

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ibn Khaldoun Tiaret
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie civil



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

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par :

KHOUNI Samia

CHOULAK Fouzia

Sujet du mémoire

**L'effet de la distribution de la porosité sur la vibration libre
d'une Plaque sandwich nano-composite.**

Soutenu publiquement le : 21 /06/2025 devant le jury composé de :

Dr. Z. RENNAK

Président

Dr. A. DRAOUI

Encadreur

Pr. M. ZIDOUR

Co. Encadreur

Dr. B. SERBAH

Examineur

Pr. H. BEKKI

Examineur

Promotion : 2024 /2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

Au terme de ce travail, nous remercions tout d'abord ALLAH, le tout puissant qui nous a donné le courage, et la volonté pour atteindre notre objectif.

*Nous tenons tout d'abord à remercier infiniment, Madame **Draoui Aïcha** pour ses conseils avisés, ses remarques pertinentes et son soutien continu. Ses orientations ont été d'une grande richesse et ont joué un rôle essentiel dans l'élaboration de ce travail.*

*Nous tenons à exprimer nos profondes gratitude au professeur **Mohamed zidour**, pour son accompagnement précieux tout au long de ce travail de recherche. Sa rigueur scientifique, sa disponibilité, ainsi que la qualité de ses conseils ont grandement contribué à l'aboutissement de ce mémoire.*

Nous le remercions sincèrement pour les efforts qu'il a consacrés et pour sa bienveillance constante.

*Nous n'oublions pas aussi de remercier le Dr. **Benahmed Abdel-llah**, qui nous a accompagnés tout au long de cette période de travail et qui a grandement contribué, par son expérience, à la progression de ce projet.*

Nos remerciements vont également à l'ensemble des membres du jury, pour leur présence, leur écoute et leur bienveillance.

Enfin, Nous n'oublions pas de remercier tous les enseignants qui ont marqué nos parcours, ceux qui nous ont guidés par leurs conseils, éclairés par leur savoir et enrichis par le partage de leur expérience tout au long de ces années d'études.

Que chacun trouvent ici l'expression de notre gratitude et profond respect.

Dédicace

À ceux que les mots ne peuvent remercier comme il se doit. À ceux qui ont planté la certitude dans mon cœur et m'ont abreuvé de patience jusqu'à ce que j'en sois rassasié, à mes chers parents, lumière lorsque le chemin s'assombrit, battement de cœur lorsque la volonté faiblit..

Je vous offre cette lettre, fruit de vos efforts avant les miens, reflet de mon labeur tourné vers vous, et symbole de la fierté que je porte en vous..., à celui qui fut un soutien discret à mes mots,

À celui dont le nom porte les plus nobles significations, Et dont l'âme dégage une paix semblable au bonheur, même sans en porter le nom...

À tous ceux qui ont cru en moi lorsque je doutais, et m'ont soutenu lorsque j'ai faibli, à un compagnon fidèle, à une trace indélébile, à une main qui, sans jamais me saisir, a toujours été présente dans mon cœur.

À vous, mes amies des réseaux sociaux, d'Algérie et du monde arabe- d'Irak, du Yémen, de Syrie et du Soudan, vous avez été bien plus que de simples amis, vous étiez des mains tendues depuis l'autre côté des écrans, venues reconstruire mon être en silence.

Et à moi, même, pour chaque chute surmontée, chaque victoire discrète, chaque pas fait avec courage malgré le doute. Je vous dédie ce travail, en toute sincérité, non pas par orgueil, mais par reconnaissance et fidélité.

Samia

Dédicace

j'ai l'honneur de dédier ce modeste travail à mon père, à ma très belle mère qui m'ont continuellement soutenu avec un dévouement sans bornes et qui m'ont recoulé aucun sacrifice tout le long de mes études. A mon cher frère, ma sœur et toute ma famille A tous mes amis de l'université de ma promotion.

Fouzia

Résumé

Dans cette étude, la théorie des plaques de déformation par cisaillement d'ordre élevée est employée pour analyser le comportement vibratoire d'une plaque sandwich poreuse en nanocomposite. Les nanotube de carbone sont utilisés comme renfort, avec deux types de distributions uniforme (UD-CNT) et fonctionnellement graduées (X-CNT, O-CNT, V-CNT, Λ -CNT). La nouveauté de cette recherche réside dans l'étude analytique de l'impact de la distribution de la porosité et les nanotubes de carbone sur la vibration libre de la plaque sandwich. Les équations mathématiques du modèle sont dérivées, et les solutions obtenues sont validées numériquement en les comparant avec certaines solutions existantes dans la littérature. L'influence de plusieurs paramètres sur la vibration des plaques sandwich poreuses renforcées par des nanotubes de carbone est analysée, notamment les rapports géométriques, la fraction volumique, les types de renforcement et la distribution de la porosité. Les résultats obtenus montrent que ces paramètres ont un impact significatif sur le comportement vibratoire de la structure.

Mots-clés : Nanocomposites ; Nanotubes ; sandwich ; Vibration ; Porosité

Abstract

In this study, the high -order shear deformation plate theory is employed to analyze the vibration behavior of a porous nanocomposite sandwich plate. The carbon nanotube are used as reinforcement, with two types of uniform (UD-CNT) and functionally graded –X-CNT, O-CNT, V-CNT, Λ -CNT) distributions. The novelty of this research lies in the analytical study of the impact of porosity distribution and carbon nanotubes on the free vibration of the sandwich plate.

The mathematical equation of the model are derived, and the obtained solutions are numerically validated by comparing them with some existing solutions in the literature. The influence of several parameters on the vibration of carbon nanotubes reinforced porous sandwich plates is analyzed, including geometric ratios, volume fraction, reinforcement types, and porosity distribution. The results obtained show that these parameters have a significant impact on the vibration behavior of the structure.

Keywords: Nanocomposites; Nanotubes; Sandwich; Vibration; Porosity.

ملخص

في هذه الدراسة تم استخدام نظرية تشوه القص عالي الترتيب لتحليل سلوك الاهتزاز للوحة ساندويش نانوية مركبة مسامية. تم استخدام أنابيب الكربون النانوية كتعزيز مع نوعين من التوزيع المنتظم (UD-CNT) و المتدرج وظيفيا (X-CNT, O-CNT, V-CNT, A-CNT) تكمن حادثة هذا البحث في الدراسة التحليلية لتأثير توزيع المسامية و أنابيب الكربون النانوية على الاهتزاز الحر للوحة الساندويش تم اشتقاق المعادلات للنموذج و تم التحقق من صحة الحلول التي تم الحصول عليها عدديا بمقارنتها ببعض الحلول الموجودة في الأدبيات تم تحليل تأثير العديد من المعلمات على اهتزاز لوحات الساندويش المسامية المقواة بأنابيب الكربون النانوية بما في ذلك النسب الهندسية و الكسر الحجمي و أنواع التعزيز و توزيع المسامية أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن هذه المعلمات لها تأثير كبير على سلوك الاهتزاز للهيك.

الكلمات المفتاحية : النانو مركبات, الأنابيب النانوية, الساندويش, مسامية الاهتزاز



Table des matières

Table des Matières

Résumé.....	i
Abstract.....	ii
المخلص.....	iii
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux.....	xi
Liste des abréviations.....	xiii
Liste des notations.....	xv
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralités sur les nanotubes de carbone

I.1 Introduction	1
I.2 Les nanotubes de carbone.....	3
I.3 Historique	3
I.4 Le carbone	5
I.5 Les formes classiques du carbone	6
I.5.1 Le Graphite	6
I.5.2 Le Diamant	6
I.5.3 Carbone mal organisés.....	7
I.6 Les nouvelles formes du carbone	8
I.6.1 Le Graphène.....	8
I.6.2 Fullerènes.....	8
I.7 Classification des nanotubes de carbone.....	9
I.7.1 Nanotubes de carbone mono-feuillets, SWNT (Single Walled Nanotube).....	9
I.7.2 Nanotubes de carbone multi-feuillets, MWNT (Multi Walled Nanotubes).....	11
I.8 Méthodes de synthèse de nanotube de carbone.....	11
I.8.1 Méthode de l'arc électrique.....	12
I.8.2 Ablation laser.....	13
I.8.3 Méthode de dépôt chimique en phase vapeur (CVD).....	14
I.8.4 Méthode décomposition catalique HiPCO.....	15
I.8.5 Autres voies de synthèse.....	15
I.9 Propriétés des nanotubes de carbone.....	16
I.9.1 Propriétés électronique.....	16
I.9.2 Propriété mécaniques.....	16
I.9.3 Propriétés thermiques.....	17

I.9.4 Propriétés optique.....	17
I.10 Applications des nanotubes de carbone.....	17
I.11 Défauts des nanotubes de carbone.....	19
I.12 Inconvénients des Nanotubes.....	19
I.13 .Conclusion.....	20

Chapitre II : Généralités sur les nanocomposites (polymère/ NTC)

II.1. Introduction.....	22
II.2. Généralités sur les polymères.....	22
II.3. Les Polymères.....	22
II.4. Classification des polymères.....	23
II.4.1. Classification selon l'origine.....	23
II.4.1.1. Les polymères naturels.....	23
II.4.1.2. Les polymères artificiels.....	23
II.4.1.3. Les polymères synthétiques.....	23
II.4.2. Classification en fonction de l'architecture.....	24
II.4.2.1. Les homopolymères.....	24
II.4.2.2. Les copolymères.....	24
II.4.3. Classification selon le comportement thermique.....	25
II.4.3.1. Polymères thermoplastiques.....	25
II.4.3.2. Les polymères thermodurcissables.....	25
II.4.3.3 Les élastomères.....	26
II.5. Utilisation des polymères.....	26
II.6. Présentation des matériaux composites.....	26
II.6.1. Les propriétés des matériaux composites.....	27
II.6.2. Domaines d'application des matériaux composites.....	27
II.7. Généralités sur les nanocomposite.....	28
II.8. Différences entre composite et nanocomposite.....	28
II.9. Les différents nano renforts.....	29
II.9.1. Nanocomposites à matrice polymères.....	29
II.9.1.1. Renforts de type 1D.....	29
II.9.1.2. Renforts de type 2D.....	29
II.9.1.3. Renforts de type 3D.....	30
II.10. Classification des nanocomposites suivant les propriétés.....	30

II.10.1. Les polymères organiques.....	30
II.10.1.1. Les Matrices Thermoplastiques (TP).....	30
II.10.1.2. Les Matrices Thermodurcissables (TD)	31
II.10.1.3. Matrices élastomères.....	31
II.10.1.4. Les Matrices Métalliques.....	32
II.10.1.5. Les Matrices céramiques.....	32
II.11. Propriétés Nano composites (Nanotube de carbone/matrice Polymère).....	32
II.11.1. Conductivité thermique.....	32
II.11.2. Propriétés électriques	33
II.11.3. Propriétés mécaniques.....	33
II.11.4. Propriétés au feu.....	33
II.12. Préparation des nanocomposites (NTC/polymère)	34
II.12.1. Techniques de la mise œuvre.....	34
II.12.1.1. Polymérisation in situ.....	34
II.12.1.2. Mélange en solution.....	34
II.12.1.3. Mélange à l'état fondu.....	36
II.13. Dispersion des renforts.....	36
II.13.1. Utilisation des ultrasons.....	36
II.13.2. Dispersion mécanique par tricylindre.....	37
II.14. Conclusion.....	38

Chapitre III : L'effet de la porosité sur les matériaux

III.1. Introduction.....	40
III.2. La porosité.....	40
III.2.1. Définition d'une porosité	40
III.2.2. La porosité dans les matériaux composites	41
III.3. Techniques de caractérisation de la porosité	42
III.4. Classification des milieux poreux	43
III.4.1. Non consolidée.....	43
III.4.2. Consolidée.....	43
III.5. Etude des causes possibles d'apparition de la porosité	44
III.5.1. Les causes mécaniques	44
III.5.2. Les causes thermodynamiques	44

III.6. L'effet de la porosité sur les propriétés mécaniques des matériaux	45
III.6.1. La Porosité et le module d'élasticité longitudinale (module de Young/porosité).....	45
III.6.2. Porosité et le module de cisaillement.....	46
III.6.3. Porosité et le coefficient de Poisson ν	47
III.7. Conclusion	47

Chapitre IV: Modélisation théorique de la vibration des plaques Sandwichs (polymère / CNT)

IV.1. Introduction.....	49
IV.2. Les plaques	49
IV.3. Différents types des plaques.....	50
IV.4. Descriptions des plaques	50
IV.5. Les Sandwichs	51
IV.6. Les hypothèses pour l'étude des plaques.....	51
IV.7. Les hypothèses fondamentales de la théorie des plaques	52
IV. 7.1. La théorie classique des plaques mince de Love-Kirchhoff.....	52
IV. 7.2. La théorie de déformation en cisaillement du premier ordre.....	53
IV. 7.3. La théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé	54
IV.8. Configuration géométrique et propriétés de la plaque sandwich étudiée.....	55
IV.9. Équations de mouvement.....	58
IV.10. Conclusion.....	62

Chapitre V : Résultats et discussions

V.1. Introduction.....	65
V.2. Résultat et discussions.....	65
V.2.1. Résultat de plaque sandwich renforcée aux core.....	70
V.2.2. Résultat de plaque sandwich renforcée aux faces.....	74
V.3. Conclusion.....	76
Conclusion générale.....	79
Références bibliographique.....	81

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les nanotubes de carbone

Figure I.1 : Structures de nanotube de carbone.....	3
Figure I.2 : Images MET de nanotubes de carbone, publiées en 1952	4
Figure I.3 : Atome du carbone	5
Figure I.4 : Le carbone.....	5
Figure I.5 : Structure hexagonal de graphite.....	6
Figure I.6 : (A) Photo de diamant (B) Structure du diamant.....	6
Figure I.7 : formes allotropiques des carbones	7
Figure I.8 : structure de graphène.....	8
Figure I.9 : Fullerène C60.....	8
Figure I.10 : (a) Structure d'un ballon de football C60, (b) C70, (c) C82, (d) nanotube de carbone mono-feuillet, (e) nanotube de carbone multi-feuillets.....	9
Figure I.11 : Représentation du vecteur c définissant l'enroulement du feuillet graphitique autour de l'axe du nanotube de chiralité (n,m)	9
Figure I.12 : Structure des NTC armchair (a), zigzag(b), et hélicoidal(c).....	10
Figure I.13 : L'enroulement d'un feuillet graphène don formes des nanotubes de carbone (a) monofeuillets et (b) multifeuillet.....	11
Figure I.14 : Un réacteur de synthèse de nanotubes monocouche par arc électrique.....	12
Figure I.15 : Représentation schématique de l'ablation laser utilisant le système laser	13
Figure I.16 : Schéma d'un réacteur CVD pour la croissance des (NTC).....	14
Figure I.17: Schéma de la production de nanotubes par méthode HiPCO.....	15
Figure I.18 : Fermeture des nanotubes de carbone	18
Figure I.19 : Courbure induite dans un réseau graphitique par un: a). heptagone b). Pentagone.....	19
Figure I.20 : Défauts pentagonaux et heptagonaux se traduisant par de jonction	19

Chapitre II : Généralités sur les nanocomposites (polymère/NTC)

Figure II.1 : Modèle schématique de la synthèse d'un polymère.....	23
Figure II.2 : Les différentes familles des homopolymères :a) Les homopolymères linéaires, b) Les homopolymères branchés, c) Les homopolymères étoiles.....	24
Figure II.3 : Modes de copolymères.....	24
Figure II.4 : Les différentes familles des copolymères :a) le mode statique, b) le Le mode alterné, c) Le mode séquencé, d) Le mode greffé.....	25
FigureII.5 : Matériau composite	27
Figure II.6: Schématisation de la polymérisation in-situ d'un nanocomposite lamellaire...	34
FigureII.7 : Représentation schématique de la méthode de traitement de mélange en solution.....	35
Figure II.8 : Méthodes d'élaborations des nanocomposites polymères : a) mise en œuvre Dans le fondu, b) mise en solution et c) polymérisation in situ.....	35
Figure II.9: (a) (CNTs) dans l'éthanol avant passage aux ultrasons. (b) Après 1 heure aux ultrasons. (c) Image microscope optique d'une gouttelette de base + (CNTs) après 2 heures de dispersion	36
Figure II.10: a) Tricylindre Exakt 80E b) Schéma du circuit d'un fluide disperse par tricylindre.....	37

Chapitre III : L'effet de la porosité sur les matériaux

Figure III.1: Limites des différentes techniques expérimentales de caractéristique de la porosité en fonction de la taille du pore.....	43
Figure III.2 : Structure non consolidée.....	43
Figure III.3: Structure consolidée.....	43
Figure III.4 : Formation des macros et micros porosités en fonction de la vitesse de déplacement du fluide lors de l'imprégnation d'un renfort	44

Chapitre IV : Modélisation théorique de la vibration des plaques Sandwichs (polymère / CNT)

Figure IV.1: Exemple de plaque d'une géométrie quelconque.....	49
Figure IV.2 : Description d'une plaque.....	51
Figure IV.3 : Matériau composite sandwich.....	51
Figure IV.4 : Illustration de la plaque de Love-Kirchhoff.....	52
Figure IV.5 : Illustration de la plaque de REISSNER-MINDLIN.....	53
Figure IV.6 : Description de la déformation d'une plaque selon les théories classique (CLPT, FSDT, HSDT)	54

Chapitre V : Résultats et discussions

Figure V.1 : L'effet de la porosité en fonction de la fréquence adimensionnelle pour les différentes distributions de nanotube de carbone ($V_{cnt}=0.11$; $a/h=10$; SP1; 1-2-1).....	71
Figure V.2 : L'effet de la porosité en fonction de la fréquence adimensionnelle Pour les différentes distributions de nanotube de carbone $5V_{cnt}=0.11$; $a/h=10$; SP1; 0-O-0).....	72
Figure V.3 : L'effet de rapport géométrique (a/h) en fonction de la fréquence adimensionnelle pour les différents distributions de porosité ($V_{cnt}=0.11$; $P0=0.2$; 1-2-1 et 0-O-0).....	73
Figure V.4 : L'effet de rapport géométrique (a/b) en fonction de la fréquence adimensionnelle pour les différentes distributions de porosité ($V_{cnt}=0.11$; $P0=0$; 1-4-1).....	73
Figure V.5: L'effet de la porosité ($P0$) en fonction de la fréquence adimensionnelle pour les différentes distributions de nanotube de carbone (SP1;1-2-1; $a/h=10$; $V_{cnt}=0.11$).....	74
Figure V.6 : L'effet de la porosité en fonction de la fréquence adimensionnelle pour les différentes distributions (SP1;0-O-0; $a/h=10$; $V_{cnt}=0.11$).....	75
Figure V.7: L'effet de rapport géométrique (a/h) en fonction de la fréquence adimensionnelle pour les différentes distributions de porosité ($V_{cnt}=0.11$; $P0=0.2$; 1-2-1; 0-O-0).....	75
Figure V.8: L'effet de rapport géométrique (a/b) en fonction de la fréquence adimensionnelle pour les différentes distributions de porosité ($V_{cnt}=0.11$; $P0=0$; 1-4-1).....	76

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre II : Généralités sur les nanocomposites (polymère/NTC)

Tableau II.1 : Tableau des caractéristiques des nanoparticules sur les polymères.....29

Tableau II.2: Caractéristiques moyennes des matrices thermoplastiques (TP).....31

Chapitre III : L'effet de la porosité sur les matériaux

Tableau III.1 : Nomenclatures relatives à la taille des pores.....41

Chapitre IV : Modélisation théorique de la vibration des plaques Sandwichs (polymère / CNT)

Tableau IV.1: Distribution nanotube de carbone dans plaque sandwich55

Chapitre V : Résultats et discussions

Tableau V.1 : Comparaison des fréquences adimensionnelles (ω) d'une plaque sandwich nanorenforcée (distribution 0-1-0, $a/h = 10$).....65

Tableau V.2 : Comparaison des fréquences adimensionnelles (ω) d'une plaque sandwich nanorenforcée, ($V_{\text{cnt}} = 0,17$, distribution 0-1-0).....66

Tableau V.3 : Effet du rapport a/b sur fréquences adimensionnelles d'une plaque sandwich nanocomposite (distribution 1-2-1, $V_{\text{cnt}} = 0,11$, $p = 0,1$).....67

Tableau V.4: Effet des différentes fractions volumiques sur la fréquence adimensionnelle, avec (porosité $p = 0,1$, rapport $a/h = 10$).....68

Tableau V.5 : Effet des différentes distributions sur fréquences adimensionnelles, avec (porosité $p = 0,1$, un rapport $a/h = 10$, et $V_{\text{cnt}} = 0,11$).....69

Tableau V.6 : Influence distributions de porosité sur fréquences adimensionnelles dans plaque sandwich nanorenforcée, avec ($p = 0,2$, rapport $a/h = 10$, $V_{\text{cnt}} = 0,11$).....70



Liste des abréviations

Liste des abréviations

C-C:	La liaison carbone-carbone.
CMM:	Composites à matrice métallique.
CNTs:	Nanotube de carbone.
CNTRC:	Plaque de composite renforcée par des nanotubes de carbone.
CO:	Monoxyde de carbone.
CVD:	Chemical Vapor Deposition.
FG:	Fonctionnellement gradué.
FSDT:	Théorie de déformation en cisaillement de premier ordre (Timoshenko).
HiPCo:	Décomposition de CO a haute pression.
HSDT:	Théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé.
MWCNT:	Nanotube de carbone multi-paroi.
NC:	Nanocomposite.
SWCNT:	Nanotube de carbone mono-paroi.
TD:	Thermodurcissable.
TP:	Thermoplastique.
SP1:	Symétrique porosité1.
SP2:	Symétrique porosité 2.
ASP:	Asymétrique porosité
UD :	Uniforme porosité



Liste des notations

Liste des notations

a	longueur de la plaque
b	largeur de la plaque
h	l'épaisseur de la plaque
E_{11}	Module de Young longitudinal
E_{22}	Module de Young transversal
G_{12}, G_{13}, G_{23}	Module de cisaillement
(n, m)	Un couple de nombres entiers qui définit la structure du nanotube.
δU	La variation virtuelle de l'énergie de déformation.
$u_0(x)$	Déplacement axiale de la fibre moyenne.
$\delta u_0, \delta v_0, \delta w_0$	Champ virtuel de déplacement
N_x, N_y, N_{xy}	Efforts normaux de membrane
δV	La variation virtuelle de l'énergie potentielle.
V_p	Fraction volumique de la matrice polymère.
V_{cnt}^*	Fraction volumique de nanotube de carbone
$W(x)$	Déplacement transversale de la fibre moyenne.
W_{cnt}	Fraction massique du nanotube de carbone.
Q_{ij}	Coefficients de rigidité.
sp^1, sp^2, sp^3	Trois formes allotropiques.
S_{ij}	Elément de la matrice

$\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$	déformation de direction
$\varepsilon_x, \varepsilon_y$	déformation dans les directions x et y.
ϕ_x, ϕ_y	rotation totale de courbure de la section transversale
Θ	Angle chiral.
ρ^{cnt}	La masse volumique de nanotube de carbone.
ρ^p	La masse volumique de la matrice polymère.
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Contraintes normales suivant les directions x, y et z
η_i (i = 1, 2, 3)	Les paramètres d'efficacité.
$\omega, \bar{\omega}$	Fréquences naturelles
B_{11}	Rigidité de couplage (membrane-flexion).
C_{60}	Fullerène C60.
$\vec{C}_h$	Le vecteur chiral
D_{11}	Rigidité de flexion
E_{11}^{cnt}	Module de Young de nanotube de carbone suivant l'axe horizontale
E_{22}^{cnt}	Module de Young de nanotube de carbone suivant l'axe verticale.
G_{12}^{cnt}	Module de cisaillement de nanotube de carbone.
$f(z)$	Fonction de forme.
$\vec{a}_1, \vec{a}_2$	Les vecteurs de base du graphène.
A_{11}	Rigidité de membrane.



Introduction générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les nanocomposites polymère /CNT à base de polymères et de nanotubes de carbone (CNT) représentent une solution technologique prometteuse pour l'amélioration des propriétés des matériaux conventionnels, en particulier dans des domaines à fortes exigences comme l'aéronautique, l'automobile ou encore les structures avancées. Cependant, la microstructure interne de ces matériaux, notamment la porosité, influence de manière significative leur comportement mécanique global. Un contrôle précis de cette porosité est donc essentiel pour optimiser les performances des nanocomposites.

Dans ce contexte, les structures sandwichs et plus spécifiquement les plaques sandwichs, offrent une architecture particulièrement avantageuse. Combinant légèreté grâce à l'association de peaux résistantes et un noyau léger. L'introduction de nanomatériaux tels que les CNT, dans ces structures ouvre la voie à la conception des matériaux multifonctionnels capables de répondre aux exigences croissantes des industriels modernes.

Ce travail vise ainsi à étudier les propriétés et les effets des nanotubes de carbone, leur intégration dans des matrices polymères pour former des nanocomposites, ainsi que l'influence de la porosité sur les comportements mécaniques des plaques sandwichs renforcées par des CNT. Plus précisément, l'objectif est d'analyser l'effet de la distribution de la porosité sur la vibration libre de ces plaques.

Ce travail est structuré en cinq chapitres principaux, le premier chapitre est consacré aux nanotubes de carbone. Il présente leur historique, leur classification, ainsi que les différentes techniques de fabrication telles que l'arc électrique et la décomposition catalytique (HiP Co). Les propriétés mécaniques, thermiques et optiques seront également abordées, ainsi que leurs principales applications.

Le deuxième chapitre traite des polymères, leur classification et de leurs utilisations, puis présente les matériaux composites et nanocomposites. Une attention particulière est portée aux nanocomposites à base de polymères renforcés par des CNT, leur classification, leurs propriétés, ainsi que les méthodes de dispersion des renforts et de fabrication.

Nous aborderons également dans le troisième chapitre de manière générale l'effet de la porosité sur les propriétés mécaniques des matériaux, en mettant en évidence les mécanismes

d'influence et les enjeux liés à leur maîtrise.

Ensuite, nous abordons le quatrième chapitre qui présente les différentes théories des plaques utilisées pour modéliser le comportement mécanique, notamment la théorie de déformation au cisaillement du premier ordre (FSDT) et théorie d'ordre élevé (HSDT). Les hypothèses fondamentales et les différences entre ces théories seront détaillées, suivies d'un développement mathématique des modèles adaptés à l'étude des plaques poreuses en nanocomposites.

