

République Algérienne Démocratique Et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Ibn Khaldoun De Tiaret.  
Faculté Des Sciences Appliquées  
Département Génie Civil



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

**Spécialité : Génie civil**

**Option : Structures**

**Présenté par :**

**LAGHOUATI Akram**

**MEDDAH Abdelkarim**

*Sujet du mémoire :*

**L'influence de la distribution de porosité sur le  
comportement statique d'une poutre nanocomposite  
(FG-CNT)**

Soutenue publiquement Le 09/06/2024 devant le jury composé de :

**Pr T. HASSAINE DAOUADJI**

**Président**

**Pr M. ZIDOUR**

**Rapporteur**

**Pr T. BENSATTALAH**

**Examineur**

**Dr A. SAOULA**

**Examineur**

**Dr A. KABLIA**

**Examinatrice**

**Promotion : 2023/2024**

## Remerciement

Je remercie ALLAH le tout puissant qui m'a guidé et qui m'a donné la force, le courage et la volonté de réaliser ce modeste travail.

Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce projet.

Tout d'abord, nous tenons à remercier nos familles pour leur soutien constant et leur encouragement tout au long de ce parcours.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadreur, ZIDOUR MOHAMED, pour ses précieux conseils, son expertise et sa disponibilité tout au long de ce travail.

Mes remerciements sincères s'adressent également aux membres de juré, T. HASSAINE  
DAOUADJI, T. BENSATTALAH, A. SAOULA , A. KABLIA

Nous sommes également reconnaissants envers nos collègues et amis qui ont partagé leurs idées et leur soutien tout au long de cette aventure.

Enfin, Nous remercions également toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à ce projet, ainsi que toutes les institutions qui ont facilité notre travail de recherche.

Merci à tous pour votre précieuse collaboration.

## Dédicaces

Du plus profond de mon cœur et avec tout le respect que je leurs dois,

Je dédis sincèrement ce travail :

A mes chers parents et ma grand-mère

Et pour leur affection et soutien,

A mes chers frères et sœurs,

A tous ceux que nous aimons et surtout qui nous aiment.

*Laghouti Akram*

## Dédicaces

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leurs amours, leurs tendresses, leurs soutiens et leurs prières tout au long de nos études, A ma chère sœur Pour leurs Encouragements permanents, et leur soutien moral.

A mes chers amis, Amine,

Abdelmalek, Mohamed, Abdel Wahab, Oussama, Hmida.

Pour leur appui et leur encouragement, A ma famille Pour leur soutien tous aux longs de notre parcours universitaire, Que ce travail soit L'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infallible, Merci  
D'être toujours là pour nous.

*MEDDAH Abdelkrim*

---

## Résumé

Le comportement statique d'une poutre en nano-composite sous l'effet de la porosité est examiné dans cette étude à l'aide de la théorie des poutres de déformation par cisaillement de ordre élevé (HSDT).

Plusieurs distribution des nanotubes de carbone sont utilisés tel que la distribution uniforme (UD-CNT) et fonctionnellement gradués (X-CNT, O-CNT, V-CNT,  $\wedge$ -CNT). La nouveauté dans le présent travail, c'est l'étude analytique de l'effet de la distribution de porosité sur le comportement statique des poutres.

Les équations mathématiques utilisées dans le modèle actuel sont dérivées, et les solutions obtenues sont validité en les comparants à des solutions disponibles dans la littérature. Les déplacements et les contraintes des poutres poreuses à base de polymères et NTC sont étudiés, en se basant sur l'étude paramétrique de rapport géométrique, la fraction volumique, les types de renforcement et la distribution de la porosité.

**Mots-clés:** renforcement; nanotubes de carbone ; flexion; contraintes; porosité.

## Abstract

The static behavior of a Nano-composite beam under the influence of porosity is examined in this study using high order shear deformation theory (HSDT) of beams.

Various distributions of carbon nanotubes (CNTs) are employed, such as uniform distribution (UD-CNT) and functionally graded distributions (X-CNT, O-CNT, V-CNT,  $\wedge$ -CNT). The novelty in the present work lies in the analytical investigation of the effect of porosity distribution on the static behavior of the beams.

Mathematical equations utilized in the current model are derived, and the obtained solutions are validated by comparing them to solutions available in the literature. Displacements and stresses of porous beams made of polymer and CNTs are studied, based on a parametric analysis of geometric ratio, volumetric fraction, types of reinforcement, and porosity distribution.

**Keywords:** Reinforcement; Carbon Nanotubes; Bending; Stresses; Porosity.

## ملخص

في هذا البحث العلمي يتم دراسة التأثيرات الستاتيكية لرافدة بمركب نانوي تحت تأثير المسامات باستخدام نظرية التشوه بالقص العالي. (HSDT).

يستخدم عدة توزيعات لأنابيب الكربون مثل التوزيع الموحد (UD-CNT) والتدرج الوظيفي (O-CNT، X-CNT، V-CNT، CNT، A-CNT) الجديد في هذا العمل هو الدراسة التحليلية لتأثير توزيع المسامات على السلوك الاستاتيكي للروافد. يتم استنتاج المعادلات الرياضية المستخدمة في النموذج الحالي، وتوثق الحلول المحصل عليها من خلال مقارنتها بالحلول المتاحة في الأدبيات. يُدرس الانتقال و الاجهادات للروافد المسامية بناءً على دراسة النسب الهندسية ، ونسبة الحجم، وأنواع التقوية، وتوزيع المسامية.

**الكلمات المفتاحية :** تقوية؛ أنابيب الكربون؛ انحناء؛ اجهادات؛ مسامية.

# *Sommaire*



# Sommaire

Remerciement	
Dédicaces	
Résumé.....	i
Abstract.....	ii
ملخص.....	iii
Liste des abréviations.....	vii
Liste des notations.....	viii
Liste des tableaux.....	x
Liste des figures.....	xi
Introduction générale.....	1

## Chapitre I : Généralité sur les nanocharges et renfort

I.1. Introduction :.....	3
I.2. Les nanocharges :.....	3
I.2.1. Classification selon leurs dimensions nanométriques :.....	3
A. les nanoparticules :.....	3
B. Les nanofibres :.....	4
C. les nanofeuillets ou nanoplaques :.....	5
I.2.2. Classification selon leurs natures :.....	5
A. Les nanocharges organiques :.....	5
B. Les nanocharges inorganiques :.....	6
I.2.3. Classification selon leur capacité à répondre aux stimuli :.....	6
A. Les nano renforts inertes (ou structurel) :.....	6
B. Les nano renforts actifs (ou fonctionnel) :.....	6
I.3. Les formes allotropiques du carbone :.....	6
A. Le graphite.....	6
B. Le diamant.....	7
C. Les fullerènes.....	7
I.4. Structure des nanotubes de carbone :.....	8
I.5. Techniques de synthèses de nanotubes de carbone :.....	9
I.5.1. L'arc électrique :.....	9
I.5.2. Ablation laser :.....	10
I.5.3. Synthèse par CVD :.....	11
I.6. Propriétés des nanotubes de carbone :.....	12
I.6.1. Propriétés mécaniques :.....	12
I.6.2. Propriétés thermiques :.....	12
I.6.3. Propriétés électriques :.....	13
I.7. Risque des nanotubes de carbone :.....	13
I.8. Le marché des nanotubes de carbone :.....	13

I.9. Applications potentielles des NTC :.....	14
I.10. Défauts des nanotubes de carbone :.....	14
I.11. Conclusion :.....	15

## **Chapitre II : Les nanocomposite (nanotube de carbon /polymère)**

II.1. Introduction :.....	16
II.2. Définition d'un nanocomposite :.....	16
II.3. Classification des nanocomposites selon la géométrie du renfort.....	16
II.3.1. Renforts de types 1D : .....	16
II.3.2. Renforts de type 2D :.....	17
II.3.3. Renforts de type 3D :.....	17
II.4. Classification des nanocomposites selon la nature de la matrice :.....	17
II.4.1. Les composites à matrice organique :.....	17
II.4.1.1. Composites de Large Diffusion :.....	17
II.4.1.2. Composites à Haute Performance :.....	17
II.4.1.3. Les matrices des matériaux COM :.....	18
II.4.1.3.1. Les thermoplastiques :.....	18
II.4.1.3.2. Les thermodurcissables :.....	18
II.4.2. Les composites à matrice minérale :.....	18
II.4.2.1. Les composites à matrice métallique : .....	18
II.4.2.2. Les composites à matrice céramique :.....	19
II.5. Les nano-composites à matrice polymère et renfort (CNT) :.....	19
II.6. Dispersion des renforts : .....	20
II.6.1. Utilisation des ultrasons :.....	20
II.6.2. Dispersion mécanique par tricylindre :.....	21
II.7. Procédés d'élaborations des nanocomposites :.....	21
II.7.1. Mélange en solution :.....	21
II.7.2. Mélange à l'état fondu :.....	22
II.7.3. Polymérisatio-n in situ :.....	22
II.8. Propriétés des nanocomposites (NTC/polymère) :.....	23
II.8.1. Propriétés mécaniques :.....	23
II.8.2. Propriétés thermiques des nanocomposites (NTC/polymère) :.....	23
II.8.2.1. La stabilité thermique :.....	24
II.8.2.2. Propriétés de retard au feu :.....	24
II.9. Interface matrice-renfort dans les nanocomposites à matrice polymère :.....	24
II.10. Applications des nanocomposites :.....	25
II.11. Application des nanocomposites dans le domaine de Génie civil :.....	25
II.12. Conclusion :.....	26

## **Chapitre III : Théories des poutres est la porosité**

III.1. Introduction :.....	27
III.2. Les différentes théories des poutres .....	27

III.2.1. Théorie d'Euler Bernoulli ou bien théorie classique des poutres :.....	27
III.2.2. La théorie de déformation en cisaillement du premier ordre FSDT (Timoshenko Beam Theory) :.....	28
III.2.3. La théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé (HSDT) :.....	29
III.3. la porosité :.....	31
III.3.1. Perméabilité :.....	31
III.3.2. Tortuosité :.....	32
III.3.3. Surface spécifique :.....	33
III.4. La caractérisation de la porosité :.....	33
III.4.1. Porosimétrie par Intrusion d'Eau :.....	34
III.4.2. Porosimétrie par intrusion de mercure :.....	34
III.5. Effet de la porosité sur les propriétés mécaniques des matériaux :.....	35
III.5.1. Porosité et module d'élasticité longitudinale (le module de Young/porosité) :.....	35
III.6. Conclusion :.....	37

**Chapitre IV : L'effet de la porosité sur le comportement mécanique des poutre « étude statique »**

IV.1. Introduction :.....	38
IV.2. Les propriétés matérielles des poutres composites renforcées par des nanotubes de carbone :.....	38
IV.2.1. Équations de mouvement :.....	41
IV.3. Solution analytique :.....	44
IV.4. Résultats et discussions :.....	45
IV.4.1. Comparaison des valeurs :.....	46
IV.5. Conclusion :.....	52
Conclusion générale :.....	53
Bibliographie :.....	55

*Liste de  
Abréviations*

## Liste des abréviations

PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
UV	Ultraviolets
CNTs	Nanotube de carbone
BN	Les nanotubes de nitrure de bore
GNP	Les nanoplaquettes de graphite
SWNT	Nanotube de carbone simple paroi
MWNT	Nanotube de carbone Multi paroi
CVD	Chemical Vapor Deposition
CMO	Composites à matrice organique
CMM	Composites à matrice métallique
CMC	Composites à matrice céramique
HRR	Heat Rate Release
SEA	Specific Extinction Area
P	La porosité
V <sub>p</sub>	Volume des vides (pores)
V <sub>t</sub>	Volume total
P <sub>c</sub>	Porosité critique (seuil de percolation)
E	Le module de Young
CNTRC	Poutre de composite renforcée par des nanotubes de carbone.

# *Liste des notations*

## Liste des notations

$\Theta$	<i>Angle chiral</i>
$\vec{a}_1, \vec{a}_2$	<i>Les vecteurs de base du graphène</i>
$d_{002}$	<i>Distance entre deux plans de graphite</i>
$\vec{C}_h$	<i>Vecteur chiral</i>
$(m, n)$	<i>Un couple de nombres entiers qui définit la structure du nanotube</i>
$C60$	<i>Fullerène C60</i>
$L$	<i>Longueur de la poutre</i>
$h$	<i>Epaisseur de la poutre</i>
$E_{11}^{cnt}; E_{22}^{cnt}$	<i>Modules de Young des nanotubes de carbone</i>
$G_{12}^{cnt}$	<i>Module de cisaillement des nanotubes de carbone</i>
$V_{cnt}$	<i>Fraction volumique des nanotubes de carbone et de la matrice</i>
$V_p$	<i>Fraction volumique de la matrice polymère</i>
$\eta_i$ ( $i = 1, 2, 3$ )	<i>Les paramètres d'efficacité</i>
$\nu^p$	<i>Coefficient du poisson de la matrice polymère</i>
$\rho^{cnt}$	<i>Masse volumique du nanotube de carbone</i>
$\rho^p$	<i>Masse volumique de la matrice polymère</i>
$V_{cnt}^*$	<i>Fraction volumique</i>
$u_0$	<i>Le déplacement axial de la fibre moyenne</i>
$w_b$	<i>Composante de la flexion du déplacement transversal long du plan médian de la poutre</i>
$w_s$	<i>Composante du cisaillement du déplacement transversal long du plan médian de la poutre</i>

$f(z)$	<i>Fonction de forme</i>
$\varepsilon_x, \gamma_{xz}$	<i>Composantes de déformation</i>
$Q_{ij}$	<i>Coefficients de rigidité</i>
$\tau_{xz}$	<i>Contrainte tangentielle</i>
$\delta U$	<i>La variation virtuelle de l'énergie de déformation</i>
$\delta V$	<i>La variation virtuelle de l'énergie potentielle</i>
$N, M_b, M_s$	<i>Les efforts résultants</i>
$q$	<i>La charge transversale</i>
$A_{110}$	<i>Rigidité d'extension ou la valeur de <math>A_{11}</math> d'une poutre homogène</i>
$\rho(z)$	<i>La masse volumique</i>
$(I_0, I_1, J_1, I_2, J_2, K_2)$	<i>Les moments d'inerties</i>
$A_{11}$	<i>Rigidité de membrane</i>
$B_{11}$	<i>Rigidité de couplage (membrane-flexion)</i>
$D_{11}$	<i>Rigidité de flexion</i>
$C_{11}, H_{11}, E_{11}$	<i>Les éléments de rigidité d'ordre élevé</i>
$Q_m$	<i>L'amplitude de la charge</i>
$U_m, W_{bm}$ et $W_{sm}$	<i>Des paramètres arbitraires</i>
$\sigma_{xx}$	<i>Contrainte normale dans la direction <math>x</math></i>
$\sigma_{xz}$	<i>Contrainte normale dans la direction <math>xz</math></i>
$S_i, m_i$	<i>Éléments de la matrice</i>
$t$	<i>Le temps</i>



# *Liste des tableaux*

---

## Liste des tableaux

### Chapitre II : Les nanocomposite (nanotube de Carbon /polymère)

**Tableau II.1:** Les avantages et les inconvénients des différentes méthodes d'élaboration des composites polymères/NTC.....23

### Chapitre IV : L'effet de la porosité sur le comportement mécanique des poutre « étude statique »

**Tableau IV.1 :** Déplacements et contraintes adimensionnels de la poutre UD-CNT sous des charges uniformes et sinusoïdales.....46

**Tableau IV.2 :** valeurs des flèches de la poutre de type ( UD-CNT) sous différents type de distributions de porosité et des charge uniforme et sinusoïdales ( $V_{cnt}=0.12$  ;  $L/h = 10$ ).....47

**Tableau IV.3 :** valeurs de la flèche de poutre CNTRC avec et sans renforcement sous différents types de distribution de porosité et des charge ( $V_{cnt}=0.12$  ;  $L/h = 10$  ;  $P = 0.3$ ).....48

