

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 :

ZEGGAOUI ZINEB

OUAHMICHE LAMIAA

Sujet du mémoire :

**Etude de la stabilité d'une poutre nanocomposite
(FG-CNT) sous différentes distributions de porosité.**

Soutenu publiquement le 09/06/2024 devant le jury composé de :

Pr. T. HASSAINE. DAOUADJI

Président

Pr. M. ZIDOUR

Encadrant

Dr. T. BENSATTALAH

Examineur

Dr. A. SAOULA

Examineur

Dr. A. KABLIA

Examineur

Promotion : 2023 /2024

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, notre promoteur Dr. ZIDOUR MOHAMED, l'encadrant de notre projet de fin de cycle, pour la confiance qu'il nous a accordé en nous proposant ce fameux sujet. De plus, son enthousiasme, encouragement et son entière disponibilité au cours de ce projet et ses judicieux conseils.

Nous tenons à remercier les honorables membres de jury qui nous ont fait l'immense honneur de Présider et d'examiner ce modeste travail.

Nous n'oublions pas aussi de remercier tous les professeurs qui ont contribué à notre formation et tous nos collègues du département de Génie Civil de l'université Ibn Khaldoun de Tiaret, nous dirons merci pour les encouragements et le soutien qu'ils n'ont cessé de nous donner.

Enfin, à tous ceux qui ont aidés de près ou de loin pour la réalisation de ce modeste travail.

Dédicace

C'est avec un grand plaisir que je dédie cet évènement marquant de ma vie :

*A mon cher père **Bakhti***

Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, je tiens à honorer l'homme que tu es.

Grace à toi papa j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité. Je voudrais te remercier Pour ton amour, ta générosité, ta compréhension...

Ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que tu as déployés pour mon éducation et ma formation. Je t'aime papa et j'implore le tout-puissant pour qu'il t'accorde une bonne santé et une vie long et heureuse

*A ma très chère mère **Nouaria***

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne serais point te remercier comme il doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance guide et ta présence à cotés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles

*A une personne très spéciale, ma sœur, mon ange **Imène** qui a été toujours là pour moi, qui n'a pas cessé de m'encourager et soutenir tout au long de mes études et qui est toujours à mes côtés.*

*A ma grande mère et grand père, mes oncles et mes tantes pour leur amour, et leur tendresse. Une spéciale dédicace à mon oncle **Hamidou** pour son soutien et son encouragement et A toute la famille **Zeggaoui** et **Guendouz** grande et petite.*

*A mes amies **Nawal, Khouloud, Amira, Makhloufia** et mon binôme **Lamiaa**, Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des sœurs et des amies sur qui je peux compter. En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.*

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui m'ont soutenu et tous ceux qui m'ont connu sans exception.

Zineb

Dédicace

Du plus profond de mon cœur et avec tout le respect que je leurs dois, Je dédie sincèrement ce travail :

*A mon très cher père **Rabah**, mon précieux offre du dieu, qui a toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection*

*A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse Mon adorable mère **Moukhtaria***

A ma grande mère et ce qui a partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail Que dieu te donne une longue et joyeuse vie

*A mes chers frères **Ilyes, Karim, Amine, Rahim** et ma chère sœur **Nourhène Nadia***

A ma chère tante et son mari et ces enfants

Et à tous les membres de ma famille, merci pour leurs amours et leurs encouragements

A tous mes amis, tous mes professeurs

Et à tous qui complusse ce modeste travail

*Sans oublier mon binôme et ma meilleure amie **Zineb** merci pour ta patience et ton soutien moral et ta compréhension tout au long de ce projet.*

Lamiaa

Résumé

La stabilité au flambement des poutres poreuses en nano-composites à base de nanotubes de carbone a été étudiée dans ce travail de recherche sous différentes distributions de porosité. Une méthode analytique est développée pour analyser la charge critique de flambement en utilisant la théorie de déformation par cisaillement d'ordre élevé (HSDT). Trois types de poutres poreuses supposées être simplement appuyées, à savoir les poutres à distribution uniforme (UD-CNT) et fonctionnellement graduées (X-CNT, O-CNT), sont pris en compte.

Des nanotubes de carbone à paroi simple sont utilisés pour le renforcement de ces poutres. Les solutions de la charge critique de flambement sont obtenues en utilisant le principe de Hamilton. Les solutions trouvées sont vérifiées en comparant avec certains résultats trouvés dans la littérature. Afin d'étudier la charge critique de flambement, Les rapports géométriques, la fraction volumique, les types de renforcement et la distribution de porosité sont analysés et discutés.

Mots-clés : Nanotubes ; Flambement ; Déformation ; Hamilton ; Porosité.

Abstract

The buckling stability of beams made of nanocomposite based on carbon nanotubes was studied in this research work under different porosity distributions. An analytical method is developed to analyze the critical buckling load using high order shear deformation theory (HSDT). Three types of porous beams assumed to be simply supported, namely uniformly distributed (UD-CNT) and functionally graded (X-CNT, O-CNT) beams, are considered.

Single-Walled carbon nanotubes are used to reinforce these beams. The solutions for critical buckling load are obtained using Hamilton's principle. The solutions found are verified by comparing with certain results found in the literature. In order to study the critical buckling load, geometric ratios, volume fraction, reinforcement types and porosity distribution are analyzed and discussed.

Key-words : Carbon nanotube ; Buckling ; Deformation ; Hamilton ; Porosity.

ملخص

تمت دراسة ثبات انبعاج الروافد المسامية المصنوعة من مركبات النانو المعتمدة على انابيب الكربون النانوية في هذا العمل البحثي تحت توزيعات مسامية مختلفة. تم تطوير طريقة تحليلية لدراسة الحمل الحرج باستخدام نظرية تشوه القص عالي الترتيب. (TSDT) تم استعمال ثلاثة انواع من الروافد المسامية التي يفرض انها تتركز على مساند بسيطة. وهي الروافد الموزعة بشكل موحد (UD-CNT) والروافد المتدرجة وظيفيا (O-CNT, X-CNT)

وتستخدم انابيب الكربون النانوية احادية الجدار لتعزيز هذه الروافد يتم الحصول على حلول حمل الانبعاج الحرج باستخدام مبدا هاملتون. يتم التحقق من الحلول التي تم العثور عليها من خلال مقارنة بعض النتائج الموجودة في الادبيات. من اجل دراسة حمل الانبعاج الحرج تم تحليل و مناقشة النسب الهندسية و كسر الكثافة و انواع التعزيز و صلابة الاساس المرن و تأثير المسامية.

الكلمات الرئيسية : أنابيب النانو الكربونية ، انبعاج ، تشوه ، هاملتون ، المسامية

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.....	01

Chapitre I : Généralités sur les nanotubes de carbone

I.1 Introduction	4
I.2 Les nanotubes de carbone	4
I.3 Historique.....	4
I.4 Le carbone.....	6
I.5 Les formes classiques du carbone	6
I.5.1 Le Graphite	6
I.5.2 Le Diamant.....	7
I.5.3 Carbone mal organisés	8
I.6 Les nouvelles formes du carbone	9
I.6.1 Le Graphène	9
I.6.2 Fullerènes	9
I.7 Classification des nanotubes de carbone.....	10
I.7.1 Nanotubes de carbone mono-feuillets, SWNT (Single Walled Nanotube)	10
I.7.2 Nanotubes de carbone multi-feuillets, MWNT (Multi Walled Nanotubes).....	11
I.8 Méthodes de synthèse de nanotube de carbone.....	12
I.8.1 Méthode de l'arc électrique.....	13
I.8.2 Ablation laser	14
I.8.3 Méthode de dépôt chimique en phase vapeur (CVD)	14
I.8.4 Méthode décomposition catalytique HiPCO	15
I.8.5 Autres voies de synthèse	16
I.9 Propriétés des nanotubes de carbone.....	17
I.9.1 Propriété mécaniques	17
I.9.2 Propriété thermiques	17
I.9.3 Propriétés électronique	18
I.9.4 Propriétés optique.....	19
I.10 Applications des nanotubes de carbone	19
I.10.1 Application au Génie Civil.....	20
I.11 Défauts des nanotubes de carbone	20
I.12 Inconvénients des Nanotubes	22
I.13 Conclusion.....	22

Chapitre II : Généralités sur les nanocomposites (polymère/nanotubes de carbone)

II.1 Introduction.....	24
II.2 Les Polymères.....	24
II.3 Classification des polymères	25
II.3.1 Classification selon l'origine	25
II.3.1.1 Les polymères naturels	25
II.3.1.2 Les polymères artificiels	25

II.3.1.3 Les polymères synthétiques	25
II.3.2 Classification en fonction de l'architecture	26
II.3.2.1 Les homopolymères	26
II.3.2.2 Les copolymères	26
II.3.3 Classification selon le comportement thermique	27
II.3.3.1 Polymères thermoplastiques.....	27
II.3.3.2 Les polymères thermodurcissables	27
II.3.3.3 Les élastomères	27
II.4 Utilisation des polymères	27
II.5 Présentation des matériaux composites	28
II.5.1 Définition d'un matériau composite	28
II.5.2 Les propriétés des matériaux composites.....	29
II.5.3 Domaines d'application des matériaux composites	29
II.6 Généralités sur les nanocomposites.....	30
II.6.1 Définition d'un nanocomposite.....	30
II.7 Différences entre composite et nanocomposite	31
II.8 Les différents nano renforts	31
II.8.1 Nanocomposites à matrice polymères	32
II.8.1.1 Renforts de type 1D	32
II.8.1.2 Renforts de type 2D	32
II.8.1.3 Renforts de type 3D.....	32
II.9 Classification des nanocomposites selon la nature de la matrice	33
II.9.1 Les composites à matrice organique	33
II.9.1.1 Les Matrices Thermodurcissables (TD).....	34
II.9.1.2 Les Matrices Thermoplastiques (TP)	34
II.9.1.3 Matrices élastomères	35
II.9.2 Les Matrices Minérales	36
II.9.2.1 Les Matrices Métalliques	36
II.9.2.2 Les Matrices céramiques	36
II.10 Nanocomposites (Nanotube de carbone/matrice Polymère).....	36
II.11 Propriétés des nanocomposites (polymères/NTC).....	37
II.11.1 Propriétés thermiques nanocomposites (NTC/polymère)	37
II.11.1.1 La stabilité thermique	37
II.11.1.2 Conductivité thermique	37
II.11.2 Propriétés optiques	38
II.11.3 Propriétés mécaniques.....	38
II.11.4 Propriétés au feu	38
II.11.5 Propriétés barrière au gaz	39
II.12 Procédés d'élaboration des nanocomposites (NTC/polymère).....	39
II.12.1 Techniques de la mise œuvre	39
II.12.1.1 Mélange en solution	40
II.12.1.2 Mélange à l'état fondu.....	40
II.12.1.3 Polymérisation in situ	41
II.12.2 Dispersion des renforts.....	41
II.12.2.1 Utilisation des ultrasons	41
II.12.2.2 Dispersion mécanique par tricylindre.....	42
II.13 Conclusion	44

Chapitre III : Théories des poutres poreuses

III.1 Introduction	46
III.2 Les différentes théories des poutres	46
III.2.1 Théorie classique d'Euler Bernoulli	46
III.2.2 La théorie Timoshenko	47
III.2.3 La théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé (HSDT)	49
III.2.4 La théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé raffinée	51
III.2.4.1 Hypothèses de la théorie raffinée	51
III.3 Porosité	52
III.4 Perméabilité	53
III.5 Caractérisation de la porosité	53
III.6 Effet de la porosité sur les propriétés mécaniques des matériaux	53
III.6.1 Porosité et module d'élasticité longitudinale (le module de Young/porosité)	53
III.6.2 Porosité et le module de cisaillement	55
III.6.3 Porosité et le coefficient de Poisson ν	55
III.7 Poutres poreuses fonctionnellement graduées	56
III.8 Phénomène de flambement	56
III.9 Géométrie et propriétés de la poutre nanocomposite avec porosité	56
III.10 Développement mathématique du présent model	57
III.11 Équations de mouvement	59
III.12 Solution analytique	61
III.13 Conclusion	62

Chapitre IV : Résultats numériques et discussion

IV.1 Introduction	64
IV.2 Analyse du flambement des poutres CNTRC	64
IV.3 Conclusion	70
Conclusion générale	72
Références bibliographique	73

Liste des figures

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Généralités sur les nanotubes de carbone

Figure I.1 : Images MET de nanotubes de carbone, publiées en 1952	05
Figure I.2 : Le carbone	06
Figure I.3 : (a) Maille hexagonale et (b) structure lamellaire du graphite.....	07
Figure I.4 : Formes allotropiques du diamant	08
Figure I.5 : Structure de diamant	08
Figure I.6 : Formes allotropiques du carbones "mal organisées".....	09
Figure I.7 : (a) Structure d'un ballon de football C60, (b) C70, (c) C82, (d) nanotube de carbone mono-feuillet, (e) nanotube de carbone multi-feuillets.....	10
Figure I.8 : Représentation de la structure de nanotubes de carbone.....	11
Figure I.9 : Différentes configurations des nanotubes de carbone (armchair, zigzag et chiral)	11
Figure I.10 : Représentation graphique d'un MWNT (gauche) et image de Microscope électronique à transmission de plusieurs MWNT (droite)	12
Figure I.11 : Structures possibles des MWNT : Type poupée russe (gauche) Type rouleau de parchemin(droite)	12
Figure I.12 : Un réacteur de synthèse de nanotubes monocouche par arc électrique	13
Figure I.13 : Schéma de l'appareillage d'ablation laser.....	14
Figure I.14 : Schéma d'un réacteur CVD pour la croissance des (NTC).....	15
Figure I.15 : Schéma de la production de nanotubes par méthode HiPCO.....	16
Figure I.16 : Propriétés électroniques des nanotubes de carbone monocouches en fonction de la paire des entiers (n,m)	18
Figure I.17: Fermeture des nanotubes de carbone	20
Figure I.18 : Courbure induite dans un réseau graphitique par un : a). Heptagone b). Pentagone.....	20
Figure I.19 : Défauts pentagonaux et heptagonaux se traduisant par des jonctions	21
Figure I.20 : Image MET des extrémités de deux nanotubes multicouches. On a indiqué quelques-uns des cycles non hexagonaux : (P) indique un pentagone et (H) un heptagone	21
Figure I.21: Une paire pentagone-heptagone provoquant une variation de diamètre et de chiralité : a- de (11,0) a (12,0) ; b- de (9,0) a (12,0)	21

Chapitre II : Généralités sur les nanocomposites (polymère/nanotubes de carbone)

Figure II.1 : Modèle schématique de la synthèse d'un polymère	25
Figure II.2 : Les différentes familles des homopolymères : a) Les homopolymères linéaires, b) Les homopolymères branchés, c) Les homopolymères étoiles	26
Figure II.3 : Modes de copolymères.....	26
Figure II.4 : Les différentes familles des copolymères : a) Le mode statistique, b) Le mode alterné, c) Le mode séquencé, d) Le mode greffé	26

Figure II.5: Matériau composite	29
Figure II.6 : Schéma illustratif d'un matériau composite	30
Figure II.7 : Morphologique de nanocomposites	31
Figure II.8 : (A) fibre de verre (B) Fibre de carbone	33
Figure II.9 : Les différentes matrices des matériaux composites.....	34
Figure II.10 : Méthodes d'élaborations des nano composites polymères : a) mise en œuvre dans le fondu, b) mise en solution et c) polymérisation in situ... ..	40
Figure II.11 : Schéma représentant l'élaboration de nano composites par mélange à l'état fondu.....	41
Figure II.12: schématisation de la polymérisation in-situ d'un nanocomposite	42
Figure II.13: (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.....	43
Figure II.14: (A) Tricylindre Exact 80E (Source : Exact Vertriebs Gmbh, Allemagne). (B) Schéma du circuit d'un fluide disperse par tricylindre	44

Chapitre III : Théories des poutres poreuses

Figure III.1: Cinématique d'Euler Bernoulli	46
Figure III.2 : Cinématique de Timoshenko	48
Figure III.3 : La distribution (constante) des contraintes de cisaillement	49
Figure III.4 : Cinématique de la Théorie d'Ordre Elevé	49
Figure III.5 : La distribution (parabolique) des contraintes de cisaillement	50
Figure III.6 : Le flambement	56
Figure III.7 : Géométrie de la poutre	56
Figure III.8 : Les différents modèles des dispositions des renforts	57
Figure III.9 : Les différentes distributions de porosité : a) Uniforme, b) Symétrique1, c) Symétrique2, d) Asymétrique1, e) Asymétrique2.....	58

Chapitre IV : Résultats numériques et discussion

Figure IV.1: L'effet du rapport de forme (L/h) sur la charge critique de flambement sous différentes distributions uniforme et symétriques de porosité ($V_{cut}^* = 0.12; p=0.3$).....	66
Figure IV.2: L'effet du rapport (L/h) sur la charge critique de flambement sous différentes distributions uniforme et asymétriques de porosité ($V_{cut}^* = 0.12; p=0.3$)	66
Figure IV.3: L'effet de la distribution uniforme de porosité sur la charge critique de flambement sous différents types de renforcement (UD-CNT, O-CNT, X-CNT)	67
Figure IV.4: L'effet de la distribution symétrique 1 de porosité sur la charge critique de flambement sous différents types de renforcement (UD-CNT, O-CNT, X-CNT)	68
Figure IV.5: La charge critique de flambement de la poutre X-CNT en fonction de rapport L/h sous une porosité de type uniforme (p=0.3)	69
Figure IV.6: La charge critique de flambement de la poutre X-CNT en fonction de rapport (L/h) sous une porosité de type symétrique2 (p=0.3)	69

Liste des tableaux

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II : Généralités sur les nanocomposites (polymère/nanotubes de carbone)

Tableau II.1: Tableau des caractéristiques des nanoparticules sur les polymères.....	31
Tableau II.2: propriétés physiques et mécaniques des thermoplastiques	35

Chapitre IV : Résultats numériques et discussion

Tableau IV.1: Comparaison de la charge critique de flambement adimensionnelles d'une poutre CNTRC ($L/h = 15$; $V_{cnt}^* = 0.12$).....	64
Tableau IV.2: L'effet de la porosité sur la charge critique de flambement d'une poutre de type (UD-CNT) sous différentes distributions de porosité ($L/h=10$; $V_{cnt}^* = 0.12$)	65
Tableau IV.3: La charges critique de flambement d'une poutre CNTRC avec et sans renforcement sous différents types de distribution de porosité en fonction du rapport L/h , ($P=0.3$; $V_{cnt}^* = 0.12$).....	65

Liste des abréviations

LISTE DES ABRÉVIATIONS

C-C:	La liaison carbone-carbone.
CBT:	Théorie classique des poutres.
CMM:	Composites à matrice métallique.
CNTs:	Nanotube de carbone.
CNTRC:	Poutre de composite renforcée par des nanotubes de carbone.
CO:	Monoxyde de carbone.
CVD:	Chemical Vapor Deposition.
DWCNT:	Nanotube de carbone double paroi.
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.
PA:	Polyamide.
PBT:	Butylénique.
PC:	Polycarbonate.
PE:	Polyéthylène.
PET:	Polytéréphtalate éthylénique.
PMMA:	Le polyméthacrylate de méthyle.
POE:	Le polyoxyde d'éthylène.
PP:	Polypropylène.
PS:	Le polystyrène.
PTFE:	Le polytétrafluoroéthylène.
PVC:	Polychlorure de vinyle.
SWCNT:	Nanotube de carbone mono-paroi.
TD:	Thermodurcissable.
TEM:	Microscopie électronique de transmission.
TP:	Thermoplastique.
UD:	Distribution uniforme.

Liste des notations

LISTE DES NOTATIONS

A_{11}	Rigidité de membrane.
A_{110}	Rigidité d'extension ou la valeur de A_{11} d'une poutre homogène.
\vec{a}_1, \vec{a}_2	Les vecteurs de base du graphène.
B_{11}	Rigidité de couplage (membrane-flexion).
C_{60}	Fullerène C60.
$\vec{\sigma}$	Le vecteur chiral.
D_{11}	Rigidité de flexion.
E_{11}	Module de Young équivalente l'axe longitudinale.
E_{22}	Module de Young équivalente l'axe transversale.
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.
$f(z)$	Fonction de forme.
G_{12}	Module de cisaillement équivalent.
G_{12}^{cnt}	Module de cisaillement de nanotube de carbone.
h	Epaisseur de la poutre.
L	Longueur de la poutre.
(n, m)	Un couple de nombres entiers qui définit la structure du nanotube.
N, M_b, M_s	Les efforts résultants.
\bar{N}	La charge critique adimensionnelle.
N_{cr}	La charge critique de flambement.
N_{x0}	La force de compression axiale.
δU	La variation virtuelle de l'énergie de déformation.

Liste des notations

$u_0(\mathbf{x})$	Déplacement axiale de la fibre moyenne.
$U_m, W_{b\ m} \text{ et } W_{s\ m}$	Des paramètres arbitraires.
V_{cnt}	Equation de la fraction volumique de nanotube de carbone.
δV	La variation virtuelle de l'énergie potentielle.
V_p	Fraction volumique de la matrice polymère.
V_{cnt}^*	Fraction volumique de nanotube de carbone
$w_0(x)$	Déplacement transversale de la fibre moyenne.
w_b	Composante de la flexion du déplacement transversal
w_{cnt}	Fraction massique du nanotube de carbone.
w_s	Composante du cisaillement du déplacement transversal
Q_{ij}	Coefficients de rigidité.
sp^1, sp^2, sp^3	Trois formes allotropiques.
S_{ij}	Élément de la matrice.
ϵ_x, γ_{xz}	Composantes de déformation.
ν^{cnt}	Coefficient de poisson de nanotube de carbone.
ν^p	Coefficient du poisson de la matrice polymère.
Θ	Angle chiral.
ρ^{cnt}	La masse volumique de nanotube de carbone.
ρ^p	La masse volumique de la matrice polymère.
σ_x	Contrainte normale.
τ_{xz}	Contrainte tangentielle.
$\eta_i (i = 1, 2, 3)$	Les paramètres d'efficacité.

Introduction générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les nanocomposites ont suscité un grand intérêt dans l'industriel et le milieu académique car ils présentent une amélioration remarquable dans les propriétés des matières par rapport aux polymères purs ou les micros.

Les nanotechnologies sont reconnues comme une direction de recherche multidisciplinaire très prometteuse et en pleine émergence. Dans le domaine des matériaux, l'élaboration de nanocomposites polymère est une activité qui suscite un intérêt sans cesse grandissant et dont les résultats pourraient élargir le champ d'application des polymères. En et, l'introduction de particules de taille nanométrique dans une matrice polymère permet d'obtenir des matériaux aux propriétés améliorées (mécaniques, électroniques, optiques)

Depuis leur observation en 1991, les nanotubes de carbone ont fait l'objet de nombreuses recherches visant à caractériser les propriétés exceptionnelles qu'on leur attribue, que ce soit en termes de propriétés mécaniques, électriques ou dimensionnelles. Ces dernières années, le verrou technologique lié à la synthèse de nanotubes de carbone de qualité, plus purs, en grandes quantités et de manière reproductible commence à être levé et certaines industries chimiques produisent déjà des grades commerciaux. Arkema est actuellement un des principaux producteurs de nanotubes de carbone multiparois (MWNTs) à raison de plusieurs tonnes par ans, et prévoit actuellement des productions plus importantes. Parallèlement à l'augmentation de la production mondiale de nanotubes de carbone, les recherches actuelles s'intensifient dans l'exploitation optimale des propriétés intrinsèques des nanotubes de carbone au sein de nanocomposites à hautes performances.

Depuis une trentaine d'années est apparue une nouvelle famille de matériaux à base de nanoparticules, appelée nanocomposites, L'utilisation de ces matériaux qui intéresse tout particulièrement les chercheurs et les industriels apporte de nombreux avantages en terme de propriétés des matériaux. En effet, le but de leur fabrication est de profiter des bonnes propriétés de différents matériaux afin d'en former un qui sera mieux adapté à certaines applications.