Le cinquième et dernier chapitre, est dédié à la présentation, l'analyse et la discussion des résultats obtenus le cadre de cette étude.

Enfin, une conclusion générale viendra résumant les principaux points abordés dans ce travail et proposer des perspectives pour de futurs travaux.



CHAPITRE I

Généralité sur les nanotubes de
carbone

I.1.Introduction

Ce chapitre vis à donner une vue générale sur les nanotubes de carbone, cela commence par leur définition et la description des leurs différentes formes, telles que le graphite, le diamant et les carbones « **mal organisés** » en plus des nouvelles formes de carbone comme le graphène. Le fullerène et les nanotubes de carbone multicouche et monocouche.

L'objectif est de comparer la structure des nanotubes de carbone avec celle des autre formes de carbone, qu'il s'agisse des formes traditionnelles ou formes récentes apparues récemment. Nous discuterons également des propriétés mécaniques, thermiques et optiques des nanotubes de carbone et de leurs couches.

I.2.Les nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone sont des structures à base des plans de graphène (une feuille d'épaisseur monoatomique de graphite) enroulés sur eux-mêmes. Un ou plusieurs plans peuvent être enroulés coaxialement, ce qui donne des nanotubes mono ou multiparois (Single-wall Nanotube SWNT, ou multi-wall Nanotube MWNT). La longueur typique des nanotubes est de quelques micromètres a quelques dizaines de micromètre, leur diamètre étant en moyenne de 2 nm pour des SWNT et de 30 nm pour des MWNT. Et l'homogénéité de ces caractéristiques pour un lot de nanotubes donnés n'est pas souvent donnée (**Bertrand, 2009**).

Il existe différents manières de construire un cylindre en enroulant ou feuillet de graphène. Deux seulement d'entre elles conduisent à des structures non chirales qui sont dénommées armchair et zigzag (**Bellay, 2005**).

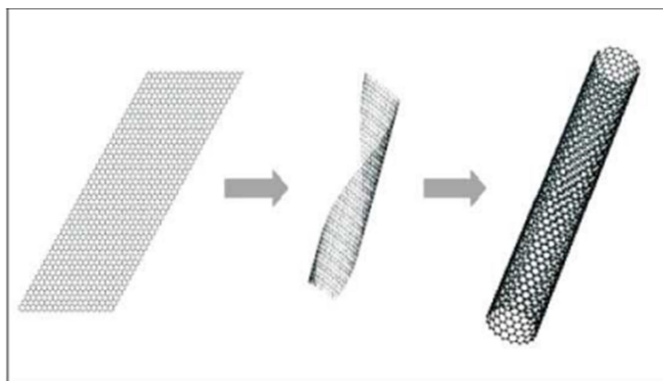


Figure I.1: Structures de nanotube de carbone

I.3.Historique

Les nanotubes de carbone ont pour la première fois été mis en évidence par TEM en 1952 et ont décrits dans le journal of « Physical Chemistry of Russia » comme de longs filamen

carbonés ayant une structure **tubulaire interne** Mais, l'article n'a été connu du monde occidental que très tard à cause de la langue de rédaction et du contexte historique de l'époque. Puis l'étude des nanotubes de carbone a été poursuivie dans les années 1960.

Il ont d'abord été considéré comme un sous-produit d'un procédé chimique industriel pour la production de fullerènes par **Bacon (1957)**. A cette époque, ils ont été appelés filaments ou fibres de carbone. Puis grâce aux avancées dans le développement des techniques de microscopie notamment le microscope électronique à transmission (Transmission Electron Microscopy TEM), a pu estimer, dans les années 1970, que leur diamètre était inférieur à 100nm. Ses observations n'ont tout fois pas beaucoup attiré l'attention, notamment pour des raisons techniques puisque les scientifiques ne disposaient pas d'outils expérimentaux permettant l'étude et la manipulation d'objets si petits. Contexte scientifique changea complètement dans les années 1990, ce qui explique l'engouement des scientifiques après la publication des observations au TEM à haute résolution d'Iijima en 1991 (**Iijima, 1991**). Cet article, dont le sujet principal sont les structures proches de celle du fullerène domaine de recherche très actif à cette période, présente des images TEM de structure carbonées filamenteuses tubulaires (fig I.2).

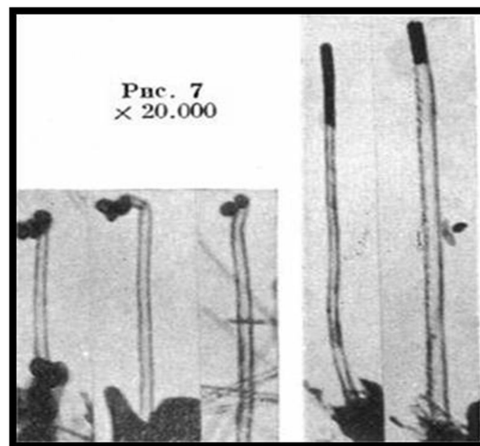


Figure I.2: Images MET de nanotubes de carbone, publiées en 1952

Quelques années plus tard, Bethune et al, et Iijima et al. Rapportent simultanément la première fabrication de nanotubes ne possédant qu'une paroi : les nanotubes monoparoi (SWNTS).

Depuis, la recherche sur les nanotubes de carbone n'a cessé de prendre de l'ampleur. D'abord sur les propriétés des nanotubes eux-mêmes, puis sur les mises en œuvre de ceux-ci, et aujourd'hui les premières applications industrielles voient le jour (**Karel saint, 2010**).

I.4. Le carbone

Le carbone un des éléments chimiques le plus abondant n'existe à l'état naturel que sous

deux formes pures : le diamant et le graphite.

Le carbone est le quatrième élément le plus abondant dans le système solaire et le sixième plus abondant dans l'univers. Il existe dans la croûte terrestre à la teneur moyenne de 18 ppm, il existe sous forme de composés et dans l'atmosphère sous forme de (CO_2 CO) et de méthane. Dans la terre toute matière vivante fait appel au carbone, la matière condensée dans laquelle le carbone est impliqué seul ou en combinaison avec d'autres éléments peut prendre des formes très variées (**Bernier, 1997**) :

De l'amorphe au cristallin, de l'isolant au conducteur, du transparent à l'opaque, du dur au mou. Le carbone doit cette diversité à sa structure électronique particulière ($1s^2 2s^2 2p^2$) (fig I.3)

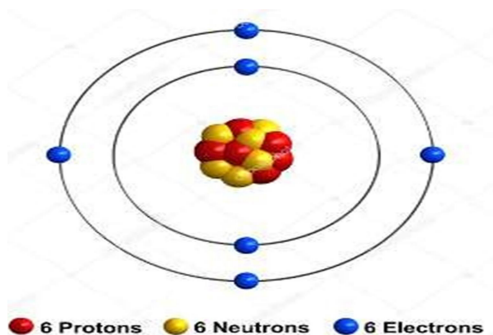


Figure I.3 : Atome du carbone

Ses orbitales atomiques sont capables de l'hybrider avec d'autres atomes, de carbone ou des hétéroatomes, pour former des orbitales moléculaires de type sp^1 , sp^2 ou sp^3 , ce qui confère au carbone un caractère bi-tri-ou tétra-valent. Il est donc possible de rencontrer des structures carbonées monodimensionnelles, bidimensionnelles ou tridimensionnelles. Le fait de pouvoir faire des liaisons simples doubles ou triples va permettre à l'atome de carbone de constituer le squelette carboné infini de molécules. Cette diversité de structure permet une diversification des propriétés du carbone (**Guessas, 2020**).



Figure I.4: Le carbone.

I.5. Les formes classiques du carbone

I.5.1 Le Graphite

Le graphite est un minéral noir friable utilisé depuis des siècles pour l'écriture (encre de chine, crayon à mine). La structure du graphite est constituée d'un empilement de plans, chacun étant constitué d'un pavage régulier d'hexagones en nid d'abeilles. Chaque atome de carbone est relié à 3 autres. Ces liaisons planes sont fortes et caractérisées par une distance entre atomes de 0,142 nm.

Les atomes sont au contraire faiblement reliés aux atomes des plans voisins, et la distance entre plans d'hexagones est de 0,34 nm. Cette structure a une densité d'un tiers plus faible que celle du diamant et définit le graphite comme un solide très anisotrope, quasi bidimensionnel car les plans faiblement reliés glissent facilement les uns par rapport aux autres (Bozlar, 2009). Le graphite peut être disponible naturellement ou synthétisé.

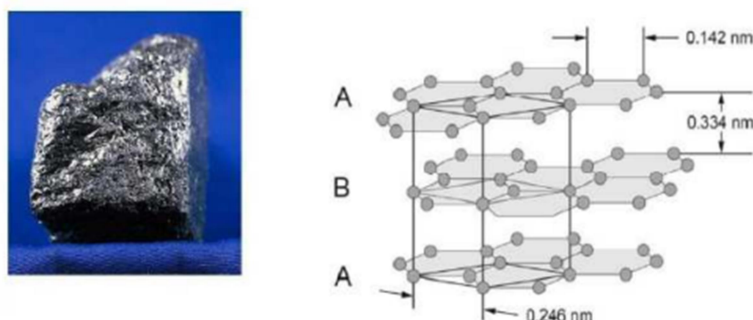


Figure I.5: Structure hexagonale de graphite.

I.5.2. Le Diamant

Le diamant est la forme allotropique ne comportant que des carbones sp^3 . Il consiste en des atomes liés comme indiqués sur la (fig 6). Les liaisons C—C ont pour longueur 1,514 Å. Le diamant est thermodynamiquement instable par rapport au graphite (la différence d'enthalpies libres est de 2,88 kJ.mol⁻¹), Mais la transformation diamant → graphite est extrêmement lente en conditions standards. Il y a principalement trois sortes de diamant : naturel, synthétique et fabriqué par CVD.



Figure I.6. (A) Photo de diamant (B) Structure du diamant

Comme le graphite, le diamant possède également une autre forme cristalline métastable : il s'agit d'une forme hexagonale appelée lonsdaléite. Notons que le diamant est beaucoup plus dense que le graphite (3,51 contre 2,22).

Le diamant est le matériau de dureté la plus élevée et trouvé de nombreuses applications en tant qu'abrasif haute performance. Il possède la plus haute conductivité thermique connue parmi les solides à température ambiante. C'est un excellent semi-conducteur lorsque son réseau est dopé avec de faibles quantités de lithium, bore, azote ou phosphore. Il a enfin un haut indice de réfraction et transmet la lumière depuis l'infrarouge lointain jusqu'à l'ultraviolet (Marcoux, 2002).

I.5.3. Carbone mal organisés

Les carbone ne présentent pas toujours une organisation cristalline. Des formes de carbone mal organisées peuvent exister. C'est notamment le cas du carbone amorphe.

Il s'agit d'un réseau désordonné d'atome de carbone présentant des états d'hybridation (sp^2 et sp^3) à l'état naturel, le carbone amorphe estrade. Il présente dans les particules des couches extérieures de l'atmosphère des étoiles froides, appelées poussières d'étoiles. Plus proche de nous, le carbone amorphe est synthétisé sous forme de couches minces, obtenues généralement par dépôt plasma.

Il sert revêtement, apportant une tenue mécanique supplémentaire à des pièces industrielles. De plus, son caractère hydrophobe lui permet d'être utilisé en tant que couche de protection (Izard, 2004).

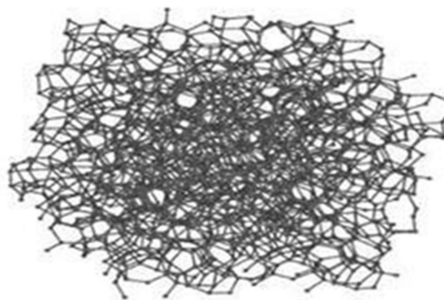


Figure I.7: Formes allotropiques du carbones "mal organisées".

I.6. Les nouvelles formes du carbone

I.6.1. Le Graphène

Le graphène est constitué d'une seule couche d'atomes de carbones. En termes simples, le graphène est une mince couche de carbone pur. Il s'agit d'une seule couche d'atomes de

carbone étroitement liée qui sont liées ensemble dans un treillis en nid d'abeille hexagonal. En termes plus complexes, il s'agit d'une allotropie carbone dans la structure d'un plan d'atomes liés sp^2 avec une longueur de liaison moléculaire de 0,142 nm. Ainsi les couches de graphène empilées les unes sur les autres forment du graphite, avec un espacement inter planaire de 0,335 nm (Garaj, 2010).

Bien que connu comme faisant partie intégrante de ces allotropies, on a longtemps pensé que le graphène ne pouvait exister. Jusqu'à récemment, il était utilisé comme objet théorique permettant de modéliser les propriétés des autres matériaux carbonés. En 2004 le modèle devint réalité lorsque les premiers plans de graphène furent isolés (Geim, 2007)

Depuis 2005, les études sur le graphène ont explosé et plusieurs méthodes ont été proposées.

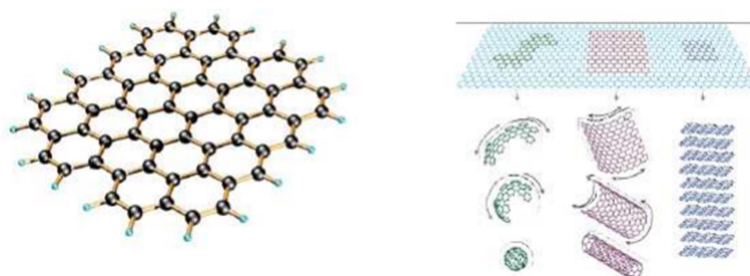


Figure I.8 : Structure de graphène

I.6.2 Fullerènes

Un fullerène est une molécule composée de carbone pouvant prendre une forme géométrique rappelant celle d'une sphère, d'une ellipsoïdale, d'un tube (appelé nanotube) ou d'un anneau. Les fullerènes sont similaires au graphite, et sont composés de feuilles d'anneaux hexagonaux liés, mais contenant des anneaux pentagonaux et parfois heptagonaux, ce qui empêche la feuille d'être plate. Les fullerènes sont la troisième forme connue du carbone.

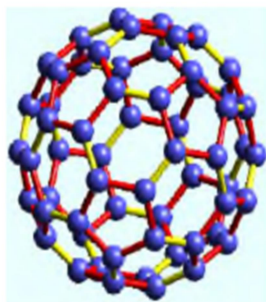


Figure I.9: Fullerène C60

Le premier fullerène découvert, le C60 est composé de 12 pentagones et de 20 hexagones, chaque sommet correspondant à un atome de carbone et chaque côté à une liaison covalente. Il a une structure identique au dôme géodésique ou à un ballon de football. Pour cette raison, il est appelé (buckminsterfullerène) (En hommage à l'architecte Buckminster Fuller qui a conçu le dôme géodésique) ou footballène (Saoula, 2017)

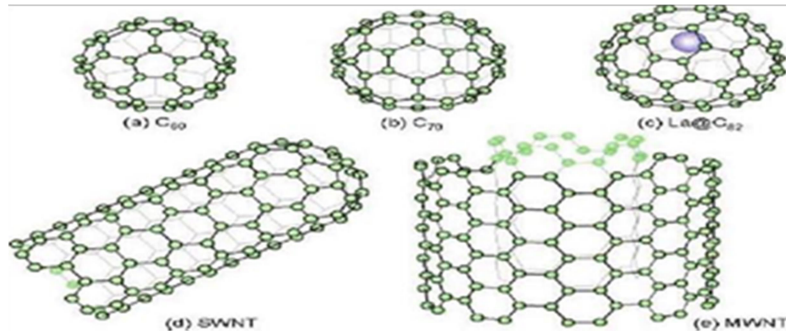


Figure I.10: (a) Structure d'un ballon de football C60, (b) C70, (c) C82, (d)

I.7 Classification des nanotubes de carbone

I.7.1 Nanotubes de carbone mono-feuillets, SWNT (Single Walled Nanotube)

La structure d'un nanotube de carbone mono-feuillet peut être représentée par un feuillet de graphène enroulé sur lui-même et fermé ou non à ses deux extrémités par une demi-sphère la façon dont le feuillet de graphène est replié sur lui-même définit un paramètre appelé chiralité, qui fixe la structure du nanotube. La chiralité permet de caractériser les différents types de nanotubes existants.

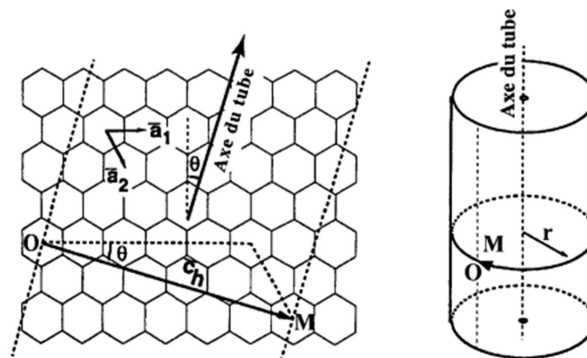


Figure I.11: Représentation du vecteur c définissant l'enroulement du Feuillet graphitique autour de l'axe du nanotube de chiralité (n, m) .

Le nanotube mono-feuillet peut être modélisé par l'enroulement d'une feuille de graphène sur elle-même. Cette feuille de graphène présente une structure de type nid d'abeille, dont on

peut donner deux vecteurs directeurs, a_1 et a_2 . On définit ensuite le vecteur de chiralité, C_h axe selon lequel le graphène s'enroule pour former le nanotube. Ce vecteur peut donc être décomposé en deux composantes, selon les vecteurs a_1 et a_2 . Soient m et n les scalaires tels que $C_h = na_1 + ma_2$. Selon la valeur de ces deux scalaires, trois types d'enroulements, donc trois types de nanotubes peuvent être décrits :

- Si m ou $n = 0$, le nanotube a une structure de type « zig-zag » ;
- Si $m = n$, le nanotube a une structure de type « chaise »
- dans tous les autres cas, le nanotube est « chiral ».

Ces différences de chiralité donneront aux nanotubes de carbone des propriétés différentes. Notamment, en ce qui concerne les propriétés électriques. Un nanotube de carbone de type « chaise » possède un comportement électrique métallique par exemple. D'autres chiralités ont des comportements semi-conducteurs.

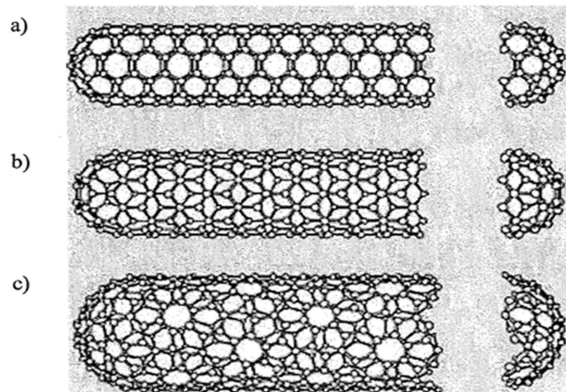


Figure I.12 : Structure des NTC armchair (a), zigzag (b), et hélicoidal (c)

I.7.2. Nanotube de carbone multifeuillet, MWNT (Multi Walled Nanotubes)

Les nanotubes multicouches (ou MWNT, Multi Walled carbone Nano Tube) sont constitués de plusieurs tubes concentriques n'ayant pas la même chiralité, créant ainsi une structure tubostratique. En effet on appelle graphite tubostratique un empilement désordonné des plans graphènes. La distance entre les couches dans les MWNTs est de l'ordre de $3,44 \text{ \AA}$, ce qui est proche de la distance inter-plans dans le graphite. Les nanotubes multicouches ont un diamètre variant bien entendu avec le nombre de feuillets : entre 2 et 25nm, pour une longueur allant de 20 à 80 μm (**Maroux, 2002**).

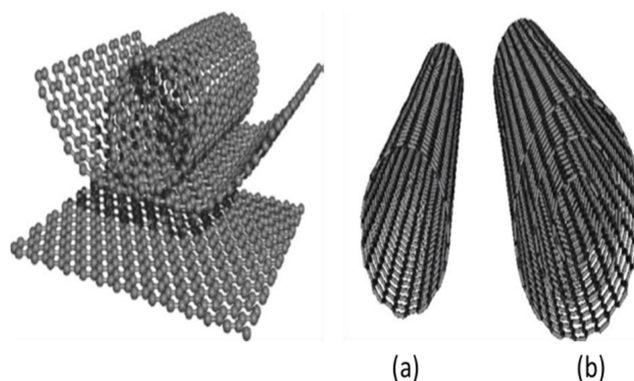


Figure I.13 : L'enroulement d'un feuillet de graphène pour former des Nanotubes de carbone (a) monofeuillets et (b) multifeuillet

I.8. Méthodes de synthèse de nanotube de carbone :

De nombreuses méthodes de croissance, directement sur le substrat, de tels réseaux ont été publiées et ce n'est pas l'objet de cet article d'en faire une liste exhaustive. Parmi tous ces travaux on peut cependant citer l'utilisation comme catalyseur de croissance par le groupe de hong Jie Dai à l'Université de stanford d'une protéine à cluster de fer, la ferritine, ou encore l'utilisation des polyoxometallates. Ce dernier article rapporte probablement la méthode de croissance permettant la croissance d'un réseu ayant une dispersion de diamètres des CNTs monoparois la plus monodisperse et ce à partir d'une polyoxometallate relativement facile à synthétiser.

D'autres groupes se sont concentrés sur des méthodes de transfert ou de dépôt par voies liquides. On peut notamment citer les travaux du groupe de Robert Haddon qui utilise des nanotubes purifiés et/ou fonctionnalisés (commercialisés par Carbon Solutionc,Inc) et qui les dépose par spray .Le groupe de V.Tsukruk dépose nanotubes par une méthode dérivée du dip-coating à partir de solution mésogènes à base de nanotubes qui permet d'obtenir des réseaux à des degrés d'orientation modulable .Si tiutes ces méthodes permettent effectivement d'obtenir des transistors, leurs propriétés électroniques sont encore très médiocres, notamment d'un point de vue ratio on /off, conductance et hystérésis. A cet effet, l'utilisation de nanotubes triés devrait permettre d'améliorer certaines de ces propriétés. Une société, NanoIntegris, Inc, spin off de l'Université de Northwestern, a notamment été créée récemment pour la commercialisation de nanotubes triés. Cette société devrait mettre ses produits sur le marché vers la fin 2008, d'après son fondateur, Mark C. Hersam de l'Université de Northwestern (Hersam, 2008).

I.8.1. Méthode de l'arc électrique

L'appareillage utilisé pour la synthèse des NTC par décharge d'un arc électrique est semblable à celui mis œuvre pour la préparation de fullerènes. Un arc électrique est établi entre deux électrodes de graphite, une électrode, l'anode se consume pour former un plasma dont la température peut atteindre 600°C . Ce plasma se condense sur l'autre électrode, la cathode, en un dépôt caoutchouteux et filamenteux évoquant une toile d'araignée très dense et contenant les nanotubes. Ce procédé très simple et peu coûteux est facilement réalisable et modifiable pour obtenir différents types de nanotube. Iijima, Ebbesen et Ajayan ont proposé des améliorations en vue de la synthèse à grande échelle de NTC. Si les NTC multi-feuillets peuvent être synthétisés sans l'aide d'un catalyseur métallique (les diamètres sont généralement compris entre 2 et 30 nm), ce dernier est nécessaire à l'obtention de NTC monofeuillets. Les NTC obtenues possèdent un diamètre généralement compris entre 0,7 nm et 5 nm selon le catalyseur utilisé et leur longueur n'excède pas quelques μm . Les échantillons obtenus ne contiennent pas uniquement des NTC mais aussi des nanoparticules, des fullerènes, et beaucoup de carbone amorphe. La purification par traitement thermique permet d'aboutir à des tubes monofeuillets purs, mais le rendement en masse est très faible et avoisine 1% (Bellayer, 2005).

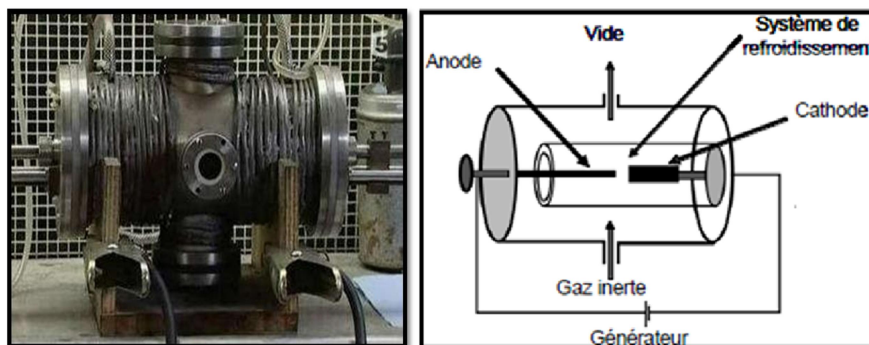


Figure I.14: Un réacteur de synthèse de nanotubes monocouche par arc électrique.

I.8.2. Ablation laser

L'ablation laser ou « Pulsed Laser Deposition PLD » en anglais est la technique utilisée pour la synthèse des fullerènes. Le premier exemple de synthèse des nanotubes de carbone par cette méthode a été mené par le groupe Smalley de l'université de Rice (Houston - USA) en 1995 (Nikolaev, 1995). Le groupe a proposé un modèle (fig I-15) utilisant une source laser pulsée Nd-YAG (grenat d'aluminium et d'yttrium dopé au néodyme), accompagnée par une chambre en quartz (diamètre 25 mm et longueur 1000-1500 mm) montée dans un four à tube réglable. Une tige cible (soit en graphite pur pour les MWCNTs, soit un mélange de graphite

et des catalyseurs métalliques pour les SWCNTs) est placée dans la zone moyenne à haute température, généralement vers les 1200 °C. Un gaz inerte ou un composite de gaz mixte est ensuite introduit dans le tube de quartz du côté amont du tube. Le régulateur de pression du côté aval est contrôlé pour alimenter le flux de gaz dans le tube. Une source laser comme le ND:YAG est ensuite introduite dans le tube de quartz et est placée de manière à ce qu'elle se focalise directement sur la tige cible au milieu. La puissance du laser évapore la tige cible et produit de nombreuses espèces de carbone dispersées.

