Jose Varghese et al 2019). Les propriétés des nanomatériaux peuvent être ajustées en modifiant leur taille. À l'échelle nanométrique, les propriétés électroniques diffèrent considérablement de celles des matériaux macroscopiques. Par exemple, le bore à l'état massif n'est pas considéré comme un métal, tandis qu'un réseau bidimensionnel de bore (borophène) semble être un excellent métal bidimensionnel (A. J. Mannix et al. 2015). Comparées à leurs homologues à l'échelle macroscopique, les propriétés mécaniques des nanomatériaux sont considérablement améliorées en raison de l'augmentation de la perfection cristalline ou de la réduction des défauts cristallographiques. Les propriétés électroniques des semi-conducteurs dans la plage de 1 à 10 nm sont régies par des considérations mécaniques quantiques. Ainsi, les nanosphères ayant des diamètres de 1 à 10 nm sont appelées points quantiques. Les propriétés optiques des nanomatériaux, telles que les points quantiques, dépendent fortement de leur forme et de leur taille. Une paire électron-trou photogénérée a un diamètre d'exciton de l'ordre de 1 à 10 nm. Par conséquent, l'absorption et

l'émission de lumière par les semi-conducteurs peuvent être contrôlées en modifiant la taille des nanoparticules dans cette plage. Cependant, dans le cas des métaux, le libre parcours moyen des électrons est d'environ 10 à 100 nm, et c'est pourquoi on s'attend à ce que des effets électroniques et optiques se manifestent dans une plage de 10 à 100 nm. Les couleurs des solutions aqueuses de nanoparticules métalliques peuvent être modifiées en changeant le rapport d'aspect. Les solutions aqueuses de nanoparticules d'argent (Ag) présentent différentes couleurs selon le rapport d'aspect. Un décalage vers le rouge dans la bande d'absorption apparaît avec une augmentation du rapport d'aspect.

Parmi une série de propriétés uniques, les caractéristiques clés suivantes peuvent être obtenues en ajustant les tailles et les morphologies des nanomatériaux :

II.6.1. Surface

Les surfaces des nanomatériaux sont généralement considérablement plus grandes que celles de leurs homologues à l'échelle macroscopique, et cette propriété est associée à tous les nanomatériaux (R. Tomar et al 2020).

II.6.2. Magnétisme

Le comportement magnétique des éléments peut changer à l'échelle nanométrique. Un élément non magnétique peut devenir magnétique à l'échelle nanométrique..

II.6.3. Effets quantiques

Les effets quantiques sont plus prononcés à l'échelle nanométrique. Cependant, la taille à laquelle ces effets apparaîtront dépend fortement de la nature du matériau semi-conducteur.

II.6.4. Conductivité thermique et électrique élevée

Selon la nature du nanomatériau, une conductivité thermique et électrique extraordinaire peut être observée à l'échelle nanométrique par rapport aux homologues à l'échelle macroscopique. Un exemple en est le graphène, obtenu à partir du graphite (S. K. Krishnan et al. 2019).

II.6.5. Excellentes propriétés mécaniques

Les nanomatériaux présentent d'excellentes propriétés mécaniques absentes de leurs homologues macroscopiques.. (Q. Wu et al. 2020)

II.6.6. Excellent support pour les catalyseurs

Les feuilles bidimensionnelles de divers nanomatériaux ont permis la bonne dispersion de nanoparticules de catalyseurs actifs, améliorant considérablement les performances du catalyseur. (W. Zhu et al 2020). Récemment, les catalyseurs ont été dispersés atomiquement sur des feuilles bidimensionnelles de nanomatériaux pour renforcer leurs performances.. (X. Liu et al. 2020)

II .6.7. Activité antimicrobienne

Certains nanomatériaux possèdent des propriétés antivirales, antibactériennes et antifongiques et ont une excellente capacité à lutter contre les maladies liées aux pathogènes. (P.Makvandi et *al.* 2020),(E. Castro et *al.* 2017)

Dans l'ensemble, ces caractéristiques ont fait des matériaux à l'échelle nanométrique des éléments précieux pour un large éventail d'applications, améliorant considérablement les performances de divers dispositifs et matériaux dans de nombreux domaines. Les détails sur les différents nanomatériaux, leurs propriétés et leurs applications dans divers domaines seront discutés ci-dessous.

II .7. Nanomatériaux, caractéristiques et applications

II.7.1. Les nanomatériaux à base de carbone : sont une famille de nanomatériaux qui ont été largement explorés pour diverses applications en raison de leurs caractéristiques exceptionnelles. Les propriétés extraordinaires des nanomatériaux à base de carbone modulables ont suscité un grand intérêt pour leur utilisation dans de nouvelles technologies et la résolution de défis modernes(L. Chen et *al.* 2020). Cette famille de nanomatériaux à base de carbone comprend plusieurs nanomatériaux uniques, notamment les nanotubes de carbone (CNT), les fullerènes, le graphène, les nanocornes de carbone, les points quantiques à base de carbone, et bien d'autres. Dans cette section, nous discuterons brièvement de ces nanomatériaux, en mettant en avant leurs caractéristiques clés et leur importance.

II .7.1.1. Fullerènes. Les fullerènes :sont une forme allotropique étonnante du carbone et ont été découverts en 1985. Les fullerènes sont des cages hautement symétriques d'atomes de carbone hybridés sp^2 . Ils sont des molécules distinctes et sont constitués d'un nombre spécifique d'atomes de carbone, ce qui les distingue des autres formes allotropiques du carbone. Les fullerènes se présentent sous différentes tailles en fonction du nombre d'atomes de carbone, tels que C_{60} , C_{70} , C_{72} , C_{76} , C_{84} et C_{100} (R. G. Mendes et al 2013). Parmi eux, l'exemple le plus abondant et le plus célèbre est le fullerène C_{60} . Le fullerène C_{60} est une structure creuse composée de 12 pentagones et de 20 hexagones formés à partir de 60 atomes de carbone liés les uns aux autres par des liaisons covalentes hybridées sp^2 et présentant une symétrie icosaédrale. Dans les fullerènes, les cycles à cinq membres sont isolés par des cycles à six membres. Le fullerène (C_{60}) est considéré comme un matériau tridimensionnel idéal en raison de sa petite taille, de sa forme sphérique et de son caractère isotopique.(X. Fan et *al.*

2020) La sphère est considérée comme l'une des structures les plus stables dans la nature, et il en va de même pour les fullerènes.

Dans la famille des nanomatériaux à base de carbone, les fullerènes ont été les premiers matériaux symétriques, ouvrant de nouvelles perspectives dans le domaine des nanomatériaux. Cela a conduit à la découverte d'autres matériaux nanostructurés à base de carbone, tels que les nanotubes de carbone et le graphène. (S. Goodarzi et al. 2017) Les fullerènes se trouvent dans la nature et dans l'espace interstellaire. Il est intéressant de noter que les fullerènes ont été élus « molécule de l'année » en 1991 et ont attiré plus de projets de recherche que d'autres sujets scientifiques au cours de cette période. Les fullerènes possèdent plusieurs caractéristiques uniques qui les rendent attrayants pour des applications dans différents domaines. Ils sont partiellement solubles dans une gamme de solvants, ce qui les distingue des autres formes allotropiques du carbone.

II.7.1.2. Nanotubes de carbone (CNT) : Les nanotubes de carbone (CNT) sont des membres essentiels de la famille des nanomatériaux à base de carbone, découverts en 1991 par S. Iijima. Ils ont depuis suscité un intérêt considérable en raison de leurs propriétés uniques et de leur potentiel d'application dans divers domaines.

Les CNT se présentent sous différentes formes : les nanotubes de carbone à paroi unique, les nanotubes de carbone à double paroi et les nanotubes de carbone à paroi multiple. Ces structures varient en fonction du nombre de feuilles de graphène enroulées pour former le nanotube.

Les méthodes de synthèse des CNT comprennent le dépôt chimique en phase vapeur, l'ablation laser, la décharge à l'arc et la croissance catalytique en phase gazeuse.

Les propriétés des CNT varient en fonction de leur structure. Les CNT peuvent présenter des comportements métalliques ou semi-conducteurs, déterminés par leur diamètre et leur hélicité. Les CNT possèdent des propriétés mécaniques exceptionnelles, avec des résistances à la traction élevées. Leur grande résistance et leur rapport d'aspect élevé en font un agent de renforcement idéal pour les composites.

Les CNT trouvent des applications dans divers domaines, notamment dans la production de composites légers, les dispositifs électroniques, les batteries lithium-ion et les émissions d'électrons.

Pour optimiser les performances des composites à base de CNT, plusieurs facteurs doivent être pris en compte, notamment la fraction volumique des CNT, leur orientation, leur adhésion à la matrice, leur rapport d'aspect et l'homogénéité du composite.

En résumé, les nanotubes de carbone présentent un large éventail d'applications potentielles et sont devenus des matériaux industriels importants en raison de leurs propriétés uniques et de leur polyvalence.

II .7.1.3. Graphène : Le graphène, membre de la famille des nanomatériaux à base de carbone, est apparu comme un matériau magique qui a suscité une attention incroyable peu de temps après son isolation du graphite en 2004. Les caractéristiques frappantes du graphène ont promis de révolutionner les domaines des batteries, des supercondensateurs, des cellules solaires, des transistors à effet de champ, de la catalyse, des capteurs et de la technologie membranaire.(N. N. Anh et *al.* 2020),(G. K. Dalapati et *al.* 2020) La fièvre du graphène n'a cessé de croître pour répondre aux besoins de divers dispositifs et obtenir des performances souhaitables. Par conséquent, une pression accrue est exercée sur cette recherche pour explorer comment amener le graphène sur le marché. Le graphène consiste en des feuilles planes d'atomes de carbone hybridés sp^2 bidimensionnels qui sont étroitement disposés en une structure en nid d'abeille. Le graphène est l'un des matériaux les plus minces connus et il possède une excellente résistance mécanique. Le graphène est transparent, ce qui est impressionnant lorsqu'il s'agit de fabriquer des panneaux lumineux transparents et des écrans tactiles. Le graphène possède également une surface théorique exceptionnellement élevée d'environ $2630 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$. La surface du graphène est bien plus élevée par rapport aux fullerènes et au graphite. Elle est également plus élevée par rapport aux nanotubes de carbone. S. Ghosh et *al.* (2008) ont rapporté que la conductivité thermique des flocons de graphène se situe dans la plage de $3080\text{--}5150 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Balandin et *al.* (2008) a obtenu une conductivité thermique comprise entre $(4,84 \pm 0,44) \times 10^3$ et $(5,30 \pm 0,48) \times 10^3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ à partir du graphène monocouche. Cette valeur élevée de conductivité thermique peut surpasser les nanotubes de carbone dans le domaine de la conduction de la chaleur. K. I. Bolotin a atteint une mobilité électronique ultra-élevée de $200\,000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ à des densités d'électrons d'environ $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ en suspendant du graphène monocouche(K. I. Bolotin et *al.* 2008) Les propriétés distinctives du graphène ont attiré une attention significative de la part des chercheurs. Ils ont commencé à l'évaluer théoriquement et expérimentalement afin d'améliorer les performances de divers dispositifs en surmontant les défis conventionnels (Tableau 2).

II .7.1.4. Nanodiamants : Les nanodiamants, apparus dans les années 1960 lors de recherches sur les explosifs en URSS, sont des matériaux à base de carbone monocristallins dont la taille des particules est inférieure à 100 nm. Leur structure de type

cœur-coque et leur riche chimie de surface, avec une variété de groupes fonctionnels, permettent leur fonctionnalisation pour des applications spécifiques. Synthétisés par diverses méthodes telles que l'irradiation ionique du graphite et le broyage à haute énergie, ils possèdent des propriétés optiques exceptionnelles, des surfaces spécifiques importantes et des structures riches. Les nanodiamants sont utilisés comme agents de renforcement dans les composites polymères, offrant une stabilité thermique, des propriétés mécaniques améliorées et une conductivité thermique supérieure. Ils présentent un grand potentiel dans le stockage d'énergie, la fabrication de capteurs, la dépollution de l'environnement, le traitement des eaux usées et l'imagerie médicale, en raison de leur fluorescence stable et de leur longue durée de vie. Leur chimie de surface remarquable les positionne comme des candidats prometteurs dans le domaine de la nanotechnologie.

II.7.1.5. Points quantiques à base de carbone : Les points quantiques de carbone sont une nouvelle forme de nanocarbone qui ont été accidentellement formés lors de la purification électrophorétique de nanotubes de carbone monofeuilletés en 2004. Les points quantiques de carbone sont des particules de carbone à l'échelle nanométrique discrètes et quasi-sphériques de zéro dimension, d'une taille inférieure à 10 nm. Les nano-feuilles de graphène d'une taille latérale inférieure à 100 nm sont généralement décrites comme des points quantiques de graphène. Idéalement, elles impliquent une seule couche atomique de graphite de taille nanométrique. Les points quantiques de carbone possèdent plusieurs caractéristiques uniques qui en font des matériaux extraordinaires pour plusieurs applications, telles que : (i) des propriétés de photoluminescence réglables et une bonne excitation multiphoton ; (ii) une biocompatibilité et une faible toxicité ; (iii) certaines caractéristiques distinctes liées aux effets de confinement quantique ; (iv) une solubilité dans l'eau due à la présence de riches groupes contenant de l'oxygène ; et (v) une rentabilité et une convivialité environnementale.

II.7.1.6. Nanocornets à base de carbone/nano-cones : Les nanocornets en carbone sont également connus sous le nom de nano-cones en carbone. Ils se présentent sous la forme de nanostructures coniques en carbone constituées de feuilles de carbone sp^2 . Les nanocornets à paroi unique sont constitués d'une structure tubulaire avec une feuille de graphène ayant une extrémité conique. En raison de leur structure à cage fermée, ils sont considérés comme une sous-ensemble des fullerènes, et leur forme allongée en fait un analogue structural des nanotubes de carbone à paroi unique de petite taille. Les nanocornets en carbone ont des longueurs de 40 à 50 nm et des diamètres compris entre 2 et 5 nm. L'assemblage de milliers

de nanocornets à paroi unique donne naissance à la formation d'agrégats de nanocornets avec un diamètre d'environ 80-100 nm.

II.7.2. Matériaux nanoporeux : Les explorations et les recherches liées au développement de matériaux poreux ont fasciné les chimistes des matériaux depuis des décennies. Un exemple de matériaux poreux est le charbon actif, qui est utilisé depuis de nombreuses années. L'importance technologique et scientifique des solides poreux réside dans leur capacité à interagir avec des ions, des atomes et des molécules à leur surface externe, tout en étant également accessibles à leur intérieur. Les matériaux poreux sont généralement définis comme des matériaux nanoporeux lorsqu'ils ont un diamètre de pore inférieur à 100 nm. Selon la taille des pores, les matériaux poreux peuvent être divisés en trois catégories majeures :

II.7.2.1. Matériaux macroporeux : Les matériaux poreux sont reconnus comme macroporeux lorsqu'ils ont des tailles de pores supérieures à 50 nm.

II.7.2.2. Matériaux mésoporeux : Les matériaux poreux sont appelés mésoporeux lorsqu'ils ont des pores dans la plage de 2 à 50 nm.

II.7.2.3. Matériaux microporeux : Les matériaux microporeux ont des tailles de pores dans la plage de 2 nm.

II.8. Introduction à l'échelle nanométrique

Le terme « nano » a des origines étymologiques grecques et signifie « nain ». Ce terme indique que les dimensions physiques sont de l'ordre du milliardième de mètre (10^{-9} mètre ou nanomètre). Cette plage est communément appelée échelle nanométrique ou simplement nanomètre. Par convention, les dimensions entre 1 et 100 nm sont considérées comme appartenant à l'échelle nanométrique. En vous référant au Tableau 1.1, vous pouvez comprendre le contexte de l'échelle nanométrique par rapport à d'autres échelles du système international. Par exemple, les atomes d'hydrogène ont un diamètre de 0,074 nm. Ainsi, un cube ayant un côté de 1 nm pourrait contenir environ 2500 atomes. Le plus petit circuit intégré actuellement connu a une dimension latérale de 250 nm et contient 10^6 atomes dans une couche atomique d'épaisseur. En considérant le rayon covalent des atomes d'or, de fer et d'azote comme étant respectivement de 0,144, 0,125 et 0,075 nm, différentes quantités de chaque type d'atome peuvent être alignées sur une règle longue de 1 nm. Figure II.2 compare

la taille des objets et des organismes naturels à différentes échelles. Tous indiquent que la prochaine révolution industrielle sera basée sur la nanotechnologie et la nanoscience.

Tableau II.1 Préfixes pour le Système International d'Unités (SI).

Préfixe	Symbole	Facteur (10 ^x)
yocto	y	24
zepto	z	-21
atto	a	-18
femto	f	-15
pico	p	-12
nano	n	-9
micro	μ	-6
milli	m	-3
centi	c	-2
déci	d	-1
déca	da	1
hecto	h	2
kilo	k	3
méga	M	6
giga	G	9
téra	T	12
péta	P	15
exa	E	18
zetta	Z	21
yotta	Y	24

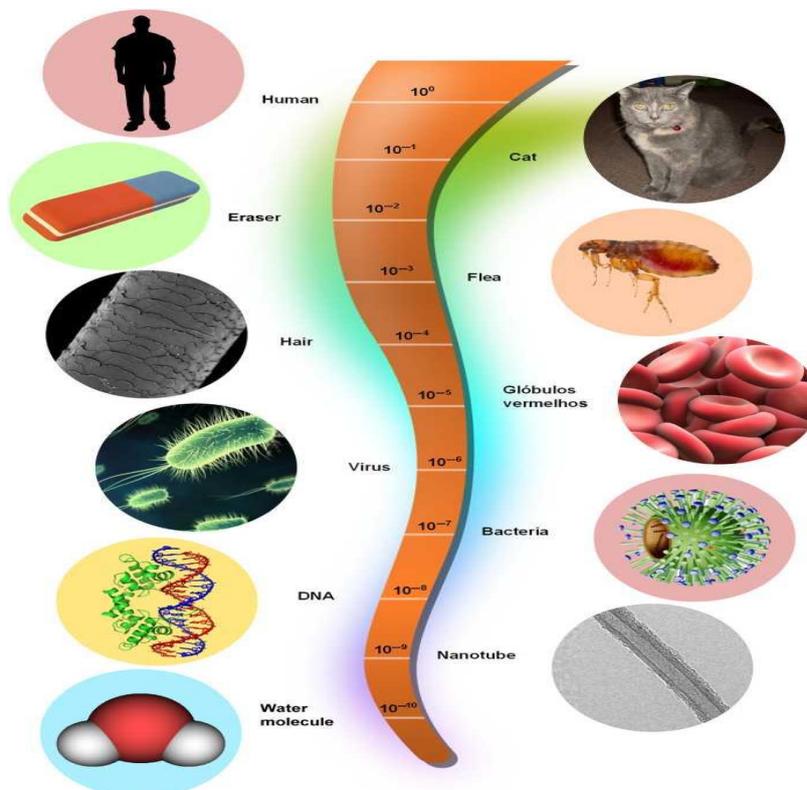


Figure II.2. Taille de différents objets et organismes naturels.

II.8.1. Types de nanotechnologie

La fabrication de nanomatériaux, ou simplement la nanotechnologie, est divisée en deux catégories : du haut vers le bas (top-down) et du bas vers le haut (bottom-up) (Miller JC et *al.* 2004).

Du Haut vers le Bas (De grand (haut) à petit (bas)) : Les mécanismes et les structures sont miniaturisés à l'échelle nanométrique. Cela a été l'application la plus courante de la nanotechnologie jusqu'à présent. En particulier, cette miniaturisation prédomine dans le domaine de l'électronique. L'un des processus les plus utilisés dans cette catégorie est la lithographie, où des matériaux tels que le silicium, un semi-conducteur, sont traités pour la fabrication de dispositifs électroniques. Un inconvénient de ce processus est la perte de matériau lors des différentes étapes.

Du bas vers le haut (De petit (bas) à grand (haut)) : Dans cette catégorie, on commence avec des structures nanométriques, telles que des atomes ou des molécules, et grâce à un processus d'auto-assemblage ou d'assemblage, on crée des mécanismes ou des dispositifs plus grands que les originaux. Cette catégorie est considérée comme la «véritable» nanotechnologie et va au-delà des limites de la miniaturisation, permettant le contrôle de la matière avec une extrême précision. Certaines des méthodes de production utilisées dans cette catégorie sont le sol-gel, le dépôt chimique en phase vapeur et la pyrolyse au laser. Comme nous le verrons, certaines de ces méthodes sont utilisées pour la fabrication de CNTs.

II.8.2. Nano dans l'histoire

Un travail extraordinaire avec du verre réalisé par les Romains au Ve siècle ap. J.-C. illustre l'un des plus grands exemples de nanotechnologie dans le monde antique. La coupe de Lycurgue, qui fait partie de la collection du British Museum, montre le roi Lycurgue traîné vers le monde souterrain par Ambrosia. Étonnamment, lorsqu'elle est éclairée de l'extérieur, la coupe semble verte. Lorsqu'elle est éclairée de l'intérieur, la coupe semble rougeâtre et le roi Lycurgue semble violet. L'explication de ce phénomène n'a été obtenue qu'en 1990 après que les scientifiques ont analysé la coupe à l'aide d'un microscope à force atomique (Barmer DJ et *al.* 1990). On a découvert que le dichroïsme (deux couleurs) est dû à la présence de nanoparticules, composées à 66,2 % d'argent, à 31,2 % d'or et à 2,6 % de cuivre, atteignant jusqu'à 100 nm de taille, dispersées dans une matrice de verre (Wagner FE et *al.* 2000). La couleur rouge observée résulte de l'absorption de la lumière (longueur d'onde de 520 nm) par les particules d'or. La couleur violette résulte de l'absorption par les particules plus grandes,

tandis que la couleur verte est attribuée à la diffusion de la lumière par des dispersions colloïdales de particules d'argent d'une taille supérieure à 40 nm. La coupe de Lycurgue est reconnue comme l'un des plus anciens nanocomposites synthétiques.

Outre les Romains, les artisans médiévaux ont également exploré l'effet de l'ajout de particules métalliques dans le verre pour créer des vitraux (Mansoori GA et *al.* 2005).

Tableau II.2 Chronologie des événements pertinents pour la nanoscience et la nanotechnologie.

2600 J.-C	Kanada Atomism
2600 J.-C	Anaximander The Aeprion
2500 J.-C	Democritus Atomism
4th Century	Lycurgus cup Colored glass
1st Century	Hero Compressibility
500–1450	Cathedrals Stained glasses
1450–1600	Deruta pottery Iridescence/metal clusters
1661	Robert Boyle Minute masses
1805	John Dalton Elements are atoms
1827	Photography Silver nanoparticle
1857	Michael Faraday Colored gold colloids
1908	Gustav Mie Light scattering nanoparticles
1931	Ernst Ruska Electron microscope
1938	Langmuir/Blodgett LB films
1947	John Bardeen et <i>al.</i> The first transistor
1951	Erwin Mueller Ion-field electron microscope
	First to see atoms
1953	Watson and Crick DNA
1958	Leo Esaki Electron tunneling
1959	Richard Feynman “There’s plenty of room .”
1960s	NASA Ferrofluids
1960	Plank and Rosinski Zeolites and catalysis
1965	Gordon E. Moore Moore’s Law
1970	John Pople Atomistic modeling
1974	Norio Taniguchi The term “nanotechnology”
1974	M. Ratner/Aviram Molecular electronics
1977	Richard P. van Duyne Surface enhanced Raman (SERS)
1980	Jacob Sagiv Self-assembled monolayers
1981	G. Binnig/H. Rohrer Scanning tunneling microscope
1985	Smalley/Croto/Curl Buckminster fullerenes
1986	G. Binnig/C. Gerber Atomic force microscope
1987	Averin/Likharev Single-electron tunneling transfer
1988	Louis Brus Quantum dots
1990	Donald Eigler et <i>al.</i> IBM with Xe atoms
1991	Sumio Iijima Multi-wall carbon nanotubes
1993	Iijima/Bethune Single-wall carbon nanotubes
1996	Mirkin/Letsinger SAM of DNA þ gold colloids
2000	Hersam/Lyding Feedback control lithography
2001	Mihail Roco National Nanotechnology Initiative

II.8.3 Applications de la nanotechnologie

Le nouveau monde de la nanotechnologie ouvre la porte à des applications plus créatives et, pourquoi pas, inhabituelles, en utilisant les nouvelles caractéristiques et phénomènes observés à l'échelle nanométrique. Les scientifiques du monde entier travaillent constamment sur de nouvelles idées, mécanismes et technologies qui promettent de rendre effectivement possible la prochaine révolution industrielle. Les applications couvrent de nombreux domaines, des plus simples comme l'alimentation aux plus complexes comme l'espace. Plusieurs produits basés sur la nanotechnologie sont déjà disponibles sur le marché. Dans cette section, nous présentons certaines des applications existantes et envisagées dans divers domaines.

II.8.3.1 Aviation et aérospatial

En utilisant des CNT, les chercheurs prévoient de construire un « ascenseur spatial », un système de transport spatial qui s'étend de la surface de la Terre dans l'espace via un câble d'une longueur comprise entre 40 000 et 96 000 km. Dans l'espace, le câble sera attaché à un contrepoids (Figure II.3). L'idée de construire un ascenseur spatial a été présentée dans un article de 1960 par Yuri N. Artsutanov. On estime que la technologie qui rendra finalement possible cette idée visionnaire est l'utilisation de CNT, l'un des matériaux les plus résistants connus de l'homme. Le principal objectif de l'ascenseur spatial est de réduire le coût de l'expédition (lancement) de matériaux en orbite terrestre basse (LEO).

Le coût actuel de l'envoi de matériaux en LEO varie de 10 000 à 25 000 dollars par kg. De plus, le rêve d'habiter d'autres planètes serait en quelque sorte facilité par rapport au transport. On prévoit que l'ascenseur spatial sera opérationnel d'ici 2031.

Un autre moyen de réduire le coût des voyages spatiaux est l'utilisation de nouveaux matériaux dans la fabrication de fusées et de navettes spatiales. Les principaux candidats à cet effet sont les composites fabriqués à partir de polymères haute performance renforcés de nano-charges. Les composites à matrice céramique et les métaux sont également utilisés, mais l'application de polymères réduit considérablement la masse de l'aéronef et, par conséquent, la consommation de carburant. L'utilisation de CNT comme agent de renforcement des polymères offre également la possibilité d'augmenter la résistance structurelle et la stabilité thermique des composites.

II.8.3.2 Médecine

Bien que la plupart des applications de la nanotechnologie en médecine en soient encore à un stade de développement, des cristaux de nano-argent sont déjà utilisés comme agents

antimicrobiens pour le traitement des plaies . Des études ont montré que les points quantiques (QD), des particules aux propriétés optiques et électroniques intéressantes, peuvent se lier sélectivement aux cellules cancéreuses et les marquer. Dans ce cas, les QD agissent comme des étiquettes fluorescentes . Pour transporter les QD vers les cellules malades, les chercheurs utilisent une nanostructure qui se fixe facilement à la membrane plasmique des cellules, appelée dendrimère. À l'avenir, l'utilisation de dendrimères et de QD couplés à d'autres molécules telles que l'acide folique pourrait être utilisée pour le diagnostic précoce du cancer et servir de vecteurs pour des médicaments spécifiques contre la maladie elle-même, révolutionnant le diagnostic précoce et le traitement actuellement disponibles pour cette maladie.

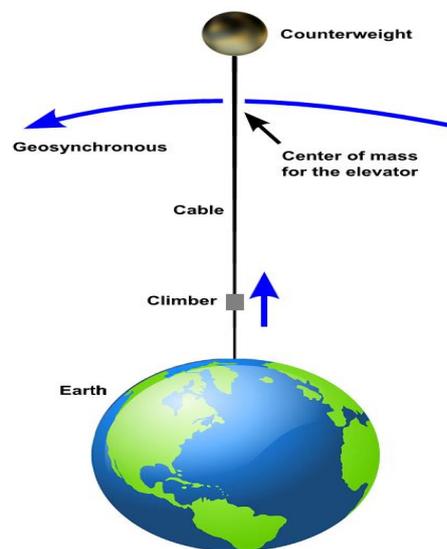


Figure II.3. Représentation de l'ascenseur spatial conçu pour transporter des marchandises depuis la surface de la Terre jusqu'à l'espace.([http://spaceelevator.com/.](http://spaceelevator.com/))

L'utilisation de nanoparticules pour administrer directement des médicaments de chimiothérapie dans les cellules tumorales minimise les dommages aux cellules saines (www.nanotherapeutics.com). Suivant cette même logique, l'objectif est la synthèse de nanocapsules qui concentrent l'énergie de la lumière infrarouge et des rayons X pour détruire les cellules cancéreuses avec un minimum de dommages aux cellules environnantes. La Figure II.4 donne une bonne explication visuelle de l'utilisation de nanocapsules. Cependant, les scientifiques travaillent sur la préparation de nanoparticules qui peuvent se lier aux cellules infectées par diverses maladies et permettre aux médecins d'identifier des maladies spécifiques par des tests sanguins.

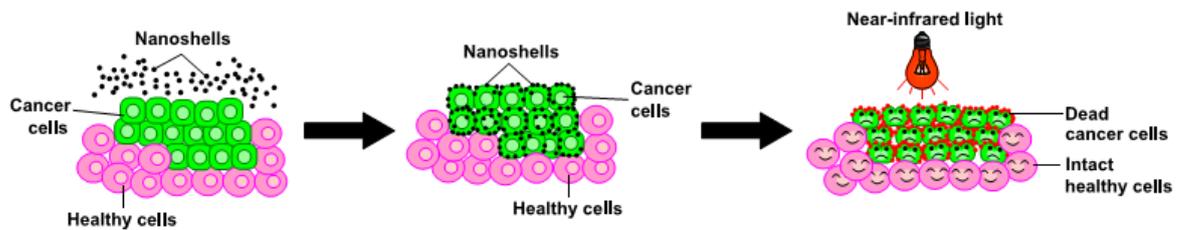


Figure II.4. Principe de l'utilisation de nanocapsules pour le traitement du cancer.

Figure aimablement fournie par l'Institut National du Cancer
(www.cancer.gov/cancertopics/understandingcancer/nanodevices/page18).

Le processus de guérison d'un os cassé est long et fastidieux. La méthode la plus efficace pour réparer les os cassés est de maintenir l'os dans la position correcte pendant la guérison à l'aide d'attelles ou de plâtre. Le temps moyen de guérison d'un os est de six semaines. Des scientifiques au Japon ont découvert que les CNT peuvent accélérer ce processus (Usui Y et *al.* 2008). Lors des expériences, des CNT ont été placés en contact avec les os fracturés de rats, et les résultats montrent que les CNT aident à régénérer le tissu osseux et à réduire l'inflammation pendant la guérison. Les images microscopiques ont montré l'intégration des CNT dans la matrice de l'os lui-même, agissant comme un point de départ pour la croissance du nouveau tissu osseux. Selon les chercheurs, la guérison est accélérée parce que les CNT agissent comme une sorte d'«échafaudage» pour la régénération osseuse. Bien que ces résultats soient encore préliminaires, les possibilités sont vastes. Par exemple, les CNT pourraient être utilisés dans la fabrication de biomatériaux tels que des plaques, des vis et des implants utilisés pour réparer les tissus osseux endommagés.