Le but de ce travail est d'analyser la stabilité au flambement des poutres en nanocomposites renforcées par des nanotubes de carbone sous différentes distributions de porosité,

Ce travail est composé de quatre chapitres : Le premier chapitre portera une vue générale sur les nanotubes de carbone, nous décrirons l'histoire et les différents types de nanotubes de carbone en détaillant leurs classifications, les différentes techniques de synthèse tel que la

méthode d'ablation laser, l'arc électrique, la décomposition catalytique (Hip Co), en plus les propriétés mécaniques, thermiques et optiques. De nombreuses applications seront ensuite présentées. Enfin, nous donnerons les Défauts des nanotubes de carbone et nous s'intéressons à leurs inconvénients.

Le deuxième chapitre présentera des généralités sur les Polymères, leurs classifications et utilisation, encore les matériaux composites et les nanocomposites, plus particulièrement on s'intéressera aux nanocomposite ainsi leur classification et propriétés, ensuite la dispersion des renforts dans la matrice polymère et la production des nanocomposites à base (polymère / NTC).

Dans le troisième chapitre, nous présenterons les différentes théories des poutres (théorie d'Euler-Bernoulli, théorie de Timoshenko(FSDBT) et la théorie d'ordre élevé (HSDT)) tout en donnant les hypothèses de chaque théorie et en montrant les différences entre ces dernières et il décrira aussi d'une façon générale, l'effet de la porosité sur la charge critique, on étudiera aussi l'effet de la porosité sur les propriétés mécaniques des matériaux et ensuite nous utilisons un développement mathématique des différents modèles sera présenté et qui permettra d'étudier analytiquement les poutres poreuses en nanocomposites. Et on a utilisé ce développement aussi pour la théorie d'ordre élevé pour étudier la charge critique de flambement de notre modèle.

Le dernier chapitre sera consacré à l'analyser de flambement des poutres en nano- composites à base de nanotube de carbone nous s'intéresserons a étudié l'effet de porosité sur la charge critique de flambement dans une poutre poreuse sous différentes distribution (Uniforme, symétrique1, symétrique2, asymétrique1 et asymétrique2) et la comparaison entre les trois distributions de nanotubes de carbone de renforcement (UD-CNT, O-CNT, X-CNT). Enfin nous interpréterons les résultats obtenus.

CHAPITRE I :

Généralité sur les nanotubes de carbone

I.1 Introduction

Depuis leur découverte, les nanotubes font l'objet d'un grand intérêt de la part de la communauté scientifique, notamment du fait de leurs propriétés physiques remarquables. Nous avons consacré ce chapitre à une présentation générale des nanotubes de carbone. Nous commencerons par décrire Les formes du carbone que ce soit les formes traditionnelles tel que le graphite, le diamant et les Carbones « mal organisés », ou les nouvelles formes de carbone comme le Graphene et le fullerène, les nanotubes multi-feuillets et mono-feuillets. En second lieu nous nous focalisons sur les procédés de synthèse les plus répandus tel que la méthode d'ablation laser, l'arc électrique, dépôt chimique en phase vapeur et la méthode dite (HiPCo), en nous attachant à exposer les avantages et les inconvénients de chacun d'entre eux. Après avoir présenté leurs propriétés mécaniques, thermiques, optiques et électroniques. Enfin, nous s'intéressons à leurs applications et leurs risques.

I.2 Les nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone sont une forme allotropique du carbone apparemment à la famille des fullerènes. Ils ont composé d'un ou plusieurs feuillets d'atomes de carbone enroulés sur eux-mêmes formant un tube. Le tube peut être fermé ou non à ses extrémités par une demi-sphère. On distingue les nanotubes de carbones simple-feuillet (SWNT ou SWCNT, pour single-Walled (Carbone) Nanotubes). Et multi-feuillets (MWNT ou MWCNT, pour Multi-Walled (Carbone) Nanotubes).

Ces nanotubes ont un diamètre de l'ordre du nanomètre et une longueur de quelques micromètres. La conductivité électrique et la conductivité thermique et résistance mécanique des nanotubes de carbone sont remarquablement élevées dans leurs sens longitudinaux. Ils font partie des produits issus des nanotechnologies actuellement utilisés et commercialisés dans différents domaines.

I.3 Historique

Les nanotubes de carbone sont l'un des quatre états allotropies connus du carbone. Ce sont des tubes jusqu'à mille fois plus longs que larges, d'un diamètre de l'ordre du nanomètre. Ils ont de quelques microns à quelques dizaines de microns de longueur. Ces matériaux sont les premiers produits industriels issus de la nanotechnologie et ils sont souvent présentés comme le matériau miracle du XXIème siècle. En 2004, plus de deux milles articles scientifiques ont été publiés à leur propos ^[Arias 2007], et aujourd'hui encore, il ne se passe guère de semaine sans que les revues scientifiques les plus prestigieuses n'ajoutent à cette liste une floraison remarquable pour un domaine aussi jeune.

Jusqu'en 1985, les seules formes cristallines connues du carbone étaient le graphite et le

diamant. En 1985, [Smalley et al 1997] ont découvert une nouvelle forme de carbone, la molécule de fullerène C₆₀ constituée de 60 atomes de carbone répartis sur les sommets d'un polyèdre régulier constitué de facettes hexagonales et pentagonales, ce qui leur valut le prix Nobel de chimie en 1996. L'histoire des nanotubes de carbone est réellement amorcée par la découverte du fullerène C₆₀. En 1991, Iijima [Iijima 1991] met en évidence l'existence d'un nouvel état solide carboné en relation avec le fullerène, en observant des structures tubulaires par microscopie électronique dans des fibres de carbone qu'il nomme nanotubes de carbone, produits secondaires de la formation de fullerènes par la méthode à arc électrique. Iijima était la première personne à identifier les nanotubes de carbone comme une nouvelle forme allotropique du carbone. Deux ans plus tard, les équipes d'Iijima [Iijima 1993] et de Béthune [Bethune 1993] publient successivement la découverte de l'existence des nanotubes de carbone mono-parois SWCNTs. Depuis, un intense effort de recherche a été entreprise pour améliorer notre connaissance des NTCs. Mais des travaux antérieurs ont déjà publié des structures de nanotubes de carbone sans pour autant pouvoir les définir. D'ailleurs, en 1952, Radushkevich et Lukyanovich ont publié dans un journal russe des images de nanotubes de carbone d'environ 50 nanomètres de diamètre [Radushkevich 1952]

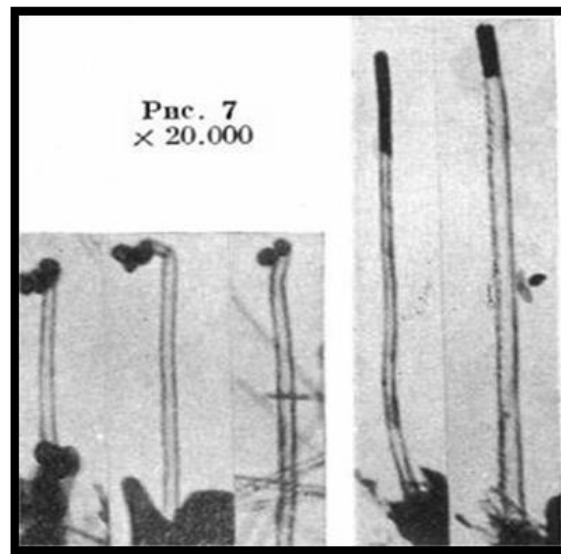


Figure I.1: Images MET de nanotubes de carbone, publiées en 1952.

Plus tard, en 1958, Hillert et Lange ont noté la formation de filaments graphitiques ayant une texture concentrique déterminée par diffraction d'électrons. En 1976, un article d'Oberlin et Endo montre des fibres de carbone creuses de taille nanométrique obtenues par CVD (Chemical Vapor Deposition). En 1982, un groupe de scientifiques soviétiques publia des résultats de la caractérisation chimique et structurale de nanoparticules de carbone produites par disputation thermo catalytique de monoxyde de carbone. En utilisant des images MET et aux rayons X, les auteurs suggèrent que leurs cristaux tubulaires multicouches de carbone ont été formés par enroulement de couches de Graphene en cylindres. [Haddad 2010]

I.4 Le carbone

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 (CO₂ CO) et de méthane.

[Zidour 2012]

L'atome de carbone capable de se lier d'une manière variée à un grand nombre d'atomes, ses orbitales atomiques sont capables de s'hybrider avec d'autres atomes pour former des orbitales moléculaires de type (sp¹, sp², ou sp³), ce qui confère au carbone un caractère bi-tri ou tétravalent. Il est donc possible de rencontrer des structures carbonées mono dimensionnelle, bidimensionnelle ou tridimensionnelle.

La seule forme stable du carbone est le graphite hexagonal, et les autres formes de carbone sont métastables dans les conditions normales de pression et de température

À l'état naturel le carbone se trouve sous trois formes cristallines, telles que les graphites, diamants et les carbones mal organisés. Il continue par la présentation des nouvelles formes du carbone, récemment découvertes. Nous rencontrerons la famille des fullerènes, les nanotubes multicouches ainsi que les nanotubes monocouches. [Buchoux 2011]



Figure I.2: Le carbone.

I.5 Les formes classiques du carbone

I.5.1 Le Graphite

Le graphite, état le plus stable des composés carbonés, qui est un matériau lamellaire Noir et friable, il est notamment utilisé depuis des siècles pour l'écriture. La forme cristalline stable est constituée d'un empilement de plans de graphènes selon la séquence (ABAB), (Chaque plan étant décalé d'une longueur de liaison par rapport au plan précédent). La Distance entre ces plans d'hexagones est plus élevée:(0,34nm). Cette structure particulière fait du graphite un matériau anisotrope. [Marcoux 2002]

Chaque graphène est organisés en hexagone, structure dite en nid d'abeilles. Les atomes de

carbone sont situés aux sommets des hexagones et chacun d'entre eux est relié à trois autres atomes, c'est une hybridation de type (sp^2). Les liaisons inter-atomes sont fortes et de distance (0,142nm). Au contraire, les liaisons entre atomes de plans voisins sont plus faibles car ces plans n'interagissent entre eux que par des forces vander Waals. Comme ces forces sont relativement faibles, les plans graphènes peuvent glisser les uns sur les autres, ce qui explique ses propriétés lubrifiantes.

Le graphite peut être disponible naturellement ou synthétisé. Le graphite synthétique est fabriqué à partir de précurseurs organiques. Le précurseur est d'abord soumis à un processus de carbonisation, consistant en un chauffage progressif sous atmosphère inerte jusqu'à atteindre des températures de près de (1300°C). A ce stade, il subsiste du carbone amorphe et du graphite polycristallin. Un traitement thermique à (2500°C) permet ensuite une graphitisation de ce carbone pour donner le graphite. [Lassagne 2006]

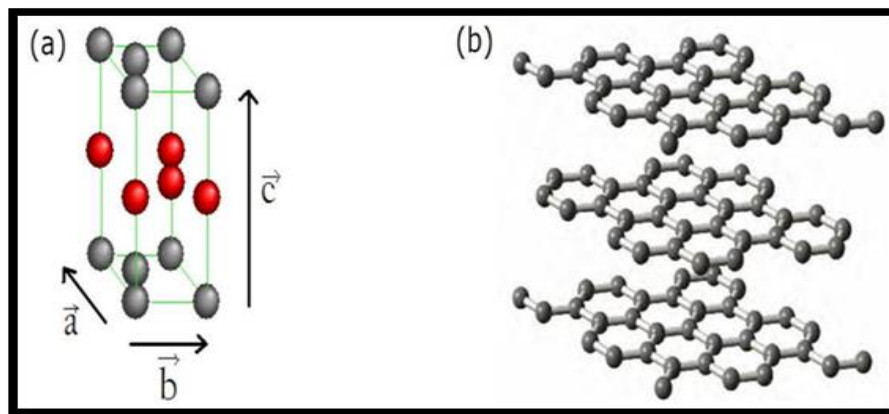


Figure I.3: (a) Maille hexagonale et (b) structure lamellaire du graphite.

I.5.2 Le Diamant

Le graphite est la forme la plus stable du carbone pur à pression et à température ambiante et sa structure a été identifiée par John Desmond en 1924 [Bernal 1924] et ne comportant que des carbones sp^2 . Il consiste en des atomes liés comme indiqués sur la Figure I.4. Les liaisons C-C ont pour longueur $1,42\text{\AA}$.

Il y a principalement trois sortes de diamant : naturel, synthétique et fabriqué par CVD. Comme le graphite, le diamant possède également une autre forme cristalline métastable : il s'agit d'une forme hexagonale appelée long dualité. Notons que le diamant est beaucoup plus dense que le graphite (3,51 contre 2,22). [Iijima 1993]

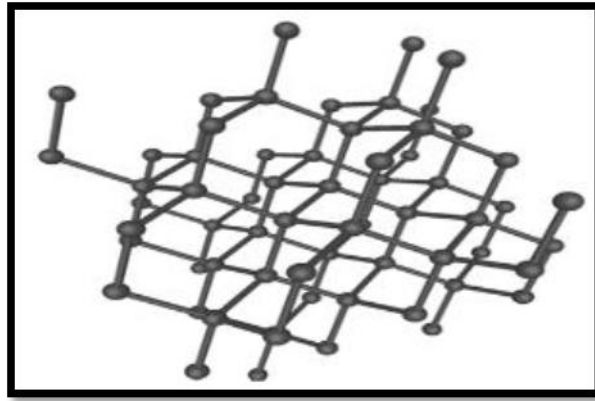


Figure I.4: Formes allotropiques du diamant.

Le diamant est le matériau de dureté la plus élevée et a 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. [Saint-Auban 2010]

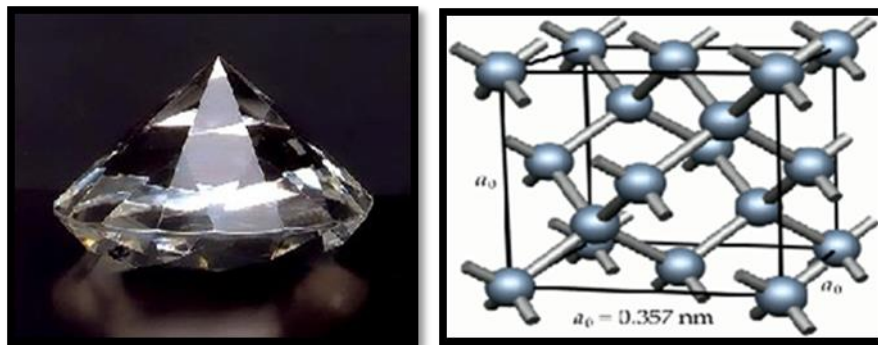


Figure I.5: Structure du diamant.

I.5.3 Carbone mal organisés

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

Il s'agit d'un réseau désordonné d'atomes de carbone, présentant des états d'hybridation (sp^2 et sp^3). A l'état naturel, le carbone amorphe est rare. Il faut aller le chercher dans les particules présentes dans les 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 de revêtement apportant une tenue mécanique supplémentaire à des pièces industrielles. Dans ce cas, le carbone amorphe n'est jamais pur, mais légèrement hydrogéné.

Notons qu'il est facile de synthétiser du carbone amorphe en laboratoire, en hydrolysant du sucre purifié à (900 °C), en l'absence d'air. [Marcoux 2002]

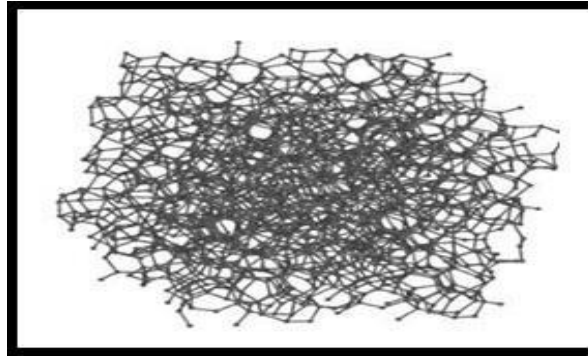


Figure I.6 : Formes allotropiques du carbones "mal organisées".

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 de 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 Graphene 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.

I.6.2 Fullerènes

Un fullerène est une molécule composée de carbone pouvant prendre une forme sphérique, 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. 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. [Bellifa Hichem 2015]

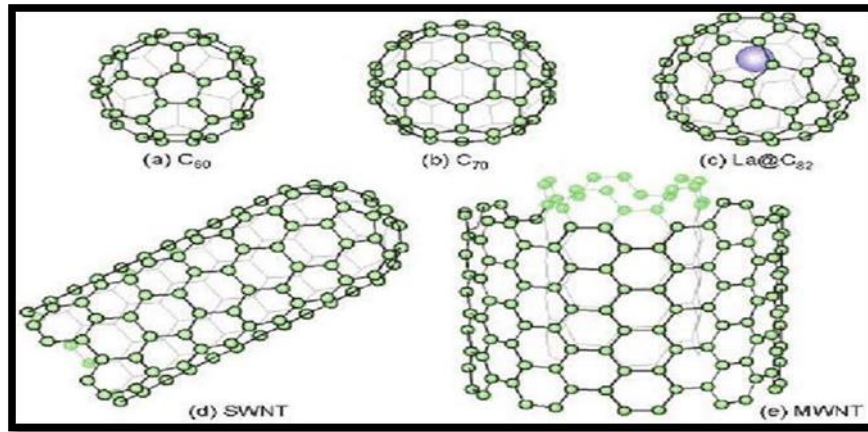


Figure I.7: (a) Structure d'un ballon de football C₆₀, (b) C₇₀, (c) C₈₂, (d) nanotube de carbone mono-feuillet, (e) nanotube de carbone multi-feuillets.

I.7 Classification des nanotubes de carbone

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

Comme leur nom l'indique, ces nanotubes sont composés d'une seule feuille de graphène enroulée sur elle-même. Le diamètre d'un nanotube de carbone mono-feuillet est typiquement entre 1 et 2 nm et sa longueur atteint facilement quelques micromètres.

Comme la molécule de fullerène dont il dérive, le nanotube de carbone obéit au théorème de Descartes-Euler. Le tube parfait étant composé d'hexagones (en nombre non limité) et de deux demi-sphères aux extrémités qui correspondent à des demi-fullerènes.

Les nanotubes de carbone mono-feuillets sont définis par trois paramètres : leur rayon r , leur longueur L et leur angle chiral Θ . La structure atomique d'un SWNT, aussi appelée son hélicité, dépend de l'orientation des motifs hexagonaux par rapport à l'axe du tube. En déroulant le feuillet de graphène qui compose un nanotube de carbone mono-feuillet,

un vecteur chiral $\vec{C}_h = \vec{a}_1 + \vec{a}_2$ ayant une norme égale à la circonférence du nanotube et perpendiculaire à l'axe du nanotube, est défini. Ce vecteur a pour indice (m, n) dans la base

$$\text{vectorielle} \begin{pmatrix} \vec{a}_1 & \vec{a}_2 \\ a_1 & a_2 \end{pmatrix}.$$

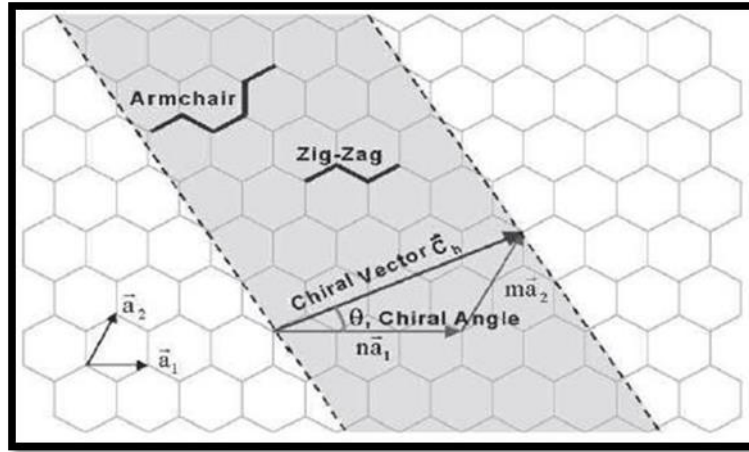


Figure I.8: Représentation de la structure de nanotubes de carbone.

L'angle formé entre les vecteur \vec{a}_1 et \vec{C}_h est appelé l'angle chiral et noté Θ . Ainsi, on peut différencier les structures « armchair » qui présentent des indices (m, m) et un angle chiral de 30° , les structures « zig-zag » d'indices $(m, 0)$ et d'angle chiral 0° et enfin les structures « chiral » qui représente tous les autres cas (*Fig I.9*). Les propriétés électroniques des nanotubes dépendent de ces configurations.

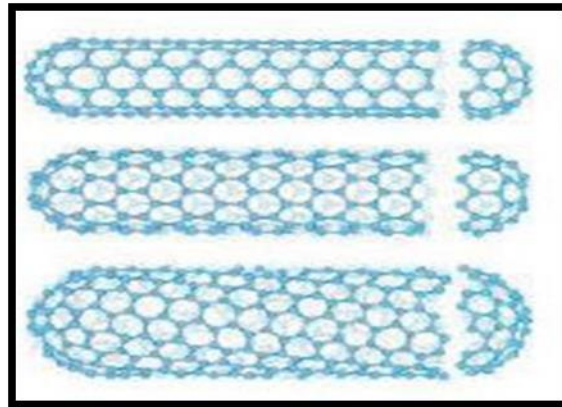


Figure I.9: Différentes configurations des nanotubes de carbone (de haut en bas : Armchair, Zig-zag et chiral)

Le vecteur chiral \vec{C}_h permet de connaître le diamètre du nanotube grâce à la valeur de la distance entre deux atomes de carbone reliés par une liaison covalente (0,142 nm)

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

La découverte des fullerènes en 1985 créa un véritable engouement pour la recherche et la caractérisation de nouvelles nanostructures carbonées. C'est ainsi que l'attention du monde scientifique s'est (re)tournée vers les fibres graphitiques, synthétisées depuis plusieurs dizaines d'années. Entretemps, les techniques de caractérisation, et notamment la microscopie électronique, avaient beaucoup progressé. Ces nouvelles techniques permirent à Sumio Iijima de mettre en évidence en 1991 [Iijima 1991], dans le produit d'évaporation du graphite par arc

électrique, des nanostructures graphitiques unidimensionnelles, baptisées nanotubes multifeuillets (Multi Wall NanoTube, MWNT).

Ces nanotubes multi-feuillets sont constitués d'un arrangement concentrique de feuilles de graphène, repliées sur elles-mêmes de manière à former des cylindres (*Fig 1.10*). Cette structure est appelée communément poupée russe, par analogie avec le jeu de poupées qui s'emboîtent les unes dans les autres. Le diamètre interne d'un nanotube multifeuillet est de l'ordre de deux nanomètres, tandis que le diamètre externe est de l'ordre d'une vingtaine de nanomètres.

Cependant, les diamètres des nanotubes multifeuillets peuvent aller jusqu'à la centaine de nanomètres de diamètre [Zidour2012]

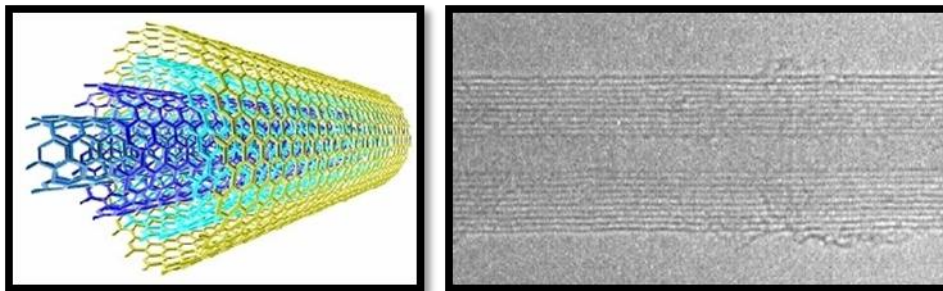


Figure 1.10: à gauche : Représentation graphique d'un MWNT et à droite : image de microscope électronique à transmission de plusieurs MWNT.