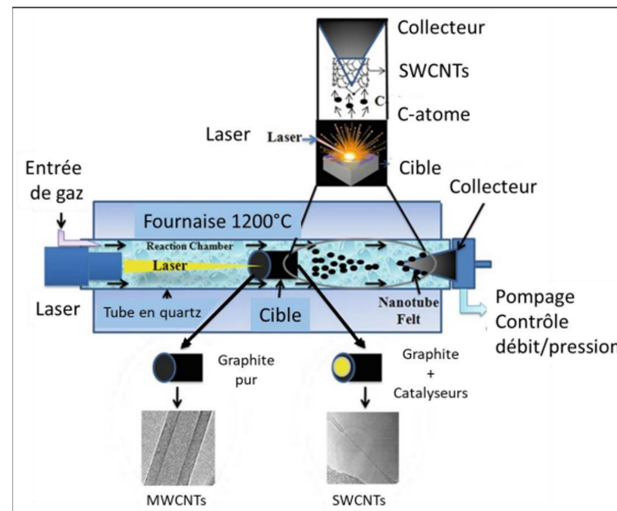


Figure I.15: Représentation schématique de l'ablation laser utilisant le système laser. Le détail de la cible et du collecteur (partie supérieure) présente le principe de croissance des tubes.

Le gaz inerte ou son composite balaye les espèces de carbone pour les déposer dans un collecteur en aval du tube. Avant que le gaz inerte ne s'échappe du tube, il entre dans un collecteur et un filtre refroidis par eau pour déposer les CNTs. Généralement, le ND:YAG est exploité sous les paramètres suivants (la longueur d'onde d'oscillation est soit 1064 nm, soit 532 nm, la chaleur est de 300 mJ, le taux de répétition est de 10 Hz, la largeur à mi-hauteur (FWHM) est < 10 ns, et le diamètre du faisceau focalisé sur la cible est de 3-8 mm).

Des SWCNTs de diamètre remarquablement uniforme peuvent être produits lorsque la cible en graphite est dopée avec une petite quantité de métaux de transition tels que le nickel Ni ou le cobalt Co. Ce procédé est coûteux, mais il présente un rendement de synthèse plus important que celui de l'arc électrique (**Iijima, 1998**).

Etat de l'art : Synthèse des nanotubes de carbone, propriétés et applications et les avantages :

- Elle permet la synthèse de nanotubes de carbone monofeuillets, alors qu'avec les autres méthodes on obtient principalement des nanotubes multifeuillets, ou un mélange

indissociable.

- Elle permet la formation de produits très purs et de bonne qualité. Cela signifie que les nanotubes

De carbone produits par cette méthode ont une structure bien définie et contiennent peu d'impuretés, ce qui est essentiel pour de nombreuses applications. Quant à les inconvénients :

- Il n'y a aucun contrôle sur la longueur des nanotubes. Cela peut poser un problème pour certaines applications où la longueur des nanotubes est un facteur important

- Il se forme des amas de nanotubes qu'il faut dissocier pour pouvoir les utiliser. Cela peut nécessiter des étapes supplémentaires de traitement et de purification, ce qui peut augmenter le coût et la complexité du processus (Soumaya, 2023).

I.8.3. Méthode de dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

La synthèse de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) de carbone est obtenue en mettant une source dans la phase gazeuse et en utilisant une source d'énergie, telle qu'un plasma ou bobine chauffée de façon résistive, pour transférer de l'énergie à une molécule de carbone gazeuse.

La synthèse CVD de nanotubes de carbone est essentiellement un processus en deux étapes de préparation du catalyseur suivie de la synthèse réelle du nanotube. Le catalyseur est généralement préparé en pulvérisant un métal de transition sur un substrat puis en utilisant soit une attaque chimique soit un recuit thermique pour induire une nucléation de particule de catalyseur. Le recuit thermique entraîne une formation de grappes sur le substrat, à duquel les nanotubes vont croître.

L'ammoniac peut être utilisé comme agent de gravure. Les températures pour la synthèse de nanotubes par CVD sont généralement dans la gamme 650-900°C. Les rendements typiques pour les maladies cardiovasculaires sont d'environ 30%. Ce sont les principes fondamentaux du processus CVD. Au cours de la dernière décennie, des techniques différentes pour la synthèse des nanotubes de carbone avec CVD ont été développées, telles

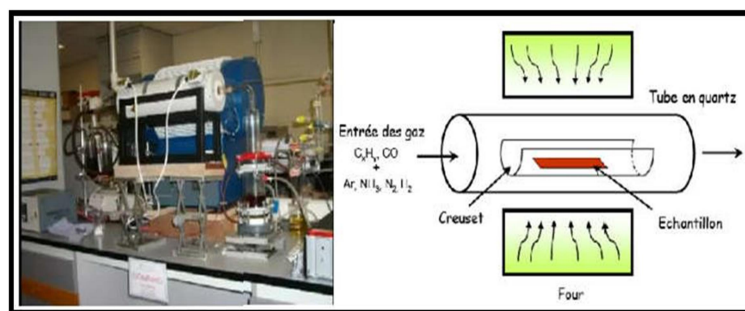


Figure I.16: Schéma d'un réacteur CVD pour la croissance des (NTC)

que le CVD amélioré par plasma, CVD chimique thermique, CVD catalytique à l'alcool, croissance de la phase vapeur, CVD à base de gel aéroélectrique et CVD assisté par laser (Amele, 2017).

I.8.4. Méthode décomposition catalique HiPCO

Le procédé (Hip CO) a été développé par le groupe de R. Smalley. Ce procédé fait partie de la famille des procédés de décomposition catalytique à moyenne température. Un flux continu de penta carbonyle de fer ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) et de monoxyde de carbone (CO) est introduit sous une pression de (10 atm) dans une enceinte chauffée à (1200°C). L'originalité du procédé tient au fait que le catalyseur, nécessaire à la croissance des tubes mono feuillets, est formé in situ par la décomposition du gaz précurseur. De surcôt, le monoxyde de carbone utilisé comme source de carbone pour la croissance des tubes ne se pyrolyse pas à (1200°C), ce qui permet d'obtenir des nanotubes de carbone mono feuillets (Izard, 2004).

L'avantage de cette méthode est de permettre la production d'échantillons de nanotubes, a priori sans carbone amorphe. Les seules "impuretés" dans le produit de Synthèse sont les particules de catalyseurs métalliques (fig I.17).

D'autre part, cette méthode permet de produire des nanotubes dans des quantités comparables à celles obtenues par la méthode d'ablation laser. D'après les auteurs elle permettra certainement de pouvoir produire des nanotubes par kilogramme (Nikolaev, 1999).

Enfin, les nanotubes de carbone se forment de façon continue à partir de ces atomes de carbone.

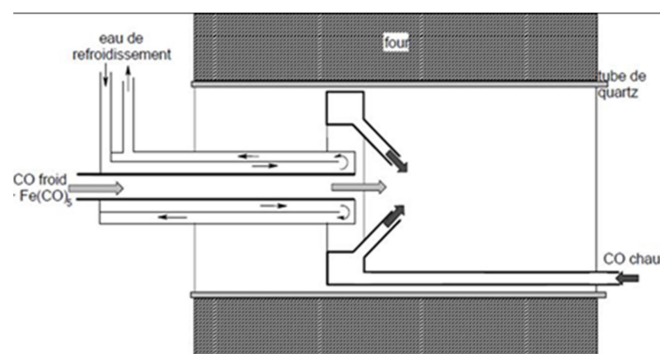


Figure I.17: Schéma de la production de nanotubes par méthode HiPCO

I.8.5. Autres voies de synthèse

Parmi les autres techniques de synthèse on a celle qui utilise l'énergie solaire, qui est comparable à l'ablation laser, qui consiste à concentrer le rayonnement solaire sur un creuset rempli de poudre de graphite et de catalyseur métallique, et ce dans une enceinte en Pyrex

sous atmosphère inerte. Après sublimation du carbone, les vapeurs produites sont entraînées par un flux d'hélium ou d'argon et se condensent dans une zone refroidie du réacteur. Au four solaire, la lumière solaire est collectée par un miroir plat pour être réfléchi vers un miroir parabolique qui focalise le rayonnement directement sur la cible. Elle peut, dans de bonnes conditions, atteindre une température de 3000 K. Les diamètres des SWNTs produits sont autour de 1,3 nm.

Citons enfin deux méthodes de production de nanotubes multicouches :

- 1- La synthèse électrochimique de MWNTs a été réalisée en faisant passer un courant dans un sel fondu (600°C) entre deux électrodes de graphite.
- 2- Une synthèse hydrothermale de MWNTs a été récemment décrite, elle recourt à un mélange eau/polyéthylène en présence de Ni à 700-800°C et sous hautes pressions (Zidour, 2024).

I.9. Propriétés des nanotubes de carbone

En raison de leurs dimensions nanométriques, les nanotubes de carbone possèdent de nombreuses propriétés électriques, thermiques et mécaniques intéressantes et souvent inattendues.

I.9.1. Propriétés électriques

Les propriétés électroniques de nanotubes de carbone sont liées à leur structure. En particulier, Wildöer et al, ainsi que Odom et al, ont expliqué la relation entre la structure et la conductivité électronique des nanotubes de carbone monofeuillet en utilisant des images de la microscopie à effet tunnel (STM, scanning tunneling microscope) et les courbes de courant-tension obtenues par la spectroscopie à effet tunnel (STS, scanning tunneling spectroscopy) sur des nanotubes de carbone individuels. Leurs études indiquent que les tubes armchair sont métalliques et que les tubes en zigzag et les tubes chiraux sont métalliques ou semi-conducteurs selon l'angle d'enrubannage et la longueur des nanotubes de carbone. Néanmoins, les échantillons de nanotubes de carbone monofeuillet présentent de nombreuses structures différentes. Les mesures à quatre sondes sur les nanotubes de carbone multifeuillets individuels révèlent que leur conductivité électrique est métallique, semi-conductrice ou semi-métallique. Frank et al. Ont mesuré expérimentalement la densité de courant d'un nanotube de carbone multifeuillets qui est de l'ordre de 10^7 A cm^{-2} , cette valeur est beaucoup plus grande que celle du cuivre (Olarbi, 2017).

I.9.2. Propriétés mécaniques

Les nanotubes de carbone possèdent d'excellentes propriétés mécaniques. La force de la

liaison covalente C-C, qui est l'une des plus fortes dans la nature, fait des nanotubes de carbone l'un des matériaux les plus solides et les plus rigides avec un module de Young particulièrement élevé, supérieur à 1 TPa (**Majid, 2003**).

I.9.3. Propriétés thermiques

À l'exception de leurs propriétés mécaniques et électroniques exceptionnelles, les nanotubes de carbone possèdent d'excellents comportements thermiques. Pop et al. ont déterminé expérimentalement à température ambiante la conductivité thermique d'un nanotube de carbone monofeuillet estimée à une valeur d'environ $3500 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Kim et al. ont également déterminé celle d'un nanotube de carbone multifeuillet qui est de l'ordre de $3000 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (**Salih, 2017**).

I.9.4 Propriétés optiques

Les nanotubes de carbone possèdent des propriétés optiques intéressantes. En effet, plus noir jamais conçu par l'homme est un tapis de nanotubes disposés verticalement, réalisé par des chercheurs à l'Université Rice autour du professeur Pulickel Ajayan, indice de réflexion avec un de 0.0045%, il est « à fois plus sombre que le carbone, ce qui lui permet d'absorber 99.9% de la lumière qu'il reçoit. C'est 3 fois « mieux » que ce que permettait l'alliage de nickel-phosphore qui était le matériau réputé le plus sombre. Ces inventions pourraient intéresser les secteurs militaire de la communication, de l'énergie (solaire notamment), de l'observation, des colorants, etc (**Bellifa, 2015**).

I.10. Applications des nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone et Grâce à Leur dimension nanométrique et leurs propriétés spécifiques sont des matériaux très intéressants du point de vue des applications. De par leur très important facteur de forme, ils sont d'excellents émetteurs d'électrons sous faible champ. Téraresse particulièrement l'industrie des écrans plats. Ils peuvent stocker une quantité importante d'hydrogène et intéressent donc l'industrie des batteries L'application la plus directe envisagée consiste à les utiliser comme additifs pour polymères (thermoplastiques, thermodurcissables et élastomères) (**Houdyp, 2006**).

Les propriétés spécifiques des nanotubes de carbone peuvent ainsi être transposées dans des matrices, à condition d'assurer une bonne dispersion de l'additif dans le composite. Des matériaux composites haute performance ou des polymères conducteurs contenant des Nanotubes peuvent ainsi être trouvant leurs applications dans l'automobile (peintures conductrices évitant l'emploi de solvants polaires), l'aéronautique (ailes d'avions, trains

d'atterrissage des hélicoptères, etc.), Il existe d'ailleurs déjà des prototypes utilisés par des sportifs de haut niveau (cyclistes utilisant des vélos dont le cadre est un matériau composite contenant des nanotubes, joueurs de tennis utilisant des raquettes à base de nanotubes de carbone, joueurs de hockey utilisant des crosses dopées en nanotubes de carbone...). Ils peuvent aussi être utilisés comme une peinture antifouling enrichie en nanotubes de carbone. Nous verrons par la suite que leur rigidité, leur grande flexibilité et leur très faible diamètre. Les nanotubes de carbone sont utilisés comme pointes dans les microscopies à force atomique, de plus sous forme de fibres macroscopiques.

Industriels, mais outre leur coût élevé, en début et fin de cycle de vie notamment, ou en cas de dispersion accidentelle, les nanotubes comme d'autres nano molécules, présentent des risques de pollution nanométrique. Une étude publiée le 4 avril 2010 dans la revue nature nanotechnologies indique que les nanotubes de carbone ne seraient non pas bio persistants, comme on le pensait jusqu'alors, mais qu'ils seraient plutôt dégradés par une enzyme, myeloperoxidase qui s'attaque à ces nanotubes. Elle est produite par les neutrophiles (**Boumia, 2017**). La toxicité, un autre inconvénient majeur des NCT, est directement liée à leur taille nanométrique et surtout à leur grand facteur de forme. En effet, tout comme les fibres d'amiante, les NCT peuvent facilement infiltrer les cellules et provoquer à long terme des cancers. Il y a encore très peu d'études sur la toxicité des NCT néanmoins, l'institut national des recherches et de sécurité recommande de prendre le plus de précautions possibles lors de leur manipulation (**Chemi, 2018**).

I.11. Défauts des nanotubes de carbone

Les nanotubes peuvent être considérés comme des fullerènes lorsque leurs extrémités sont fermées par deux calottes hémisphériques. Pour cela il est nécessaire d'introduire des défauts dans la structure. La courbure positive est obtenue par la présence de pentagones (cf. Flèche fig I.18). Il faut ainsi six pentagones à chaque de fermeture (condition bien connue des mathématiciens sous le nom de théorème d'Euler).

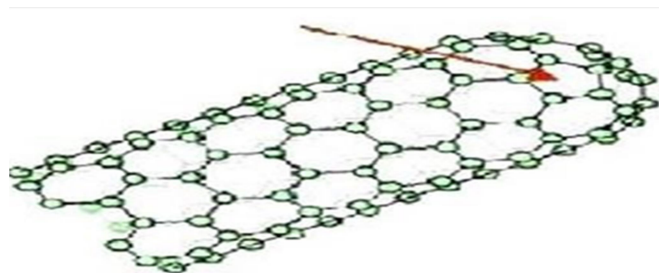


Figure I.18: Fermeture des nanotubes de carbone

Si la courbure provoquée par l'introduction d'un pentagone dans un réseau graphitique est

positive, la présence d'un heptagone provoque elle une courbure négative (fig I.19)

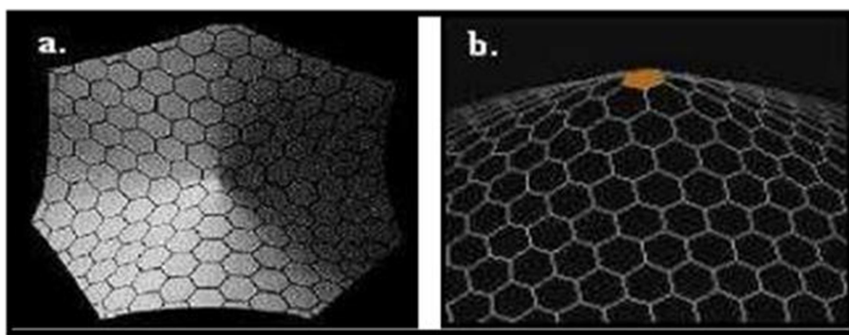


Figure I.19: Courbure induite dans un réseau graphitique par un: a). heptagone
b).pentagon

Il est alors possible, en combinant ces défauts, de faire varier le diamètre du tube ou créer des coudes. Des connexions entre NTC peuvent aussi être envisagées sous la forme de jonction en Y, T ou en X (Aurélien, 2007).

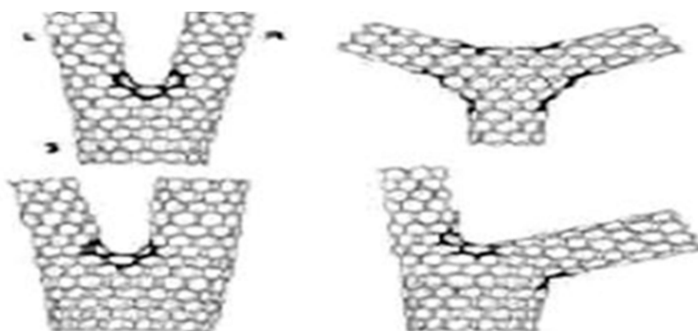


Figure I.20 : Défauts pentagonaux et heptagonaux se traduisant par des jonctions

I.12. Inconvénients des Nanotubes

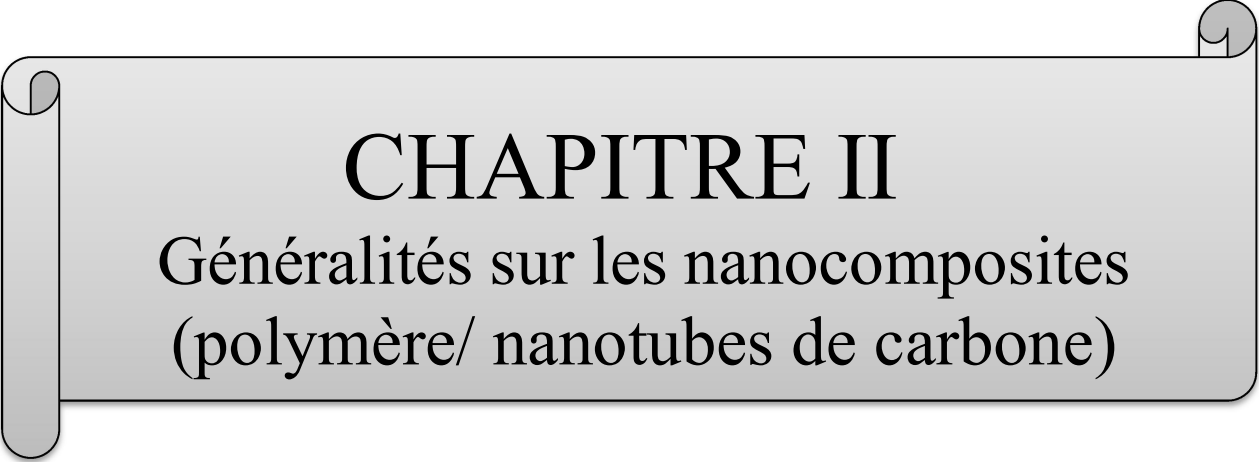
Industriels, mais outre leur coût élevé, en début et fin de cycle de vie notamment, ou en cas de dispersion accidentelle, les nanotubes, comme d'autres nano molécules, présentent des risques de pollution nanométrique. Une étude publiée le 4 avril 2010 dans la revue nature nanotechnologies indique que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

toxicité, un autre inconvénient majeur des NCT, est directement liée à leur taille nanométrique et surtout à leur grand facteur de forme. En effet, tout comme les fibres d'amiante, les NCT peuvent facilement infiltrer les cellules et provoquer à long terme des cancers. Il Ya encore très peu d'études sur la toxicité des NCT néanmoins, l'institut national des recherches et de sécurité recommande de prendre le plus de précautions possibles lors de leur manipulation (**Chemi, 2018**).

I.13. Conclusion

Ce chapitre, qui constitue une recherche bibliographique sur les nanotubes de carbone où l'importance de ces nano-objets est apparue que ce soit dans le domaine des nanosciences ou dans d'autres applications, et grâce à la particularité de ses dimensions uniques et à ses propriétés variées ces nanotubes ouvrent de vastes perspectives d'innovation dans l'industrie, ce qui les rend prometteurs pour de nombreux développements futurs.

Ensuite, nous avons vu classifications qui donnent deux types de nanotubes de carbone (mono-feuillets, multi- feuillets) après cela nous avons détaillé trois méthodes de synthèse de nanotubes de carbone et les différentes propriétés (mécaniques, électrique, thermique) encore leur vaste champ d'application pour cela nous avons cité les défauts des nanotubes de



CHAPITRE II

Généralités sur les nanocomposites
(polymère/ nanotubes de carbone)

II.1.Introduction

Les nano composites sont des matériaux constitués d'au moins deux phases dont l'une générale est une phase continue et représente la matrice, et l'(les) autre(s) constitue(nt) les charge dispersées à l'intérieur de cette matrice. La particularité des nano composites, comparée aux matériaux composites classiques, est de présenter une interface importante ce qui permet un contrôle meilleur des propriétés du matériau produit. Dans ce chapitre, on introduira les polymères, leurs types, ainsi que leur utilisation.

Ensuite on verra la transition du composite au nano-composite, en décrivant leur classification suivant différents types de matrices et fibres existants ainsi que leur propriétés. Plus particulièrement on s'intéressera aux nano-composite à matrice polymère et renforts de (NTC).

Enfin, nous traitons particulièrement la dispersion des renforts dans la matrice polymère et la production mondiale des nano-composites à base (polymère /NTC)

II.2. Généralités sur les polymères :

Les polymères sont des matériaux à macromolécules résultant de l'assemblage de molécules élémentaires appelées monomères. Les chaînes obtenues par la répétition de ces monomères atteignent souvent des tailles et des masses molaires très importantes, typiquement supérieures à $10\,000\text{ g.mol}^{-1}$. Les polymères sont dans l'ensemble peu denses, compte tenu de leur origine organique et par suite de la présence d'éléments constitutifs légers (Carbone, Oxygène, Hydrogène, Azote). La liaison covalente des carbones est forte (438 kJ/mol) par conséquent, les polymères possèdent une élasticité élevée dans le sens de la chaîne macromoléculaire (Caillere, 1982).

II.3. Les polymères :

Les polymères sont omniprésents en odontologie, que ce soit en odontologie conservatrice comme matériaux de reconstitution ou en prothèses comme matériaux d'infrastructure, cosmétiques ou à empreinte. Ils rentrent également dans la constitution de cires ou des fils de sutures. Les mécanismes d'action de ces polymères au contact des différents tissus bucco-dentaires font appel à une stratégie chimique de plus en plus élaborée pour tenter de répondre convenablement et cependant, les structures réalisées par synthèse sont souvent proches de celles des polymères naturels (Guessas, 2020).

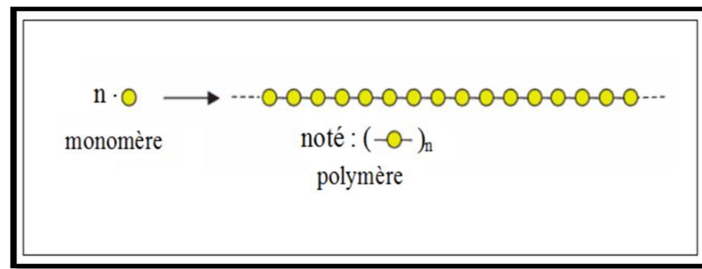


Figure II.1: Modèle schématique de la synthèse d'un polymère.

II.4. Classification des polymères

Le polymère peut avoir différentes structures chimiques, propriétés physiques, comportement mécanique, caractéristiques thermiques, etc., sur cette base de propriétés, il est possible de classer les polymères de différentes manières, nous indiquons ci-après les classifications les plus courantes :

II.4.1. Classification selon l'origine

On distingue les polymères naturels, les polymères Artificiels et les polymères Synthétiques :

II.4.1.1. Les polymères naturels

Ils sont très nombreux et existent dans la nature. On les divise généralement suivant leur provenance végétale, animale ou minérale.

Les polymères naturels également connus sous le nom des biopolymères de source végétale ou animal. Exemples de tels polymères sont le caoutchouc naturel, les polysaccharides, les polypeptides, les polynucléotides, la cellulose, l'amidon, les protéines, etc (**Zerrouki, 2022**).

II.4.1.2. Les polymères artificiels

Leur constituant de base est d'origine naturelle mais ils résultent d'une transformation chimique des fonctions portées par les unités monomères (**Zidour, 2012**).

II.4.1.3. Les polymères synthétiques

Ils sont constitués de molécules monomères qui n'existent pas dans la nature. Cependant, les structures réalisées par synthèse sont souvent proches de celles des polymères naturels (**Guessas, 2020**).

II.4.2. Classification en fonction de l'architecture

Il existe deux types de polymères : Les homopolymères et Les copolymères.

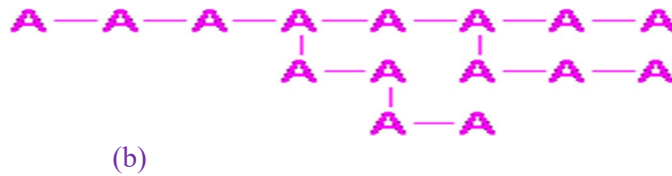
II.4.2.1. Les homopolymères

Les homopolymères sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité. Parmi les homopolymères, on peut citer le polyéthylène. Il existe différents types d'homopolymères

- Les homopolymères linéaires.



- Les homopolymères branchés.



- Les homopolymères étoilés.

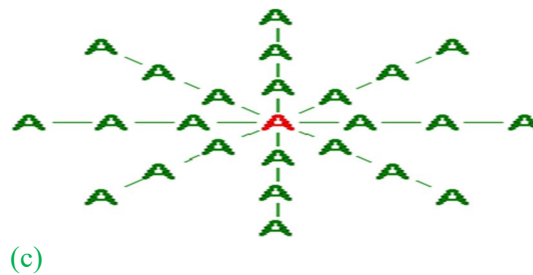


Figure II.2 : Les différentes familles des homopolymères : a) Les homopolymères linéaires, b) Les homopolymères branchés, c) Les homopolymères étoilés.