# *Liste des figures*

# Liste des figures

## CHAPITRE I : Généralité sur les nanocharges et renfort

<b>Figure I.1</b> : Schéma descriptif de nanoparticule.....	4
<b>Figure I.2</b> : Schéma descriptif de nanofibre.....	4
<b>Figure I.3</b> :Schéma descriptif denano plaque.....	5
<b>Figure I.4</b> : Le graphite.....	7
<b>Figure I.5</b> : Le diamant.....	7
<b>Figure I.6</b> : fullerène.....	7
<b>Figure I.7</b> : a) Modélisation d'un nanotube de carbone monoparoi et b) micrographie haute résolution des parois d'un nanotube de carbone multiparois.....	8
<b>Figure I.8</b> :Schéma montrant comment un feuillet de graphène s'enroule pour former un Nanotube.....	9
<b>Figure I.9</b> : Illustration de la structure atomique d'un nanotube de carbone (a) de type fauteuil et (b) de type zig-zag.....	9
<b>Figure I.10</b> : Schéma représentant un réacteur de type arc électrique permettant la production de nanotubes de carbone.....	10
<b>Figure I.11</b> : Schéma représentant un réacteur de type ablation laser permettant la production de nanotubes de carbone.....	11

## CHAPITRE II : Les nano composite (nanotube de carbon /polymère)

<b>Figure II.1</b> : L'influence de la dispersion des (CNTs) par ultrasons. (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 agrégats sont encore présents.....	20
--	----

## CHAPITRE III :Théories des poutres est la porosité

<b>Figure III.1</b> : Illustration du modèle de la poutre d'Euler Bernoul.....	27
<b>Figure III.2</b> : Illustration du modèle de poutre FSDT (Théorie de Timoshenko ).....	29
<b>Figure III.3</b> : Cinématique de la Théorie d'Ordre Elevé.....	30
<b>Figure III.4</b> : La distribution (parabolique) des contraintes decisaillement.....	30
<b>Figure III.5</b> : Configuration de mesure de la perméabilité visqueuse $k_0$ ou la résistivité au passage de l'air.....	32

<b>Figure III.6:</b> Définition des paramètres géométriques de la tortuosité et de l'orientation d'un pore.....	33
<b>Figure III. 7:</b> Représentation schématique de l'influence de la porosité sur les propriétés mécaniques de matériau poreux. Les deux courbes pointillées décrivent l'évolution des propriétés de deux microstructures différentes.....	35
<b>CHAPITRE IV : L'effet de la porosité sur le comportement mécanique des poutre « étude statique »</b>	
<b>Figure IV.1 :</b> (a) Géométrie de la poutre CNTRC sur une fondation élastique (b) les différents modèles des dispositions des renforts.....	38
<b>Figure IV. 2 :</b> Les différentes distributions de porosité : a) Uniforme, b) Symétrique1, c)Symétrique2, d) Asymétrique1, e) Asymétrique2.....	40
<b>Figure IV.3 :</b> L'effet du rapport (L/h) sur la flèche sous différents distribution Symétrique de porosité sous un chargement uniforme ( $V_{cnt}^*=0.12$ ; $p=0.3$ ).....	49
<b>Figure IV.4 :</b> L'effet du rapport (L/h) sur la flèche sous différents distribution Asymétrique de porosité sous un chargement uniforme ( $V_{cnt}^*=0.12$ ; $p=0.3$ ).....	49
<b>Figure IV.5 :</b> d'effet de la porosité (uniforme) sur la flèche sous d'efférents type de renforcement (UD-CNT , O-CNT , X-CNT , V-CNT,VR-CNT ), ( $V_{cnt}=0.12$ ; $L/h=10$ ).....	50
<b>Figure IV.6 :</b> l'effet de porosité de type distributions symétrique 1 sur la flèche sous d'efférents type de renforcement (UD-CNT , O-CNT , X-CNT , V-CNT ,VR-CNT ), ( $V_{cnt}=0.12$ ; $L/h=10$ )...50	50
<b>Figure IV.7 :</b> L'effet du rapport géométrique (L/h) et les fractions volumiques sur la flèche des poutres pour la distribution (X-CNT ) avec une porosité de type uniforme (P=0.3).....	51
<b>Figure IV .8 :</b> L'effet du rapport géométrique (L/h) et les fractions volumiques sur la flèche des poutres pour la distribution (X-CNT) avec une porosité de type symétrique 2 (p=0.3).....	51

## Introduction générale

À l'aube du XXI<sup>e</sup> siècle, nous sommes témoins de l'émergence d'un univers où l'infiniment petit devient synonyme de progrès gigantesques. Les nanosciences, étudiant les phénomènes et la manipulation de la matière à l'échelle atomique et moléculaire, ouvrent la porte à des applications sans précédent, redéfinissant les frontières de la physique, de l'ingénierie et de la médecine. Au cœur de cette révolution se trouvent les nanotubes de carbone (CNTs), ces cylindres de carbone aux propriétés remarquables, découverts par Sumio Iijima en 1991.

Ces structures nanométriques, plus résistantes que le diamant et dotées d'une élasticité surprenante, ont le potentiel de bouleverser notre approche des matériaux composites. Leur intégration dans des matrices polymères ou métalliques conduit à la création de nanocomposites à gradient fonctionnel (FG-CNT), où la distribution de porosité peut être finement contrôlée pour optimiser les performances mécaniques.

Le présent mémoire explore l'influence de cette distribution de porosité sur le comportement statique d'une poutre nano-composite FG-CNT. En s'appuyant sur des modèles théoriques et des simulations numériques, nous cherchons à comprendre comment la répartition des vides à l'échelle nanométrique affecte la rigidité, la résistance et la durabilité de ces matériaux d'avant-garde. Cette étude s'inscrit dans une démarche de conception de matériaux plus légers, plus résistants et plus adaptés aux exigences de l'ère moderne, où la performance et la miniaturisation vont de pair avec la durabilité et l'efficacité énergétique.

En dépit des progrès réalisés dans la synthèse des CNTs, les mécanismes régissant leur formation restent partiellement élucidés, entravant la capacité à produire des nanotubes aux propriétés spécifiques et homogènes. Ce travail de recherche contribue donc à combler les lacunes de la connaissance, en vue de faciliter l'adoption plus large des nanotubes de carbone dans diverses applications industrielles et technologiques.

Ainsi, ce mémoire se propose de jeter un pont entre la science fondamentale des nanomatériaux et leurs applications pratiques, en mettant en lumière l'impact de la microstructure sur les propriétés macroscopiques des composites avancés. Il s'agit d'une quête à la fois scientifique et technique, visant à repousser les limites de l'ingénierie des matériaux pour un avenir où la nanotechnologie est omniprésente et bénéfique pour tous. Les nanotubes de carbone dépassent même le diamant en termes de dureté et peuvent tolérer des déformations de quelques pourcents tout en conservant leur élasticité. Leurs avantages ne se limitent pas à cela, car les nanotubes de carbone possèdent également des propriétés optiques, thermiques, électromécaniques et magnétiques remarquables.

Le premier chapitre offre une revue approfondie de la littérature centrée sur les nanocharges et les nanorenforts, en mettant en lumière les divers types de nanocharges existants. Une attention particulière est accordée aux nanotubes de carbone, en détaillant leurs différents types, leurs propriétés uniques, ainsi que les diverses méthodes de synthèse, de purification, de dispersion et de fonctionnalisation qui les concernent. Le deuxième chapitre porte sur le renforcement des polymères grâce à l'intégration des nanotubes de carbone. Il débute par un survol des notions de base sur les polymères, avant d'examiner en détail les matériaux composites et nanocomposites, leurs divers types et leur composition. Une attention particulière est accordée aux composites à base de polymère renforcés par des nanotubes de carbone, explorant leurs caractéristiques et propriétés distinctives. Le troisième chapitre expose les diverses théories de déformation des poutres, puis la porosité et leurs caractéristiques et leurs effets sur les propriétés mécaniques des matériaux. Le quatrième chapitre est consacré à une validation de la présente théorie de déformation de cisaillement des poutres du ordre élevé (HSDT) proposée en comparant les résultats obtenus et celles existantes dans la littérature. Ensuite, les résultats numériques du comportement à la flexion des poutres nanocomposite sont présentés dans ce chapitre.

# ***CHAPITRE I***

## **Généralité sur les nanocharges et renfort**



## **I.1. Introduction :**

Depuis plus d'un siècle qu'une certaine forme filamenteuse de carbone peut se former par la décomposition d'un gaz comportant du carbone sur une surface métallique très chaude [1]. Il est très probable que ces matériaux élaborés aient été des filaments de nanofibres de carbone mais pour les observer il aurait fallu attendre le développement des microscopes électroniques à haute résolution. En 1952, Radushkevich et Lukyanovich ont réussi à observer grâce à un microscope électronique à transmission des suies de nanofibres de carbone [2]. Entre les années 1950 et 1970, la découverte de dépôts de carbone indésirables dans le domaine des transports ainsi que du nucléaire suscitait l'intérêt des chercheurs sur les nanofibres de carbone. En 1985, une nouvelle forme de carbone, appelée fullerène C<sub>60</sub>, a été découverte par l'équipe de Kroto [3] et leurs a valu le prix Nobel de chimie en 1997. Quelques années plus tard, en 1991, Iijima montre la formation de nanotubes de carbone lors de l'élaboration de fullerènes par arc électrique [4]. Dans les années 90, la technique PECVD pour la croissance de nanostructures de carbone a commencé à s'introduire dans les laboratoires. Cette technique a l'avantage de permettre un meilleur contrôle des paramètres de croissance et donc une croissance plus déterministe. En 1997, Chen et al ont utilisé cette technique pour croître des nanofibres de carbone [5]. Dans la suite de ce chapitre, nous allons tout d'abord parler des différentes structures et propriétés des nanotubes de carbone, ensuite nous aborderons les techniques de synthèses les plus utilisées de ces structures ainsi que leurs mécanismes de croissance. La dernière partie du chapitre traitera des applications possibles de ces structures

## **I.2. Les nanocharges :**

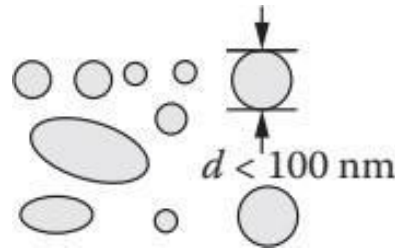
Une nanocharge est un matériau qui a une, deux ou trois dimensions comprises entre 1 et 100 nm. En raison de leur taille nanométrique, il présente une surface spécifique très élevée.

Il y a différentes classifications des nanocharges :

### **I.2.1. Classification selon leurs dimensions nanométriques :**

#### **A. les nanoparticules :**

Ce sont des nanocharges à trois dimensions à l'échelle nanométrique. Ils sont généralement de forme sphérique et cubique, et sont généralement appelés : nanoparticules, nanosphères, nanogranules et nanocristaux. Des exemples de nanocharges tridimensionnelles incluent le nanosilice, le nanoalumine, l'oxyde de nanotitane, le silsesquioxane oligomère polyédrique (POSS), l'hydroxyde de nanomagnésium, les nanoclusters semi-conducteurs, le noir de carbone, le carbure de silicium, et la silice [6]

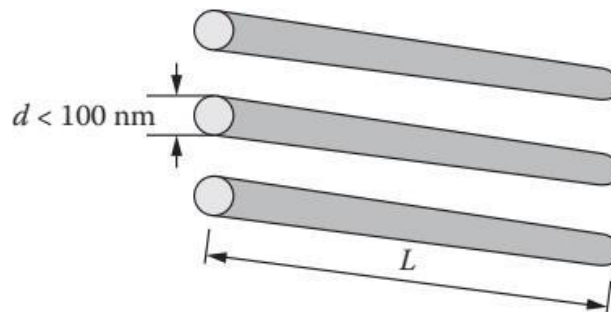


**Figure I.1 :** Schéma descriptif de nanoparticule

Les nanocharges tridimensionnelles sont très importantes dans la formulation des nanocomposites polymères en raison de leurs propriétés inhérentes. Certaines de ces nanoparticules (par exemple :  $\text{TiO}_2$ , Ag,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  et ZnO) possèdent une bonne stabilité, un indice de réfraction élevé, une hydrophilie, une résistance aux ultraviolets (UV) et une excellente transparence à la lumière visible, une activité photocatalytique élevée et un faible coût (. Lorsqu'ils sont combinés avec une matrice polymère appropriée, ils confèrent des propriétés qui leur permettent d'être utilisés dans des applications telles que les revêtements, la séparation et la purification et la biomédecine . Le nano-argent est employé comme agent anti bactérien dans la fabrication de chaussettes anti-odeurs, de sparadraps, d'ustensiles de cuisine ou encore de réfrigérateurs [7].

### B. Les nanofibres :

Ce sont des nanocharges à deux dimensions à l'échelle nanométrique . Ils se présentent principalement sous la forme de tubes, de fibres ou de filaments. Les nanotubes de carbone (CNTs), les nanotubes de nitrure de bore (BN), et les nanotubes d'argile sont des exemples les plus courants de nanotubes.



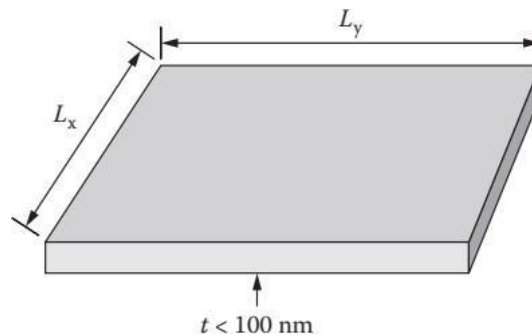
**Figure I.2 :** Schéma descriptif de nanofibre

Certaines nanocharges 2D utilisées dans la formulation de nanocomposites polymères sont les fibres naturelles d'argile sépiolite , les fibres de cellulose , les nanotubes , les fibres de carbone ,

nanofils d'or , oxyde de zinc , dioxyde de titane , silice , dioxyde de cérium et oxyde de cuivre . D'autres incluent le MoS<sub>2</sub> et l'oxyde de graphène . Les nanocharges 2D sont très utiles en énergie[, capteurs, électronique, et optoélectronique.

### C. les nanofeuillets ou nanoplaques :

Ce sont des nanocharges à une dimension à l'échelle nanométrique. Ils se présentent généralement sous la forme de feuilles d'un à quelques nanomètres d'épaisseur à des centaines et des milliers de nanomètres de long. L'argile montmorillonite et le graphène sont des exemples courants de nanocharges 1D.



**Figure I.3 :** Schéma descriptif de nanoplaque

On les trouve également sous forme de nanodisques, de nanoprismes, de nanofeuillets, de nanoplaques et de nanoparois . Des exemples importants incluent les silicates en couches, les nanoplaquettes de graphite (GNP), les nanoplaquettes de ZnO, les plaquettes de graphène amphiphile, les nanofeuilles de ZnO, et des nanodisques Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. La plupart des nanocharges 1D présentent des caractéristiques uniques dépendantes de la forme qui les rendent utiles dans la formation de composants clés des nanodispositifs [8]. Ils sont largement utilisés dans des applications telles que la microélectronique, les biocapteurs, les capteurs, le biomédical et les revêtements.

### I.2.2. Classification selon leurs natures :

#### A. Les nanocharges organiques :

Comprennent les nanofibres polymères, les fibres naturelles (cellulose, lin, bois, etc.) et l'argile naturelle .

**B. Les nanocharges inorganiques :**

Parmi les nanocharges inorganiques figurent les nanoargiles, les oxydes métalliques (Cu<sub>2</sub>O, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, etc.), les nanocharges de carbone (graphène, fibres de carbone, graphite, etc.), les particules métalliques (Au, Ag, Fe, etc.) et d'autres particules (PbS, CdS, MoS<sub>2</sub>, etc.) [9]

**I.2.3. Classification selon leur capacité à répondre aux stimuli :****A. Les nano renforts inertes (ou structurel) :**

Qui manquent de propriétés de réponse aux stimuli et leur rôle principal est le renforcement mécanique. Ces nanocharges comprennent des nanoparticules de silice, de cellulose et de matériaux argileux (montmorillonite, hectorite, saponite, laponite, halloysite, etc.) [10], La nanocharge structurelle ou le nanorenfort est le constituant de nanocomposite qui va supporter la plus grosse partie des efforts mécaniques.

**B. Les nano renforts actifs (ou fonctionnel) :**

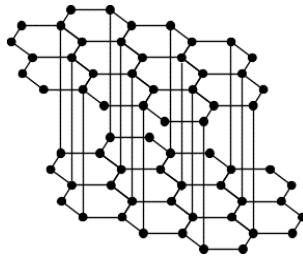
Ce type de nanocharges en plus du renforcement, fournit la capacité de réponse au stimulus au matériau nanocomposite. Des exemples de ce type de matériau incluent les nanocharges à base de carbone, d'or et d'oxyde de fer magnétique.