La structure des nanotubes multifeuillets décrite précédemment est communément admise mais ce n'est pas la seule structure possible. Ainsi, certaines études expérimentales [zhou 1994] laissent envisager que les nanotubes multifeuillets pourraient avoir une structure de type rouleau de parchemin (*Figure 1.11*). [Marcoux 2002]

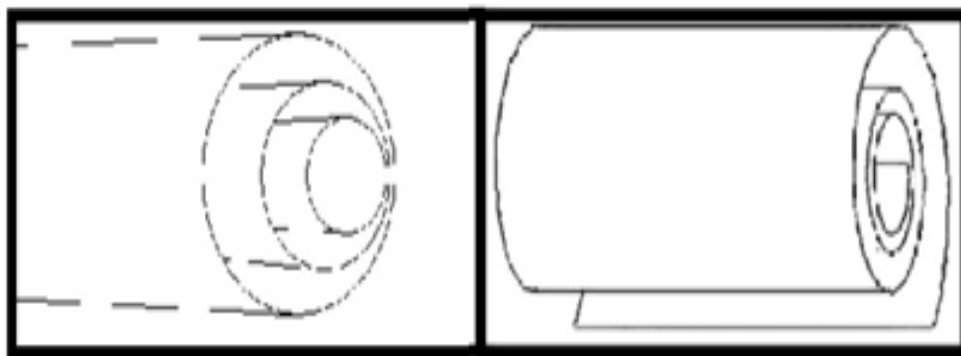


Figure 1.11: Structures possibles des MWNT. Gauche : type poupée russe. Droite : type rouleau de parchemin

I.8 Méthodes de synthèse de nanotube de carbone

De nombreuses méthodes ont été mises au point pour synthétiser les NTCs, cependant elles sont toutes basées sur le même principe nécessitant : une source carbonée, sous forme solide ou gazeuse ; de l'énergie, sous forme de chaleur et/ou de pression ; et un catalyseur.

Ce sont les techniques de synthèse, les conditions opératoires et les types de source carbonée et de catalyseur utilisés qui vont déterminer la nature (SWNTs, DWNTs, MWNTs), la chiralité, la qualité et la pureté des NTCs synthétisés. Les NTCs sont essentiellement synthétisés selon trois techniques : par dépôt chimique catalytique en phase vapeur (CCVD), par arc électrique et par ablation laser. La première méthode est une voie de synthèse dite à température modérée, alors que les deux autres sont considérées comme des voies de synthèse à haute température. Il existe cependant d'autres méthodes de synthèse, qui ne seront pas détaillées par la suite, à savoir par combustion d'hydrocarbures, par décharge électrique en solution aqueuse par rayonnement solaire.

I.8.1 Méthode de l'arc électrique

La méthode à arc électrique, déjà utilisée pour la synthèse des fullerènes, a permis la découverte des nanotubes de carbone. Le réacteur pour la production de CNT est constitué de deux électrodes de graphite positionnées dans une chambre sous vide dans laquelle on introduit un gaz approprié à une pression donnée.

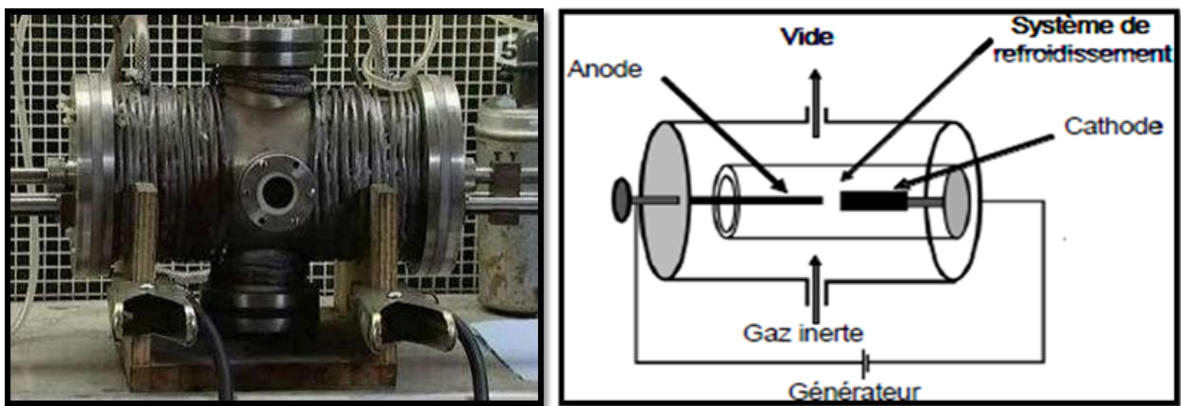


Figure I.12: Un réacteur de synthèse de nanotubes monocouche par arc électrique.

La réaction se produit lorsqu'une tension est appliquée et que les électrodes sont rapprochées. Un arc électrique se déclenche et la température monte localement à 3000–4000°C. Dans ces conditions, l'anode peut se vaporiser et former des produits carbonés qui se déposent à la cathode. Les premiers nanotubes obtenus avec cette technique étaient de type multi-parois, mais la sélectivité était vraiment très faible et les CNT étaient accompagnées de produits non désirés tels que de la suie ou des particules encapsulées. Depuis, le procédé a été amélioré et, grâce à l'optimisation des paramètres de réaction comme la tension appliquée, le choix et la pression du gaz inerte ou la présence d'un catalyseur métallique dans les électrodes, la productivité et la sélectivité ont été augmentées.

Comme pour les MWNT, l'arc électrique a été la première méthode à partir de laquelle des SWNT ont été produits en 1993 par Iijima et Bethune. Le passage d'une forme de nanotubes à l'autre a été possible en ajoutant des catalyseurs à base de fer ou de cobalt dans l'anode mais les

SWNT étaient produits avec de faibles sélectivités.

Ce type de technique présente l'avantage de produire des nanotubes de bonne qualité et de pouvoir les aligner partiellement à l'aide du champ électrique qui est généré dans le réacteur. Il présente néanmoins un inconvénient majeur dans l'optique d'une industrialisation : vu les températures élevées, nécessaires à la vaporisation du graphite, la méthode à arc est très coûteuse et le passage à l'échelle industrielle semble, à ce jour, peu vraisemblable. [Massimiliano 2005]

I.8.2 Ablation laser

L'ablation par laser est un procédé de synthèse utilisant des lasers ayant une puissance variant entre 4.2 kW et 1 MW. On utilise les lasers du type IR, CO₂, UV ou encore ArF pouvant fonctionner de manière pulsée ou continue. Ils peuvent être couplés et ainsi élever la température effectuant la pyrolyse. En effet, le substrat et le mélange gazeux d'hydrocarbure sont chauffés simultanément par le laser et réagissent pour former la déposition sur le substrat. Les gaz utilisés sont le plus souvent le méthane (CH₄) et l'acétylène (C₂H₂). La température du substrat avoisine les 500 °C. Cette méthode permet de produire des couches de diamant mais aussi de CNT à une seule couche. Ce procédé permet de découvrir et d'observer pour la première fois les fullerènes en, or, depuis, cette technique s'est révélée très généreuse dans la synthèse de nanotubes fortement graphitisés et à une seule paroi [Emmengger 2002]

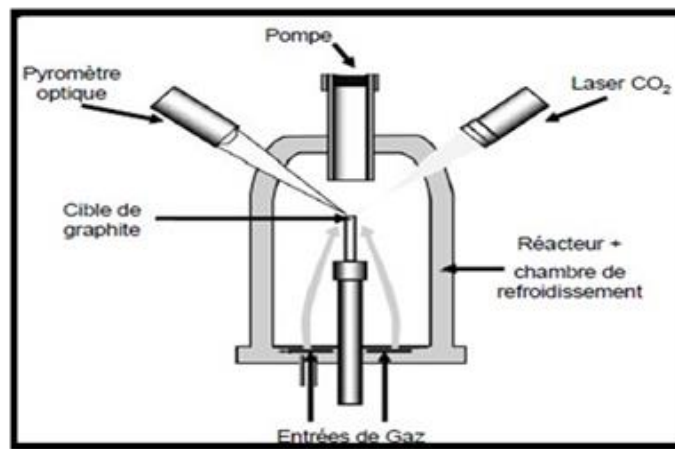


Figure I.13: Schéma de l'appareillage d'ablation laser.

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

Dans cette méthode, des hydrocarbures (CH₄, C₆H₆ etc....) et de l'hydrogène sont mis en présence de catalyseurs métalliques (Fe, Co, Ni etc....), le tout dans un four porté à haute température (~1000°C). Les nanotubes se forment alors sur les plots de catalyseurs. L'un des avantages de cette méthode est que les nanotubes se forment de façon continue (contrairement à la méthode d'ablation laser par exemple).

On peut espérer trouver des conditions expérimentales permettant de fabriquer des nanotubes purs et permettant un contrôle parfait du diamètre et de la chiralité [Saito 1992]. Cependant, cela est

encore loin d'être la réalité. Un autre avantage de cette méthode est que l'on peut faire croître les nanotubes à des endroits prédéterminés. Cela peut s'avérer très intéressant pour toutes les applications en nanoélectronique, par exemple, pour fabriquer des matrices de transistors à base de nanotubes de carbone. De plus, on peut facilement aligner les nanotubes entre eux, perpendiculairement à la surface.

On obtient alors des "pelouses" de nanotubes. Cette propriété est très intéressante pour toutes les utilisations des propriétés d'émission de champ des nanotubes. En revanche, un inconvénient de cette méthode est qu'elle ne permet pas, pour le moment, de fabriquer de grandes quantités de nanotubes mono-paroi.

En effet, autant la production de nanotubes de carbone multi-parois est relativement facile autant celle de nanotubes de carbone mono-paroi est difficile. Enfin, le fait de faire croître les nanotubes à un endroit donné peut aussi s'avérer être un inconvénient puisque de ce fait, on ne peut pas les manipuler facilement (on ne peut pas les recueillir, les déplacer).

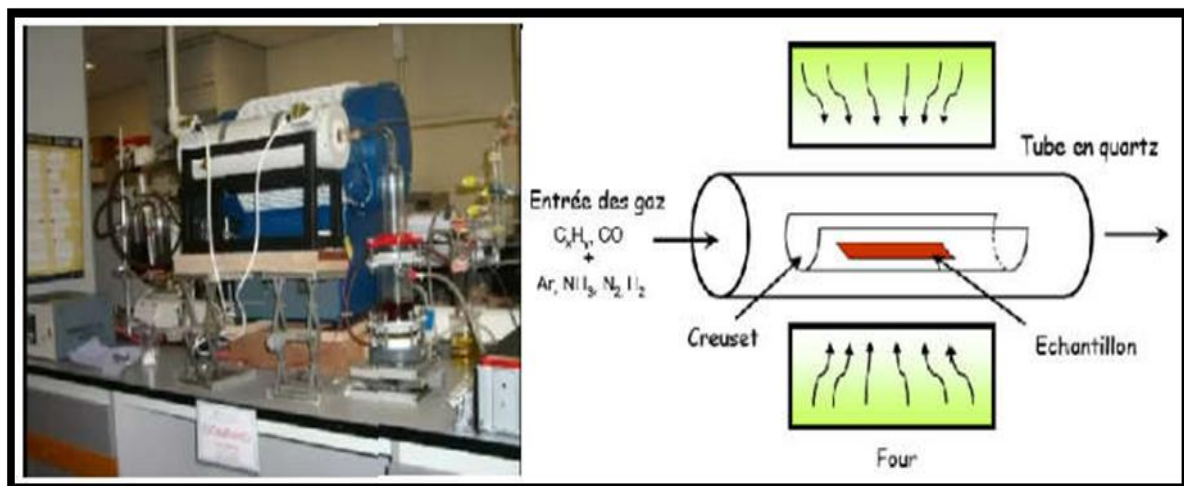


Figure I.14: Schéma d'un réacteur CVD pour la croissance des (NTC)

I.8.4 Méthode décomposition catalytique HiPCO

Le procédé (Hip CO) (High Pressure decomposition of 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 surcroît, le monoxyde de carbone utilisé comme source de carbone pour la croissance des tubes ne se pyrolyse pas à (1200°C), ce qui permet d'obtenir des nanotubes de carbone mono feuillets. [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.15).

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]

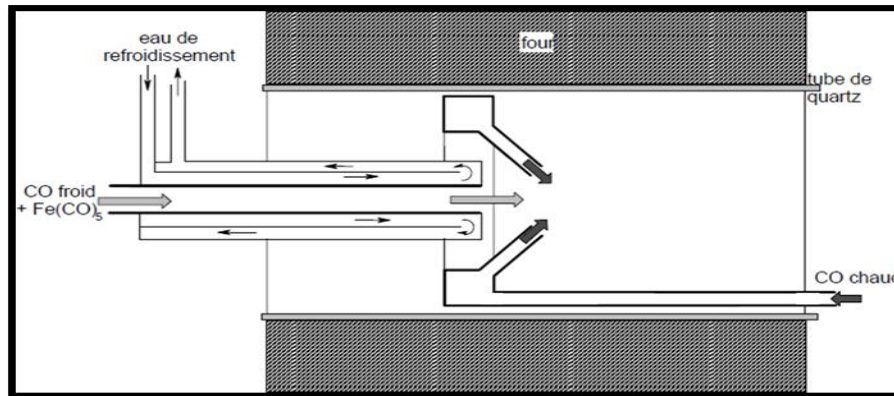


Figure I.15: Schéma de la production de nanotubes par méthode HiPCO

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

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 catalyseur métalliques. D'autre part, cette méthode permet de produire des nanotubes dans des quantités comparables à celles obtenues par la méthode d'ablation laser.

[Lauret 2004]

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.

I.9 Propriétés des nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone possèdent des propriétés physiques exceptionnelles.

- Très faible déformation sous charge : module d'Young axial (270-950 GPa) pour (MWNT) et (550-1060 GPa) pour (SWNT) contre (210) GPa pour l'acier au carbone.
- Très forte résistance à la traction : (150 GPa), plus de 100 fois supérieure à l'acier Ultrarésistant.
- Très forte conductivité thermique : (3000-6000 W m⁻¹, K⁻¹) contre (400 GPa) pour le cuivre.
- Conductivité électrique : même niveau que le cuivre.

Evident, la meilleure dispersion des nanotubes dans les matériaux composites permet d'atteindre les mêmes performances. [Rakrak 2018]

I.9.1 Propriétés mécaniques

Les nanotubes de carbone possèdent des propriétés mécaniques uniques, à cause de forte liaison chimique carbone-carbone du graphite, dont l'énergie de dissociation est de l'ordre de 348 kJ/mol. Les travaux théoriques ont prévu un module de Young très élevé de 0.97 et 1.1 TPa pour les nanotubes mono parois et multi parois, respectivement [Lu 1997]

Ces propriétés varient aussi selon la nature du nanotube. Les nanotubes multi-feuillets sont beaucoup plus résistants que les nanotubes mono feuillets. Il a montré aussi que les propriétés mécaniques sont indépendantes des caractéristiques géométriques des tubes (chiralité, diamètre...).

Les nanotubes de carbone peuvent être soumis à d'importantes contraintes sans montrer de signe de fracture fragile ou de déformation plastique Par AFM, il faut exercer une contrainte de 0.40 TPa pour briser la corde d'un nanotube de carbone à simple paroi (SWCNT : Single Wall Carbon Nanotube).

La déformation maximale de SWCNT à la rupture tend vers 5.3 % [Yu MR 2000] Des mesures semblables sur les nanotubes de carbone à parois multiples (MWCNT : Multi Wall Carbon Nanotubes) montrent que la déformation de rupture est d'environ de 12 %.

I.9.2 Propriétés thermiques

Compte tenu des performances en tant que conducteur thermique du graphite et du diamant, de nombreux chercheurs se sont penchés sur celles des NTC. Les études théoriques ont rapidement montré qu'à basse température un effet de transport balistique des phonons est possible dans les NTC. Des expériences sur des tubes uniques à basse températures ont permis de mieux comprendre les mécanismes intervenant dans la conduction thermique de tels systèmes. Concrètement, les nanotubes présentent des conductivités thermiques de l'ordre de celle du graphite dans le plan ou encore du diamant, c'est-à-dire de l'ordre de quelque de kW.m⁻¹. K⁻¹ à température ambiante. L'utilisation de NTC entant que conducteurs de chaleur est ainsi

envisagée pour des matériaux composites ou dans des microsystèmes entant que dissipateur de chaleur. [Florent 2011]

I.9.3 Propriétés électronique

L'orientation des motifs hexagonaux de carbone par rapport à l'axe du tube déterminée Comportement métallique ou semi-conducteur théorique des SWNT. [Saito 1992] Les nanotubes de configuration dite « Armchair » ont des propriétés électroniques comparables à celles des conducteurs métalliques, alors qu'une configuration « Zigzag » ou « Chiral » engendre un comportement semi-conducteur, de ces règles de construction, lors de la synthèse des NTC mono-feuillets et en tenant Compte de toutes les chiralités possibles, 1/3 des NTC auront un comportement métallique et 2/3 un comportement semi-métallique Ouse conducteur. [Saito 1992]

D'après ces auteurs, l'électron traverse le NTC (selon l'axe) sans subir de collisions et sans dissiper d'énergie. Théoriquement, en tenant compte du transport balistique, un nanotube aurait une résistance Minimale de $h/4e^2$ soit 6,5 kl (h : constante de Planck, e : (charge d'un électron) indépendamment de sa longueur. [Yao 2001]

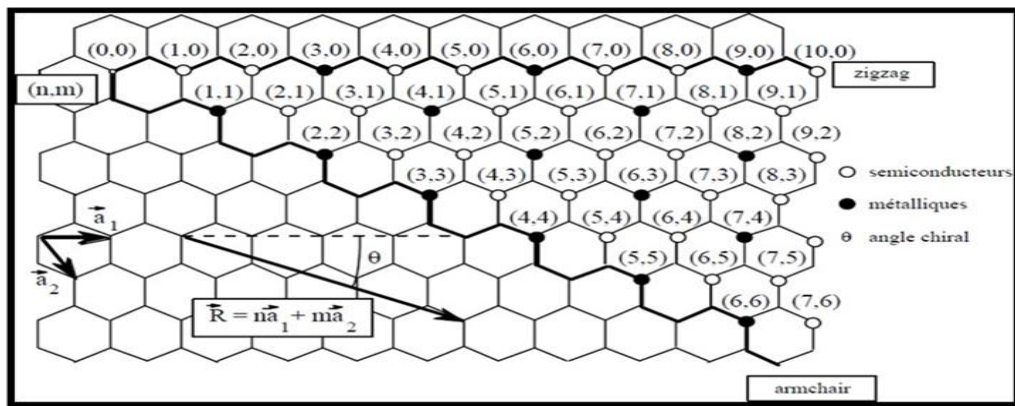


Figure I.16: Propriétés électroniques des nanotubes de carbone monocouches en fonction de la paire des entiers (n,m) .

Les CNTs présentent différentes propriétés électriques pour différents indices chiraux :

- Lorsque $n - m = 3p$ (où $p = 1,2,3, \dots$), les CNTs présentent des caractéristiques d'un métal, donc les CNTs de configuration armchair sont toujours métalliques Lorsque $(n - m = 3p \pm 1)$, les CNTs présentent des caractéristiques d'un semi-conducteur.

La structure des nanotubes de carbone est déduite de la structure d'un feuillet de graphène qui a été enroulé jusqu'à la forme d'un cylindre.

Le vecteur chiral de la structure est donné par : $\vec{R} = n.a_1 + m.a_2$, avec n, m des entiers

Si : $\theta = 0^\circ$ (n = 0 ou m = 0) : Le nanotube est non chiral, de type zigzag.

Si : $\theta = 30^\circ$ (n = m) : Le nanotube est non chiral, de type armchair.

Si : $\theta \neq 0^\circ$ et $\theta \neq 30^\circ$: Le nanotube est chiral.

I.9.4 Propriétés optiques

Les nanotubes de carbone possèdent des propriétés optiques intéressantes. En effet, le matériau le plus noir jamais conçu par l'homme est un tapis de nanotubes disposés verticalement, réalisé par des chercheurs l'Université Rice autour du professeur Pulickel Ajayan ; indice de réflexion avec un de 0,045%, il est 30 fois plus sombre que le carbone, ce qui lui permet d'absorber 99,9 % de la lumière qu'il reçoit. C'est 3 fois « mieux » que ce que permettait l'alliage de nickel-phosphore qui était le matériau réputé le plus sombre. Ces inventions pourraient intéresser les secteurs militaires, 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. Cela intéresse 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). 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 anti-fouling 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. [Bernard 2007]

I.10.1 Applications au Génie Civil

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 anti-fouling enrichie en nanotubes de carbone. [Bernard 2007]

I.11 Défauts des nanotubes de carbone

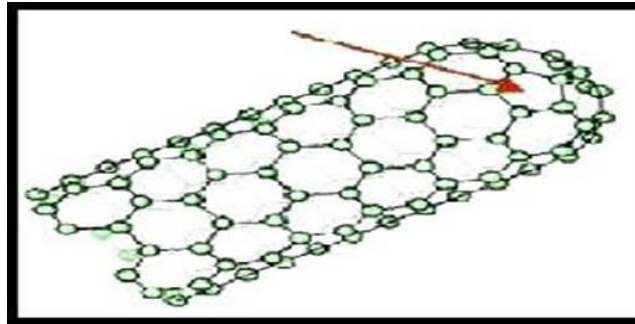


Figure I.17: Fermeture des nanotubes de carbone

La courbure positive est obtenue par la présence de pentagones (flèche *Fig I.17*). Il faut ainsi six pentagones à chaque extrémité, soit douze au total, pour satisfaire la condition de fermeture (condition bien connue des mathématiciens sous le nom de théorème d'Euler).