Une des applications envisagées de la nanotechnologie est la construction de micro et nano-robots programmables pour réparer des cellules malades spécifiques, fonctionnant de manière similaire aux anticorps dans notre processus naturel de guérison. La Figure II.5. représente comment un micro-robot pourrait être conçu. Le design s'inspire des micro-organismes trouvés dans les profondeurs marines.

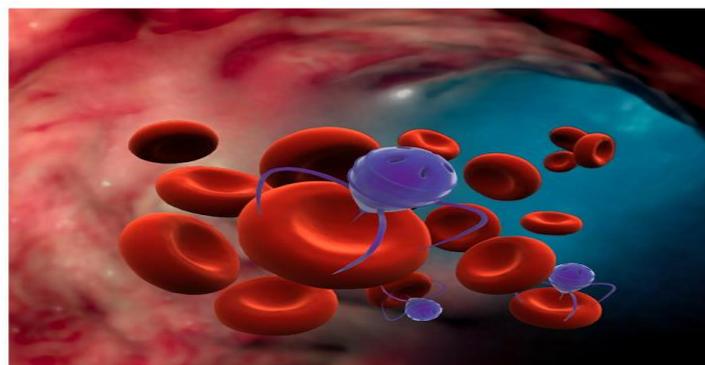


Figure II.5. Représentation d'un micro-robot fonctionnant de manière similaire aux anticorps dans notre processus de guérison.

II.8.3.3 Alimentation

La nanotechnologie trouve déjà des applications dans l'industrie alimentaire, offrant des solutions innovantes pour améliorer la sécurité et la qualité des produits alimentaires. Les nanocomposites renforcés à base d'argile sont utilisés dans les emballages alimentaires pour créer des barrières imperméables aux gaz comme l'oxygène et le dioxyde de carbone, prolongeant ainsi la durée de conservation des aliments. Les nanoparticules d'argent intégrées dans les emballages éliminent les bactéries, réduisant ainsi les risques d'infection bactérienne.

Les nanomatériaux permettent également de modifier les caractéristiques des aliments et des boissons (Figure II.6). Les nanoparticules sont utilisées pour la libération contrôlée de vitamines et de nutriments, améliorant ainsi leur absorption par le corps. Des nanocapsules contenant des nutriments pourraient être programmées pour se libérer en réponse à des carences détectées par des nanocapteurs dans le corps, offrant ainsi un approvisionnement en vitamines plus efficace et personnalisé.

L'oxyde de zinc sous forme de nanoparticules peut être ajouté aux contenants en plastique pour bloquer les rayons ultraviolets et offrir une protection antibactérienne, prolongeant la durée de vie des produits alimentaires emballés. Des nanocapteurs intégrés dans les emballages plastiques peuvent détecter les gaz produits par la détérioration des aliments, changeant même la couleur de l'emballage pour avertir les consommateurs. De plus, des nanocapteurs en développement pourraient détecter les bactéries et les contaminants, contribuant ainsi à réduire les risques de contamination des aliments.

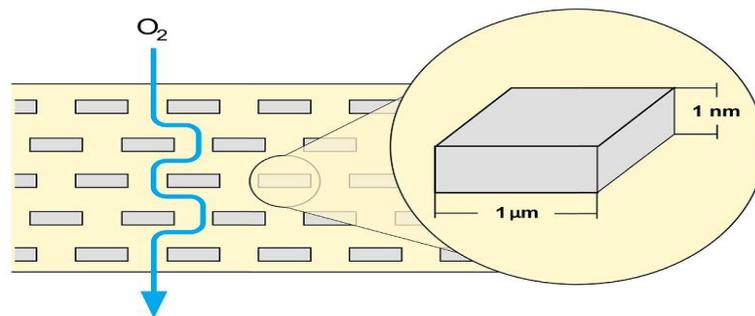


Figure II.6. Film plastique (Durethan) contenant du silicate agissant comme une barrière à l'oxygène.

(www.nanoforum.org (nanotechnology in agriculture and food))

En agriculture, les chercheurs étudient la possibilité de fabriquer des pesticides encapsulés dans des nanoparticules qui ne seront libérés que dans l'estomac des insectes, minimisant ainsi la contamination des plantes. Il y a encore des chercheurs qui envisagent la création d'un réseau de nanocapteurs et de diffuseurs répartis dans les champs de culture . Les nanocapteurs

reconnaissent quand une plante a besoin de nutriments ou d'eau, puis les diffuseurs libèrent des nutriments ou de l'eau avant que la plante ne montre un handicap visible.

II.8.3.4 Électronique

L'un des efforts de recherche dans ce domaine concerne le développement d'électrodes à partir de nanofils permettant la fabrication d'écrans flexibles plus fins que ceux actuellement disponibles. Des prototypes ont été fabriqués (Figure II.7). Cette technologie implique l'utilisation de transistors fabriqués à partir de nanofils transparents qui sont cultivés sur du verre ou des films minces en plastique flexible. L'utilisation de ces nanofils a permis la création d'écrans à matrice active similaires à ceux des télévisions et des écrans d'ordinateur. Un écran à matrice active est capable de diriger précisément le flux d'électricité pour produire l'image, car chaque pixel a son propre circuit de commande. Un aspect unique de ces nouveaux écrans est qu'ils sont transparents tant que les pixels ne sont pas activés. Récemment, les chercheurs ont démontré que des nanobagues en permalloy, sous forme de rectangles, peuvent stocker des données pratiquement instantanément (Subramani A et al. 2004). Cette découverte pourrait accélérer la commercialisation de la mémoire d'accès aléatoire magnétique (MRAM). Ce type de technologie utilise des champs magnétiques au lieu de charges électriques pour stocker et accéder aux données de manière aléatoire. Dans les mémoires dynamiques à accès aléatoire conventionnelles (DRAM), les informations sont stockées sous forme de charges électriques. Elles doivent être constamment mises à jour. Par conséquent, en cas de coupure de courant, les informations sont perdues. Dans le cas de la MRAM, même en l'absence de courant, la couche de mémoire magnétisée reste magnétisée et accessible. On estime que l'application d'anneaux nanomagnétiques pourrait permettre la fabrication de dispositifs de stockage de données allant jusqu'à 62 Go/cm².

La fabrication de circuits intégrés avec des composants tels que des nanotransistors de petite taille augmentera la densité de transistors dans les circuits intégrés. De plus, des travaux sont en cours sur le développement de nanostructures auto-alignées pour la fabrication de circuits intégrés à l'échelle nanométrique.

Toutes les futures applications de la nanotechnologie dans l'électronique, mentionnées ci-dessus, nous fourniront des appareils électroniques tels que des téléphones portables, des lecteurs MP3, des ordinateurs portables, etc., qui seront plus petits, plus légers et plus modernes.



Figure II.7. Moniteur d'affichage couleur flexible développé par LG.Philips.

www.voyle.net/nano

II.8.3.5 Énergie

Les avancées de la nanotechnologie ont un impact significatif sur les secteurs de l'énergie, notamment les piles à combustible, les cellules solaires, les batteries et les carburants. Dans les piles à combustible, l'utilisation de nanoparticules de platine comme catalyseurs permet une réduction de la quantité de matériau nécessaire grâce à une augmentation de la surface et de la réactivité. Les membranes hydrocarbonées nanostructurées améliorent également l'efficacité des piles à combustible. Pour l'énergie solaire, l'utilisation de nanoparticules semi-conductrices réduit les coûts de fabrication des cellules solaires, favorisant ainsi leur déploiement à grande échelle. Les nanofils absorbant la lumière permettent la fabrication de panneaux solaires flexibles à faible coût, déjà intégrés dans des produits tels que les téléphones portables et les ordinateurs portables.

Le stockage de l'énergie est essentiel pour une utilisation ultérieure. Les supercondensateurs à base de nanotubes de carbone offrent une alternative efficace aux batteries pour les voitures hybrides, tandis que les batteries au lithium-ion utilisant des électrodes nanoparticulaires répondent aux normes de sécurité nécessaires pour les voitures électriques. La nanotechnologie est également explorée pour la conversion du charbon en carburants comme l'essence et le diesel, ainsi que pour la production de biodiesel à moindre coût grâce à des catalyseurs à base de nanosphères. Des recherches sont en cours pour rendre la production de méthanol plus rentable en utilisant des bactéries et des enzymes modifiées pour convertir la cellulose en sucre.

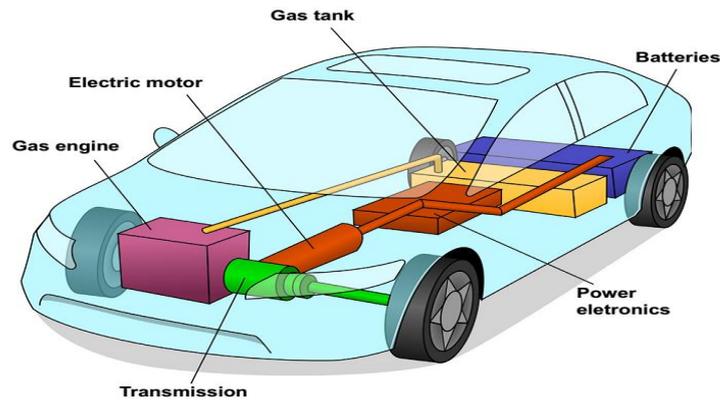


Figure II.8. Système de transmission typique d'une voiture hybride.

Les voitures hybrides deviennent de plus en plus courantes, principalement en raison de leur capacité à réduire les émissions de dioxyde de carbone (CO₂). (<http://car-question.wikispaces.com/hybridcars>)

II.8.3.6 Pollution de l'air et de l'eau

La nanotechnologie est utilisée pour développer des solutions à différents problèmes liés à la qualité de l'air et de l'eau. Actuellement, certains des plus grands problèmes dans ce domaine sont l'élimination des polluants gazeux de l'air et l'élimination du sel, des métaux et des déchets industriels de l'eau. Les projets de recherche en cours dans ce domaine comprennent les suivants :

- Élimination des composés organiques volatils des fumées émises par l'industrie grâce à l'utilisation de membranes nanostructurées ou modifiées avec des nanotubes de carbone (CNT) et des enzymes génétiquement modifiées.
- Développement d'électrodes composées de nanofibres pour l'élimination des métaux et du sel de l'eau (Figure II.9) (www.cdtwater.com).
- Réduction de la quantité de platine utilisée dans les pots catalytiques. Actuellement, le platine est utilisé dans les automobiles pour capturer des gaz tels que le monoxyde de carbone, qui est hautement toxique, et la conversion de ces polluants en gaz moins nocifs tels que le dioxyde de carbone.
- Conversion du dioxyde de carbone en nanotubes de carbone (CNT), contribuant ainsi à réduire les émissions de gaz à effet de serre (www.nanotech-now.com).
- Utilisation de nanoparticules de fer pour nettoyer le tétrachlorure de carbone présent dans les eaux souterraines.
- Fabrication de filtres dotés de pores nanométriques permettant d'éliminer les virus.
- Nanoparticules capables d'absorber les contaminants radioactifs présents dans les eaux usées.
- Nanoparticules neutralisant les solvants hydrophobes présents dans l'eau.

- Développement de réseaux de nanofils capables d'absorber le pétrole lors de déversements.
- Fabrication de filtres capables de retenir les gouttelettes d'huile à l'aide de nanotubes et d'or.

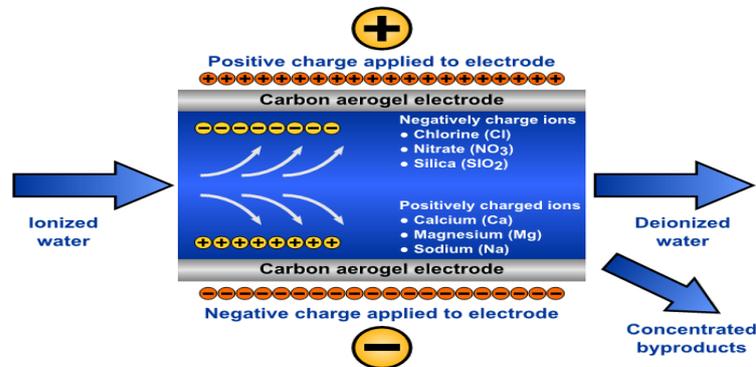


Figure II.9. Principe de fonctionnement d'un processus de dessalement de l'eau.

([www.cdtwater.com/cdt technology summary.pdf](http://www.cdtwater.com/cdt%20technology%20summary.pdf).)

II.8.3.7 Textiles

L'ajout de nanoparticules ou de nanofibres aux tissus peut améliorer leurs propriétés sans augmenter le poids, l'épaisseur ou la rigidité de ces matériaux. Certaines des nouvelles applications de la nanotechnologie en développement dans ce domaine comprennent les suivantes :

- Utilisation de nanotiges pour la fabrication de tissus résistants aux taches et anti-odeurs.
- Ajout de nanoparticules d'argent qui tuent les bactéries dans les tissus, rendant les vêtements anti-odeurs. Une autre option déjà disponible pour la fabrication de vêtements anti-taches et anti-odeurs est l'utilisation de nanoparticules de bambou.
- Nanopores pour améliorer l'isolation dans les semelles de chaussures dans les climats froids.
- Utilisation de nanoparticules pour la fabrication de vêtements autonettoyants et résistants aux taches.

II.8.3.8 Sports

La nanotechnologie est également appliquée dans les équipements sportifs. Voici quelques-unes des applications actuelles de la nanotechnologie dans ce domaine :

- Utilisation de matériaux à l'échelle nanométrique pour remplir les vides dans les clubs de golf (www.ncnanotechnology.com).
- Utilisation de films nanocomposites pour étendre l'air à l'intérieur des balles de tennis.

- Ajout de nanotubes de carbone dans les raquettes de tennis pour augmenter la rigidité et la « puissance » (www.wilson.com).
- Augmentation du transfert d'énergie entre les balles de golf et les clubs grâce à l'utilisation de polymères nanostructurés.
- Amélioration des guidons de vélo en fibre de carbone en ajoutant des nanotubes de carbone pour remplir les vides autour des fibres. Ce processus augmente la résistance des guidons et les rend plus légers. En fait, plusieurs composants de vélo sont déjà renforcés avec des nanotubes de carbone.

Comme nous pouvons le constater, il y a une augmentation continue des applications de la nanotechnologie dans notre vie quotidienne. Bon nombre de ces applications se présentent sous forme de composites polymères renforcés avec des nanotubes de carbone.

II.8.4. Nanoscience et nanotechnologie : Un regard vers l'avenir

Comme nous l'avons vu dans ce chapitre, les scientifiques sont désormais capables de manipuler des matériaux à l'échelle atomique, atome par atome. Bien que de tels résultats soient extraordinaires, l'utilisation d'une telle technologie est encore loin de devenir une réalité à grande échelle, où le taux de production devrait viser les performances maximales et les profits maximums. Un nano-abacus obtenu en manipulant des atomes à l'échelle nanométrique (Cuberes MT et *al.* 1995). Cet abaque est fonctionnel et peut être utilisé pour effectuer des calculs en utilisant la sonde d'un microscope à effet tunnel en balayage, qui déplace les atomes. De plus, l'abaque peut être utilisé à température ambiante. Il s'agit d'un exemple typique de nanotechnologie «bottom-up» (du bas vers le haut).

La construction de dispositifs à l'échelle nanométrique, atome par atome, à l'aide d'un microscope, n'est pas une option attrayante pour la production de masse, une exigence de l'économie actuelle. Les dispositifs de petite taille auront plus de chances d'être utilisés s'ils sont fabriqués en grande quantité, de préférence en utilisant la nanotechnologie.

Le processus de fabrication de nanotubes de carbone à paroi unique (SWCNT), qui sont actuellement utilisés, peut être considéré comme simple par rapport à la manipulation d'atomes à l'échelle nanométrique. Une quantité raisonnable de nanotubes peut être obtenue par synthèse à l'échelle du gramme. Cependant, la situation est tout à fait différente si l'objectif est de synthétiser des SWCNT de haute pureté, avec le même diamètre, la même orientation et la même qualité.

Selon George Whitesides de l'Université Harvard, nous vivons à l'ère de la nano-fabrication, mais l'ère de la nanotechnologie - la recherche d'applications pratiques pour les

nanostructures - n'a pas encore commencé (Whitesides GM 2002). Un des directeurs du centre de nanotechnologie de la NASA ajoute : «Beaucoup de nanoscience, mais peu de nanotechnologie pour le moment» (Binks P 2005) Deux défis majeurs ralentissant la nanofabrication sont :

La communication entre le monde macroscopique et le monde nanométrique. Il s'agit du principe d'incertitude d'Heisenberg, qui stipule que l'état d'un système est perturbé lorsqu'il est mesuré. Par conséquent, un détecteur macroscopique perturberait un système nanométrique de son état idéal.

La nanosurface. Les dispositifs d'une pureté ultra-élevée fabriqués à l'échelle nanométrique doivent être exploités dans des environnements d'ultra-vide. Dans d'autres environnements, le contact avec des impuretés altérerait les propriétés. Un principe similaire est observé dans les microscopes électroniques en transmission, où un vide élevé est nécessaire pour éviter la collision du faisceau d'électrons avec des impuretés, telles que l'air lui-même.

La N&N est l'un des sujets les plus étudiés en milieu universitaire aujourd'hui et commence lentement à prendre de l'ampleur dans le secteur industriel. On estime que les produits basés sur la nanotechnologie contribueront à hauteur de 1 billion de dollars au produit intérieur brut mondial et créeront plus de deux millions d'emplois d'ici 2015 (Cao G.2004). Des chiffres comme celui-ci mettent en lumière la manière dont la nano peut avoir des conséquences méga, voire giga, dans notre société.

Cela fait plus de 50 ans que Feynman a prononcé son discours. Il avait raison ! Il y a beaucoup de place en bas !

II.9. Conclusion

Un grand nombre d'études théoriques et expérimentales ont été menées sur les nanomatériaux et la nanotechnologie, ouvrant la voie à des technologies futures dépendantes de la manipulation des matériaux à l'échelle nanométrique. Cependant, le développement et l'utilisation efficaces des nanomatériaux sont confrontés à plusieurs défis cruciaux :

(a) Présence de défauts : Les défauts dans les nanomatériaux, tels que les impuretés ou les orientations aléatoires, peuvent compromettre leurs performances.

(b) Synthèse : La production économique de nanomatériaux de haute qualité reste un défi en raison des conditions strictes et des équipements sophistiqués nécessaires.

(c) Agrégation : Les nanoparticules ont tendance à s'agréger, réduisant leur efficacité et compromettant leurs propriétés uniques.

(d) Architectures 3D : Le développement d'architectures tridimensionnelles peut améliorer les propriétés des nanomatériaux, mais nécessite davantage de recherche.

(e) Matériaux ultraminces en 2D : La synthèse et la stabilisation de matériaux ultraminces posent des défis importants.

(f) Toxicité : Les préoccupations concernant la toxicité des nanomatériaux, en particulier leur impact environnemental et biologique, sont de plus en plus importantes.

(g) Nanomatériaux et énergies propres : Les nanomatériaux offrent des opportunités pour les énergies propres, mais nécessitent une recherche continue.

(h) Nanomédecine : Les nanomatériaux jouent un rôle crucial en nanomédecine, mais nécessitent une étude approfondie de leur interaction avec les cellules et les tissus.

(i) Toxicologie et sécurité : La recherche sur la toxicologie et la sécurité des nanomatériaux est essentielle pour leur développement responsable.

En résumé, bien que les nanomatériaux offrent de nombreuses opportunités, surmonter les défis liés aux défauts, à la synthèse, à l'agglomération et à la sécurité est essentiel pour leur intégration réussie dans diverses applications. Le domaine des nanomatériaux continuera à croître et à contribuer aux avancées technologiques et scientifiques.

Haut du formulaire.

CHAPITRE III

**LES NANOTUBES DE CARBONE :
PROPRIETES, SYNTHÈSE ET
APPLICATIONS**

CHAPITRE III

LES NANOTUBES DE CARBONE : PROPRIETES, SYNTHESE ET APPLICATIONS

III .1.Introduction

Les nanotubes de carbone (CNT) sont des structures cylindriques de quelques nanomètres de diamètre, composées de feuillets de graphène enroulés. Découverts en 1991 par Sumio Iijima, ils possèdent des propriétés exceptionnelles, telles qu'une résistance mécanique jusqu'à 100 fois supérieure à celle de l'acier, une conductivité électrique comparable à celle du cuivre et une conductivité thermique remarquable. Leur légèreté, alliée à ces propriétés uniques, en fait des matériaux prometteurs pour diverses applications, allant de l'électronique avancée, comme les transistors et les capteurs, à la fabrication de matériaux composites renforcés, ainsi qu'à la médecine, où ils peuvent être utilisés pour le ciblage des médicaments et l'imagerie médicale. Leurs applications potentielles dans le domaine des énergies renouvelables, notamment pour améliorer les performances des batteries et des super condensateurs, soulignent leur importance dans les technologies de demain .

III.2. L'historique des nanotubes de carbone

La nanoscience est l'étude des matériaux à l'échelle nanométrique, c'est-à-dire la compréhension, le contrôle des phénomènes et la manipulation. Elle porte sur les atomes, les points quantiques, les molécules, les macromolécules et les assemblages de macromolécules. La nanotechnologie est un domaine émergent du développement technologique qui implique la science et l'ingénierie de la matière à l'échelle nanométrique, soit environ 1 à 100 *nm*. Les matériaux de la famille du carbone jouent un rôle majeur dans la science et la technologie actuelles. La base de la chimie organique est la propriété d'auto-caténation du carbone, qui forme des combinaisons infinies d'anneaux et de chaînes. Les produits utilisant des nanotubes de carbone (CNT) et des nano fibres de carbone (CNF) dans le commerce ont considérablement augmenté au cours des deux dernières décennies (Thostenson et al. 2001). Les CNT contiennent de très petits cylindres de graphite, fermés aux deux extrémités, avec six capuchons en forme de pentagone. C'est un allotrope du carbone, comme le graphite, le diamant, le fullerène, et une comparaison de leurs structures est donnée dans la Figure III.1. La structure des CNT peut être démontrée en considérant que le CNT peut être formé en

plaçant un cylindre en graphène entre les deux moitiés d'une molécule de C₆₀. Les nanotubes sont généralement des structures quasi-unidimensionnelles car elles ont un grand rapport aspect (longueur :diamètre) d'environ 1000. Si nous nous plongeons davantage dans l'histoire des CNT, des preuves supplémentaires peuvent être trouvées montrant que l'origine des CNT pourrait même être de nature préhistorique, comme la montre la Figure III.2. La question de l'occurrence naturelle des CNT est vivement débattue, car elle a des implications juridiques concernant le régime de propriété intellectuelle des CNT.

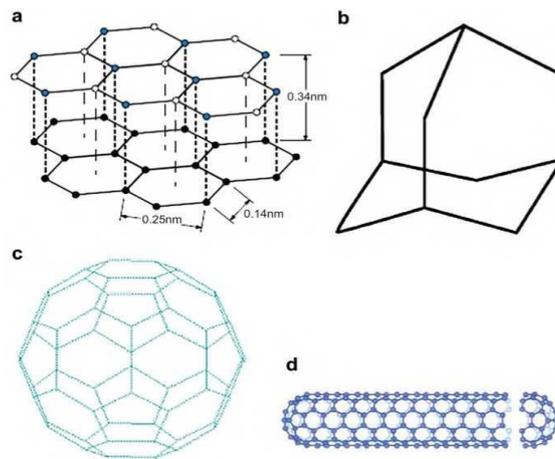


Figure III.1 Comparaison structurelle des allotropes du carbone : (a) graphite, (b) diamant (adamantane), (c) fullerène, et (d) nanotubes de carbone

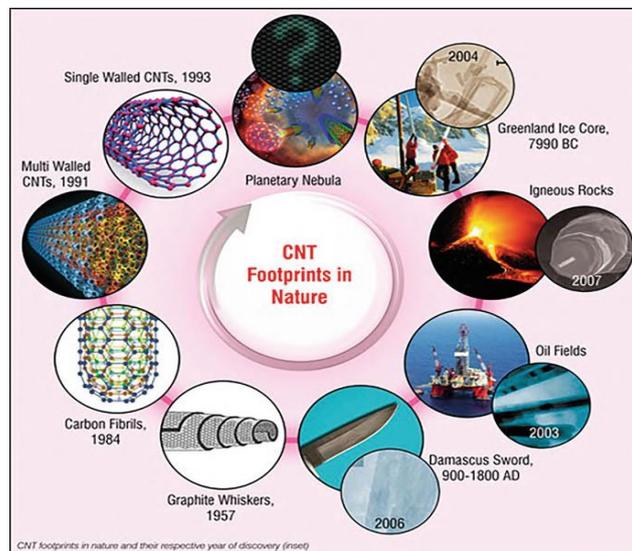


Figure III.2 Empreintes de pas prouvant l'existence de nanotubes de carbone dans la nature et (encadré) leur année de découverte

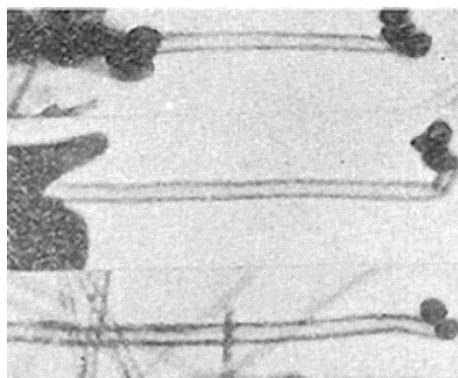
Les propriétés des CNT attirent l'attention des scientifiques de toutes les disciplines. Leurs propriétés électroniques étonnantes, leur potentiel en tant que « nanotubes à essai », leur incroyable rigidité, résistance et résilience sont applaudis respectivement par les physiciens,

les chimistes et les spécialistes des matériaux. Grâce à ces propriétés, les CNT ont un énorme potentiel commercial dans des applications qui seront discutées ultérieurement.

La santé et la sécurité des travailleurs sont un élément clé de la croissance responsable des technologies émergentes. Il est rapporté que les CNT ont des effets sur l'environnement et la santé. Cela est principalement dû à leur nature hydrophobe, et de nombreuses modifications de surface sont suggérées pour réduire ces inconvénients des CNT.

On rapporte que le marché mondial des CNT en 2015 était d'environ 2,26 milliards de dollars (Thostenson et al. 2001) et en 2009, il était d'environ 1,24 milliard de dollars (45% de croissance). La raison de cette croissance était le potentiel croissant des CNT dans de nombreuses applications telles que le stockage d'énergie, l'électronique et les plastiques. Le marché prévu des CNT devrait atteindre environ 14 milliards de dollars en 2026 (Pratik et al. 2021). Les CNT ont été acceptés comme le matériau du XXI^e siècle.

Au XIX^e siècle, les chimistes organiques ont commencé à créer de nouvelles molécules qui n'existent pas dans la nature. Comme mentionné précédemment, la base de la chimie organique est la propriété d'auto caténation du carbone, qui forme d'innombrables combinaisons de chaînes et de cycles. On sait que les fibres de carbone ont été étudiées scientifiquement dans les années 1950 et fabriquées industriellement depuis 1963. Radushkevich et Lukyanovich ont découvert des tubes de carbone droits et creux, une nouvelle fibre de carbone. Leur diamètre était de 50 nm, et ils l'ont signalé en 1952 (Radushkevich et Lukyanovich 2007). Les tubes étaient une forme filamenteuse unidimensionnelle du carbone avec un diamètre de plus de 100 nm, comme montre la(FigureIII.3).



FigureIII.3 Images de microscopie électronique en transmission à faible résolution des nanotubes de carbone rapporté par Radushkevich et Lukyanovich (1950) (MAG 20 000)

En 1880, Thomas Edison a utilisé des fibres de carbone dans les ampoules à incandescence. Plus tard, les filaments de tungstène ont été utilisés pour les applications d'ampoules électriques, et les nanostructures de nanotubes de carbone (CNT) ont été

introduites. Les CNT ne sont pas des molécules uniques ; ils sont différents des fibres de carbone, c'est-à-dire des filaments de feuilles de graphite en couches. La différence structurelle et la comparaison de taille des fibres de carbone conventionnelles, des nanofibres et des nanotubes sont montrées dans la (Figure III.4).

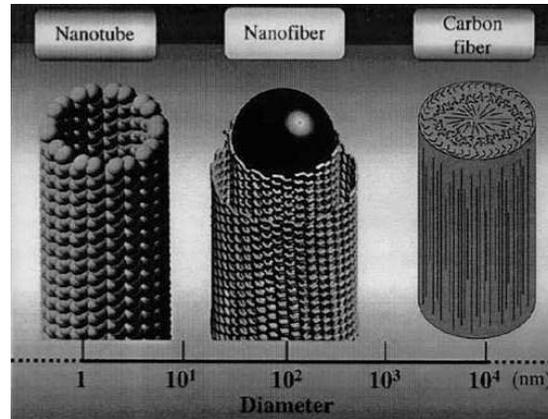


Figure III.4 Différence de taille et de structure entre la fibre de carbone conventionnelle, la nanofibre et les nanotubes (Endo et Dresselhaus 2003)

Morinobu Endo et ses collègues ont signalé que les CNT ont été produits par une technique de croissance en phase vapeur dans les années 1970 (Endo et al. 1997). En 1979, les CNT ont été produits en utilisant la décharge en arc sur des anodes en carbone par John Abrahamson et al. (1999). En 1981, les nanotubes de carbone à parois multiples (MWCNT) ont été observés de manière productive par un groupe de scientifiques soviétiques grâce à l'oxydation et à la réduction catalytiques thermiques du monoxyde de carbone (Kroto et al. 1985). En 1984, le premier brevet pour la préparation de filaments de carbone de taille nanométrique, appelés « fibrilles de carbone », c'est-à-dire sensiblement exempts de carbone thermique déposé par pyrolyse, Des études ultérieures ont montré que ces fibrilles avaient la même morphologie que les MWCNT, ce qui n'avait pas été identifié au moment de l'invention. En utilisant la décomposition thermique des hydrocarbures pour préparer des filaments de carbone, l'équipe de T.V. Hughes a déposé un brevet en 1886 (Hughes et Chambers 1889). Ces études n'ont pas pu détecter la présence de CNT en raison des limitations de résolution des outils microscopiques disponibles à l'époque.