**I.3. Les formes allotropiques du carbone :**

Le carbone est l'un des éléments les plus abondants sur terre. On peut le rencontrer sous différentes formes allotropiques dont les plus connues sont le graphite et le diamant liées à ses deux hybridations sp<sup>2</sup> et sp<sup>3</sup>. Or depuis 1985 et les travaux de Kroto et al. [11] de nouvelles formes carbonées sont apparues avec les fullerènes. Nous présentons dans ce paragraphe les principales caractéristiques de ces trois formes du carbone élémentaire

**A. Le graphite :**

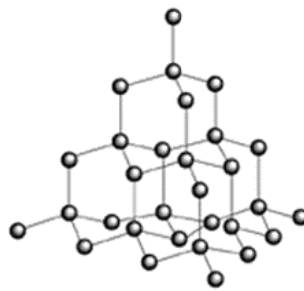
Le graphite est une structure lamellaire à symétrie hexagonale. Les plans, dits plans graphènes, sont empilés suivant le mode ABAB, avec une distance inter-plans de 3.35 Å (le graphite existe aussi en symétrie rhomboédrique avec des empilement ABCABC). Les interactions entre plans sont des forces de Van de Waals, relativement faibles, qui font que les plans de graphènes peuvent glisser facilement les uns par rapport aux autres et confèrent au solide ses propriétés de friabilité. Le graphite est un bon conducteur électrique, tous les carbones sont hybridés sp<sup>2</sup>, autorisant ainsi la délocalisation des électrons et la conduction électrique au sein d'un plan.



**Figure I.4 :** Le graphite

### **B. Le diamant :**

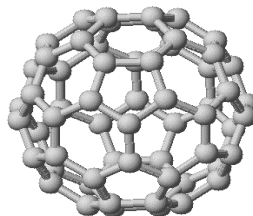
Comme le graphite, le diamant est une forme cristalline naturelle du carbone mais beaucoup plus dense . Il est caractérisé par une maille cubique face centrée ayant deux atomes de carbone dans sa maille élémentaire.



**Figure I.5 :** Le diamant

### **C. Les fullerènes :**

Si le nombre d'atomes de carbone est inférieur à quelques centaines, le nombre de liaisons pendantes sur les bords du plan graphène devient élevé et la forme thermodynamiquement stable du carbone sera alors une structure fermée, il s'agit des fullerènes de formule brute  $C_{2n}$ . Avec 12 pentagones et 20 hexagones on peut former le fameux  $C_{60}$ , ou buckminsterfullerène, du nom de l'architecte Richard Buckminster Fuller (1895-1983) connu pour les dômes géodésiques qu'il a bâtis.



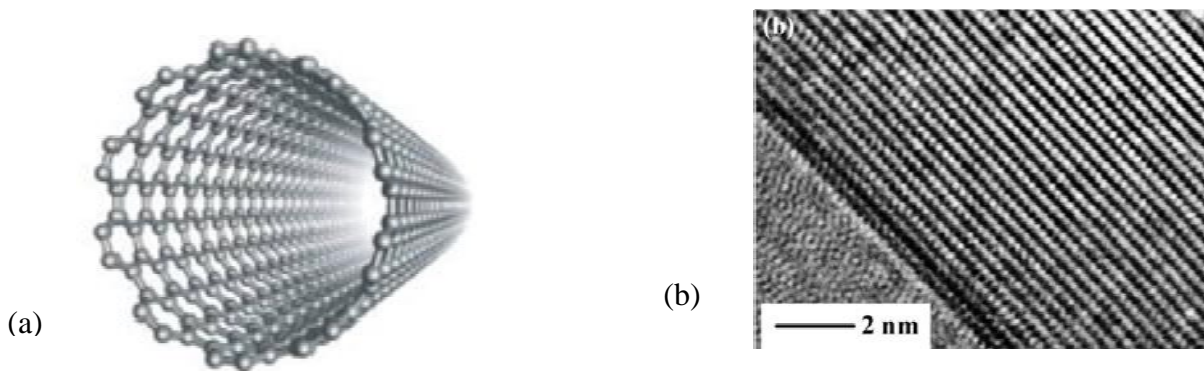
**Figure I.6 :** fullerène

#### I.4. Structure des nanotubes de carbone :

Les nanotubes de carbone (NTC), découverts en 1991, se caractérisent par leur structure unique, semblable à des feuillets de graphène enroulés sur eux-mêmes. Ces structures tubulaires sont fermées à leurs extrémités par des demi-sphères analogues aux fullerènes. On distingue principalement deux catégories de nanotubes de carbone :

Les nanotubes monoparois (SWNT, Single Wall Carbon Nanotubes) : composés d'un seul feuillet de graphène formant un tube.

Les nanotubes multiparois (MWNT, Multi Wall Carbon Nanotubes) : constitués soit de plusieurs feuillets de graphène emboîtés les uns dans les autres, à la manière des poupées russes, soit d'un seul feuillet de graphène enroulé plusieurs fois sur lui-même.

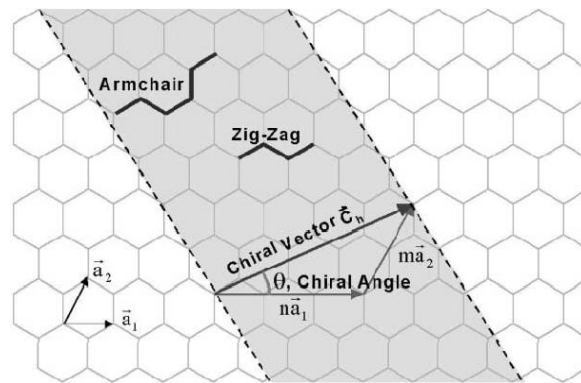


**Figure I.7:** a) Modélisation d'un nanotube de carbone monoparois et b) micrographie haute résolution des parois d'un nanotube de carbone multiparois

Les feuillets de graphène peuvent s'enrouler de différentes manières. L'hélicité des nanotubes va donc différer, conduisant ainsi à différentes structures atomiques des nanotubes de carbone : zig-zag, fauteuil ou chiral.

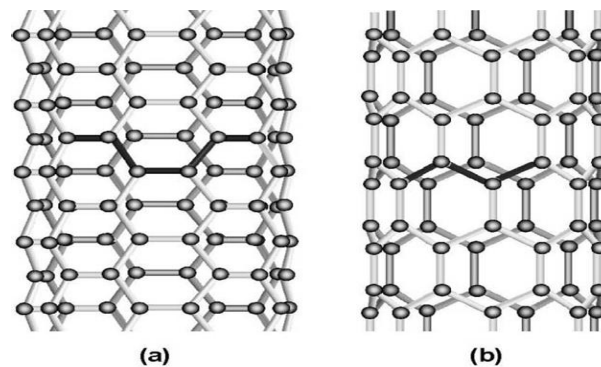
L'hélicité est définie par le vecteur chiral  $\vec{C}_h$  et l'angle chiral  $\theta$ . (la Figure 1.6) représente un feuillet de graphène défini par les vecteurs directeurs  $\vec{a}_1$  et  $\vec{a}_2$ . La bande délimitée par les pointillés représente un nanotube de vecteur chiral  $\vec{C}_h$  enroulé de façon à ce que les bouts du vecteur se rejoignent. Celui-ci peut s'écrire selon l'équation suivante :  $\vec{C}_h = n.\vec{a}_1 + m.\vec{a}_2$ .

L'angle formé par les vecteurs  $\vec{C}_h$  et  $\vec{a}_1$  est appelé angle chiral et les composantes  $n$  et  $m$  définissent le nanotube  $(n, m)$  [12].



**Figure I.8 :** Schéma montrant comment un feuillet de graphène s'enroule pour former un nanotube. Ainsi plusieurs types de nanotubes de carbone peuvent être définis. On distingue tout de même deux cas limites :

- si  $m = 0$  alors  $\theta = 0$  : le nanotube a une structure de type « zig-zag » (Figure I.9 a),
- si  $m = n$  alors  $\theta = 30$  : le nanotube a une structure de type « fauteuil » (Figure I.9 b),
- dans tous les autres cas, on dira que le nanotube est « chiral ».

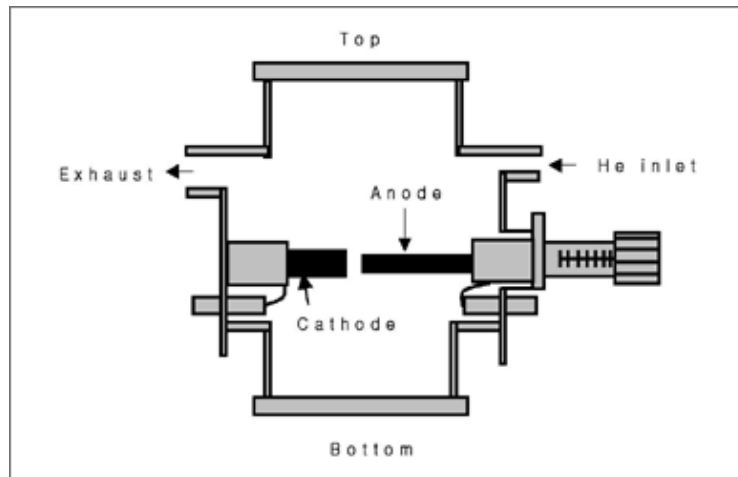


**Figure I.9:** Illustration de la structure atomique d'un nanotube de carbone (a) de type fauteuil et (b) de type zig-zag

## I.5. Techniques de synthèses de nanotubes de carbone :

### I.5.1. L'arc électrique :

Cette technique, utilisée pour la première synthèse de fullerènes par Krätschmer et Huffman en 25 1990 [13], consiste à produire un arc électrique entre 2 électrodes de graphite dans un gaz inerte (Ar, He, ...). La **Figure I-10** est un schéma typique d'un réacteur à arc. Les électrodes utilisées sont en graphite. Le dépôt qui contient des nanotubes ainsi que des nanoparticules de carbone se trouve sur la cathode. Les conditions de dépôt généralement utilisées dans ce type de réacteur sont une tension allant de 20 à 40 eV entre les électrodes et un courant de l'ordre de 50 à 100 A traversant les électrodes.



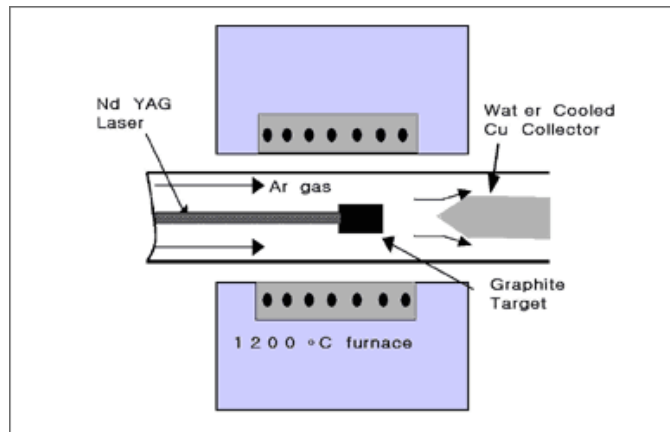
**Figure I.10 :** Schéma représentant un réacteur de type arc électrique permettant la production de nanotubes de carbone.[ 14]

La température du plasma est de l'ordre de 3000K. Les électrodes contiennent une certaine quantité d'un métal de transition (Co, Fe, Ni). La pression dans l'enceinte, l'intensité du courant, et la tension sont de l'ordre de 50-600 Torr, 100A et 20V respectivement. La distance entre les électrodes est de moins de 1mm. Dans le plasma ainsi produit, les particules constituant l'anode s'évaporent et se déposent sur la cathode ainsi que sur l'enceinte du réacteur. Comme l'anode est consommée, il faut en permanence rapprocher les électrodes pour garder les conditions du plasma constantes. Sur l'extrémité de la cathode nous trouvons alors un dépôt fibreux et noir entouré d'une coquille grise appelée culot qui contient des nanotubes et des grains graphitiques.

### I.5.2.Ablation laser :

Ce procédé schématisé sur la Figure I-11 consiste à bombarder, en présence d'un flux de gaz neutre à haute densité, une cible de graphite, avec un faisceau laser. La cible est généralement placée au milieu d'un tube en quartz. A l'extrémité du tube se trouve un collecteur en cuivre refroidi. Lorsque le laser est pulsé (la fréquence des pulses varie typiquement de 8 ns à 10 ms) la cible est ablatée sous forme de petits agrégats qui ne peuvent se recombinaison selon une structure spécialisée que si le réacteur est placé dans un four à au moins 800°C.





**Figure I.11:** Schéma représentant un réacteur de type ablation laser permettant la production de nanotubes de carbone.

Lorsque le laser est continu, la cible est chauffée par le laser à des températures supérieures à 3000 K et progressivement vaporisée. Le gaz qui circule dans l'enceinte est échauffé au voisinage de la cible et joue le rôle d'un four local. La pression et le débit du gaz porteur permettent d'ajuster les gradients de température. Les espèces volatiles vaporisées ou expulsées en petits fragments de quelques atomes, sont transportées par le flux gazeux de la zone haute température jusqu'au collecteur en cuivre refroidi où elles se déposent.

### I.5.3. Synthèse par CVD :

On part ici d'une source de carbone liquide (toluène, benzène, cyclohexane) à laquelle on ajoute un précurseur métallique. On utilise fréquemment du ferrocène ( $C_5H_{10}-Fe-C_5H_{10}$ ) (parfois du nickelocène  $C_5H_{10}-Ni-C_5H_{10}$ ). On transforme la solution en aérosol (fines gouttelettes) transportées alors par un gaz inerte (de l'argon en général) jusqu'à un four à une température comprise entre 750°C et 900°C. Les nanotubes sont alors récupérés soit sur la paroi en verre du tube, soit sur une plaque de silicium. Les nanotubes récupérés sont des multifeuillets, alignés, d'une longueur d'environ 200µm. L'apport continu de réactifs va obliger les nanotubes naissant à prendre le moins de place possible, donc de s'aligner tous dans une direction [15]. Couteau et al [16] ont quant à eux synthétisé des nanotubes en utilisant un catalyseur composé de Fe (III) + Co (II) supporté sur du  $CaCO_3$  et la source de carbone (gazeuse) est de l'acétylène ( $C_2H_2$ ).

Néanmoins le handicap majeur pour le développement des nanotubes reste leur prix de revient exorbitant.

## **I.6. Propriétés des nanotubes de carbone :**

Les nanotubes de carbone suscitent un énorme intérêt dans le monde de la recherche, autant fondamentale qu'appliquée, car leurs propriétés sont exceptionnelles à bien des égards [17]. Leurs propriétés électriques, mécaniques et thermiques laissent entrevoir de nombreuses applications dans plusieurs domaines.

### **I.6.1. Propriétés mécaniques :**

La force des liaisons confère aux nanotubes des propriétés mécaniques exceptionnelles. Des calculs théoriques prédisent tout d'abord ces propriétés : des valeurs de 1 à 5 TPa furent calculées pour le module d'Young axial de SWNTs (des valeurs comparables à celle du module d'Young tangentiel pour un feuillet graphène, à savoir  $\sim 1,0$  TPa). [18] Les premières valeurs expérimentales du module d'Young ont été estimées sur des nanotubes multicouches isolés, par la mesure de leurs vibrations intrinsèques thermiques en microscopie électronique à transmission. Elles sont de l'ordre du TPa, avec une moyenne estimée à 1,8 TPa, mais avec des valeurs pouvant atteindre 4 TPa. D'autres mesures furent réalisées, en utilisant cette fois-ci la microscopie à force atomique. Elles donnèrent des valeurs de 1,3 TPa pour des MWNTs [19] et de 1,0 TPa pour des SWNTs. [20] Les nanotubes peuvent subir en tension des déformations extrêmes (jusqu'à 10 %-20 %) sans montrer de signes de déformation plastique ou de rupture fragile. La forte capacité des nanotubes à subir des déformations réversibles est due à la flexibilité du feuillet graphène, à la possibilité qu'ont les atomes de carbone de se réhybrider avec un degré d'hybridation  $sp^2 / sp^3$  dépendant de la contrainte. Ces réhybridations permettent, lors de l'application d'une contrainte, la propagation des défauts dans les réseaux graphènes des parois. Notons enfin que la compression de nanotubes monocouches conduit à une réduction de volume exceptionnellement grande et réversible. La densité augmente rapidement avec la pression, jusqu'à approcher celle du graphite, et retrouve sa valeur initiale après l'arrêt de l'application de la pression. Cette capacité des SWNTs à absorber réversiblement de l'énergie mécanique a été attribuée à un changement de forme réversible de la section transversale des tubes, passant de circulaire à elliptique et vice-versa.