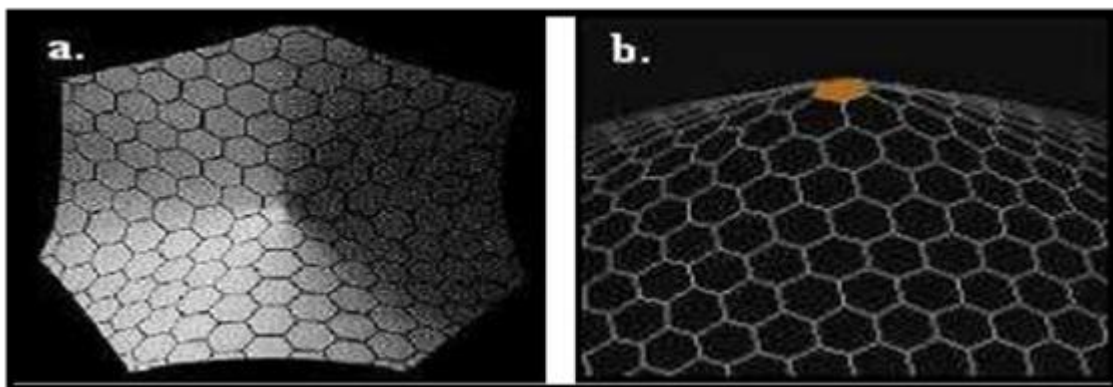


Figure I.18: Courbure induite dans un réseau graphitique par un: a). heptagone b). pentagone

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.17.a*). Il est alors possible, en combinant ces défauts, de faire varier le diamètre du tube ou créer des coudes. Des

connexions entre les nanotubes de carbone peuvent aussi être envisagées sous la forme de jonction en Y, T ou en X. (Fig I.19). [Chemi 2018]

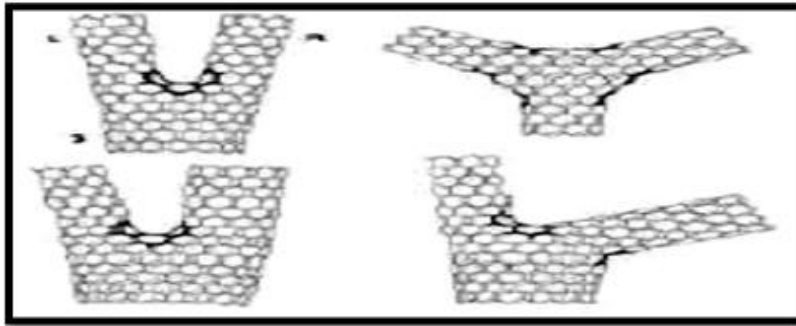


Figure I.19: Défauts pentagonaux et heptagonaux se traduisant par des jonctions

Sur la (Fig I.120) on peut voir l'influence des cycles non hexagonaux sur les feuillets de 2 nanotubes multicouches:

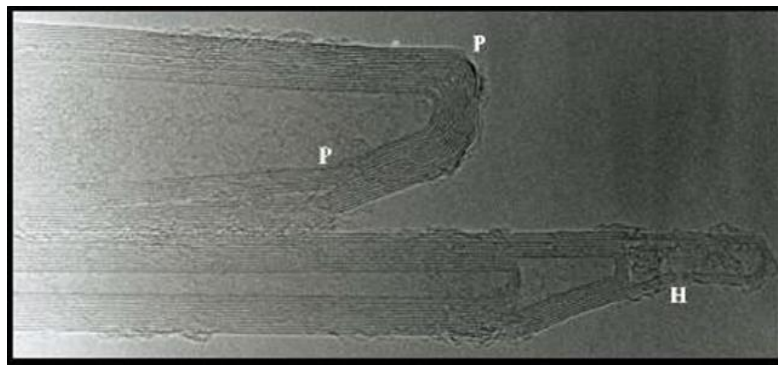


Figure I.20: Image MET des extrémités de deux nanotubes multicouches. On a indiqué quelques-uns des cycles non hexagonaux : (P) indique un pentagone et (H) un heptagone.

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

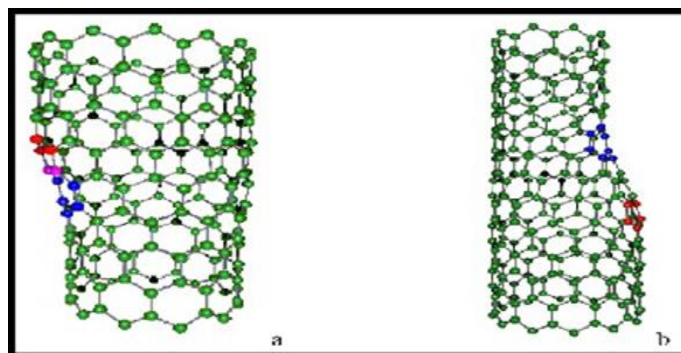


Figure I.21: Une paire pentagone-heptagone provoquant une variation de diamètre et de chiralité : a- de (11,0) a (12,0) ; b- de (9,0) a (12,0).

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, 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.13 Conclusion

A travers ce premier chapitre, on comprend mieux pourquoi les nanotubes de carbone jouent un rôle de premier plan dans le domaine des nanosciences que dans leur côté applicatif. Vu de leurs dimensions particulières ainsi que leurs propriétés (mécanique, électronique, thermiques...) diverses ouvrent à l'industrie des perspectives d'innovations nombreuses et prometteuses.

Ensuite, nous avons étudié la structure des nanotubes de carbone mono-feuillets et les nanotubes de carbone multi-feuillets. Aussi, nous avons détaillé trois méthodes de synthèse de NTC, encore leur vaste champ d'application pour cela nous avons noté les inconvénients et cité les défauts des nanotubes de carbone.

Enfin, les nanotubes de carbone (NTC) sont très résistants et excellent matériaux pour le renforcement des matrices polymères permet d'obtenir des matériaux nano-composites.

CHAPITRE II :

Généralités sur les nanocomposites (polymère/
nanotubes de carbone)

II.1 Introduction

Les matériaux composites à base de polymère conducteurs possèdent de nombreuses applications dans différents domaines comme l'électronique et les transports. Les composites avec une matrice de polymère sont une classe de matériaux particulièrement intéressante dans le contexte socio-économique actuel.

Les polymères non chargés offrent déjà des avantages de légèreté et de ductilité combinés à une facilité de mise en œuvre ainsi qu'un faible coût de production. Ces caractéristiques les ont placés, moins d'un siècle après leur industrialisation, devant les métaux en termes de consommation annuelle.

Cependant, les polymères sont moins rigides que les métaux et surtout non conducteurs ce qui limite leurs applications dans certains domaines techniques. Nous comprenons alors que les nouveaux matériaux hautes performances sont des composites de polymères renforcés par des charges conductrices afin d'allier légèreté, déformabilité, rigidité et conductivité.

Les charges de carbone dites de nouvelle génération sont des nanotubes, des nano fibres ou encore des feuillets de Graphene. Ces charges sont toutes anisotropes avec au moins une dimension inférieure au micromètre.

II.2 Les Polymères

Les polymères sont des macromolécules, organique ou inorganique, de poids moléculaire élevé, formée de l'enchaînement covalent d'un très grand nombre d'unités structurales uniques, appelées monomères, assemblées de manière régulière. La réaction par laquelle les monomères se combinent pour former un polymère est connue sous le nom de polymérisation. [Gowariker et al. 2005]

La structure de la macromolécule est définie par la composition chimique du monomère, la disposition des atomes et des liaisons, l'ordre d'enchaînement et les aspects topologiques (l'architecture). En général, les polymères sont formés à partir des 9 éléments chimiques suivants : le carbone, l'hydrogène, l'azote, l'oxygène, le fluor, le silicium, le phosphore, le soufre et le chlore. [Kau 2001]

La polymérisation se fait soit par chauffage, par irradiation ou par diffusion d'un amorceur fixé sur l'argile, via une réaction d'échange cationique, avant le gonflement de l'argile par le monomère.

Le terme polymère vient du grec "polus" plusieurs et "meros" parties, ce qui signifie que les polymères sont des matériaux constitués de longues chaînes macromoléculaires. Chaque macromolécule est formée de plusieurs dizaines à plusieurs milliers d'unités de répétition

identiques appelées "mères" et liées entre elles par des liaisons primaires. [Zidour 2012]

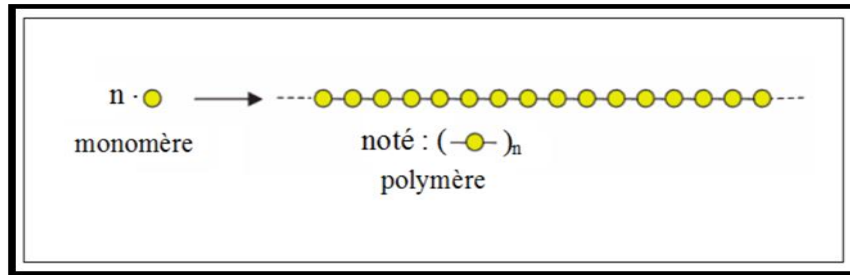


Figure II.1: Modèle schématique de la synthèse d'un polymère.

La lettre n est appelée « degré de polymérisation » ou « indice de polymérisation », pour des valeurs élevées de n ($n > 100$), on parle de macromolécules. La plupart des macromolécules synthétiques se présentent de façon semblable, sous forme de fils longs et souple.

Un polymère peut être caractérisé par son degré de polymérisation ou sa masse moléculaire. Le degré de polymérisation est le nombre total de monomères contenus dans une macromolécule.

II.3 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.3.1 Classification selon l'origine

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

II.3.1.1 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 de 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.3.1.2 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.3.1.3 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.3.2 Classification en fonction de l'architecture

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

II.3.2.1 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 :

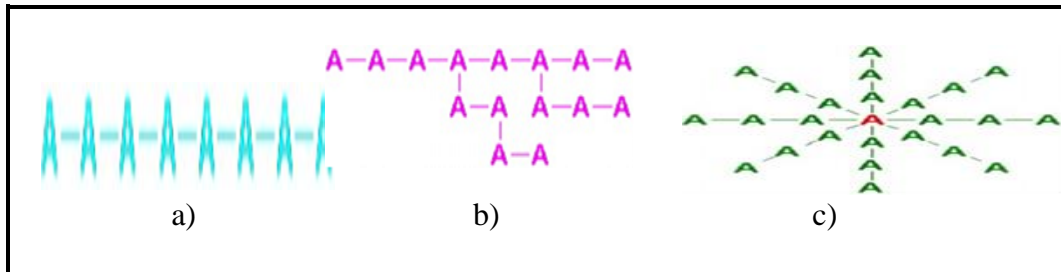


Figure II.2 : Les différentes familles des homopolymères : a) Les homopolymères linéaires, b) Les homopolymères branchés, c) Les homopolymères étoiles.

II.3.2.2 Les copolymères

Les copolymères sont des polymères qui possèdent plusieurs unités. Comme pour les Homopolymères, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles.

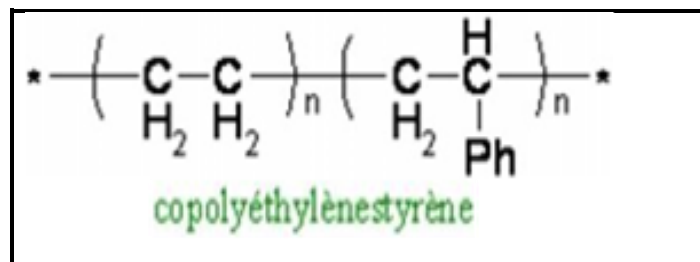


Figure II.3 : Modes de copolymères

Parmi les différents modes de copolymères, nous trouvons :

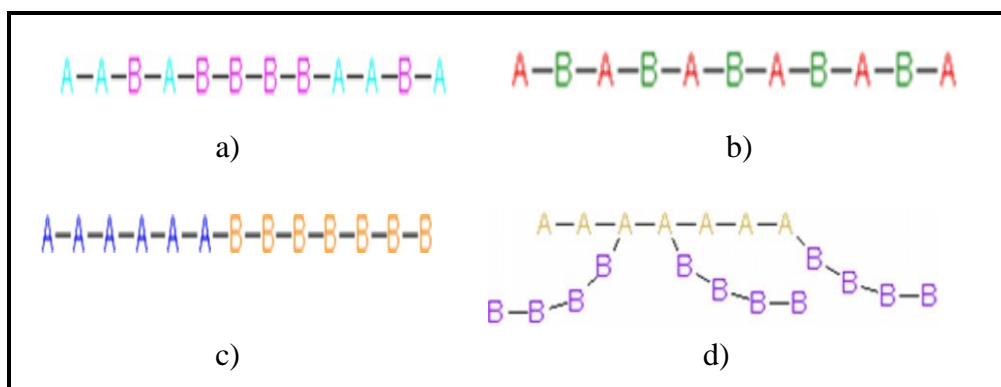


Figure II.4: Les différentes familles des copolymères : a) Le mode statistique, b) Le mode alterné, c) Le mode séquencé, d) Le mode greffé.

Les symboles (A) et (B) sont deux unités différentes du copolymère les polymères, qu'ils soient

homos 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.3.3 Classification selon le comportement thermique

II.3.3.1 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 [Paris 2011]

II.3.3.2 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.3.3.3 Les élastomères

Ce sont des polymères qui peuvent être étirés à au moins deux fois leur longueur d'origine et qui se rétractent à leur dimension initiale dès que cesse la force d'étirement et ce sans vulcanisation. Parmi les avantages des élastomères, il faut citer une excellente mise en œuvre, de bonnes propriétés mécaniques, un très faible échauffement interne et une très bonne tenue au froid [Perrin et al 1999]

II.4 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'infiltrent 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. Il faut préciser que ces applications de polymères réels (formulations entièrement composées de produits de synthèse) avaient été précédées par des emplois de produits naturels (goudron de houille - bitumes, etc.) dopés et/ou améliorés avec des polymères de synthèse. [Buerschaper 1944]

II.5 Présentation des matériaux composites

II.5.1 Définition d'un matériau composite

Le matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de nature différente, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à la performance des composants pris séparément. Il est constitué d'une matrice et d'un renfort, constitué de fibres. La matrice est elle-même composée d'une résine (polyester, époxyde, etc...). Le renfort apporte au matériau composite ses performances mécaniques élevées, alors que la matrice permet de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures [Bertholt 1999] Le Mélange entre eux est réalisé par polymérisation (réaction chimique). En effet, les matériaux composites ont un comportement particulier, et ceci est dû essentiellement à deux facteurs. Le premier facteur résulte du comportement anisotrope du matériau utilisé dans la couche élémentaire : contrairement aux matériaux isotropes, les matériaux composites sont peu rigides en cisaillement. Le deuxième facteur dérive de la stratification qui consiste en l'empilement de plusieurs couches, ce qui favorise l'effet de cisaillement, et particulièrement du cisaillement transversal (noté CT) [Daniel 2009]

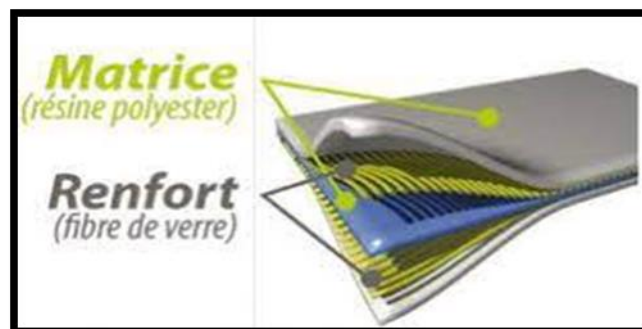


Figure II.5: Matériau composite.

Tout matériau hétérogène pourrait être qualifié de matériau composite [Renard 2005] Néanmoins, on donne généralement une définition plus restrictive. Un composite est un matériau constitué de deux phases (ou plus) non miscibles ayant des propriétés et des rôles différents. L'une, continue, est appelée matrice et l'autre, discontinue, appelée renfort (*Fig II.6*).

Les composants doivent être physiquement identifiés : il doit exister une interface distincte entre eux. Ce mélange possède des propriétés nouvelles et on recherche en les associant un ensemble de performances supérieures aux composants pris séparément.

Le renfort assure souvent la tenue mécanique et la matrice, la cohésion et le transfert des

efforts vers le renfort. Les matériaux de renfort confèrent aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture, dureté... Ils permettent également de modifier certaines propriétés physiques comme le comportement thermique, la résistance à l'abrasion ou les propriétés électriques.

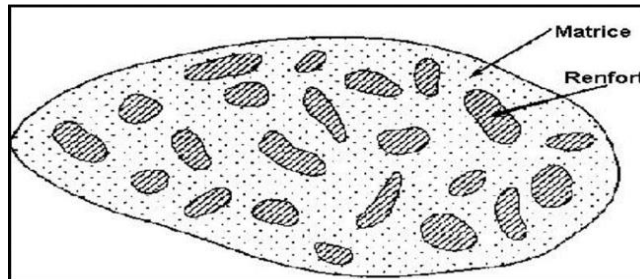


Figure II.6: Schéma illustratif d'un matériau composite.

II.5.2 Les propriétés des matériaux composites

Dépendent de trois facteurs :

- De la nature et des propriétés des matériaux constituants.
- De la géométrie et de la distribution du renfort.
- Des interactions entre constituants et de la nature de l'interface matrice-renfort.

Le renfort sera caractérisé par sa forme, sa taille, sa concentration et son orientation. La concentration en renfort est définie par la fraction volumique ou massique. Il s'agit d'un paramètre déterminant des propriétés du composite. Sa distribution dans le volume l'est aussi car de nombreuses propriétés en dépendent comme le montre par exemple, la théorie de la percolation. Si elle est uniforme, les mesures ne dépendront pas du point de mesure. Selon la géométrie et l'orientation du renfort, il est possible de contrôler l'anisotropie des caractéristiques souhaitées du composite. Suivant la forme et la nature des constituants il est possible de classer les matériaux composites. En effet, en fonction de la forme nous trouvons deux grandes classes : les composites à particules et à fibres [Berthelot 1999]

II.5.3 Domaines d'application des matériaux composites

L'utilisation des composites dans la construction civile est un nouveau créneau, qui commence à intéresser nos bâtisseurs. Le nombre de dégâts causés par les séismes à travers le monde a poussé les chercheurs à s'intéresser aux composites. Le handicap majeur de l'utilisation des matériaux composites dans la construction civile, reste leur coût, qui est encore excessif. L'utilisation des composites renforcés de fibres de carbone, en complément des composites à fibre de verre (TD et TP) pourra se développer dans le secteur de la construction civile lorsque leur prix deviendra inférieur à 6 €/kg [Menail 2009]

II.6 Généralités sur les nanocomposite

II.6.1 Définition d'un nanocomposite

Nano composite, le mot est exagérément appliqué en ce moment, à-peu-près Galvaudé, et malgré cela ces matériaux ne datent pas d'hier. Un matériau est dit composite lorsqu'il est constitué d'au minimum deux phases et qu'il combine les avantages en limites de propriétés de chacun de ses constituants pris individuellement tout en minimisant leurs inconvénients [Vaia et al 1995]

Cette définition très générale s'accorde à assembler une variété de matériaux tels que le bois, l'os, les mélanges de polymères Non miscibles. Les composites sont constitués de plusieurs phases chimiquement Différentes et séparés par une interface clairement définie une autre approche consiste à définir comme un matériau à deux phases, dont l'une (généralement la charge) est de dimension nanométrique (10^{-9} m), la seconde phase étant généralement la matrice, Les nano composites sont généralement obtenus en dispersant de petites quantités (1 à 5% en poids) de nanoparticules organiques ou Inorganiques dans une matrice [Garcia et al 2003].

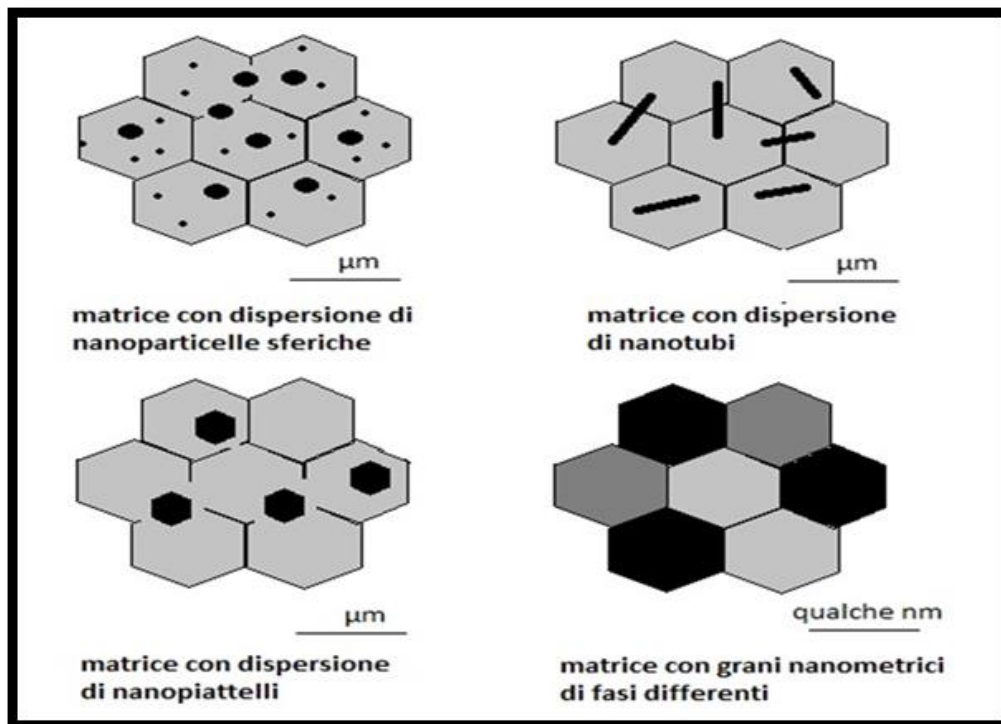


Figure II.7 : Morphologie de nanocomposites.

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

Propriétés améliorées	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - 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 	<ul style="list-style-type: none"> -Augmentation de la viscosité limitant sa mise en oeuvre - Difficultés de dispersion - Problèmes optiques - Sédimentation - Impact(s) potentiel(s) sur la santé - Coloration

II.7 Différences entre composite et nanocomposite

Les nanocomposites (NTC/Polymère) font l'objet d'une littérature très abondante. [Yam 1995] Ils sont également composés d'une matrice contenant des charges. 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 interrassiale 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 nanocomposites ont des 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]

II.8 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, et qui se présente, généralement, sous forme de fibres : Fibres longues unidirectionnelles (Carbone, verre), fibres

longues tissées, fibres courtes réparties aléatoirement sans directions privilégiées(mat) [Remond et al 2003]

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

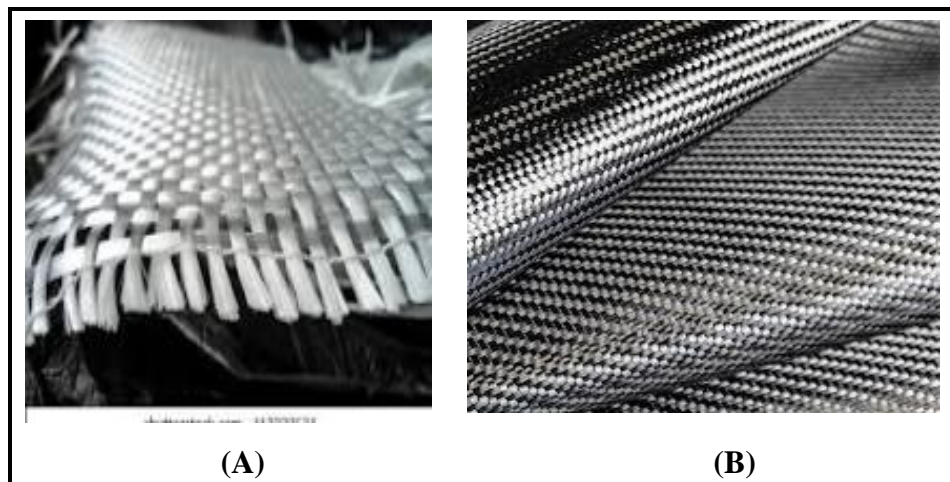


Figure II.8: (A) Fibre de verre (B) Fibre de carbone.

II.8.1 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. On en distingue trois types :

II.8.1.1 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.8.1.2 Renforts de type 2D

Deux des dimensions sont de taille nanométrique. La charge se présente donc sous forme de tube (nanotubes de carbone) [Peeterbroeck et al 2004] ou sous forme de fibre (silicates aciculaires : la sépiolite).

II.8.1.3 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.9 Classification des nanocomposites selon la nature de la matrice

Le rôle de la matrice est de lier les renforts sous forme compacte et de donner la forme finale à la pièce. De plus elle permet de transférer les charges entre les fibres et de les protéger contre l'environnement. Les performances générales du composite sont très liées à la nature de la matrice, notamment pour la tenue à long terme comme décrit sur la (fig II.8), il existe différentes catégories de matrices qui regroupent les matrices organiques, minérales, céramiques et métalliques.

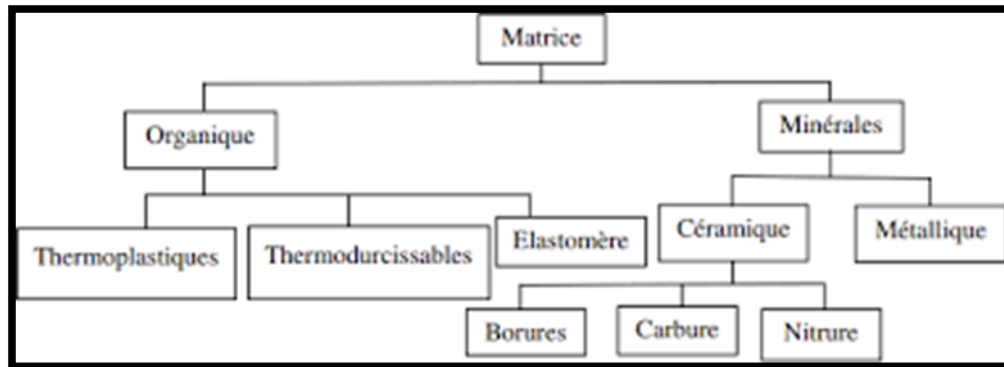


Figure II.9: Les différentes matrices des matériaux composites.