II.4.2.2. Les copolymères

Les copolymères sont des polymères qui possèdent plusieurs unités. Comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles. On parle alors de modes de copolymère

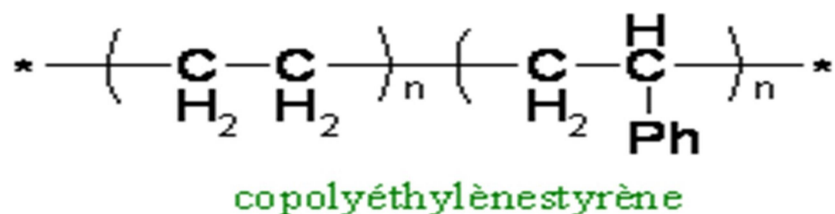


Figure II.3 : Modes de copolymères

Parmi les différents modes de copolymères, nous trouvons:

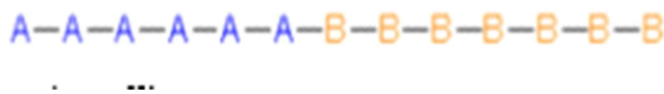
- Le mode statistique. (a)



- Le mode alterné. (b)



- Le mode séquencé. (c)



- Le mode greffé. (d)

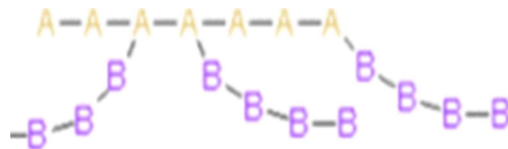


Figure II.4: Les différentes familles des copolymères : a) Le mode statistique, b) Le mode alterné, c) Le mode séquencé, d) Le mode greffé.

Ou (A) et (B) seront deux unités différentes du copolymère. Les polymères, qu'ils soient homo ou copolymères, peuvent être réticulés. Un polymère réticulé est un polymère dont certaines de ses chaînes sont reliées entre elles par des ponts chimiques covalents.

La plupart des polymères doivent être réticulés avant leur utilisation. En effet, un polymère est un liquide et pour le maintenir en place, il faut le réticuler (**Zidour, 2012**).

II.4.3. Classification selon le comportement thermique

II.4.3.1. Polymères thermoplastiques

Ce sont des polymères linéaires, fusibles et soluble dans les solvants organiques et ils sont en générale recyclable, c'est-à-dire, ils permettent le chauffage et le refroidissement plusieurs fois lors du moulage des pièces (**Dupeux, 2004**).

II.4.3.2. Les polymères thermodurcissables

Ils durcissent au cours de la polymérisation lors de la montée en température en formant un réseau tridimensionnel de monomères liés par liaisons covalentes. La transformation est unique et donne lieu à une pièce définitive. Donc, il n'existe pour eux ni solvant, ni phase

fondue. Les thermodurcissables ne sont pas recyclables et leur mise en forme est plus complexe (Perrin et al, 1999).

II.4.3.3. Les élastomères

Ces polymères présentent les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc, un élastomère au repos est constitué de longues chaînes moléculaires repliées sur elles même, sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et se déformer (Zidour, 2022).

II.5. Utilisation des polymères

On rencontre les polymères dans les petits objets usuels de la maison comme les appareils électroménagers, et aussi en tant que matériaux de construction, en revêtements et peintures dans les emballages, les pneus, les fibres textiles, les produits médicaux, chirurgicaux, prothèses, produits d'hygiène, articles de loisirs, de structures dans les véhicules de transport, les équipements électriques, les circuits électroniques, les colles. Ils s'infiltreront aussi dans l'alimentation, les produits cosmétiques...etc.. L'utilisation, dans le Génie Civil, de tous ces polymères, est relativement récente par rapport à l'origine du béton. Les premières grandes applications ont été réalisées dans le début des années 60, dans le cadre de réparations et/ou de remise en état, avant d'être envisagées en travaux neufs (Buerschaper, 1944).

II.6. Présentation des matériaux composites

Un composite est un matériau hétérogène, formé d'au moins deux constituants qui occupent des phases différentes. Ces constituants sont disposés selon organisation géométrique, qui confère au composite des propriétés supérieures à celles des constituants pris séparément.

Il est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément.

Les matériaux composites disposent d'éventualités importantes par apport aux matériaux traditionnels. Ils possèdent de nombreux avantages fonctionnels :

- ✓ Légèreté
- ✓ Résistance mécanique et chimique
- ✓ Maintenance réduite Liberté de forme et une bonne isolation électrique (Djebloun, 2004).

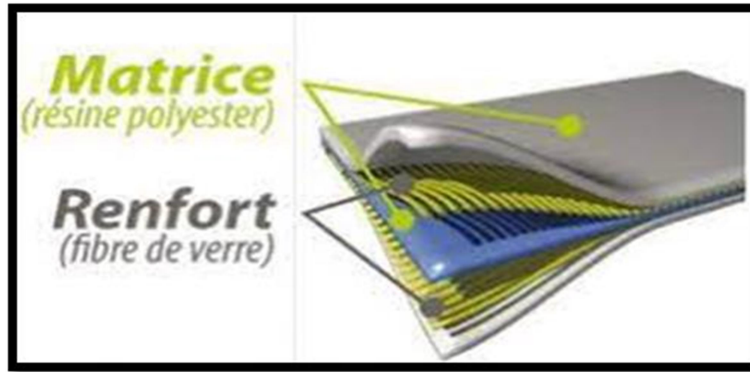


Figure II.5: Matériau composite.

II.6.1. Les propriétés des matériaux composites

Au final, les matériaux composites se différencient des matériaux classiques par un fort module d'Young, une faible masse volumique et une bonne tenue en fatigue. Ils ont l'avantage d'avoir une limite élastique très élevée, de ne pas se corroder et de résister aux produits chimiques courants tels que les graisses, huiles, peintures, etc. De plus les techniques de mise en forme par moulage permettent la réalisation de pièces complexes.

Cependant, leur résistance aux impacts est souvent plus faible que celle des matériaux métalliques classiques. Enfin, ils sont plus sensibles à la chaleur et à l'humidité (Behly, 2008).

II.6.2. Domaines d'application des matériaux composites

Les excellentes performances mécaniques des matériaux composites fibres résine en termes de caractéristiques spécifiques en font des matériaux attrayants pour l'utilisation dans les structures. En outre, l'intérêt de ces matériaux dans leurs anisotropies aisément contrôlable par le concepteur qui peut ainsi ajuster la rigidité et la résistance en fonction des sollicitations extérieures. Ainsi l'immense avantage des matériaux composites est de pouvoir être optimisé pour chaque application.

Cette optimisation résulte en une grande performance de ces matériaux, qui sont souvent de loin les plus légers. Cependant ils restent très chers à fabriquer, d'où leurs domaines d'application :

- Bâtiment et travaux publics
- Electricité et électrique
- Construction navale...

Ainsi, on note que les matériaux composites sont surtout utilisés pour des applications où une haute performance est recherchée et où le prix n'est pas le facteur primordial (Gay, 2009).

II.7. Généralités sur les nanocomposite

Un nanocomposite est un matériau composite dont le renfort possède au moins une des trois dimensions de l'ordre du nanomètre (MTIMET, 2011; Guitou, 2014). On peut les classer de la même manière que les composites, selon la morphologie du renfort qui y est dispersé et plus particulièrement selon le nombre de leur dimension nanométrique, Ils sont constitués généralement d'une matrice solide inorganique (la matrice) contenant une phase organique nanométrique (le renfort), ou vice versa (Imoudache, 2019).

II.8. Différences entre composite et nanocomposite

Les nanocomposites (NTC/Polymère) font l'objet d'une littérature très abondante. La différence par rapport aux matériaux composites classiques provient du fait que les charges possèdent au moins une dimension de l'ordre du nanomètre. Ces nano charges peuvent être monodimensionnelles (NTC), bidimensionnelles (argiles en feuillets) ou encore tridimensionnelles (nano sphères). Les (NC) présentent plusieurs intérêts par rapport aux composites classiques. Un premier intérêt réside dans la surface inter faciale entre les nano charges et la matrice. Pour un poids donné, les nanoparticules présentent une surface d'échange beaucoup plus importante que les particules de taille microscopique. Les (NC) ont donc de meilleures propriétés comparativement aux composites classiques, comme par exemple une meilleure répartition des contraintes à l'intérieur de la matrice. Bien que l'ajout de charges microscopiques dans une matrice permette d'améliorer quelques propriétés, cela se fait au détriment d'autres propriétés. Les (NC) présentent souvent des propriétés similaires aux composites classiques mais pour des teneurs en charges jusque 20 fois inférieures, limitant ainsi par la même occasion la dégradation des propriétés provoquée par l'ajout de charges macroscopiques (Penu, 2008).

Tableau II.1: Tableau des caractéristiques des nanoparticules sur les polymères.

Propriétés améliorées	Inconvénients
- Propriétés mécaniques (résistance à la traction, rigidité, ténacité) - Barrière aux gaz - Additif retardateur de flammes synergique - Stabilité dimensionnelle - Expansion thermique - Conductivité thermique - Résistance thermique - Renforcement	-Augmentation de la viscosité limitant sa mise en oeuvre - Difficultés de dispersion - Problèmes optiques - Sédimentation - Impact(s) potentiel(s) sur la santé - Coloration

II.9. Les différents nano renforts

Le renfort est généralement composé de matériau plus dur que la résine, son rôle principal est d'assurer au matériau une grande résistance surtout à la traction. En fonction de la forme des renforts, on distingue deux types de composites :

- Les composites à fibres : constitués de fibres continues ou discontinues (Fibres coupées ou courtes). Leur orientation permet de moduler les propriétés mécaniques du matériau et d'obtenir des matériaux isotropes ou anisotropes
- Les composites à particules : les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux (**Zidour, 2024**).

II.9.1. Nanocomposites à matrice polymères

Les nanocomposites polymères consistent en une matrice polymère dans laquelle sont dispersées des nanoparticules. Ces nanoparticules de formes anisotropes, ont des structures lamellaires, tubulaires, ou encore fibrillaires. On peut ainsi classer les nanocomposites polymères selon la dimension de la charge incorporée.

II.9.1.1. Renforts de type 1D

Une seule dimension est de l'ordre du nanomètre. La charge se présente sous forme de feuillet (feuillets de graphites ou feuillets d'argiles : la Montmorillonite (**Fabio et al, 2006**).

II.9.1.2. Renforts de type 2D

Deux des dimensions sont de taille nanométrique. La charge se présente donc sous forme de tube (nanotubes de carbone) (**Peeterbrock et al, 2004**). ou sous forme de fibre (silicates

aciculaires : la sépiolite).

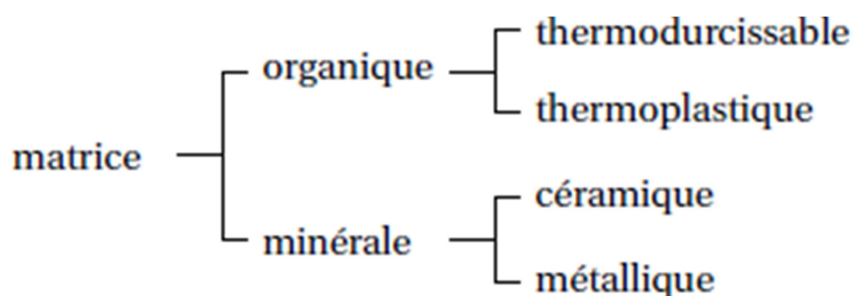
II.9.1.3. Renforts de type 3D

Les trois dimensions de la charge sont de taille nanométrique. La charge se présente sous forme de sphère. Exemple : la silice souvent utilisée dans les silicones, le noir de carbone utilisé comme renfort dans les pneus (Fina et al, 2006).

II.10. Classification des nanocomposites suivant les propriétés

II.10.1. Les polymères organiques

Généralement, les polymères organiques sont utilisés comme matrices dans les matériaux composites, elles assurent le transfert des charges entre les renforts du composite, de les protéger des chocs, des frottements et de l'environnement extérieur. En outre, elle présente l'avantage d'être chimiquement réactive, ce qui permet de liaisons fortes avec le renfort. Elle apporte aussi la tenue chimique de la structure et enfin d'assurer la forme de la structure. Les polymères organiques sont choisis selon le domaine d'utilisation du matériau composite. Il existe trois grandes familles de polymères :



II.10.1.1. Les matrices thermoplastiques (TP)

Ils se présentent sous forme des chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme, et les refroidir pour les fixer. Cette opération est réversible et ces polymères sont recyclés par simple chauffage. Ils sont de loin les plus employés du fait de leur faible coût et de leur facilité d'utilisation. Le changement d'état solide/ liquide ou pâteux peut se faire plusieurs fois avec une perte de caractéristiques à chaque cycle (Menail, 2009).

Tableau II.2: Caractéristiques moyennes des matrices thermoplastiques (TP).

Matrices (TP)	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Module d'élasticité Longitudinale	Coefficient de poisson	Contrainte de rupture (traction)	Allongement à rupture (%)	Coefficient de dilatation thermique
PP	900	1200	0.4	30	20 à 400	9×10^{-5}
PPS	1300	4000	/	65	100	5×10^{-5}
PA	1100	2000	0.35	70	200	8×10^{-5}
PES	1350	3000	/	85	60	6×10^{-5}
PEI	1150	3300	/	105	60	6×10^{-5}
PEEK	1300	4000	/	90	50	5×10^{-5}

II.10.1.2. Les Matrices Thermodurcissables (TD)

Contrairement aux composites à matrices thermoplastiques, les composites à matrices thermodurcissables ne peuvent être mis en forme qu'une fois. En effet, après polymérisation par apport de chaleur en présence d'un catalyseur, ces résines conduisent à un réseau très réticulé qui ne peut être détruit que par un apport important de chaleur. Ainsi, ils possèdent des propriétés mécaniques et thermiques plus élevées que les composites à matrices thermoplastiques (Zidour, 2012).

II.10.1.3. Matrices élastomères

Les élastomères, sont fortement répandus dans le domaine de l'industrie. La multiplicité des utilisations des élastomères provient de caractéristiques mécaniques très intéressantes - Capacité à subir de grandes déformations sous faible compressibilité.

- Capacité à dissiper de l'énergie, phénomène qui permet d'obtenir des propriétés d'isolation vibratoire et acoustique.

Le préfixe "élasto" rappelle les grandes déformations élastiques possibles, tandis que le suffixe "mère" évoque leur nature de polymères, et donc leur constitution macro moléculaire. A l'état brut, le caoutchouc n'a guère de possibilités d'emploi pratique. Pour obtenir un produit présentant de meilleures propriétés mécaniques, le caoutchouc brut doit subir un traitement chimique appelé vulcanisation : ce procédé consiste à malaxer du caoutchouc brut, à y ajouter du soufre et à chauffer le mélange. L'ensemble se transforme en un matériau élastique, stable dans une gamme de température beaucoup plus large, et résistant au fluage

sous contrainte. Ce procédé de vulcanisation, fut découvert accidentellement par Goodyear en 1839 (Sawi, 2010).

On citera quelques exemples de matière élastomère : Le polyisoprène (caoutchouc naturel), le polybutadiène (caoutchouc artificiel), le polychloroprène (néoprène). Dans la suite, on s'intéresse plus précisément à la définition des polymères amorphes et semi- cristalline.

II.10.1.4. Les Matrices Métalliques

Parmi les matériaux métalliques utilisés pour constituer la matrice des matériaux composites, sont l'Aluminium et ses alliages, le Nickel, le Titane et le Magnésium. Un avantage essentiel apporté par une matrice métallique réside dans la possibilité d'utiliser le composite à des températures élevées, avec en plus de bonne conductibilité électrique et thermique et de bonnes caractéristiques mécaniques transverses, ce qui n'est pas le cas pour les composites à matrice organique (Soualah, 2018).

II.10.1.5. Les Matrices céramiques

Ils sont utilisés pour des applications à plus haute température comme des oxydes, carbures ou Nitrures. L'utilisation des céramiques est limitée notamment par leur ténacité à rupture, leur résistance à la fatigue et aux chocs thermiques. Pour résoudre ces problèmes, l'incorporation d'une seconde phase ductile dans la matrice céramique est une solution. Les CMC sont des composites produits pour des critères recherchés aux matériaux de faibles densités, réfractaires, tenaces, à bonne résistance thermomécanique pour des domaines de températures supérieures à 1000°C et pouvant atteindre 2000°C, et même de l'ordre de 3000°C (Besnard, 2019).

II.11. Propriétés Nano composites (Nanotube de carbone/matrice Polymère)

Les propriétés des composites polymères qui peuvent être améliorées grâce à la présence des nanotubes de carbone comprennent la résistance à la traction, le module de young, la ténacité, la température de transition vitreuse, la conductivité thermique, la conductivité électrique, la résistance au solvant, les propriétés optiques (El achay, 2012).

II.11.1. Conductivité thermique

L'élaboration d'un matériau composite avec un niveau de conductivité thermique élevé est un défi important à relever du fait des applications prometteuses, en particulier dans la

réalisation composant électronique. Diverses études ont récemment montré une augmentation de (40%) de la conductivité thermique d'une résine époxy ou du polyuréthane chargée à (0,5%) en masse de (CNTs) (Cai, 2008).

II.11.2. Propriétés électriques

Dotés de propriétés mécaniques exceptionnelles, les NTC possèdent également une conductivité électrique intrinsèque très élevée. La conductivité électrique des différents NTC variait de 10^{-7} à 10^{-8} S / m, ce qui est comparable à celle des métaux. La conductivité électrique très élevée des NTC a contribué à conférer une conductivité à un matériau hautement isolant tel qu'un polymère en fabriquant des nano composites polymères. L'amélioration de la conductivité électrique du polymère isolant de plusieurs ordres de grandeur a été obtenue avec une très faible charge (0,021% en poids) de nanotubes dans les matrices de polymère, ce qui a contribué à préserver d'autres aspects de la performance des polymères tels que la clarté optique, les propriétés mécaniques Par conséquent, ces matériaux conducteurs sont de plus en plus demandés dans différents domaines d'application, tels que les revêtements conducteurs transparents, la dissipation électrostatique, la peinture électrostatique et les applications de protection contre les interférences électromagnétiques (Martin, 2004).

II.11.3. Propriétés mécanique

L'amélioration des propriétés mécaniques des polymères ne tient pas uniquement aux excellentes propriétés des nanotubes. En effet, la liaison inter faciale entre les charges et la matrice ainsi que la dispersion des charges sont également à prendre en compte. Ainsi la contrainte à la rupture peut être diminuée par la présence de défauts associés aux agglomérats de nanotubes (Andrews, 2002).

II.11.4 Propriétés au feu

Propriétés au feu Le cône calorimètre est l'un des appareils de mesure les plus pertinents pour mesurer les propriétés au feu d'un matériau : temps d'ignition, quantité de chaleur dégagé, la production de fumée, quantité de CO et de CO₂. Une forte diminution du pic de chaleur dégagée est généralement observée lorsqu'un matériau est renforcé par une nano charge de type argile (Zidour, 2022).

II.12. Préparation des nanocomposites (NTC/polymère)

Il existe trois grandes voies pour l'élaboration des nanocomposites à matrice polymère :

II.12.1. Techniques de la mise œuvre

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

II.12.1.1. Polymérisation in situ

La fabrication de (NC) par un procédé de polymérisation in situ est divisée en plusieurs étapes. Dans un premier temps, les charges sont ajoutées au monomère liquide. Etant donné la faible viscosité de ce dernier, la dispersion des charges peut s'effectuer grâce à l'utilisation d'ultrasons ou encore via agitation mécanique en régimes turbulents. Une fois les charges bien dispersées dans la matrice, on débute la polymérisation. Lorsque la polymérisation est achevée, il ne reste plus qu'à extraire le monomère résiduel (ex : par dégazage sous vide). Le premier avantage de cette méthode est qu'elle ne nécessite pas l'utilisation de solvants qui sont coûteux et difficiles à éliminer. Le deuxième avantage est qu'elle permet d'obtenir un bon état de dispersion notamment grâce au fait que les charges sont introduites dans le monomère fondu qui à une faible viscosité (Penu, 2008).

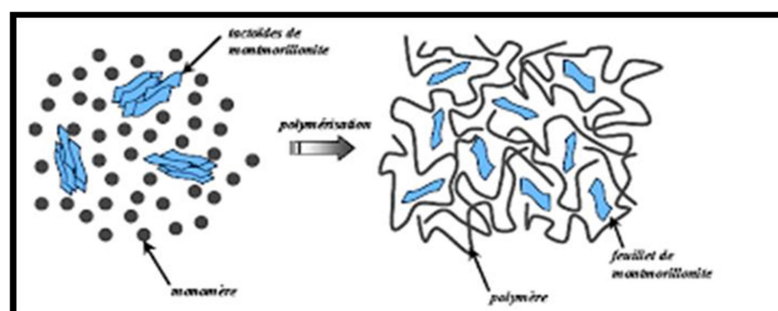


Figure II.6: schématisation de la polymérisation in-situ d'un nanocomposite lamellaire

II.12.1.2. Mélange en solution

Il est particulièrement adapté pour la fabrication des composites en faibles quantités de renforts, ce qui est le cas des nano-composites. Il consiste à mélanger les renforts et le polymère dans un solvant. La dispersion des renforts se fait généralement par ultrasons. Cette méthode implique d'utiliser un solvant compatible avec la matrice et les renforts. Bien que efficace pour disperser les renforts, cette méthode a la réputation de détruire les chaînes

macromoléculaires par une exposition non maîtrisée aux ultrasons. Il est également difficile d'éliminer totalement le solvant. Une des solutions pour contourner ces inconvénients est l'utilisation des ultrasons pour disperser les charges dans le solvant et l'ajout du polymère au mélange hors du bain ultrason. Afin de conserver la dispersion obtenue par ultrason et peut-être de l'améliorer, il est nécessaire d'utiliser un agitateur magnétique pour mélanger les charges et le polymère après le bain ultrason (**Draoui, 2020**).

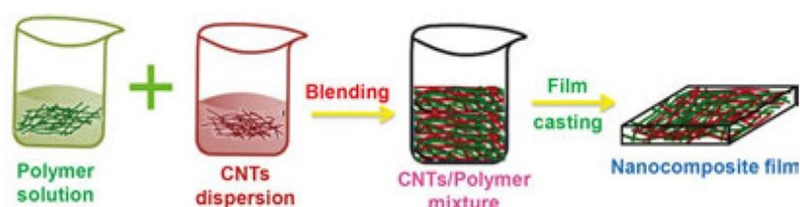


Figure II.7 : Représentation schématique de la méthode de traitement de mélange en solution

II.12.1.3. Mélange à l'état fondu

C'est la méthode de préparation des nano composites polymères préférée par le monde industriel. Elle repose sur le mélange de la matrice polymère à l'état fondu avec l'argile modifiée ou non. Si la compatibilité entre la matrice polymère et la surface des feuillets d'argile est bonne, les chaînes de polymère peuvent pénétrer dans l'espace inter foliaire et former un nano composite intercalé ou exfolié (Fig II.8). Le grand intérêt de cette méthode est la non utilisation de solvant et de permettre l'utilisation des techniques de mise en oeuvre classiques des polymères. La température du mélange et la masse moléculaire du polymère jouent un rôle sur l'intercalation à l'état fondu. Les études cinétiques d'intercalation faites par Vaia et coll (**Vaia et al, 1995**), dans le cas d'une matrice de polystyrène, ont montré l'effet positif de l'augmentation de la température ou la diminution de la masse moléculaire de la matrice polymère sur la cinétique.

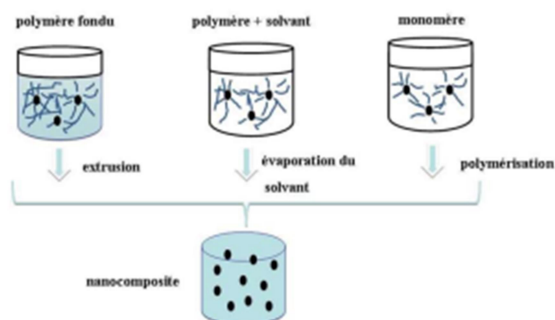


Figure II.8 : Méthodes d'élaborations des nanocomposites polymères : a) mise en œuvre dans le fondu, b) mise en solution et c) polymérisation in situ.

II.13. Dispersion des renforts

II.13.1. Utilisation des ultrasons

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

- dans un premier temps, la masse appropriée de (CNTs) est introduite dans un volume d'éthanol et placée aux ultrasons pendant (~ 1 heure), jusqu'à l'évaporation du solvant.
- ensuite la poudre de (CNTs) est ajoutée à la base et à nouveau soumis aux ultrasons durant (1 heure).

La dernière étape d'élaboration du composite consiste à rajouter le catalyseur à la solution précédente pour procéder à la réticulation du polymère.

Les images ci-dessous montrent que l'usage des ultrasons peut fournir des résultats assez satisfaisants. En effet, un tel procédé permet de briser les gros agrégats de (CNTs). Cependant, des observations au microscope optique sur une gouttelette de la solution constituée de base + (CNTs) (après 2 heures de passages aux ultrasons) montrent que des agglomérats de tailles micrométriques persistent (Fig II.9) (**Bozlar, 2009**).

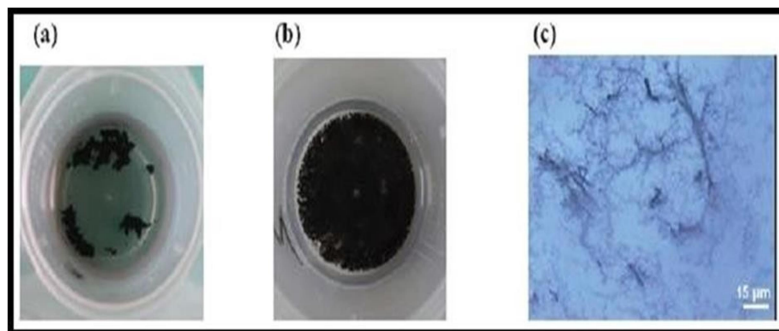


Figure II.9: (a) (CNTs) dans l'éthanol avant passage aux ultrasons. (b) Après 1 heure aux ultrasons. (c) Image microscope optique d'une gouttelette de base + (CNTs) après 2 heures de dispersion

II.13.2. Dispersion mécanique par tricylindre

A l'origine, cet appareil a été conçu pour broyer des produits dans l'industrie pharmaceutique ou alimentaire (Fig II.10). Son utilisation pour disperser les (CNTs) est récente. Thostenson et al (**Thostenson, 2006**), ont montré que le tricylindre est un outil assez performant pour disperser de manière homogène les (CNTs) dans une résine époxy. Ils ont pu ainsi obtenir des niveaux de conductivités électriques et thermiques supérieurs à d'autres travaux (utilisant notamment les ultrasons).