En 1991, Sumio Iijima, un spécialiste bien connu de la microscopie électronique travaillant à l'époque dans les laboratoires NEC au Japon, a découvert une matière en forme d'aiguille qui apparaissait près du fullerène en utilisant la méthode de la décharge en arc. Iijima était très intéressé par l'article de Krätschmer-Huffman sur la production à l'échelle du laboratoire de C₆₀ et, en utilisant un microscope électronique en transmission haute résolution (HRTEM), il a analysé la suie produite par leur méthode fournie par Ando. Cette découverte d'Iijima a

marqué un tournant dans les études ultérieures sur les CNT. Cette matière en forme d'aiguille a été plus tard connue sous le nom de "nanotube de carbone", le nom donné par Iijima. Initialement, il a envisagé de nombreux autres noms, notamment microtubules, tubuline, tubes NEC et tubes Iijima (Iijima 1991). Les tubes contenaient deux ou plusieurs couches (MWCNT) et leur diamètre extérieur était compris entre 3 nm et 30 nm. Il a été observé que ces tubes étaient fermés aux deux extrémités. Les belles images (Figure III.5) des CNT d'Iijima, montrées pour la première fois en octobre 1991 et publiées un mois plus tard dans Nature. Ces images ont été présentées lors d'une réunion à Richmond, en Virginie, aux États-Unis, et ont encouragé les chercheurs sur les fullerènes du monde entier à examiner à nouveau les cathodes de graphite utilisées qui avaient été précédemment jetées comme des déchets. On savait que la découverte des CNT était accidentelle, mais l'énorme expérience et les connaissances accumulées d'Iijima dans les études de microscopie électronique sur divers types de matériaux carbonés ont joué un rôle crucial dans l'identification des CNT dans la suie de la cathode de graphite produite par évaporation sous arc. Les premiers tubes n'étaient pas très intéressants en raison de leur structure imparfaite et n'avaient pas de propriétés remarquables. En 2000, 9 ans plus tard, en utilisant la méthode de la décharge en arc, le professeur Tang Zhang et Wang Ning ont synthétisé des nanotubes de carbone à parois simples (SWCNT), qui sont 75 000 fois plus fins qu'un cheveu humain et ont un diamètre de 0,4 nm, le CNT le plus étroit du monde (Wang et al. 2000). Aujourd'hui, près de 25 ans après la diffusion des CNT sur la scène scientifique mondiale, de nombreux projets de recherche en cours sur les CNT sont en cours (Yang et al. 2008). Les chercheurs explorent le potentiel des CNT pour diverses applications.

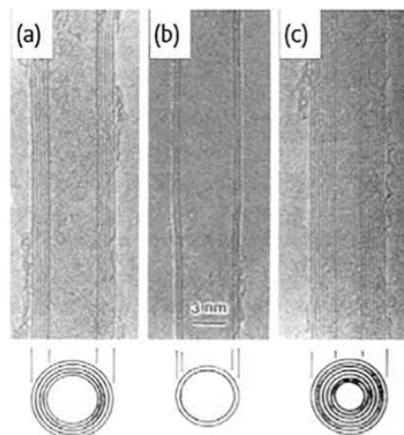


Figure III.5 Micrographies électroniques en transmission des tubes d'Iijima.

Le tube se compose de (a) cinq feuilles de graphite, d'un diamètre de 6,7 nm, (b) deux feuilles de graphite, d'un diamètre de 5,5 nm, et (c) sept feuilles de graphite, d'un diamètre de 6,5 nm.

La découverte et l'histoire ancienne des CNT sont illustrées dans la (Figure III.6) .ont rapporté que dans les roches ignées, des tubes de carbone micro et nano se sont formés il y a environ 250 millions d'années (Ryabov et al. 2012). Ils ont suggéré que la formation des CNT pourrait avoir lieu lors des processus magmatiques et ont expliqué qu'en présence d'éléments métalliques, la condensation et la décomposition des hydrocarbures se produisent lorsque le mouvement des fluides d'hydrocarbures à travers le reste de la fusion de la roche produit des zones saturées de gaz, formant des tubes de carbone micro et nano. En utilisant la spectroscopie de fluorescence des rayons X, il a été identifié qu'un grand groupe d'éléments tels que Fe, Ti, V, Cr, K, Mn, Ni, Pt, Zn, Ga, Br, Ge, Sr, Zr et Pb ont été reconnus dans les structures à l'échelle nanométrique des roches ignées contenant des globules de graphite naturel. Les nanostructures de carbone ont été formées en présence de ces éléments en tant que catalyseurs naturels par un processus similaire de dépôt chimique en phase vapeur, et la présence de CNT a été identifiée à l'aide de la microscopie électronique. Des études en microscopie électronique en transmission (TEM) ont montré des preuves de CNT naturellement présents dans le noyau de glace du Groenland en 7990 BC.rapportées par (Esquivel et Murr.2004). Ces échantillons de noyau de glace vieux de 10 000 ans étaient des preuves convaincantes de la présence naturelle de CNT (MWCNT), et ils ont suggéré que les MWCNT auraient pu se former lors de la combustion naturelle du gaz naturel/méthane. Les études spectrales de Raman ont montré la ressemblance entre les CNT naturellement présents et les MWCNT disponibles commercialement. Des scientifiques allemands ont utilisé des roches ignées pour synthétiser des CNT, et ces roches provenaient de lave du mont Etna et servaient de catalyseur et de support. L'oxyde de fer naturel présent dans la roche de lave de l'Etna a favorisé la croissance et l'immobilisation des nano-carbones. À 700 °C et en atmosphère réduite, un mélange d'hydrogène et d'éthylène a été passé sur les roches concassées, et les particules de fer ont catalysé la décomposition de l'éthylène en carbone élémentaire. Ce carbone est déposé sur la roche de lave sous forme de petites fibres et de tubes. Il est clair à partir de cette étude que si une source de carbone est disponible, à des températures modérées, des CNF/CNT peuvent se développer sur un minéral. Cette étude explique également la possibilité du développement de CNT dans les volcans sous-océaniques actifs ou même dans l'espace interstellaire, où l'hydrogène atomique, le méthane, le fer métallique et les oxydes de carbone sont présents.

Les études en microscopie électronique menées par Peter Paufler et ses collègues à l'Université technique de Dresde (Reibold et al. 2006) sur l'épée de Damas médiévale légendaire datant de 900 AD ont révélé la présence de CNT dans la microstructure de l'acier

wootz, le matériau à partir duquel les épées étaient fabriquées. La présence de nanofils de cémentite (Fe_3C) a été trouvée sur l'épée en acier de Damas à partir des premières études. Un composé dur et cassant a été formé de fer et d'acier au carbone. Lorsqu'un morceau de l'épée a été exposé à l'acide chlorhydrique, la microstructure constituée de nanofils de cémentite s'est dissoute et les CNT ont été révélés.

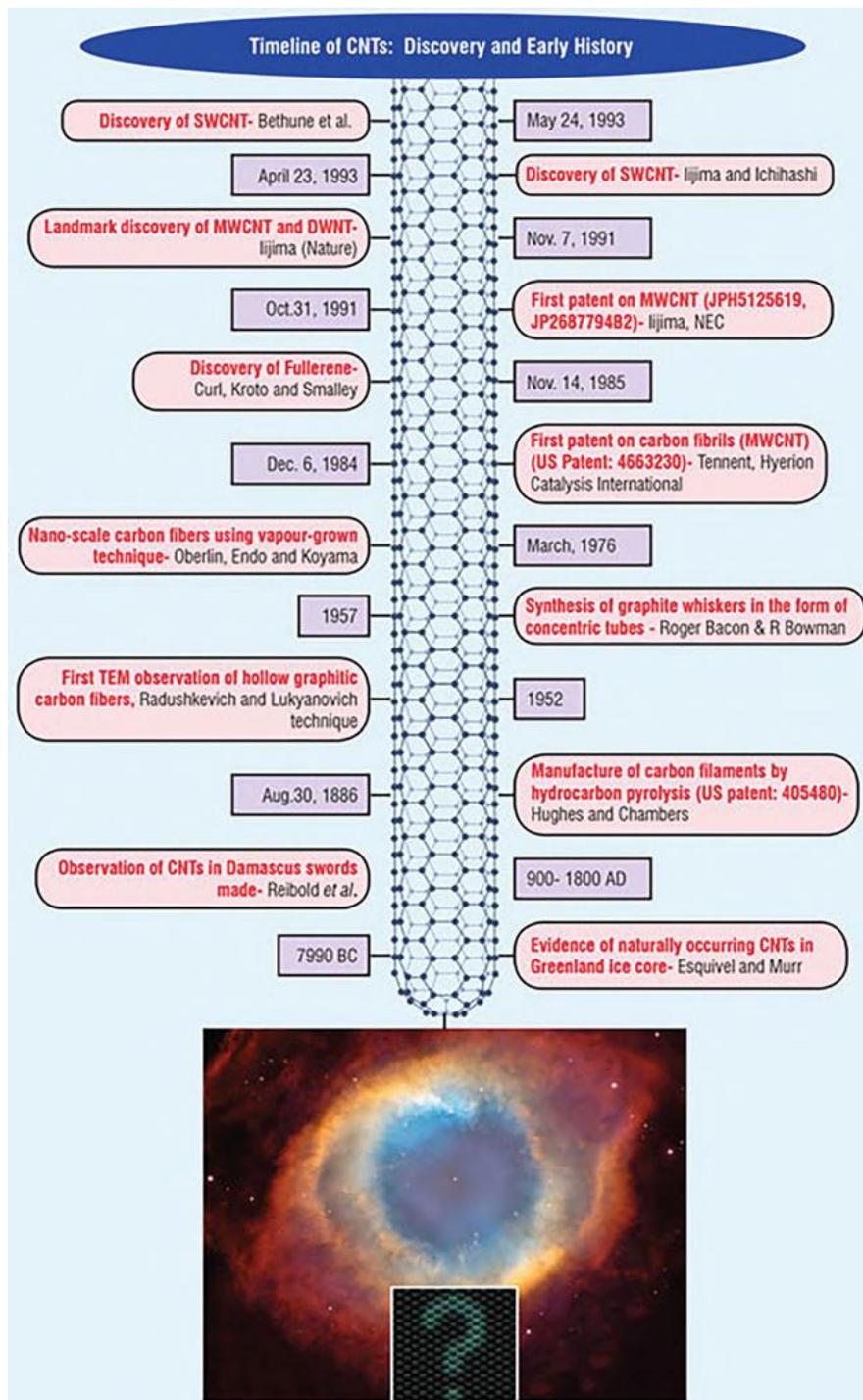


Figure III.6 Découverte et première histoire des CNT (nanotubes de carbone) (S. Iilima 1993).

III.3. Structures des nanotubes de carbone

Les CNT ont été découverts par Sumio Iijima, et sa première tentative de synthèse de nanotubes de carbone à parois multiples a été réalisée par une méthode simple d'évaporation par arc. Les CNT sont disposés en hexagone et en pentagone et sont composés d'atomes de carbone d'un diamètre de 3 à 15 nm. Les CNT font partie de la famille des fullerènes, qui sont des allotropes du carbone, découverts par Kroto et al. (H.W. Kroto et al 1985). Le nom est basé sur leur taille, où le diamètre d'un nanotube est de quelques nanomètres. Ce sont de grandes macromolécules caractéristiques par leur taille, leur forme et leurs propriétés. La structure des CNT est un cylindre creux formé par le déplacement de couches simples ou multiples de feuilles de graphène.

Selon le nombre de couches extérieures ou de parois, les CNT se divisent principalement en deux types : les nanotubes de carbone à parois simples (SWNT) et les nanotubes de carbone à parois multiples (MWNT). Lorsque nous commençons à discuter de la structure d'un nanotube, nous devons également comprendre les fullerènes, car les nanotubes en font partie. Lorsqu'une feuille de fullerène est roulée à des angles spécifiques, une structure appropriée de nanotube se forme avec un rayon interne fixe. En raison de l'enroulement d'une feuille de graphène, elle forme elle-même divers allotropes du carbone, notamment le graphite et les fullerènes, qui donnent naissance aux CNT (Iijima, Ichihashi 1993).

Les CNT sont classées en trois groupes en fonction de leur paroi interne présente dans les CNT. Différentes images de CNT sont présentées dans la figure ci-dessous.

III.3.1. Nanotubes de carbone à parois simples

Le terme "nanotubes de carbone à parois simples" (Single Walled Carbon nanotube « SWCNT ») a été décrit pour la première fois en 1993 (Iijima, Ichihashi). Les SWCNT sont une seule couche de feuille de graphène d'un diamètre de 1 à 2 nm. (La Figure III.7) montre la vue extérieure et intérieure d'un SWNT. Un catalyseur est nécessaire pour la préparation des CNT afin d'obtenir un contrôle adéquat sur leur développement et leur état atmosphérique. Selon les méthodes de préparation, la longueur des CNT peut varier avec une moindre pureté.

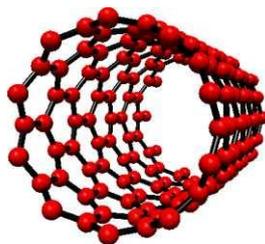


Figure III.7. Vue externe et interne des nanotubes de carbone monoparoi.

III.3.2. Nanotubes de carbone à parois doubles

Les nanotubes de carbone à parois doubles (DWNT) sont constitués de deux nanotubes de carbone distincts, où le tube extérieur entoure le tube intérieur. Le tube extérieur a un diamètre de 2 à 4 nm et le diamètre intérieur est de 1 à 3 nm. **Figure III.8** montre la vue extérieure et intérieure des nanotubes de carbone à parois doubles.

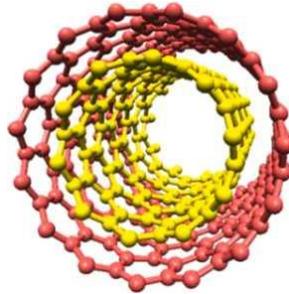


Figure III.8 Vue externe et interne d'un nanotube de carbone bi-paroi.

III.3.3. Nanotubes de carbone à parois multiples

En raison de la présence de plusieurs couches de feuilles de graphène enroulées avec un diamètre variant de 2 à 50 nm, les nanotubes de carbone à parois multiples (MWCNT) sont nommés et numérotés en fonction de la présence de feuilles de graphène. Le rayon de la couche interne du tube est de 0,34 nm et le rayon de la couche externe est de l'ordre de 2 nm jusqu'à 20 à 30 nm (Prasher et *al.*2009). Les MWCNT sont classés en deux modèles structurels : le modèle "poupée russe" et le modèle "parchemin". La Figure III.9 montre la vue extérieure et intérieure des nanotubes de carbone à parois multiples. L'agencement des feuilles de graphène en cylindres concentriques est appelé "poupée russe", et l'enroulement de la feuille de graphène unique sur elle-même plusieurs fois conduit à la formation d'un "rouleau de papier" (Vander Wal et *al.*2003).

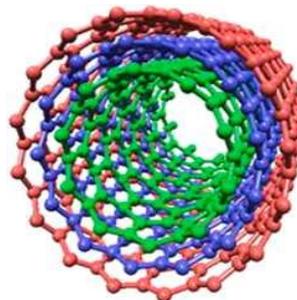


Figure III.9 Vue externe et interne d'un nanotube de carbone à parois multiples.

III.3.4. Base de la chiralité

Comme nous le savons, CNTs n'est rien d'autre qu'une version modifiée de la feuille de graphène. Pour comprendre la structure des CNT, nous devons d'abord connaître la structure

du graphène. La feuille de graphène représentée ci-dessous (Figure III.10) est une feuille plane du graphite. La structure en treillis du graphène est formée par deux vecteurs de base, a_1 et a_2 , comme le montre la figure 4. Le vecteur de base $a_1 = a(\sqrt{3}, 0)$ et $a_2 = a(\sqrt{3}/2, 3/2)$ a une valeur de $|a_1| = |a_2| = \sqrt{3}a$, où "a" est la longueur de liaison C-C d'une valeur de 0,142 nm. La cellule unitaire du graphène contient deux atomes (X et Y), comme le montre également la figure 4. Lorsque les centres des deux hexagones sont reliés par des additions vectorielles, cela s'appelle le vecteur chiral. La chiralité est la principale caractéristique permettant de connaître les propriétés électriques des CNT. Elle est exprimée par deux entiers, n et m, qui dépendent du classement des entiers et de leur relation. De nombreuses structures sont ainsi formées. Pour $m = 0$, la structure sera en zigzag sur les nanotubes. Lorsque $n = m$, les nanotubes présentent une structure en chaise et les autres états montrent des structures chirales. CNT est une structure cylindrique qui se forme après la découpe de la feuille de graphène en une bande rectangulaire. Le processus de conversion de la feuille de graphène rectangulaire en CNT de structure zigzag est illustré dans la Figure III.10. La Figure III.11 explique la conversion de la feuille de graphène de $n, m = 13, 0$ en une structure zigzag de CNT de $n, m = 10, 0$, où la longueur du tube est de $15 A^0$. Le vecteur chiral, $C = na_1 + ma_2$ (a_1 et a_2 étant les vecteurs de cellule de base du graphite), définit le diamètre du tube et détermine également la direction de l'enroulement de la feuille de graphène. Les Figures III.12a-d montrent différentes chiralités des CNT.

La liaison entre les atomes de carbone dans la feuille de graphène est disposée de manière symétrique par rapport aux liaisons carbone dans le CNT. Cette différence dans la liaison des atomes de carbone est due à l'enroulement de la feuille de graphène.

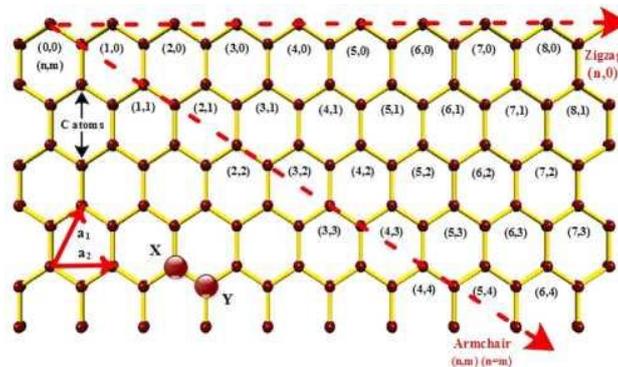


Figure III.10 Une feuille de graphène à partir de graphite avec chiralité (n, m).

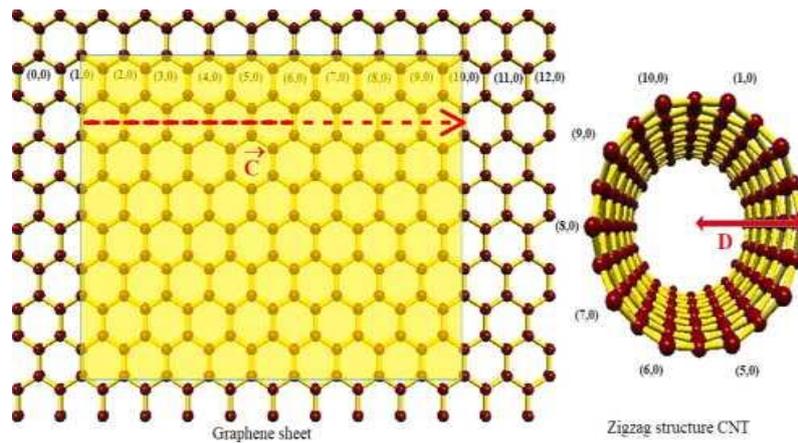


Figure III.11 CNT en zigzag ($n, m = 10, 0$) à partir d'une feuille de graphène ($n, m = 12, 0$).

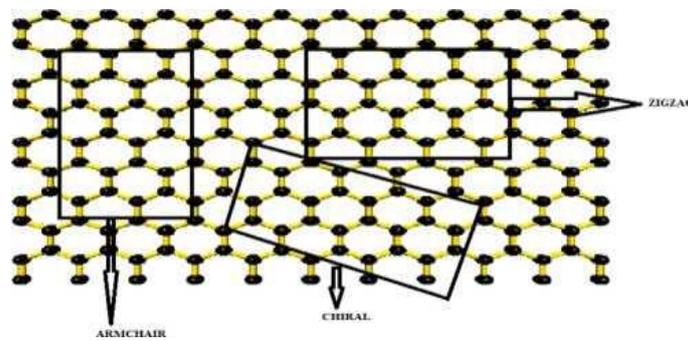


Figure. 12.a. Les bases de la chiralité des CNT (nanotubes de carbone).

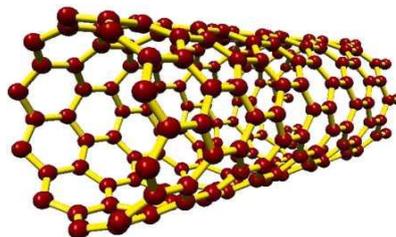


Figure III.12b Chiralité en zigzag ($n, m = 10, 0$, Longueur = 20 Å, Longueur de liaison = 1,5 Å).

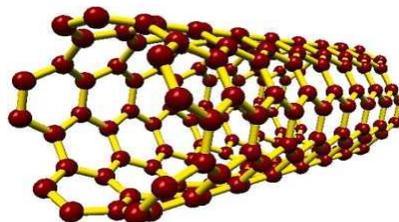


Figure III.12.c Chiralité en fauteuil ($n, m = 5, 5$, Longueur = 20 Å, Longueur de liaison = 1,5 Å).

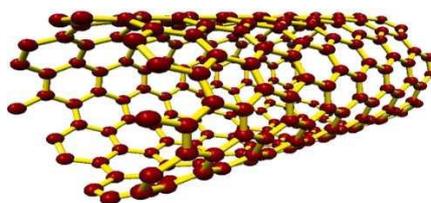


Figure III.12d Chiralité chirale ($n, m = 8, 6$, Longueur = 20 Å, Longueur de liaison = 1,5 Å).

III.4. Synthèse des nanotubes de carbone

Il existe de nombreuses méthodes pour synthétiser les nanotubes de carbone (CNT), mais ces trois méthodes sont les plus importantes et les plus couramment utilisées. Les voici :

III.4.1 Méthode de Dépôt chimique en phase vapeur (CVD - Chemical Vapor Deposition)

Le CVD est une technique dans laquelle les réactifs vaporisés réagissent chimiquement et forment un produit nanomatériau qui est déposé sur le substrat (voir Figure III.13).

Sources de carbone : Les précurseurs des nanotubes de carbone sont des gaz hydrocarbonés tels que l'acétylène, l'éthylène, le méthane, etc.

Substrat utilisé : Les substrats sont des matériaux sur lesquels les CNT sont cultivés. Les substrats couramment utilisés dans la méthode CVD sont la zéolite, la silice, une plaque de silicium recouverte de particules de fer, etc.

Catalyseur utilisé : Pour produire des nanotubes de carbone à parois simples (SWCNT), des nanoparticules de catalyseur métallique telles que le fer, le cobalt, le nickel, le molybdène, des alliages fer-molybdène, etc., sont utilisées.

Sources de CVD utilisées : En fonction de la source de chaleur, le CVD peut être :

- CVD activé thermiquement chauffé par rayonnement infrarouge, un chauffage par radiofréquence, etc.
- CVD assisté par photo chauffé par des lampes à arc, un laser CO₂, un laser à ions d'argon, un laser NdYAG, etc.
- CVD assisté par plasma chauffé par rayonnement micro-ondes, etc.

Conditions maintenues : Les conditions suivantes sont maintenues à l'intérieur du four :

Température : 500-900°C.

Atmosphère de gaz inerte : Gaz argon.

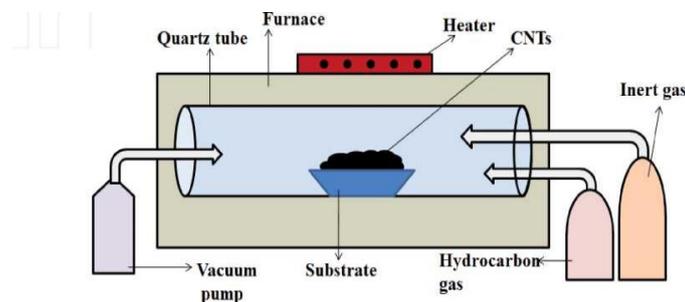


Figure III.13. Méthode de Dépôt chimique en phase vapeur

III.4.2 Procédure de synthèse des CNT par la méthode de CVD thermique

Les CNT sont synthétisées par la méthode de CVD thermique en utilisant un gaz hydrocarboné comme source de carbone. Dans cette méthode, un tube en quartz est placé à l'intérieur d'un four maintenu à haute température (500-900°C) chauffé par un radiateur RF. Un creuset contenant le substrat recouvert de nanoparticules de catalyseur est placé à l'intérieur du tube en quartz rempli de gaz inerte tel que l'argon. Le gaz hydrocarboné (source de carbone) est pompé dans le tube en quartz, subissant une réaction de pyrolyse et formant des atomes de carbone vaporisés. Ces atomes de carbone se lient au substrat et se rejoignent les uns aux autres par force d'attraction de van der Waals et se développent sous forme de nanotubes de carbone à parois multiples (MWCNT) sur le substrat. Pour synthétiser des nanotubes de carbone à parois simples (SWCNT), des nanoparticules de catalyseur de Fe, Co, Ni sont utilisées. Les CNT obtenus sont ensuite purifiés pour obtenir la forme pure des CNT.

III.4.3 Méthode de décharge à arc électrique

Les nanotubes de carbone sont synthétisés par la méthode de décharge à arc électrique, également appelée méthode d'arc de plasma.

Électrodes : Barres de graphite pur (électrode positive et négative). L'électrode positive est réglable depuis l'extérieur pour maintenir l'espace entre les deux électrodes.

Diamètre des électrodes : 5 – 20 μm .

Espace entre les électrodes : 1 mm.

Courant : 50 – 120 ampères.

Tension : 20 – 25 V.

Pression de gaz inerte : 100-500 torr (aucun CNT n'est formé en dessous de 100 torr). Le gaz inerte est utilisé pour refroidir et condenser les atomes afin de former les CNT. L'hélium est couramment utilisé comme gaz inerte.

Température : 3000-3500°C.

Réacteur : Il contient une chambre en quartz connectée à une pompe à vide et à une pompe à diffusion pour l'approvisionnement en gaz inerte. Initialement, la chambre est mise sous vide par la pompe à vide, puis elle est remplie de gaz hélium par la pompe à diffusion.

III.4.4 Procédure de synthèse des CNT par la méthode de décharge à arc électrique

Dans cette méthode, une tension de 20 à 25 V est appliquée entre les électrodes de graphite pur séparées par une distance de 1 mm et maintenues à une pression de 500 torr d'hélium qui s'écoule à l'intérieur de la chambre en quartz (voir Figure III.14). Lorsque les électrodes sont amenées à se heurter l'une à l'autre dans ces conditions, elles produisent un arc électrique.

L'énergie produite dans l'arc est transférée à l'anode, qui ionise les atomes de carbone de l'anode en graphite pur et produit des ions C^+ et forme un plasma (le plasma est constitué d'atomes ou de molécules à l'état de vapeur à haute température). Ces ions de carbone chargés positivement se déplacent vers la cathode, se réduisent, se déposent et se développent en tant que CNT sur la cathode. À mesure que les CNT grandissent, la longueur de l'anode diminue, mais les électrodes sont ajustées et maintiennent toujours un espace de 1 mm entre les deux électrodes. Si un refroidissement adéquat des électrodes est obtenu, une déposition uniforme de CNT est formée sur la cathode, ce qui est obtenu par un gaz inerte maintenu à une pression appropriée. Par cette méthode, des nanotubes de carbone à parois multiples (MWCNT) sont synthétisés, et pour synthétiser des nanotubes de carbone à parois simples (SWCNT), des nanoparticules de catalyseur de Fe, Co et Ni sont incorporées dans la partie centrale de l'électrode positive. Les CNT obtenus sont ensuite purifiés pour obtenir la forme pure des CNT.

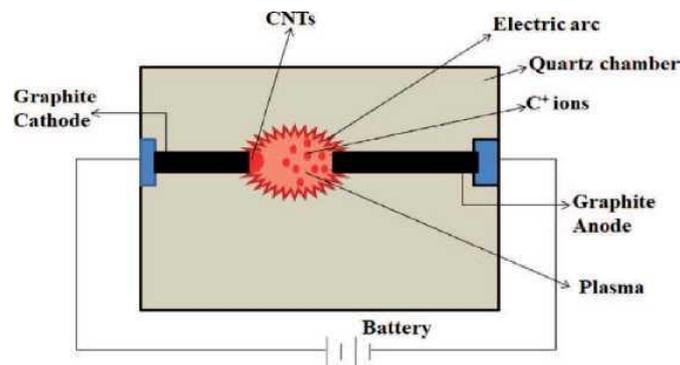


Figure III.14 Méthode de décharge à arc électrique

III.4.5 Méthode d'ablation au laser

Dépôt physique en phase vapeur (PVD) : Le PVD est une technique permettant de vaporiser un matériau sous forme gazeuse, puis de le déposer sur la surface d'un substrat.

Source de cible : La cible la plus couramment utilisée comme source de carbone est le graphite solide, qui est irradié par une source laser et vaporisé en atomes de carbone gazeux.

Source laser : La source laser utilisée pour la vaporisation du matériau cible en atomes de cible gazeux peut être une source laser continue telle qu'un laser CO_2 ou une source laser pulsée telle qu'un laser Nd:YAG (YAG dopé au néodyme, $Nd:Y_3Al_5O_{12}$).

Substrat utilisé : Le substrat utilisé est le collecteur de cuivre refroidi à l'eau sur lequel les atomes de carbone vaporisés se déposent et se développent sous forme de CNT.

Atmosphère de gaz inerte : Le gaz argon est couramment utilisé comme gaz inerte qui s'écoule à un débit constant vers le collecteur de cuivre refroidi à l'eau.

III.4.6 Procédure de synthèse des CNT par la méthode d'ablation au laser

La méthode d'ablation au laser est une méthode de dépôt physique en phase vapeur dans laquelle une cible de graphite est vaporisée par une source laser (voir Figure III.15). Dans cette méthode, la cible de graphite est placée au centre d'une chambre en quartz remplie de gaz argon et maintenue à 1200°C. La cible de graphite est vaporisée soit par une source laser continue, soit par une source laser pulsée. Les atomes de cible vaporisés (carbone) sont balayés vers le collecteur de cuivre refroidi par le flux de gaz argon. Les atomes de carbone sont déposés et se développent sous forme de CNT sur le collecteur de cuivre refroidi. En cas de faisceau laser continu, les atomes de carbone sont continuellement vaporisés, tandis qu'en cas de faisceau laser pulsé, la quantité de CNT produite peut être surveillée car chaque tir de faisceau laser pulsé est directement proportionnel à la quantité d'atomes de carbone vaporisés. Par cette méthode, des nanotubes de carbone à parois multiples (MWCNT) sont synthétisés, et pour synthétiser des nanotubes de carbone à parois simples (SWCNT), des nanoparticules de catalyseur de Fe, Co, Ni sont utilisées. Les CNT obtenus sont ensuite purifiés pour obtenir la forme pure des CNT.

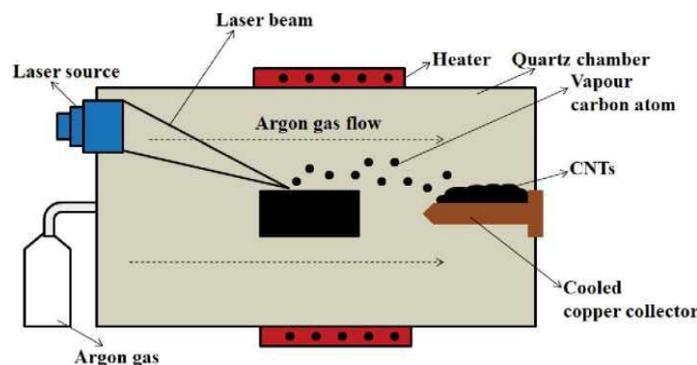


Figure III.15 Méthode d'ablation au laser - Représentation schématique.