Le choix d'une matrice pour une application donnée se base sur différentes propriétés :

- Les propriétés d'adhésion et de compatibilité avec les renforts.
- Les propriétés mécaniques et de résistance à la fatigue : si les composites montrent des propriétés en fatigue comparables à celles des métaux, leur résistance dépend des propriétés de ténacité des matrices.
- L'absorption d'eau : selon la nature des composants, une sensibilité à la présence d'eau plus ou moins importante implique un vieillissement prématuré de la matrice.

Les composites à matrice métallique sont moins répandus que les composites à matrice organique mais présentent des applications intéressantes dans des domaines tels que l'aéronautique.

Les matrices céramiques sont notamment utilisées pour des applications à haute température alors que les géo polymères [Haiwen et al 2013] sont des polymères à base silice et alumine, plus résistant aux attaques chimiques que les polymères organiques.

II.9.1 Les composites à matrice organique

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. Cela a donné différentes matrices utilisées selon la fonction pour laquelle le composite est destiné. Ce qui a donné naissance à un matériau nouveau, modulable et adaptable aux caractéristiques mécaniques exigées.

Il existe trois grandes familles de polymères : Polymères thermoplastiques, Polymères thermodurcissables et Élastomères. [Nodal 2001]

II.9.1.1 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.9.1.2 Les Matrices Thermoplastiques (TP)

La famille des matrices polymère est très vaste et peut être séparée en plastique de grande diffusion et en plastique technique. Les plastiques de grande diffusion sont mis en œuvre soit par injection pour obtenir des objets moulés, soit par extrusion pour obtenir des films, des plaques, des tubes, des profilés, etc. Par contre, les plastiques techniques sont généralement mis en œuvre par injection et sont souvent utilisés dans des applications techniques qui nécessitent de hautes performances, contrairement à la première classe utilisée dans des applications usuelles du quotidien.

Dans les polymères dits de commodité ou à grande diffusion, on peut citer les polyoléfinés, essentiellement le polyéthylène, le polypropylène, et le polystyrène. L'intérêt de l'utilisation de ces thermoplastiques réside dans leur faible coût, résultant à la fois de matières premières disponibles et des procédés de fabrication maîtrisables avec une facilité de transférabilité.

A côté de ceci, ces polyoléfinés présentent un compromis de propriétés mécaniques, barrières et de surface intéressantes. [Kausch 2001]

Toutefois, leur usage est limité lorsque des propriétés thermomécaniques alliant une rigidité importante avec une tenue en température sont requises. Dans ce cas, on fait appel à un polymère plus technique tel que le polyamide ou encore le polycarbonate, plus performants mais de plus en plus coûteux. Une autre solution consiste à incorporer dans ces matrices de grande diffusion des renforts qui auront pour but de pallier le déficit de propriétés, sans toutefois provoquer une augmentation du coût des produits. [Lefebvre et al 2015]

Tableau II.2: Caractéristiques moyennes des matrices thermoplastiques (TP). [Ait Atmane 2010]

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.9.1.3 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. [El 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.9.2 Les Matrices Minérales

II.9.2.1 Les Matrices Métalliques

Dans le but d'augmenter la raideur et la tenue à haute température de matériaux tels que l'aluminium (Al), le magnésium (Mg) ou le titane (Ti), des fibres céramiques ont été ajoutées à ces matériaux, donnant la naissance des composites à matrice métallique (CMM).

Les CMM sont rapidement devenus de solides candidats pour une utilisation en aéronautique, ou dans des structures fonctionnant à haute température et les CMM intéressent particulièrement l'industrie automobile, l'industrie électronique et l'industrie de loisir pour leur capacité à répondre à des exigences mécaniques spécifiques [Guessas 2020]

II.9.2.2 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.10 Nano composites (Nanotube de carbone/matrice Polymère)

L'idée d'améliorer les propriétés des matériaux en combinant deux phases aux propriétés différentes n'est pas nouvelle. On retrouve à travers l'histoire des exemples de matériaux que l'on peut considérer comme nano composites ; certaines colorations de peintures mayas proviennent d'inclusion de nanoparticules métalliques et d'oxyde dans un substrat de silicate amorphe. En 1917, le noir de carbone a été introduit dans la composition des pneumatiques, ce qui a eu pour conséquence de multiplier par cinq leur durée de vie. [Kumar et al 2017]

Pour les applications industrielles, la plupart des composites sont constitués d'une matrice et d'un renfort. Le renfort se présente généralement sous forme de particules, tissus ou structures et assure la tenue mécanique, la matrice est généralement un polymère qui lie les points de renfort et participe au transfert des contraintes subit par le matériau final.

Ils sont appelés communément "matières plastiques", sont indissociables de notre environnement et de notre vie pratique. Ils se sont imposés dans tous les domaines de nos activités, des plus visibles aux plus cachés, des objets les plus banals jusqu'à des applications techniques sophistiquées, en passant par leur utilisation dans les produits d'hygiène ou alimentaires. Plus particulièrement, on appelle un nano composite, un système hétéro-phase

constitué de plusieurs composants et qui possède des propriétés qu'aucun des constituants ne posséderait seul, dont le renfort possède au moins une des trois dimensions de l'ordre du nanomètre. [Mashkov et al 2016]

II.11 Propriétés des nanocomposites (polymères /NTC)

L'ajout de NTC dans une matrice polymère permet, dans la majorité des cas, d'améliorer les propriétés des polymères vierges qu'ils soient sous forme de plaques, de joncs, de fils [Aurélien 2010]

Lorsque des phyllosilicates sont ajoutés aux polymères, les principales améliorations souhaitées sont des augmentations à la fois de la stabilité thermique et de l'ignifugation

II.11.1 Propriétés thermiques nanocomposites (NTC/polymère)

II.11.1.1 La stabilité thermique

La stabilité thermique est généralement évaluée par analyse thermogravimétrique sous atmosphère inerte ou oxydante. De manière générale, la température de dégradation des polymères est augmentée après l'incorporation de silicates lamellaires exfoliés, ce qui valorise ces polymères et permet leur utilisation à de plus hautes températures. Cette amélioration de sa stabilité thermique est fortement dépendante de l'état de dispersion de la charge au sein du polymère

L'analyse thermogravimétrique (ATG) de ces matériaux indique que les nano composites à matrice PMMA linéaire ou réticulé possèdent une température de décomposition de 40°C à 50°C supérieure à celle du PMMA pur. L'amélioration de la stabilité thermique des polymères est attribuée à l'effet barrière induit par les feuillets d'argile exfoliés qui ralentissent à la fois l'incorporation de l'oxygène de l'air dans le matériau et la diffusion des gaz de décomposition vers l'extérieur (produits volatils générés lors de la décomposition du matériau). La combustion dévient anise plus difficulté [Ojijo et al 2014]

II.11.1.2 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 de composants électroniques. 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]

Dans les nanocomposites, plusieurs propriétés sont modifiées après l'incorporation des nanocharges de type montmorillonite. Ce gain global est obtenu par une dispersion parfaite des nanofeuillets dans la matrice de manière polymérique et par l'obtention d'une surface interfaciale entre la matrice organique et les nanocharges inorganiques maximale.

II.11.2 Propriétés optiques

Les propriétés optiques particulières des nanocomposites sont un atout supplémentaire qui pourrait leur ouvrir un grand nombre d'applications. En fait, les matériaux, bien que chargés électriquement, sont étonnamment visibles et transparents, apparemment 10 à 100 fois plus gros que leur épaisseur. Ainsi, le fait que la transparence puisse être associée à de bonnes propriétés mécaniques est certainement un avantage dans des applications telles que l'emballage.

Dans d'autres domaines, tels que les guides de lumière (par exemple, les coupleurs de fibres, les séparateurs ou les capteurs), les nanocomposites renforcés en couches sont à l'étude et pourraient également être utilisés.

II.11.3 Propriétés mécaniques

L'amélioration des propriétés mécaniques des polymères ne tient pas uniquement aux excellentes propriétés des nanotubes. En effet, la liaison interfaciale 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]

La résistance à la rupture de ces composites est améliorée lorsque la matrice et les charges possèdent une énergie interfaciale suffisante pour permettre le transfert des efforts de la matrice au renfort.

La dispersion des nanotubes dans une matrice polyéthylène téréphtalate permet d'augmenter le module d'Young du polymère de (1,5 GPa à 1,9 GPa) ainsi que la contrainte à la rupture de (60 MPa à 68 MPa) avec (2%) de (NTC) [Kim 2007]

II.11.4 Propriétés au feu

La réduction de l'inflammabilité est un paramètre clé dans l'application des polymères techniques, notamment dans les domaines du bâtiment et du transport.

L'addition de produits anti-feu halogénés classiques représente un surcoût important et ne répond plus aux normes internationales environnementales. C'est pourquoi, depuis qu'il a été prouvé que les matrices polymères à renfort de feuillets de silicates présentaient une amélioration non négligeable de la résistance au feu, un intérêt considérable a été accordé à ce type de matériaux [Kiliaris et al 2010]. Le cône calorimètre est la méthode la plus employée pour évaluer les propriétés au feu. Les paramètres mesurés sont le taux de chaleur libérée (HRR : Heat Rate Release), la chaleur de combustion (Hc) et la production de monoxyde de carbone et de fumée. Le taux de chaleur libérée, et plus particulièrement son maximum, est le paramètre le plus significatif de la résistance au feu

II.11.5 Propriétés barrière au gaz

L'incorporation de petites quantités d'argile augmente les propriétés barrière vis-à-vis de l'eau et des gaz. En effet, les lamelles de silicate que l'on retrouve dans la structure des argiles sont imperméables à l'eau et aux gaz. Ainsi, elles augmentent la distance à parcourir pour les molécules qui diffusent. La quantité d'argile incorporée dans les polymères et le rapport de forme des renforts contribuent à l'amélioration des propriétés barrière [ELBAZ 2004/2005]

II.12 Procédés d'élaboration des nanocomposites (NTC/polymère)

La mise en forme de matériaux composites à matrice polymère nécessite la mise en place de procédés très précis afin d'obtenir un matériau de qualité. L'un des problèmes rencontrés lors de la fabrication est la dispersion uniforme des renforts (NTCs) dans la matrice polymère. [Bozlar 2009]

La liaison entre la matrice et les renforts est un phénomène physico-chimique fondamental qui est créé lors de la phase d'élaboration du matériau composite. C'est l'interface (Matrice/renfort) qui sera déterminante au niveau des propriétés finales du composite, et notamment du point de vue mécanique. [Ajayan 2007]

Il est à rappeler que pour la plupart des matrices polymères, la compatibilité avec les (CNTs) est faible du fait de leurs structures chimiques très différentes. En effet, l'adhésion entre un CNT et un polymère est mauvaise du fait des tensions superficielles trop élevées. Ce désagrément empêche par ailleurs une dispersion efficace et homogène des (CNTs) à l'intérieur de la matrice. De nombreuses études sont menées afin de comprendre et d'améliorer les phénomènes à l'interface [Wei 2006]

II.12.1 Techniques de la mise œuvre

Les nano composites 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

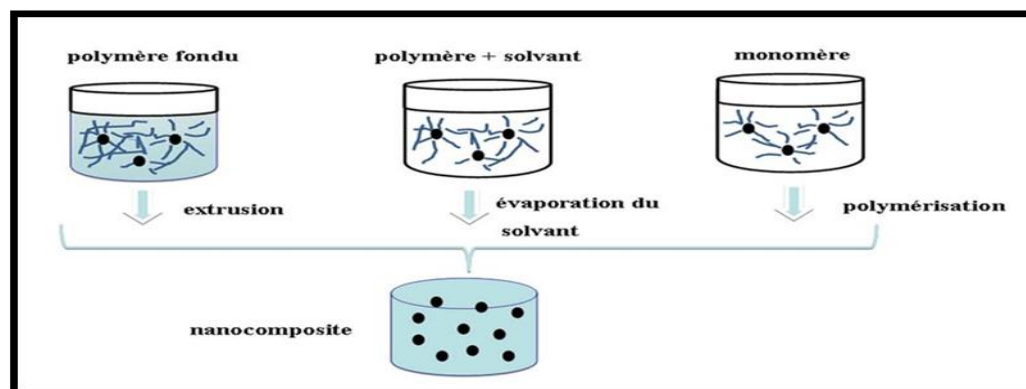


Figure II.10: Méthodes d'élaborations des nano composites polymères : a) mise en œuvre dans le fondu, b) mise en solution et c) polymérisation in situ

II.12.1.1 Mélange en solution

Le mélange en solutions est la méthode la plus courante pour la fabrication de nano composites de CNT/polymères. Généralement, Le mélange par solutions implique trois étapes principales :

- Dispersion des CNTs dans un solvant approprié (acétone par exemple) par mélange mécanique, agitation magnétique ou par sonication. Le solvant peut également dissoudre les résines polymères.
- Par la suite, les CNT dispersés sont mélangées à une matrice de polymère à température ambiante ou élevée.
- Le nano-composite est finalement obtenu par précipitation ou coulée du mélange. Cette méthode est souvent utilisée pour préparer des films composites. [Zerrouki 2022]

II.12.1.2 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.10). 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 d'intercalation.

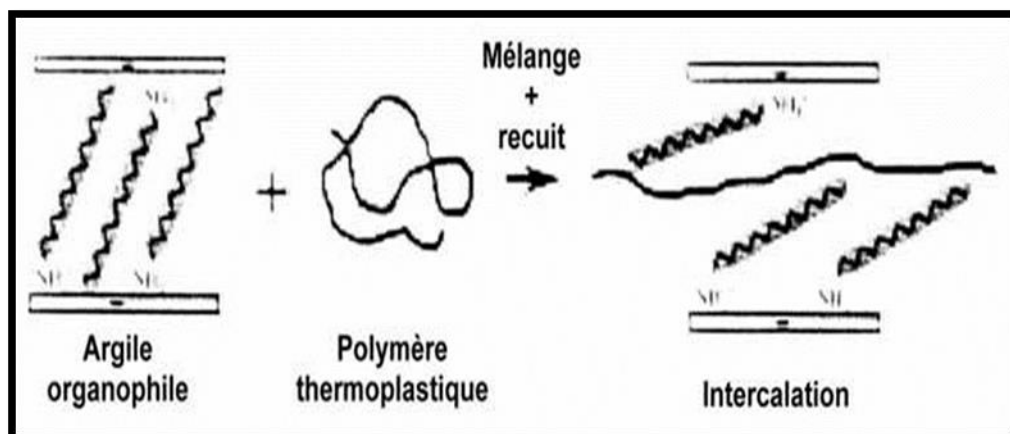


Figure II.11: Schéma représentant l'élaboration de nano composites par mélange à l'état fondu

II.12.1.3 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 (exemple : 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 a une faible viscosité. [Penu 2008]

Dans le cas des feuillets d'argile, elle consiste à mélanger des monomères avec les feuillets d'argile et, lorsque la polymérisation des monomères est amorcée, les chaînes de polymère en croissance séparent les feuillets, contribuant ainsi à l'exfoliation des feuillets phyllosilicate de manière individuelle.

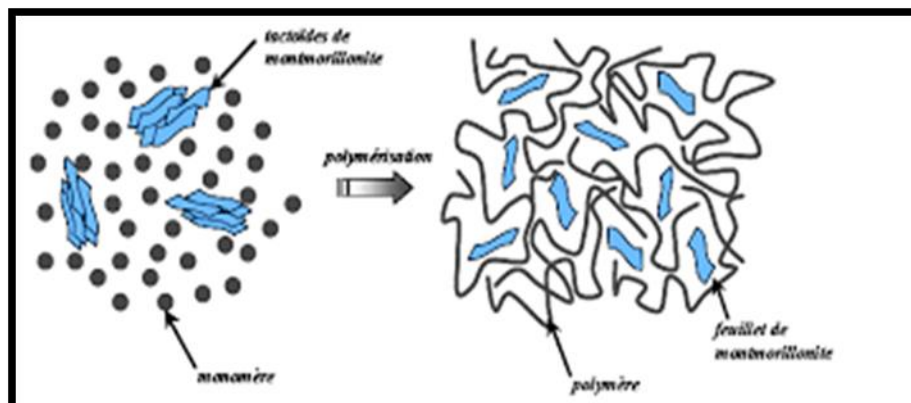


Figure II.12: schématisation de la polymérisation in-situ d'un nanocomposite lamellaire

II.12.2 Dispersion des renforts

II.12.2.1 Utilisation des ultrasons

L'usage des ultrasons, est une technique très connue et utilisée en abondance dans le domaine [Xiong 2006] 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 soumise 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.13*). [Bozlar 2009]

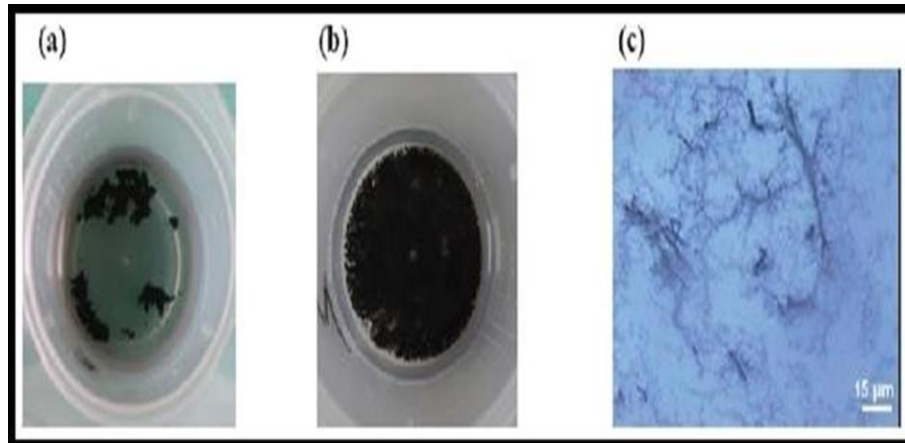


Figure II.13: (a) (CNTs) dans l'éthanol avant passage aux ultrasons. (b) Après 1 heure aux ultrasons. (c) Image microscope optique d'une gouttelette de base + (CNTs) après 2 heures de dispersion.

Des recherches ont montré que l'énergie fournie par les vibrations aux fréquences ultrasonores induit des défauts, voire même la coupure des (NTC). Malgré ces points négatifs, l'utilisation d'ultrasons reste bien souvent nécessaire pour disperser les (NTC) lorsque ceux-ci sont en suspension dans un solvant (avant de mélanger ce dernier à la matrice polymère).

Les ultrasons permettent en effet de séparer les amas de tubes, allant même jusqu'à les individualiser. L'étude réalisée par [Liao 2004] montre l'importance de l'utilisation des ultrasons pour améliorer la dispersion des (NTC).

- Volume de matière limité.

- Nécessite des liquides de basse viscosité pour qu'elle soit efficace.

II.12.2.2 Dispersion mécanique par tricylindre

A l'origine, cet appareil a été conçu pour broyer des produits dans l'industrie pharmaceutique ou alimentaire (*Fig II.13 a*). 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).

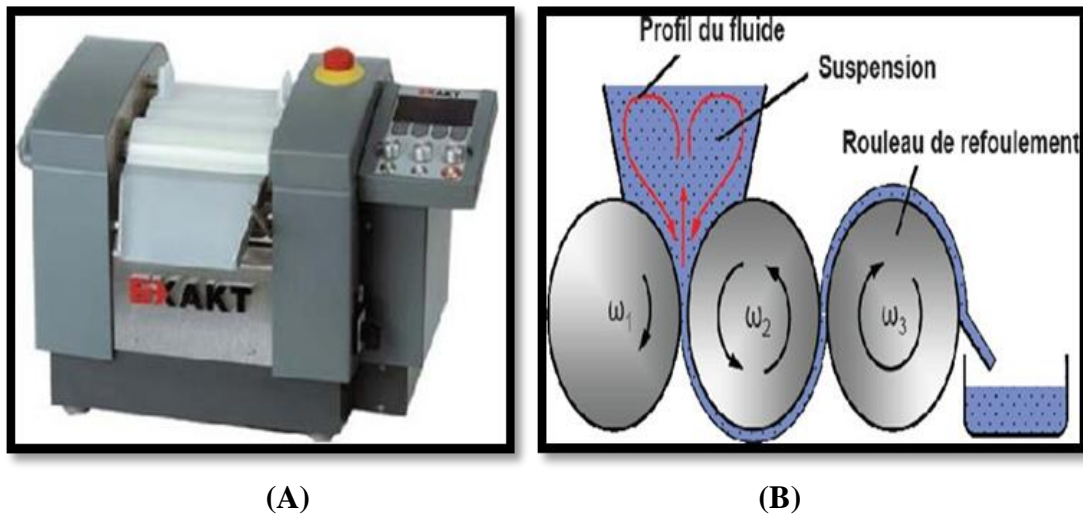


Figure II.14: (A) Tricylindre Exakt 80E (Source : Exakt Vertriebs GmbH, Allemagne).
(B) Schéma du circuit d'un fluide dispersé par tricylindre

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.14 b) 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) [Tho 2005] pour disperser des (NTC) dans des polymères époxyde.

II.13 Conclusion

Les polymères présentent des propriétés variées et abondantes qui font d'eux des candidats idéals pour la fabrication des nanocomposites, en particulier ceux renforcés avec des NTCs. Les nano composites sont des matériaux composés d'au moins deux constituants : une matrice et un renfort. L'un de ces constituants est à l'échelle nanométrique.

Nous avons vu que l'utilisation des NTCs dans un composite est la méthode la plus rapide afin d'exploiter les propriétés physiques des NTCs. Suivant les matériaux utilisés, l'apport des NTCs améliore la dissipation ou la tenue thermique des céramiques ou des métaux, de même ils peuvent aussi augmenter la conductivité et la résistance mécanique des polymères et métaux.

Cependant l'utilisation des NTC nécessite une dispersion homogène dans une matrice polymère. Pour obtenir une dispersion uniforme, nous avons démontré à travers différentes études, que l'utilisation des copolymères à blocs amphiphiles constitue l'une des meilleures options de stabilisation. La bi-fonctionnalité de ces espèces ainsi que la présence d'un bloc hydrophobe susceptible de s'adsorber sur la surface des NTC constituent leurs atouts majeurs.

Les différentes études sur les composites polymère/NTC montrent un manque de cohérence entre elles. 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.

Finalement, 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 :

Théories des poutres poreuses

III.1 Introduction

Pour résoudre les problèmes avec des structures qui ont des poutres comme éléments structurels. Il faut choisir une bonne théorie pour décrire correctement le comportement statique de la structure et appliquer la méthode de résolution. La théorie des poutres est un modèle utilisé dans le domaine de la résistance des matériaux. Trois modèles ont été utilisés :

- La théorie d'Euler-Bernoulli, qui néglige l'influence du cisaillement.
- La théorie de Timoshenko qui prend en compte l'effet du cisaillement en exigeant un facteur de correction.
- La théorie d'ordre élevé qui prend en compte l'effet du cisaillement
- La théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé raffinée.