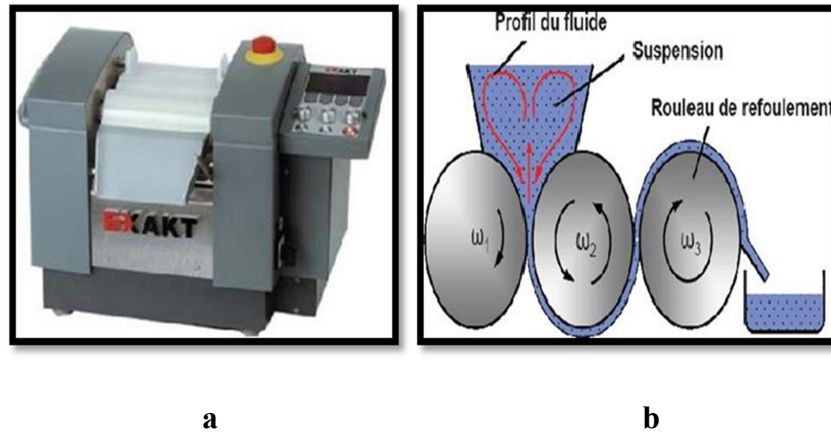


Figure II.10: a) Tricylindre Exakt 80^E. b) Schéma du circuit d'un fluide dispersé par tricylindre

Le principe général de ce système mécanique consiste à appliquer une combinaison de forces de cisaillements et de pressions sur un fluide en régime laminaire. La solution à disperser est introduite au niveau des rouleaux 1 et 2. (Fig II.10) Le cylindre du milieu (numéro 2) tourne dans un sens opposé aux deux autres. On peut modifier la vitesse de rotation du rouleau de refoulement ω^3 (tr/min), qui peut varier entre (30 et 600 tr/min). Ensuite, les deux autres cylindres tournent à des vitesses de rotation différentes avec un rapport de démultiplication tel que (**Bozlar, 2009**) :

$$\omega_2 = -\frac{1}{3} \omega_3$$

$$\omega_1 = -\frac{1}{3} \omega_3$$

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

L'avantage que nous voyons à ce procédé est qu'il permet une grande cadence de fabrication.

Ce procédé a été récemment utilisé par les membres de l'équipe de K. Schulte à Hambourg (Goj, 2004). et celle de Thostenson à Virginia Tech. (USA) pour disperser des (NTC) dans des polymères époxyde.

II.14. Conclusion

Les nanocomposites constituent une classe de matériaux à part entière : bien qu'ils aient la même composition que les classiques, notamment concernant la nature de la matrice, leur différence réside dans la taille des composants (matrice ou renfort) et dans le fait que certaines propriétés spécifiques n'apparaissent qu'à l'échelle du nanomètre.

De nombreux travaux de recherche ont été menés pour améliorer la qualité des NTC et des techniques de traitement. Le plus grand défi pour réaliser tout le potentiel des NTC consiste à obtenir une dispersion homogène de ceux-ci de manière à disposer d'une surface de charge maximale pour le transfert de charge entre charge et matrice. En effet, plusieurs facteurs sont mis en jeu dans chacune des études, ce qui rend confuse la comparaison. Mais la tendance globale montre une amélioration des propriétés (mécaniques et optiques...) des matrices polymères en présence de NTC.

Enfin, nous pouvons conclure que NTC est idéal pour la fabrication de polymères composites, mais certains problèmes doivent être abordés avant de réaliser pleinement les propriétés extraordinaires graves du nanocomposites (NTC en polymère).



CHAPITRE III

L'effet de la porosité sur les matériaux

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une étude bibliographique sur la porosité dans des matériaux. Dans un premier temps, nous introduisons quelques notions générales autour de la porosité en utilisant un bref rappel historique des études réalisées sur les matériaux poreux, leurs applications et leurs classifications, avec un accent particulier sur la porosité hiérarchique. Dans un deuxième temps, nous présentons brièvement les techniques de caractérisation de la porosité les plus utilisées ou les plus connues, allant de méthodes de caractérisation directes à des méthodes d'imagerie plus avancées. En dernier lieu, nous concluons ce chapitre avec un étatde-l'art sur différents outils et algorithmes nécessaires à la détermination des paramètres morphologiques et topologiques de la microstructure des milieux poreux.

III.2. La porosité

III.2.1. Définition d'une porosité

Selon le glossaire international d'hydrologie, la porosité peut être définie comme étant la propriété d'un milieu, d'un sol ou d'une roche de comporter des pores, c'est à dire des vides interstitiels interconnectés ou non. Elle peut être exprimée comme étant le rapport du volume de ces vides au volume total du milieu. La porosité est donc définie à la fois comme une propriété caractéristique d'un milieu poreux et comme un paramètre qui l'exprime quantitativement (rapport de volumes, sans dimension). D'après cette définition, il est possible de se représenter le défaut de porosité dans un matériau composite comme étant de très petites cavités emprisonnant à priori de la matière gazeuse (**Schoeller, 1955**). distingue deux catégories de pores:

- Les porosités ouvertes composées de vides inter-communicants connectés à la partie extérieure du matériau.
- Les porosités fermées, isolées à l'intérieur du matériau et ne permettant aucune perméabilité. Les pores pénétrants sont des pores ouverts qui ont la particularité de relier au moins deux faces du matériau poreux. Les nombreuses applications des matériaux poreux font appel à des tailles de pores qui peuvent varier de l'échelle atomique à l'échelle millimétrique. L'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) a recommandé la nomenclature relative à la taille des pores présentée à (Tableau III.1). En se référant à la gamme des tailles moyennes des interstices d'un milieu poreux et aux états physiques de l'eau contenue en leur sein, une seconde classification des porosités avait préalablement été proposée (**Schoeller 1955**). Celle-ci définit un micropore (ou pore matricielle) comme une

cavité de diamètre inférieur à 0,1 μm et un macropore (ou porosité structurale) comme une cavité de diamètre supérieur à 2,5 mm. Les mésoporosités (ou porosité texturale ou capillaire) sont donc les interstices de diamètre intermédiaire compris entre 0,1 μm et 2,5 mm (Tableau III.1) La porosité est donc un concept indépendant de la forme et des connexions entre les pores. Seuls les volumes sont considérés. Néanmoins, il est important de signaler que pour les matériaux composites, le concept de porosité correspond à des interstices de petites tailles (ordre millimétrique et inférieur) par rapport aux fissures, diaclases ou délaminages.

Tableau III.1 : Nomenclatures relatives à la taille des pores

Rayon des pores	Classe	Etat de l'eau
< 0,1 μm	Microporosité	Eau de rétention exclusivement
0,1 à 2500 μm	Macroporosité	Eau capillaire et eau gravitaire
> 2500 μm	Macroporosité	Eau gravitaire dominante

III.2.2. La porosité dans les matériaux composites

Très recherchée dans la fabrication des mousses ou des membranes filtrantes, la porosité est en revanche néfaste au matériau composite de haute performance. L'impact de ce défaut a fait l'objet de beaucoup d'attention, comme en atteste le nombre important d'études sur ce sujet. La présence de porosité dans les pièces composites est un fait inévitable. C'est ainsi que des limites furent fixées suivant les applications : dans les structures aérospatiales travaillant en dynamique, un taux de porosités dépassant 1% n'est pas tolérable ; contrairement à d'autres applications où un niveau de 5% et même plus peut être toléré. Ces niveaux critiques permettent de limiter la chute des caractéristiques mécaniques. En dessous d'un certain pourcentage volumique, compris entre 0.5% et 1% suivant le matériau étudié, la porosité n'a pas d'influence sur le comportement de la pièce si elle est bien répartie dans l'espace. En revanche, pour des taux de porosité plus élevés, les propriétés mécaniques de la pièce sont affectées de manière significative. En effet, plusieurs études montrent que les caractéristiques mécaniques des composites sont sensibles à la teneur en porosité. Dans leurs recherches sur la détermination de la pression de cuisson optimale aboutissant à un minimum de porosité, Olivier et al. ont étudié en même temps les principales causes et effets de la porosité sur les composites carbone/époxy. Deux principales causes engendrant de la porosité ont été citées :

- La première est l'emprisonnement d'air lors de l'imprégnation des fibres par la résine.
- La seconde est due à l'évaporation des substances volatiles contenues dans le système

matriciel. Après ces deux amorces, l'augmentation du taux de porosité peut survenir à partir de la diffusion de l'air ou par l'agglomération des porosités voisines.

Plusieurs auteurs ayant étudié les effets de la porosité sur les stratifiés composites épais en carbone/époxy s'accordent à dire que les propriétés de traction longitudinale des stratifiés unidirectionnels n'apparaissent pas être influencés par la teneur en porosité ; contrairement aux propriétés de compression, traction transverse ainsi que la flexion et le cisaillement inter laminaire. Tous ces auteurs mentionnent une diminution des propriétés mécaniques avec l'augmentation du taux de porosité : le cisaillement inter laminaire est la caractéristique la plus sensible.

III.3. Techniques de caractérisation de la porosité

Il existe une pléiade de techniques permettant de caractériser la porosité dans des milieux poreux. Cependant, chacune possède des avantages comme elle possède des inconvénients. Ces derniers peuvent être liés à des difficultés au niveau de leur mise en pratique (préparation de l'échantillon, mise en œuvre, ...), ou intrinsèque à la mesure elle-même (résolution, échelle, ...). Dans la première partie, on propose de présenter différentes techniques dites directes ou méthodes d'exploration classiques permettant de mesurer la porosité effective, c'est-à-dire la porosité connectée (fig III.1). En premier, on présentera le principe de deux techniques utilisées intensément dans différents domaines et qui permettent de caractériser différents types d'échantillons poreux comme les supports de catalyseurs, des matériaux à base de ciments (Zhu, 2019).

Il s'agit de la porosimétrie au mercure et de l'adsorption d'azote. Ensuite, on présentera brièvement d'autres techniques qui sont un peu moins connues, comme la saturation (imbibition), la porosimétrie à l'hélium et la buoyancy (la flottabilité). Dans la deuxième partie, on présentera des techniques d'imagerie considérées comme non invasives et plus intuitives car elles permettent d'étudier le matériau à travers l'analyse d'images. Ces techniques d'imagerie reposent sur des méthodes intrinsèquement bidimensionnelles (2D) mais peuvent faire appel à des techniques tridimensionnelles (3D) qui sont plus appropriées pour les échantillons complexes. Pour ce faire, on présente plusieurs techniques capables de fournir des informations 3D, résolues dans les trois dimensions de l'espace, telles que la tomographie aux rayons X, la microscopie électronique en transmission (TEM)...

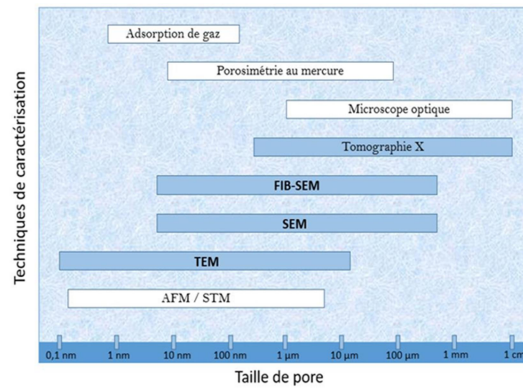


Figure III.1 : Limites des différentes techniques expérimentales de caractérisation de la porosité en fonction de la taille du pore.

III.4. Classification des milieux poreux

Les milieux poreux sont de nature très variée, en particulier du point de vue de la structure géométrique délimitant l'espace poral. La matrice solide d'un milieu poreux peut être :

III.4.1. Non consolidée

La phase solide est alors formée de grains ou de fibres non soudés entre eux (graviers, sables, limons, billes de verre et d'acier, matériaux divers...) ; les billes de verre sont notamment très utilisées en laboratoire pour étudier les phénomènes de transfert en milieu poreux.



Figure III.2 : Structure non consolidée.

III.4.2. Consolidée

Dans ce cas, la matrice solide compacte ne peut pas se diviser en grains ou fibres (roches calcaires, grès, argiles, bois, céramiques, poudres frittées, tissus végétaux et animaux...).



Figure III.3 : Structure consolidée.

III.5. Etude des causes possibles d'apparition de la porosité

En observant la création d'une bulle de gaz dans un verre de champagne, dans une casserole d'eau bouillante ou entre une tapisserie et le mur, il est évident que les phénomènes mis en jeu sont différents. Dans le premier cas, la nucléation liée aux phénomènes de diffusion sont majoritaires, tandis que dans le deuxième, ceux sont plutôt les phénomènes thermiques et dans le troisième, un effet mécanique. Ces trois aspects très différents peuvent néanmoins intervenir séparément ou simultanément lors du processus de mise en œuvre des matériaux composites pour induire la formation de porosité

III.5.1. Les causes mécaniques

La création de porosité par emprisonnement mécanique d'air lors de la conception de la pièce est la cause la plus facile à comprendre intuitivement. Les deux exemples suivants illustrent ce type de création :

Le premier concerne l'emprisonnement de poches d'air dans la résine durant sa phase de fabrication (malaxage, etc...) ou durant l'imprégnation du renfort. Ce deuxième point est très largement développé par de nombreux auteurs travaillant sur la mise en œuvre des composites par RTM ou par infusion (RLI, RFI...). L'intégralité de ces travaux concorde pour expliquer la formation lors du moulage par LCM de deux types de porosités : les macros porosités observées entre les mèches et les micros porosités, observées au sein même des mèches.

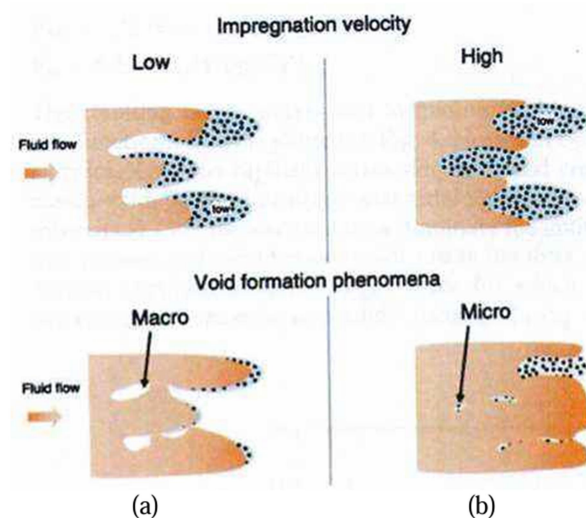


Figure III.4: Formation des macros et micros porosités en fonction de la vitesse de déplacement du fluide lors de l'imprégnation d'un renfort : (a) force de capillarité prédominante, (b) force de viscosité prédominante.

III.5.2. Les causes thermodynamiques

L'observation du diagramme de phase de l'eau montre qu'une bulle de vapeur dans la

phase liquide se forme soit en augmentant la température localement dans le liquide, soit en provoquant une rapide décompression. Ces deux paramètres favorisent en effet les nucléations homogène et hétérogène des germes initiateurs de bulle. Seul un aperçu des théories relatives à la nucléation, sont abordées dans cette partie. Au sein de la résine, les molécules de gaz diffusent au hasard et finissent par se rencontrer d'autant plus facilement que leur concentration est élevée. Les molécules diffusantes, à l'état de monomère s'additionnent donc successivement pour former des agglomérats qui ont une taille suffisante pour être qualifiés de germes (entre 50 et 100 molécules pour une espèce chimique à faible masse molaire comme l'eau (Kingery et al, 1975).

III.6. L'effet de la porosité sur les propriétés mécaniques des matériaux

Une porosité élevée diminue la résistance à la porosité des composites à matrice métallique coulée est connue comme un défaut affectant l'amélioration de la résistance, en particulier dans les composites renforcés par des particules. Des études antérieures ont montré que la formation de porosité est due notamment à la pénétration de bulles d'air dans la matrice fondue, à la vapeur d'eau à la surface des particules, au piégeage de gaz lors du mélange, au dégagement d'hydrogène et au retrait lors de la solidification. De nombreuses études ont montré que les paramètres de coulée sont les principaux facteurs influençant la formation de porosité. Les propriétés optimales des composites à matrice métallique coulée sont obtenues avec une teneur en porosité minimale. En général, une teneur en porosité accrue diminue les propriétés mécaniques telles que la résistance à la traction, le module de Young, le coefficient de Poisson et la capacité d'amortissement. La présence de porosité diminue les propriétés mécaniques des pièces moulées, car le processus de rupture est déclenché par les vides formés. Traction, le module de Young.

III.6.1. La Porosité et le module d'élasticité longitudinale (module de Young/porosité)

De vastes travaux expérimentaux et théoriques ont été entrepris pour relier l'interaction complexe de la microstructure et des propriétés mécaniques. Dans le cas de notre étude on s'est focalisé sur l'effet de la porosité sur le module d'élasticité longitudinal (le module de Young/porosité). Les expressions (relations empiriques) suivantes sont celles utilisées le plus souvent pour décrire ce comportement.

$$E=E_0 (1-bp) \quad (3.1)$$

- E : est le module de Young à la porosité P
- E₀ : le module de Young à porosité nulle

- b : Paramètre dépend de la nature et de la géométrie du matériau.

Ce modèle linéaire repris dans la théorie de l'élasticité d'Einstein (**Einstein, 1961**) qui l'utilisait pour décrire le comportement élastique d'un fluide avec une suspension de sphères dures.

$$E = E_0(e^{-bp}) \quad (3.2)$$

Cette relation exponentielle a été utilisée pour la première fois par **SPRIGGS** pour analyser l'effet de la porosité sur le module élastique de la matière réfractaire poly cristalline, oxyde d'aluminium.

$$E = E_0 \frac{(1-p)}{(1+p)} \quad (3.3)$$

Ce modèle non linéaire a été proposé par **Hasselman en 1962** est directement basé sur les expressions obtenues par **Hashin en 1962** pour les modules de matériaux avec suspensions diluées de pores sphériques.

$$E = E_0 (1 - bp^{\frac{2}{3}}) \quad (3.4)$$

Cette relation à puissance (2/3) a été dérivée par Martin et **Haynes en 1971** pour le module de Young des matériaux poreux et a été utilisée tardivement pour analyser les données de plusieurs matériaux.

Le principal inconvénient de ces modèles est qu'ils ne peuvent pas être utilisés pour toute la plage de porosité. Il semble que certaines conditions doivent être remplies par un bon modèle pour toute la plage de porosité : il doit être aussi simple que possible, doit posséder le plus petit nombre possible de paramètres d'ajustement et il est nécessaire d'intégrer la porosité critique (seuil de percolation) au modèle. A cause cela, le modèle exponentiel de Knudsen et Spriggs équation ne convient pas car aucun seuil de percolation n'est pris en compte. De plus, il est également inapplicable pour les mousses, car il ne satisfait pas la condition limite $E = 0$ pour $P = 1$ (E est le module de Young et P est la porosité).

Au cours des dernières années, les progrès dans la prédiction des propriétés élastiques matériaux poreux à la relation empirique loi-puissance de Phani et de Niyogi.

$$E = E_0 \left(1 - \frac{p}{p_c}\right)^{f_G} \quad (3.5)$$

III.6.2. Porosité et le module de cisaillement

Le même modèle de percolation est valable pour le module de cisaillement de matériaux poreux.

$$G = G_0 \left(1 - \frac{p}{p_c}\right)^{f_G} \quad (3.6)$$

Où f_G est l'exposant caractéristique du module de cisaillement. Du point de vue de la stabilité mécanique du système, on peut s'attendre à ce que le seuil de percolation soit évidemment le même pour le module de Young et le module de cisaillement. Cependant, les exposants caractéristiques du module de Young et du module de cisaillement ne sont pas identiques en général. Il existe de nombreux paramètres qui influencent le module de Young et le module de cisaillement des matériaux poreux.

III.6.3. Porosité et le coefficient de Poisson ν

Dans le cas de matériaux isotropes homogènes, le coefficient de Poisson ν peut être déterminé le coefficient de Poisson du matériau solide, nous pouvons simplifier

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (3.7)$$

Après le remplacement des équations (3.5) et (3.6) dans l'équation (3.8) nous obtenons :

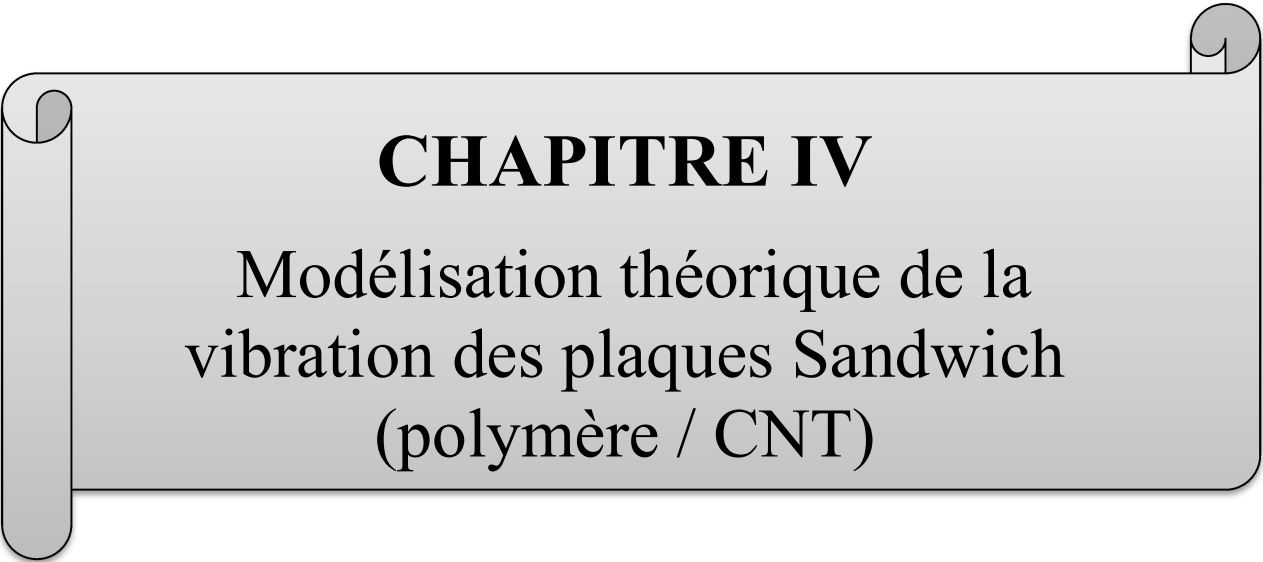
$$\nu = \frac{E_0}{2G_0} \left(\frac{p_c - p}{p_c}\right)^{F_E - F_G} - 1 \quad \text{pour} \quad P \leq P_c \quad (3.8)$$

Dans ce cas, le seuil de percolation est à nouveau considéré comme identique du point de vue de la stabilité mécanique. Cependant, comme les exposants caractéristiques du module de Young et du module de cisaillement ne sont pas toujours les mêmes, il est nécessaire de considérer un nouvel exposant caractéristique pour le coefficient de Poisson Où : $F_V = F_E - F_G$.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre on a parlé sur la porosité des plaques sandwich en NTC. Il existe deux points de vue divergents sur la porosité en particulier dans les matériaux composites. La porosité d'un matériau n'est pas qu'un simple paramètre physique : elle conditionne sa capacité à interagir avec son environnement. Dans le contexte des bâtiments performants et durables, le choix de matériaux en fonction de leur type de porosité est crucial pour garantir à la fois le confort hygrothermique, la pérennité de l'enveloppe et qualité de l'air intérieur.

Les évolutions récentes des normes et techniques de construction mettent en avant l'importance de bien caractériser et maîtriser cette propriété.



CHAPITRE IV

Modélisation théorique de la
vibration des plaques Sandwich
(polymère / CNT)

IV.1. Introduction

Les plaques constituent des éléments structuraux fondamentaux largement utilisés dans de nombreux secteurs industriels tels que l'aéronautique, le génie civil et le domaine de l'énergie. L'importance stratégique et économique de ces domaines explique l'intérêt soutenu que suscitent les plaques depuis d'un siècle.

Mais cordialement les matériaux composites sandwich se distinguent par leur légèreté, leur haute résistance (mécanique et chimique), et leur résistance aux (chocs et à la chaleur...), tout en nécessitant peu d'entretien. Elle offre également une grande flexibilité de conception et prolongent la durée de vie des équipements.

Dans ce chapitre, nous présentons les différentes théories de déformation des plaques. Parmi ses théories on trouve c'elles qui ne tiennent pas en compte l'effet de cisaillement transversale dans l'épaisseur de la plaque tel que la théorie classique des plaques (CPT), et d'autres modèles qui tiennent en compte.

IV.2. Les plaques

Une plaque est un solide tridimensionnel, défini par une surface de référence plane(x,y) et une épaisseur, petite par rapport aux autres dimensions à savoir sa longueur et sa largeur,

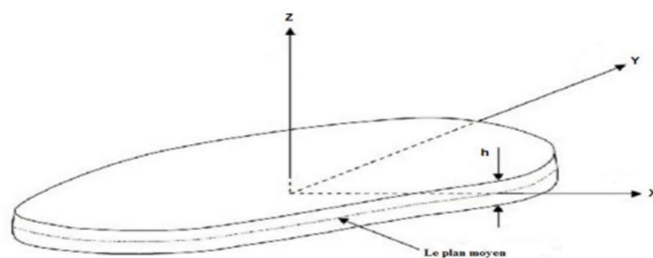


Figure IV.1 : Exemple de plaque d'une géométrie quelconque

On définit :

- **Le plan moyen (plan médian)** : plan situé à équidistance entre les faces.
- **La fibre neutre** : élément de matière d'épaisseur infinitésimale situé autour du plan moyen (O, x, y), avec $z = 0$.
- **Une fibre normale** : ensemble des points situés sur une normale au plan médian, à un endroit (x, y) donné ; elle a pour direction z .