III.4.6.1 Procédure pour la méthode de dépôt au laser pulsé

La méthode de dépôt au laser pulsé est une technique de dépôt de couches minces dans laquelle le matériau cible est vaporisé par un faisceau laser pulsé, et les atomes de cible vaporisés sont amenés à se déposer sur des substrats (voir Figure III.16). Le four contient une cible en bas et un substrat monté en haut. Un faisceau laser pulsé provenant d'une source laser Nd:YAG est dirigé vers la cible pour produire des atomes de cible vaporisés appelés le nuage (le nuage est constitué d'atomes vaporisés à haute température). Le nuage se déplace vers le substrat et est déposé et se développe sous forme de CNT. Chaque tir de laser est directement lié à la quantité de matériau ablaté, de sorte que le taux de dépôt peut être contrôlé et calibré.

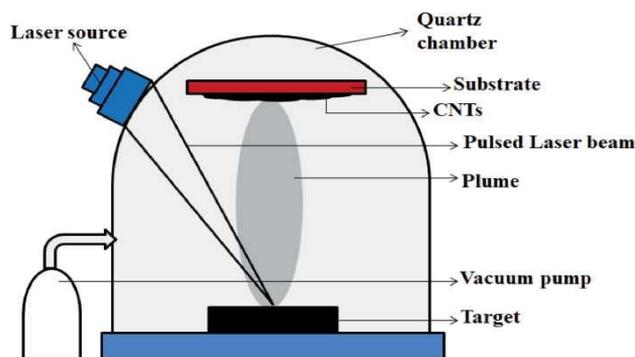


Figure III.16 Méthode d'ablation au laser - Représentation schématique.

III.4.6.2 Purification des CNT

Les CNT synthétisés peuvent être séparés du carbone amorphe, des nanoparticules de carbone, du catalyseur résiduel et d'autres impuretés par diverses méthodes. Les méthodes conventionnelles de purification ne sont pas très efficaces, mais des méthodes comme la purification en phase gazeuse, en phase liquide et les méthodes d'intercalation donnent de bons résultats.

Purification en phase gazeuse des CNT : Dans cette méthode, les CNT sont soumises à une oxydation à haute température, suivie d'extractions répétées à l'acide nitrique et à l'acide chlorhydrique. Cette procédure rend les CNT synthétisés plus purs et plus stables, avec moins de catalyseur résiduel et d'autres formes de carbone non CNT.

Purification en phase liquide des CNT : La purification en phase liquide des CNT suit plusieurs étapes. Elles sont les suivantes :

- Filtration préliminaire pour éliminer les particules de graphite en vrac.
- Dissolution dans des solvants organiques et des acides concentrés pour éliminer les fullerènes et le catalyseur, respectivement.
- Séparation centrifuge des CNT (partie solide) de la solution (contenant des impuretés).
- Microfiltration.

Chromatographie pour isoler les nanotubes de carbone à parois multiples, les nanotubes de carbone à parois simples, etc.

III.4.6.3. Purification par intercalation des CNT

Dans cette méthode, les impuretés de nanoparticules présentes sont oxydées par le cuivre métallique, qui agit comme catalyseur d'oxydation formé à partir de la réduction du chlorure de cuivre ajouté pendant le processus. Ce processus introduit des résidus d'intercalation et endommage les CNT pendant le processus d'oxydation.

III.5. Application des nanotubes de carbone

Les propriétés structurelles, mécaniques, thermiques et électroniques remarquables des CNT offrent de vastes perspectives dans les études fondamentales et les applications, notamment les nanocomposites, les dispositifs d'émission de champ, les dispositifs électroniques et électrochimiques, ainsi que les capteurs et les sondes. Un grand nombre de prototypes de dispositifs à base de CNT ont été fabriqués. Il est encourageant de noter que certains dispositifs à base de CNT, tels que la pointe de microscope à force atomique (AFM) et le composite de nanotubes d'Hyperion, sont déjà présents sur le marché (Figure 13.3).

III.5.1. Composites à base de CNT

Les fibres composites à base de CNT, présentant des propriétés mécaniques et électriques améliorées, ont été produites pour la première fois en 1999 (Andrews R et *al.* 1999). Des méthodes ont été développées pour "filer" les nanotubes en fibres ou fils macroscopiques, qui sont plus résistants que toute autre fibre organique connue (Jiang KL et *al.* 2002). L'incorporation de CNT dans les matériaux structuraux permet non seulement de renforcer mécaniquement ces matériaux, mais aussi d'améliorer leur conductivité électrique et thermique. En ajoutant des CNT à de l'époxy industriel...

Le composite résultant peut renforcer et améliorer la conductivité thermique de 125%. L'ajout de 1% de MWCNT dans le polystyrène peut augmenter le module et la résistance à la rupture jusqu'à 42% et 25%, respectivement. Le composite polymère conducteur électrique à base de MWCNT est un type de matériau à fort potentiel commercial. Des conductivités de 0,01 - 0,1 Scm⁻¹ peuvent être atteintes avec une charge de 5% de MWCNT dans une matrice polymère. De plus, les composites à base de CNT moulés ont également des applications potentielles dans la protection contre les rayonnements électromagnétiques émis par les téléphones portables et les ordinateurs.

III.5.2. Applications mécaniques

Compte tenu de leurs propriétés mécaniques extraordinaires, les CNT ont de nombreuses applications potentielles dans les capteurs de contrainte, les muscles artificiels et même les ascenseurs spatiaux. Des films minces de SWCNT alignés ont été utilisés comme capteurs de contrainte (Yamada T et *al.* 2011). Réagissant à divers modes de mouvement humain, ces dispositifs ont été fabriqués sous forme de bandages, de gants et de bas capables de détecter l'extension, la flexion, la respiration et les sauts. De plus, la recherche et le développement

ultérieurs permettront d'intégrer les CNT dans des batteries portables et une armure électronique légère pour les soldats. Une deuxième application utilise des SWCNT individuels comme capteurs de masse nanomécaniques. Avec une longueur d'environ 150 nm, une fréquence de 2 GHz et une résolution de $1,7 \times 10^{-24}$ g, un nanotube résonant est capable de détecter des événements d'adsorption et de mesurer les énergies de liaison.

Les films de CNT super-alignés peuvent être utilisés comme nouveaux muscles artificiels qui sont actionnés par une tension appliquée et peuvent fournir des allongements géants de 220% avec des taux d'allongement de $(3,7 \times 10^4)\%$ par seconde à des températures de fonctionnement de 80 à 1900 K (Aliev AE et al. 2009). En filant des MWCNT en fils, un actionneur rotatif a été créé. Ce dispositif tourne à 590 révolutions par minute avec jusqu'à $15,000^0$ rotations réversibles et peut être utilisé pour le mélange dans les puces fluidiques. Au lieu d'appliquer de l'électricité, on pourrait générer du courant en convertissant le mouvement mécanique du muscle CNT en torsion.

III.5.3. Applications thermiques

Les CNT sont des matériaux attractifs pour les applications thermiques. Les MWCNT sont capables de convertir l'énergie thermique chimiquement générée en énergie électrique (Choi W et al. 2010). La combustion du cyclotriméthylènetrinitroamine entourant un MWCNT produit une onde thermoélectrique se propageant le long de la longueur du nanotube. Cela produit des électrons thermiquement excités qui peuvent être exploités pour générer de l'énergie électrique en impulsions de puissance allant jusqu'à 7 kW kg^{-1} . Une autre application relie les dispositifs électroniques à l'échelle nanométrique aux CNT pour la gestion thermique. Le chauffage par effet Joule dans ces dispositifs est une préoccupation majeure et doit être minimisé. Grâce aux contacts entre les MWCNT et un substrat polaire, l'énergie est dissipée à distance. Le couplage des modes de vibration entre le nanotube et le substrat a montré qu'il dissipait 84 % de la puissance électrique fournie par le MWCNT vers un substrat.

III.5.4. Dispositifs photoniques et optoélectroniques

Les propriétés optiques des CNT peuvent avoir d'importantes applications en nanophotonique, telles que les nanolasers, les photodétecteurs, les nanoantennes, la conversion d'énergie solaire et l'optique quantique. Un tel dispositif utilise un SWCNT en tant que diode électroluminescente (LED) infrarouge en recombinaison d'excitons. Le transistor à effet de champ ambipolaire (FET) a produit une électroluminescence à partir d'un

CNT en injectant simultanément des électrons et des trous aux extrémités du tube. Cela a été amélioré avec les diodes p-n à base de CNT, qui permettent une conversion efficace des porteurs en photons, une auto-chauffage minuscule et une faible dissipation de puissance (Lee JU et *al.* 2004). L'électroluminescence correspond à la transition En du nanotube avec une densité de puissance d'environ $0,1 \text{ W m}^{-1}$.

En raison du couplage entre les électrons et les phonons, le transfert d'énergie entraîne un chauffage par effet Joule, qui peut être exploité comme émission de lumière thermique. Les SWCNT semi-métalliques émettent dans les longueurs d'onde infrarouge et visible à partir de leurs transitions E_{11} et E_{22} avec une dépendance exponentielle de la dissipation de puissance du dispositif. Les MWCNT alignés sur du silicium ont également montré une émission optique due au chauffage par effet Joule sous forme de rayonnement du corps noir (Sveningsson M et *al.* 2002). Le film émettait de la lumière dans la plage de longueurs d'onde de 350 à 900 nm à des températures de chauffage résistif de 1550 à 2000 K.

En plus de l'émission de lumière, les CNT peuvent agir comme des fibres optiques dirigeant le rayonnement entre les nanotubes ou d'autres matériaux dans leur environnement. Des SWCNT parallèles séparés sur de grandes distances de 300 nm peuvent être couplés optiquement par diffusion Rayleigh superposée. Dans un autre exemple, des SWCNT ont été incorporés dans les écailles des ailes de papillon pour l'imagerie infrarouge à mi-onde. Cette nanoarchitecture bio-inspirée convertit l'excitation infrarouge en radiation visible grâce à un mécanisme complexe de modification de l'espacement de la cavité optique en réponse à l'expansion thermique. Enfin, les MWCNT dans un câble nanocoaxial transmettent la lumière visible par le biais d'un guide d'onde sub-longueur d'onde (Rybczynski J et *al.* 2007).

III.5.5. Dispositifs d'émission de champ

En raison de leurs propriétés attractives d'émission de champ, les CNT ont été étudiés pour leur utilisation en tant que sources d'électrons par émission de champ dans les écrans plats, les lampes, les tubes à décharge de gaz et les générateurs de rayons X. Par rapport aux matrices de pointes en tungstène et en molybdène qui nécessitent un vide de 10^{-10} torr, les surfaces d'émission de champ en CNT sont relativement plus faciles à fabriquer et ne se détériorent pas sous un vide modéré (10^{-8} torr). De plus, les CNT peuvent fournir une émission stable, une longue durée de vie et des potentiels de seuil d'émission faibles, ainsi qu'une densité de courant élevée de 4 A cm^{-2} (10 mA cm^{-2} requis pour les écrans plats)(Zhu W et *al.* 1999).

Les écrans plats sont une application prometteuse des CNT. Une tension appliquée entre une surface revêtue de CNT et une anode produit des champs locaux élevés, qui font que les électrons passent par effet tunnel de l'extrémité du CNT dans le vide. Les champs électriques dirigent les électrons émis par champ vers l'anode, où un phosphore produit de la lumière pour l'application de l'écran plat. Les avantages des CNT par rapport aux écrans à cristaux liquides sont une faible consommation d'énergie, une luminosité élevée, un temps de réponse rapide, un large angle de vision et une plage de température de fonctionnement étendue. Samsung a produit plusieurs générations de prototypes, y compris un écran couleur rouge-bleu-vert de 9 pouces. Samsung et Unidym ont également fabriqué le premier écran électrophorétique en couleur à matrice active à base de CNT au monde, démontré sur un écran de 14,3 pouces. De plus, des prototypes de lampes fluorescentes à base de CNT avec une durée de vie élevée de plus de 8000 heures et des tubes à décharge de gaz à base de CNT ont également été fabriqués.

III.5.6. Dispositifs électroniques

Dans les interconnexions en cuivre de pointe utilisées en microélectronique, les longueurs de diffusion sont de quelques nanomètres, ce qui entraîne de grandes résistances. Les CNT métalliques offrent la possibilité d'interconnexions haute performance pour les systèmes intégrés à grande échelle (Javey A et al. 2003). Les avantages des interconnexions en CNT sont un libre parcours moyen des porteurs élevé résultant du transport balistique, une mobilité élevée des porteurs et une densité de courant élevée de 10^9 A cm^{-2} (10^5 A cm^{-2} pour les métaux conventionnels). De plus, ces interconnexions sont immunisées contre l'électromigration en raison des fortes liaisons C-C (Bandaru PR 2007).

Le transport électrique dans les CNT semi-conducteurs peut être commuté « allumé » et « éteint » ; ainsi, les CNT semi-conducteurs peuvent être utilisés comme canal conducteur dans les transistors. Le premier transistor à effet de champ (FET) à base de CNT à température ambiante a été signalé en 1998 (Tans SJ et al 1998). Il a été démontré qu'un SWCNT drapé entre deux électrodes en or pouvait être commandé. Depuis lors, de nombreux résultats sur les CNT-FET ont été rapportés. Un exemple est une diode CNT créée en greffant un nanotube métallique sur un nanotube semi-conducteur (Yao Z et al. 1999). D'autres dispositifs électriques comprennent une mémoire vive non volatile et des dispositifs électroniques à trois et quatre bornes formées à partir de SWCNT croisés.

Dans un CNT-FET, les CNT semi-conducteurs jouent le rôle de canal. Les principaux avantages des CNT-FET par rapport aux FET à base de semiconducteurs à oxyde métallique

sont la faible diffusion due au transport électrique balistique, la basse tension de fonctionnement et la très faible capacité d'environ 10 aF, ainsi qu'une mobilité élevée du canal FET. La diffusion due aux états de surface et à la rugosité, qui sévit dans les FET conventionnels, en particulier à haute tension de grille, est absente dans les CNT. Dans les FET à oxyde métallique conventionnels, la capacité de la grille à contrôler le potentiel dans le canal est limitée une fois que la tension de grille dépasse la tension de seuil, tandis que le couplage optimal entre la grille et le canal est permis dans les CNT-FET en raison des petits diamètres des nanotubes, permettant à la grille de contrôler le potentiel du canal. De plus, la surface chimiquement inerte des CNT est également avantageuse en termes de réduction de la recombinaison de surface, de courant de fuite et de conduction en dessous du seuil, et la résistance plus faible des CNT peut entraîner un fonctionnement plus rapide du dispositif avec une faible dissipation de puissance. Cependant, les pièges interfaciaux et les contacts inefficaces sont souvent observés pour affecter significativement les dispositifs CNT-FET. De plus, les défauts induisent souvent une perte de contrôle dans les propriétés électriques et constituent une source d'instabilité. En particulier, l'oxygène ambiant affecte les performances des dispositifs en dopant involontairement les contacts/les CNT. Ces problèmes représentent d'importants défis technologiques pour les applications immédiates des CNT-FET dans l'électronique à grande échelle.

III.5.7. Capteurs et sondes

Au-delà de l'électronique à grande échelle, la mobilité élevée des porteurs et la sensibilité des CNT-FET par rapport aux FET à base de silicium offrent aux CNT des applications très prometteuses dans les capteurs chimiques. Les SWCNT semi-conducteurs ont été utilisés dans des capteurs de gaz, où une variation de trois ordres de grandeur de la résistance électrique a été observée lors de l'exposition à des gaz oxydants et réducteurs, tels que le NO_2 et le NH_3 , avec une sensibilité de 2 ppm et 0,1 %, respectivement (Kong J et al 2000). Les oxydants forts (NO_2) provoquent un transfert de charge des SWCNT, induisant ainsi une densité de trous accrue et une meilleure conductivité électrique. Un effet inverse a été observé avec les agents réducteurs (NH_3), provoquant un transfert de charge des électrons vers les nanotubes, ce qui diminue la conductivité. Les MWCNT ont également été suggérés comme capteurs novateurs en raison de leur structure double paroi unique. Comparée aux SWCNT, cette structure double paroi offre une paroi extérieure qui peut être fonctionnalisée sélectivement par chimie covalente pour améliorer considérablement la sélectivité chimique du capteur. Comme la

paroi extérieure n'a qu'un seul atome d'épaisseur, le tube intérieur reste efficace pour détecter l'environnement chimique.

Plusieurs biosenseurs pour la détection d'une multitude de pathogènes et de produits chimiques ont été fabriqués avec des CNT comme élément de base (Martin CR, Kohli P 2003). Les CNT ont été utilisés pour fabriquer des capteurs de glucose en raison de leur taux de transfert d'électron rapide et de leur effet électrocatalytique élevé (Lin YH et *al.* 2004). Comme l'élément de détection à l'échelle nanométrique a une énorme surface, les capteurs à base de CNT sont très sensibles. La fonctionnalisation et les changements des propriétés électriques des CNT pourraient être utilisés à l'avenir pour les capteurs électroniques.

Les CNT ont été suggérés comme nouvelles sondes de balayage. Comparées aux sondes nanométriques conventionnelles, la robustesse mécanique des CNT et la faible force de flambage permettent de minimiser les dommages causés à l'échantillon lors de chocs répétés avec des substrats et augmentent ainsi considérablement la durée de vie de la sonde. Les sondes CNT permettent d'obtenir des images dans des crevasses étroites et profondes et une haute résolution en raison de leurs structures tubulaires et nanométriques.

III.5.8. Dispositifs électrochimiques

Grâce à leur aire de surface ultra-élevée, à leurs propriétés mécaniques, à leur conductivité électronique et à leur remarquable stabilité chimique ainsi qu'à leur légèreté, les CNT ont montré leur potentiel en tant qu'électrodes de haute performance pour les dispositifs de stockage et de conversion de l'énergie électrochimique, tels que les batteries au lithium (Gao B et *al.* 1999), les supercondensateurs et les actionneurs électromécaniques. Pour les batteries au lithium, les MWCNT offrent une capacité théorique élevée de 1000 mA heure g^{-1} , supérieure à celle du graphite (372 mA heure g^{-1}) et du graphite broyé à billes (708 mA heure g^{-1}). Récemment, des hétérostructures nanostructurées à base de CNT, telles que les CNT revêtus de silicium et les CNT revêtus de MnO_2 , ont été proposées comme électrodes prometteuses pour les batteries au lithium. Ces hétérostructures combinent les avantages des CNT et des matériaux fonctionnels, et améliorent manifestement les performances des batteries au lithium.

Les super condensateurs ont une densité de puissance élevée et une meilleure réponse en fréquence pour une meilleure performance et des applications plus exigeantes. Leurs capacités dépendent de la séparation entre la charge sur l'électrode et la contre-charge dans l'électrolyte. En tant qu'électrodes pour les supercondensateurs, la taille nanométrique des CNT offre une grande aire de surface accessible à l'électrolyte et conduit donc à des capacités

très élevées. Les électrodes en SWCNT et en MWCNT ont des capacités de 180 et 102 F g⁻¹, respectivement. Une densité de puissance spécifique élevée de plus de 20 kW kg⁻¹ et une réponse en fréquence supérieure d'environ 7560 Hz ont été obtenues en utilisant des films minces de MWCNT en tant qu'électrodes.

III.6. Inconvénients des Nanotubes de Carbone

Bien que les CNT aient de nombreuses applications dans de nombreux domaines, elles ont également quelques inconvénients pour l'environnement et la santé humaine. Le National Toxicology Program de l'Institut national des sciences de l'environnement et de la santé (NIEHS) et l'Institut national de la sécurité et de la santé au travail contribuent à découvrir et à sensibiliser aux effets des CNT sur la santé. Différentes nanoparticules et les impuretés présentes en elles peuvent toutes deux avoir un effet spécifique sur la toxicité des CNT.

III.6.1. Effets Environnementaux

Les nanotubes de carbone sont hautement stables, peu biodégradables et persévérants dans la nature. En raison de leur nature hydrophobe, ils ne devraient pas être dispersés dans l'eau car ils ont tendance à s'agréger. Des études montrent qu'il existe une possibilité de bioaccumulation (Petersen et al. 2011). Par exemple, (Khodakovskaya et al. 2009) ont rapporté que lors de la germination et de la croissance, les CNT pénètrent dans une variété de graines de plantes et dans les racines des plantes. Ils ont également été capables de migrer en faibles concentrations des racines des plantes vers d'autres parties telles que les feuilles et les fruits. On a signalé que dans le tractus digestif des organismes aux niveaux inférieurs de la pyramide écologique, les CNT peuvent rester et remonter dans la chaîne alimentaire à mesure que ces organismes sont consommés (Kim et al. 2010).

III.6.2. Effets sur la Santé

Des études ont montré que l'inhalation de CNT peut provoquer des mutations dans les cellules pulmonaires pouvant entraîner un cancer. (Zeni et al. 2008) ont rapporté qu'avec l'interaction de SWCNT, il y avait un effet toxique potentiel sur les cellules lymphocytaires du sang périphérique humain. Selon les produits chimiques attachés aux groupes fonctionnels, la cytotoxicité des CNT fonctionnalisés variera. La toxicité des CNT n'est toujours pas complètement connue. Elle est liée aux impuretés produites et peut-être à leur constitution en fragments de masse. Pour réduire la toxicité, il est essentiel de contrôler l'hydrophobicité extrême des CNT. En raison de leur hydrophobicité élevée, ils s'agrègent dans les liquides

polaires. La modification de surface avec des groupes covalents ou non covalents peut réduire leur hydrophobicité ou augmenter leur hydrophilicité. Les substituants hydrophiles peuvent être incorporés par liaison covalente sur les parois extérieures des CNT. La modification non covalente implique l'adsorption de tensioactifs tels que le NaDDBS sur les CNT sans affecter leur structure de base (Cheng et al. 2008). Pour des applications grand public, des modifications covalentes et non covalentes ont été utilisées pour préparer des CNT. Parmi les différentes stratégies de modification de surface covalente, la greffe intentionnelle de groupes fonctionnels contenant de l'oxygène sur les parois latérales et les extrémités ouvertes des CNT est une approche acceptée et adaptable. En fait, cette stratégie est fréquemment utilisée pour produire des CNT dispersés dans l'eau (Smith et al. 2009). Une oxydation de surface accidentelle est également possible après que les CNT ont été libérés dans l'environnement. Cela peut être dû à l'exposition à des agents d'oxydation naturels tels que l'ozone et les radicaux hydroxyles (Vione et al. 2006), ou à un processus courant de traitement de l'eau qui crée une irradiation UV et une ozonolyse (Savage et al. 2003). Il existe différentes méthodes disponibles pour incorporer de l'oxygène de surface dans les CNT : oxydation chimique humide (Li et al. 2008), traitements au plasma (Yang et al. 2008), et stratégies de fonctionnalisation rationnelle (Gromov et al. 2005). Les traitements oxydatifs aident également à éliminer les impuretés telles que le carbone amorphe et les impuretés métalliques des CNT (Bergeret et al. 2008), malgré le fait qu'une grande variété de conditions oxydantes soit utilisée pour modifier les CNT.

III.7. Conclusion

En conclusion, les nanotubes de carbone (CNT) se distinguent par leurs propriétés exceptionnelles, notamment leur résistance mécanique, leur conductivité électrique et thermique, et leur légèreté. Leur synthèse, bien que complexe, a été perfectionnée au fil des années, permettant une production plus efficace et à plus grande échelle. Grâce à ces caractéristiques uniques, les CNT trouvent des applications variées et innovantes dans de nombreux domaines, tels que l'électronique, les matériaux composites, la médecine et les énergies renouvelables. Leur potentiel continue de susciter un intérêt croissant, promettant des avancées significatives dans les technologies de pointe.

CHAPITRE IV

VIBRATION DES NANOPOUTRES EN MATERIAUX FG-CNTRC EN UTILISANT LE MODELE D'ORDRE SUPERIEUR

Chapitre IV

VIBRATION DES NANOPOUTRES EN MATERIAUX FG-CNTRC EN UTILISANT LE MODELE D'ORDRE SUPERIEUR

IV. 1.Introduction

Ce chapitre présente une approche analytique pour explorer le comportement des vibrations libres de nouvelles poutres composites renforcées par des nanotubes de carbone (CNT) à gradient fonctionnel (FG) basée sur une théorie de déformation par cisaillement d'ordre supérieur. La gradation des matériaux et les propriétés des matériaux sont décrites par des fonctions cosinus à travers l'épaisseur. Les relations cinématiques de la poutre sont proposées en fonction trigonométriques. Les équations d'équilibre sont obtenues en utilisant le principe du travail virtuel et résolues en appliquant la méthode de Navier. L'exactitude du modèle analytique proposé est démontrée par une évaluation comparative des résultats par rapport aux prédictions de la littérature. De plus, une analyse paramétrique détaillée vérifie la sensibilité de la réponse aux vibrations des nanopoutres FG à l'échelle de longueur non locale, à la structure à gradient de contrainte, à la distribution des matériaux et à la géométrie.

Dans ce travail, le problème des vibrations libres de poutres CNTRC simplement supportées renforcées par différents motifs de distribution de CNT dans la matrice polymère est présenté. La gradation des matériaux et les propriétés des matériaux sont décrites par des fonctions cosinus à travers l'épaisseur. En se basant sur la théorie du gradient de contrainte non local d'ordre supérieur, les équations d'équilibre sont obtenues en utilisant le principe du travail virtuel et résolues en appliquant la procédure de Navier.

IV.2. Propriétés mécaniques des poutres CNTRC

Pour commencer, comme le montre la (Figure IV.1), une poutre CNTRC (Composite à Nervures Transversales Renforcées en Carbone) uniforme de longueur L et d'épaisseur h est prise en considération. Ainsi, chaque couche de la poutre est renforcée par des nanotubes de carbone mono paroi (SWCNTs) selon différentes distributions de la fonction de gradation, comme indiqué également dans la (Figure IV.1). Les schémas de distribution des CNTs utilisés dépendent de la fraction volumique des CNTs, V_{cnt}^* , en fonction de la gradation.

UD CNTRC poutre:

$$V_{cnt} = V_{cnt}^* \quad (IV.1)$$

FG-V CNTRC poutre:

$$V_{cnt} = \left(1 + \frac{2z}{h}\right) V_{cnt}^* \quad (IV.2)$$

FG-O CNTRC poutre:

$$V_{cnt} = 2 \left(1 - \frac{2z}{h}\right) V_{cnt}^* \quad (IV.3)$$

FG-X CNTRC poutre:

$$V_{cnt} = 4 \frac{|z|}{h} V_{cnt}^* \quad (IV.4)$$

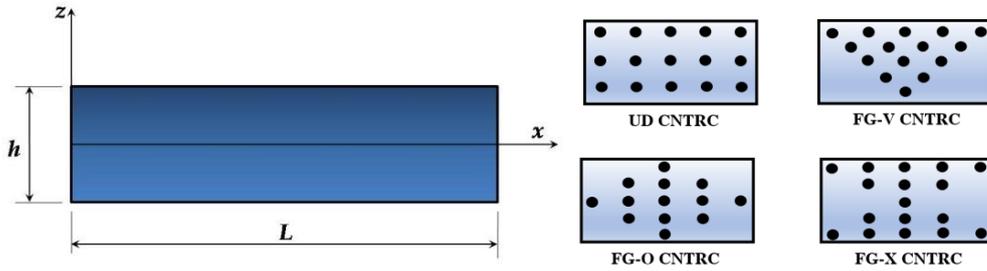


Figure IV. 1. Géométrie et sections transversales d'une poutre FG-CNTRC.

De plus, les sigles UD CNTRC indiquent une distribution uniforme, tandis que FG-V, FG-O et FG-X représentent les distributions non uniformes à gradient fonctionnel. V_{cnt}^* représente la fraction volumique donnée des nanotubes de carbone (CNTs).

Pour le type de poutre trigonométrique FG-A, le module d'Young est donné par :

$$V_{cnt} = \left(1 - \cos\left(N \frac{2\pi z}{h}\right)\right) V_{cnt}^* \quad (IV.5)$$

Pour la poutre trigonométrique de type FG-B, le module d'Young est donné par :

$$V_{cnt} = \left(1 + \cos\left(N \frac{2\pi z}{h}\right)\right) V_{cnt}^* \quad (IV.6)$$

V_{cnt} , ρ_{cnt} et ρ_m représentent respectivement la fraction massique des CNTs (nanotubes de carbone), la masse volumique des CNTs et la masse volumique de la matrice polymère.

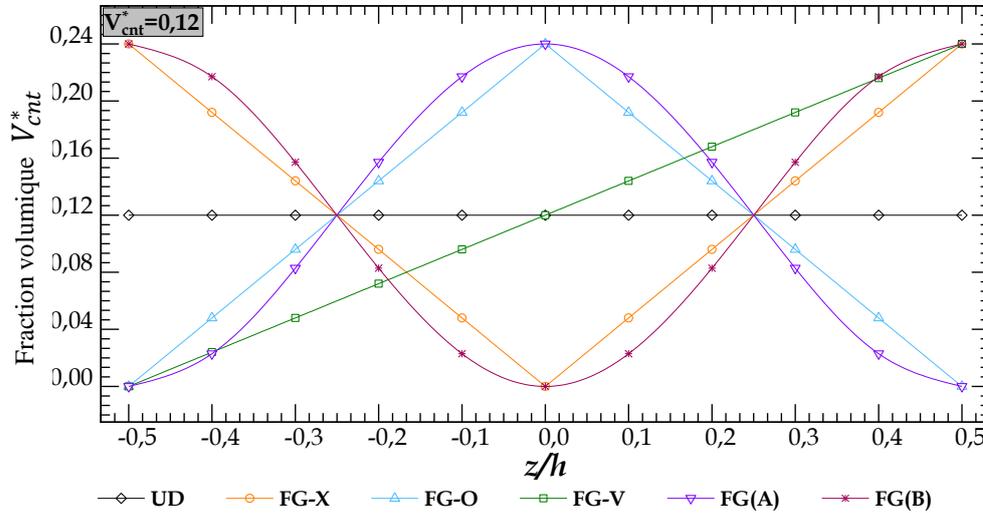


Figure. IV. 2. Distribution de nanotubes de carbone CNTs à gradient de fonctionnalité.

À partir de cette Figure IV.1, représente la distribution de nanotubes de carbone CNT à travers l'épaisseur de la poutre . on observe que les matériaux à gradient fonctionnel proposés (FG(A) et FG(B)) ont une variation excellente et régulière de la distribution des constituants, contrairement au FG-X et au FG-V qui ont un changement abrupt de distribution au niveau de la position du plan médian.

Le module de Young effectif (E) et le module de cisaillement (G) d'une poutre CNTRC sont donnés par

$$\begin{aligned}
 E_{11} &= \eta_1 V_{cnt} E_{11}^{cnt} + V_p E_p \\
 \frac{\eta_2}{E_{22}} &= \frac{V_{cnt}}{E_{22}^{cnt}} + \frac{V_p}{E_p} \\
 \frac{\eta_3}{E_{22}} &= \frac{V_{cnt}}{G_{12}^{cnt}} + \frac{V_p}{G_p}
 \end{aligned}
 \tag{IV.7}$$

Le coefficient de Poisson ν_{12} , et la densité ρ de chaque feuille peut être exprimée comme

$$\nu_{12} = V_{cnt} \nu_{12}^{cnt} + V_p \nu_p
 \tag{IV.8}$$

$$\rho = V_{cnt} \rho_{cnt} + V_p \rho_p
 \tag{IV.9}$$

Où E_{11} et E_{22} sont les modules d'Young dans les directions du plan (x,z) , et G_{12} est le module de cisaillement des composites de la poutre. ρ et ν sont respectivement la masse volumique et

le coefficient de Poisson du matériau de la poutre. Les exposants “ ρ ” et “ cnt ” font référence aux caractéristiques mécaniques du polymère et des SWCNTs, respectivement.