III.2 Les différentes théories des poutres

La construction d'une théorie de poutre nécessite l'introduction de certaines hypothèses, qui représentent des simplifications acceptables de la réalité. Plusieurs théories dans la littérature jouent sur la prise en compte ou non du cisaillement. On cite, dans ce qui suit, les trois les plus répandues. [Zemri 2016]

III.2.1 Théorie classique d'Euler Bernoulli

La théorie classique des poutres (classical beam theory-CBT) se base sur les hypothèses d'Euler- Bernoulli. Dans cette théorie, les modèles sont basés sur une distribution linéaire des déplacements suivant l'épaisseur de la poutre. L'hypothèse dans cette théorie :

- ✓ Après déformation, les déformations dues au cisaillement transversal sont négligées (pas de cisaillement sur la hauteur de la poutre).
- ✓ La section reste perpendiculaire à la ligne moyenne de la poutre et la section plane reste plane.

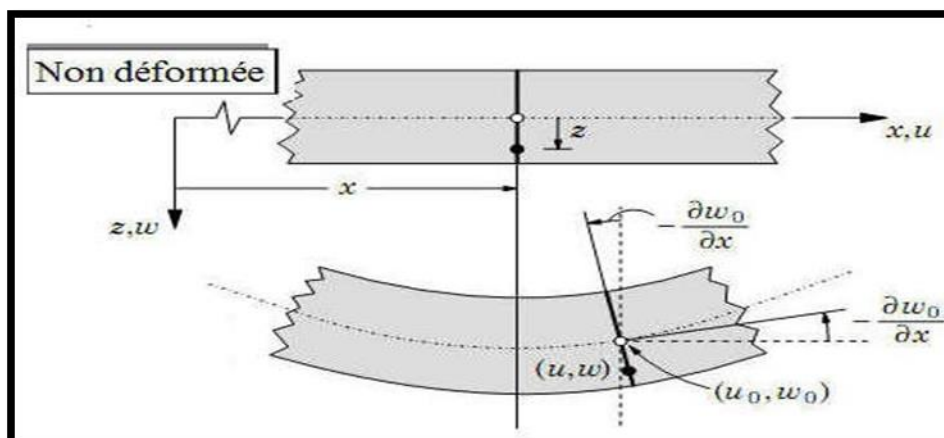


Figure III.1: Cinématique d'Euler Bernoulli.

En se basant sur les hypothèses ci-dessus, le champ de déplacement peut se donner par :

$$\begin{cases} u(x, z) = u_0(x) - z \frac{\partial w_0(x)}{\partial x} \\ w(x, z) = w_0(x) \end{cases} \quad (3.1)$$

$u(x, z)$: C'est le déplacement horizontal (axial, suivant axe x).

$w(x, z)$: C'est le déplacement dans la direction verticale (axe z) ou bien la flèche.

$z(\partial w_0(x)/\partial x)$: Le déplacement due à la flexion.

$\partial w_0(x)/\partial x$: La rotation due à la flexion.

$u_0(x)$: Le déplacement axial de la fibre moyenne.

$w_0(x)$: Le déplacement transversal de la fibre moyenne.

Sous ces considérations, les sections droites de la poutre ne subissent aucun glissement. En effet

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{\partial w_0}{\partial x} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (3.2)$$

Qui en résulte une contrainte nulle de cisaillement :

$$\tau_{xz} = G\gamma_{xz} = 0 \quad (3.3)$$

Donc on résume que le cisaillement est négligeable par cette théorie. Ce modèle donne des bons résultats pour les poutres élancées, mais il n'est pas valable pour les poutres courtes.

III.2.2 La théorie Timoshenko

La théorie de déformation en cisaillement du premier ordre (théorie de Timoshenko) a prolongé la théorie classique des poutres en tenant compte de l'effet de cisaillement transverse le champ de déplacement est évalué en supposant qu'une section droite initialement plane et perpendiculaire à la "ligne moyenne" reste plane mais non perpendiculaire (*Fig III.2*).

Pour le cas d'une poutre plane chargée dans son plan, il ne subsiste que trois inconnues, deux translations de la ligne moyenne (respectivement $U(s)$ et $V(s)$ selon x et z à l'abscisse s), et une rotation (angle $\theta(s)$, caractérisant la flexion autour de y). Le champ de déplacement pour un point M (x, z) quelconque s'exprime en fonction de ces inconnues :

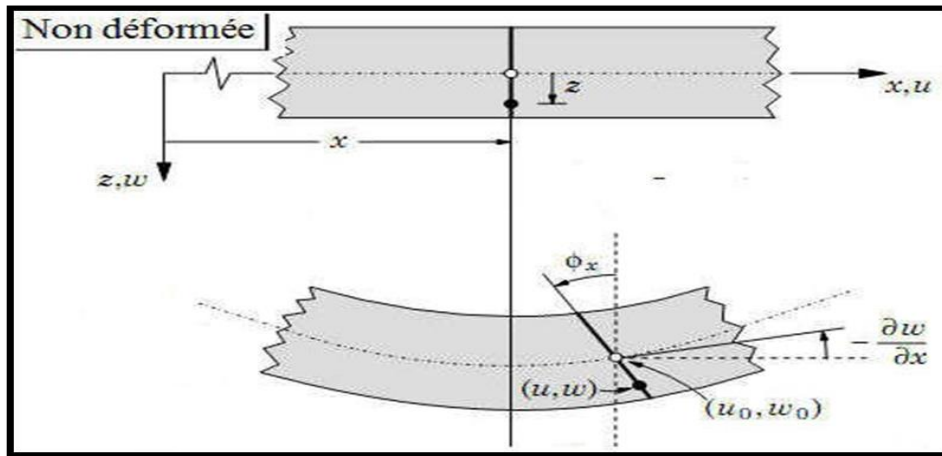


Figure III.2 : Cinématique de Timoshenko

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

$$\begin{cases} u(x, z) = u_0(x) - z \frac{\partial w_0(x)}{\partial x} + z \phi_x \\ w(x, z) = w_0(x) \end{cases} \quad (3.4)$$

Le déplacement dû au cisaillement où est la rotation due au cisaillement.

Si on veut calculer la contrainte de cisaillement :

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{\partial w_0}{\partial x} + \frac{\partial w_0}{\partial x} + \phi_x = \phi_x \quad (3.5)$$

$$\tau_{xz} = G \gamma_{xz} \neq 0 \quad (3.6)$$

G : est le module de cisaillement transversal qui est supposé constant.

Avec cette théorie, les contraintes tangentielles de cisaillement sont constantes et uniformes sur toute l'épaisseur de la poutre ; cela veut dire qu'elles existent même sur les bords supérieurs et inférieurs de la poutre et pourtant il n'y a aucun chargement qui induit le cisaillement. Cette contradiction mène à introduire des coefficients de correction pour mieux considérer le cisaillement transversal. Ces coefficients correcteurs notés "k" dépendent de la forme géométrique de la poutre considérée (par exemple, pour une poutre de section rectangulaire ($k=5/6$) [Tagrara 2015])

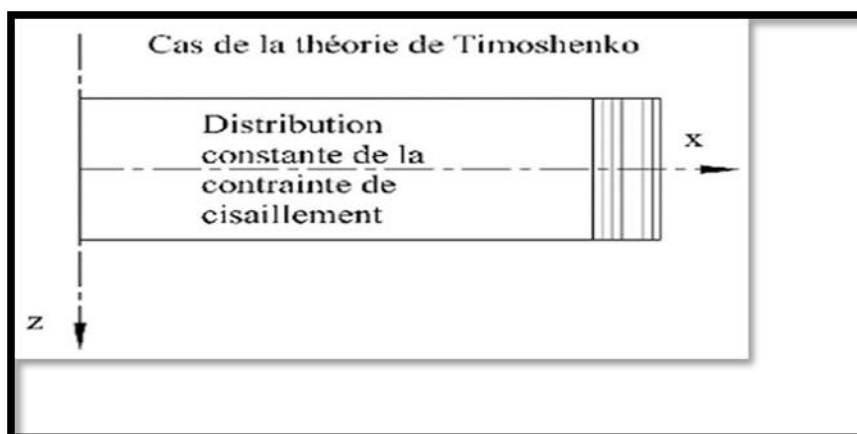


Figure III.3: La distribution (constante) des contraintes de cisaillement.

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

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

À la différence de la théorie classique et de celle de Timoshenko cisaillement d'ordre élevé avec les acceptations de la distribution linéaire du déplacement à travers l'épaisseur, la théorie d'ordre élevé est basée sur une distribution non linéaire des champs dans l'épaisseur. Par conséquent, on tient compte des effets de la déformation transversale de cisaillement et/ou de la déformation normale transversale. Ces modèles n'exigent pas des facteurs de correction.

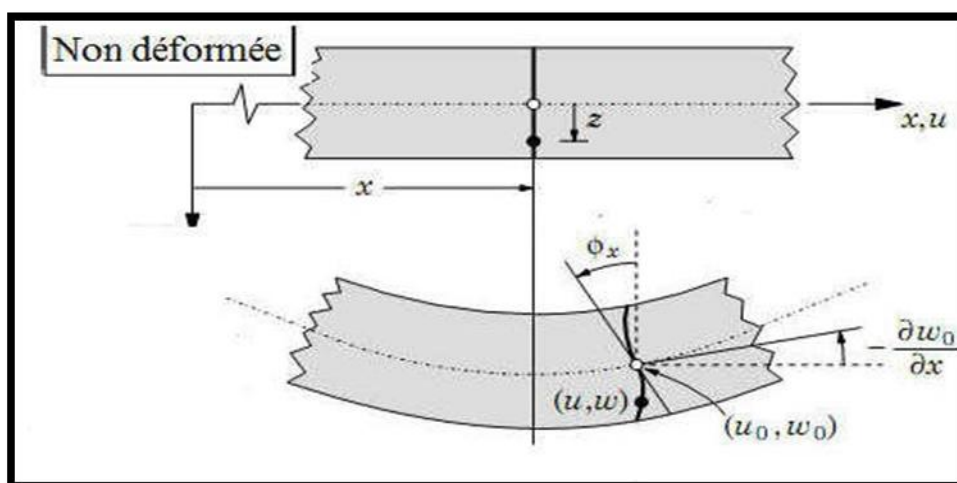


Figure III.4 : Cinématique de la Théorie d'Ordre Elevé.

Dans ce cas, le champ de déplacement devient :

$$\begin{cases} u(x, z) = u_0(x) - z \frac{\partial w_0(x)}{\partial x} + f(z)\varphi_x \\ w(x, z) = w_0 \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\gamma_{xz}(x) = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial w_0(x)}{\partial x} + f(z)\varphi_x + \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (3.8)$$

$$\gamma_{xz}(x) = f(z)\varphi_x(x) \quad (3.9)$$

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

$$f(z) = f\left(+\frac{h}{2}, -\frac{h}{2}\right) = 0 \quad (3.10)$$

Dans cette théorie a corrigé le défaut de la théorie Timoshenko et pour assurer la multi sur la face supérieure et la face inférieure. D'ailleurs cette théorie est plus proche de la réalité

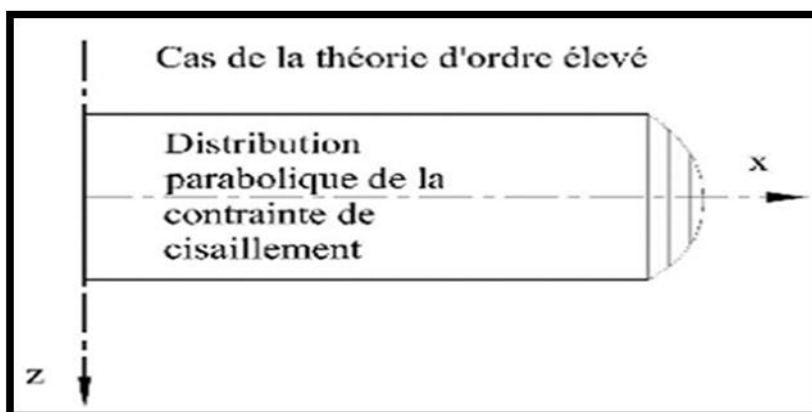


Figure III.5: La distribution (parabolique) des contraintes de cisaillement.

On trouve les mêmes parties : le déplacement de la membrane, le déplacement dû à la flexion et le déplacement dû au cisaillement. Mais cette fois, le déplacement axial du au cisaillement n'est plus linéaire. Donc, on remplace le « z » pour la théorie précédente par une fonction f(z) qu'on l'appelle « fonction de gauchissement » ou « fonction de forme ».

Cette dernière représente l'allure de la déformation de la section transversale, c'est ce qu'on appelle « le gauchissement », donc elle doit être impaire pour prendre la forme de « S » aplatie qui est remarquée lors de la déformation de la poutre. La fonction de gauchissement doit aussi satisfaire les conditions aux limites de la nullité des contraintes tangentielles aux surfaces supérieurs et inférieurs de la poutre.

Quelques modèles sont présentés dans la littérature des nanomatériaux :

Le modèle Euler-Bernoulli (la théorie classique) ETB :

$$f(z) = 0 \quad (3.11)$$

Le modèle de Timoshenko ou bien la théorie du premier ordre FSDT :

$$f(z) = z \quad (3.12)$$

Le modèle d'ordre élevé, avec l'approche de Levin son ^[Reddy 1984]

$$f(z) = \frac{5z}{z} \left(1 - \frac{4z^2}{3h^2} \right) \quad (3.13)$$

Le modèle exponentiel proposé par ^[Afaq 2003]

$$f(z) = z e^{-2\left(\frac{z}{h}\right)^2} \quad (3.14)$$

Le modèle d'Aydogdu ^[Aydogdu 2005]

$$f(z) = z \alpha \frac{-2\left(\frac{z}{h}\right)^2}{\ln \alpha} \quad (3.15)$$

Avec, h étant l'épaisseur du matériau. Le choix de la fonction exponentielle permet un développement en puissance pair et impair de la variable z .

III.2.4 La théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé raffinée

Le nombre de variables inconnus de la théorie raffinée de déformation de cisaillement d'ordre élevé est seulement quatre, contrairement au cinq variables dans le cas des autres théories de déformation de cisaillement.

III.2.4.1 Hypothèses de la théorie raffinée

Les hypothèses de la présente théorie sont les suivantes :

- ✓ Les déplacements sont petits par rapport à l'épaisseur de la poutre, et par conséquent, les déformations engendrées sont infinitésimales.
- ✓ Le déplacement transversal w comprend deux composantes de flexion w_b et de cisaillement w_s . Ces composantes sont en fonction des coordonnées x et s'écrit :

$$w(x, z) = w_b(x) + w_s(x) \quad (3.16)$$

- ✓ Le déplacement U suivant la direction x est défini par superposition des déplacements dus aux effets d'extension, de flexion et de cisaillement.

$$U = u_0 + u_b + u_s \quad (3.17)$$

La composante de la flexion u_b est supposée similaire aux déplacements donnés par:

$$u_b = -z \frac{\partial w_b}{\partial x} \quad (3.18)$$

La composante de cisaillement u_s donne à l'aide du déplacement w_s une variation trigonométrique de déformation de cisaillement γ_{xz} et par conséquent la contrainte de cisaillement τ_{xz} à travers l'épaisseur de la poutre de telle sorte que la contrainte de cisaillement τ_{xz} sera nulle aux surfaces supérieures et inférieures de la poutre. En conséquence, l'expression pour u_s est donnée par [Tounsi 2012]:

$$u_s = -f(z) \frac{\partial w_s}{\partial x} \quad (3.19)$$

Avec :

$$f(z) = \left(z - \frac{h}{\pi} \sin \frac{\pi z}{h} \right) \quad (3.20)$$

En se basant sur les hypothèses précédentes, le champ de déplacement est obtenu par :

$$u(x, z) = u_0(x) - z \frac{\partial w_b}{\partial x} - f(z) \frac{\partial w_s}{\partial x} \quad (3.21)$$

$$w(x, z) = w_b(x) + w_s(x) \quad (3.22)$$

III.3 La porosité

La porosité est la quantité de vides (pores) dans un matériau solide, qui sont remplis de fluides (liquide ou gaz). C'est une grandeur physique de 0 à 1 (ou un pourcentage d'entre 0 et 100%) La porosité est définie comme le rapport du volume des vides (pores) V_p sur le volume total V_t de l'échantillon. Autrement dit, c'est la fraction volumique du matériau occupé par les pores (percolant ou pas). Elle s'écrit :

$$\varphi = \frac{V_{pores}}{V_{total}} = \frac{V_p}{V_s + V_p} \quad (3.23)$$

Où V_s est le volume du solide.

La porosité est aussi liée au rapport (C) entre le volume de matière et le volume total par la relation :

$$P = 1 - C \quad (3.24)$$

Où (C) est la compacité. On définit également une autre grandeur sans dimension qui est le rapport entre le volume des pores sur le volume du solide. Ce rapport est appelé indice des vides.

III.4 Perméabilité

La perméabilité d'un milieu poreux, notée k , caractérise l'aptitude de se laisser traverser par

un fluide sous l'effet d'un gradient pression. Cette constante caractéristique d'un milieu poreux, dépend de la forme des grains, de la porosité et de la connectivité des pores [Hildebrand et al 1949]. Donc, indépendante des caractéristiques du fluide. Elle représente le volume de fluide traversant en une unité de temps, sous l'effet d'une unité de gradient de pression une unité de section orthogonale à la direction d'écoulement. Elle s'exprime en cm² les dimensions du carré de la taille moyenne des pores. [Naghdi 1957]

III.5 Caractérisation de la porosité

La variété des méthodes de caractérisation de la porosité est liée à la variété des matériaux poreux et aux objectifs de chaque approche. Par exemple, lors de l'étude des adsorbants ou des matériaux utilisés en catalyse, les mesures de surface peuvent être préférables.

En revanche, si l'objectif est de contrôler la taille des pores, alors la méthode de détermination de la distribution granulométrique est recommandée [Félix 2012]

Les méthodes de caractérisation poreuse sont souvent associées à la classification des matériaux poreux selon certains critères. Les matériaux poreux peuvent être classés selon le type de porosité principale (fermée ou ouverte), l'origine de la porosité (inter-particule ou intra particule), la résistance mécanique (rigidité ou fragilité) ou la taille des pores [Inagaki 2009]

III.6 Effet de la porosité sur les propriétés mécaniques des matériaux

L'étude des propriétés mécaniques des matériaux poreux se résume généralement à déterminer une corrélation entre la porosité et les propriétés mécaniques : une augmentation de la fraction volumique de pores implique une diminution des propriétés mécaniques [Clément et al 2013]

La plupart des études disponibles dans la littérature se concentrent sur l'influence du principal facteur d'influence. La forme des pores, la distribution de leur taille ou encore la nature des interconnexions entre les particules solides ont également une influence sur la corrélation entre les propriétés mécaniques et la porosité [Ogasawara et al 2005]

III.6.1 Porosité et module d'élasticité longitudinale (le 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 suivantes est celles utilisées le plus souvent pour décrire ce comportement : [Dean 1983]

$$E = E(1 - bp) \quad (3.25)$$

Où :

E : est le module de Young à la porosité P

E_0 : le module de Young à porosité nulle

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

Ce modèle linéaire (3.25) repris dans la théorie de l'élasticité d'Einstein [Einstein 1906] qui l'utilisait pour décrire le comportement élastique d'un fluide avec une suspension de sphères dures.

$$E = E_0(e^{-bp}) \quad (3.26)$$

Cette relation exponentielle (3.26) a été utilisée pour la première fois par SPRIGGS [Spriggs 1961] pour analyser l'effet de la porosité sur le module élastique de la matière réfractaire polycristalline, oxyde d'aluminium :

$$E = E_0(1 - bp)/(1 + bp) \quad (3.27)$$

Ce modèle non linéaire (3.27) a été proposé par Hasselman [Hasselman 1962] est directement basé sur les expressions obtenues par Hashin [Hashin 1962] pour les modules de matériaux avec suspensions diluées de pores sphériques

$$E = E_0(1 - bp^{2/3}) \quad (3.28)$$

Cette relation (3.28) 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) [Kovacik 2008] au modèle. A cause cela, le modèle exponentiel de Knudsen et Spriggs équation (3.27) 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 des matériaux poreux sur toute une plage de porosité ont été étroitement liés à la relation empirique loi-puissance de Phani et de Niyogi [Phani 1987]

$$E = E_0 \left(1 - \frac{P}{P_c} \right)^{f_E} \quad (3.29)$$

P_c : est la porosité critique (seuil de percolation) à laquelle le module de Young effectif devient égal à zéro.

f_E : est le paramètre dépendant de la morphologie du grain et de la géométrie des pores du matériau poreux.

III.6.2 Porosité et le module de cisaillement

Le même modèle de percolation est valable pour le module de cisaillement de matériaux poreux. [Kovach 2001]

$$G = G_0 \left(1 - \frac{P}{P_c} \right)^{f_G} \quad (3.30)$$

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 [Kovacik 2006]

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 à l'aide du module d'élasticité E et du module de cisaillement G comme suit :

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (3.31)$$

Après le remplacement des équations (3.29) et (3.30) dans l'équation (3.31) nous obtenons

$$\nu = \frac{E_0}{2G_0} \left[\frac{P_c - P}{P_c} \right] \text{ pour } P \leq P_c \quad (3.32)$$

Puisque $E_0/2G_0$ détermine le coefficient de Poisson du matériau solide, nous pouvons simplifier l'équation comme suit :

$$\nu = (\nu_0 + 1) \left[\frac{P_c - P}{P_c} \right] - 1 \text{ pour } P \leq P_c \quad (3.33)$$

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 ν

$$f_\nu = f_E - f_G \tag{3.34}$$

III.7 Poutres poreuses fonctionnellement graduées

Un matériau fonctionnellement gradué est un matériau composite qui a des propriétés mécaniques variables en suivant une fonction dans une direction donnée, en général c'est l'épaisseur de la poutre, il est fabriqué en mélangeant les particules des phases de deux matières différentes.

III.8 Phénomène de flambement

Le flambage est un phénomène physique relevant des principes de la résistance des matériaux. Lorsqu'une structure est compressée dans le sens de la longueur, elle a tendance à fléchir perpendiculairement à l'axe de la force appliquée, en raison d'un phénomène d'instabilité élastique.



Figure III.6: Le flambement.

III.9 Géométrie et propriétés de la poutre nanocomposite avec porosité

Considérons une poutre poreuse de largeur (L), et épaisseur (h), mentionné par rapport aux coordonnées cartésiennes rectangulaires (x, z) (Fig III.6). Dans cette étude, les faces supérieure et inférieure de la poutre sont à $z = (\pm h / 2)$.

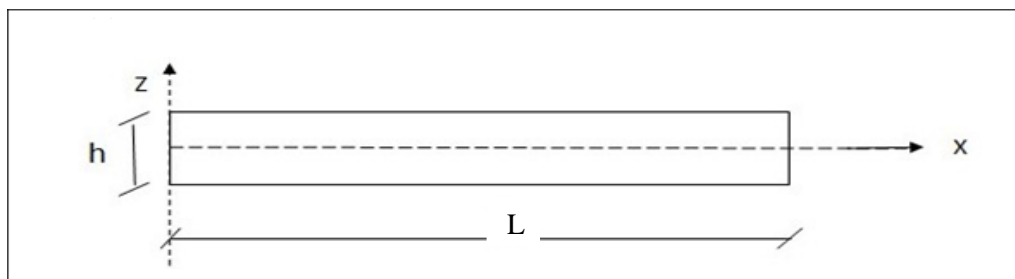


Figure III.7: Géométrie de la poutre.

III.10 Développement mathématique du présent modèle

Il y a Trois formes différentes de la distribution des CNTs à travers l'épaisseur sont pris en considération, dont l'une de ces formes à une distribution uniforme (UD-CNT), et les autres formes ont une distribution fonctionnellement graduée (X-CNT et O-CNT).