- **L'épaisseur h** : l'épaisseur de la plaque ; le plan inférieur est donc le plan $z = -h/2$ et le plan supérieur est le plan $z = h/2$ (Guessas, 2020).

IV.3. Différents types de plaques

En fonction de la nature des matériaux qui les constituent et de la géométrie de leur section transversale, les plaques peuvent être classées en trois catégories :

- ❖ **Les plaques isotropes** : elles sont constituées d'un matériau isotrope (acier, béton) et leur section transversale est homogène. Elles sont définies par deux paramètres élastiques (E et ν : respectivement le module d'élasticité et le coefficient de Poisson)
- ❖ **Les plaques orthotropes** : leurs propriétés élastiques sont différentes dans deux directions perpendiculaires. L'orthotropie peut être naturelle (bois) ou techniques (dalles rédiées). Le comportement de ces dalles est défini par quatre paramètres élastiques et on les retrouve dans les constructions navales, aéronavales, de réservoirs de l'industrie chimique, des bâtiments et d'ouvrages d'art.
- ❖ **Les plaques anisotropes** : leurs propriétés élastiques sont différentes dans toutes les directions. Neuf paramètres élastiques sont suffisants pour les définir. Elles sont souvent constituées de matériaux composites et sont surtout utilisées dans l'industrie aéronavale (Rezgui, 2023).

IV.4. Description des plaques

A côté des structures linéaires (poutres et cadres) où une dimension domine les deux autres, on rencontre fréquemment, dans la construction, des structures qui s'étendent sur une surface plane ou courbe (structures bidimensionnelles). Dans ce cas, deux dimensions dominent la troisième (l'épaisseur). Si la surface est courbe, on parle de coque ou de coupole.

Si la surface est plane, on doit distinguer entre :

- ✓ Les voiles plans ou les charges agissant essentiellement dans le plan du voile ;
- ✓ Les dalles, où les charges agissent essentiellement perpendiculairement à la surface.

Ce type de structure est rencontré très fréquemment dans la construction. Dans le bâtiment, cette forme de structure est même prédominante.

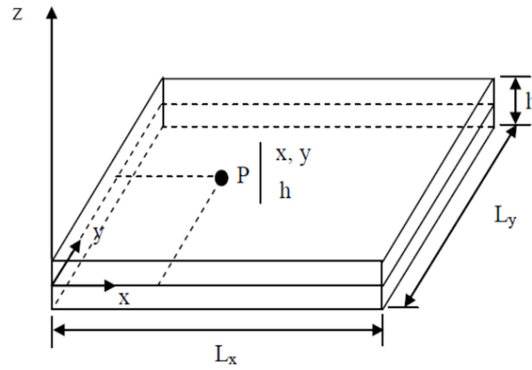


Figure IV.2: Description d'une plaque.

IV.5. Les Sandwichs

Ces composites sont constitués de deux couches externes, appelées peaux qui sont séparées par un noyau léger et résistant appelé l'âme, qui peut être en mousse, en bois ou en nid d'abeille. Cette structure offre une combinaison unique de rigidité et de légèreté, les rendant idéaux pour de nombreuses applications, notamment dans l'industrie aéronautique et automobile. Les peaux et l'âme sont assemblées par collage à l'aide d'adhésifs, souvent des résines telles que les polyesters ou les époxydes. Ces adhésifs jouent un rôle essentiel dans le transfert des contraintes mécaniques entre les peaux et l'âme, tout en offrant une protection aux fibres contre les agressions extérieures de l'environnement (Elmascri, 2024).

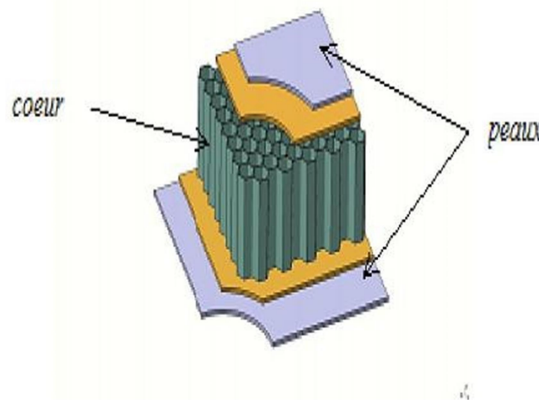


Figure IV.3: Matériau composite sandwich

IV.6. Les hypothèses pour l'étude des plaques

La théorie des plaques, qu'on considère dans ce qui suit, est basée sur :

-L'hypothèse dite des sections droites(ou planes) : les points matériels situés sur une normale à la surface moyenne non déformée restent sur une droite dans la configuration déformée. Les déplacements u et v (suivant x et y) d'un point quelconque, varient alors linéairement en z et le déplacement transversal w (suivant z) n'est fonction que de x et y . Cette hypothèse a été

proposée par plusieurs auteurs, dont les plus connus sont Reissner, Henchy, Bollé, Mindlin et permet de prendre en compte l'influence des déformations. Elle a été initialement proposée pour les plaques isotropes mais ensuite a été appliquée aux plaques orthotropes et multicouches.

- L'hypothèse d'une déformation transversale ε_z nulle (pas de variation d'épaisseur)
- L'hypothèse d'anisotropie plane pour chaque couche dans le cas d'une plaque composite (l'axe z est l'axe d'orthotrope de toutes les couches).

IV.7. Les hypothèses fondamentales de la théorie des plaques :

IV.7.1. La théorie classique des plaques mince de Love-Kirchhoff (Classical Laminated Plate Theory CLPT) :

La théorie classique des plaques minces (CLPT) se base sur les hypothèses de Love-Kirchhoff : L'épaisseur est faible donc les contraintes dans le sens de l'épaisseur sont supposées nulles, on reste en petites déformations, les sections normales au plan moyen de la plaque restent normales lors de la déformation en négligeant les effets de déformation de cisaillement transverse. Cette théorie est très bien décrite dans Timoshenko et Woinowsky (Reddy, 1997).

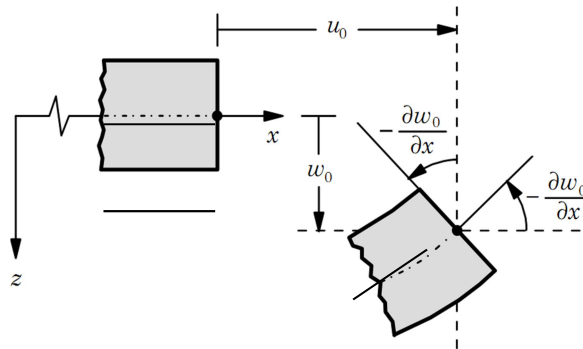


Figure IV.4 : Illustration de la plaque de Love-Kirchhoff

Le champ de déplacements de Love-Kirchhoff s'écrit (fig IV.4) :

$$\begin{cases} u(x, y, z) = u_0(x, y) - z \frac{\partial w_0}{\partial x} & (4.1a) \\ v(x, y, z) = v_0(x, y) - z \frac{\partial w_0}{\partial y} & (4.1b) \\ w(x, y, z) = w_0(x, y) & (4.1c) \end{cases}$$

Où :

u_0 et v_0 sont les déplacements de membrane dans les directions x et y respectivement, et w_0 la flèche de la plaque, $\frac{\partial w_0}{\partial x}$ et $\frac{\partial w_0}{\partial y}$: les rotations dues à la flexion (sans cisaillement). Le plan principal de la plaque est le plan (o, x, y) et l'épaisseur est orientée selon l'axe $z \in [-h/2 ; h/2]$.

Comme ce modèle ne tient pas en compte l'effet de cisaillement transverse, il ne donne pas des résultats précis pour les plaques épaisses (**Guellil, 2022**).

IV.7.2. La théorie de déformation en cisaillement du premier ordre (First order shear déformation Théory FSDT)

Puisque la CPT donne des résultats non précis pour les plaques épaisses, la théorie de déformation de cisaillement du premier ordre a prolongée la théorie classique des plaques en tenant compte de l'effet de cisaillement transverse. Dans ce cas les contraintes et les déformations sont uniformes et constantes à travers l'épaisseur de la plaque, ce qui nécessite l'introduction d'un du facteur de correction de cisaillement. Les études sur la théorie de déformation en cisaillement du premier ordre (FSDT) peuvent être trouve dans les références (**Reissner, 1945**) et (**Mindlin, 1951**). La FSDT est utilisé par plusieurs chercheurs, (**Valizadeh et al, 2013**).

La théorie du premier ordre est basée sur le champ de déplacement suivant :

$$u(x,y,z) = u_0(x,y) - z \frac{\partial w_0}{\partial x} + z \phi_x \quad (4.2a)$$

$$v(x,y,z) = v_0(x,y) - z \frac{\partial w_0}{\partial y} + z \phi_y \quad (4.2b)$$

$$w(x,y,z) = w_0(x,y), \quad (4.2c)$$

Avec : (u_0, v_0, w_0) et (ϕ_x, ϕ_y) sont les déplacements en membrane et les rotations autour des axes y et x, respectivement.

Le champ de déplacement définis dans l'expression ci-dessus permet de reprendre la théorie classique des plaques décrite dans la dernière section par le remplacement. (**Bourada 2018**)

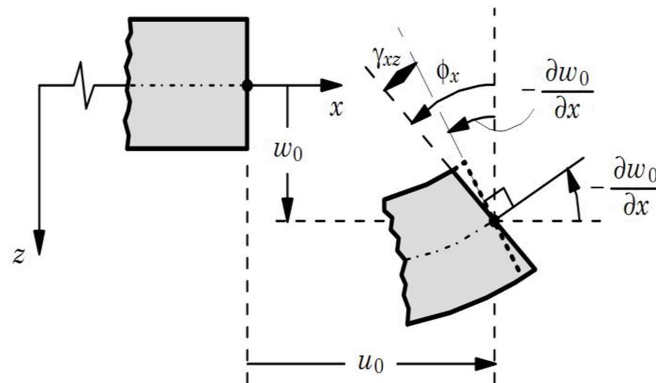


Figure IV.5 : Illustration de la plaque de REISSNER-MINDLIN

IV.7.3. théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé (Higher Order Shear Deformation Theory HSDT)

Cette classe de théories plus fines a pour base un développement du déplacement dans l'épaisseur à l'ordre deux ou plus. Ces théories sont particulièrement bien adaptées à la modélisation du comportement des plaques épaisses ou poutres courtes, où la déformation transverse joue un rôle prédominant. La plupart de ce modèle utilise un développement en série de Taylor, la théorie d'ordre élevé est basée sur une distribution non linéaire des champs dans l'épaisseur. Par conséquent, on tient en compte des effets de la déformation transversale de cisaillement et/ou de la déformation normale transversale. Ces modèles n'exigent pas des facteurs de correction. Les références sur de tels modèles peuvent être trouvées dans (Reissner, 1975).

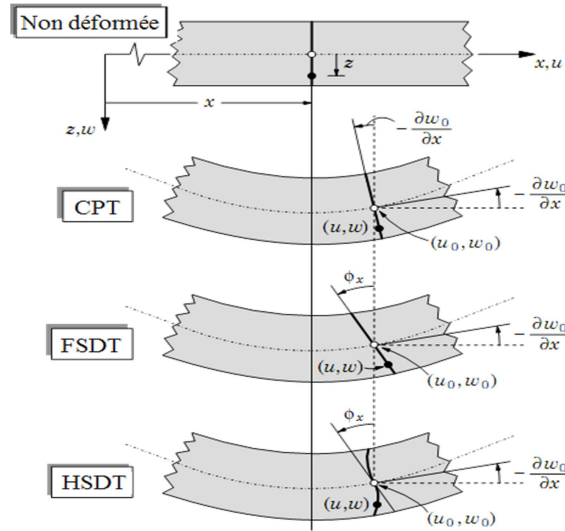


Figure IV.6 : Description de la déformation d'une plaque selon les théories classique (CLPT, FSDT, HSDT)

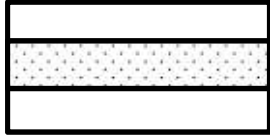
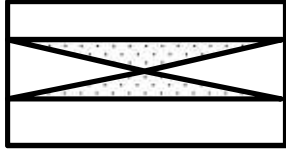
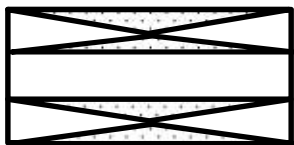
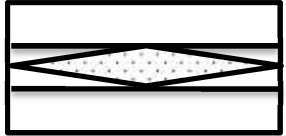
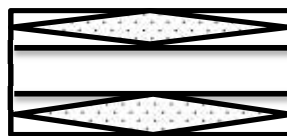
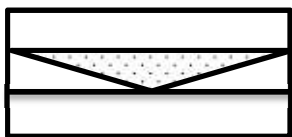
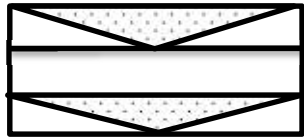
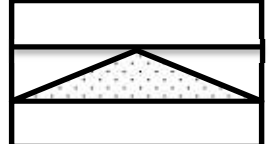
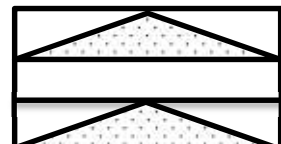
Le champ de déplacement est généralement écrit comme suit :

$$\begin{cases} u(x, y, z) = u_0(x, y) - z \frac{\partial w_0}{\partial x} + f(z) \phi_x & (4.3a) \\ v(x, y, z) = v_0(x, y) - z \frac{\partial w_0}{\partial y} + f(z) \phi_y & (4.3b) \\ w(x, y, z) = w_0(x, y) & (4.3c) \end{cases}$$

IV.8. Configuration géométrique et propriétés de la plaque sandwich étudiée

une plaque composite composée de trois couches se référant à des coordonnées (x,y,z) de longueur a de largeur b et d'épaisseur h. Dans cette étude, les faces supérieure et inférieure de la plaque sandwich sont à $z = \pm h / 2$, La plaque en sandwich est composée de trois couches élastiques, à savoir, la couche 1, la couche 2 et la couche 3 de bas en haut de la plaque sont désignées par $h_1 = -h / 2$, h_2 , h_3 , $h_4 = h / 2$, respectivement.

Tableau IV.1 : Distribution nanotube de carbone dans plaque sandwich

0-UD-0 	$V_{cnt}^3 = 0$ $V_{cnt}^2 = V_{cnt}$ $V_{cnt}^1 = 0$	UD-0-UD 	$V_{cnt}^3 = V_{cnt}^*$ $V_{cnt}^2 = 0$ $V_{cnt}^1 = V_{cnt}^*$
0-X-0 	$V_{cnt}^3 = 0$ $V_{cnt}^2 = 2\left(\frac{-z/h_2}{h_2}\right) V_{cnt}^*$ $V_{cnt}^1 = 0$	X-0-X 	$V_{cnt}^3 = 2\left(\frac{(h_4+h_1)-2z}{h_4-h_3}\right) V_{cnt}^*$ $V_{cnt}^2 = 0$ $V_{cnt}^1 = 2\left(\frac{(h_1+h_2)-2z}{h_1-h_2}\right) V_{cnt}^*$
0-O-0 	$V_{cnt}^3 = 0$ $V_{cnt}^2 = 2\left(\frac{-z/h_2}{h_2} + 1\right) V_{cnt}^*$ $V_{cnt}^1 = 0$	0-0-0 	$V_{cnt}^3 = 2\left(1 - \frac{(h_4+h_3)-2z}{h_4-h_3}\right) V_{cnt}^*$ $V_{cnt}^2 = 0$ $V_{cnt}^1 = 2\left(1 - \frac{(h_2+h_1)-2z}{h_2-h_1}\right) V_{cnt}^*$
0-V-0 	$V_{cnt}^3 = 0$ $V_{cnt}^2 = 2\left(\frac{h_3-z}{h_3-h_2}\right) V_{cnt}^*$ $V_{cnt}^1 = 0$	V-0-V 	$V_{cnt}^3 = 2\left(\frac{z-h_3}{h_4-h_3}\right) V_{cnt}^*$ $V_{cnt}^2 = 0$ $V_{cnt}^1 = 2\left(\frac{z-h_1}{h_2-h_1}\right) V_{cnt}^*$
0-Λ-0 	$V_{cnt}^3 = 0$ $V_{cnt}^2 = 2\left(\frac{z-h_2}{h_3-h_2}\right) V_{cnt}^*$ $V_{cnt}^1 = 0$	Λ-0-Λ 	$V_{cnt}^3 = 2\left(\frac{h_4-z}{h_4-h_3}\right) V_{cnt}^*$ $V_{cnt}^2 = 0$ $V_{cnt}^1 = 2\left(\frac{h_2-z}{h_2-h_1}\right) V_{cnt}^*$

On suppose que les plaques sandwichs sont renforcées par plusieurs types différents de distribution alignée de nanotubes de carbone sur toute l'épaisseur de la plaque. La couche UD-CNT représente la distribution uniforme et la couche FG-CNT est la distribution fonctionnellement graduée des CNT. La densité de NTC dans la zone est constante et la fraction volumique varie en fonction de l'épaisseur des couches. Les propriétés matérielles du CNTRC, du mélange de NTC et d'un polymère isotrope peuvent être estimées selon la règle du mélange (Esawi 2007]. Dans la présente étude, selon la règle du mélange en introduisant les paramètres d'efficacité du CNT (η_1, η_2, η_3), le module de Young effectif et le module de cisaillement de la couche CNTRC peuvent être exprimés par (Shen, 2009).

$$E_{11} = \eta_1 V_{cnt} E_{11}^{cnt} + V_p E^p \quad (4.4a)$$

$$\frac{\eta_2}{E_{22}} = \frac{V_{cnt}}{E_{22}^{cnt}} + \frac{V_p}{E^p} \quad (4.4b)$$

$$\frac{\eta_3}{G_{12}} = \frac{V_{cnt}}{G_{12}^{cnt}} + \frac{V_p}{G^p} \quad (4.4c)$$

Où : $E_{11}^{cnt}, E_{22}^{cnt}, G_{12}^{cnt}$ indiquer les modules de Young et le module de cisaillement des SWCNT, respectivement, E^p et G^p représentent les propriétés de la matrice isotrope. η_1, η_2, η_3 sont les paramètre d'efficacité de matrice / CNT, V_{cnt} et V_p sont le fractions volumiques des nanotubes de carbone et de la matrice, respectivement, et il est à noter que la somme des fractions volumiques des deux constituants est égale à l'unité. Pour d'autres propriétés en termes de coefficient de Poisson (ν) et de masse volumique(ρ), celles-ci peuvent être écrites comme suit:

$$V_{12} = V_{cnt} \nu_{12}^{cnt} + V_p \nu^p ; \rho = V_{cnt} \rho^{cnt} + V_p \rho^p \quad (4.5)$$

On suppose que la fraction volumique de deux plaques sandwich obéit à une fonction utilisée pour décrire les distributions des CNT alignés dans le sens de l'épaisseur des plaques sandwich décrites aux tableaux (IV.1)

Où V_{cnt}^* est la fraction volumique de NTC donnée, qui peut être obtenue à l'aide de l'équation suivante :

$$V_{cnt}^* = \frac{W_{cnt}}{W + (\rho^{cnt} / \rho^m)(1 - W_{cnt})} \quad (4.8a)$$

Où W_{cnt} est la fraction massique du nanotube de carbone dans la plaque nano-composite dans cette étude, les paramètres d'efficacité du CNT (V_{cnt}^*) associé à la fraction volumique donnée sont (Zhu, 2012).

$\eta_1 = 0.149$ et $\eta_2 = \eta_3 = 0.934$ pour $V_{cnt}^* = 0.11$;

$\eta_1 = 0.150$ et $\eta_2 = \eta_3 = 0.941$ pour $V_{cnt}^* = 0.14$;

$\eta_1 = 0.149$ et $\eta_2 = \eta_3 = 1.381$ pour $V_{cnt}^* = 0.17$;

Le module de Young de la matrice polymère, sous l'effet de porosité, peut être défini en fonction du changement de la porosité, est défini par

Uniforme porosité :

$$E_p = E_{p0} \left(1 - \frac{2(1-\sqrt{1-p0})}{\pi} \right)^2 \quad (4.9a)$$

$$\rho = \rho_0 \left(1 - \frac{2(1-\sqrt{1-p0})}{\pi} \right)$$

Symétrique porosité 1

$$E_p = E_{p0} \left(1 - p0 \cos\left(\frac{\pi z}{h}\right) \right)$$

$$\rho = \rho_0 \left(1 - Pm \cos\left(\frac{\pi z}{h}\right) \right) \quad (4.9b)$$

Symétrique porosité 2 :

$$E_p = E_{p0} \left(1 - p0 \cos\left(-\left|\frac{\pi z}{h}\right| + \frac{\pi}{2}\right) \right)$$

$$\rho = \rho_0 \left(1 - Pm \cos\left(-\left|\frac{\pi z}{h}\right| + \frac{\pi}{2}\right) \right) \quad (4.9c)$$

Asymétrique porosité :

$$E_p = E_{p0} \left(1 - p0 \cos\left(\frac{\pi z}{2h} + \frac{\pi}{4}\right) \right)$$

$$\rho = \rho_0 \left(1 - (1 - \sqrt{1-p0}) \cos\left(\frac{\pi z}{2h} + \frac{\pi}{4}\right) \right) \quad (4.9d)$$

Ou : $Pm = 1 - \sqrt{1-p0}$

IV.9. Equations de mouvement

Pour décrire le comportement dynamique des plaques sandwichs du CNTRC. La théorie des de déformation en cisaillement d'ordre élevé (HSDT) a été utilisée pour produire les équations de mouvement utilisées. Le champ de déplacement basé sur la théorie d'une point situé en (x,y,z) dans les plaques en sandwich du CNTRC est donné ci-dessous :

$$\begin{aligned}
 u(x, y, z, t) &= u_0(x, y, z, t) - z \frac{\partial w_0}{\partial x} + f(z) \phi_x, \\
 v(x, y, z, t) &= v_0(x, y, z, t) - z \frac{\partial w_0}{\partial y} + f(z) \phi_y, \\
 w(x, y, z, t) &= w_0(x, y, z, t)
 \end{aligned} \tag{4.10a}$$

Dans lequel u_0 , v_0 et w_0 sont les déplacements suivant les directions x , y et z dans le plan médian de la plaque, t est le temps.

ϕ_x et ϕ_y : sont les rotations totale de courbure de la section transversale en un point quelconque de le plan de référence, à savoir la théorie de la déformation en cisaillement d'ordre élevé (HSDT). Si le dernier terme de l'équation (4.10a) est négligé, les déplacements sont réduits à la théorie des plaques classique (CPT).

Déformations linéaires dans le plan et transversales sont données par :

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

Les composantes de déformation associées au champ de déplacement dans l'équation (4.10a) peuvent être exprimées comme suit :

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + \Psi(z) \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \\
 \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} + \Psi(z) \frac{\partial \phi_y}{\partial y} \\
 \gamma_{xy} &= \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} + \Psi(z) \left(\frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \right) \\
 \gamma_{xz} &= \frac{\partial \Psi(z)}{\partial z} \phi_x ; \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial \Psi(z)}{\partial z} \phi_y
 \end{aligned} \tag{4.11a}$$

L'expression des relations constitutives s'écrit sous la forme :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} ; \quad \begin{Bmatrix} \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{44} & 0 \\ 0 & Q_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} \tag{4.12a}$$

Où Q_{ij} sont les constants élastiques transformés

$$Q_{11} = \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12} \nu_{21}}, Q_{22} = \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12} \nu_{21}}, Q_{12} = \frac{\nu_{21} E_{11}}{1 - \nu_{12} \nu_{21}} \quad (4.13a)$$

$$Q_{66} = G_{12}, Q_{55} = G_{13}, Q_{44} = G_{23} \quad (4.13b)$$

Le principe de Hamilton est appliqué pour produire les équations du mouvement

$$\int_0^1 (\delta U_s + \delta K) dt = 0 \quad (4.14a)$$

Où, δU_s et δK sont la variation virtuelle de l'énergie de déformation, le travail virtuel effectué par des forces externes et l'énergie cinétique virtuelle.