### **6.2. 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 [21]. 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  $kW.m^{-1}.K^{-1}$  à température

ambiante. L'utilisation de NTC en tant que conducteurs de chaleur est ainsi envisagée pour des matériaux composites ou dans des microsystèmes en tant que dissipateur de chaleur [22].

### **I.6.3. Propriétés électriques :**

L'orientation des motifs hexagonaux de carbone dans les nanotubes de carbone à simple paroi (SWNT) détermine leur comportement métallique ou semi-conducteur, selon une étude de Saito en 1992 [23]. Les configurations « Armchair » des SWNT sont comparables aux conducteurs métalliques, tandis que les configurations « Zigzag » ou « Chiral » sont semi-conductrices . En synthétisant des SWNT, 1/3 d'entre eux présentent un comportement métallique et 2/3 sont semi-métalliques ou semi-conducteurs .

Le transport électronique dans les SWNT est balistique sur de longues distances, sans collisions ni dissipation d'énergie, selon Frank (1998) et Chiu (2005) [24] . Un nanotube a une résistance théorique minimale de 6,5 k $\Omega$ , indépendamment de sa longueur, comme démontré par Yao en 2001 [25].

Contrairement au cuivre, dont la conductivité diminue à l'échelle nanométrique, la conductivité électrique des SWNT augmente avec leur longueur. Cela est montré dans une étude de [26] et confirmé par [27], où la conductivité des SWNT dépasse celle du cuivre pour des longueurs supérieures à 10  $\mu\text{m}$  .

### **I.7. Risque des nanotubes de carbone :**

Les nanotubes de carbone présentent des risques potentiels pour la santé et l'environnement. Ils peuvent causer des dommages pulmonaires lorsqu'ils sont inhalés, en raison de leur petite taille et de leur forme fibreuse, similaire à l'amiante. Leur biodurabilité et la possibilité d'une accumulation dans les tissus biologiques soulèvent des inquiétudes. Les impacts environnementaux à long terme des nanotubes de carbone ne sont pas entièrement compris, nécessitant une manipulation prudente et une étude approfondie de leurs effets écologiques. De plus, le manque de réglementations spécifiques pour les nanomatériaux ajoute un défi supplémentaire pour assurer une utilisation sûre et responsable.

### **I.8. Le marché des nanotubes de carbone :**

Le marché des nanotubes de carbone connaît une croissance rapide, principalement en raison de leur utilisation croissante dans divers secteurs tels que l'électronique, l'automobile, l'aérospatiale, et les matériaux composites. L'innovation continue dans la technologie des nanotubes stimule cette expansion, ouvrant de nouvelles applications, notamment dans le stockage d'énergie et les nanocomposites. Les principaux défis incluent la standardisation et la production à grande échelle,

tout en gérant les préoccupations environnementales et sanitaires. La demande croissante pour des matériaux légers et à haute performance alimente également l'expansion de ce marché.

### **I.9. Applications potentielles des NTC :**

Nous venons de le voir, en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques, électriques, thermiques, d'émission de champ, les NTC pourraient être utilisés pour de nombreuses applications. Les NTC sont utilisés seuls quand on veut exploiter leur propriété d'émission de champ.

Des prototypes d'écrans plats (Samsung et Motorola) ont ainsi déjà été réalisés. Les NTC pourraient également être utilisés pour des lampes lumineuses, comme cathode froide ou comme source portable de rayons X à faible consommation. En raison de leurs propriétés thermiques, électriques et mécaniques associées à leur surface spécifique, les NTC peuvent également être utilisés comme support de catalyseur [28] [29] [30] [31].

Ensuite, il est envisageable de les utiliser comme « additifs » à d'autres matériaux pour en améliorer les propriétés mécaniques, électriques et thermiques.

En effet, d'un point de vue mécanique, les NTC présentent une excellente rigidité tout en étant extrêmement légers. Ils peuvent donc contribuer au renforcement des matrices polymères qui sont peu rigides. L'ajout de NTC dans des matrices métalliques ou oxydes permet également l'obtention de matériaux composites plus résistants avec un gain de poids considérable. Ces matériaux seraient alors utilisables dans les domaines de l'aéronautique ou de l'automobile.

Cette excellente tenue mécanique, associée à la bonne conductivité électrique des NTC, nous permet d'imaginer de nouveaux matériaux aux propriétés combinées, comme par exemple un câble électrique composé de nanotubes de carbone qui présenterait 10 fois moins

### **I.10. Défauts des nanotubes de carbone :**

Parmi les défauts présents dans les nanotubes pouvant avoir une influence notable sur les propriétés mécaniques, nous distinguons les dislocations, les agglomérats, et les défauts topologiques. Les atomes de carbone peuvent former par exemple des pentagones ou des heptagones plutôt que des hexagones. Les dislocations entraînent une diminution de la résistance à la rupture, alors que les défauts topologiques, lorsqu'ils induisent une courbure locale de la couche de graphite, peuvent diminuer le module élastique effectif d'un nanotube.

Les pentagones, supposés à l'origine des courbures observées par TEM, ont été détectés par microscopie à effet tunnel car ils induisent une modification de la densité électronique locale.

Le nanotube multiparois est formé de plusieurs couches concentriques et, comme dans le cas du graphite, chaque couche interagit avec ses voisines par l'action des forces de Van der Waals. Ces

forces étant faibles, nous pouvons nous interroger sur la qualité du couplage mécanique entre les couches. La morphologie et la qualité structurale des nanotubes multiparois vont dépendre étroitement de la méthode de synthèse utilisée.

Les nanotubes produits par arc électrique contiennent peu de défauts structuraux du fait de la température élevée des atomes de carbone lors du processus de synthèse, et sont en majorité rectilignes. Les courbures observées sur certains nanotubes sont dues à des contraintes mécaniques plutôt qu'à des défauts de structure [32].

### **I.11. Conclusion :**

Les nanotubes de carbone met en lumière une avancée remarquable dans le domaine de la nanotechnologie. Ces structures uniques, avec leurs propriétés mécaniques, électriques et thermiques exceptionnelles, ouvrent de vastes horizons pour des applications révolutionnaires, allant de l'électronique à l'espace. Cependant, il est également crucial de souligner l'importance de traiter avec prudence ces technologies, en particulier en tenant compte des risques potentiels associés aux nanomatériaux. La fabrication et l'utilisation des nanotubes de carbone nécessitent une attention et une recherche constantes, non seulement du point de vue de l'innovation technologique, mais aussi pour garantir la sécurité environnementale et sanitaire. Les nanotubes de carbone ne représentent pas seulement une avancée scientifique significative, mais sont également une porte d'entrée vers l'avenir des matériaux et de la technologie, avec la promesse d'innovations qui pourraient changer le cours de notre monde, à condition de prendre en compte les risques des nanomatériaux et de les gérer de manière responsable.

# ***CHAPITRE II***

**Les nanocomposites (nanotube  
de carbon /polymère)**

## **II.1. Introduction :**

Depuis les années 1940, la communauté des matériaux a pris conscience de l'intérêt que pouvaient présenter les composites. Ces matériaux sont constitués de l'assemblage d'au moins deux phases de natures différentes [33]. On distingue généralement une ossature, appelée renfort, qui assure la tenue mécanique et une protection, dénommée matrice, qui peut être un polymère assurant la cohésion de la structure [34].

Au cours des dernières décennies, ces matériaux ont été particulièrement étudiés en raison de la possibilité de combiner les propriétés de chacun des constituants, voir générer les propriétés hybrides issues du mélange de ceux-ci. Toutefois, l'apparition des nanocharges ayant une des trois dimensions à l'échelle du nanomètre a permis de mettre en évidence que l'effet du renforcement devient de plus en plus remarquable à mesure que la taille individuelle de la charge diminue. D'où la naissance des matériaux nanocomposites.

## **II.2. Définition d'un nanocomposite :**

Un nanocomposite est un composite dont le renfort a une dimension au moins à l'échelle nanométrique, un composite étant un matériau constitué d'au moins deux phases combinant les avantages de chacun de ses constituants tout en minimisant les inconvénients. A cette définition, on peut adjoindre celle d'une classe particulière de nanocomposites donnée par Sanchez : "Nous appellerons matériaux hybrides tout système organominéral ou biominéral dans lequel l'une au moins des composantes, organique ou inorganique, se situe dans un domaine de taille compris entre le dixième de nanomètre et la dizaine de nanomètres." Ces diverses composantes peuvent être des molécules, des oligomères ou des polymères, des agrégats, voire des particules. Ces matériaux sont donc des nanocomposites, voire des composites à l'échelle moléculaire.

## **II.3. Classification des nanocomposites selon la géométrie du renfort :**

### **II.3.1. Renforts de types 1D :**

Dans ce cas, une seule des dimensions est de l'ordre du nanomètre ; les charges se présentent sous forme de plans d'épaisseur de l'ordre du nanomètre et de dimensions latérales allant de quelques dizaines à plusieurs centaines de nanomètres. Ces charges plaquettaires peuvent être aussi bien des argiles naturelles (par exemple : montmorillonite) ou synthétiques (par exemple : laponite) que des phosphates de métaux de transition (phosphate de zirconium  $Zr(HPO_4)$ ). Les nanocomposites sont obtenus par intercalation du polymère dans les galeries situées entre les plans des feuillets.

### **II.3.2. Renforts de type 2D :**

Les deux des dimensions sont de l'ordre du nanomètre et la troisième est très largement plus grande, formant ainsi une structure fibrillaire telle que celle des nanotubes de carbone ou des whiskers de cellulose. De tels renforts conduisent à des matériaux ayant des propriétés exceptionnelles en particulier en matière de rigidité.

### **II.3.3. Renforts de type 3D :**

Ce sont des renforts dont les trois dimensions sont de l'ordre du nanomètre. On a alors affaire à des nanoparticules isodimensionnelles telles que des billes de silice nanométriques (obtenues par voie sol-gel in situ ou par polymérisation directement depuis la surface de la charge).

## **II.4. Classification des nanocomposites selon la nature de la matrice :**

La classification des nanocomposites selon la nature de la matrice se réfère à la façon dont les nanocomposites sont organisés en fonction du type de matrice utilisée. Un nanocomposite est décrit comme un matériau biphasé où la phase de renfort présente une dispersion de taille nanométrique. La matrice dans un nanocomposite peut être de type métallique, céramique ou polymère. La classification générale des nanocomposites est souvent basée sur le facteur de forme de la charge incorporée, qui est le rapport entre la longueur et l'épaisseur ou le diamètre de ces charges

### **II.4.1. Les composites à matrice organique :**

Les composites à matrice organique (CMO) se distinguent comme étant parmi les plus prévalents dans le domaine des matériaux composites, principalement en raison de leur coût unitaire modéré, qui permet une fabrication à grande échelle. On identifie principalement deux catégories distinctes de CMO :

#### **II.4.1.1. Composites de Large Diffusion :**

Ces composites, qui représentent environ 95% de la production des CMO, sont économiques et fréquemment utilisés pour fabriquer une variété de pièces soumises à des contraintes modérées. Leur abordabilité les rend particulièrement adaptés pour une utilisation étendue et diversifiée.

#### **II.4.1.2. Composites à Haute Performance :**

Bien qu'ils soient plus coûteux, ces composites offrent des propriétés mécaniques remarquables. Ils sont principalement utilisés dans des secteurs exigeants tels que l'aéronautique, le nautisme, le domaine des sports et des loisirs, ainsi que dans la construction industrielle. Leur coût



plus élevé est justifié par leurs performances supérieures et leur aptitude à répondre aux exigences strictes de ces industries.

#### **II.4.1.3. Les matrices des matériaux COM :**

##### **II.4.1.3.1. Les thermoplastiques :**

Les thermoplastiques, qui sont des types de polymères caractérisés par des liaisons intermoléculaires faibles, se distinguent par leur aptitude au recyclage et leur solubilité dans divers solvants. Cette catégorie de matériaux, incluant notamment le PVC (polychlorure de vinyle), le PE (polyéthylène), le PP (polypropylène), le PA (polyamide) et les PC (polycarbonates), est particulièrement prisée pour sa production économique et aisée. L'un des principaux avantages des thermoplastiques réside dans leur capacité à être facilement recyclés, grâce à leur propriété de réversibilité sous l'effet de la chaleur. En outre, certains types de thermoplastiques spéciaux sont capables de supporter des températures élevées, dépassant parfois les 200°C, élargissant ainsi leur champ d'application.

##### **II.4.1.3.2. Les thermodurcissables :**

Les matériaux thermodurcissables sont des types de polymères qui, une fois formés, ne peuvent être remodelés ou refondus, se distinguant ainsi par leurs supérieures propriétés mécaniques et de résistance thermique comparées aux thermoplastiques. Cette catégorie inclut des variétés telles que les polyesters insaturés (par exemple, le vinyl ester et les composés allyliques), les résines époxy, ainsi que les résines issues de réactions de condensation comme les phénoliques, les aminoplastes et les furaniques.

#### **II.4.2. Les composites à matrice minérale :**

##### **II.4.2.1. Les composites à matrice métallique :**

Les matériaux composites à matrices métalliques (CMM) sont constitués d'une matrice en métal (aluminium, titane, magnésium, molybdène, cobalt et cuivre) et d'un renfort en matériau à caractéristiques distinctes (céramique, métallique ou intermétallique) [35]. La matrice métallique donne au matériau composite de nouvelles propriétés de meilleures propriétés mécaniques, une meilleure résistance au feu et à la température, une meilleure conductivité électrique et thermique, une résistance aux radiations, une imperméabilité au gaz.

Les CMM à matrice d'aluminium sont désormais assez largement répandus dans l'industrie mécanique et en particulier dans le secteur aéronautique pour des pièces soumises à des chargements et des températures modérées.

#### **II.4.2.2. Les composites à matrice céramique :**

Les matériaux céramiques et les composites à matrice céramique sont généralement fragiles. La fabrication de ces matériaux se fait par frittage de différents oxydes et matériaux inorganiques ce qui consiste en un « compactage » de ces différents composants sous haute pression et quelques fois à hautes températures. Les propriétés de ces matériaux dépendent fortement de leur structure, il s'est avéré que les céramiques composées de nanograins sont ductiles, les joints entre ces derniers bloquant plus efficacement la propagation des fissures [. Depuis une vingtaine d'années, de nouvelles routes de synthèse ont permis l'obtention d'oxydes nanocristallins et de poudres non oxydées de très hautes puretés. Néanmoins, le passage de nanopoudres à celui d'un matériau céramique nanostructuré est très difficile, l'agglomération des poudres augmentant avec la diminution de la taille des particules. Le frittage, nécessitant des hautes pressions et dans certains cas des hautes températures, est généralement accompagné par une rapide croissance des grains rendant difficile le maintien d'une nanostructure tout en augmentant la densité. Comme dans le cas de certains matériaux métalliques, une solution consiste à ajouter des additifs ayant pour but de diminuer la croissance des grains. Parmi les NC à matrice céramique, on peut citer les renforts de nanoparticules de SiC dans une matrice Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. [36]

#### **II.5. Les nano-composites à matrice polymère et renfort (CNT) :**

Nous avons vu que les nanotubes de carbone sont de nouvelles formes carbonées qui présentent des propriétés mécaniques, électriques et thermiques et optiques, remarquables. Ces nouveaux objets ont donc suscité un vif intérêt et de nombreux travaux essayant de mettre à profit ces propriétés dans diverses applications sont publiés chaque année. Les articles étudiant les nanotubes comme renfort dans les composites polymères sont notamment très nombreux. Loin de vouloir en faire une liste exhaustive.

Les procédés d'élaboration des matériaux composites peuvent être organisés en 3 grandes classes: l'élaboration par voie solvant (le polymère et les charges sont respectivement dissout et dispersées dans le même solvant) ; par mélange direct (les charges sont mélangées directement à la résine avant l'ajout du durcisseur ou au polymère fondu) ; ou par polymérisation in-situ (les charges sont

dispersées dans le monomère avant la réaction de polymérisation). La dispersion des nanocharges nécessite en général l'emploi d'ultrasons plus ou moins puissants.