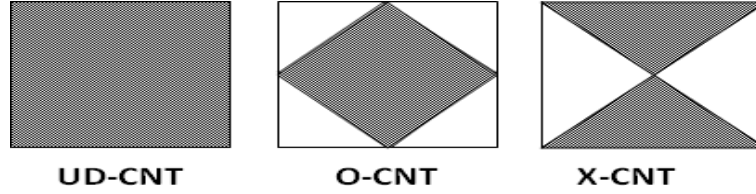


Figure III.8: Les différents modèles des dispositions des renforts

En utilisant le modèle de règle de mélange, le module de Young et le module de cisaillement efficaces fabriqués à partir d'un mélange de SWCNT et d'une matrice polymère isotrope peuvent être exprimés comme [Wattanasakulpong et Ungbhakorn 2013]

$$E_{11} = \eta_1 V_{cnt} E_{11}^{cnt} + V_p E^p \quad (3.35.a)$$

$$E_{22} = \eta_2 \frac{E_{22}^{cnt} E^p}{V_p E_{22}^{cnt} + V_{cnt} E^p} \quad (3.35.b)$$

$$G_{12} = \eta_3 \frac{G_{12}^{cnt} G^p}{V_{cnt} G^p + V_p G_{12}^{cnt}} \quad (3.35.c)$$

$E_{11}^{cnt}; E_{22}^{cnt}; E^p$ et $G_{12}^{cnt}; G^p$ indiquer le module de Young et le module de cisaillement des SWCNT et de la matrice polymère, respectivement. Cette règle inclut les paramètres d'efficacité CNT (η_1, η_2, η_3) afin de tenir compte du matériau dépendant de l'échelle les propriétés sont données par [Yas et Samadi 2012]

$$\eta_1 = 1.2833 \text{ et } \eta_2 = \eta_3 = 1.0566 \text{ pour } V_{cnt}^* = 0.12$$

$$\eta_1 = 1.3414 \text{ et } \eta_2 = \eta_3 = 1.7101 \text{ pour } V_{cnt}^* = 0.17$$

$$\eta_1 = 1.3238 \text{ et } \eta_2 = \eta_3 = 1.7380 \text{ pour } V_{cnt}^* = 0.28$$

La masse volumique (ρ) et le coefficient de poisson (ν) des poutres s'écrivent:

$$\rho = V_{cnt} \rho^{cnt} + V_p \rho^p \quad (3.36.a)$$

$$\nu_{12} = V_{cnt} \nu_{12}^{cnt} + V_p \nu^p \quad (3.36.b)$$

$$V_{cnt} + V_p = 1 \quad (3.36.c)$$

V_{cnt} Et V_p sont les fractions volumiques du NTC et du polymère, respectivement.

Le module de Young de la matrice polymère, sous différentes distributions de porosité, qui peut être fonction du changement de porosité.

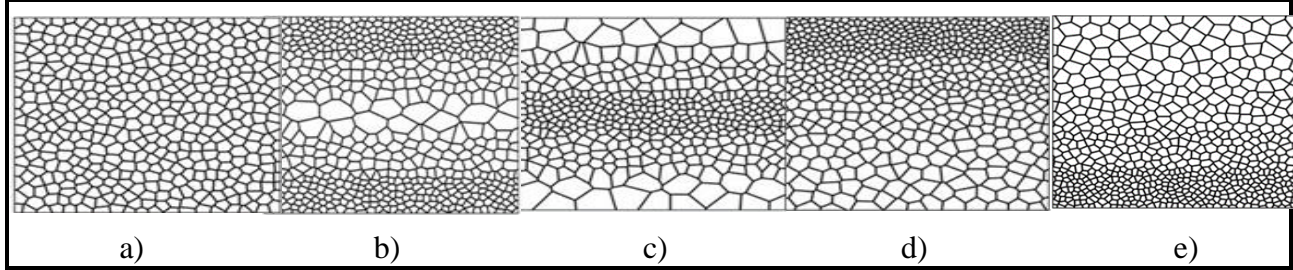


Figure III.9 : Les différentes distributions de porosité : a) Uniforme, b) Symétrique1, c) Symétrique2, d) Asymétrique1, e) Asymétrique2.

Uniforme :

$$E^p = E_0^p \left(1 - \left(1 - \sqrt{1 - P_0}\right) \left(2/\pi\right)\right)^2 \quad (3.37.a)$$

$$\rho^p = \rho_0^p \left(1 - \left(1 - \sqrt{1 - P_0}\right) \left(2/\pi\right)\right) \quad (3.37.b)$$

Symétrique1 :

$$E^p = E_0^p \left(1 - P_0 \cos(\pi z / h)\right) \quad (3.38.a)$$

$$\rho^p = \rho_0^p \left(1 - P_m \cos(\pi z / h)\right) \quad (3.38.b)$$

Symétrique2 :

$$E^p = E_0^p \left(1 - P_0 \cos\left(\left|\pi z / h\right| - \pi / 2\right)\right) \quad (3.39.a)$$

$$\rho^p = \rho_0^p \left(1 - P_m \cos\left(\left|\pi z / h\right| - \pi / 2\right)\right) \quad (3.39.b)$$

Asymétrique1 :

$$E^p = E_0^p \left(1 - P_0 \cos\left(\pi z / (2h) + \pi / 4\right)\right) \quad (3.40.a)$$

$$\rho^p = \rho_0^p \left(1 - P_m \cos\left(\pi z / (2h) + \pi / 4\right)\right) \quad (3.40.b)$$

Asymétrique2 :

$$E^p = E_0^p \left(1 - P_0 \cos\left(\pi z / (2h) - \pi / 4\right)\right) \quad (3.41.a)$$

$$\rho^p = \rho_0^p \left(1 - P_m \cos\left(\pi z / (2h) - \pi / 4\right)\right) \quad (3.41.b)$$

Où: $P_m = 1 - \sqrt{1 - P_0}$

E^p, ρ^p est le module de Young et la masse volumique effectifs de la matrice poreuse avec porosité P , E_0^p, ρ_0^p est le module de Young et la masse volumique de la matrice sans porosité.

Pour l'analyse du flambement, la fraction volumique CNT le long de la direction de l'épaisseur de la poutre devient une fonction [Yas et Samadi 2012]

$$V_{cnt} = \begin{cases} V_{cnt}^* & \text{for UD-beam} \\ 2\left(1 - 2\frac{|z|}{h}\right) V_{cnt}^* & \text{for O-beam} \\ 4\frac{|z|}{h} V_{cnt}^* & \text{for X-beam} \end{cases} \quad (3.42.a)$$

V_{cnt}^* : La fraction volumique des CNT

$$V_{cnt}^* = \frac{W_{cnt}}{W_{cnt} + \left(\rho^{cnt} / \rho^p\right)(1 - W_{cnt})} \quad (3.42.b)$$

Voici W_{cnt} : la fraction massique des CNT.

III.11 Équations de mouvement

Basé sur la base de la théorie de cisaillement du troisième ordre, le champ de déplacement raffiné avec seulement trois inconnues est utilisé dans le présent travail. Le déplacement transversal de tout point de la poutre est donné par [Tagrara et al. 2015]

$$\begin{cases} u(x, z, t) = u_0 - z \frac{\partial w_b}{\partial x} - f(z) \frac{\partial w_s}{\partial x} \\ w(x, z, t) = w_b(x, t) + w_s(x, t) \end{cases} \quad (3.43)$$

u_0 est le déplacement axial, W_b et W_s sont les composantes de flexion et de cisaillement du déplacement transversal le long du plan médian de la poutre. La fonction de forme $f(z)$ est choisie sur la base d'une théorie de déformation par cisaillement du troisième ordre (TSDT) comme [Reissner 1945] :

$$f(z) = z - \frac{5}{4} z \left(1 - \frac{4z^2}{3h^2}\right) \quad (3.44)$$

La relation déformation-déplacement linéaire dans les déformations planes et transversales peut être exprimée comme suit :

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \varepsilon_x^0 + z k_x^b + f(z) k_x^s \\ \gamma_{xz} = g(z) \gamma_{xz}^s \end{cases} \quad (3.45)$$

$$g(z) = 1 - \frac{df(z)}{dz} \quad (3.46)$$

La contrainte normale et la contrainte de cisaillement sont données par la loi de comportement

élastique linéaire comme :

$$\begin{cases} \sigma_x = Q_{11}(z)\varepsilon_x \\ \tau_{xz} = Q_{55}(z)\gamma_{xz} \end{cases} \quad (3.47)$$

Les équations du mouvement sont obtenues par le principe de **Hamilton** :

$$\delta U + \delta V = 0 \quad (3.48)$$

δU est la variation virtuelle de l'énergie de déformation, δV est la variation virtuelle de l'énergie de potentielle. δ Représente le symbole virtuel. U, V sont l'énergie de déformation, l'énergie potentielle du faisceau.

L'énergie de déformation virtuelle de la poutre se présente comme suit :

$$\begin{aligned} \delta U &= \int_0^L \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_x \delta \varepsilon_x + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz}) dz dx \\ &= \int_0^L \left(N \frac{d\delta u_0}{dx} - M_b \frac{d^2 \delta w_b}{dx^2} - M_s \frac{d^2 \delta w_s}{dx^2} + Q \frac{d\delta w_s}{dx} \right) dx \end{aligned} \quad (3.49)$$

Les efforts internes N, M_b, M_s sont définies comme :

$$(N, M_b, M_s) = \int_{-h/2}^{h/2} (1, z, f) \sigma_x dz \quad (3.50)$$

Le travail virtuel (δV) peut être exprimé comme suit :

$$\delta V = - \int_0^L \left[\left(N_{x0} \frac{d^2}{dx^2} \right) (\delta w_b + \delta w_s) \right] dx \quad (3.51)$$

En substituant les expressions de δV et δU des Eqs. (3.49), Eqs. (3.51) dans l'équation (3.48) et en intégrant par parties, et en collectant les coefficients de δu_0 , δw_b et δw_s , les équations suivantes de mouvement du faisceau CNTR :

$$\begin{cases} \delta u_0 : \frac{dN}{dx} = 0 \\ \delta w_b : \frac{d^2 M_b}{dx^2} + N_{x0} \frac{d^2 (w_b + w_s)}{dx^2} = 0 \\ \delta w_s : \frac{d^2 M_s}{dx^2} + \frac{dQ}{dx} + N_{x0} \frac{d^2 (w_b + w_s)}{dx^2} = 0 \end{cases} \quad (3.52)$$

À partir des relations ci-dessus, toutes les résultantes de contrainte peuvent être écrites sous la forme de composants de rigidité du matériau et de déplacements comme suit :

La rigidité de la poutre peut être définie par :

$$\begin{cases} N = A_{11} \frac{du_0}{dx} - B_{11} \frac{d^2 w_b}{dx^2} - B_{11}^s \frac{d^2 w_s}{dx^2} \\ M_b = B_{11} \frac{du_0}{dx} - D_{11} \frac{d^2 w_b}{dx^2} - D_{11}^s \frac{d^2 w_s}{dx^2} \\ M_s = B_{11}^s \frac{du_0}{dx} - D_{11}^s \frac{d^2 w_b}{dx^2} - H_{11}^s \frac{d^2 w_s}{dx^2} \\ Q = A_{55}^s \frac{dw_s}{dx} \end{cases} \quad (3.53)$$

$$\begin{cases} (A_{11}, B_{11}, D_{11}) = \int_{-h/2}^{h/2} (1, z, z^2) dz \\ (B_{11}^s, D_{11}^s, H_{11}^s) = \int_{-h/2}^{h/2} (f(z), zf(z), f^2(z)) dz \\ A_{55}^s = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{55} [g(z)]^2 dz \end{cases} \quad (3.54)$$

En remplaçant l'expression de l'équation (3.45) des résultantes de contrainte dans l'équation (3.44), on obtient

$$\begin{cases} A_{11} \frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} - B_{11} \frac{\partial^3 w_b}{\partial x^3} - B_{11}^s \frac{\partial^3 w_s}{\partial x^3} = 0 \\ B_{11} \frac{\partial^3 u_0}{\partial x^3} - D_{11} \frac{\partial^4 w_b}{\partial x^4} - D_{11}^s \frac{\partial^4 w_s}{\partial x^4} + N_{x0} \frac{d^2(w_b + w_s)}{dx^2} = 0 \\ B_{11}^s \frac{\partial^3 u_0}{\partial x^3} - D_{11}^s \frac{\partial^4 w_b}{\partial x^4} - D_{11}^s \frac{\partial^4 w_s}{\partial x^4} + \frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2} + N_{x0} \frac{d^2(w_b + w_s)}{dx^2} = 0 \end{cases} \quad (3.55)$$

III.12 Solution analytique

Pour la solution analytique, la méthode de résolution de Navier pour une poutre (FG-CNT) sous différentes distribution est adoptée. Ainsi, les développements suivants des déplacements (u_0, w_b, w_s) sont supposés être :

$$\begin{cases} u_0 \\ w_b \\ w_s \end{cases} = \sum_{m=1}^{\infty} \begin{cases} U_m \cos(\lambda x) e^{i\omega t} \\ W_{bm} \sin(\lambda x) e^{i\omega t} \\ W_{sm} \sin(\lambda x) e^{i\omega t} \end{cases} \quad (3.56)$$

U_m, W_{bm} et W_{sm} sont des paramètres arbitraires à déterminer, est la fréquence propre associée au même mode de flambement propre, et $\lambda = m\pi/L$. En substituant les développements de u_0, w_b et w_s des Eqs (3.48) dans les équations de mouvement Eqs (3.47).

Les solutions analytiques peuvent être déterminées à partir des équations suivantes :

$$S_{11} = A_{11}\lambda^2; \quad S_{12} = -B_{11}\lambda^3; \quad S_{13} = -B_{11}^s\lambda^3$$

$$S_{22} = D_{11}\lambda^4 + N_{x0}\lambda^2; \quad S_{23} = D_{11}^s\lambda^4 + N_{x0}\lambda^2; \quad (3.57)$$

$$S_{33} = H_{11}^s\lambda^4 + A_{55}^s\lambda^2 + N_{x0}\lambda^2;$$

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_m \\ W_{bm} \\ W_{sm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

La formule adimensionnelle suivante est utilisée pour présenter les résultats numériques

Pour le flambement des poutres CNTRC :

$$\bar{N} = \frac{N_{x0}}{A_{110}} \quad , \quad A_{110} = \int_{-h/2}^{h/2} E_0^p / (1 - \nu_p^2) \quad (3.59)$$

III.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous donnons un aperçu des différentes théories des poutres, à savoir la théorie classique des poutres (Euler-Bernoulli), la théorie des déformations de cisaillement du premier ordre (Timoshenko) et la théorie des déformations d'ordre élevé. Et des études analytiques ultérieures de flambement de poutres poreuses nanocomposites renforcées par de nanotubes de carbone.

Les équations du mouvement sont dérivées en utilisant le principe de Hamilton. Ces solutions ont été obtenues à l'aide de la solution de Navier. Dans le chapitre suivant, nous présentons les résultats, où nous calculons la charge critique de flambement.

CHAPITRE IV :
Résultats et discussions

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, les résultats numériques du comportement en flambement des poutres CNTRC sont présentés et discutés les caractéristiques matérielles effectives des poutres CNTRC utilisées tout au long de ce travail sont indiquées ci-après. Le PMMA (polymère) est utilisé comme matrice dans laquelle les propriétés des matériaux sont :

$$\nu^p = 0.3, \rho_0^p = 1190 \text{kg/m}^3 \text{ et } E^p = 2.5 \text{GPa}$$

Pour les matériaux de renforcement, le type armchair SWCNT (10,10) est choisi avec les propriétés suivantes selon l'étude de Zhu et al. (2012) :

$$\nu^{cnt} = 0.19, \rho^{cnt} = 1400 \text{kg/m}^3, E_{11}^{cnt} = 600 \text{GPa}, E_{22}^{cnt} = 10 \text{GPa}, G_{12}^{cnt} = 17.2 \text{GPa}$$

En fin La charge critique de flambement des poutres CNTRC trouvée par la formule

adimensionnelle suivante : $\bar{N} = \frac{N_{x0}}{A_{110}}$

IV.2 Analyse du flambement des poutres CNTRC

Dans cette section, les résultats numériques du flambement des poutres CNTRC sont discutés. Selon l'étude de flambement, la poutre X-CNT est la plus rigide et qui prend la plus grande charge du flambement, suivie par la poutre UD-CNT et la poutre O-CNT.

Afin de vérifier le modèle mathématique de la théorie, les résultats obtenus ont été comparé aux résultats existants dans littératures (tableau IV.1).

Tableau IV.1: Comparaison de la charge critique de flambement adimensionnelles d'une poutre CNTRC ($V_{cnt}^* = 0.12$, $L/h = 15$, $P=0$)

Source	UD-CNT	O-CNT	X-CNT
[Wattanasakulpong et Ungbhakorn 2013] FSDT	0.1032	0.0604	0.1367
[Wattanasakulpong et Ungbhakorn 2013] TSDT	0.0985	0.0575	0.1291
[Yas and Samadi 2012]	0.0986	0.0588	0.1288
[Tagrara 2015]	0.0985	0.0575	0.1291
Présente	0.0984	0.0576	0.1289

D'après ce tableau, on remarque qu'il y a un bon accord entre les résultats de la présente théorie et les résultats trouvés par [Tegrara 2015], [Wattanasakulpong et Ungbhakorn 2013], [Yas and Samadi 2012] cela pour les différents types de renforcement ($V_{cnt}^* = 0.12$; $L/h=15$).

Tableau IV.2: L'effet de la porosité sur la charge critique de flambement d'une poutre de type (UD-CNT) sous différentes distributions de porosité ($L/h=10$; $V_{cnt}^* = 0.12$)

Distribution de porosité	Porosité		
	0.1	0.2	0.3
Uniforme	0.1590	0.1534	0.1473
Symétrique1	0.1575	0.1503	0.1422
Symétrique2	0.1606	0.1585	0.1529
Asymétrique1	0.1588	0.1530	0.1467
Asymétrique2	0.1588	0.1530	0.1467

Ce tableau représente l'effet de la porosité sur les charges critiques de flambement adimensionnelles des poutres de Type (UD-CNT) sous une fraction volumique ($V_{cnt}^* = 0.12$ et $L/h=10$) en utilisant la théorie d'ordre Elevée. La valeur de la charge critique de flambement adimensionnelles la plus grande est remarquée pour la distribution de la porosité de type (symétrique2) ou la porosité est concentrée aux faces supérieur et inférieur de la poutre quelle que soit le pourcentage de la porosité. Par contre, la concentration de la porosité au cœur de la section (symétrique1) rendre la poutre plus souple et donne des charges critiques de flambement moins important. On remarque aussi que les charges critiques de flambement adimensionnelles diminuent avec L'augmentation de la porosité. On constate que l'augmentation de la porosité rend la poutre moins rigide (souple) et supporte moins de charge.

Tableau IV.3: La charge critique de flambement d'une poutre CNTRC avec et sans renforcement sous différents types de distribution de porosité en fonction du rapport L/h, ($V_{cnt}^* = 0.12$, $p=0.3$)

Type de distribution de porosité	L / h = 10				L / h = 20			
	UD-CNT	O-CNT	X-CNT	Non renforcé $V_{cnt}^* = 0$	UD-CNT	O-CNT	X-CNT	Non renforcé $V_{cnt}^* = 0$
Uniforme	0.1473	0.0971	0.1759	0.0064	0.0603	0.0340	0.0812	0.0016
Symétrique1	0.1422	0.0947	0.1692	0.0071	0.0595	0.0338	0.0797	0.0018
Symétrique2	0.1529	0.0998	0.1836	0.0059	0.0612	0.0343	0.0828	0.0015
Asymétrique1	0.1467	0.0969	0.1753	0.0065	0.0602	0.0340	0.0811	0.0017
Asymétrique2	0.1467	0.0969	0.1753	0.0065	0.0602	0.0340	0.0811	0.0017

On remarque à travers le tableau IV.3 que la valeur de la charge critique de flambement adimensionnelle la plus élevée est détectée dans le cas de X- CNT et sous porosité de type symétrique2. Ce si peut être expliqué par la concentration du renfort près de la surface supérieure

et inférieure qui favorise l'élargissement de la plage de la rigidité des poutres (X-CNT) par rapport à la distribution (UD-CNT et O-CNT). On observe aussi une grande diminution des charges critiques de flambement pour $L/h=20$. Cette diminution est attribuée à l'élancement de la poutre (l'augmentation de la longueur de la poutre). Sauf dans le cas non renforcé, la valeur de la charge critique de flambement la plus grande est remarquée pour la distribution de la porosité de type (symétrique1).

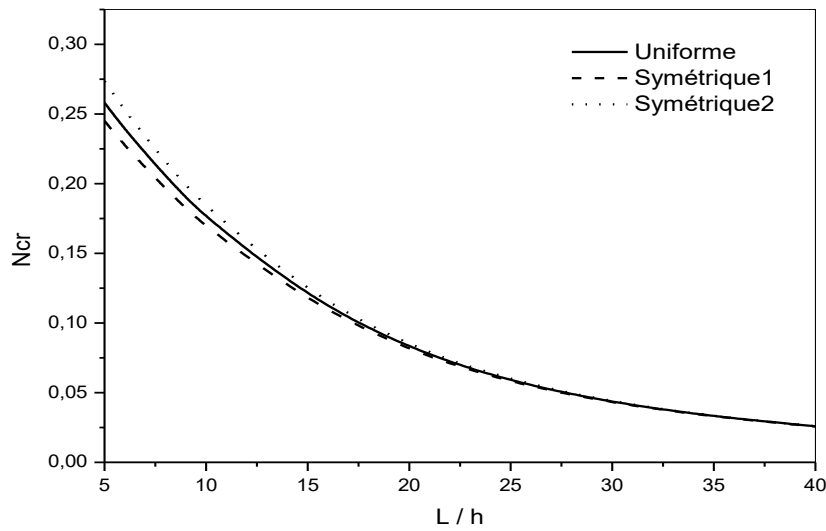


Figure IV.1: L'effet du rapport (L/h) sur la charge critique de flambement de la poutre X-CNT sous différentes distributions uniforme et symétriques de porosité ($V_{cnt}^* = 0.12$; $p=0.3$).

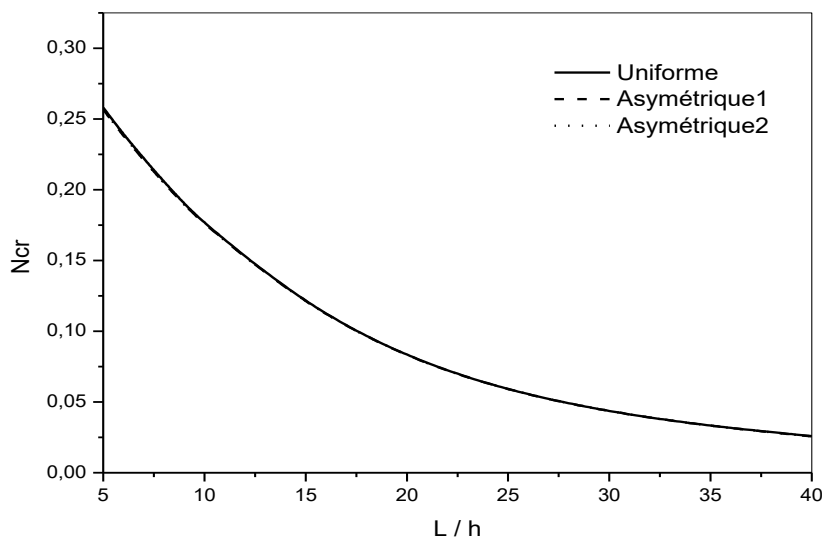


Figure IV.2 : L'effet du rapport (L/h) sur la charge critique de flambement de la poutre X-CNT sous différentes distributions uniforme et asymétriques de porosité ($V_{cnt}^* = 0.12$; $p=0.3$)

Les figures IV.1 et IV.2 illustrent l'effet du rapport (L/h) sur les charges critiques de flambement de la poutre renforcée pour (X-CNT) et sous différents types de distributions de porosité (uniforme, symétrique1, symétrique2, asymétrique1 et asymétrique2) pour ($p=0.3$). On prend la fraction volumique de nanotube de carbone ($V_{cnt}^* = 0.12$). On observe sur ces figures que la diminution des charges critiques de flambement est effectuée par la variation de la longueur de la poutre. Cette diminution est attribuée à l'élancement de la poutre.