Les paramètres d'efficacité des CNT η_i ($i = 1,2,3$) sont :

$$V_{cnt}^* = 0.12; \eta_1 = 1.2833, \eta_2 = \eta_3 = 1.0556.$$

$$V_{cnt}^* = 0.17; \eta_1 = 1.3414, \eta_2 = \eta_3 = 1.7101.$$

$$V_{cnt}^* = 0.28; \eta_1 = 1.3238, \eta_2 = \eta_3 = 1.7380.$$

IV.3. Théorie des poutres

L'utilisation croissante des matériaux composites est devenue courante dans divers domaines industriels tels que l'aéronautique, l'automobile, le nucléaire et le génie civil. Cette tendance s'explique par les nombreux avantages de ces matériaux, notamment leur haute résistance et leur grande rigidité par rapport à leur poids, ainsi que leurs caractéristiques de fatigue supérieures et leur capacité à modifier les orientations des fibres pour répondre aux exigences de conception. Cependant, du fait de leur composition en deux matériaux ou plus, ces matériaux posent des problèmes au niveau des interfaces, notamment le délaminage et la propagation des fissures entre les couches. Il est donc crucial de comprendre leurs caractéristiques structurales telles que les déplacements, la distribution des contraintes à travers l'épaisseur, les fréquences naturelles, la force de flambement et l'effet des états de frontière et des chargements externes. Étant donné l'importance de l'utilisation des poutres composites dans la conception des structures industrielles, il est nécessaire de disposer d'une théorie efficace pour prédire avec précision les caractéristiques structurales de ces poutres. Différentes approches existent, et en particulier, celles basées sur la recherche d'une structure équivalente homogène (Equivalent Single Layer Model).

IV.3.1. Théorie d'Euler-Bernoulli (Classical beam Theory CBT)

La théorie des poutres minces, également connue sous le nom de théorie d'Euler-Bernoulli (CPT), est un modèle fondamental utilisé dans le domaine de la résistance des matériaux. Bien que la paternité de cette théorie soit traditionnellement attribuée à Galilée, des études récentes suggèrent que Léonard de Vinci aurait été le précurseur. De Vinci avait postulé une déformation linéaire en fonction de la distance à la surface neutre, avec la courbure comme coefficient de proportionnalité, mais il n'a pas pu finaliser ses calculs en raison de son absence de connaissance de la loi de Hooke. Galilée, quant à lui, avait fait une hypothèse incorrecte

(supposant une répartition uniforme de la contrainte en flexion), et c'est Antoine Parent qui a obtenu la distribution correcte. La première théorie pratique a été formulée par Leonhard Euler et Jacques Bernoulli vers 1750, tandis que Daniel Bernoulli, le neveu de ce dernier, a écrit l'équation différentielle pour l'analyse vibratoire.

Dans la théorie classique des poutres, plusieurs hypothèses sont établies, notamment :

- Aucune déformation ne se produit dans le plan moyen de la poutre.
- La contrainte normale σ_z est négligeable par rapport aux autres composantes.
- Une normale au plan moyen avant déformation reste normale au plan moyen après la déformation.
- L'effet de l'inertie de rotation est négligeable.

En considérant une poutre FGM de longueur "L" et d'épaisseur "h", les déplacements de la poutre sont exprimés comme suit

$$\begin{aligned} u(x, z) &= u_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial x} \\ w(x, z) &= w_0 \end{aligned} \quad (\text{IV.10})$$

Où $u(x, z)$, $v(x, z)$ et $w(x, z)$, sont les déplacements de la poutre, u_0 , v et w_0 sont les composantes du champ de déplacement sur le plan moyen de la poutre (Figure IV.3).

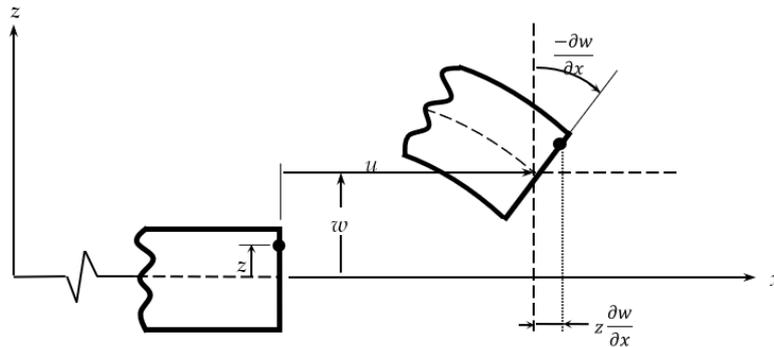


Figure IV.3. Cinématique de la déformation de la poutre d'Euler-Bernoulli.

IV.3.2. Théorie de premier ordre (First-order Shear Deformation Beam Theory FSDPT)

La troisième hypothèse de la théorie d'Euler-Bernoulli stipule que la déformation due au cisaillement transversal est négligée. Toutefois, les effets du cisaillement transversal et de l'inertie de rotation deviennent significatifs lorsque la poutre est relativement épaisse ou lorsque

des solutions précises pour des modes de vibration plus élevés sont nécessaires. Plusieurs théories de poutres ont été développées pour prendre en compte l'effet du cisaillement transversal, avec pour objectif implicite de minimiser au maximum les erreurs.

Reissner (1945) a proposé une des théories les plus simples en introduisant l'effet du cisaillement transversal par un terme supplémentaire dans l'énergie principale. Mindlin, quant à lui, a présenté une approche différente en développant une théorie de premier ordre pour les poutres, intégrant à la fois la déformation de cisaillement et un facteur de correction de cisaillement. Dans cette théorie, les deux premières hypothèses de Kirchhoff (1850) sont maintenues.

Pour prendre en compte l'effet du cisaillement transversal, cette théorie assouplit l'hypothèse de normalité, de sorte que toute section droite perpendiculaire à la surface moyenne non déformée reste droite mais pas nécessairement perpendiculaire à la surface moyenne déformée. Cette hypothèse implique que la déformation de cisaillement transversal est différente de zéro, mais elle conduit également à une violation statique de la contrainte de cisaillement qui est nulle sur les surfaces extérieures, car la contrainte de cisaillement devient constante à travers toute l'épaisseur de la poutre. Pour corriger cette erreur, Mindlin(1951) a proposé l'utilisation d'un facteur de correction de cisaillement pour la force de cisaillement. De plus, Mindlin a modifié la quatrième hypothèse pour inclure l'effet de l'inertie de rotation.

Dans la théorie du premier ordre des poutres, le champ de déplacement (voir Figure IV.4) est exprimé sous la forme

$$\begin{aligned} u(x, z) &= u_0 + z\varphi_x \\ w(x, z) &= w_0 \end{aligned} \tag{IV.11}$$

Où φ_x et φ_y , sont les rotations autour des axes x et y, respectivement (Figure IV.3).

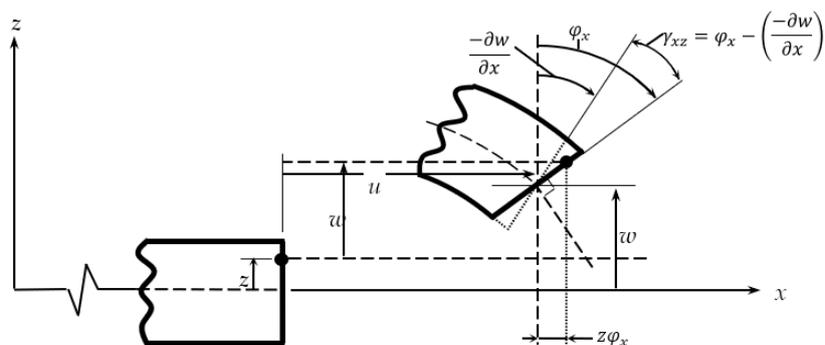


Figure IV.4. Cinématique de la théorie du premier ordre.

IV.3.3. Théorie d'ordre supérieur (high-order shear deformation beam theory HSDPT)

Pour dépasser les limites des théories du premier ordre, plusieurs auteurs proposent des théories d'ordre supérieur. Ces modèles reposent sur une distribution non linéaire des champs à travers l'épaisseur. Ils permettent de prendre en compte la déformation de torsion de la section dans sa configuration déformée.

La plupart des modèles d'ordre supérieur utilisent un développement en séries de Taylor des champs de déplacements, exprimés sous la forme :

$$u(x, t) = u(x, t) + z\varphi^{(1)}(x, t) + z^2\varphi^{(2)}(x, t) + z^3\varphi^{(3)}(x, t) + z^4\varphi^{(4)}(x, t) + \dots \quad (\text{IV. 12})$$

Partons de ce principe : nous pouvons utiliser différents ordres en fonction de la complexité du problème et de la précision souhaitée. La plupart des études se basent sur un développement en ordre supérieur, offrant ainsi un niveau minimal de complexité. La valeur de φ_i détermine la nature de la théorie. Par exemple, la théorie du premier ordre de Reissner-Mindlin est obtenue en fixant φ_i pour $i=2, 3, 4...$

En principe, les modèles d'ordre supérieur sont plus précis que les modèles du premier ordre. La précision augmente avec l'ordre de développement, c'est-à-dire avec le nombre de paramètres supplémentaires. Cependant, les conditions aux limites sur les bords sont difficiles à satisfaire, et le nombre de variables de déplacement indépendantes dépasse celui des modèles classiques. Pour réduire le nombre de paramètres de déplacement, plusieurs simplifications sont proposées. On impose souvent que les contraintes de cisaillement transversal soient nulles aux surfaces supérieure et inférieure de la poutre. Le développement en série de Taylor est utilisé avec $\varphi^{(2)} = \varphi^{(4)} = 0$

Pour simplifier l'écriture, le champ de déplacement d'un point matériel dans la poutre est basé sur la théorie d'ordre supérieur.

$$\begin{aligned} u(x, z) &= u_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial x} + f(z)\varphi_x \\ w(x, z) &= w_0 \end{aligned} \quad (\text{IV. 13})$$

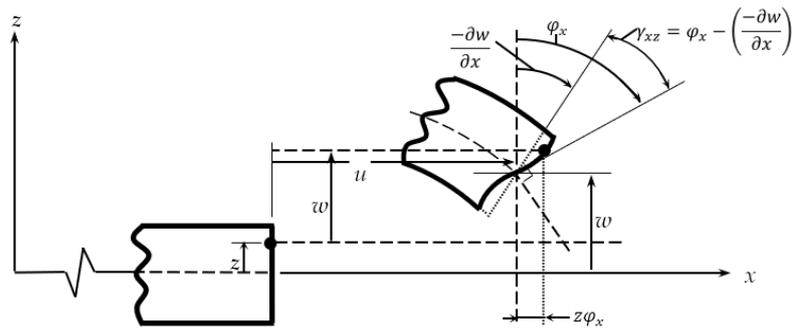


Figure IV.5. Cinématique de la théorie d'ordre supérieur.

Dans la théorie classique des poutres (CPT), le champ de déplacement est obtenu en fixant $f(z) = 0$. La théorie du premier ordre (first-order shear deformation theory, FSDT) est obtenue en fixant $f(z) = z$. Il est à noter que la FSDT inclut un facteur de correction 5/6 pour prendre en compte les effets de cisaillement qui ne sont pas pris en compte dans la CPT. Il existe plusieurs contributions au développement de modèles d'ordre supérieur présents dans la littérature, qui se distinguent par la fonction de forme $f(z)$.

- Ambartsumian(1958)

$$f(z) = \frac{z}{2} \left(\frac{h^2}{4} - \frac{z^2}{3} \right) \quad (IV.14)$$

- Kruszewski(1909)

$$f(z) = \frac{5z}{2} \left(1 - \frac{4z^2}{3h^2} \right) \quad (IV.15)$$

- Reddy (1990)

$$f(z) = z \left(1 - \frac{4z^2}{3h^2} \right) \quad (IV.16)$$

- Touratier (1991)

$$f(z) = \frac{h}{\pi} \sin\left(\frac{z}{h}\right) \quad (IV.17)$$

- Soldatos (1992)

$$f(z) = z \cosh\left(\frac{1}{2}\right) - h \sinh\left(\frac{z}{h}\right) \quad (IV.18)$$

- Karama (2003)

$$f(z) = z e^{-2\left(\frac{z}{h}\right)^2} \quad (IV.19)$$

- Akavci (2007)

$$f(z) = \frac{3\pi}{2} \left[h \tanh\left(\frac{z}{h}\right) - z \sec^2 h \left(\frac{1}{2}\right) \right] \tag{IV.20}$$

- Mantari et al. (2012)

$$f(z) = \sin\left(\frac{\pi z}{h}\right) e^{m \cos\left(\frac{\pi z}{h}\right)} + \frac{m \pi z}{h}, m \geq 0 \tag{IV.21}$$

Les figures suivantes illustrent la variation de la fonction de forme $f(z)$ pour différents modèles en fonction de l'épaisseur de la poutre, ainsi que la dérivée de la fonction de forme $f'(z)$ en fonction de l'épaisseur.

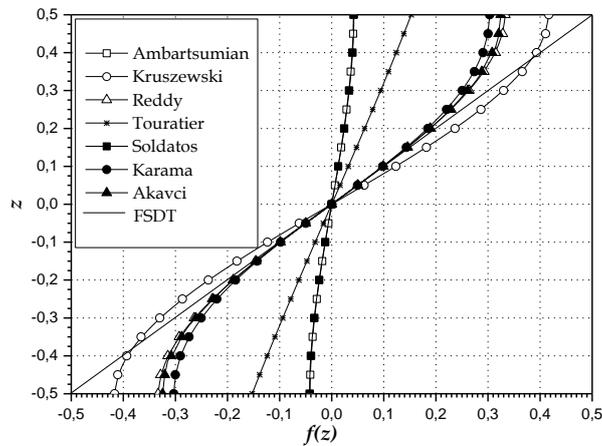


Figure IV.6. Variation de la fonction de forme $f(z)$ des différents modèles en fonction de l'épaisseur.

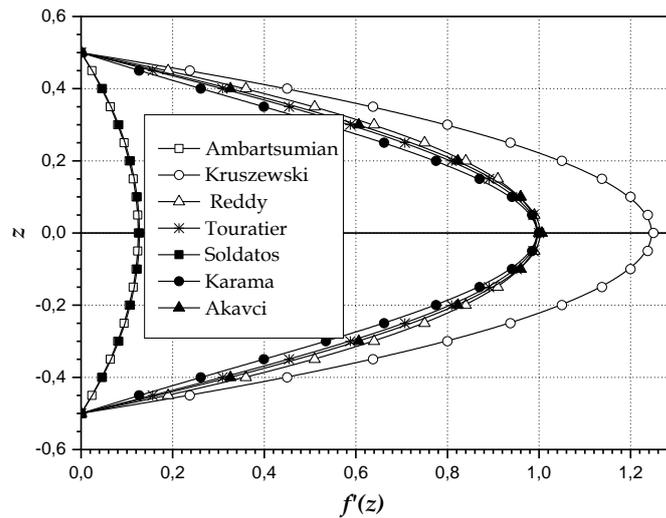


Figure IV.7. Variation de la dérivée de la fonction de forme $f'(z)$ des différents modèles en fonction de l'épaisseur.

IV.4. Formulation mathématique

Une théorie 2D de déformation parabolique en cisaillement pour les nanopoutres FG (poutres à gradient de propriétés) en tenant compte des déformations de cisaillement transversales est adoptée dans cette étude. Le champ de déplacement de la théorie proposée est choisi en se basant sur les hypothèses suivantes (Daikh *et al.* 2020) :

- Le déplacement axial est composé de composantes d'extension, de flexion et de cisaillement.
- La composante de flexion du déplacement axial est similaire à celle donnée par la théorie classique des poutres d'Euler-Bernoulli ;
- La composante de cisaillement du déplacement axial entraîne une variation parabolique de la déformation de cisaillement et donc du contrainte de cisaillement à travers l'épaisseur de la poutre de telle manière que la contrainte de cisaillement s'annule sur les surfaces supérieure et inférieure.

En se basant sur les hypothèses énoncées ci-dessus, le champ de déplacement de la théorie actuelle peut être obtenu comme suit

$$\begin{aligned} u(x, z, t) &= u_0(x, t) - z \frac{\partial w_0(x, t)}{\partial x} + f(z) \varphi_x(x, t) \\ w(x, z, t) &= w_0(x, t) \end{aligned} \quad (\text{IV.21})$$

Où u_0 est le déplacement axial ; w_0 est le déplacement transversal d'un point situé sur la ligne médiane de la poutre ; φ_x est la rotation d'une section transversale de la poutre à l'axe neutre due à la déformation de cisaillement transversal.

Dans la présente étude, la déformation de cisaillement le long de la direction de l'épaisseur peut être exprimée par une fonction trigonométrique de la forme

$$f(z) = 5 \cdot h \cdot \text{atan}\left(\frac{z}{h}\right) - 4z \quad (\text{IV.22})$$

Les composantes de déformation cinématique associées aux déplacements sont exprimées comme suit :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \varepsilon_{xx}^0 - z \varepsilon_{xx}^1 + f(z) \varepsilon_{xx}^2 \\ \gamma_{xz} &= \frac{df(z)}{dz} \varphi_x \end{aligned} \quad (\text{IV.23})$$

Ou

$$\varepsilon_{xx}^0 = \frac{\partial u_0}{\partial x}, \quad \varepsilon_{xx}^1 = \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}, \quad \varepsilon_{xx}^2 = \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} - \frac{\partial \varphi_0}{\partial x} \quad (\text{IV.24})$$

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + f(z) \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} - \frac{\partial \varphi_0}{\partial x} \right) \quad (\text{IV.25a})$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial f(z)}{\partial z} \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} - \varphi_0 \right) \quad (\text{IV.25b})$$

Pour obtenir les équations du mouvement, le principe de Hamilton est utilisé comme suit :

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta U - \delta K) dt = 0 \quad (\text{IV.26})$$

Pour commencer, δU représente l'énergie totale de déformation, et δK est l'énergie cinétique. Par conséquent, l'énergie virtuelle de déformation de la poutre peut être exprimée comme suit :

$$\delta U = \int_0^L \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_{xx} \delta \varepsilon_{xx} + \tau_{xz} \delta \varepsilon_{xz}) dz dx \quad (\text{IV.27})$$

$$\delta U = \int_0^L \left[N_{xx} \frac{d\delta u_0}{dx} - M_{xx} \frac{d^2 \delta w_0}{dx^2} + P_{xx} \left(\frac{d^2 \delta w_0}{dx^2} - \frac{d\delta \varphi_0}{dx} \right) + Q_x \left(\frac{d\delta w_0}{dx} - \delta \varphi_0 \right) \right] dx \quad (\text{IV.28})$$

Où N_{xx} , M_{xx} , P_{xx} et Q_x sont les résultantes de contrainte du moment de flexion, de la force généralisée d'ordre supérieur et de la force de cisaillement et peuvent être définis comme suit

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} N_{xx} \\ M_{xx} \\ P_{xx} \end{Bmatrix} &= \int_{-h/2}^{h/2} \begin{Bmatrix} 1 \\ z \\ f(z) \end{Bmatrix} \sigma_{xx} dz \\ Q_{xz} &= \int_{-h/2}^{h/2} \frac{df(z)}{dz} \sigma_{xz} dz \end{aligned} \quad (\text{IV.29})$$

L'énergie cinétique δK peut être exprimée comme suit :

$$\begin{aligned} \delta K &= \int_0^L \rho(z) [\dot{u}_0 \delta \dot{u}_0 + \dot{w}_0 \delta \dot{w}_0] dz dx \\ \delta K &= \int_0^L \left[I_1 (\dot{u}_0 \delta \dot{u}_0 + \dot{w}_0 \delta \dot{w}_0) - I_1 \left(\frac{d\dot{w}_0}{dx} \delta \dot{u}_0 + \dot{u}_0 \frac{d\delta \dot{w}_0}{dx} \right) \right. \\ &\quad \left. + I_2 \left(\frac{d\dot{w}_0}{dx} + I_3 \left(\frac{d\dot{w}_0}{dx} \delta \dot{u}_0 - \dot{\varphi}_0 \delta \dot{u}_0 + \dot{u}_0 \frac{d\delta \dot{w}_0}{dx} - \dot{u}_0 \delta \dot{\varphi}_0 \right) \right) \right. \\ &\quad \left. + I_4 \left(\delta \frac{d\delta \dot{w}_0}{dx} - 2 \frac{d\dot{w}_0}{dx} \frac{d\delta \dot{w}_0}{dx} + \frac{d\dot{w}_0}{dx} \delta \dot{\varphi}_0 \right) + I_5 \left(\frac{d\dot{w}_0}{dx} \frac{d\delta \dot{w}_0}{dx} - \dot{\varphi}_0 \frac{d\delta \dot{w}_0}{dx} - \frac{d\dot{w}_0}{dx} \delta \dot{\varphi}_0 + \dot{\varphi}_0 \delta \dot{\varphi}_0 \right) \right] dx \end{aligned} \quad (\text{IV.30})$$

Les moments d'inertie massiques I_i ($i=0,1,2,\dots,5$) peuvent être définis comme suit :

$$\{I_0, I_1, I_2, I_3, I_4, I_5\} = \int_{-h/2}^{h/2} \rho(z) \{1, z, z^2, f(z), zf(z), f(z)^2\} dz \quad (IV.31)$$

De plus, en substituant les équations de δU et δK dans l'équation (IV.26), et en appliquant l'intégration par parties et en regroupant les coefficients de δu_0 , δw_0 et $\delta \phi_0$, on obtient les équations du mouvement suivantes.

$$\begin{aligned} \delta u_0: \frac{dN_x}{dx} &= I_0 \ddot{u}_0 - I_1 \frac{d\ddot{w}_0}{dx} + I_3 \left(\frac{d\ddot{w}_0}{dx} - \ddot{\phi}_0 \right) \\ \delta \phi_0: \frac{dP_x}{dx} - Q_x &= I_3 \ddot{u}_0 - I_4 \frac{d\ddot{w}_0}{dx} + I_5 \left(\frac{d\ddot{w}_0}{dx} - \ddot{\phi}_0 \right) \\ \delta w_0: \frac{d^2 P_x}{dx^2} - \frac{d^2 M_x}{dx^2} - \frac{dQ_x}{dx} &= \\ -I_0 \ddot{w}_0 - I_1 \frac{d\ddot{u}_0}{dx} + I_2 \frac{d^2 \ddot{w}_0}{dx^2} + I_3 \frac{d\ddot{u}_0}{dx} + I_4 \left(\frac{d\ddot{\phi}_0}{dx} - 2 \frac{d^2 \ddot{w}_0}{dx^2} \right) + I_5 \left(\frac{d^2 \ddot{w}_0}{dx^2} - \frac{d\ddot{\phi}_0}{dx} \right) \end{aligned} \quad (IV.32)$$

Les conditions aux limites associées à $x = 0$ et $x = L$ sont données comme suit :

$$\begin{aligned} N_x &= 0 \text{ ou } u = 0 \\ M_x &= 0 \text{ ou } w = 0 \\ \frac{\partial M_x}{\partial x} - \frac{\partial P_x}{\partial x} + Q_x &= 0 \text{ ou } w = 0 \end{aligned} \quad (IV.33)$$

Comme on peut le constater, les équations (IV.32) sont des fonctions des sollicitations de contrainte. Cependant, les contraintes normales et de cisaillement peuvent être exprimés en utilisant les relations constitutives comme suit:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & 0 \\ 0 & Q_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} \quad (IV.34)$$

Où σ_{xx} et τ_{xz} sont respectivement les contraintes axiales et de cisaillements transversaux. Q_{ij} sont les coefficients de rigidité liés aux constantes d'ingénierie comme suit:

$$Q_{11}(z) = \frac{E_{11}}{1 - \nu^2}, Q_{55}(z) = G_{12}(z), E_{11} = \eta_1 V_{cnt} E_{11}^{cnt} + V_p E_p \quad (IV.35)$$

En substituant les équations (IV.23-25) dans l'équation (IV.34) et en utilisant (IV.29), on obtient les sollicitations de contrainte :

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} N_{xx} \\ M_{xx} \\ P_{xx} \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_{11} & B_{11} & C_{11} \\ B_{11} & D_{11} & F_{11} \\ C_{11} & F_{11} & H_{11} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_x^1 \\ \varepsilon_x^2 \end{Bmatrix} \\ Q_{xz} &= A_{55} \gamma_{xz} \end{aligned} \quad (IV.36)$$

Où les rigidités de la section transversale sont exprimées comme suit :

$$\{A_{11}, B_{11}, D_{11}, C_{11}, F_{11}, H_{11}\} = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{11} \{1, z, z^2, f(z), zf(z), f(z)^2\} dz \quad (IV.37)$$

$$A_{55} = - \int_{-h/2}^{h/2} Q_{55} \left[\frac{df(z)}{dz} \right]^2 dz \quad (IV.38)$$

Les sollicitations de force et de moment peuvent être définies dans les champs de déplacement comme suit :

$$\begin{aligned} N_{xx} &= A_{11} \frac{\partial u_0}{\partial x} - B_{11} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + C_{11} \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} - \frac{\partial \varphi_0}{\partial x} \right) \\ M_{xx} &= B_{11} \frac{\partial u_0}{\partial x} - D_{11} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + F_{11} \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} - \frac{\partial \varphi_0}{\partial x} \right) \\ P_{xx} &= C_{11} \frac{\partial u_0}{\partial x} - F_{11} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + H_{11} \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} - \frac{\partial \varphi_0}{\partial x} \right) \\ Q_x &= A_{55} \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} - \varphi_0 \right) \end{aligned} \quad (IV.39)$$

IV.5. Théorie des déformations non locales à gradient

En prenant en compte l'impact physique couplé des contraintes dues aux gradients de déformation et des contraintes élastiques non locales, (Lim et *al.* 2015) ont proposé une fonction de contraintes comme suit :

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{(0)} - \frac{d\sigma_{ij}^{(1)}}{dx} \quad (IV.40)$$

Ou $\sigma_{ij}^{(0)}$ et $\sigma_{ij}^{(1)}$ Les contraintes classiques correspondant à la déformation ε_{kl} et les contraintes $\sigma_{ij}^{(1)}$ correspondant au gradient de déformation $\varepsilon_{kl,x}$ peuvent être exprimées comme suit :

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^{(0)} &= \int_0^L C_{ijkl} \alpha_0(x, x', e_0 a) \varepsilon_{kl,x}(x') dx' \\ \sigma_{ij}^{(1)} &= l^2 \int_0^L C_{ijkl} \alpha_1(x, x', e_1 a) \varepsilon_{kl,x}(x') dx' \end{aligned} \quad (IV.41)$$

C_{ijkl} Désigne une constante élastique, et l est le paramètre d'échelle de longueur du matériau introduit pour prendre en compte l'importance du champ de contraintes dû aux gradients de déformation. De plus, $e_0 a$ et $e_1 a$ sont les paramètres non locaux introduits pour prendre en compte l'importance du champ de contraintes élastiques non locales.

Les fonctions noyau non locales $\alpha_0(x, x', e_0 a)$ et $\alpha_1(x, x', e_1 a)$ satisfont aux conditions développées par Eringen (1983). La relation constitutive générale devient alors :

$$[1 - (e_1 a)^2 \nabla^2][1 - (e_0 a)^2 \nabla^2] \sigma_{ij} = C_{ijkl} [1 - (e_1 a)^2 \nabla^2] \varepsilon_{kl} - C_{ijkl} l^2 [1 - (e_0 a)^2 \nabla^2] \nabla^2 \varepsilon_{kl} \quad (IV.42)$$

∇^2 est l'opérateur laplacien.

Dans le travail actuel, nous supposons que le coefficient $e = e_0 = e_1$.