## II.6. Dispersion des renforts :

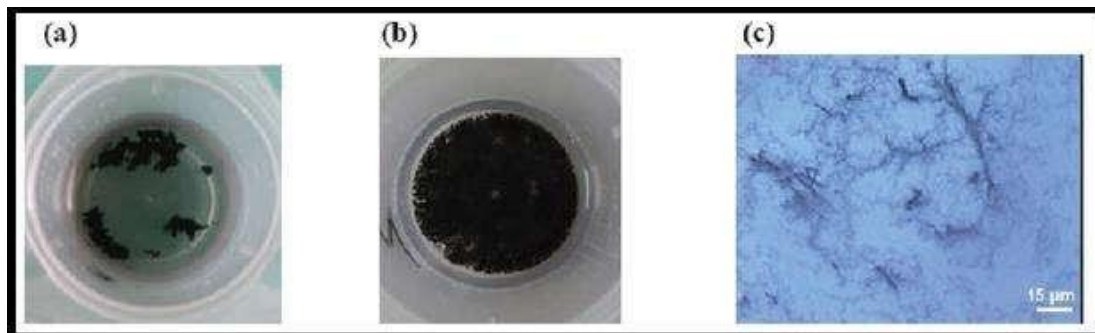
### II.6.1. Utilisation des ultrasons :

L'usage des ultrasons, est une technique très connue et utilisée en abondance dans le domaine [37]. Ce procédé consiste à utiliser les vibrations de la solution dans un bain US pour casser les enchevêtrements de (CNTs) en deux étapes :

- dans un premier temps, la masse appropriée de (CNTs) est introduite dans un volume d'éthanol

Et placée aux ultrasons pendant (~ 1 heure), jusqu'à l'évaporation du solvant.

- ensuite la poudre de (CNTs) est ajoutée à la base et à nouveau soumis aux ultrasons durant (1 Heure).



**Figure II.1:** L'influence de la dispersion des (CNTs) par ultrasons. (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 agrégats sont encore présents. [38].

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

### **II.6.2. Dispersion mécanique par tricylindre :**

Ce procédé est utilisé pour la dispersion des microparticules. Il s'agit d'un procédé de calandrage au cours duquel les résines chargées de NTC passent entre des rouleaux (en métal, plastique, ou céramique) animés de sens de rotation opposés (tels par exemple les rouleaux d'un laminoir). Ce sont donc des forces de cisaillement créées entre les deux rouleaux qui provoquent la dispersion des NTC. À l'instar du procédé d'extrusion, le mini-calandrage permet de générer une force de cisaillement suffisante pour disperser les NTC. C'est donc un procédé très efficace qui, si l'on réduit en plusieurs étapes l'épaisseur du film de résine liquide chargée cisailée, permet d'orienter les NTC.

La méthode de mélange en solution pour la dispersion des nanotubes de carbone (NTC) et du polymère en solution aqueuse repose sur l'emploi des ultrasons et/ou la fonctionnalisation des NTC. Elle présente l'avantage de nécessiter un faible taux de NTC, mais elle comporte l'inconvénient lié à l'utilisation et à l'élimination des solvants.

### **II.7. Procédés d'élaborations des nanocomposites :**

Les difficultés de dispersion des nanoparticules dans des milieux organiques, dues principalement à la tendance des nanoparticules à former des agrégats stabilisés par des interactions comme les liaisons ioniques, ponts hydrogène, et forces de Van der Waals. Ces interactions sont souvent plus fortes que celles entre les nanoparticules et la matrice organique. Pour améliorer la dispersion, un prétraitement des nanoparticules est nécessaire, souvent via des agents de compatibilisation ou des surfactants. Les principales techniques pour créer des nanocomposites à matrice polymère : mélange en solution, mélange dans le polymère fondu, et la polymérisation in situ avec les nanoparticules.

#### **II.7.1. Mélange en solution :**

Cette méthode est notamment utilisée pour l'élaboration d'élastomère [39]. Mais aussi pour certain type de (TP) [40]. Elle permet en effet d'abaisser la viscosité permettant ainsi disperser de manière homogène les nanotubes de carbone. La matrice polymère est tout d'abord mise en solution dans son solvant. Les nanotubes sont de leur côté dispersés dans le même solvant sous agitation par ultrasons.

Cette solution de (NTC) est ensuite ajoutée à la matrice solubilisée sous agitation. Les nanotubes peuvent de cette manière s'introduire entre les chaînes macromoléculaires du polymère.

En fin Le solvant est extrait par évaporation. L'un des principaux inconvénients de cette méthode est l'utilisation et l'élimination du solvant, sachant que ce solvant peut influencer les propriétés mécaniques du nanocomposite comme le montrent U. Khan et Al [41].

Un autre inconvénient provient de l'utilisation des ultrasons, qui bien que très efficaces pour disperser les (NTC), peuvent également détruire les chaînes macromoléculaires [42]

### **II.7.2. Mélange à l'état fondu :**

Cette méthode est la plus simple. Dans ce cas, le polymère et les nanotubes sont incorporés, dans une extrudeuse chauffée. Le cisaillement apporté par la rotation des vis est l'élément déterminant dans la qualité de la dispersion des charges. Les (NTC) peuvent ainsi circuler au sein du polymère fondu. Des nanocomposites à base de polyéthylène, polypropylène, polyamide, polycarbonate, polyéthylène téréphtalate, polylactide, polyméthacrylate de méthyle et autres polymères thermoplastiques ont été obtenus par cette méthode [42].

L'inconvénient de cette méthode est que la viscosité augmente considérablement avec le taux de (NTC) [43].

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. En effet, la synthèse d'un polymère thermodurcissable s'avère plus complexe que celle d'un thermoplastique. Le second paramètre à prendre en compte dans la fabrication de composites est la dispersion des renforts au sein de la matrice. La dispersion des renforts est certainement l'étape fondamentale du procédé de fabrication de composites

### **II.7.3. Polymérisation in situ :**

La fabrication de composites nanocomposites (NC) par un procédé de polymérisation in situ implique plusieurs étapes distinctes. Dans un premier temps, les charges sont incorporées au monomère liquide. Étant donné la faible viscosité du monomère, la dispersion des charges peut être réalisée en utilisant des ultrasons ou par agitation mécanique en régime turbulent. Une fois que les charges sont uniformément dispersées dans la matrice, la polymérisation est initiée. Une fois la polymérisation terminée, le monomère résiduel peut être extrait, par exemple par dégazage sous vide. Ce procédé présente plusieurs avantages : il ne nécessite pas l'utilisation de solvants, qui sont coûteux et difficiles à éliminer, et il permet d'obtenir une bonne dispersion des charges, notamment parce qu'elles sont introduites dans le monomère fondu.

**Tableau II.1** : Les avantages et les inconvénients des différentes méthodes d'élaboration des composites polymères/NTC.

<b>Méthode de préparation</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
Mélange en solution	L'utilisation de faible taux de NTC.	L'utilisation et l'élimination des solvants.
Mélange à l'état fondu	Facile à produire a l'échelle industrielle (simple, propre, sans solvant).	La viscosité élevée dans le système.
Polymérisatio-n in situ	Dans le cas du « grafting from », les propriétés mécaniques des composites sont améliorées.	Technique généralement longue.

## II.8. Propriétés des nanocomposites (NTC/polymère) :

### II.8.1. 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 [44]. 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) . Avec ce même taux de charge une augmentation de (214%) du module d'élasticité est observée dans une matrice polyamide .Dans une matrice polyéthylène une amélioration de (89% et 56%) respectivement du module d'Young et de la contrainte à la rupture peut être observée à (10%) de charges

### II.8.2. Propriétés thermiques des nanocomposites (NTC/polymère) :

Les principales améliorations recherchées par l'incorporation de montmorillonite à des polymères sont la stabilité thermique et la tenue au feu

### **II.8.2.1. La stabilité thermique :**

Elle 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 la stabilité thermique est fortement dépendante de l'état de dispersion de la charge au sein du polymère [45].

### **II.8.2.2. Propriétés de retard au feu :**

La réduction de l'inflammabilité est un paramètre clé dans l'application des polymères techniques et de commodités dans de nombreuses applications, plus particulièrement dans le domaine du bâtiment

L'addition de produits antifeu classiques halogénés 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, de nombreux programmes de recherche ont été initiés

Le cône calorimètre est la méthode la plus efficace pour déterminer les propriétés au feu. Les paramètres mesurés sont le taux de chaleur libérée (HRR : Heat Rate Release), la chaleur de combustion (H c), la production de monoxyde de carbone et de fumée (SEA: Specific Extinction Area). Le taux de chaleur libérée, et plus particulièrement son maximum, est le paramètre significatif de la résistance au feu [46]

## **II.9. Interface matrice-renfort dans les nanocomposites à matrice polymère :**

La liaison entre la matrice et les renforts est un phénomène physico-chimique fondamental qui est créée 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. 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 [47]. Il s'agit principalement de travailler au niveau de la cohésion entre les deux éléments constitutifs du composite. Ceci peut être réalisé grâce à une modification de surface des CNTs avant leur insertion dans la matrice.

## **II.10. Applications des nanocomposites :**

Les nanocomposites sont largement utilisés dans divers domaines pour améliorer les propriétés mécaniques et fonctionnelles des matériaux. Dans l'industrie automobile, ils sont essentiels pour la fabrication de pièces plus légères et plus résistantes, ce qui contribue à accroître l'efficacité énergétique et la performance des véhicules. Dans le domaine de l'aéronautique et de l'aérospatiale, les nanocomposites permettent la création de structures légères mais robustes, cruciales pour réduire le poids et augmenter l'efficacité énergétique des avions et des engins spatiaux. En électronique et optoélectronique, ces matériaux sont utilisés dans la fabrication de composants tels que les transistors et les diodes en raison de leurs propriétés électriques et optiques améliorées. Dans le domaine de la biotechnologie et de la médecine, les nanocomposites sont employés pour des applications telles que la livraison ciblée de médicaments, la régénération tissulaire et le diagnostic, grâce à leur capacité à interagir spécifiquement avec les cellules ou les tissus biologiques. Ils jouent également un rôle majeur dans le secteur de l'énergie, où ils sont utilisés dans la fabrication de cellules solaires, de batteries et de supercondensateurs pour améliorer l'efficacité et la capacité de stockage de l'énergie. Par ailleurs, les nanocomposites sont employés dans des applications environnementales telles que la filtration et la purification de l'eau, contribuant ainsi à l'élimination des contaminants et des polluants grâce à leurs propriétés d'absorption et de réactivité uniques. En outre, ils améliorent la résistance aux rayures, la protection contre la corrosion et les propriétés antimicrobiennes des revêtements et des peintures. Enfin, dans le domaine des sports et loisirs, les nanocomposites sont utilisés dans la fabrication d'équipements sportifs pour améliorer leur performance et leur durabilité, comme les raquettes de tennis et les clubs de golf.

## **II.11. Application des nanocomposites dans le domaine de Génie civil :**

Les nanocomposites sont devenus des éléments essentiels dans divers domaines de l'ingénierie et de la construction, offrant une gamme impressionnante d'améliorations et de possibilités. Dans le secteur du béton, par exemple, l'intégration de nanoparticules telles que les nanosilices contribue à augmenter la résistance, la durabilité et la résistance à la corrosion du matériau. De même, l'utilisation de nanomatériaux tels que les nanotubes de carbone dans la fabrication de polymères ou de métaux permet de créer des matériaux de construction légers mais remarquablement résistants, idéaux pour les structures soumises à des contraintes importantes ou à des conditions environnementales extrêmes. Par ailleurs, les nanocomposites sont largement utilisés dans les revêtements et les peintures pour renforcer la résistance aux rayures, la protection contre les UV et la résistance à la corrosion, offrant une protection supplémentaire aux structures exposées à des environnements météorologiques rigoureux ou corrosifs. En outre, l'incorporation de nanoparticules dans les matériaux isolants permet d'améliorer leurs propriétés thermiques et acoustiques, favorisant



ainsi la création de bâtiments plus écoénergétiques et confortables. De plus, certains nanocomposites sont conçus avec des capacités d'auto-réparation, comme des capsules nanométriques intégrant des agents de réparation dans le béton, permettant ainsi de combler automatiquement les fissures. En outre, les nanocomposites sont utilisés pour intégrer des capteurs dans les structures de génie civil, permettant une surveillance en temps réel de l'état des infrastructures critiques telles que les ponts et les bâtiments. Ces capteurs peuvent détecter divers facteurs comme les changements de charge, de température et d'humidité. Dans le domaine du génie environnemental, les nanocomposites jouent également un rôle crucial dans le développement de systèmes de filtration et de purification de l'eau plus efficaces, contribuant ainsi à la gestion durable des ressources en eau. Enfin, dans le domaine de la géotechnique, les nanocomposites sont utilisés pour renforcer les sols, augmentant ainsi la stabilité des fondations et des pentes. En somme, les nanocomposites offrent un potentiel considérable pour améliorer la performance, la durabilité et la sécurité des infrastructures et des matériaux de construction dans divers secteurs industriels.

## **II.12. Conclusion :**

Les nanocomposites représentent une avancée technologique majeure, marquant une ère nouvelle dans l'ingénierie des matériaux et ouvrant la voie à des applications révolutionnaires, particulièrement dans le domaine du génie civil. Leur capacité à transformer les propriétés fondamentales des matériaux traditionnels – en améliorant leur résistance, leur durabilité et leur fonctionnalité – symbolise une synergie parfaite entre la nanotechnologie et les besoins contemporains en matière de construction et de développement durable.

Cette intégration de nanomatériaux dans les structures et les systèmes de génie civil ne se limite pas à une simple amélioration des performances matérielles ; elle incarne également un engagement envers l'innovation et la durabilité environnementale. Que ce soit dans l'amélioration de la qualité des infrastructures, dans la réalisation d'économies d'énergie, ou dans la contribution à la protection de l'environnement, les nanocomposites jouent un rôle clé.

En définitive, les nanocomposites ne sont pas seulement une réalisation remarquable de l'ingénierie moderne, mais aussi un symbole de l'aspiration humaine à repousser les frontières de la science pour un avenir meilleur. Leur exploration continue promet des avancées encore plus spectaculaires, affirmant leur position comme un pilier central dans le progrès technologique et environnemental du XXI<sup>e</sup> siècle.

# *CHAPITRE III*

## **Théories des poutres et porosité**

### III.1. Introduction :

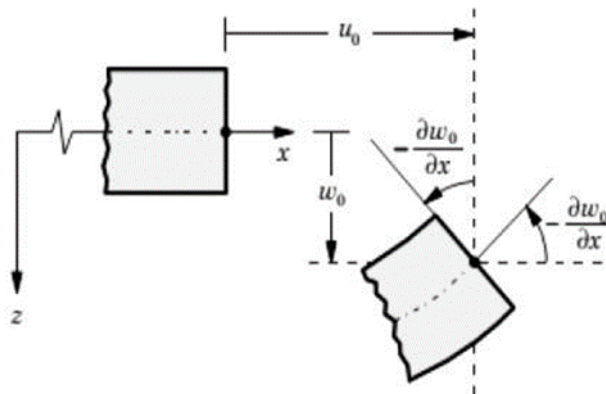
Dans ce chapitre, nous plongeons dans l'univers complexe des théories des poutres et de la porosité, explorant les modèles mathématiques qui permettent de comprendre et de prédire le comportement des structures sous diverses charges. Nous abordons des théories fondamentales telles que celle d'Euler-Bernoulli, qui simplifie l'analyse en négligeant le cisaillement, et celle de Timoshenko, qui offre une perspective plus nuancée en intégrant cet effet. En outre, nous examinons des approches d'ordre élevé qui cherchent à affiner davantage nos prédictions. La porosité des matériaux, en particulier ceux renforcés par des nanotubes de carbone, joue un rôle crucial dans la compréhension de la mécanique des poutres, et c'est cette interaction entre la structure et la matière qui est au cœur de nos investigations.

### III.2. Les différentes théories des poutres :

#### III.2.1. Théorie d'Euler Bernoulli ou bien théorie classique des poutres :

Cette théorie repose sur des modèles qui se fondent sur une distribution linéaire des déplacements à travers l'épaisseur de la poutre. L'hypothèse fondamentale de cette théorie :

- Après déformation, les déformations résultant du cisaillement transversal sont négligées après la déformation (il n'y a pas de cisaillement le long de la hauteur de la poutre).
- La section reste perpendiculaire à la ligne moyenne de la poutre, et la section plane reste plane.
- La fonction qui décrit la distribution des déplacements à travers l'épaisseur de la poutre est égale à zéro.



**Figure III.1 :** Illustration du modèle de la poutre d'Euler-Bernoulli

La fonction qui décrit la répartition de déplacement suivant l'épaisseur de la poutre est :

$$\varphi(z) = \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (III.1)$$

Pour le cas des poutres élancées et d'après la théorie classique des poutres, le déplacement d'un point M est donné par les deux composantes suivantes :

$$u(x, z) = u_0(x) - z \frac{\partial w_0(x)}{\partial x} \quad (III.2)$$

$$w(x, z) = w_0(x)$$

$u(x, z)$  C'est le déplacement suivant  $x$  et  $w(x, z)$  est le déplacement dans la direction de  $z$  ou bien la flèche.