Ces figures montrent aussi une comparaison entre les distributions de porosité. On constate que la porosité de type symétrique2 donne des valeurs plus élevées de la charge critique de flambement.

Pour la figure IV 2, la variation de la charge critique entre les distributions asymétrique1, asymétrique2 et uniforme n'est pas importante

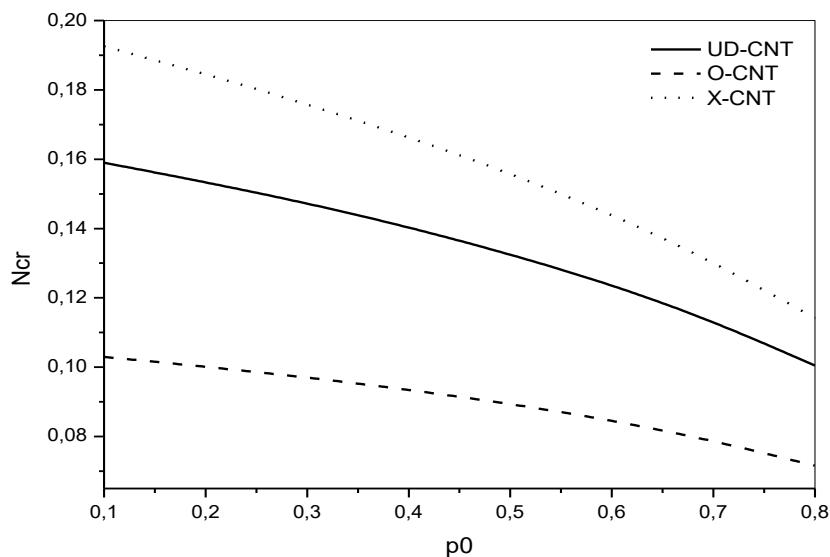


Figure IV.3: L'effet de la distribution uniforme de porosité sur la charge critique de flambement sous différents types de renforcement (UD-CNT, O-CNT, X-CNT).

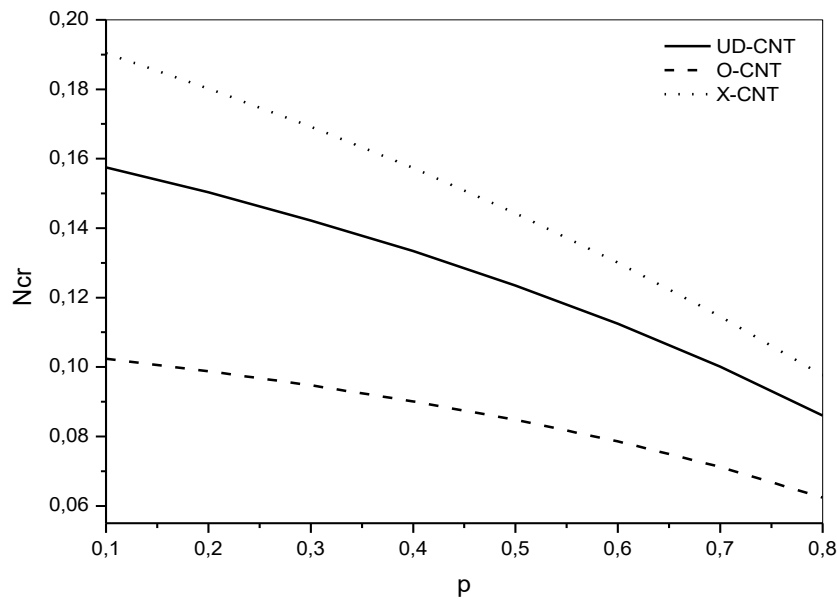


Figure IV.4: L'effet de la distribution symétrique de porosité sur la charge critique de flambement sous différents types de renforcement (UD-CNT, O-CNT, X-CNT).

Les résultats représentés dans les figures (IV.3 et IV.4) montrent que l'existence de la porosité met en évidence la rigidité de la poutre poreuse renforcée par des nanotubes de carbone. Pour un rapport ($L/h=10$) et pour une fraction volumique ($V_{cnt}^* = 0.12$). On constate que les charges critiques de flambement des poutres renforcées diminuent dans tous les cas de types de renforcement (UD-CNT), (O-CNT) et (X-CNT) avec l'augmentation de la porosité. On observe que le renfort de type X-CNT donne des valeurs plus élevées de la charge critique de flambement.

On peut conclure que les valeurs élevées estimées dans le renforcement X-CNT sont attribuées à la concentration du nanotube de carbone sur les faces supérieures et inférieures de la poutre.

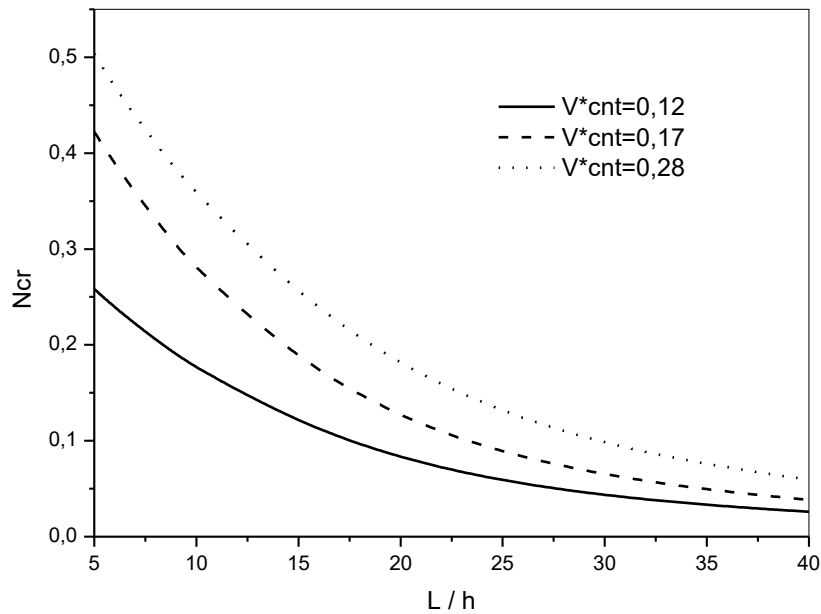


Figure IV.5: La charge critique de flambement de la poutre X-CNT en fonction de rapport L/h sous une porosité de type uniforme ($p=0.3$).

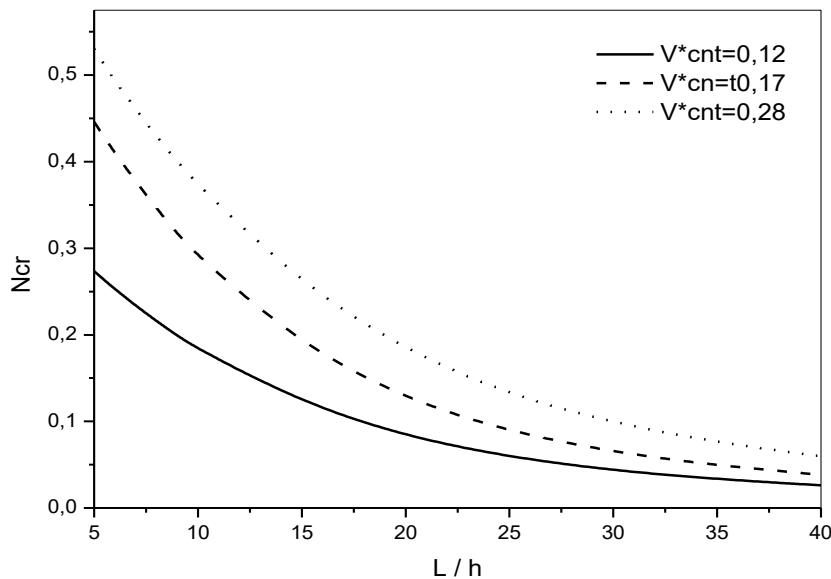


Figure IV.6: La charge critique de flambement de la poutre X-CNT en fonction de rapport (L/h) sous une porosité de type symétrique2 ($p=0.3$)

Les figures IV.5 et IV.6 représentent l'influence de la fraction volumique des nanotubes de carbone sur la charge critique de flambement de la poutre (X-CNT) avec une porosité de type uniforme et symétrique2 respectivement. On remarque, lorsque les fractions volumiques des CNT augmentent les charges critique de flambement augmentes. Une autre diminution de la

charge critique de flambement est remarquée lorsque le rapport géométrique augmente. Cette diminution est attribuée à l'élanement de la poutre.

IV.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié l'effet de la distribution de porosité sur la charge critique de flambement des poutres poreuses et la comparaison entre les trois distributions de renforcement de nanotubes de carbone (UD-CNT, O-CNT, X-CNT). Les résultats numériques indiquent que la distribution des nanotubes de carbone dans la matrice polymère influe sur leur rigidité et on a trouvé que la poutre X-CNT est la plus rigide par rapport aux autres types des poutres CNTRC.

Les valeurs des charges critiques diminuent avec l'augmentation du rapport (L/h) et augmentent avec l'augmentation de la fraction volumique V_{cnt}^*

En termes d'analyses de porosité, on constate que les charges critiques de flambement de la poutre poreuse renforcée diminuent en augmentant la porosité. La comparaison entre les différents types de distribution de la porosité montre une influence importante sur les charges critiques de flambement comme la distribution de type (symétrique2) qui donne des valeurs plus élevées. Lorsqu'on compare les distributions asymétrique1, asymétrique2 et uniforme on constate qu'il n'y a pas une variation importante de la charge critique.

Finalement, la poutre X est la plus rigide et qui prend la plus grande charge du flambement, suivie par la poutre UD et la poutre O, la porosité donne les plus petites valeurs de la charge critique de flambement sous différentes distributions de porosité.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Une nouvelle révolution industrielle est en train de croître, basée sur le monde du nanomatériau, où le carbone dans sa nouvelle forme nanotube de carbone occupe une place privilégiée.

L'objectif de ces travaux consistait à l'étude du comportement mécanique d'une poutre poreuse en nanocomposite à base de nanotube de carbone (NTPC), et de mettre en œuvre l'effet de la distribution de la porosité sur le comportement des poutres poreuses renforcées par des NTPCs.

Dans ce travail, nous avons étudié la charge critique de flambement et l'influence des différents paramètres sur le comportement des poutres poreuses renforcées par des nanotubes de carbone selon trois formes différentes (UD-CNT, O-CNT, X-CNT).

Cette étude est basée sur la théorie d'ordre élevée raffinée de déformation de cisaillement concernant l'effet du rapport géométrique, nous avons conclu que les valeurs de la charge critique de flambement (N_{cr}) des poutres diminuent avec l'augmentation des rapports géométriques (L/h), ce dernier diminue pour tous les types de renforcement, pareil pour le changement de la fraction volumique.

A partir des résultats exposés par la formulation proposée, on peut dire que la charge critique de flambement est influée par la disposition des nanotubes de carbone dans une matrice polymère, et on a trouvé que la poutre X-CNT est la plus rigide par rapport aux autres types avec des charges critiques importantes.

La distribution O-CNT donne des charges critiques de flambement les plus faibles par rapport aux autres renforcements.

Ensuite on a constaté une grande influence estimée à la distribution de porosité de type symétrique 2.

Enfin, cette étude peut servir comme une base de données pour les futurs chercheurs dans le but de développer et d'approfondir les connaissances dans le domaine d'utilisation des nanocomposites à base de nanotube de carbone.

Références bibliographique

[A]

- [Arias 2007] Arias -Diana Lucio, Loet Leydesdorff, *Scientometrics*, 2007, 70, 603
- [Ait Atmane 2010] Ait Atman Hassen, *Vibration des structures composites en tenant compte de l'effet du cisaillement*, thèse de doctorat, L'Université Djilali Liabes de Sidi bel Abbes, (2010).
- [Ajayan 2007] P. M.Ajayan, J. M.Tour, *Materials science - Nanotube composites*. *Nature* 2007, 447 (7148), 1066-1068.
- [Andrews 2002] R. Andrews, D. Jacques, D. Qian, T. Rantell, *Accounts of Chemical Research*, 2002, 35, 1008-1017.
- [Aurélie 2010] Aurelie Cayla, *Elaboration de détecteurs souples de température –mise en œuvre et caractérisation de multifilaments à base de polymères immiscibles chargés en nanotubes de carbone*, thèse de doctorat, L'Université des sciences et technologiques de Lille école doctorale des sciences pour l'ingénieur, (2010).

[B]

- [Bernard 2007] : Bernard C, *Propriétés mécaniques des nanotubes de carbone en tant que nano sondes et leur fonctionnalisation par bio-nanoparticules*, l'Université Bordeaux I, (2007).
- [Bethune 1993] D. S. Bethune, C. H. Kiang, M. S. de Vries, G. Gorman, R. Savoy, J. Vazquez, R. Beyers, *Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer wall*, *Nature*, 363, 605 (1993).
- [Berthelot 1999] J.M. Berthelot, « *Matériaux composites, comportement et analyse des structures* », Edition TEC & DOC, Cachan, 1999
- [Besnard, C. 2019]. Besnard, C. (2019). *Elaboration de composites céramiques oxyde/oxyde par caléfaction* (Doctoral dissertation, Université de Bordeaux).
- [Boumia 2017] Boumia Lakhdar *Les propriétés physique et mecaniques des nanotubes en carbone*, thèse de doctorat, l'Université Abou-Belkaid Tlemcen, (2017).
- [Bozlar 2009] M. Bozlar, *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. A, *Thermal and electrical conductivity of graphite and carbon at low temperatures*, *Journal of Applied Physics*, 15(5), 452-454, (1944).
- [Buchoux 2011] J. Buchoux ; *nanotubes de carbone comme sondes en microscopie à force atomique*, thèse de doctorat, l'Université Bordeaux I, (2011).

[C]

- [Cai 2008] Cai. D. Y, Song. M, *Latex technology as à simple route to improve the thermal Conductivité of a carboné nanotube/polymère composite*, *Carbon*, 46 (15), 2107-2112, (2008).
- [Chemi 2018] Chemi Awda, *La charge critique de flambement d'un nanotube de carbone* thèse de doctorat, l'Université Djilali Liabes Sidi Bel-Abbes, (2018).
- [Clément, Phillipe2013] Clément, Phillipe. *Détermination des propriétés mécaniques de céramiques poreuses par essais de microindentation instrumentée sphérique*. Thèse de doctorat. INSA de Lyon.2013.

[D]

- [Daniel 2009] Daniel Gay, *Matériaux Composites 4ème Edition*, Hermès 2009.
- [Dean 1983] Dean, E. A. et Lopez, J. A. *Empirical dependence of elastic module on porosity for ceramic materials*. *Journal of the American Ceramic Society*, 1983, vol. 66, no 5, p. 366

[E]

- [Elbaz 2004/2005] M r : ELBAZ Mikael ; *master Nanotechnologie ; Les nano composite à matrice organique ; 2004/2005*
- [El Sawi 2010] Ihab EL SAWI, *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).

[**Einstein1906**] Einstein, Albert. Einstein bestimmung der moleküldimensionen. Annalen der Physik, 1906, vol. 324, no 2, p. 289

[F]

[**Fabio 2006**] Fabio.Bertini, Maurizio Canetti, Polymer Degradation and Stability, 91, p. 600-605 (2006).

[**Félix2012**] Félix Balima. Structure et porosité de systèmes lamellaires sous haute pression : cas du graphite et de la vermiculite. Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci]. Université Claude Bernard - Lyon I, 2012. Français. Tel-00845579

[**Fina 2006**] A. Fina, H.C.L. Abbenhuis, Polymer Degradation and Stability, 91, p.1064-1070 (2006).

[**Florent 2011**] Florent Seichepine, Réalisation d'inter connexions de faible résistivité à base de nanotubes de carbone bi parois pour la microélectronique, Université Toulouse III Paul Sabatier, (2011).

[G]

[**Geim 2007**] A. K. Geim, K. S, les nanotubes de carbone. Site ; <http://www.google.com> (accédé le 11/11/2011).

[**Goj 2004**] F. H. Gojny, M. H. G. Wichmann, U. Köpke, B. Fiedler and K. Schulte, Composites Science and Technology, vol. 64, Issue 15, pp.2363-2371, (2004).

[**Guessas, H. 2020**] Guessas Habib Comportement Mécanique d'une Plaque Nanocomposite à base de Nanotube de Carbone (Doctoral dissertation)2020.

[H]

[**Haddad 2010**] Raoudha Haddad, Fonctionnalisation de Nanotubes de Carbone pour le Développement de Bio-architectures Affines : Application aux Biocapteurs, thèse de doctorat, l'Université de Monastir, délivré par la Faculté des Sciences de Monastir Et de l'Université de Grenoble, délivré par l'Institut Polytechnique de Grenoble, (2010).

[**Hildebrand et al 1949**] HILDEBRAND, F. B., REISSNER, E., et THOMAS, G. B. Notes on the foundations of the theory of small displacements of orthotropic shells. 1949.

[I]

[**Iijima 1991**] Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. Nature, 354(6348), 56-58.

[**Iijima 1993**] S. Iijima, T. Ichihashi, Single-shell carbon nanotubes of 1 nm diameter, Nature, 363, 603, (1993).

[**Inagaki 2009**] FGF21 induces PGC-1 α and fatty acid metabolism during the adaptive starvation response. Proceedings of The National Academy of Science, (2009).

[**Izard 2004**] Nicolas Izard, Nanotubes de Carbone : Systèmes pour la limitation optique. Matériaux. Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc, (2004).

[K]

[**Kau 2001**] H.-H. Kausch, N. Heymans, C. J. G. Plummer, P. Decroly, Matériaux polymères : propriétés mécaniques et physiques, Presses polytechniques et universitaires romandes (2001)

[**Kim 2007**] J.Y. Kim, H.S. Park, S.H. Kim, Journal of Applied Polymer Science, 2007, 103, 1450-1457.

[**Kumar et al 2017**] Sanat K Kumar, Brian C Benicewicz, Richard A Vaia, and Karen I Winey. 50th anniversary perspective: are polymer nanocomposites practical for applications?

Macromolecules, 50(3) :714731, 2017

[L]

[**Lauret 2004**] Lauret. J. S, Thèse, Etude des propriétés optiques des nanotubes de carbone, université Pierre et Marie Curie–Paris VI, 112, (2003).

[**Lassagne 2006**] B. Lassagne, Transport électronique dans les nanotubes de carbone : étude sous champ magnétique, thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, (2006).

[**Liao 2004**] Y.H. Liao, O. Marietta-Tondin, Z. Liang, C. Zhang, B. Wang, Materials Science and Engineering A, vol.385, pp.175–181, 2004.

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

[M]

[**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).

[**Mashkov et al 2016**] Yu K Mashkov, VA Egorova, OV Chemisenko, and OV Maliy. Polymer nanocomposites development and research for petrochemical and oil and gas production equipment. Procedia Engineering, 152 :545 550, 2016.

[**Menail 2009**] Menail Younès, 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).

[N]

[**Naghdi 1957**] NAGHDI, P. M. On the theory of thin elastic shells. Quarterly of Applied Mathematics, 1957, vol. 14, no 4, p. 369-380.

[**Nikolaev 1999**] Nikolaev. P, Bronikowski. M. J, Bradley. R. K, F· Rohmund. D· T· Colbert, K· A· Smith, 良. E. Smalley, Chemical Physics Letters, 313, 91, (1999).

[**Nodal 2001**] L'industrie française des matériaux composites Etude stratégique réalisée par NODAL CONSULTANTS Rapport final 17 décembre 2001

[P]

[**Paris 2011**] C. Paris, Étude et Modélisation de la Polymérisation Dynamique de Composites à matrice Thermodurcissable, thèse de doctorat, Université de Toulouse, (2011).

[**Peeterbroeck et al 2004**] S.Peeterbroeck, M. Alexander, Composites Science and Technology, 64, p .2317-2323 (2004).

[**Penu 2008**] C. Penu, Nanocomposites à matrice polyamide 6 ou polystyrène et à renforts de nanotubes de carbone : Du procédé de synthèse aux phénomènes de percolation, Thèse de Doctorat, L'Institut National Polytechnique de Lorraine, 2008

[**Perrin et al 1999**] R. Perrin, J. P Scharff, Chimie industrielle, Dunod, 2ème Ed (1999).

[**Phani 1987**] PHANI, Kalyan Kumar et NIYOGI, S. K. Young's modulus of porous brittle solids. Journal of materials science, 1987, vol. 22, no 1, p. 257

[R]

[**Radushkevich 1952**], L.V.Radushkevich ,V.M.Lukyanovich, Zurn Fisic Chim, 1952, 26, 88

[**Rakrak 2018**] RAKRAK. K, Thèse, Etude de la vibration libre d'un nanotube en carbone, Université djillali liabes de sidi bel abbes, (2018).

[REMOND et al 2003] REMOND Y. & LAMON J. "Matériaux composites, Elaboration- Conception –Structure - Comportement mécanique". Volume 1, Strasbourg 12,13 et 14 mars 2003

[S]

[Saito 1992] R. Saito, M. Fujita, G. Dresselhaus, M. S. Dresselhaus, Electronic structure of graphene tubules based on C60, Phys. Rev. B, 46, 1804 (1992).

[T]

[Tagrara 2015] Tagrara. S. H, Benachour. A, Bouiadjra. M. B, Tounsi. A, On bending, buckling and vibration responses of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite beams, Steel and Composite Structures, 19(5), 1259-1277, (2015).

[Tho 2005] E. T. Thostenson, C. Li, T-W. Chou, Composites Science and Technology, vol. 65, pp.491–516, (2005).

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

[Tounsi 2012] A. Tounsi, M.S.A. Houari, S. Benyoucef, E.A.Adda Bedia, Aerospace Science and Technology,(In press) (2012).

[V]

[Vaia et al 1995] R. A. Vaia, K. D. Jandt, E. J. Kramer, E. P. Giannelis. Macromolecule 28 1995 8080-8085.

[W]

[Wei 2006] C. Y.We, Applied Physics Letters, 88 (9), (2006).

[Wattanasakulpong et Ungbhakorn 2013] N, Wattanasakulpong, V, Ungbhakorn, Analytical solutions for bending, buckling and vibration responses of carbon nanotub- reinforced composite beames resting on elastic foundation, computat. Mater.Sci.71, 201-208, (2013).

[X]

[Xiong 2006] J.Xiong, Z. Zheng, X. Qin, M. Li, H. Li, X. Wang, Carbon 2006, 44 (13), 2701- 2707

[Y]

[Yao 2001] Liu. Z, Jiao. L, Yao. Y, Xian. X, Zhang. J, Aligned, ultralong single-walled carbon nanotubes: from synthesis, sorting, to electronic devices, Advanced materials, 22(21), 2285- 2310, (2010).

[Yas et Samadi 2012] Yas M.H, Samadi N, “Free vibrations and buckling analysis of carbon nanotube-reinforced composite Timoshenko beams on elastic foundation”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 98, 119 – 128, (2012).

[Yam 1995] T. Yamabe, Synthetic Metals, vol.70, pp.1511-1518, 1995.

[Yu MR 2000] M.F Yu., B. S Files, S. Arepalli, R.S Ruo, Physical Review Letters 84 (24), 5552 (2000). 145. Yung,Y.Y., Munz, D., 1996. Stress analysis in two materials joint with a fonctionnaly graded material. In: Shiota, T., Miyamoto, M.Y. (Eds.), functionally Graded Material, pp.41-46.

[Z]

[Zerrouki 2022] ZERROUKI, Rachid. Thèse de doctorat : Etude de l'Influence de la Distribution des Nanocharges sur le Comportement Mécanique du Nanocomposite. Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, 2022.

[Zhou 1994] O. zhou, R.M. Fleming, D.W. Murphy, C.H. Chen, R.C. Haddon, A.P. Ramirez et S.H. Glarum, Science, 263 :1744 (1994).

[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 Abbes, (2012).