La relation constitutive totale de déformation de gradient non locale peut être exprimée comme suit :

$$[1 - \mu \nabla^2] \sigma_{ij} = C_{ijkl} [1 - \lambda \nabla^2] \varepsilon_{kl} \quad (\text{IV. 43})$$

Ou $\mu = (ea)^2$ et $\lambda = l^2$.

$$(1 - (e_0 a)^2 \nabla^2) \sigma_{ij} = C_{ijkl} (1 - l^2 \nabla^2) \varepsilon_{kl} \quad (\text{IV. 44})$$

Par conséquent, les relations constitutives peuvent être exprimées comme suit :

$$\sigma_{xx} - \mu \frac{\partial^2 \sigma_{xx}}{\partial x^2} = Q_{11} \left(\varepsilon_{xx} - \lambda \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial x^2} \right) \quad (\text{IV. 45})$$

$$\tau_{xz} - \mu \frac{\partial^2 \tau_{xz}}{\partial x^2} = Q_{55} \left(\gamma_{xz} - \lambda \frac{\partial^2 \gamma_{xz}}{\partial x^2} \right) \quad (\text{IV. 46})$$

Pour obtenir les équations du mouvement sous forme de déplacements, les sollicitations de contrainte présentées dans l'équation (IV.39) sont substituées dans l'équation (IV.32).

$$\begin{aligned} N_{xx} - \mu \frac{\partial^2 N_{xx}}{\partial x^2} &= \left(1 - \lambda \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \left[A_{11} \frac{\partial u_0}{\partial x} - B_{11} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + C_{11} \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} - \frac{\partial \varphi_0}{\partial x} \right) \right] \\ M_{xx} - \mu \frac{\partial^2 M_{xx}}{\partial x^2} &= \left(1 - \lambda^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \left[B_{11} \frac{\partial u_0}{\partial x} - D_{11} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + F_{11} \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} - \frac{\partial \varphi_0}{\partial x} \right) \right] \\ P_{xx} - \mu \frac{\partial^2 P_{xx}}{\partial x^2} &= \left(1 - \lambda \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \left[C_{11} \frac{\partial u_0}{\partial x} - F_{11} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + H_{11} \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} - \frac{\partial \varphi_0}{\partial x} \right) \right] \\ Q_{xz} - \mu \frac{\partial^2 Q_{xz}}{\partial x^2} &= \left(1 - \lambda \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \left[A_{55} \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} - \varphi_0 \right) \right] \end{aligned} \quad (\text{IV. 47})$$

Selon la théorie des gradients de déformation non locaux, les équations d'équilibre pour la nanopoutre FG-CNTRC peuvent être écrites comme suit

$$\begin{aligned} &\left(1 - \lambda \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \left(A_{11} \frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} - B_{11} \frac{\partial^3 w_0}{\partial x^3} + C_{11} \left(\frac{\partial^3 w_0}{\partial x^3} - \frac{\partial^2 \varphi_0}{\partial x^2} \right) \right) \\ &= \left(1 - \mu \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \left[I_0 \ddot{u}_0 - I_1 \frac{d\dot{w}_0}{dx} + I_3 \left(\frac{d\dot{w}_0}{dx} - \ddot{\varphi}_0 \right) \right] \\ &\left(1 - \lambda \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \left(C_{11} \frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} - F_{11} \frac{\partial^3 w_0}{\partial x^3} + H_{11} \left(\frac{\partial^3 w_0}{\partial x^3} - \frac{\partial^2 \varphi_0}{\partial x^2} \right) - A_{55} \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} - \varphi_0 \right) \right) \\ &= \left(1 - \mu \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \left[I_3 \ddot{u}_0 - I_4 \frac{d\dot{w}_0}{dx} + I_5 \left(\frac{d\dot{w}_0}{dx} - \ddot{\varphi}_0 \right) \right] \end{aligned} \quad (\text{IV. 48})$$

$$\begin{aligned}
& \left(1 - \lambda \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) \left(\begin{array}{c} C_{11} \frac{\partial^3 u_0}{\partial x^3} - F_{11} \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^4} + H_{11} \left(\frac{\partial^4 w_0}{\partial x^4} - \frac{\partial^3 \varphi_0}{\partial x^3} \right) \\ -B_{11} \frac{\partial^3 u_0}{\partial x^3} + D_{11} \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^4} - F_{11} \left(\frac{\partial^4 w_0}{\partial x^4} - \frac{\partial^3 \varphi_0}{\partial x^3} \right) - A_{55} \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} - \frac{\partial \varphi_0}{\partial x} \right) \end{array} \right) \\
& = \left(1 - \mu \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) \left[\begin{array}{c} -I_0 \ddot{w}_0 - I_1 \frac{d\dot{u}_0}{dx} + I_2 \frac{d^2 \dot{w}_0}{dx^2} + I_3 \frac{d\dot{u}_0}{dx} \\ + I_4 \left(\frac{d\dot{\varphi}_0}{dx} - 2 \frac{d^2 \dot{w}_0}{dx^2} \right) + I_5 \left(\frac{d^2 \dot{w}_0}{dx^2} - \frac{d\dot{\varphi}_0}{dx} \right) \end{array} \right]
\end{aligned} \tag{IV.49}$$

IV.6. Solutions exactes pour les nanopoutres FG-CNTRC

Les fonctions du champ des déplacements qui satisfont les conditions aux limites des poutres à plis croisés simplement-simplement sont développées sous forme de série de Fourier comme suit :

$$\begin{aligned}
u_0(x, t) &= \sum_{m=1}^{\infty} U_m e^{i\omega t} \cos(\alpha x) \\
w_0(x, t) &= \sum_{m=1}^{\infty} W_m e^{i\omega t} \sin(\alpha x) \\
\varphi_x(x, t) &= \sum_{m=1}^{\infty} X_m e^{i\omega t} \cos(\alpha x)
\end{aligned} \tag{IV.50}$$

Dans lesquelles $i = \sqrt{-1}$; U_{mn}, V_{mn} , et X_{mn} sont des paramètres arbitraires $\alpha = m\pi/L$. En substituant l'équation. (IV.50) a Eq. (IV.49)

$$\left((1 + \lambda \alpha^2) \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} - \omega^2 (1 + \mu \alpha^2) \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \right) \begin{pmatrix} U_n \\ \varphi_n \\ W_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{IV.51}$$

Où les éléments de la matrice de l'équation (IV.51) peuvent être écrits comme suit:

$$\begin{aligned}
s_{11} &= -A_{11} \alpha^2, s_{12} = C_{11} \alpha^2, s_{13} = B_{11} \alpha^3 - C_{11} \alpha^3 \\
s_{21} &= -C_{11} \alpha^2, s_{22} = H_{11} \alpha^2 + A_{55}, s_{23} = F_{11} \alpha^3 - H_{11} \alpha^3 - A_{55} \alpha \\
s_{31} &= C_{11} \alpha^2 - B_{11} \alpha^3, s_{32} = -H_{11} \alpha^3 + E_{11} \alpha^3 - A_{55} \alpha \\
s_{33} &= -E_{11} \alpha^4 + H_{11} \alpha^4 + D_{11} \alpha^4 - E_{11} \alpha^4 + A_{55} \alpha^2
\end{aligned} \tag{IV.52}$$

Et

$$\begin{aligned}
m_{11} &= -I_0, m_{12} = I_3, m_{13} = I_1 \alpha - I_3 \alpha, m_{21} = -I_3 \\
m_{22} &= I_5, m_{23} = -I_5 \alpha + I_4 \alpha, m_{31} = -I_0 \alpha + I_3 \alpha \\
m_{32} &= I_4 \alpha - I_5 \alpha, m_{33} = I_0 + I_2 \alpha^2 - 2I_4 \alpha^2 + I_5 \alpha^2
\end{aligned} \tag{IV.53}$$

IV.7. Résultats et Discussions

Les résultats des analyses numériques et des simulations seront présentés et discutés en détail. Les implications pratiques des découvertes seront abordées, en mettant en évidence les avantages potentiels pour les applications industrielles.

Dans la présente recherche, des résultats numériques sont présentés pour illustrer les contraintes et les déformations des poutres CNTRC en utilisant une nouvelle théorie de déformation de poutre à hyperbole d'ordre supérieur. De plus, les conditions aux limites considérées sont simplement supportées. Dans cette étude, le Poly méthacrylate de méthyle (PMMA) est utilisé comme matériau matriciel, tandis que les nanotubes de carbone monoparoi (SWCNTs) de type chaise (10,10) sont sélectionnés comme matériaux de renforcement.

IV.7.1. Résultats numériques

Les propriétés du matériau de la matrice sont $\nu^p = 0.3$, $\rho^p = 1190 \text{ Kg/m}^3$ et $E^p = 2.5 \text{ GPa}$, et pour le renforcement $\nu^{cnt} = 0.19$, $\rho^{cnt} = 1400 \text{ Kg/m}^3$, $E_{11}^{cnt} = 600 \text{ GPa}$, $E_{22}^{cnt} = 10 \text{ GPa}$ et $G_{12}^{cnt} = 17.2 \text{ GPa}$.

Pour l'analyse des vibrations, les résultats numériques sont présentés en termes des paramètres sans dimension (adimensionnelle) comme suit :

$$\bar{\omega} = \omega L \sqrt{\frac{I_{00}}{A_{110}}} \quad (\text{IV. 54})$$

Où A_{110} et I_{00} sont respectivement les valeurs de A_{11} et I_0 pour une poutre composée de matériaux de matrice pure.

En raison de la limitation existante des résultats de travaux similaires pour les nanopoutres multicouches en CNTRC, les processus de validation du modèle actuel pour son efficacité et sa précision sont divisés en deux étapes :

(1) une étude comparative pour valider l'exactitude du modèle de fonction en forme hyperbolique proposé.

(2) une étude paramétrique pour examiner les effets de plusieurs paramètres de manière indépendante.

Tableau IV. 1. Comparaison de la fréquence adimensionnelle de diverses distributions de nanotubes de carbone (CNT) à simple support ($L/h=15$, $V_{cnt}^* = 0.12$)

Theory	UD	FG-O	FG-X	FG-V
FSDT ^(a)	0.9976	0.7628	1.1485	0.8592
TSDT ^(a)	0.9745	0.7453	1.1152	0.8441
ESDT ^(a)	0.9756	0.7440	1.1180	0.8448
HSDT ^(a)	0.9745	0.7454	1.1151	0.8441
TrSDT ^(a)	<u>0.9749</u>	<u>0.7446</u>	<u>1.1163</u>	<u>0.8443</u>
Present	0.9749	0.7446	1.1162	0.8443

^(a) Wattanasakulpong and Ungbhakorn 2013

Afin d'examiner l'efficacité de la théorie proposée sur le comportement vibratoire des poutres FG, le Tableau (IV.1) présente une analyse comparative en tenant compte des motifs de nanotubes de carbone existants dans la littérature (UD, FG X, FG O, FG V).

Les résultats proposés sont comparés avec ceux obtenus par Wattanasakulpong et Ungbhakorn.(2013) voir Tableau (IV.1) en utilisant la théorie de la déformation par cisaillement du premier ordre (FSDT), la théorie de la déformation par cisaillement exponentiel (ESDT), la théorie de la déformation par cisaillement du troisième ordre (TSDT), la théorie de la déformation par cisaillement hyperbolique (HSDT) et la théorie de la déformation par cisaillement trigonométrique (TrSDT). Par conséquent, on peut observer que nos résultats sont absolument identiques à ceux générés en utilisant la TrSDT.

Tableau IV.2. Effet de la fraction volumique des nanotubes de carbone (CNT) et du rapport d'épaisseur sur les fréquences adimensionnelle.

V_{cnt}^*	L/h	UD	FG-X	FG-O	FG-V	FG(A)	FG(B)
12%	5	1.6497	1.7332	1.4270	1.5678	1.3429	1.7376
	10	1.2594	1.3916	1.0066	1.1272	0.9224	1.4092
	20	0.7809	0.9128	0.5827	0.6649	0.5242	0.9352
	30	0.5490	0.6545	0.4014	0.4606	0.3594	0.6737
17%	5	2.1023	2.2000	1.8189	1.9848	1.7073	2.2041
	10	1.5700		1.2447	1.3921	1.1357	1.7607
	20	0.9530	1.1171	0.7062	0.8057	0.6332	1.1452
	30	0.6656	0.7951	0.4839	0.5552	0.4320	0.8186
28%	5	2.3427	2.3858	2.1215	2.2456	2.0159	2.3806
	10	1.8279	1.9636	1.5036	1.6464	1.3815	1.9786
	20	1.1608	1.3363	0.8731	0.9875	0.7838	1.3648
	30	0.8227	0.9726	0.6020	0.6874	0.5371	0.9990

Le Tableau (IV.2) représente l'effet de la fraction volumique des CNTs et du rapport d'épaisseur sur les fréquences adimensionnelle. On constate que les fréquences adimensionnelle augmentent avec l'augmentation de la fraction volumique des CNTs et la diminution du rapport d'épaisseur, indépendamment du motif de distribution des CNTs.

Tableau IV.3. Effet des paramètres non locaux et de l'échelle de longueur sur les fréquences adimensionnelles ($L/h=10$).

μ	λ	UD	FG-X	FG-O	FG-V	FG(A)	FG(B)
0	0	1.2594	1.3916	1.0066	1.1272	0.9224	1.4092
	0.5	1.2901	1.4255	1.0311	1.1547	0.9449	1.4435
	1	1.3200	1.4587	1.0551	1.1816	0.9669	1.4771
	1.5	1.3494	1.4911	1.0785	1.2078	0.9884	1.5099
	2	1.3781	1.5228	1.1015	1.2335	1.0094	1.5420
0.5	0	1.2294	1.3585	0.9826	1.1004	0.9005	1.3756
	0.5	1.2594	1.3916	1.0066	1.1272	0.9224	1.4092
	1	1.2886	1.4239	1.0300	1.1534	0.9439	1.4419
	1.5	1.3172	1.4556	1.0529	1.1791	0.9649	1.4740
	2	1.3453	1.4865	1.0753	1.2041	0.9854	1.5053
1	0	1.2015	1.3276	0.9603	1.0754	0.8800	1.3444
	0.5	1.2307	1.3600	0.9837	1.1016	0.9015	1.3772
	1	1.2594	1.3916	1.0066	1.1272	0.9224	1.4092
	1.5	1.2873	1.4225	1.0290	1.1523	0.9429	1.4405
	2	1.3147	1.4528	1.0508	1.1768	0.9630	1.4711
1.5	0	1.1754	1.2988	0.9395	1.0521	0.8609	1.3152
	0.5	1.2040	1.3304	0.9624	1.0777	0.8819	1.3472
	1	1.2320	1.3614	0.9847	1.1027	0.9024	1.3786
	1.5	1.2594	1.3916	1.0066	1.1272	0.9224	1.4092
	2	1.2861	1.4212	1.0280	1.1512	0.9421	1.4391
2	0	1.1509	1.2717	0.9199	1.0301	0.8430	1.2878
	0.5	1.1789	1.3027	0.9423	1.0553	0.8635	1.3192
	1	1.2063	1.3330	0.9642	1.0798	0.8836	1.3499
	1.5	1.2331	1.3626	0.9856	1.1038	0.9032	1.3798
	2	1.2594	1.3916	1.0066	1.1272	0.9224	1.4092

Le Tableau (IV.3) représente l'effet des paramètres non locaux et d'échelle de longueur sur les fréquences adimensionnelle. On constate que les fréquences adimensionnelle augmentent avec l'augmentation de λ et la diminution de μ , indépendamment du motif de distribution des CNTs.

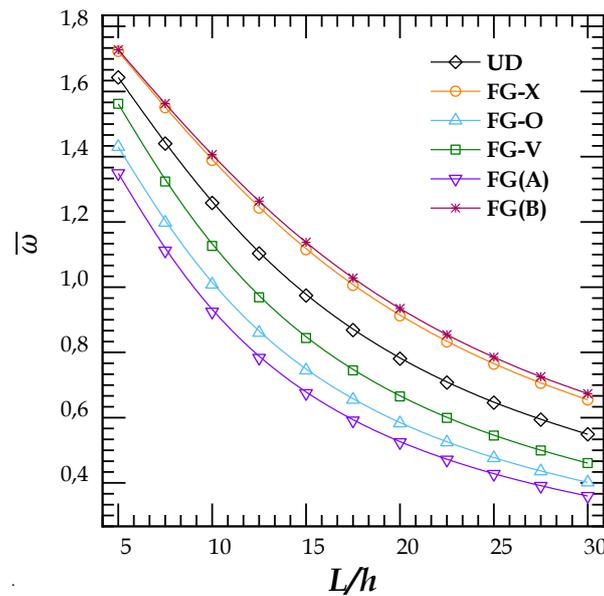


Figure IV.8. Effet du rapport d'épaisseur sur la fréquence adimensionnelle. ($V_{cnt}^* = 0.12, \mu = \lambda = 0$).

Dans la Figure IV.8 , représente Effet du rapport d'épaisseur sur la fréquence adimensionnelle On constate que l'augmentation du paramètre géométrique L/h diminue la fréquence adimensionnelle $\bar{\omega}$, quelque soit la distribution des nanotubes de carbone CNTs. Il est clair que le FG CNTRC(B) présente les valeurs les plus élevées de fréquence adimensionnelle $\bar{\omega}$, tandis que les valeurs les plus basses sont observées pour le CNTRC(A). Les fréquences adimensionnelles les plus élevées sont celles du FG CNTRC (B), tandis que les valeurs les plus basses sont celles du FG CNTRC (A).

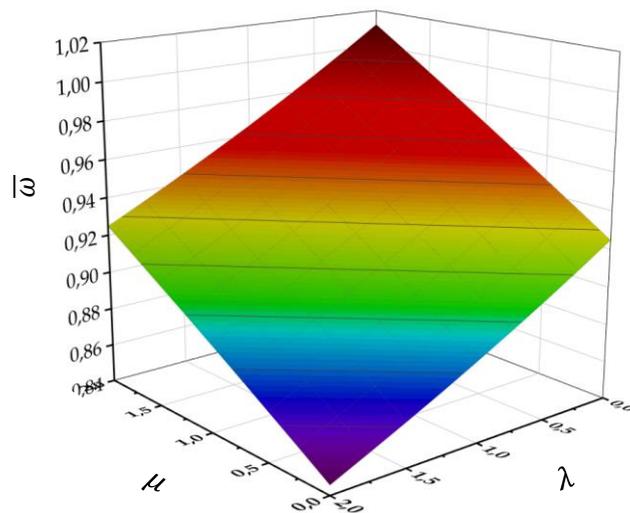


Figure. IV.9. Effet des paramètres non locaux et d'échelle de longueur sur la fréquence adimensionnelle de la poutre CNTRC(A)

Les Figures IV.9 et IV.10 représente l'Effet des paramètres non locaux et d'échelle de longueur sur la fréquence adimensionnelle de la poutre CNTRC(A) et la poutre CNTRC(B) nous exposons l'influence des paramètres non locaux et de l'échelle de longueur sur le FG CNTRC (A) et le FG CNTRC (B). Augmenter les paramètres non locaux conduit à une élévation des fréquences adimensionnelles, indépendamment du schéma de distribution. En revanche, l'augmentation des paramètres d'échelle de longueur induit une diminution des fréquences adimensionnelles, contrairement à l'effet des paramètres non locaux.

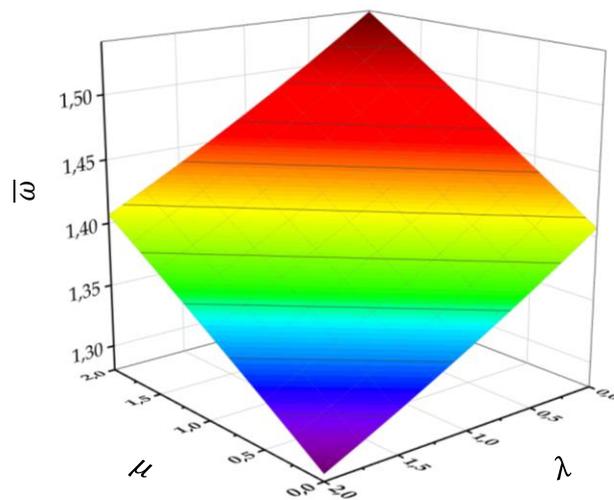


Figure IV.10. Effet des paramètres non locaux et de l'échelle de longueur sur la fréquence adimensionnelle de la poutre CNTRC(B).

Les Figures IV.11 et IV.12 représente l'Effet du nombre de modes sur la fréquence adimensionnelle de la poutre CNTRC(A) et la poutre CNTRC(B) , montrent l'effet du mode m et de la fraction volumique des CNTs sur la fréquence V_{cnt}^* adimensionnelle. Il est clair que l'augmentation des modes m entraîne également une augmentation de la fréquence adimensionnelle. D'autre part, le FG CNTRC (B) présente les valeurs de fréquence adimensionnelle les plus élevées.

Les fréquences les plus élevées sont pour la poutre qui a une fraction volumique $V_{cnt}^* = 0.28$, tandis que les valeurs les plus basses sont pour la fraction volumique $V_{cnt}^* = 0.12$

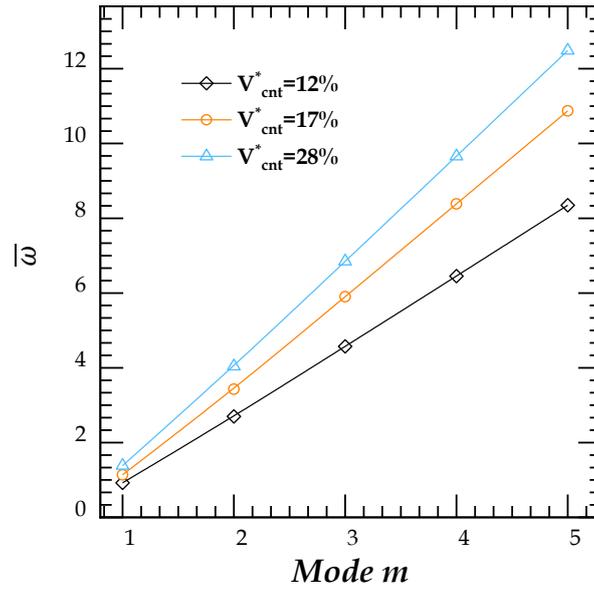


Figure. IV. 11. Effet du nombre de modes sur la fréquence adimensionnelle de la poutre CNTRC(A)

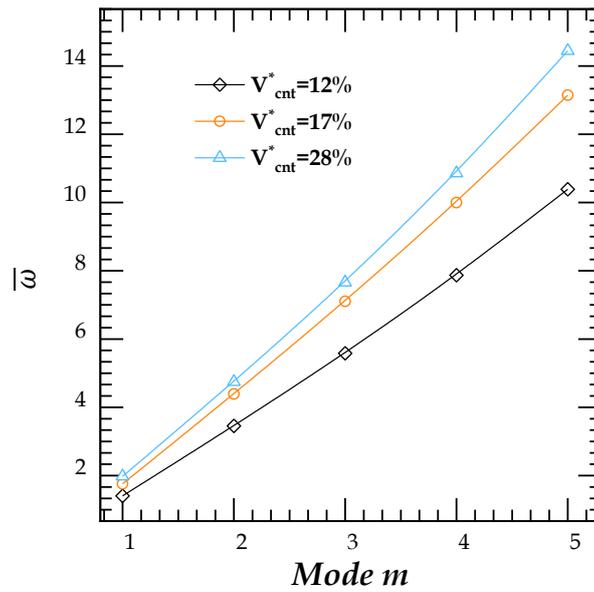


Figure.IV.12. Effet du nombre de modes sur la fréquence adimensionnelle de la poutre CNTRC(B)

IV.8. Conclusion :

En conclusion, plusieurs problèmes de vibrations libres de poutres CNTRC simplement supportées ont été étudiés. Ces poutres sont renforcées par différents motifs de distribution de CNT dans la matrice polymère. De plus, l'exactitude des modèles mathématiques a été vérifiée numériquement en les comparant à certains résultats disponibles.

De plus, la forme proposée de CNT FG-(B) présente la plus grande rigidité, par conséquent, les fréquences les plus élevées. En revanche, la plus faible rigidité et les fréquences les plus basses sont obtenues pour les poutres composites renforcées par des CNT FG-(A).

L'action des paramètres non locaux et de l'échelle de longueur sur les CNTRC FG (A) et CNTRC FG (B) respectivement, montre que l'augmentation du paramètre non local entraîne une augmentation des fréquences adimensionnelles $\bar{\omega}$ quel que soit le motif de distribution. Contrairement à l'effet du paramètre non local, l'augmentation du paramètre d'échelle de longueur entraîne une diminution des fréquences adimensionnelles $\bar{\omega}$.

L'effet de la forme de mode m , et de la fraction volumique des CNT V_{cnt}^* sur la fréquence adimensionnelle $\bar{\omega}$ est également observé. Il est clair que l'augmentation des modes m et n entraîne une augmentation de la fréquence adimensionnelle $\bar{\omega}$. Cependant, les fréquences les plus élevées sont obtenues pour la poutre ayant une fraction volumique $V_{cnt}^* = 0.28$, tandis que les valeurs les plus basses correspondent à une fraction volumique $V_{cnt}^* = 0.12$.

L'effet de la fraction volumique des CNT et du rapport d'épaisseur sur les fréquences adimensionnelles est également observé. On constate que les fréquences adimensionnelles augmentent avec l'augmentation de la fraction volumique des CNT et la diminution du rapport d'épaisseur, quelle que soit la répartition des CNT. L'effet des paramètres non locaux et de l'échelle de longueur sur les fréquences adimensionnelles est également observé, les fréquences adimensionnelles augmentant avec l'augmentation de λ et la diminution de μ , quelle que soit la répartition des CNT.

CHAPITRE V

ANALYSE VIBRATOIRE DES NANOPOUTRES

EN FG-CNTRC REPOSANTS SUR DES

FONDACTIONS ELASTIQUES

Chapitre V

ANALYSE VIBRATOIRE DES NANOPOUTRES EN FG-CNTRC REPOSANTS SUR DES FONDATIONS ELASTIQUES

V. 1.Introduction

Les nanotubes de carbone (CNT) sont des matériaux de renforcement pour les composites, grâce à leur résistance élevée, leur faible densité, et leur capacité à supporter des contraintes élastiques. Les composites renforcés par des nanotubes de carbone à gradation fonctionnelle (FG-CNTRC) sont obtenus en distribuant les CNT de manière graduelle dans le matériau.

L'effet des fondations élastiques sur le comportement des structures de poutres et de plaques est essentiel. Ces fondations offrent un support mécanique et peuvent être modélisées comme des ressorts indépendants (modèle de Winkler) ou avec des interactions entre les ressorts (modèle de Pasternak).

Des études récentes, comme celles de Liew et al. (2015), ont examiné les structures FG-CNTRC sous diverses charges mécaniques. Garg et al. (2021) ont étudié les propriétés des CNT à paroi simple. (Keleshteri et al,2019). ont exploré la flexion non linéaire des plaques FG-CNTRC sur des fondations élastiques, et Yas et Samadi (2012) ont analysé les vibrations libres des poutres Timoshenko FG-CNTRC. D'autres chercheurs, comme (Wang et al,2018), ont utilisé une approche semi-analytique pour étudier les vibrations libres des structures FG-CNTRC. Mohseni et Shakouri (2019) ont examiné le comportement des poutres FG-CNTRC à épaisseurs variables sur des fondations élastiques. Ces études montrent l'importance des fondations élastiques dans le comportement mécanique des structures en composites.

V.2.Formulation mathématique

Une théorie 2D de déformation parabolique en cisaillement pour les nanopoutres FG en tenant compte des déformations de cisaillement transversales est adoptée dans cette section. Le champ de déplacement de la théorie proposée est choisi en se basant sur les hypothèses suivantes :

- Le déplacement axial est composé de composantes d'extension, de flexion et de cisaillement;
- La composante de flexion du déplacement axial est similaire à celle donnée par la théorie classique des poutres d'Euler-Bernoulli ;

- La composante de cisaillement du déplacement axial entraîne une variation parabolique de la déformation de cisaillement et donc du contrainte de cisaillement à travers l'épaisseur de la poutre de telle manière que la contrainte de cisaillement s'annule sur les surfaces supérieure et inférieure.

En se basant sur les hypothèses énoncées ci-dessus, le champ de déplacement de la théorie actuelle peut être obtenu comme suit

$$\begin{aligned} u(x, z, t) &= u_0 - z \frac{\partial w_b}{\partial x} - f(z) \frac{\partial w_s}{\partial x} \\ w(x, z, t) &= w_b + w_s \end{aligned} \quad (\text{V.1})$$

Où u_0 est le déplacement axial ; w_b est w_s sont les déplacements transversaux d'un point situé sur la ligne médiane de la poutre.

Dans la présente étude, la déformation de cisaillement le long de la direction de l'épaisseur peut être exprimée par une fonction hyperbolique de la forme :

$$f(z) = \frac{z \left(\pi + 2 \cos \left(\frac{\pi z}{h} \right) \right)}{2 + \pi} \quad (\text{V.2})$$

Les composantes de déformation cinématique associées aux déplacements sont exprimées comme suit :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \varepsilon_x^0 + z k_x^b + f(z) k_x^s \\ \gamma_{xz} &= g(z) \gamma_{xz}^0 \end{aligned} \quad (\text{V.3})$$

Où

$$\varepsilon_x^0 = \frac{\partial u_0}{\partial x}, k_x^b = \frac{\partial^2 w_b}{\partial x^2}, k_x^s = \frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2}, \gamma_{xz}^0 = \frac{\partial w_s}{\partial x} \quad (\text{V.4a})$$

Et

$$g(z) = \frac{df(z)}{dz} \quad (\text{V.4b})$$

Pour obtenir les équations du mouvement, le principe de Hamilton est utilisé comme suit :

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta U - \delta K + \delta U_F) dt = 0 \quad (\text{V.5})$$

δU représente l'énergie totale de déformation, et δK est l'énergie cinétique, δU_F est la variation de l'énergie potentielle de la fondation élastique

Par conséquent, l'énergie virtuelle de déformation de la poutre peut être exprimée comme suit :

$$\delta U = \int_0^L \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_{xx} \delta \varepsilon_x + \tau_{xz} \delta \varepsilon_{xz}) dz dx \quad (V.6)$$

$$\delta U = \int_0^L \left[N \frac{d\delta u_0}{dx} - M_b \frac{d^2 \delta w_b}{dx^2} - M_s \frac{d^2 \delta w_s}{dx^2} + Q_x \frac{d\delta w_s}{dx} \right] dx \quad (V.7)$$

où N , M_b , M_s et Q sont les résultats de contrainte définis comme suit

Ils sont définis par

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} N \\ M_b \\ M_s \end{pmatrix} &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ z \\ f(z) \end{pmatrix} \sigma_x dz \\ Q_{xz} &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} g(z) \sigma_{xz} dz \end{aligned} \quad (V.8)$$

L'énergie cinétique δK peut être exprimée comme suit :

$$K = \int_0^L \rho(z) [\dot{u}_0 \delta \dot{u}_0 + \dot{w}_0 \delta \dot{w}_0] dx \quad (V.9)$$

La variation de l'énergie potentielle de la fondation élastique peut être exprimée comme :

$$\delta U_F = \int_0^L (K_w w - K_s \nabla^2 w) \delta w dx \quad (V.10)$$

où K_w et K_s sont respectivement la raideur de la fondation de Winkler et la raideur en cisaillement de la fondation élastique.

De plus, en substituant les équations de δU et K , δU_F dans l'équation (V.5), et en appliquant l'intégration par parties et en regroupant les coefficients de δu_0 , δw_b et δw_s , on obtient les équations du mouvement suivantes.

$$\begin{aligned} \delta u_0: \frac{dN}{dx} &= I_0 \ddot{u}_0 - I_1 \frac{d\ddot{w}_b}{dx} - J_1 \frac{d\ddot{w}_s}{dx} \\ \delta w_b: \frac{d^2 M_b}{dx^2} - k_w w + k_s \frac{d^2 w}{dx^2} &= I_0 (\ddot{w}_b + \ddot{w}_s) + I_1 \frac{d\ddot{u}_0}{dx} - I_2 \frac{d^2 \ddot{w}_b}{dx^2} - J_2 \frac{d^2 \ddot{w}_s}{dx^2} \\ \delta w_s: \frac{d^2 M_s}{dx^2} + \frac{dS_x}{dx} - k_w w + k_s \frac{d^2 w}{dx^2} &= I_0 (\ddot{w}_b + \ddot{w}_s) + J_1 \frac{d\ddot{u}_0}{dx} - J_2 \frac{d^2 \ddot{w}_b}{dx^2} - K_2 \frac{d^2 \ddot{w}_s}{dx^2} \end{aligned} \quad (V.11)$$

Comme on peut le constater, les équations (V.11) sont des fonctions des sollicitations de contrainte. Cependant, les contraintes normales et de cisaillement peuvent être exprimés en utilisant les relations constitutives comme suit:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & 0 \\ 0 & Q_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} \quad (\text{V.12})$$

Où σ_x et τ_{xz} sont respectivement les contraintes axiales et de cisaillements transversaux. Q_{ij} sont les coefficients de rigidité liés aux constantes d'ingénierie comme suit:

$$Q_{11}(z) = \frac{E_{11}}{1 - \nu^2}, Q_{55}(z) = G_{12}(z), E_{11} = \eta_1 V_{cnt} E_{11}^{cnt} + V_p E_p \quad (\text{IV.13})$$

En substituant les équations (V.13) dans l'équation (V.12), et en utilisant l'équation (V.8), on obtient les sollicitations de contrainte :

$$\begin{Bmatrix} N_{xx} \\ M_{xx} \\ P_{xx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & B_{11} & B_{11}^s \\ B_{11} & D_{11} & D_{11}^s \\ C_{11} & D_{11}^s & H_{11}^s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ k_x^b \\ k_x^s \end{Bmatrix} \quad (\text{V.14})$$

$$S_{xz} = A_{55}^s \gamma_{xz}$$

Où les rigidités de la section transversale sont exprimées comme suit :

$$\{A_{11}, B_{11}, D_{11}, B_{11}^s, D_{11}^s, H_{11}^s\} = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{11} \{1, z, z^2, f(z), zf(z), f(z)^2\} dz \quad (\text{V.15})$$

$$A_{55}^s = - \int_{-h/2}^{h/2} Q_{55} g(z)^2 dz \quad (\text{V.16})$$

V.3. Théorie des déformations non locales à gradient

Élasticité du gradient de déformation non local (ou théorie du gradient de déformation non local d'ordre élevé) (Lim et al.2015), donne les champs de contraintes et de déformations non locaux :

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{(0)} - \frac{d\sigma_{ij}^{(1)}}{dx} \quad (\text{V.17})$$

Où $\sigma_{ij}^{(0)}$ et $\sigma_{ij}^{(1)}$ Les contraintes classiques correspondant à la déformation ε_{kl} et les contraintes $\sigma_{ij}^{(1)}$ correspondant au gradient de déformation $\varepsilon_{kl,x}$ peuvent être exprimées comme suit :

$$\sigma_{ij}^{(0)} = \int_0^L C_{ijkl} \alpha_0(x, x', e_0 a) \varepsilon_{kl,x}(x') dx'$$

$$\sigma_{ij}^{(1)} = l^2 \int_0^L C_{ijkl} \alpha_1(x, x', e_1 a) \varepsilon_{kl,x}(x') dx' \quad (\text{V.18})$$

C_{ijkl} Désigne une constante élastique, et l est le paramètre d'échelle de longueur du matériau introduit pour prendre en compte l'importance du champ de contraintes dû aux gradients de déformation. De plus, e_0a et e_1a sont les paramètres non locaux introduits pour prendre en compte l'importance du champ de contraintes élastiques non locales.