Sous ces considérations, les sections droites de la poutre ne subissent aucun glissement, en effet, Qui en résulte une contrainte nulle de cisaillement :

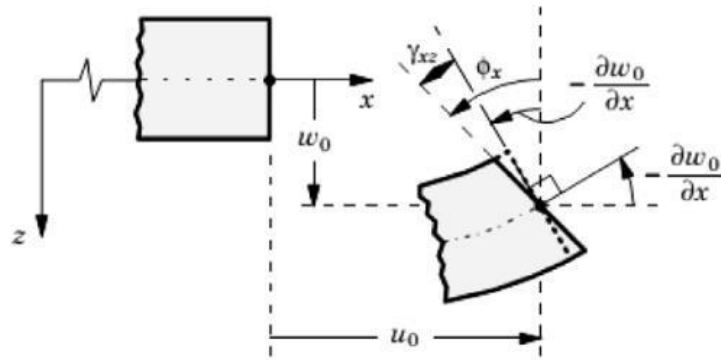
$$G_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{\partial w_0}{\partial x} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (III.3)$$

$$\tau_{xz} = G_{xz} = 0$$

$u_0(x)$  et  $w_0(x)$  sont les composantes de déplacement au milieu de la section et sur la ligne moyenne de la poutre, respectivement le long des axes  $x$  et  $z$ . Lorsque cette théorie est utilisée pour l'analyse des fréquences naturelles des poutres, les flèches sont sous-estimées. Ceci est la conséquence de négliger la déformation transversale

### III.2.2. La théorie de déformation en cisaillement du premier ordre FSDT (Timoshenko Beam Theory) :

La FSDT ou la théorie de Timoshenko est la version raffinée de la théorie des poutres d'Euler-Bernoulli, Contrairement à la théorie précédente, ce modèle prend en compte les déformations de cisaillement transversales, et la section plane reste plane mais elle perd sa perpendicularité par rapport à la ligne moyenne de la poutre,



**Figure III.2 :** Illustration du modèle de poutre FSDT (Théorie de Timoshenko)

Les expressions pour les déplacements d'une poutre chargée transversalement données par TBT sont les suivantes :

$$u(x, z) = u_0(x) - z \frac{\partial w_0(x)}{\partial x} + z \phi_x \quad (\text{III.4})$$

$$w(x, z) = w_0(x)$$

$$\phi(x) = \gamma_{xz}^0(x) - \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (\text{III.5})$$

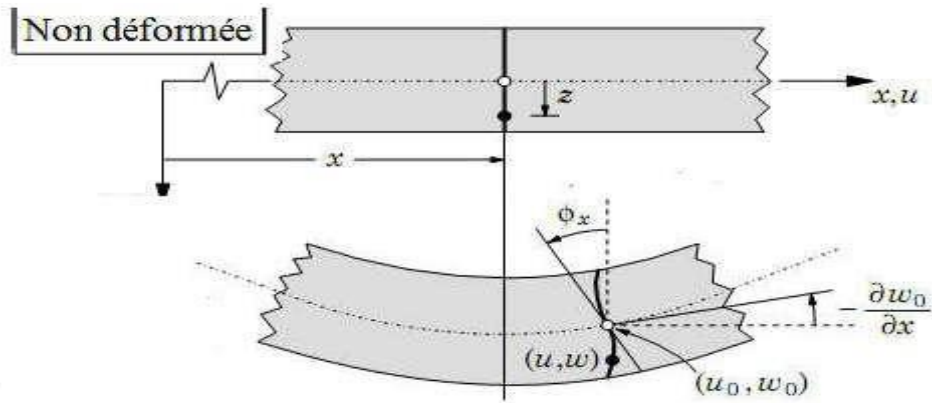
$\phi(x)$  est la rotation autour de l'axe y,  $\gamma_{xz}^0(x)$  est la distorsion mesurée sur la ligne moyenne de la poutre

Dans ce modèle, la déformation de cisaillement transversale est constante dans l'épaisseur, ce qui

Nécessite à introduire des coefficients de correction k qui dépend de la forme de la géométrie.

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

Dans cette théorie la distribution des champs de déplacement est non linéaire selon l'épaisseur de la poutre. Elle est plus précise que la théorie du premier ordre puisqu'elle introduit une fonction qui tient compte du phénomène de *gauchissement*. Ce phénomène apparaît lorsque la section transversale de la poutre perd sa planéité. La fonction  $\Phi(z)$  représente le gauchissement et sa dérivée  $\Phi'(z)$  le cisaillement



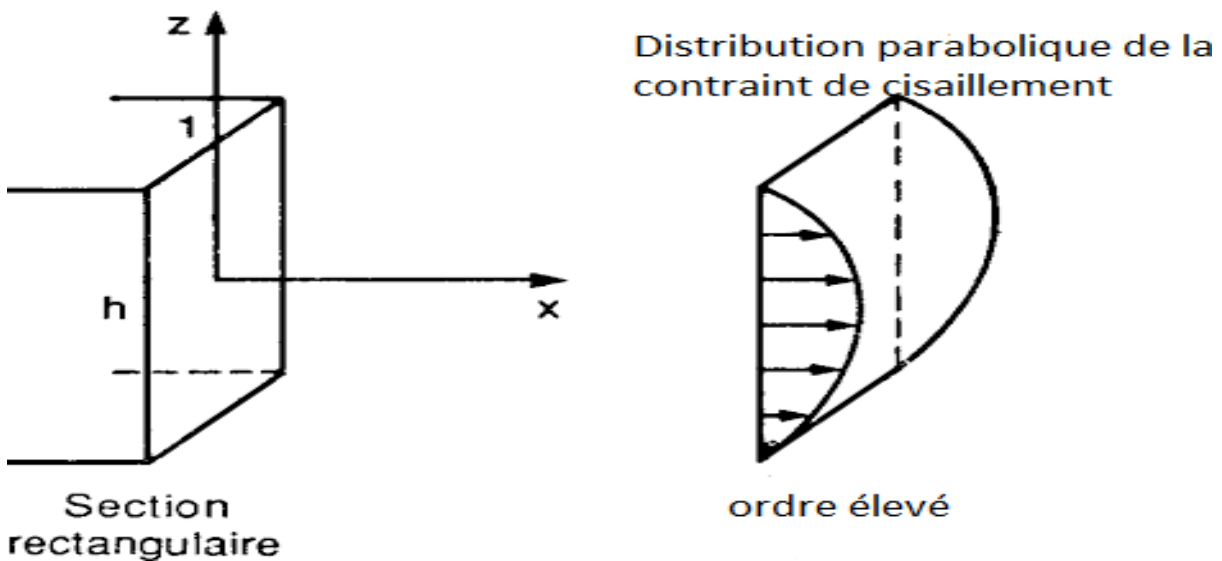
**Figure III.3 :** Cinématique de la Théorie d'Ordre Elevé.

Dans ce cas, le champ de déplacement devient :

$$u(x, y) = u_0(x) - z \frac{\partial w_0(x)}{\partial x} + f(z)\phi_x \tag{III.6}$$

$$w(x, z) = w_0 \tag{III.7}$$

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



**Figure III.4 :** La distribution (parabolique) des contraintes de cisaillement.

### III.3. la porosité :

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 :

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} = \frac{V_p}{V_s + V_p} \quad (III.8)$$

Où  $V_s$  est le volume du solide.  $\phi$  varie entre **0** (solide plein) et **1** (volume quasiment vide comme les aérogels) (ou en pourcentage %).

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

$$P=1-C.$$

(C) est appelé 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 indices des vides.

#### III.3.1. Perméabilité :

La perméabilité a été définie par Darcy dans le cas spécifique de l'eau, et a été généralisée avec l'introduction du concept de la viscosité. Pour un écoulement non turbulent, la loi de Darcy dans le cas du matériau poreux anisotrope prend la forme :

$$W = -\frac{\bar{k}}{\eta} \nabla p_f \quad (III.9)$$

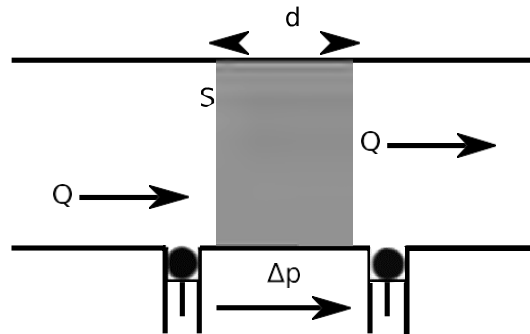
où  $W$  est la vitesse de filtration ou une quantité de fluide traversant une unité de surface

du matériau à l'extérieur tel que  $W = \phi(U' - u')$ , avec  $U$  et  $u'$  représentent respectivement, les Vitesses macroscopiques du fluide et du solide,  $\bar{k}$  est la matrice de la perméabilité visqueuse du matériau poreux, égale à  $k_0$  dans le cas isotrope,  $\eta$  est la viscosité dynamique du fluide saturant, et  $p_f$  est la pression du fluide.

La perméabilité visqueuse est calculée directement à partir de la mesure de la chute de pression lorsque le fluide circule à travers l'échantillon poreux à une vitesse donnée. Dans le cas unidimensionnel isotopique (**Figure III. 5**) la loi de Darcy s'écrit :

$$Q = \frac{k_0 \nabla p_f}{\eta d} \quad (\text{III.10})$$

où  $Q = S \|W\|$  est le débit volumique traversant un échantillon d'épaisseur  $d$  et de section  $S$ , avec une baisse de pression  $\Delta p_f$  entre les bords. L'analogie avec la résistance électrique est



**Figure III.5 :** Configuration de mesure de la perméabilité visqueuse  $k_0$  ou la résistivité au passage de l'air  $R_f = \eta/k$

Évidente si nous comparons le débit du fluide volumique à l'intensité du courant, et la diminution de la pression  $\Delta p_f$  à la différence de potentiel électrique. Par conséquent, les acousticiens et les ingénieurs préfèrent utiliser la résistivité du flux ou la résistivité de l'écoulement, définie comme :

$$R_f = \eta/k_0$$

Cette résistivité illustre la réduction de l'écoulement à travers l'échantillon induit principalement par une géométrie complexe et grande surface de contact entre le squelette et le fluide.

### III.3.2. Tortuosité :

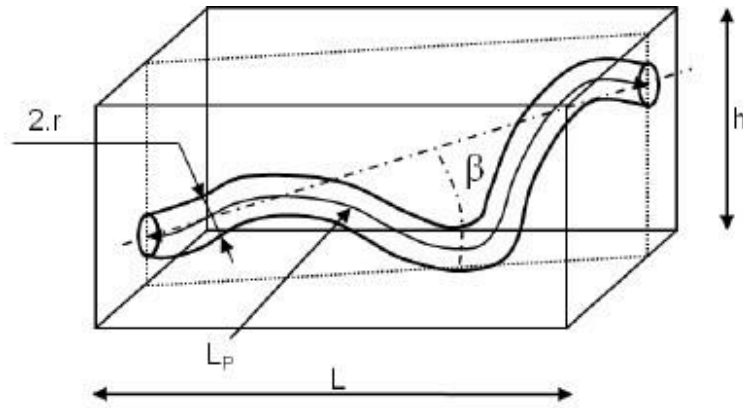
Cette notion permet de rendre compte de la complexité du chemin parcouru par le fluide dans le milieu poreux. Comme son nom l'indique, la tortuosité  $T$  traduit le caractère sinueux du chemin qu'emprunte une particule fluide pour traverser le milieu poreux. Elle est définie par le ratio entre la longueur réellement parcourue  $L_p$  à travers l'échantillon et la longueur  $L$  de cet échantillon (Figure III.6).

$$T = \frac{L_p}{L} \quad (\text{III.11})$$



On trouve également dans la littérature la définition

$$T = (L_p/L)^2 \quad (\text{III.12})$$



**Figure III.6:** Définition des paramètres géométriques de la tortuosité et de l'orientation d'un pore [48]

Dans le cas où les canaux sont rectilignes, nous avons  $T = 1$ . Pour des canaux quelconques,  $T > 1$ . Pour des matériaux faiblement poreux, la valeur de la tortuosité peut être très supérieure à l'unité: pour les mousses métalliques ou céramiques, des valeurs légèrement supérieures à 1, ont été mesurées [49]

### III.3.3. Surface spécifique :

La surface spécifique d'un milieu poreux est le rapport de la surface totale des grains soit à l'unité de volume de l'échantillon (surface volumique), soit à l'unité de masse (surface massique) du solide. Elle s'exprime respectivement en  $L^2/L^3$  ou en  $L^2/M$ . C'est un des principaux facteurs des actions physicochimiques d'interface (pore/matrice) fluide/grain (phénomènes d'adsorption). La surface spécifique croît fortement lorsque le diamètre des grains diminue. Cette surface de contact est le lieu des échanges thermique, chimique, électronique, de l'adsorption, du mouillage, etc., entre le fluide et la matrice, d'où l'intérêt de la maximiser dans un volume restreint. Plus la micro structure est petite, plus La surface spécifique est grande.

### III.4. La caractérisation de la porosité :

La variété des méthodes d'évaluation de la porosité est liée à la diversité des matériaux poreux et aux objectifs de chaque approche. Ainsi, dans l'étude d'un adsorbant ou d'un matériau utilisé dans la catalyse, une mesure de la surface spécifique, par exemple, peut être privilégiée. Par contre,

si l'objectif concerne le contrôle de la taille des pores, les méthodes de détermination de la distribution de taille seront une préférence [50].

Les méthodes de caractérisation de la porosité sont très souvent liées à une classification des matériaux poreux suivant des critères donnés.

Les matériaux poreux peuvent être classés suivant le type de porosité dominante (fermée ou ouverte), l'origine de la porosité (inter ou intra particule), la résistance mécanique (rigide ou fragile) ou la taille des pores [51]. Voici quelques exemples permettant d'illustrer la variété des techniques employées

#### III.4.1. Porosimétrie par Intrusion d'Eau :

La porosimétrie à l'eau est une technique reposant sur l'exploitation de pesées d'un échantillon de matériau poreux à différents états hydriques. Cette technique simple permet notamment de mesurer la porosité totale accessible à l'eau, le volume apparent d'un échantillon et la saturation en eau. Grâce à la taille des molécules d'eau, la porosimétrie à l'eau permet d'investir des pores jusqu'à **0,5 nm** de diamètre (taille de deux molécules d'eau) [52]

#### III.4.2. Porosimétrie par intrusion de mercure :

La Porosimétrie par Intrusion de Mercure (**PIM**) permet d'obtenir rapidement sur les caractéristiques géométriques d'un réseau poreux pour des diamètres de pores compris entre **3nm et 800µm**. Les caractéristiques déterminées sont notamment : le volume des pores accessibles au mercure, la surface spécifique, le volume introduit en fonction de la taille des cols d'accès aux pores, et la répartition en taille des cols d'accès aux pores [53],[54].

Grâce à son caractère non-mouillant, le mercure ne peut pas entrer de lui-même dans les pores d'un matériau : il faut exercer une pression afin qu'il puisse y pénétrer. Si le pore est supposé cylindrique, la relation entre pression exercée et rayon du pore considéré est donnée par l'équation de Washburn [55]

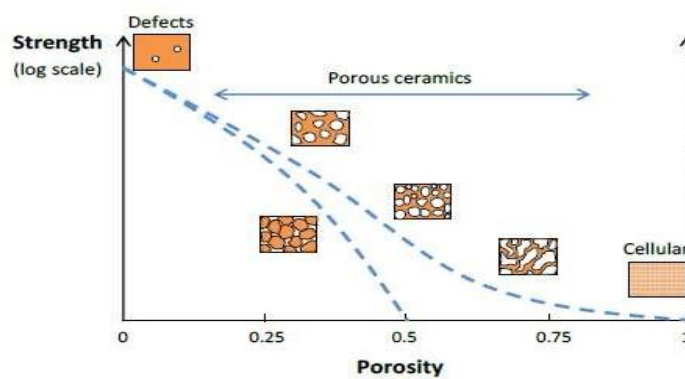
$$P_{Hg} = \frac{2\gamma_{Hg}\cos\theta}{r_p} \quad (III.13)$$

Avec  $P_{Hg}$ , la pression exercée sur le mercure [Pa],  $\gamma_{Hg}$ , la tension superficielle du mercure [ $N.m^{-1}$ ],  $\theta$  l'angle de contact entre le mercure et la surface du pore, et  $r_p$ , le rayon du pore considéré [m].