Tout d'abord, l'expression de l'énergie de déformation virtuelle est :

$$\delta U_s = \sum_{n=1}^3 \int_{h_n}^{h_{n+1}} \int_A (\sigma_{xx} \delta \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} \delta \varepsilon_{yy} + \sigma_{xy} \delta \gamma_{xy} + \sigma_{yz} \delta \gamma_{yz} + \sigma_{xz} \delta \gamma_{xz}) dA dx \quad (4.15a)$$

En substituant Eq. (4.10a) dans Eq (4.14a), on obtient

$$\delta U_s = \sum_{n=1}^3 \int_A \{ N_{xx} \delta u_{0,x} - M_{xx} \delta w_{0,xx} + P_{xx} \delta \phi_{x,x} + N_{yy} \delta v_{0,y} - M_{yy} \delta w_{0,yy} + P_{yy} \delta \phi_{y,y} + N_{xy} (\delta u_{0,y} + \delta v_{0,x}) - 2M_{xy} \delta w_{0,xy} + P_{xy} (\delta \phi_{x,y} + \delta \phi_{y,x}) + R_{yz} \delta \phi_y + R_{xz} \delta \phi_x \} dx dy \quad (4.16a)$$

Les résultats de contrainte dans l'équation (4.15a) peuvent être comme suit :

$$(N_{xx}, N_{yy}, N_{xy}) = \sum_{n=1}^3 \int_{h_n}^{h_{n+1}} (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}) dz \quad (4.17a)$$

$$(M_{xx}, M_{yy}, M_{xy}) = \sum_{n=1}^3 \int_{h_n}^{h_{n+1}} (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}) dz \quad (4.17b)$$

$$(P_{xx}, P_{yy}, P_{xy}) = \sum_{n=1}^3 \int_{h_n}^{h_{n+1}} (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}) dz \quad (4.17c)$$

$$R_{yz} = \sum_{n=1}^3 \int_{h_n}^{h_{n+1}} \frac{\partial \psi(z)}{\partial z} \sigma_{yz} dz ; R_{xz} = \sum_{n=1}^3 \int_{h_n}^{h_{n+1}} \frac{\partial \psi(z)}{\partial z} \sigma_{xz} dz$$

En substituant Eq. (4.11) dans Eq. (4.16), on obtient les contraintes résultantes sous la forme de composants de rigidité de matériau et de déplacement.

$$\begin{Bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(0)} \\ \varepsilon_{yy}^{(0)} \\ \gamma_{xy}^{(0)} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & 0 \\ B_{12} & B_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(1)} \\ \varepsilon_{yy}^{(1)} \\ \gamma_{xy}^{(1)} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(\psi)} \\ \varepsilon_{yy}^{(\psi)} \\ \gamma_{xy}^{(\psi)} \end{Bmatrix} \quad (4.18a)$$

$$\begin{Bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & 0 \\ B_{12} & B_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(0)} \\ \varepsilon_{yy}^{(0)} \\ \gamma_{xy}^{(0)} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(1)} \\ \varepsilon_{yy}^{(1)} \\ \gamma_{xy}^{(1)} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & 0 \\ E_{12} & E_{22} & 0 \\ 0 & 0 & E_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(\psi)} \\ \varepsilon_{yy}^{(\psi)} \\ \gamma_{xy}^{(\psi)} \end{Bmatrix} \quad (4.18b)$$

$$\begin{Bmatrix} P_{xx} \\ P_{yy} \\ P_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(0)} \\ \varepsilon_{yy}^{(0)} \\ \gamma_{xy}^{(0)} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & 0 \\ E_{12} & E_{22} & 0 \\ 0 & 0 & E_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(1)} \\ \varepsilon_{yy}^{(1)} \\ \gamma_{xy}^{(1)} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & 0 \\ F_{12} & F_{22} & 0 \\ 0 & 0 & F_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(\psi)} \\ \varepsilon_{yy}^{(\psi)} \\ \gamma_{xy}^{(\psi)} \end{Bmatrix} \quad (4.18c)$$

$$\begin{Bmatrix} R_{yz} \\ R_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{55} & 0 \\ 0 & H_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{yz}^{(0)} \\ \gamma_{xz}^{(0)} \end{Bmatrix}$$

Où

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(0)} \\ \varepsilon_{yy}^{(0)} \\ \gamma_{xy}^{(0)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{Bmatrix}; \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(1)} \\ \varepsilon_{yy}^{(1)} \\ \gamma_{xy}^{(1)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix}; \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(\psi)} \\ \varepsilon_{yy}^{(\psi)} \\ \gamma_{xy}^{(\psi)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \end{Bmatrix}; \begin{Bmatrix} \gamma_{yz}^{(0)} \\ \gamma_{xz}^{(0)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \phi_y \\ \phi_x \end{Bmatrix} \quad (4.19a)$$

En termes d'analyse vibratoire des plaques, l'énergie cinétique virtuelle du système peut être exprimée comme suit :

$$\delta K = \int_V [\dot{u} \delta \dot{u} + \dot{v} \delta \dot{v} + \dot{w} \delta \dot{w}] dx dy dz \quad (4.20a)$$

$$\begin{aligned} \delta K = \int_A \{ \dot{u}_0 \delta \dot{u}_0 + \dot{v}_0 \delta \dot{v}_0 + \dot{w}_0 \delta \dot{w}_0 \} + I_1 \left(\frac{\partial \dot{w}_0}{\partial x} \delta \dot{u}_0 + \frac{\partial \dot{w}_0}{\partial y} \delta \dot{v}_0 + \dot{u}_0 \frac{\partial \dot{w}_0}{\partial x} + \dot{v}_0 \frac{\partial \dot{w}_0}{\partial y} \right) + I_2 \left(\frac{\partial \dot{w}_0}{\partial x} \frac{\partial \delta \dot{w}_0}{\partial x} + \right. \\ \left. \frac{\partial \dot{w}_0}{\partial y} \frac{\partial \delta \dot{w}_0}{\partial y} \right) + I_3 (\dot{\phi}_x \delta \dot{u}_0 + \dot{u}_0 \delta \dot{\phi}_x + \dot{\phi}_y \delta \dot{v}_0 + \dot{v}_0 \delta \dot{\phi}_y) - I_4 \left(\dot{\phi}_x \frac{\partial \delta \dot{w}_0}{\partial x} + \frac{\partial \dot{w}_0}{\partial x} \delta \dot{\phi}_x + \dot{\phi}_y \frac{\partial \delta \dot{w}_0}{\partial y} + \right. \\ \left. \frac{\partial \dot{w}_0}{\partial y} \delta \dot{\phi}_y \right) + I_5 (\dot{\phi}_x \delta \dot{\phi}_x + \dot{\phi}_y \delta \dot{\phi}_y) \} dx dy \quad (4.20b) \end{aligned}$$

$$\text{Où } [I_0, I_1, I_2, I_3, I_4, I_5] = \int_{-h/2}^{h/2} \rho(z) [1, z, z^2, \psi(z), z\psi(z), (\psi(z))^2] dz$$

qui sont définies comme les inerties de masse

$$\delta u_0 : \frac{\partial N_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} = I_0 \ddot{u}_0 - I_1 \frac{\partial \dot{w}_0}{\partial x} + I_3 \ddot{\phi}_x \quad (4.21a)$$

$$\delta v_0 : \frac{\partial N_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} = I_0 \ddot{v}_0 - I_1 \frac{\partial \dot{w}_0}{\partial y} + I_3 \ddot{\phi}_y \quad (4.21b)$$

$$\delta w_0 : \frac{\partial^2 M_{xx}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_{yy}}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} = I_0 \ddot{w}_0 + I_1 \left(\frac{\partial \ddot{u}_0}{\partial x} + \frac{\partial \ddot{v}_0}{\partial y} \right) - I_2 \left(\frac{\partial^2 \dot{w}_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{w}_0}{\partial y^2} \right) + I_4 \left(\frac{\partial \ddot{\phi}_x}{\partial x} + \frac{\partial \ddot{\phi}_y}{\partial y} \right) \quad (4.21c)$$

$$\delta \phi_x : \frac{\partial P_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial P_{xy}}{\partial y} - R_{xz} = I_3 \ddot{u}_0 - I_4 \frac{\partial \dot{w}_0}{\partial x} + I_5 \ddot{\phi}_x \quad (4.21d)$$

$$\delta \phi_y : \frac{\partial P_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial P_{xy}}{\partial x} - R_{yz} = I_3 \ddot{v}_0 - I_4 \frac{\partial \dot{w}_0}{\partial y} + I_5 \ddot{\phi}_y \quad (4.21e)$$

La méthode de Navier est utilisée pour formuler les solutions sous forme fermée aux problèmes de flexion et de vibration des plaques CNTRC à appuis simples de longueur (a) et de largeur (b). Les plaques sont supposées placées sur la fondation élastique de Pasternak. Les conditions d'appuis simples le long de tous les bords des plaques peuvent être considérées comme :

$$u_0(x, y, t) = \sum_{M=1}^{\infty} \sum_{N=1}^{\infty} U_{MN} e^{i\omega t} \cos \alpha x \sin \xi y \quad (4.22a)$$

$$v_0(x, y, t) = \sum_{M=1}^{\infty} \sum_{N=1}^{\infty} V_{MN} e^{i\omega t} \sin \alpha x \cos \xi y \quad (4.22b)$$

$$w_0(x, y, t) = \sum_{M=1}^{\infty} \sum_{N=1}^{\infty} W_{MN} e^{i\omega t} \sin \alpha x \sin \xi y \quad (4.22c)$$

$$\phi_x(x, y, t) = \sum_{M=1}^{\infty} \sum_{N=1}^{\infty} \Theta_{xMN} e^{i\omega t} \cos \alpha x \sin \xi y \quad (4.22d)$$

$$\phi_y(x, y, t) = \sum_{M=1}^{\infty} \sum_{N=1}^{\infty} \Theta_{yMN} e^{i\omega t} \sin \alpha x \cos \xi y \quad (4.22e)$$

$$\text{Où : } \alpha = \frac{M\pi}{a}, \quad \xi = \frac{N\pi}{b}, \quad i = \sqrt{-1}$$

Où U_{MN} et V_{MN} , W_{MN} , Θ_{xMN} Θ_{yMN} sont des paramètres arbitraires et ω , la fréquence de

vibration libre

$$q(x, y) = \sum_{M=1}^{\infty} \sum_{N=1}^{\infty} Q_{MN} \sin(\alpha x) \sin(\xi y)$$

$$\text{Où : } Q_{MN} = \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b q(x, y) \sin(\alpha x) \sin(\xi y) dx dy$$

Pour différents types de charges agissant sur les plaques CNTRC peuvent être définis comme :

$$Q_{MN} = \begin{cases} q_0 & (M = N = 1) \\ \frac{16q_0}{MN\pi^2} & (M = N = 1, 3, 5 \dots) \end{cases}$$

En substituant l'Eq. (4. 22e) dans l'Eq. (4.21e), on obtient les solutions sous forme fermée qui sont présentées sous la forme matricielle suivante.

$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} \end{pmatrix} - \omega^2 \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} & m_{15} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} & m_{25} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} & m_{35} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} & m_{45} \\ m_{51} & m_{52} & m_{53} & m_{54} & m_{55} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{MN} \\ V_{MN} \\ W_{MN} \\ \theta_{xMN} \\ \theta_{yMN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Ou

$$\begin{aligned} s_{11} &= -A_{11}\alpha^2 + A_{66}\xi^2, \quad s_{12} = -A_{12}\alpha\xi - A_{66}\alpha\xi, \quad s_{13} = B_{11}\alpha^3 - B_{12}\alpha\xi + 2B_{66}\alpha\xi^2, \\ s_{14} &= -C_{11}\alpha^2 - C_{66}\xi^2, \quad s_{15} = -C_{12}\alpha\xi - C_{66}\alpha\xi, \quad s_{21} = -A_{12}\alpha\xi - A_{66}\alpha\xi \\ s_{22} &= -A_{22}\xi^2 - A_{66}\alpha^2, \quad s_{23} = B_{12}\alpha^2\xi - B_{22}\xi^3 + 2B_{66}\alpha\xi^2, \quad s_{24} = -C_{12}\alpha\xi - C_{66}\alpha\xi \\ s_{25} &= -C_{22}\xi^2 - C_{66}\alpha^2, \quad s_{31} = B_{11}\alpha^3 + B_{12}\alpha\xi^2 + 2B_{66}\alpha\xi^2, \quad s_{32} = B_{12}\alpha^2\xi + B_{22}\xi^3 + 2B_{66}\alpha^2\xi \\ s_{33} &= -D_{11}\alpha^4 - 2D_{12}\alpha^2\xi^2 - D_{22}\xi^4 - 4D_{66}\alpha^2\xi^2, \quad s_{34} = E_{11}\alpha^3 - E_{12}\alpha\xi^2 + 2E_{66}\alpha\xi^2 \\ s_{35} &= E_{12}\alpha^2\xi + E_{22}\xi^3 + 2E_{66}\alpha^2\xi, \quad s_{41} = -C_{11}\alpha^2 - C_{66}\xi^2, \quad s_{42} = -C_{12}\alpha\xi - C_{66}\alpha\xi \\ s_{43} &= E_{11}\alpha^3 + E_{12}\alpha\xi^2 + 2E_{66}\alpha\xi^2, \quad s_{44} = -F_{11}\alpha^2 - F_{66}\xi^2 - H_{44}, \quad s_{45} = -F_{12}\alpha\xi - F_{66}\alpha\xi \\ s_{51} &= -C_{12}\alpha\xi - C_{66}\alpha\xi, \quad s_{52} = -C_{22}\xi^2 - C_{66}\alpha^2, \quad s_{53} = E_{12}\alpha^2\xi + E_{22}\xi^3 + 2E_{66}\alpha^2\xi \\ s_{54} &= -F_{12}\alpha\xi - F_{66}\alpha\xi, \quad s_{55} = -F_{22}\xi^2 - F_{66}\alpha^2 - H_{55} \end{aligned}$$

Et

$$\begin{aligned} m_{11} &= -I_0, \quad m_{12} = 0, \quad m_{13} = I_1\alpha, \quad m_{14} = -I_3, \quad m_{15} = 0 \\ m_{21} &= 0, \quad m_{22} = -I_0, \quad m_{23} = I_1\xi, \quad m_{24} = 0, \quad m_{25} = -I_3 \\ m_{31} &= I_1\alpha, \quad m_{32} = I_1\xi, \quad m_{33} = -I_0 - I_2(\alpha^2 + \xi^2), \quad m_{34} = I_4\alpha, \quad m_{35} = I_4\xi \\ m_{41} &= -I_3, \quad m_{42} = 0, \quad m_{43} = I_4\alpha, \quad m_{44} = -I_5, \quad m_{45} = 0 \\ m_{51} &= 0, \quad m_{52} = -I_3, \quad m_{53} = I_4\xi, \quad m_{54} = 0, \quad m_{55} = -I_5 \end{aligned}$$

Les paramètres adimensionnels utilisés pour présenter Pour l'analyse vibratoire :

CNTRC sont les suivants.

$$\bar{\omega} = \omega h \sqrt{\rho^p / E^p} \quad (4.23a)$$

IV.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous donnons différentes théories des plaques sandwich visant à simplifier la modélisation et l'analyse des problèmes complexes. Une comparaison entre les théories classiques, de premier ordre et d'ordre élevé, a été effectuée en mettant l'accent sur la représentation de la déformation en cisaillement des plaques. Il a été démontré que d'autres théories dérivées de ces modèles peuvent fournir, dans certains cas des résultats acceptables et précis.

De manière générale, il est difficile de trouver une théorie unique capable de s'appliquer à tous les cas possibles, que ce soit en termes de matériaux (matériaux composites anisotropes, isotropes, stratifiés ou sandwich) ou de phénomènes physiques étudiés (réponse dynamique,.....etc.). La théorie idéale devrait être simple, facile à mettre en œuvre, et peu coûteuse en temps de calcul. Chaque théorie offre ainsi des avantages et des limites spécifiques selon son domaine d'application.

Les équations du mouvement ont été obtenues à partir du principe de Hamilton, suivies de la dérivation des équations différentielles générales de la vibration transversale d'une plaque sandwich renforcée



CHAPITRE V

Résultats et discussion

V.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats obtenus dans le cadre de l'étude du comportement vibratoire des plaques sandwich en matériaux composites renforcées par des nanotubes de carbone (CNT). Une validation de la théorie d'ordre élevé développée est d'abord effectuée par comparaison avec les résultats issus de la littérature. Par la suite, une étude paramétrique approfondie est menée pour évaluer l'influence de divers facteurs sur les fréquences naturelles de ces structures. Les paramètres analysés incluent la distribution des CNT (UD, X, O, V, Λ), les configurations de porosité (symétriques, asymétriques, uniformes), les rapports géométriques (a/h et a/b), ainsi que la localisation du renforcement (au noyau ou aux faces). L'objectif est de dégager les combinaisons optimales permettant d'améliorer les performances vibratoires dans un contexte d'allègement structurel.

V.2. Résultats et discussions

Les résultats numériques de la vibration libre des plaques sandwich renforcées par des nanotube de carbone sont présentés et discutés. Les caractéristiques matérielles effectives des plaques renforcées par de nanotube de carbone (CNTRC) utilisées tout au long de ce travail sont indiquées ci-après.

Le polymère (PMPV) est utilisé comme matrice dans laquelle les propriétés des matériaux sont : $\nu_p = 0.34$, $\rho_p = 1150 \text{ kg/m}^3$ et $E_p = 2.1 \text{ GPa}$. Pour le matériau de renforcement, des nanotubes de carbone type armchair (10,10) SWCNTs ont choisi avec les propriétés $\nu_{12}^{cnt} = 0.175$, $\rho^{cnt} = 1400 \text{ kg/m}^3$, $E_{11}^{cnt} = 5.6466 \text{ TPa}$, $E_{22}^{cnt} = 7.0800 \text{ TPa}$ et $G_{12}^{cnt} = G_{13}^{cnt} = G_{23}^{cnt} = 1.9445 \text{ TPa}$, suivantes selon l'étude de Zhu et al (ZHU, 2012). Afin de prouver la validité des modèles mathématiques de la présente théorie, les résultats obtenus sont adoptés et comparés à ceux déjà existants dans la littérature présentés par Draoui et al (Draoui, 2019) et (Wattanasakulpong, 2015).

Tableau V.1 : Comparaison des fréquences adimensionnelles (ω) d'une plaque sandwich nanorenforcée (distribution 0-1-0, rapport $a/h = 10$).

		UD-CNT	X-CNT	O-CNT	V-CNT
$V_{cnt} = 0.11$	TSDT*	0.1355	0.1469	0.1134	0.1245
	SSDT*	0.1357	0.1472	0.1132	0.1246
	Présent	0.1335	0.1469	0.1134	0.1245
$V_{cnt} = 0.14$	TSDT*	0.1436	0.1541	0.1213	0.1328
	SSDT*	0.1438	0.1545	0.1211	0.1329
	Présent	0.1436	0.1541	0.1214	0.1328
$V_{cnt} = 0.17$	TSDT*	0.1683	0.1819	0.1409	0.1544
	SSDT*	0.1685	0.1821	0.1408	0.1546
	Présent	0.1683	0.1819	0.1410	0.1544

* [Wattanasakulpong 2015]

Le tableau V.1 met en évidence l'influence significative de la distribution des nanotubes de carbone (CNTs) comportement vibratoire des plaques sandwich. La configuration en forme de X présente les meilleures performances en termes de rigidité et de fréquences adimensionnelles, tandis que la distribution de type O affiche les résultats les plus faibles. La distribution en V offre quant à elle un comportement intermédiaire, légèrement supérieur à celui du type O. Ainsi, il existe une concordance entre les résultats de la théorie actuelle et ceux de la TSDT pour chaque fraction volumique. Par ailleurs, l'étude confirme la précision et la robustesse du modèle numérique adopté. L'optimisation de la distribution des CNTs conduit à une augmentation des fréquences adimensionnelles, ce qui améliore la résistance aux vibrations un avantage pour applications techniques.

Le tableau V.2 compare les fréquences adimensionnelles de deux configurations (0-1-0 et 1-0-1) dans une plaque sandwich nano-composite, avec une fraction volumique de CNTs fixée $V_{cnt} = 0.17$, pour deux rapports géométriques $a/h = 5$ et $a/h = 10$, et modes de vibration ((1-1), (1-2), (2-2)). La distribution 1-0-1 montre les fréquences les plus élevées, traduisant une meilleure rigidité. Une distribution 0-1-0, les fréquences sont plus modérées, Une augmentation du rapport a/h entraîne une diminution globale des fréquences. Les résultats obtenus via la théorie actuelle sont plus performants que ceux de Draoui, qui a utilisé une fonction linéaire.

Tableau V.2 : Comparaison des fréquences adimensionnelles (ω) d'une plaque sandwich nanorenforcée, ($V_{\text{cnt}} = 0,17$, 0-1-0).

Plaque sandwich renforcée au niveau du noyau							
		a/h=5			a/h=10		
	(m-n)	(1-1)	(1-2)	(2-2)	(1-1)	(1-2)	(2-2)
UD-CNT	Draoui**	0.4305	0.6311	0.9962	0.1678	0.2196	0.4305
	Présent	0.4382	0.9558	1.0637	0.1683	0.4123	0.4382
FG-CNT	Draoui**	0.4048	0.6100	0.9810	0.1425	0.1999	0.4048
	Présent	0.3992	0.8651	0.9908	0.1410	0.3680	0.3992
Plaque sandwich renforcée au niveau des faces supérieure et inférieure							
UD-CNT	Draoui **	0.4305	0.6311	0.9962	0.1678	0.2196	0.4305
	Présent	0.4382	0.9558	1.0637	0.1683	0.4123	0.4382
FG-CNT	Draoui**	0.4463	0.6543	1.0179	0.1824	0.2343	0.4463
	Présent	0.4522	0.9830	1.0920	0.1819	0.4263	0.4522

** [Draoui 2019]

Tableau V.3: Effet du rapport a/b sur les fréquences adimensionnelles d'une plaque sandwich nanocomposite (1-2-1, $V_{\text{cnt}} = 0.11$, $p = 0,1$).

Plaque sandwich renforcée au niveau du noyau					
a/b	0-UD-0	0-X-0	0-O-0	0-V-0	0-A-0
10	0.0799	0.0875	0.0698	0.0739	0.0739
30	0.0097	0.0110	0.0082	0.0088	0.0088
60	0.0025	0.0028	0.0021	0.0022	0.0022
Plaque sandwich renforcée au niveau des faces					
a/b	UD-0-UD	X-0-X	O-0-O	V-0-V	A-0-A
10	0.1306	0.1326	0.1288	0.1300	0.1300
30	0.0197	0.0199	0.0195	0.0196	0.0196
60	0.0051	0.0052	0.0051	0.0051	0.0051

Le tableau V.3 illustre l'effet de rapports géométriques a/b sur fréquences adimensionnelles, pour fraction volumique $V_{\text{cnt}} = 0.11$ et une configuration (1-2-1), en présence d'une porosité ($p=0.1$). Les valeurs indiquent que l'augmentation de rapport a/b entraîne une diminution de la fréquence adimensionnelle. La distribution **X-0-X** offre

cependant les meilleures performances en termes de rigidité.

Tableau V.4: Effet des différentes fractions volumiques sur la fréquence adimensionnelle, avec ($p = 0.1$, $a/h = 10$).

Plaque sandwich renforcée au niveau du noyau					
V_{cnt}^*	0-UD-0	0-X-0	0-O-0	0-V-0	0-Λ-0
0.11	0.0799	0.0875	0.0698	0.0739	0.0739
0.14	0.0846	0.0930	0.0731	0.0778	0.0788
0.17	0.0975	0.1074	0.0845	0.0898	0.0898
Plaque sandwich renforcée au niveau des faces					
V_{cnt}^*	UD-0-UD	X-0-X	O-0-O	V-0-V	Λ-0-Λ
0.11	0.1306	0.1326	0.1288	0.1300	0.1300
0.14	0.1376	0.1399	0.1354	0.1369	0.1369
0.17	0.1605	0.1632	0.1583	0.1599	0.1599

Ce tableau analyse l'effet de différentes fractions volumiques de CNTs $V_{cnt}^* = 0.11$, $V_{cnt}^* = 0.14$, $V_{cnt}^* = 0.17$, sur la fréquence adimensionnelle, pour une porosité uniforme ($p=0.1$) et rapport géométrique $a/h=10$, selon une configuration (1-2-1). Les résultats montrent une augmentation progressive des fréquences adimensionnelles avec l'augmentation de la fraction volumique. Cette augmentation met en évidence l'effet positif de l'ajout de CNTs comme renfort dans le matériau pour une amélioration de sa rigidité.

Tableau V.5 : Effet des différentes configurations de la plaque sandwich sur les fréquences adimensionnelles, avec ($p = 0.1$, $a/h = 10$, $V_{cnt}=0.11$).

	Plaque sandwich renforcée au niveau des faces				
	UD-0-UD	X-0-X	O-0-O	V-0-V	Λ-0-Λ
1-1-1	0.1326	0.1361	0.1293	0.1315	0.1315
1-2-1	0.1306	0.1326	0.1288	0.1300	0.1300
2-1-2	0.1337	0.1385	0.1288	0.1320	0.1320
Plaque sandwich renforcée au niveau du noyau					
	0-UD-0	0-X-0	0-O-0	0-V-0	0-Λ-0
1-1-1	0.0648	0.0686	0.0605	0.0622	0.0622
1-2-1	0.0799	0.0875	0.0698	0.0739	0.0739
2-1-2	0.0579	0.0590	0.0569	0.0573	0.0573

Le tableau V.5 présente l'effet des différentes configurations de la plaque sandwich et du renforcement sur la fréquence adimensionnelle des plaques sandwich, avec fraction volumique $V_{cnt} = 0.11$, et une porosité fixée ($P=0.1$). On constate, que les fréquences adimensionnelles varient en fonction de l'épaisseur relative des couches renforcée.

La fréquence adimensionnelle la plus faible est observée pour la distribution (2-1-2), tandis que la plus élevée correspond à la distribution (1-2-1) lorsque le renforcement est concentré au niveau du noyau. Cette tendance s'inverse lorsque le renforcement est appliqué aux faces supérieure et inférieure. Cette variation peut s'expliquer par l'influence de l'épaisseur des couches renforcées sur la rigidité globale de la structure.

Tableau V.6 : Influence distributions de porosité sur fréquences adimensionnelles dans plaque sandwich nanorenforcée, avec ($p=0.2$, $a/h=10$, $V_{cnt}=0.11$)

Plaque sandwich renforcée au niveau du noyau					
	0-UD-0	0-X-0	0-O-0	0-V-0	0-Λ-0
UP [uniforme porosité]	0.0706	0.0873	0.0693	0.0735	0.0735
SP1 [symétrique porosité1]	0.0802	0.0876	0.0703	0.0743	0.0743
SP2 [symétrique porosité2]	0.0791	0.0870	0.0686	0.0729	0.0729
ASP [Asymétrique porosité]	0.0797	0.0873	0.0695	0.0735	0.0735
Plaque sandwich renforcée au niveau des faces					
	UD-0-UD	X-0-X	O-0-O	V-0-V	Λ-0-Λ
UP [uniforme porosité]	0.1300	0.1320	0.1281	0.1294	0.1294
SP1 [symétrique porosité1]	0.1292	0.1312	0.1273	0.1285	0.1285
SP2 [symétrique porosité2]	0.1310	0.1330	0.1291	0.1304	0.1304
ASP [Asymétrique porosité]	0.1299	0.1319	0.1280	0.1293	0.1293

L'analyse du tableau V.6 révèle que la fréquence adimensionnelle la plus élevée est observée dans le cas de X- CNT associée à une porosité de type SP2 au niveau des faces, en revanche dans la zone du noyau, c'est la distribution de type X qui présente les meilleures performances lorsqu'elle est combinée à une porosité de type SP1. Ces résultantes confirment que le schéma de distribution des fibres de carbone exerce un effet significatif sur la performance structurelle de la plaque, avec une influence différente selon le type de porosité

appliqué au noyau ou aux faces.