Les fonctions noyau non locales $\alpha_0(x, x', e_0a)$ et $\alpha_0(x, x', e_1a)$ satisfont aux conditions développées par (Eringen, 1983). La relation constitutive générale devient alors :

$$[1 - (e_1a)^2 \nabla^2][1 - (e_0a)^2 \nabla^2] \sigma_{ij} = C_{ijkl} [1 - (e_1a)^2 \nabla^2] \varepsilon_{kl} - C_{ijkl} l^2 [1 - (e_0a)^2 \nabla^2] \nabla^2 \varepsilon_{kl} \quad (\text{V.19})$$

∇^2 est l'opérateur laplacien.

Dans le travail actuel, nous supposons que le coefficient $e = e_0 = e_1$.

La relation constitutive totale de déformation de gradient non locale peut être exprimée comme suit :

$$[1 - \mu \nabla^2] \sigma_{ij} = C_{ijkl} [1 - \lambda \nabla^2] \varepsilon_{kl} \quad (\text{V.20})$$

Où $\mu = (ea)^2$ et $\lambda = l^2$.

$$(1 - (e_0a)^2 \nabla^2) \sigma_{ij} = C_{ijkl} (1 - l^2 \nabla^2) \varepsilon_{kl} \quad (\text{V.21})$$

Par conséquent, les relations constitutives peuvent être exprimées comme suit :

$$\sigma_x - \mu \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} = Q_{11} \left(\varepsilon_x - \lambda \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial x^2} \right) \quad (\text{V.22a})$$

$$\tau_{xz} - \mu \frac{\partial^2 \tau_{xz}}{\partial x^2} = Q_{55} \left(\gamma_{xz} - \lambda \frac{\partial^2 \gamma_{xz}}{\partial x^2} \right) \quad (\text{V.22b})$$

L'équation (V.23) peut être simplifiée pour certains cas particuliers :

(a) (Théorie du continuum non local) : L'équation constitutive de la théorie du continuum non local peut être facilement obtenue en fixant $l = 0$ dans l'équation (V.22), ce qui donne :

$$\sigma_x - \mu \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} = Q_{11} \varepsilon_x \quad (\text{V.23a})$$

$$\tau_{xz} - \mu \frac{\partial^2 \tau_{xz}}{\partial x^2} = Q_{55} \gamma_{xz} \quad (\text{V.23b})$$

Ce qui est identique au modèle d'Eringen (1983).

(b) (Théorie du gradient de contrainte) : L'équation constitutive de la théorie du gradient de contrainte peut être obtenue facilement en fixant $ea = 0$ dans l'équation (V.22), ce qui donne :

$$\sigma_x = Q_{11} \left(\varepsilon_x - \lambda \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial x^2} \right) \quad (\text{V. 24a})$$

$$\tau_{xz} = Q_{55} \left(\gamma_{xz} - \lambda \frac{\partial^2 \gamma_{xz}}{\partial x^2} \right) \quad (\text{V. 24b})$$

Ce qui est identique au modèle d'Aifantis (1992). En intégrant l'Équation (V.8) sur la section transversale du nano-poutre, les relations non locales suivantes pour le modèle de nano-poutre FG sont déduites :

$$\begin{aligned} N - \mu \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} &= \left(1 - \lambda \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \left[A_{11} \frac{\partial u_0}{\partial x} - B_{11} \frac{\partial^2 w_b}{\partial x^2} - B_{11}^s \frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2} \right] \\ M_b - \mu \frac{\partial^2 M_b}{\partial x^2} &= \left(1 - \lambda \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \left[B_{11} \frac{\partial u_0}{\partial x} - B_{11}^s \frac{\partial^2 w_b}{\partial x^2} - D_{11}^s \frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2} \right] \\ M_s - \mu \frac{\partial^2 M_s}{\partial x^2} &= \left(1 - \lambda \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \left[B_{11}^s \frac{\partial u_0}{\partial x} - D_{11}^s \frac{\partial^2 w_b}{\partial x^2} - H_{11}^s \frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2} \right] \\ S_{xz} - \mu \frac{\partial^2 S_{xz}}{\partial x^2} &= \left(1 - \lambda \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \left[A_{55}^s \frac{\partial w_s}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad (\text{V. 25})$$

Selon la théorie des gradients de déformation non locaux, les équations d'équilibre pour la nanopoutre FG-CNTRC peuvent être écrites comme suit

$$\begin{aligned} \left(1 - \lambda \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \left(A_{11} \frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} - B_{11} \frac{\partial^3 w_b}{\partial x^3} - B_{11}^s \frac{\partial^3 w_s}{\partial x^3} \right) &= \left(1 - \mu \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \left(I_0 \ddot{u}_0 - I_1 \frac{d\ddot{w}_b}{dx} - J_1 \frac{d\ddot{w}_s}{dx} \right) \\ \left(1 - \lambda \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \left(B_{11} \frac{\partial^3 u_0}{\partial x^3} - D_{11} \frac{\partial^4 w_b}{\partial x^4} - D_{11}^s \frac{\partial^4 w_s}{\partial x^4} \right) &+ \left(1 - \mu \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \left(K_w (w_b + w_s) - K_s \frac{d^4 (w_b + w_s)}{dx^4} \right) \\ &= \left(1 - \mu \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \left(I_0 (\ddot{w}_b + \ddot{w}_s) + I_1 \frac{d\ddot{u}_0}{dx} - I_2 \frac{d^2 \ddot{w}_b}{dx^2} - J_2 \frac{d^2 \ddot{w}_s}{dx^2} \right) \\ \left(1 - \lambda \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \left(B_{11}^s \frac{\partial^3 u_0}{\partial x^3} - D_{11}^s \frac{\partial^4 w_b}{\partial x^4} - H_{11}^s \frac{\partial^4 w_s}{\partial x^4} + A_{55}^s \frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2} \right) & \\ + \left(1 - \mu \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \left(K_w (w_b + w_s) - K_s \frac{d^4 (w_b + w_s)}{dx^4} \right) & \\ = \left(1 - \mu \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \left(I_0 (\ddot{w}_b + \ddot{w}_s) + J_1 \frac{d\ddot{u}_0}{dx} - J_2 \frac{d^2 \ddot{w}_b}{dx^2} - K_2 \frac{d^2 \ddot{w}_s}{dx^2} \right) & \end{aligned} \quad (\text{V. 26})$$

V.4.Solutions exactes pour les nanopoutres FG-CNTRC

Les équations de mouvement ci-dessus sont résolues analytiquement pour le problème de flambement. La technique de Navier est utilisée pour obtenir des solutions analytiques pour un nano-poutre FG simplement appuyé. La solution est supposée être de la forme suivante :

$$\begin{aligned}
u_0 &= \sum_{m=1}^{\infty} U_m e^{i\omega t} \cos(\alpha x) \\
w_b &= \sum_{m=1}^{\infty} W_{bm} e^{i\omega t} \sin(\alpha x) \\
w_s &= \sum_{m=1}^{\infty} W_{sm} e^{i\omega t} \sin(\alpha x)
\end{aligned} \tag{V.27}$$

Dans lesquelles $i = \sqrt{-1}$; U_m, W_{bm} , et W_{sm} sont des paramètres arbitraires $\alpha = m\pi/L$ et. En substituant l'équation. (V.27) a Eq. (V.26) les solutions analytiques peuvent être obtenues en

$$\left((1 + \lambda\alpha^2) \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{12} & s_{22} & s_{23} \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} \end{bmatrix} - \omega^2 (1 + \mu\alpha^2) \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{12} & m_{22} & m_{23} \\ m_{13} & m_{23} & m_{33} \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} U_n \\ \varphi_n \\ W_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{V.28}$$

Où les éléments de la matrice de l'équation (V.28) peuvent être écrits comme suit:

$$\begin{aligned}
s_{11} &= -A_{11}\alpha^2, s_{12} = B_{11}\alpha^3, s_{13} = B_{11}^s\alpha^3 \\
s_{22} &= -D_{11}\alpha^4 + c(k_w + k_s\alpha^2), s_{23} = -D_{11}^s\alpha^4 + c(k_w + k_s\alpha^2) \\
s_{33} &= \alpha^2(A_{55}^s + \alpha^2 H_{11}^s) + c(k_w + k_s\alpha^2)
\end{aligned} \tag{V.29}$$

Où $c = (1 + \mu\alpha^2)/(1 + \lambda\alpha^2)$.

Et

$$\begin{aligned}
m_{11} &= -I_0, m_{12} = I_1\alpha, m_{13} = J_1\alpha, \\
m_{22} &= -I_0 - I_2\alpha^2, m_{23} = -I_0 - J_2\alpha^2, \\
m_{33} &= -I_0 - K_2\alpha^2
\end{aligned} \tag{V.30}$$

$I_0, I_1, I_2, J_1, J_2, K_2$ sont les inerties de masse définies comme suit :

$$\{I_0, I_1, I_2, J_1, J_2, K_2\} = \int_{-h/2}^{h/2} \rho(z) \{1, z, z^2, f(z), zf(z), f(z)^2\} dz \tag{V.31}$$

V.5. Résultats et Discussions

Les résultats des analyses numériques et des simulations seront présentés et discutés en détail. Les implications pratiques des découvertes seront abordées, en mettant en évidence les avantages potentiels pour les applications industrielles.

Dans la présente recherche, des résultats numériques sont présentés pour illustrer les contraintes et les déformations des poutres CNTRC en utilisant une nouvelle théorie de déformation de poutre à hyperbole d'ordre supérieur. De plus, les conditions aux limites

considérées sont simplement supportées. Dans cette étude, le Poly méthacrylate de méthyle (PMMA) est utilisé comme matériau matriciel, tandis que les nanotubes de carbone monoparoi (SWCNTs) de type chaise (10,10) sont sélectionnés comme matériaux de renforcement.

Les propriétés du matériau de la matrice sont $\nu^p = 0.3$, $\rho^p = 1190 \text{ Kg/m}^3$ et $E^p = 2.5 \text{ GPa}$, et pour le renforcement $\nu^{cnt} = 0.19$, $\rho^{cnt} = 1400 \text{ Kg/m}^3$, $E_{11}^{cnt} = 600 \text{ GPa}$, $E_{22}^{cnt} = 10 \text{ GPa}$ et

$$G_{12}^{cnt} = 17.2 \text{ GPa}.$$

Pour l'analyse des vibrations, les résultats numériques sont présentés en termes des paramètres sans dimension (adimensionnelle) comme suit :

$$\bar{\omega} = \omega L \sqrt{\frac{I_{00}}{A_{110}}}, \quad K_w = \frac{k_w L^2}{D_p}, \quad K_s = \frac{k_s L^2}{D_p}, \quad D_p = \frac{E^p h^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (\text{V.32})$$

Où A_{110} et I_{00} sont respectivement les valeurs de A_{11} et I_0 pour une poutre composée de matériaux de matrice pure.

En raison de la limitation existante des résultats de travaux similaires pour les nanopoutres multicouches en CNTRC, les processus de validation du modèle actuel pour son efficacité et sa précision sont divisés en deux étapes :

(1) une étude comparative pour valider l'exactitude du modèle de fonction en forme hyperbolique proposé.

(2) une étude paramétrique pour examiner les effets de plusieurs paramètres de manière indépendante.

Tableau V. 1. Comparaison de la fréquence adimensionnelle de diverses distributions de (CNT) à simple support avec et sans fondation élastique ($L/h=15$, $V_{cnt}^* = 0.12$)(a)(Wattanasakulpong and Ungbhakorn 2013)

Theory	$k_w = 0, k_s = 0$				$k_w = 0,1, k_s = 0,02$			
	UD	FG-O	FG-X	FG-V	UD	FG-O	FG-X	FG-V
FSDT [14]	0.9976	0.7628	1.1485	0.8592	1.1339	0.9339	1.2688	1.0142
TSDT [14]	0.9745	0.7453	1.1152	0.8441	1.1137	0.9198	1.2387	1.0014
ESDT [14]	0.9756	0.7440	1.1180	0.8448	1.1147	0.9187	1.2413	1.0020
HSDT [14]	0.9745	0.7454	1.1151	0.8441	1.1137	0.9198	1.2387	1.0014
TrSDT [14]	0.9749	0.7446	1.1163	0.8443	1.1140	0.9192	1.2397	1.0016
Present	0.9756	0.7442	1.1178	0.8448	1.1146	0.9187	1.2410	1.0019

Afin d'examiner l'efficacité de la théorie proposée sur le comportement vibratoire des poutres FG, le Tableau (V.1) présente une analyse comparative en tenant compte des motifs de nanotubes de carbone existants dans la littérature (UD, FG X, FG O, FG V).

Les résultats proposés sont comparés avec ceux obtenus par (Wattanasakulpong et Ungbhakorn.2013) en utilisant la théorie de la déformation par cisaillement du premier ordre (FSDT), la théorie de la déformation par cisaillement exponentiel (ESDT), la théorie de la déformation par cisaillement du troisième ordre (TSDT), la théorie de la déformation par cisaillement hyperbolique (HSDT) et la théorie de la déformation par cisaillement trigonométrique (TrSDT).

Nous pouvons constater que les poutres reposant sur une fondation élastique ont des fréquences plus élevées que celles sans fondation élastique pour chaque rapport d'épaisseur. De plus, une augmentation du nombre de CNT conduit à une plus grande résistance des poutres CNTRC.

Par conséquent, on peut observer que nos résultats sont absolument identiques à ceux générés en utilisant la TrSDT.

Le Tableau (V.2) représente l'effet de la fraction volumique des CNTs et du rapport d'épaisseur sur les fréquences adimensionnelle. On constate que les fréquences adimensionnelles augmentent avec l'augmentation de la fraction volumique des CNTs et la diminution du rapport d'épaisseur, indépendamment du motif de distribution des CNTs.

Tableau V.2. Effet de la fraction volumique des nanotubes de carbone (CNT) et du rapport d'épaisseur sur les fréquences adimensionnelle. ($k_w = 0, k_s = 0$)

V_{cnt}^*	L/h	UD	FG-X	FG-O	FG-V	FG-(A)	FG-(B)
12%	5	1.6579	1.7449	1.4254	1.5678	1.3384	1.7493
	10	1.2612	1.3951	1.0054	1.1272	0.9206	1.4127
	20	0.7812	0.9135	0.5824	0.6649	0.5239	0.9361
	30	0.5491	0.6548	0.4013	0.4606	0.3593	0.6739
17%	5	2.1114	2.2122	1.8173	1.9848	1.7025	2.2157
	10	1.5720	1.7416	1.2437	1.3921	1.1340	1.7637
	20	0.9534	1.1178	0.7059	0.8057	0.6329	1.1458
	30	0.6657	0.7953	0.4839	0.5552	0.4319	0.8188
28%	5	2.3562	2.3995	2.1233	2.2456	2.0132	2.3917
	10	1.8309	1.9658	1.5033	1.6464	1.3802	1.9793
	20	1.1613	1.3365	0.8730	0.9875	0.7836	1.3645
	30	0.8229	0.9726	0.6020	0.6874	0.5371	0.9988

Le Tableau (V.3) représente l'effet des paramètres non locaux et d'échelle de longueur sur les fréquences adimensionnelle avec et sans fondation élastique. On constate que les fréquences adimensionnelle augmentent avec l'augmentation de λ et la diminution de μ , indépendamment du motif de distribution des CNTs. de plus, nous pouvons voir que les poutres reposant sur une fondation élastique ont des fréquences plus élevées que celles sans fondation élastique pour chaque paramètre non local et d'échelle de longueur.

Tableau V.3. Effet des paramètres non locaux et de l'échelle de longueur sur les fréquences adimensionnelle ($L/h=15$).

k_w	k_s	μ	λ	$V_{cnt}^* = 0.12$					
				UD	FG-X	FG-O	FG-V	FG-(A)	FG-(B)
0	0	0	0	0.9755	1.1178	0.7441	0.8447	1.0075	1.6359
			2	1.0174	1.1658	0.7760	0.8810	1.0508	1.7061
			4	1.0576	1.2119	0.8067	0.9158	1.0924	1.7736
		2	0	0.9354	1.0717	0.7134	0.8099	0.9661	1.5685
			2	0.9755	1.1178	0.7441	0.8447	1.0075	1.6359
			4	1.0141	1.1620	0.7735	0.8781	1.0474	1.7006
		4	0	0.8998	1.0310	0.6863	0.7791	0.9293	1.5089
			2	0.9384	1.0752	0.7158	0.8126	0.9692	1.5737
			4	0.9755	1.1178	0.7441	0.8447	1.0075	1.6359
0.1	0	2	0	0.9862	1.1164	0.7789	0.8681	1.0103	1.5962
			2	1.0286	1.1643	0.8123	0.9054	1.0536	1.6647
			4	1.0692	1.2104	0.8445	0.9412	1.0953	1.7306
0	0.02	2	0	1.0334	1.1583	0.8377	0.9213	1.0515	1.6227
			2	1.0777	1.2080	0.8737	0.9608	1.0967	1.6923
			4	1.1203	1.2558	0.9083	0.9988	1.1401	1.7593
0.1	0.02	2	0	1.0796	1.1998	0.8941	0.9728	1.0923	1.6494
			2	1.1259	1.2513	0.9325	1.0146	1.1392	1.7202
			4	1.1704	1.3008	0.9694	1.0547	1.1843	1.7883

Les influences du paramètre non local et de l'échelle de longueur sur les fréquences fondamentales adimensionnelles de la poutre en X sont examinées dans la Figure. V.1 et la Figure V.2 . ($k_w = 0,1, k_s = 0,02$).

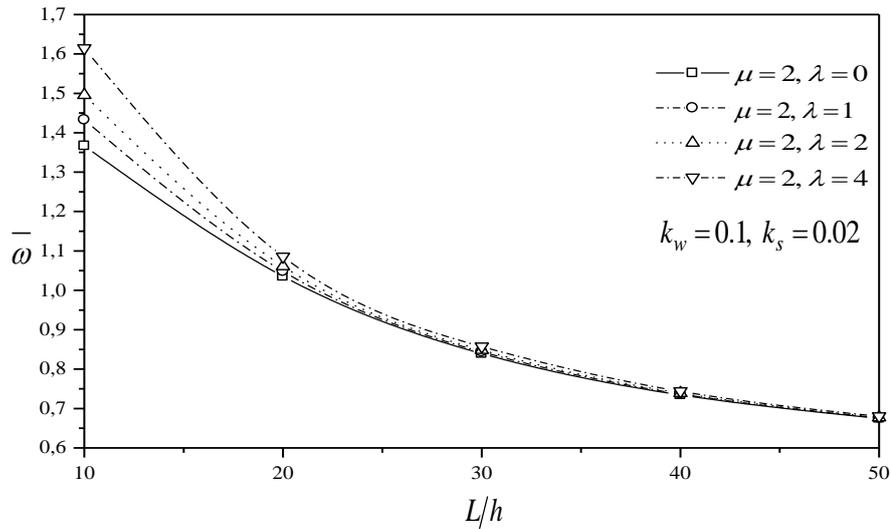


Figure V.1 Effet du paramètre non local et de l'échelle de longueur sur les fréquences fondamentales adimensionnelles de la poutre en X sur une fondation élastique ($k_w = 0,1, k_s = 0,02, \mu = 2$).

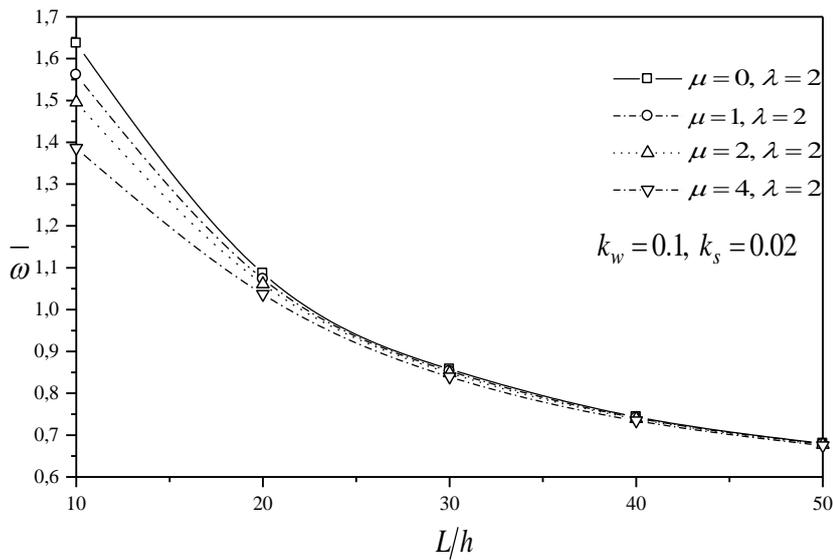


Figure. V.2. Effet du paramètre non local et de l'échelle de longueur sur les fréquences fondamentales adimensionnelles de la poutre en X sur une fondation élastique ($k_w = 0,1, k_s = 0,02, \lambda = 2$).

Les poutres avec ($\mu=2, \lambda=4$) ont des fréquences plus élevées, et l'augmentation des rapports d'épaisseur entraîne une diminution des fréquences, en particulier dans la plage de $L/h = 10-50$.

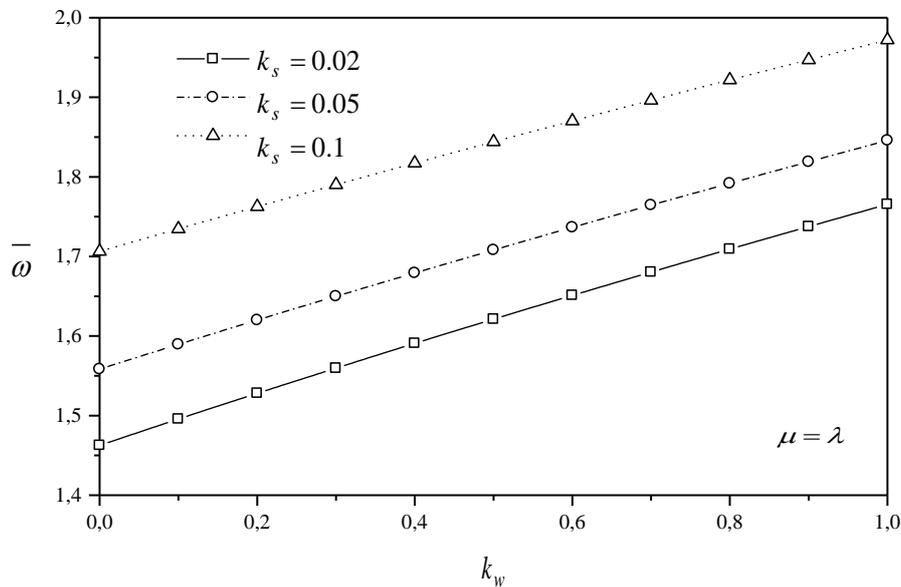


Figure V.3. Fréquences fondamentales adimensionnelles de la poutre en X sur une fondation élastique avec différents facteurs de constante de ressort. ($L/h=15$, $V_{cnt}^* = 0.12$, $\mu = \lambda$).

De plus, les effets des facteurs de constante de ressort sur les fréquences sont illustrés dans la Figure V.3, On observe que les fréquences augmentent linéairement à mesure que les facteurs de constante de ressort augmentent.

V.6. Conclusion :

La présente section traite du problème de l' vibration libre de poutres CNTRC simplement appuyées renforcées par différents motifs de distribution des nanotubes de carbone (CNT) dans la matrice polymère a la présence de la fondation élastique. La forme proposée de FG-(B) pour les CNT a la rigidité la plus élevée, et donc les fréquences les plus élevées. Tandis que la rigidité et les fréquences les plus basses sont pour les poutres composites renforcées par les FG-(A).

L'effet du paramètre non local et du paramètre d'échelle de longueur sur les FG-CNTRC (A) et FG-CNTRC (B) montre que l'augmentation du paramètre non local conduit à une augmentation des fréquences sans dimension, quel que soit le motif de distribution. Contrairement à l'effet du paramètre non local, l'augmentation du paramètre d'échelle de longueur conduit à une diminution des fréquences adimensionnelles $\bar{\omega}$.

L'effet du paramètre non local et de l'échelle de longueur sur les fréquences sans dimension montre que les fréquences augmentent avec l'augmentation de λ et la diminution de μ , quel que soit le motif de distribution des CNT.

L'augmentation des facteurs de constante de ressort de la fondation élastique entraîne une augmentation des fréquences lorsque les ressorts deviennent plus rigides. Pour ce qui est de l'effet du rapport d'épaisseur, il est révélé que les fréquences des poutres CNTRC diminuent à mesure que le rapport d'épaisseur augmente. De plus, la poutre FG-(B) a également la fréquence naturelle la plus élevée, suivie respectivement par les poutres X-, FG-(B)-, UD-, V-, et O.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette thèse a abordé les mécanismes complexes régissant le comportement mécanique des structures en matériaux avancés. En particulier, elle a exploré les interactions entre la flexion, le flambement et les vibrations libres dans des matériaux à gradient de propriétés (FGM) et des composites renforcés par des nanotubes de carbone (CNT).

Les résultats de cette recherche ont montré que les propriétés non locales et d'ordre supérieur des FGM et des CNT ont un impact significatif sur leur comportement mécanique. Par exemple, les FGM ont été montrés pour présenter une résistance au flambement accrue par rapport aux matériaux homogènes. De plus, les CNT ont été montrés pour améliorer les propriétés de flexion et de vibration des composites.

Cette recherche a contribué à l'avancement des connaissances dans le domaine de l'ingénierie des matériaux et des structures. Elle a permis de développer une meilleure compréhension des mécanismes qui régissent le comportement mécanique des structures en matériaux avancés. Cette compréhension peut être utilisée pour améliorer la conception et l'analyse de ces structures.

Voici quelques-unes des conclusions spécifiques de cette thèse :

Les FGM présentent une résistance au flambement accrue par rapport aux matériaux homogènes. Cette résistance accrue est due à la distribution non uniforme des propriétés dans les FGM.

Les CNT peuvent améliorer les propriétés de flexion et de vibration des composites. Les CNT contribuent à renforcer la structure et à réduire la masse.

Les interactions entre la flexion, le flambement et les vibrations libres sont complexes et dépendent des propriétés non locales et d'ordre supérieur des matériaux.

Cette recherche ouvre de nouvelles perspectives pour le développement de structures en matériaux avancés. Les FGM et les CNT peuvent être utilisés pour créer des structures plus

légères, plus résistantes et plus résilientes. Ces structures ont le potentiel de révolutionner les domaines de l'aérospatiale, de l'automobile et de la construction.

Voici quelques recommandations pour des travaux futurs dans ce domaine :

Il est nécessaire de développer des méthodes de conception et d'analyse des structures en matériaux avancés qui prennent en compte les effets des propriétés non locales et d'ordre supérieur.

Il est important d'étudier les effets des FGM et des CNT sur le comportement mécanique des structures dans des conditions de chargement complexes, telles que la fatigue et la corrosion.

Il est nécessaire de développer des méthodes de fabrication à grande échelle des FGM et des CNT pour rendre ces matériaux plus accessibles.

Cette recherche a posé les bases pour des travaux futurs qui contribueront à développer des structures en matériaux avancés plus performantes et plus durables, ce chapitre résumera les conclusions majeures de la thèse, soulignant les contributions à la compréhension du comportement mécanique des structures en matériaux à gradient de propriétés et en matériaux composites renforcés par des nanotubes de carbone. Des pistes pour de futures recherches seront également proposées

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Abrahamson, J., Wiles, P. G., & Rhoades, B. L. (1999). Microstructure analysis of carbon fibers produced via carbon arc discharge. *Carbon*, 37(11), 1873–1874.
2. Aboudi J, Pindera M-J, Arnold SM (1999) Higherorder theory for functionally graded materials. *Compos B: Eng* 30B:777–832
3. Aifantis, E. C. (1992), "On the role of gradients in the localization of deformation and fracture", *International Journal of Engineering Science.*, 30(10), 1279-1299. [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(92\)90141-3](https://doi.org/10.1016/0020-7225(92)90141-3)
4. Akavci, S. S. (2007). Analytical modeling of buckling and vibration behavior of laminated composite beams on an elastic foundation. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 26(18), 1907–1919.
5. Alexiou, C., Arnold, W., Hulin, P., Klein, R., Schmidt, A., Bergemann, C., & Parak, F. G. (2001). Magneto hydrodynamic properties of ferrofluids under external fields. *Magneto hydrodynamics*, 37, 318–322.
6. Aliev, A. E., Oh, J., Kozlov, M. E., Kuznetsov, A. A., Fang, S., Fonseca, A. F., ... & Baughman, R. H. (2009). Carbon nanotube aerogel muscles: High-strain, super-elastic artificial muscles. *Science*, 323(5914), 1575–1578.
7. Amans, D., Chenus, A.-C., Ledoux, G., Dujardin, C., Reynaud, C., Sublemontier, O., ... & Guillois, O. (2009). Structural and mechanical characterization of diamond nanoparticles using advanced electron microscopy techniques. *Diamond and Related Materials*, 18, 177–180.
8. Ambartsumyan, S. A. (1958). On the theory of beam bending under various loading conditions. *Proceedings of the Soviet Academy of Sciences*, 5, 69–77.
9. Andrews, R., Jacques, D., Rao, A. M., Rantell, T., Derbyshire, F., Chen, Y., ... & Burdick, J. (1999). Fabrication and characterization of carbon nanotube composite fibers for advanced applications. *Applied Physics Letters*, 75(9), 1329–1331.
10. Anh, N. N., Chuc, N. V., Thang, B. H., Nhat, P. V., Hao, N., Phuong, D. D., ... & Trinh, P. V. (2020). Addressing global challenges: A comprehensive overview. *Global Challenges*, 2000010.
11. Artioli, G., Angelini, I., & Polla, A. (2008). Thermodynamic analysis of phase transitions in complex materials. *Phase Transitions*, 81(3), 233–252.
12. Badrossamay, M. R., McIlwee, H. A., Goss, J. A., & Parker, K. K. (2010). Control of cell morphology and alignment by micropatterned biomaterial substrates. *Nano Letters*, 10(6), 2257–2261.
13. Baig, N., Sajid, M., & Saleh, T. A. (2019). Trends in analytical chemistry: A comprehensive review. *Trends in Analytical Chemistry*, 111, 47–61.
14. Balandin, A. A., Ghosh, S., Bao, W., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Miao, F., & Lau, C. N. (2008). Nanoscale thermal transport in graphene nanoribbons. *Nano Letters*, 8(3), 902–907.
15. Bandaru, P. R. (2007). Electrical transport phenomena in carbon nanotube structures: Fundamentals and applications. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 7(4-5), 1239–1267.