Connaissant le volume de mercure injecté en fonction de la pression exercée lors de la mesure PIM, il est possible de déterminer le volume cumulé de mercure introduit en fonction de la taille du col d'accès aux pores ( $r_p$ ), répartition en taille de pores.

### III.5. 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 (Figure III.7) [56]



**Figure III. 7:** Représentation schématique de l'influence de la porosité sur les propriétés mécaniques de matériau poreux. Les deux courbes pointillées décrivent l'évolution des propriétés de deux microstructures différentes [57] et [56].

La majorité des études disponibles dans la littérature portent sur l'effet du taux de porosité, qui reste le principal facteur d'influence [58] , 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 [59] .

#### III.5.1. 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 c'est focaliser sur l'effet de la porosité sur le module d'élasticité longitudinale (**le module de Young/porosité**). Les expressions (relations empiriques) suivantes sont celles utilisées le plus souvent pour décrire ce comportement :

$$E = E_0(1 - bP) \text{ [60]} \quad \text{ou} \quad \text{(III.14)}$$

- E : est le module de Young à la porosité P,
- E<sub>0</sub> : le module de Young à porosité nulle
- b : Paramètre dépend de la nature et de la géométrie du matériau

Ce modèle linéaire (III.14) repris dans la théorie de l'élasticité d'Einstein [61], qui l'utilisait pour décrire le comportement élastique d'un fluide avec une suspension de sphères dures.

$$E = E_0(e^{-bP}) \quad \text{(III.15)}$$

Cette relation exponentielle (III.15) a été utilisée pour la première fois par SPRIGGS [62] pour analyser l'effet de la porosité sur le module élastique de la matière réfractaire poly cristalline, oxyde d'aluminium

$$E = E_0(1 - P)/(1 + bP) \quad \text{(III.16)}$$

Ce modèle non linéaire (III.16) à été proposé par Hasselman[63] est directement basé sur les expressions obtenues par Hashin [64] pour les modules de matériaux avec suspensions diluées de pores sphériques.

$$E = E_0(1 - bP^{2/3}) \quad \text{(III.17)}$$

Cette relation (III.17) à puissance (2/3) a été dérivée par Martin et Haynes [65] 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) [66] au modèle. Pour cette raison, le modèle exponentiel de Knudsen et Spriggs équation (10) 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 [67]

$$E = E_0 \left(1 - \frac{P}{P_c}\right)^{f_E} \quad (\text{III.18})$$

Où  $P_c$  est la porosité critique (seuil de percolation) à laquelle le module de Young effectif devient égal à zéro et  $f_E$  est le paramètre dépendant de la morphologie du grain et de la géométrie des pores du matériau poreux [68] Comme l'ont noté *Wang et al.* [70], les ajustements des données expérimentales à cette équation donnent souvent  $P_c = 1$  [69, 71] et n'expliquent pas les données avec précision. Dans des travaux expérimentaux récents, soit  $P_c = 1$  est utilisé de préférence [72–73], soit un modèle linéaire ( $f_E = 1$ ) [74] est utilisé, où  $P_c$  est considéré comme une porosité initiale de la poudre, car les matériaux poreux sont de préférence préparés à partir de poudres dont la taille et la forme des particules peuvent varier de manière significative. Pendant la consolidation de la poudre, différentes porosités peuvent être obtenues en faisant varier les paramètres technologiques tels que la température, la pression externe ou le temps.

### III.6. Conclusion :

Ce chapitre a mis en lumière la richesse et la diversité des théories des poutres, en soulignant l'importance de choisir le modèle approprié en fonction des caractéristiques spécifiques de la poutre et de la charge appliquée. De la théorie classique d'Euler-Bernoulli à la théorie de déformation en cisaillement de Timoshenko, jusqu'aux modèles d'ordre élevé, chaque approche offre des outils précieux pour l'ingénieur. La prise en compte de la porosité et de l'utilisation de matériaux composites avancés ouvre de nouvelles perspectives pour la conception de structures plus légères, plus résistantes et plus efficaces, marquant ainsi un pas de plus vers l'innovation dans le domaine de l'ingénierie des structures.

# ***CHAPITRE IV***

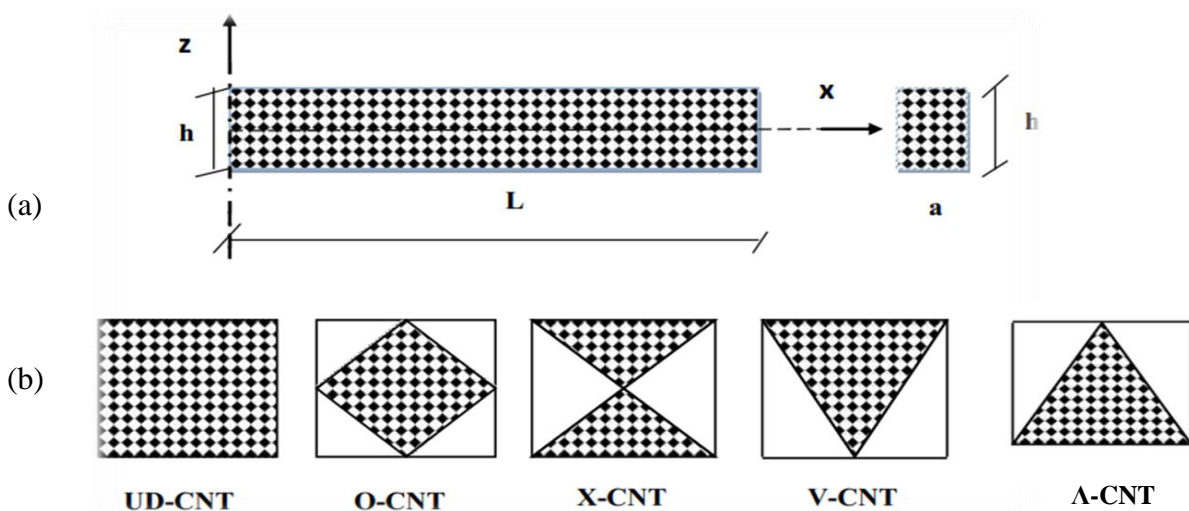
**L'effet de la porosité sur le  
comportement mécanique des  
poutres « Etude statique »**

### IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre dédié à l'étude statique, nous nous intéressons à l'impact de la porosité sur le comportement mécanique des poutres. La porosité, caractérisée par la présence de vides au sein d'un matériau, peut influencer significativement les propriétés mécaniques telles que la rigidité, la résistance et la durabilité des structures. À travers une analyse rigoureuse, nous cherchons à comprendre comment la distribution de la porosité affecte des contraintes et déformations dans les poutres, et comment ces effets peuvent être modélisés pour assurer l'intégrité et la sécurité des constructions.

### IV.2. Les propriétés matérielles des poutres composites renforcées par des nanotubes de carbone :

Les poutres CNTRC étudiées dans ce présent travail sont faites à partir d'un mélange de matrice polymère isotrope et des SWCNTs. La figure (IV.1a) montre une poutre CNTRC ayant une longueur ( $L$ ) et une épaisseur ( $h$ ). Quatre modèles différents de la distribution des renforts à travers l'épaisseur sont pris en considération dans cette étude comme indiqué dans la Figure (IV.1b).



**Figure IV. 1 :** (a) Géométrie de la poutre CNTRC. (b) 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 [76].

$$E_{11} = \eta_1 V_{cnt} E_{11}^{cnt} + V_p E^p \quad (IV.1a)$$

$$E_{22} = \eta_2 \frac{E_{22}^{cnt} E^p}{V_p E_{22}^{cnt} + V_{cnt} E^p} \quad (IV.1b)$$

$$G_{12} = \eta_3 \frac{G_{12}^{cnt} G^p}{V_{cnt} G^p + V_p G_{12}^{cnt}} \quad (IV.1c)$$

$E_{11}^{cnt}$ ;  $E_{22}^{cnt}$ ;  $E^p$  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 ( $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ,  $\eta_3$ ) afin de tenir compte du matériau dépendant de l'échelle les propriétés sont données par [77].

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

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

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

La masse volumique ( $\rho$ ) et le coefficient de poisson ( $\nu$ ) des poutres s'écrivent:

$$\rho = V_{cnt} \rho^{cnt} + V_p \rho^p \quad (IV.2a)$$

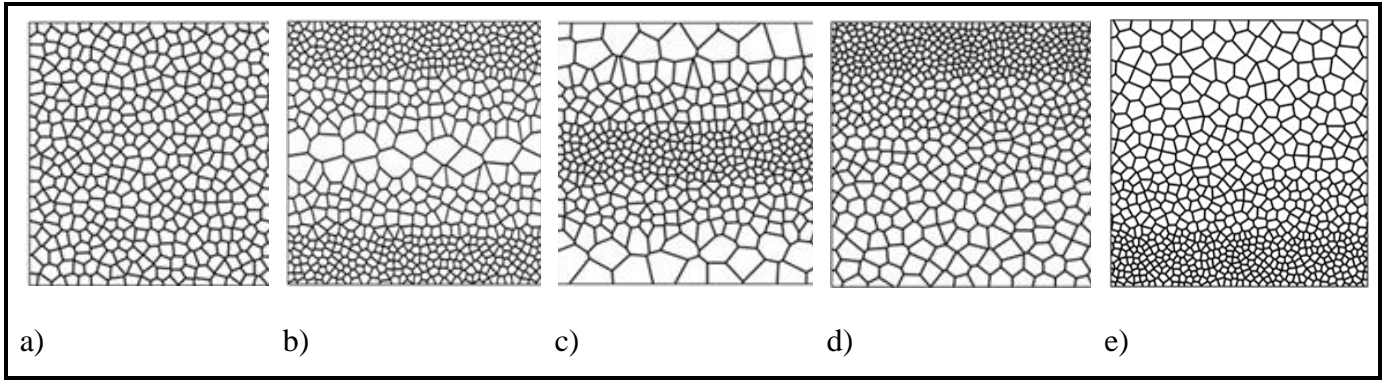
$$\nu_{12} = V_{cnt} \nu_{12}^{cnt} + V_p \nu^p \quad (IV.2b)$$

$$V_{cnt} + V_p = 1 \quad (IV.2c)$$

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

Le module de Young de la matrice polymère, sous porosité, qui peut être fonction du changement de porosité, est défini par [75].





**Figure IV.2:** Les différentes distributions de porosité : a) Uniforme, b) Symétrique1, c) Symétrique2, d) Asymétrique1, e) Asymétrique2.

**Uniforme :**

$$E^p = E_0^p \left( 1 - (1 - \sqrt{1 - P})(2/\pi) \right)^2 \quad (IV.3a)$$

$$\rho^p = \rho_0^p \left( 1 - (1 - \sqrt{1 - P})(2/\pi) \right) \quad (IV.3b)$$

**Symétrique 01 :**

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

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

**Symétrique 02 :**

$$E^p = E_0^p \left( 1 - P_0 \cos \left( \left| \frac{\pi z}{h} \right| - \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (IV.5a)$$

$$\rho^p = \rho_0^p (1 - P_m \cos(|(\pi z/h)| - \pi/2)) \quad (IV.5b)$$

**Asymétrique 01 :**

$$E^p = E_0^p (1 - P_0 \cos(\pi z/(2h) + \pi/4)) \quad (IV.6a)$$

$$\rho^p = \rho_0^p (1 - P_m \cos(\pi z/(2h) + \pi/4)) \quad (IV.6b)$$

**Asymétrique 02 :**

$$E^p = E_0^p (1 - P_0 \cos(\pi z/(2h) - \pi/4)) \quad (IV.7a)$$

$$\rho^p = \rho_0^p (1 - P_m \cos(\pi z / (2h) - \pi/4)) \quad (IV.7b)$$

$E^p, \rho^p$  est le module de Young et la masse volumique effectifs de la matrice poreuse avec Porosité P,  $E_0^p, \rho_0^p$  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 [77]

$$V_{cnt} \begin{cases} V_{cnt}^* & \text{UD-CNT} \\ 2 \left( 1 - 2 \frac{|z|}{h} \right) V_{cnt}^* & \text{O-CNT} \\ 4 \frac{|z|}{h} V_{cnt}^* & \text{X-CNT} \\ 2 \left( \frac{1}{2} + \frac{z}{h} \right) V_{cnt}^* & \text{V-CNT} \\ 2 \left( \frac{1}{2} - \frac{z}{h} \right) V_{cnt}^* & \text{\Lambda-CNT} \end{cases} \quad (IV.8)$$

$V_{cnt}^*$  : La fraction volumique des CNT. elle est déterminée à partir de la relation suivante :

$$V_{cnt}^* = \frac{W_{cnt}}{W_{cnt} + (\rho^{cnt} / \rho^p)(1 - W_{cnt})} \quad (IV.9)$$

Voici  $W_{cnt}$  : la fraction massique des nanotubes de carbone

A partir les équations (IV.8), on peut constater que les poutres du type O-CNT, X-CNT et V-CNT sont des poutres fonctionnellement graduées ou leurs propriétés matérielles varient d'une façon continue à travers leurs épaisseurs, alors que la poutre UD-CNT possède une distribution uniforme des renforts CNT.

#### IV.2.1. Équations de mouvement :

"Basé sur la base de la théorie de cisaillement du troisième ordre, le champ de déplacement d'une théorie de poutre trigonométrique affinée est utilisé dans le présent travail. Le déplacement transversal de n'importe quel point de la poutre est donné comme suit [78] :

$$\begin{cases} u(x, z, t) = u_0 - z \frac{\partial w_b}{\partial x} - f(z) \frac{\partial w_s}{\partial x} \\ w(x, z, t) = w_b(x, t) + w_s(x, t) \end{cases} \quad (IV.10)$$

Où  $u_0$  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 [79] :

$$f(z) = z - \frac{5}{4}z\left(1 - \frac{4z^2}{3h^2}\right) \quad (IV.11)$$

La relation linéaire entre la déformation et le déplacement dans les plans et les déformations transversales peut être exprimée comme suit :

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_b}{\partial x^2} - f(z) \frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2} \\ \gamma_{xz} = g(z) \frac{\partial w_s}{\partial x} \end{cases} \quad (IV.12a)$$

Où :

$$g(z) = 1 - \frac{df(z)}{dz} \quad (IV.12b)$$

La contrainte normale  $\sigma_x$  et la contrainte de cisaillement  $\gamma_{xz}$  sont données par la loi constitutive élastique linéaire comme suit :

$$\begin{cases} \sigma_x = Q_{11}(z) \varepsilon_x \\ \tau_{xz} = Q_{55}(z) \gamma_{xz} \end{cases} \quad (IV.13a)$$

Où

$$\begin{cases} Q_{11}(z) = \frac{E_{11}(z)}{1 - \nu^2} \\ Q_{55}(z) = G_{12}(z) \end{cases} \quad (IV.13b)$$

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

$$\delta U + \delta V = 0 \quad (IV.14)$$

Où  $\delta$  représente le symbole virtuel de variation.  $U$ ,  $V$  sont l'énergie de déformation, l'énergie potentielle de la poutre.