V.2.1. Résultats de plaque sandwich renforcée aux core

La figure V.1 montre l'évolution de la fréquence naturelle en fonction la distribution de porosité sur les plaques sandwich renforcées au niveau de noyau avec rapport d'aspect $a/h=10$ et fraction volumique constante $V_{cnt} = 0.11$. On remarque que les valeurs dans le cas 0-O-0, 0-V-0, 0- Λ -0 est augmentent avec l'augmentation du la porosité par contre dans le cas 0-UD-0 et 0-X-0 il diminue, La forme de distribution de porosité en V et Λ donne à peu près les mêmes valeurs, par conséquent la distribution 0-O-0, où les CNTs sont regroupés vers le centre, engendre les fréquences les plus faibles

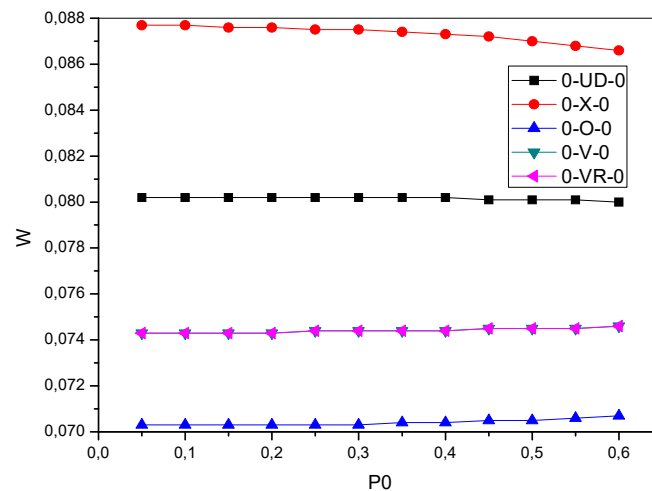


Figure V.1 : L'effet de la porosité sur la fréquence adimensionnelle pour les différentes distributions de nanotube de carbone ($V_{cnt}=0.11$; $a/h=10$; SP1; 1-2-1)

La figure V.2 illustre l'évolution de la fréquence naturelle d'une plaque sandwich nanocomposite en fonction l'effet de distribution de porosité avec une distribution (SP1), en supposant une répartition des nanotubes de carbone de type 0-O-0, c'est-à-dire concentrée au centre. On remarque que la fréquence naturelle varie de manière modérée mais significative selon la configuration de porosité adoptée.

La distribution **1-4-1** affiche systématiquement les **fréquences les plus élevées**, indiquant que la concentration de la porosité au cœur de la plaque est mécaniquement plus avantageuse que dans les zones externes.

À l'inverse, la configuration **2-1-2** présente les **valeurs les plus basses**, ce qui montre que la présence de pores dans les couches extérieures est plus préjudiciable pour la réponse

vibratoire de la plaque, en raison de leur contribution importante au moment.

Les configurations **1-1-1** et **1-2-1** se situent entre ces deux extrêmes, avec une légère dégradation de la fréquence lorsque la porosité augmente. Cela suggère une bonne stabilité mécanique pour des distributions symétriques de porosité modérée.

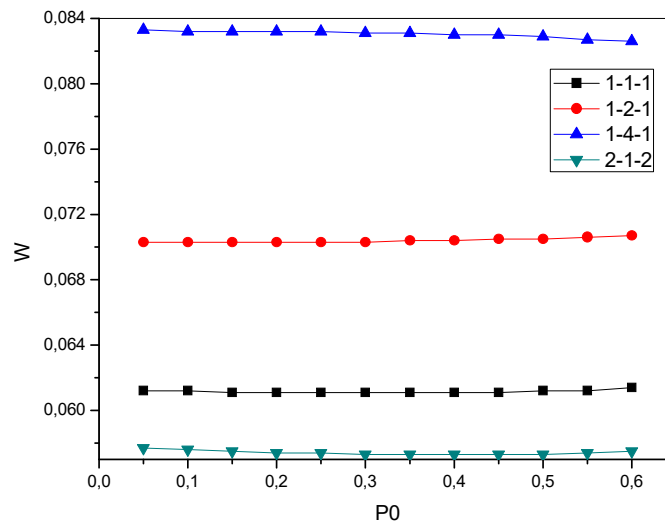
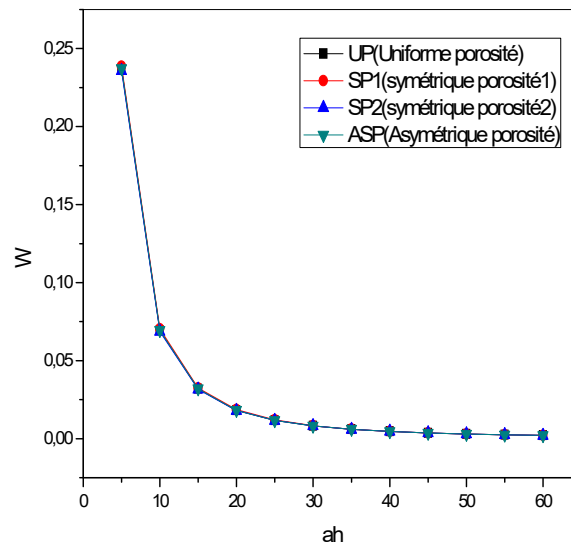


Figure V.2 : L'effet de la porosité en fonction de la fréquence adimensionnelle

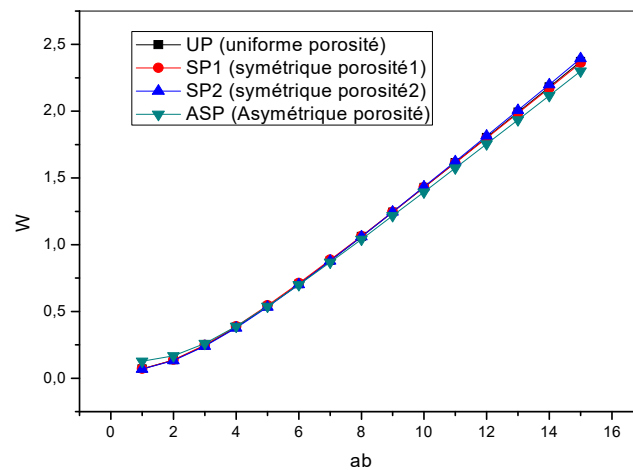
Pour les différentes distributions de nanotube de carbone ($V_{cnt}=0.11$; $a/h=10$; SP1; 0-O-0)

La figure V.3 illustre l'effet du rapporte a/h et du monde de distribution de la porosité des plaques sandwich. UP (porosité uniforme), SP1 (porosité symétrique type 1), SP2 (symétrique type 2) et ASP (asymétrique type), dans le cas où la distribution des CNTs est fixée pour une configuration 1-2-1, avec une fraction volumique $V_{cnt}=0.11$ et une porosité égale 0,2. A partir de ces courbes, on remarque les configurations de porosité est diminué avec l'augmentation du rapport a/h de la plaque. De plus, les valeurs sont proches ce qui est confirmé par la superposition des quatre courbes.



FigureV.3: L'effet de rapport géométrique (a/h) en fonction de la fréquence adimensionnelle pour les différentes distributions de porosité ($V_{\text{cnt}}=0.11$; $P_0=0.2$; 1-2-1 et 0-O-0)

À partir des courbes présentées dans la figure V.4, on remarque que les valeurs des fréquences dans le cas de (UP, SP1, SP2, ASP) sont proches et augmentent avec l'augmentation du rapport (a/b).



FigureV.4 : L'effet de rapport géométrique (a/b) en fonction de la fréquence adimensionnelle pour les différentes distributions de porosité ($V_{\text{cnt}}=0.11$; $P_0=0$; 1-4-1)

V.2.2. Résultats de plaque sandwich renforcée aux faces

Les résultats présentés dans la figure V.5 montrent que la distribution O des CNTs offre les meilleures performances vibratoires dans plaques sandwich renforcée, en présence de porosité. À l'inverse, la distribution X présente les fréquences les plus élevées. L'augmentation du taux de porosité entraîne une diminution des fréquences. Ces observations soulignent l'importance du choix de la distribution des CNTs et la porosité dans l'optimisation du comportement vibratoire des structures composites.

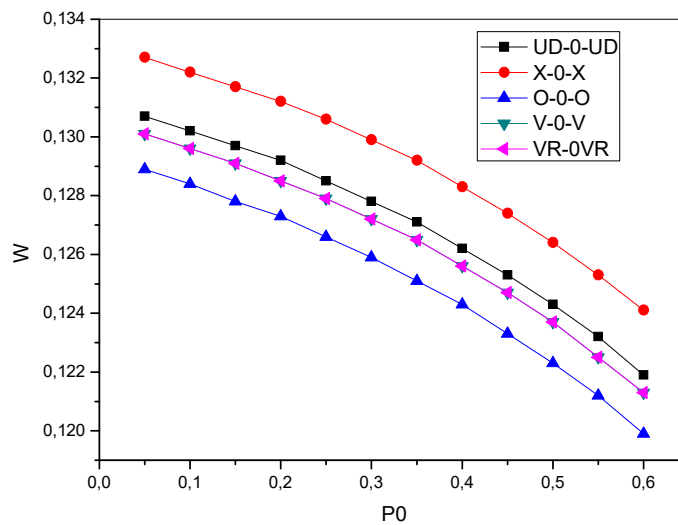


Figure V.5 : L'effet de la porosité (P_0) en fonction de la fréquence adimensionnelle pour les différentes distributions de nanotube de carbone (SP1;1-2-1; $a/h=10$; $V_{cnt}=0.11$)

La figure V.6 illustre l'effet de la porosité sur la fréquence adimensionnelle pour différentes configurations de la plaque sandwich, pour le cas du rapport géométrique $a/h = 10$ et la fraction volumique des CNT $V_{cnt} = 0.11$.

Les résultats mettent en évidence que la configuration du noyau joue un rôle déterminant dans les performances vibratoires d'une plaque sandwich nano-composite. Parmi les distributions analysées, la configuration 2-1-2 offre la meilleure rigidité dynamique.

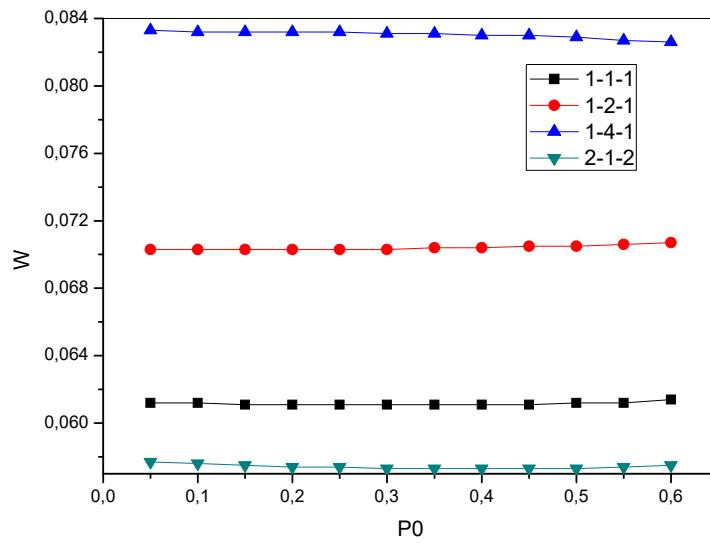


Figure V.6 : L'effet de la porosité en fonction de la fréquence adimensionnelle pour les différentes distributions (SP1;0-O-0; $a/h=10$; $V_{\text{cnt}}=0.11$)

Les résultats de la figure V.7 montrent que les différentes distributions de porosité (UP, SP1, SP2, ASP) donnent des fréquences adimensionnelles similaires. On observe que ces fréquences diminuent lorsque le rapport a/h augmente. Physiquement, cela s'explique par une diminution de la rigidité.

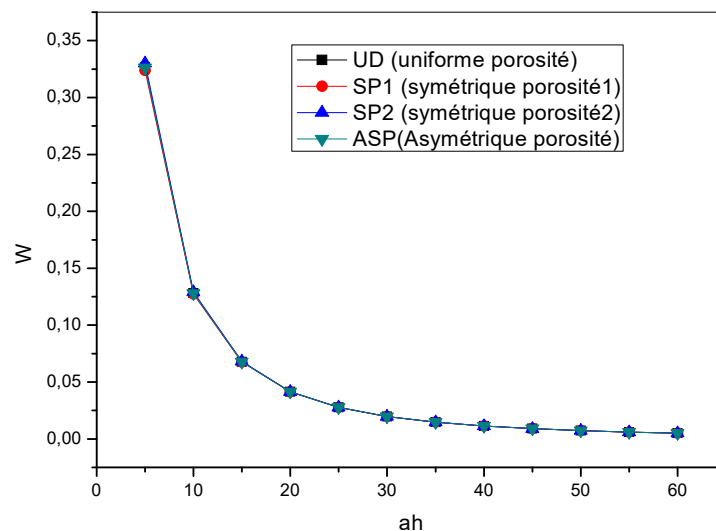


Figure V.7: L'effet de rapport géométrique (a/h) en fonction de la fréquence adimensionnelle pour les distributions de porosité ($V_{\text{cnt}}=0.11$; $P_0=0.2$; 1-2-1; 0-O-0)

Selon la figure V.8 qui montre L'effet de rapport géométrique (a/b) en fonction du rapport de vibration adimensionnelle on remarque que les valeurs dans le cas de (UP, SP1, SP2, ASP1) sont proches et augmentent avec l'augmentation du rapport (a/b).

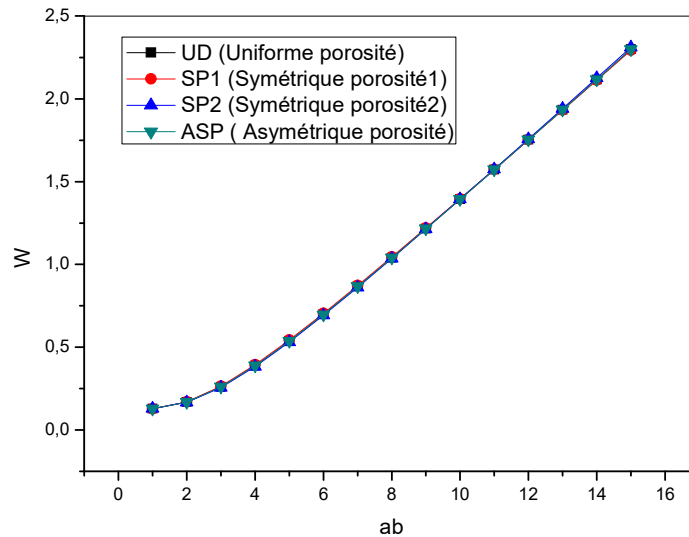


Figure V.8 : L'effet de rapport géométrique (a/b) en fonction de la fréquence adimensionnelle pour les différentes distributions de porosité ($V_{cnt}=0.11; P_0=0; 1-4-1$)

V.3.Conclusion

L'analyse numérique menée dans ce chapitre a permis de démontrer l'impact majeur des distributions de CNT et des schémas de porosité sur le comportement dynamique des plaques sandwich en nanocomposites. Il a été observé que la configuration X-CNT, aussi bien au niveau des faces que du noyau, permet d'atteindre une rigidité et des fréquences naturelles nettement supérieures à celles des autres distributions. De même, la configuration de porosité symétrique 2-1-2 s'est révélé la plus favorable en termes de performance vibratoire. L'augmentation du rapport a/b tend à augmenter les fréquences naturelles, tandis que celle du rapport a/h les réduit en raison de la perte de rigidité.

L'étude met en évidence le rôle déterminant de la microstructure (distribution des CNT et porosité) sur les propriétés vibratoires des plaques sandwich. Ces résultats constituent un outil pertinent pour optimiser design de structures composites avancées destinées à des applications nécessitant en même temps légèreté et performance dynamique élevée.



Conclusion Générale

Conclusion générale

L'utilisation des matériaux composites à base de nanotube de carbone (NTC) représente une voie prometteuse dans le domaine des nouveaux matériaux composites, en raison de leurs propriétés structurales et électroniques exceptionnelles.

Ce travail a porté sur l'étude de l'influence de différents paramètres sur le comportement dynamique de plaque sandwich composite renforcée par de nanotube de carbone au niveau des faces et du noyau selon des formes différents (UD-CNT, X-CNT, O-CNT, V-CNT, Λ -CNT), L'analyse a été réalisée en utilisant la théorie déformation en cisaillement d'ordre élevée (HSDT), Nous avons constaté, à travers les analyses de vibrations, il a été constaté que les types de renforcement, les proportions et les numéros de mode sont des paramètres importants pour les fréquences adimensionnelles de chaque plaque. L'augmentation des rapports d'aspect (a/h) et du mode fondamental conduit à la plus petite fréquence adimensionnelle contrairement le rapport (a/b) est diminué, et on a trouvé que la plaque X-CNT est la plus rigide par rapport aux autres types,

Ensuit on a constaté une grande influence est estimée à la distribution de porosité de type symétrique 1. Enfin, cette étude s'inscrit dans une perspective de recherche visant à enrichir la base de connaissances autour des nano-composites à base de NTC. Elle pourra servir de référence pour les futurs chercheurs désireux de développer et approfondir les applications de ces matériaux avancés dans divers domaines technologiques.



Références bibliographique

(A)

- (Amele, 2017) Amele. M, etude de la vibration libre d'une plaque composite semi-épaisse à gradient fonctionnel renforcée par nanotubes en carbone, Université BLIDA1, 2017.
- (Andrews, 2002) Andrews. R, Rantell, Accounts of Chemical Research, 2002.

(B)

- (Bacon, 1957) Bacon. R. Production and properties of graphite whiskers physcos 1957
- (Behly, 2008) Behly, Nouveaux matériaux composites thermo formables à base de fibres cellulose
- (Bellayer, 2005) Bellayer. S, Développement de nouvelles techniques de caractérisation qualitative et quantitative de nanocomposites à matrice polymère : application au textile,
- (Bernier, 1997) Bernier, Le carbone dans tous ses Eacutetats. Taylor 1997.
- (Berthelot, 2010) Berthelot. J, Mécanique des matériaux et structures composites. Le Mans, France : ISMANS 2010
- (Besnard, 2019) Besnard, C. Elaboration de composites céramiques oxyde/oxyde par caléfaction (Doctoral dissertation, Université de Bordeaux) 2019.
- (Bouazza, 2010) Bouazza. M, "Thermoelastic stability analysis of functionally graded plates: An analytical approach". Comput Mater Sci, 2010.
- (Bourada, 2018) Bourada. F, thèse Etude de la stabilité des plaques composites épaisses en utilisant des théories de déformation d'ordre élevé, Universitaire Belhadj Bouchaib-Ain Témouchent, 2018
- (Bozlar, 2009) Bozlar. M, Modification de surface des nanotubes de carbone par un polymère conducteur électrogénéré pour la réalisation de nanocomposites multifonctionnels, École Normale Supérieur de Cachan - Paris, 2009.
- (Buerschaper, 1944) Buerschaper. R, Thermal and electrical conductivity of graphite and carbon at low temperatures, Journal of Applied Physics, 1944.

(C)

- (Cai, 2008) Cai. D, Latex technology as à simple route to improve the thermal conductivité of a carboné nanotube/polymère composite, Carbon 2008.
- (Ciallere, 1982) Ciallere. S, Minéralogie des argiles 2, Classifications et nomenclature, éd. Masson 1982.

(D)

- (Djebloun, 2004) Djebloun. Y, Etude de la rupture en MODE I d'ouverture des matériaux composites, Université de Biskra 2004.
- (Draoui, 2019) Draoui. A, Etude de la réponse statique et dynamique des plaques en composites renforcées par des nanotubes de carbone, Université Djillali liabes sidi bel Abbes, 2020.
- (Dupeux, 2004) Dupeux. M, Aide-mémoire Science des matériaux, Editions Dunod, 2004.

(E)

- (El achay, 2012) El achay. M, nanocomposite films of poly filled with coated

multiwalled carbon nanotubes 2012.

(El Sawi, 2010) El Sawi. I, Dispersion de nanotubes de carbone et intégration de la fonction de conductivité électrique dans les matériaux composites structuraux, l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2010.

(Elmascri, 2024) Elmascri. S, Etude de l'influence de la porosité sur la réponse dynamique et la stabilité des plaques composites stratifiées, Université Abdelhamid ibn badis de Mostaganem 2024.

(Esawi, 2007) Esawi. A, "Carbon nanotube reinforced composites: potential and current Mater Des, 2007. challenges

(F)

(Fabio et al, 2006) Fabio. B, Polymer Degradation and Stability 2006.

(G)

(Garaj, 2010) garaj. S, gate- defined quantum dots on carbon nanotubes, 2010

(Gay, 2009) Gay. D, Matériaux Composites 4^{ème} Edition, Hermès 2009

(Geim, 2007) Geim. A. K, les nanotubes de carbone, Site ; <http://www.google.com> (accédé

(Geullil, 2022) Geullil.m.kh, Etude de Comportement mécanique des plaques FGM reposant sur des fondations élastiques sous diverses conditions aux limites, thèse de doctorat en sciences, Université Djillali liabes sidi bel Abbes, 2022.

(Goj, 2004) Goj. F, Composites Science and Technolog 2004.

(Guessas, 2020) Guessas. H, Thèse : Comportement Mécanique d'une Plaque Nanocomposite à base de Nanotube de Carbone 2020.

(H)

(Hersam, 2008) Hersam. M, Progress towards monodisperse single- walled carbon nanotubes. Nature Nanotechnology 2008

(Hildebrand, 1949) Hildebrand. R, "Notes on the foundations of theory of small displacements of orthotropic shells", 1949.

(Houdyp, 2006) Houdyp. P, Les nanosciences, Nanomatériaux et nano chimie : La collection Échelles Éditions Belin 2006.

(I)

(Iijima, 1991) Iijima. S, Helical microtubules of graphitic carbon 1991.

(Imodache, 2019) Imodache. H., Synthèse et valorisation dans le domaine médical des nanocomposites de « Ag-TiO₂ ». Université Saad Dahlab-Blida, 2019.

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

(K)

(Karellsaint, 2010) Karellsaint. A, Etude de dispersions de nanotubes de carbone par des polymères pour l'élaboration de composites conducteurs et structure 2010.

(L)

(Ludru, 2009) Ludru.Y, thèse de doctorat tude de la porosité dans les matériaux composites stratifiés stratifiés aéronautique, l'université de toulouse 2009

(M)

(Majid, 2003) Majid. S "Carbon Paste Electrode Bulk-Modified with the Conducting Polymère Poly (1,8 Diaminonaphthalene): Application to Lead Determination," Microchim. Acta 2003.

(Marcoux, 2002) Marcoux. P. R, Réactivité et manipulation de nanotubes de carbone monocouches: fonctionnalisation de surface par greffage covalent et mise en œuvre

comme agent structurant, Université d'Angers 2002.

(Martin, 2004) Martin. C, Formation of percolating networks in multi-wall carbon-nanotube-epoxy composites, 2004.

(Memar, 2014) Memar. A, "Analysis of functionally graded stiffened plates based on FSDT utilizing reproducing kernel particle method", Compos Struct, 2014

(Menail, 2009) Menail. Y, Analyse de l'effet du vieillissement à l'air, dans l'eau douce et dans l'eau sale, sur la tenue en fatigue de composites à matrice organique, renforcée par des fibres de verre, thèse de doctorat UBM, Anaba, 2009.

(Mindlin, 1951) Mindlin. R.D, Influence of rotary inertia and shear on flexural motions of isotropic elastic plates, J Appl Mech-T ASME, 1951,

(N)

(Nikolaev, 1995) Nikolaev. A, Thèses, DT. Colbert, R.E. Smalley RE, « Catalytic growth of single-walled nanotubes by laser vaporization », Chemical Physics Letters 1995.

(O)

(Oularbi, 2017) Oularbi. L, "Electrochemical determination of traces lead ions using anew nanocomposite of polypyrrole/carbon nanofibers," J. Solid State Electrochem. 2017.

(P)

(Penu, 2008) Penu. C, Thèse : Nanocomposites à matrice polyamide 6 ou polystyrène et à renforts de nanotubes de carbone : du procédé de synthèse aux phénomènes de percolation, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2008

(Perrin et al, 1999) Perrin. R, Chimie industrielle, Dunod, 2ème Ed, 1999.

(R)

(Reddy, 1998) Reddy. JN, "Thermo-mechanical analysis of functionally graded cylinders and plates", J. Therm. Stresses, 1998.

(S)

(Salih, 2017) Salih. F. E, "Electrochemical detection of lead (II) at. bismuth/Poly (1,8-diaminonaphthalene) modified carbon paste électrode," Arab. J. Chem, 2017.

(Saoula, 2017) Saoula. A, Analyse de la vibration libre d'un nanotube de carbone monocouche type zigzag entouré par une matrice polymère, Université ibn khaldoun de Tiaret 2017

(Schoeller, 1955) Schoeller,H, Géochimie des eaux souterraines: application aux eaux des gisement de pétrol ,1955.

(Soualah, 2018) Soualah. S, Amélioration des Performances d'un Matériau Composite Stratifié Biomécanique chargé de granulés de noyaux de dattes. Université Badji Mokhtar Annaba 2018.

(Soumaya, 2023) Soumaya. B, Synthèse par arc électrique de nanotubes de carbone dopés au bore et/ou à l'azote : analyses structurales chimiques et caractérisation optiques et électriques en corrélation avec les propriétés du plasma 'université Toulouse III - Paul Sabatier(UT3) 2023.

(T)

(Thostenson, 2006) Thostenson. E, Processing-structure-multi-functional property relationship in carbon nanotube/epoxy composites. Carbon 2006.

(V)

(Valizadeh, 2013) Valizadeh. N, "NURBS-based finite element analysis of functionally graded plates: Static bending, vibration, buckling and flutter", Compos Struct, 2013.

(W)

(Wattanasakulpong, 2015) Wattanasakulpong, N. and Chaikittiratana, A. "Exact solutions for static and dynamic analyses of carbon nanotube-reinforced composite plates With Pasternak elastic

(Wiess, 2010) Wiess. P, La chimie des polymères 2010.

(Z)

(Zerrouki, 2022) Zerrouki.R, Thèse : Etude de l'influence de la distribution des Nanocharges sur le Comportement Mécanique du Nanocomposite. Université Ibn Khaldoun-Tiaret 2022.

(Zhu, 2019) Zhu. J, The fractal characteristics of pore size distribution in cement-based materials and its effect on gas permeability 2019.

(Zidour, 2012) Zidour. M, Etude du comportement mécanique des nanotubes en carbone entourés par une matrice polymère, Option : Structures et matériaux, Université Djilali Liabes, Sidi Bel Abbès, 2012.