16. Barner, D. J., & Freestone, I. C. (2004). Investigating the origins of color in the Lycurgus Benefits, Risks, Ethical, Legal, and Social Aspects of Nanotechnology. Nanoforum.org, European Nanotechnology Gateway. Retrieved from <https://www.nanowerk.com/nanotechnology/reports/reportpdf/report3>.
17. Bayer Research: www.research.bayer.com
18. Bergeret, C., Cousseau, J., Fernandez, V., Mevellec, J.-Y., & Lefrant, S. (2008). Spectroscopic identification of carbon nanotubes' loss of metallic character induced by covalent functionalization using nitric acid purification. *The Journal of Physical Chemistry C*, 112, 16411–16416.
19. Binks, P. (2005). Interview on the challenges confronting nanotechnology, conducted by R. Williams, Ockham's Razor. Retrieved from www.abc.net.au/rn/science/ockham/stories/s1304778.htm.
20. Bleeker, E. A. J., Cassee, F. R., Geertsma, R. E., de Jong, W. H., Heugens, E. H. W., Koers-Jacquemijns, M., ... & Wijnhoven, S. W. P. (2012). Interpretation and implications of the European Commission's definition of nanomaterials. Letter report 601358001. RIVM: Bilthoven, Netherlands. Retrieved from <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/601358001.html>.
21. Boch, P., Chartier, T., & Huttepain, M. (1986). Tape casting of Al₂O₃/ZrO₂ laminated composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 69(8), 191–192.
22. Bohidar, S. K., Sharma, R., & Mishra, P. R. (2014). A critical review of functionally graded materials. *International Journal of Research*, 1, 289–301.
23. Bolotin, K. I., Sikes, K. J., Jiang, Z., Klima, M., Fudenberg, G., Hone, J., Kim, P., & Stormer, H. L. (2008). Ultrahigh electron mobility in suspended graphene. *Solid State Communications*, 146, 351–355.
24. Boudou, J.-P., Curmi, P. A., Jelezko, F., Wrachtrup, J., Aubert, P., Sennour, M., ... Gaffet, E. (2009). Controlled manipulation of individual nanoscale objects. *Nanotechnology*, 20, 235602.
25. Boverhof, D. R., Bramante, C. M., Butala, J. H., Clancy, S. F., Lafranconi, M., West, J., & Gordon, S. C. (2015). Regulatory considerations for nanotechnology in consumer products: Current challenges and future prospects. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 73, 137–150.
26. Brun, N., Mazerolles, L., & Pernot, M. (1991). Fabrication and characterization of novel materials with enhanced properties using laser-assisted techniques. *Journal of Materials Science Letters*, 10, 1418–1420.
27. Cancer Nanotechnology: www.cancer.gov/cancertopics/understandingcancer/nanodevices/page18
28. Cao, G. (2004). *Nanostructures and nanomaterials: Synthesis, properties, and applications*. 1st ed. New York: Imperial College Press.
29. Castro, E., Garcia, A. H., Zavala, G., & Echegoyen, L. (2017). Functionalized carbon nanotubes for biomedical applications: Recent advances and future directions. *Journal of Materials Chemistry B*, 5, 6523–6535.
30. CDT Technology Summary: www.cdtwater.com/cdt technology summary.pdf
31. CDT Water: www.cdtwater.com

32. Chen, L., Zhao, S., Hasi, Q., Luo, X., Zhang, C., Li, H., & Li, A. (2020). Addressing global challenges: A comprehensive review. *Global Challenges*, 4, 1900098.
33. Cheng, J., Fernando, K. A. S., Veca, L. M., Sun, Y.-P., Lamond, A. I., & Lam, Y. W. (2008). Cellular uptake and nuclear localization of functionalized single-walled carbon nanotubes. *ACS Nano*, 2(10), 2085–2094.
34. Chi, S. H., & Chung, Y. L. (2006). Mechanical behavior of functionally graded material plates under transverse load—Part I: Analytical modeling. *International Journal of Solids and Structures*, 43, 3657–3674.
35. Choi, W., Hong, S., Abrahamson, J. T., Han, J.-H., Song, C., Nair, N., ... & Belcher, A. M. (2010). Chemically driven carbon-nanotube-guided thermopower waves: A new paradigm for energy harvesting. *Nature Materials*, 9, 423–429.
36. Chung, Y. L., & Chi, S. H. (2001). Residual stress analysis of functionally graded materials. *Journal of the Chinese Institute of Civil & Hydraulic Engineering*, 13, 1–9.
37. Cuberes, M. T., Schlitter, R. R., & Gimzewski, J. K. (1996). Manipulating individual C₆₀ molecules at Cu steps: Toward molecular counting devices. *Applied Physics Letters*, 69, 3016–3018.
38. Daikh, A. A., et al. (2020). Multilayer nonlocal strain gradient nanobeams reinforced by carbon nanotubes: Static analysis and mechanical behavior. *Steel and Composite Structures*, 36(6), 643–656.
39. Dalapati, G. K., Masudy-Panah, S., Moakhar, R. S., Chakraborty, S., Ghosh, S., Kushwaha, A., ... & Ramakrishna, S. (2020). Advancements and challenges in nanotechnology: A global perspective. *Global Challenges*, 4, 1900087.
40. El-Wazery, M. S. A. R., El-Desouky, O. A., Hamed, N. A., Mansour, A., & Ahmed, A. H. (2012). Fabrication and characterization of zirconia/nickel functionally graded materials for structural applications. *Arab Journal of Nuclear Sciences and Applications*, 45(2), 435–446.
41. Endo, M., Saito, R., Dresselhaus, M. S., & Dresselhaus, G. (1997). *Evolution from carbon fibers to carbon nanotubes*. CRC Press, Boca Raton.
42. Eringen, A. Cemal. "On differential equations of nonlocal elasticity and solutions of screw dislocation and surface waves." *Journal of applied physics* 54.9 (1983): 4703-4710. <https://doi.org/10.1063/1.332803>
43. Esquivel, E. V., & Murr, L. E. (2004). Nanoparticle analysis in polar ice core samples using transmission electron microscopy. *Materials Characterization*, 52, 15–25.
44. Fan, X., Soin, N., Li, H., Li, H., Xia, X., & Geng, J. (2020). Research on energy and environmental materials. *Energy & Environmental Materials*, 3, 469–491
45. Fendrych, F., Taylor, A., Peksa, L., Kratochvilova, I., Vlcek, J., Rezacova, V., ... & Nesladek, M. (2010). Controlled synthesis and characterization of carbon-based nanomaterials for electronic applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43, 374018.
46. Freestone, I., Meeks, N., Sax, M., & Higgitt, C. (2007). Investigating ancient gold artifacts: Analytical techniques and challenges. *Gold Bulletin*, 40, 270–277.

47. Gao, B., Kleinhammes, A., Tang, X. P., Bower, C., Fleming, L., Wu, Y., ... & Zhou, O. (1999). Electrochemical intercalation of lithium ions into single-walled carbon nanotubes. *Chemical Physics Letters*, 307, 153–157.
48. Garg, A., et al. "Estimation of carbon nanotubes and their applications as reinforcing composite materials—an engineering review." *Composite Structures* 272 (2021): 114234. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114234>
49. Ghosh, S., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Pokatilov, E. P., Nika, D. L., Balandin, A. A., et al. (2008). Enhanced thermoelectric performance of single-wall carbon nanotubes. *Applied Physics Letters*, 92, 151911.
50. Gleiter, H. (2000). Nanostructured materials: Synthesis, properties, and applications. *Acta Materialia*, 48, 1–29.
51. Gokarna, A., Parize, R., Kadiri, H., Nomenyo, K., Patriarche, G., Miska, P., & Lerondel, G. (2014). Advancements in plasmonics and their applications in biosensing. *RSC Advances*, 4, 47234–47239.
52. Goodarzi, S., Da Ros, T., Conde, J., Sefat, F., & Mozafari, M. (2017). Advances in carbon nanotube-based materials. *Materials Today*, 20, 460–480.
53. Gromov, A., Dittmer, S., Svensson, J., Nerushev, O. A., Perez-Garcia, S. A., Licea-Jimenez, L., ... & Pasquali, M. (2005). Covalent functionalization of single-wall carbon nanotubes for enhanced properties. *Journal of Materials Chemistry*, 15(32), 3334–3339.
54. Gu, P., & Asaro, R. J. (1997). Mechanical behavior and crack propagation in functionally graded materials: A computational study. *International Journal of Solids and Structures*, 34, 3085–3098.
55. Hajime, G., Terumi, F., Yoshiya, F., & Toshiyuki, O. (2002). Efficient method for purifying single-wall carbon nanotubes from metal catalyst impurities. Patent No. US6426479B1.
56. Heiligt, F. J., & Niederberger, M. (2013). Recent advancements in the synthesis of nanostructured materials for various applications. *Materials Today*, 16, 262–271.
57. Helal, W. M. K., & Shi, D. (2014). Optimization of material gradient for functionally graded structures using finite element analysis. *Indian Journal of Materials Science*, Article ID 501935.
58. Hochella, M. F., Jr., Spencer, M. G., & Jones, K. L. (2015). Applications of nanotechnology in environmental science: A comprehensive review. *Environmental Science: Nano*, 2, 114–119.
59. Hughes, T. V., & Chambers, C. R. (1889). Manufacture of N Filaments [US Patent No.: 405480].
60. Hybrid Cars. (n.d.). Retrieved from <http://car-question.wikispaces.com/hybridcars>.
61. Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphite carbon. *Nature*, 354, 56–58.
62. Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 354, 56–58.
63. Iijima, S., & Ichihashi, T. (1993). Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter.

- Nature, 363, 603–605.
64. Ijima, S., & Ichihashi, T. (1993). Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. *Nature*, 363, 603–605.
 65. Jackson, P., Jacobsen, N., Baun, A., et al. (2013). Bioaccumulation and ecotoxicity of carbon nanotubes. *Chemical Central Journal*, 7(13), 154.
 66. Javey, A., Guo, J., Wang, Q., Lundstrom, M., & Dai, H. J. (2003). Ballistic carbon nanotube field-effect transistors. *Nature*, 424, 654–657.
 67. Jian, C. Y., Hashida, T., Takahashi, H., & Saito, M. (1995). Thermal shock and fatigue resistance evaluation of functionally graded coatings for gas turbine blades. *Composites Engineering*, 879–889.
 68. Jiang, K. L., Li, Q. Q., & Fan, S. S. (2002). Spinning continuous carbon nanotube yarns. *Nature*, 419, 801.
 69. Jin, Z. H., & Paulino, G. (2001). Transient thermal stress analysis of an edge crack in a functionally graded material. *International Journal of Fracture*, 107, 73–98.
 70. Johnson-McDaniel, D., Barrett, C. A., Sharafi, A., & Salguero, T. T. (2013). Insights into nanomaterials synthesis. *Journal of the American Ceramic Society*, 135, 1677–1679.
 71. Karama, M., Afaq, K. S., & Mistou, S. (2003). Mechanical behavior of laminated composite beams using a new multi-layered laminated composite structures model with transverse shear stress continuity. *International Journal of Solids and Structures*, 40, 1525–1546.
 72. Kawasaki, A., & Watanabe, R. (1997). Evaluation of thermomechanical performance for thermal barrier type of sintered functionally graded materials. *Composites Part B: Engineering*, 29–35.
 73. Keleshteri, M. M., H. Asadi, and M. M. Aghdam. "Nonlinear bending analysis of FG-CNTRC annular plates with variable thickness on elastic foundation." *Thin-Walled Structures* 135 (2019): 453-462. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.11.020>
 74. Khodakovskaya, M., Dervishi, E., Mahmood, M., et al. (2009). Impact of carbon nanotubes on seed germination and plant growth. *ACS Nano*, 3(10), 3221–3227.
 75. Kieback, B., Neubrand, A., & Riedel, H. (2003). Processing techniques for functionally graded materials. *Materials Science and Engineering: A*, 362, 81–106.
 76. Kim, H., Wang, M., Lee, S. K., Kang, J., Nam, J.-D., Ci, L., & Suhr, J. (2017). Advanced nanomaterials for energy storage and conversion. *Scientific Reports*, 7, 9512.
 77. Kim, K., Klaine, S., Lin, S., et al. (2010). Acute toxicity of a mixture of copper and single-walled carbon nanotubes to *Daphnia magna*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 29(1), 122–126.
 78. Kirchhoff, G. R. (1850). Über das Gleichgewicht und die Bewegung einer elastischen Scheibe. *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 40, 51–88.
 79. Koizumi, M. (1993). The concept of functionally graded materials. *Ceramic Transactions*, 34, 3–10. Koizumi, M. (1997). FGM activities in Japan. *Composites Part B: Engineering*, 28, 1–4.

80. Kong, J., Franklin, N. R., Zhou, C. W., et al. (2000). Nanotube molecular wires as chemical sensors. *Science*, 287, 622–625.
81. Kreuter, J. (2007). Nanotechnology in drug delivery systems. *International Journal of Pharmaceutics*, 331, 1–10.
82. Krishnan, S. K., Singh, E., Singh, P., Meyyappan, M., & Nalwa, H. S. (2019). Recent advances in carbon nanotube-based materials. *RSC Advances*, 9, 8778–8881.
83. Kroto, H. W., Heath, J. R., O'Brien, S. C., Curl, R. F., & Smalley, R. E. (1985). Discovery and characterization of fullerene molecules. *Nature*, 318, 162.
84. Kroto, H. W., Heath, J. R., O'Brien, S. C., Curl, R. F., & Smalley, R. E. (1985). C₆₀: Buckminsterfullerene. *Nature*, 318, 162–163.
85. Kruszewski, E. T. (1909). Effect of transverse shear and rotatory inertia on the natural frequency of a uniform beam. National Advisory Committee for Aeronautics.
86. Kuang, T., Chang, L., Chen, F., Sheng, Y., Fu, D., & Peng, X. (2016). Recent advances in carbon nanotube synthesis and applications. *Carbon*, 105, 305–313.
87. Kumar, N., & Kumbhat, S. (2016). Carbon-Based Nanomaterials. *Essentials in Nanoscience and Nanotechnology* (pp. 189–236). John Wiley & Sons, Inc.
88. Lee, J. U., Gipp, P. P., & Heller, C. M. (2004). Carbon nanotube p-n junction diodes. *Applied Physics Letters*, 85, 145–147.
89. Leonhardt, U. (2007). Optical metamaterials: The negative-index perspective. *Nature Photonics*, 1, 207–208.
90. Li, C., Adamcik, J., & Mezzenga, R. (2012). Insights from nature in nanotechnology. *Nature Nanotechnology*, 7, 421.
91. Li, M., Boggs, M., Beebe, T. P., & Huang, C. P. (2008). Oxidation of single-walled carbon nanotubes in dilute aqueous solutions by ozone as affected by ultrasound. *Carbon*, 46, 466–475.
92. Li, X.-Q., Hou, P.-X., Liu, C., & Cheng, H.-M. (2019). Advances in carbon materials. *Carbon*, 147, 187–198.
93. Liew, K. M., Z. X. Lei, and L. W. Zhang. "Mechanical analysis of functionally graded carbon nanotube reinforced composites: a review." *Composite Structures* 120 (2015): 90-97. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.09.041>
94. Lim, C. W., Zhang, G., & Reddy, J. N. (2015). A higher-order nonlocal elasticity and strain gradient theory and its applications in wave propagation. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 78, 298–313.
95. Lin, Y. H., Lu, F., Tu, Y., & Ren, Z. F. (2004). Glucose biosensors based on carbon nanotube nanoelectrode ensembles. *Nano Letters*, 4, 191–195.
96. Liu, X., Xu, M., Wan, L., Zhu, H., Yao, K., Linguerr, R., Chambaud, G., Han, Y., & Meng, C. (2020). Catalytic advancements in ACS journals. *ACS Catalysis*, 10, 3084–3093.
97. Liu, X.-M., Huang, Z. D., Oh, S. W., Zhang, B., Ma, P.-C., Yuen, M. M. F., & Kim, J.-K. (2012). Comprehensive review on composite science and technology. *Composites Science & Technology*, 72, 121–144.

98. Makvandi, P., Wang, C., Zare, E. N., Borzacchiello, A., Niu, L., & Tay, F. R. (2020). Recent advances in functional nanomaterials for biomedical applications. *Advanced Functional Materials*, 30, 1910021.
99. Mallakpour, S., & Khadem, E. (2016). Carbon nanotubes: Synthesis, properties, and applications. *Chemical Engineering Journal*, 302, 344–367.
100. Mannix, A. J., Zhou, X.-F., Kiraly, B., Wood, J. D., Alducin, D., Myers, B. D., ... & Guisinger, N. P. (2015). Synthesis of 2D materials with atomic precision using scanning transmission electron microscopy. *Science*, 350(6259), 1513–1516.
101. Mansoori, G. A., & Soelaiman, T. A. F. (2005). Nanotechnology: An introduction for the standards community. *Journal of ASTM International*, 2(6), JAI13110.
102. Mantari, J. L., Oktem, A. S., & Soares, C. G. (2012). A new higher-order shear deformation theory for sandwich and composite laminated beams. *Composites Part B: Engineering*, 43, 1489–1499.
103. Martin, C. R., & Kohli, P. (2003). The emerging field of nanotube biotechnology. *Nature Reviews Drug Discovery*, 2, 29–37.
104. Mendes, R. G., Bachmatiuk, A., Büchner, B., Cuniberti, G., & Rummeli, M. H. (2013). Advances in materials chemistry: A comprehensive overview. *Journal of Materials Chemistry B*, 1, 401–428.
105. Mie, G. (1908). Contributions to the optics of turbid media, particularly of colloidal metal solutions. *Annalen der Physik*, 330, 377–445.
106. Miller, J. C., Serrato, R. M., Represas-Cardenas, J. M., & Kundahl, G. (2004). *The handbook of nanotechnology business, policy, and intellectual property law*. Wiley. ISBN-10: 0471666955, ISBN-13: 9780471666950.
107. Mindlin, R. D. (1951). Influence of rotary inertia and shear on flexural motions of isotropic, elastic beams. *Journal of Applied Mechanics*, 18, 31–38.
108. Mohseni, Ali, and M. Shakouri. "Vibration and stability analysis of functionally graded CNT-reinforced composite beams with variable thickness on elastic foundation." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications* 233.12 (2019): 2478-2489. <https://doi.org/10.1177/1464420719866222>
109. Nakai, I., Numako, C., Hosono, H., & Yamasaki, K. (1999). Effect of temperature on the mechanical properties of sintered functionally graded materials. *Journal of the American Ceramic Society*, 82, 689–695.
110. Nano Energy: www.nanoener.com
111. Nanosolar: www.nanosolar.com
112. Nanotechnology in Agriculture and Food: www.nanoforum.org
113. Nanotech-Now: www.nanotech-now.com
114. Nanotherapeutics: www.nanotherapeutics.com
115. Nejad, M., Abedi, M., Lotfian, M., & Ghannad, M. (2013). Elastic analysis of exponential functionally graded materials disks subjected to internal and external pressure. *Central European Journal of Engineering*, 3, 459–465.

116. Nikolaev, P., Bronikowski, M. J., Bradley, R. K., Rohmund, F., Colbert, D. T., Smith, K., & Smalley, R. E. (1999). Chemically driven manipulation of carbon nanotubes. *Chemical Physics Letters*, 313, 91–97.
117. North Carolina Nanotechnology Center: www.ncnanotechnology.com
118. Odenbach, S. (2003). Advances in colloid surface science: A comprehensive review. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 217, 171–178.
119. Petersen, E., Zhang, L., Mattison, N., & et al. (2011). Environmental fate and ecological risks of carbon nanotubes: A comprehensive review. *Environmental Science & Technology*, 45(23), 9837–9856.
120. Pokropivny, V. V., & Skorokhod, V. V. (2007). A comprehensive study of advanced materials. *Materials Science and Engineering: C*, 27, 990–993.
121. Potocnik, J. (2011). Official Journal of the European Communities: Legislative aspects of nanotechnology. L275, 38–40.
122. Prasher, R. S., Hu, X. J., Chalopin, Y., Mingo, N., Lofgreen, K., Volz, S., Cleri, F., & Keblinski, P. (2009). Turning carbon nanotubes from exceptional heat conductors into insulators. *Physical Review Letters*, 102, 105901-1–105901-4.
123. Pratik, M., Ashwin, P., & Prasad, E. (2021). Market trends in carbon nanotubes.
124. Qin, L. H., Zhao, X., Hirahara, K., Miyamoto, Y., Ando, Y., & Iijima, S. (2000). Materials science: The smallest carbon nanotube. *Nature*, 408, 50-51.
125. Radushkevich, L. V., & Lukyanovich, V. M. (1952). On the carbon structure formed during thermal decomposition of carbon monoxide in the presence of iron (in Russian). *Zhurnal Fizicheskoi Khimii*, 26, 88.
126. Rao, G. P., Lu, C., & Su, F. (2007). Sorption of divalent metal ions from aqueous solution by carbon nanotubes: A review. *Separation and Purification Technology*, 58, 224-231.
127. Reddy, J. N. (1990). A general nonlinear third-order theory of beams with moderate thickness. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 25(6), 677–686.
128. Reibold, M., Paufler, P., Levin, A. A., et al. (2006). Materials: carbon nanotubes in an ancient Damascus sabre. *Nature*, 444, 286.
129. Reissner, E. (1945). The effect of transverse shears deformation on the bending of elastic beams. *Journal of Applied Mechanics*, 12, 69–77.
130. Rinzler, A. G., Liu, J., Dai, H., Nikolaev, P., Huffman, C. B., Rodríguez-Macías, F. J., ... & Smalley, R. E. (1998). Large-scale synthesis of single-walled carbon nanotubes by arc-discharge and laser ablation methods. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 67(1), 29–37.
131. Rittner, M. N., & Abraham, T. (1998). The role of carbon nanotubes in modern materials. *JOM*, 50, 37–38.

132. Rother, M., Brohmann, M., Yang, S., Grimm, S. B., Schießl, S. P., Graf, A., & Zaumseil, J. (2017). Advances in electronic materials: A comprehensive overview. *Advanced Electronic Materials*, 3, 1700080.
133. Ryabov, V. V., Ponomarchuk, V. A., Titov, A. T., & Semenova, D. V. (2012). Micro- and nanostructures of carbon in Pt-low-sulfide ores of the Talnakh deposit (Siberian platform). *Doklady Earth Sciences*, 446, 1193-1195.
134. Rybczynski, J., Kempa, K., Herczynski, A., Wang, Y., Naughton, M. J., Ren, Z. F., et al. (2007). Subwavelength waveguide for visible light. *Applied Physics Letters*, 90, 021104.
135. Saito, Y., Okuda, M., Tomita, M., & Hayashi, T. (1995). Extrusion of single-wall carbon nanotubes via formation of small particles condensed near an arc evaporation source. *Chemical Physics Letters*, 236, 419-426.
136. Savage, T., Bhattacharya, S., Sadanadan, B., Gaillard, J., Tritt, T. M., Sun, Y.-P., et al. (2003). Photoinduced oxidation of carbon nanotubes. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 15, 5915–5921.
137. Schaming, D., & Remita, H. (2015). Advances in the photochemistry of carbon nanotubes. *Foundations of Chemistry*, 17, 187–205.
138. Scientific American, Time-Warner Book Group. (2002). Publication from Scientific American in York.
139. Shen, C., Brozena, A. H., & Wang, Y. (2011). Emerging trends in nanostructured materials: Synthesis, properties, and applications. *Nanoscale*, 3, 503–518.
140. Small (2008). Carbon nanotubes as building blocks for nanoscale devices. *Small*, 4(2), 240–246.
141. Smith, B., Wepasnick, K., Schrote, K. E., Cho, H.-H., Ball, W. P., & Fairbrother, D. H. (2009). Influence of surface oxides on the colloidal stability of multi-walled carbon nanotubes: a structure–property relationship. *Langmuir*, 25(17), 9767–9776.
142. Soldatos, K. P. (1992). A transverse shear deformation theory for homogeneous monoclinic beams. *Acta Mechanica*, 94, 195–200.
143. Space Elevator. (n.d.). Retrieved from <http://spaceelevator.com/>.
144. Subramani, A., Geerpuram, D., Domanowski, A., Baskaran, V., & Metlushko, V. (2004). Vortex state in magnetic rings. *Physica C*, 404, 241–245.
145. Sveningsson, M., Jonsson, M., Nerushev, O. A., Rohmund, F., & Campbell, E. E. B. (2002). Blackbody radiation from resistively heated multiwalled carbon nanotubes during field emission. *Applied Physics Letters*, 81, 1095-1097.
146. Tans, S. J., Verschueren, A. R. M., & Dekker, C. (1998). Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube. *Nature*, 393, 49–52.
147. Thostenson, E. T., Zhifeng, R., & Tsu-Wei, C. (2001). Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review. *Composites Science and Technology*, 61, 1899–1912.
148. Tiwari, J. N., Tiwari, R. N., & Kim, K. S. (2012). Carbon nanotubes: synthesis, properties, and applications. *Progress in Materials Science*, 57, 724–803.

149. Tomar, R., Abdala, A. A., Chaudhary, R. G., & Singh, N. B. (2020). Recent developments in materials science. *Materials Today: Proceedings*, 29, 967–973.
150. Touratier, M. (1991). An efficient standard beam theory. *International Journal of Engineering Science*, 29(8), 901–916.
151. Udupa, G., Rao, S. S., & Gangadharan, K. V. (2014). Functionally graded composite materials: An overview. *Procedia Materials Science*, 5, 1291–1299.
152. Usui, Y., Aoki, K., Narita, N., Murakami, N., Nakamura, I., Nakamura, K., et al. Carbon nanotubes with high bone-tissue compatibility and bone-formation acceleration effects.
153. Vance, M. E., Kuiken, T., Vejerano, E. P., McGinnis, S. P., Hochella, M. F., Jr., Rejeski, D., & Hull, M. S. (2015). Environmental nanotechnology: Applications and implications in environmental science and engineering. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 6, 1769–1780.
154. Vander Wal, R. L., Berger, G. M., & Ticich, T. M. (2003). Carbon nanotube synthesis in a flame using laser ablation for in situ catalyst generation. *Applied Physics A*, 77, 885–889.
155. Varghese, R. J., Sakho, E. H. M., Parani, S., Thomas, S., Oluwafemi, O. S., & Wu, J. (2019). *Nanomaterials for solar cell applications*. Elsevier.
156. Vione, D., Maurino, V., Minero, C., Pelizzetti, E., Harrison, M. A. J., & Olariu, R. I. (2006). Photochemical reactions in the tropospheric aqueous phase and on particulate matter. *Chemical Society Reviews*, 35, 441–453.
157. Voyle Nano: www.voyle.net/nano
158. Wagner, F. E., Haslbeck, S., Stievano, L., Calogero, S., Pankhurst, Q. A., & Martinek, K.-P. (2000). A new approach to studying the role of gold in goldruby glass. *Nature*, 407, 691–692.
159. Wagner, S., Gondikas, A., Neubauer, E., Hofmann, T., & von der Kammer, F. (2014). Environmental implications of engineered nanomaterials: Are current testing strategies useful? *Angewandte Chemie International Edition*, 53, 12398–12419.
160. Walter, P., Welcomme, E., Hallégot, P., Zaluzec, N. J., Deeb, C., Castaing, J., et al. (2006). Carbon nanotubes for nanotechnology. *Nano Letters*, 6, 2215–2219.
161. Wang, N., Tang, Z. K., Li, G. D., & Chen, J. S. (2000). Single-walled 4 Å carbon nanotube arrays. *Nature*, 408, 50.
162. Wang, Qingshan, et al. "A unified formulation for free vibration of functionally graded carbon nanotube reinforced composite spherical panels and shells of revolution with general elastic restraints by means of the Rayleigh–Ritz method." *Polymer Composites* 39.S2(2018):E924-E944.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2009.07.009>
163. Wattanasakulpong, N., & Ungbhakorn, V. (2013). Analytical solutions for bending, buckling, and vibration responses of carbon nanotube-reinforced composite beams resting on elastic foundation. *Computational Materials Science*, 71, 201–208.
164. Wilson: www.wilson.com

165. Wu, Q., Miao, W., Zhang, Y., Gao, H., & Hui, D. (2020). Review of nanotechnology advancements. *Nanotechnology Reviews*, 9, 259–273.
166. Xiao, J. R., Gama, B. A., & Gillespie, J. W. (2005). Analysis of composite structures under various loading conditions. *International Journal of Solids and Structures*, 42, 3075–3092.
167. Yamada, T., Hayamizu, Y., Yamamoto, Y., Yomogida, Y., Izadi-Najafabadi, A., Futaba, D. N., et al. (2011). Development of stretchable strain sensors using carbon nanotubes. *Nature Nanotechnology*, 6, 296–301.
168. Yamanouchi, M., Koizumi, M., Hirai, T., & Shiota, I. (1990). Functionally gradient materials: design considerations. *Proceedings of the First International Symposium on Functionally Gradient Materials*.
169. Yang, D.-Q., & Sacher, E. (2008). Enhanced interactions between Pt nanoparticles and carbon nanotubes. *Journal of Physical Chemistry C*, 112, 4075–4082.
170. Yao, Z., Postma, H. W. C., Balents, L., & Dekker, C. (1999). Investigation of intramolecular junctions in carbon nanotubes. *Nature*, 402, 273–276.
171. Yas, M. H., and N. Samadi. "Free vibrations and buckling analysis of carbon nanotube-reinforced composite Timoshenko beams on elastic foundation." *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 98 (2012): 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2012.07.012>
172. Yin, H. M., Sun, L. Z., & Paulino, G. H. (2004). Micromechanics-based elastic model for functionally graded materials. *Acta Materialia*, 52, 3535–3543.
173. Zaporotskova, I. V., Boroznina, N. P., Parkhomenko, Y. N., & Kozhitov, L. V. (2016). Advances in modern electronic materials. *Modern Electronic Materials*, 2, 95–105.
174. Zeni, O., Palumbo, R., Zeni, L., Sarti, M., & Scarfi, M. R. (2008). Cytotoxicity study of carbon nanotubes on human blood cells. *Sensors*, 8, 488–499.
175. Zhang, J., Langille, M. R., & Mirkin, C. A. (2011). Nanoparticle research in *Nano Letters*. *Nano Letters*, 11, 2495–2498.
176. Zhang, L., Wang, L., Jiang, Z., & Xie, Z. (2012). Nanoscale research advancements. *Nanoscale Research Letters*, 7, 312.
177. Zhou, J., Ding, Y., Deng, S. Z., Gong, L., Xu, N. S., & Wang, Z. L. (2005). Progress in advanced materials. *Advanced Materials*, 17, 2107–2110.
178. Zhu, W., Bower, C., Zhou, O., Kochanski, G., & Jin, S. (1999). Innovative carbon nanotube field emitters. *Applied Physics Letters*, 75, 873–875.
179. Zhu, W., Guo, Y., Ma, B., Yang, X., Li, Y., Li, P., et al. (2020). Carbon-based materials for hydrogen storage: Recent advances and future prospects. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 8385–8395.