L'énergie de déformation virtuelle de la poutre se manifeste comme suit

$$\delta U = \int_0^L \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (\sigma_x \delta \varepsilon_x + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz}) dz dx \quad (IV.15)$$

$$= \int_0^L (N \frac{d\delta u_0}{dx} - M_b \frac{d^2 \delta w_b}{dx^2} - M_s \frac{d^2 \delta w_s}{dx^2} + Q \frac{d\delta w_s}{dx}) dx$$

Les résultats de contrainte  $N$ ,  $M_b$ ,  $M_s$ ,  $Q$  sont définis comme suit :

$$(N, M_b, M_s) = \int_0^L (1, z, f) \sigma_x \quad \text{et} \quad Q = \int_{-h/2}^{h/2} g \tau_{xz} dz \quad (IV.16)$$

Le travail virtuel effectué ( $\delta V$ ) par la charge transversale ( $q$ ) peuvent être exprimés comme suit :

$$\delta V = - \int_0^L [q (\delta w_b + \delta w_s)] dx \quad (IV.17)$$

En substituant les expressions de  $\delta U$ ,  $\delta V$  provenant des équations (IV.15), (IV.17) dans l'équation (IV.14), et en intégrant par parties par rapport aux variables spatiales et temporelles, puis en collectant les coefficients de  $\delta u_0$ ,  $\delta w_b$  et  $\delta w_s$ , les équations de mouvement suivantes de la poutre CNTRC sont obtenues.

$$\begin{cases} \delta u_0: \frac{dN}{dx} = 0 \\ \delta w_b: \frac{d^2 M_b}{dx^2} + q = 0 \\ \delta w_s: \frac{d^2 M_s}{dx^2} + \frac{dQ}{dx} + q = 0 \end{cases} \quad (IV.18)$$

À partir des relations ci-dessus, tous les résultats de contrainte peuvent être écrits sous forme de composantes de rigidité du matériau et de déplacements comme suit :

$$\begin{cases} N = A_{11} \frac{du_0}{dx} - B_{11} \frac{d^2w_b}{dx^2} - B_{11}^S \frac{d^2w_s}{dx^2} \\ M_b = B_{11} \frac{du_0}{dx} - D_{11} \frac{d^2w_b}{dx^2} - D_{11}^S \frac{d^2w_s}{dx^2} \\ M_s = B_{11}^S \frac{du_0}{dx} - D_{11}^S \frac{d^2w_b}{dx^2} - H_{11}^S \frac{d^2w_s}{dx^2} \\ Q = A_{55}^S \frac{dw_s}{dx} \end{cases} \quad (IV.19)$$

La rigidité de la poutre peut être définie par

$$\begin{cases} (A_{11}, B_{11}, D_{11}) = \int_{-h/2}^{h/2} (1, z, z^2) dz \\ (B_{11}^S, D_{11}^S, H_{11}^S) = \int_{-h/2}^{h/2} (f(z), zf(z), f^2(z)) dz \\ A_{55}^S = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{55}[g(z)] dz \end{cases} \quad (IV.20)$$

En substituant l'expression de l'équation (IV.19) des résultats de contrainte dans l'équation (IV.18), on obtient.

$$\begin{cases} A_{11} \frac{d^2u_0}{dx^2} - B_{11} \frac{d^3w_b}{dx^3} - B_{11}^S \frac{d^3w_s}{dx^3} = 0 \\ B_{11} \frac{d^3u_0}{dx^3} - D_{11} \frac{d^4w_b}{dx^4} - D_{11}^S \frac{d^4w_s}{dx^4} + q = 0 \\ B_{11}^S \frac{d^3u_0}{dx^3} - D_{11}^S \frac{d^4w_b}{dx^4} - D_{11}^S \frac{d^4w_s}{dx^4} + \frac{d^2w_s}{dx^2} + q = 0 \end{cases} \quad (IV.21)$$

### IV.3. Solution analytique :

Pour la solution numérique, la méthode de solution de Navier pour une poutre FG-CNT sous différentes distributions est adoptée. Ainsi, les expansions suivantes des déplacements ( $u_0$ ,  $w_b$ ,  $w_s$ ) sont supposées :

$$\begin{Bmatrix} u_0 \\ w_b \\ w_s \end{Bmatrix} = \sum_{m=1}^{\infty} \begin{Bmatrix} U_m \cos(\lambda x) e^{i\omega t} \\ W_{bm} \sin(\lambda x) e^{i\omega t} \\ W_{sm} \sin(\lambda x) e^{i\omega t} \end{Bmatrix} \quad (IV.22)$$

Où  $U_m$ ,  $W_{bm}$ , et  $W_{sm}$  sont des paramètres arbitraires à déterminer,  $\omega$  est la fréquence propre associée au  $m$ -ème mode propre, et  $\lambda = m\pi/L$ . La charge transversale ( $q$ ) est également développée en série de Fourier comme suit :

Les coefficients  $Q_m$  sont donnés ci-dessous pour quelques charges typiques.

$$\left\{ \begin{array}{l} q(x) = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \sin(\lambda x) \\ Q_m = \frac{2}{L} \int_0^L q(x) \sin(\lambda x) dx \end{array} \right. \quad \text{Amplitude de charge} \quad (IV.23)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_m = q_0, m = 1 \text{ pour une charge sinusoïdale} \\ Q_m = \frac{4q_0}{m\pi}, m = 1,3,5 \text{ pour charge uniforme} \end{array} \right. \quad (IV.24)$$

En substituant les expansions de  $u_0$ ,  $w_b$ ,  $w_s$  et  $q$  provenant des équations (IV.22) et (IV.23) dans les équations du mouvement (IV.21), les solutions analytiques peuvent être déterminées à partir des équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_m \\ W_{bm} \\ W_{sm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Q_m \\ Q_m \end{bmatrix} \quad (IV.25)$$

Ou :

$$S_{11} = A_{11} \lambda^2 ; S_{12} = -B_{11} \lambda^3 ; S_{13} = -B_{11}^S \lambda^3 ; S_{22} = D_{11} \lambda^4 ; S_{23} = D_{11}^S \lambda^4 ; S_{33} = H_{11}^S \lambda^4 + A_{55}^S \lambda^2 ;$$

#### IV.4. Résultats et discussions :

Les résultats numériques du comportement en flexion, des poutres CNTRC sont présentées et discutés. Les caractéristiques matérielles effectives des poutres CNTRC à la température ambiante employée tout au long de ce travail sont données comme suit : Poly méthacrylate de méthyle (PMMA) est utilisé comme matrice et ses propriétés matérielles sont les suivantes:

$\nu^p = 0.3$  ;  $\rho_0^p = 1190 \text{ kg/m}^3$  et  $E^p = 2.5 \text{ GPa}$  . Pour le matériau de renforcement SWCNTs armchair (10, 10) est choisi avec les propriétés suivantes [77] :

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

Les formules adimensionnelles suivantes sont utilisées :

- Pour l'analyse de la flexion :  $\bar{w} = 100 \frac{E_p h^3}{q_0 L^4} w$ ,  $\bar{\sigma}_x = \frac{h}{q_0 L} \sigma_x \left( \frac{L}{2}, \frac{h}{2} \right)$ ,  $\bar{\tau}_{xz} = \frac{h}{q_0 L} \tau_{xz} (0,0)$

**IV.4.1. Comparaison des résultats :**

**Tableau IV.1 :** Déplacements et contraintes adimensionnels de la poutre UD-CNT sous des charges uniformes et sinusoïdales

$V_{cnt}$	$L/h$	theory	Uniforme			Sinusoïdale		
			$W$	$\sigma$	$\tau$	$W$	$\sigma$	$\tau$
0.12	10	Wattanasakulpong,Ungbhakorn [76]	0.704	8.399	0.701	0.562	6.970	0.472
		Tegrara [78]	0.703	8.458	0.718	0.560	7.025	0.486
		Présent	0.704	8.400	0.701	0.562	6.970	0.473
	15	Wattanasakulpong , Ungbhakorn [76]	0.524	11.849	0.716	0.416	9.716	0.475
		Tegrara [78]	0.524	11.888	0.736	0.416	9.754	0.490
		Présent	0.524	11.850	0.717	0.416	9.716	0.475
	20	Wattanasakulpong Ungbhakorn [76]	0.461	15.448	0.725	0.365	12.608	0.476
		Tegrara [78]	0.460	15.479	0.746	0.365	12.636	0.491
		Présent	0.461	15.450	0.725	0.365	12.608	0.476
0.28	10	Wattanasakulpong,Ungbhakorn [76]	0.325	8.562	0.697	0.260	7.130	0.472
		Tegrara [78]	0.324	8.631	0.713	0.259	7.194	0.485
		Présent	0.325	8.564	0.697	0.260	7.130	0.472
	15	Wattanasakulpon , Ungbhakorn [76]	0.235	11.959	0.714	0.187	9.824	0.475
		Tegrara [78 ]	0.234	12.004	0.733	0.186	9.868	0.489
		Présent	0.235	11.959	0.714	0.187	9.824	0.475
	20	Wattanasakulpong Ungbhakorn [76]	0.203	15.530	0.723	0.161	12.689	0.476
		Tegrara [78]	0.203	15.566	0.743	0.161	12.722	0.491
		Présent	0.203	15.532	0.723	0.161	12.689	0.476

Ce tableau présente les résultats numériques du comportement en flexion de poutres CNTRC soumises à des charges sinusoïdales et uniformes. On constate que les résultats trouvés sont proches de ceux obtenus par [Wattanasakulpong , Ungbhakorn [76] et Tegrara [78] en utilisant la théorie des poutres de déformation par cisaillement de ordre élevé (HSDT). On constate à travers les résultats que la charge uniforme conduit à des flèches importantes contrairement à la charge sinusoïdale.

**Tableau IV.2 :** valeurs des flèches de la poutre de type ( UD-CNT) sous différents type de distributions de porosité et des charge uniforme et sinusoïdales ( $V_{cnt}=0.12$  ;  $L/h = 10$ )

Porosité	Uniform			Sinusoïdale		
	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3
Uniforme	0.726	0.753	0.784	0.580	0.601	0.626
Symétrique 01	0.733	0.768	0.811	0.585	0.614	0.648
Symétrique 02	0.719	0.736	0.755	0.574	0.588	0.603
Asymétrique 01	0.727	0.755	0.790	0.581	0.603	0.628
Asymétrique 02	0.727	0.755	0.787	0.581	0.603	0.628

Le tableau montre comment la flèche varie en fonction du type de chargement et de la distribution de porosité. On peut observer que la flèche augmente avec l'augmentation du paramètre de la porosité. On constate que l'augmentation de la porosité rend la poutre moins rigide.

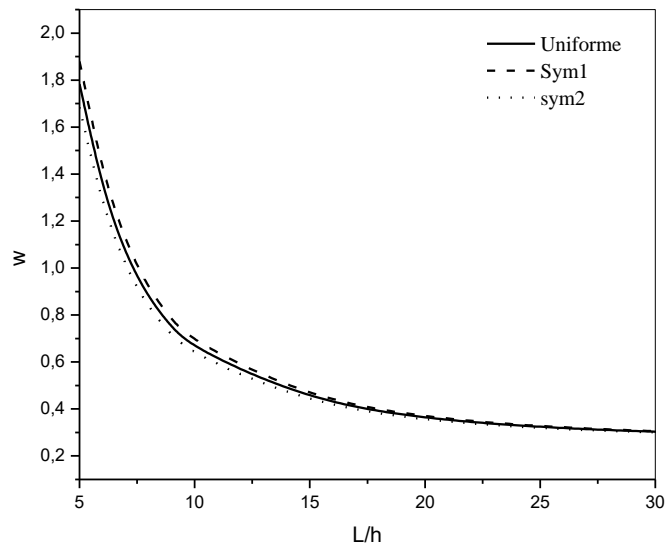
La flèche est plus élevée sous une charge uniforme que sous une charge sinusoïdale. Pour l'effet de la distribution de la porosité, les résultats indiquent de la distribution (symétrique 02) donne la plus petite valeur par rapport aux autres distributions. On remarque aussi Les deux distributions de porosité (Asymétrique 01 et 02) ont les mêmes valeurs de la flèche.



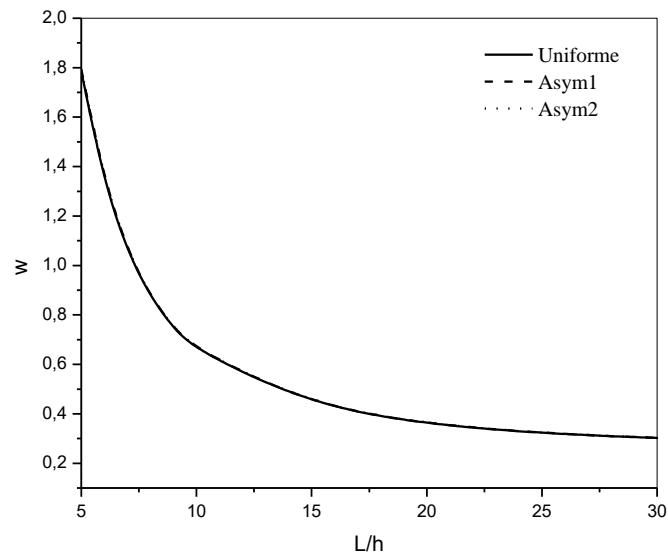
**Tableau IV.3** : valeurs de la flèche de poutre CNTRC avec et sans renforcement sous différents types de distribution de porosité et des charge ( $V_{cnt}=0.12$  ;  $L/h = 10$  ;  $P = 0.3$ )

Uniform						
	UD-CNT	X-CNT	O-CNT	V-CNT	$\Lambda$ -CNT	Non renforcé
Uniform	0.784	0.655	1.193	0.962	0.962	18.171
Symétrique 01	0.811	0.681	1.222	0.988	0.988	16.434
Symétrique 02	0.755	0.628	1.161	0.934	0.934	19.779
Asymétrique 01	0.787	0.657	1.195	0.965	0.963	17.895
Asymétrique 02	0.787	0.657	1.195	0.963	0.965	17.895
Sinusoïdale						
Uniform	0.626	0.524	0.950	0.767	0.767	14.336
Symétrique 01	0.648	0.545	0.974	0.788	0.788	12.967
Symétrique 02	0.603	0.502	0.924	0.744	0.744	15.604
Asymétrique 01	0.628	0.526	0.952	0.769	0.768	14.119
Asymétrique 02	0.628	0.526	0.952	0.768	0.769	14.119

À travers le tableau IV.3 On peut observer que les poutres sans renforcement donnent des flèches plus élevées on compare avec les poutres renforcées. Cette grande variation indique l'importance de la présence du renfort qui change complètement le comportement de la poutre. Pour les poutres renforcées, la valeur de la flèche la plus élevée est détectée dans le cas de O- CNT et sous porosité de type symétrique 01. Ce se peut être expliqué par la concentration du renfort au milieu qui diminue la rigidité des poutres (O-CNT) par rapport à la distribution (UD-CNT , X-CNT,V-CNT et  $\Lambda$ -CNT). On constate aussi que la distribution de type (Symétrique 02) donne la grande valeur de la flèche pour les poutres non renforcées et la petite valeur pour les poutres renforcées.

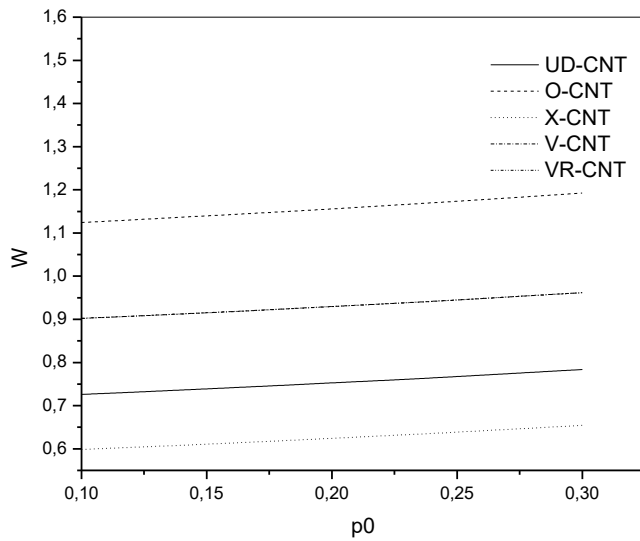


**Figure IV.3 :** L'effet du rapport ( $L/h$ ) sur la flèche sous différents distribution Symétrique de porosité sous un chargement uniforme ( $V_{cnt}^*=0.12$  ;  $p=0.3$ )

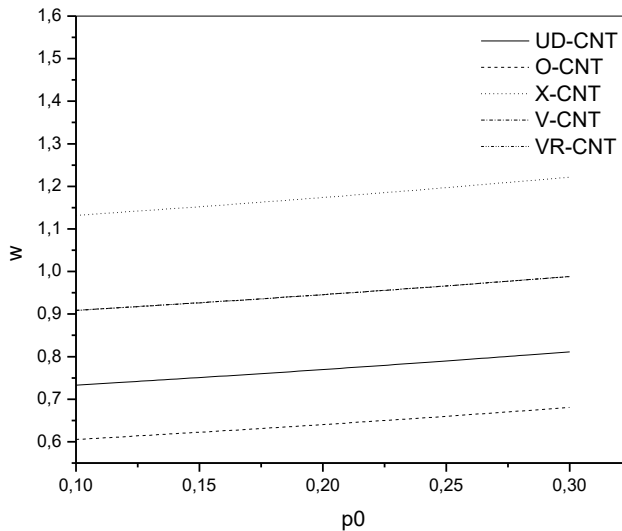


**Figure IV.4 :** L'effet du rapport ( $L/h$ ) sur la flèche sous différents distribution Asymétrique de porosité sous un chargement uniforme ( $V_{cnt}^*=0.12$  ;  $p=0.3$ )

Les figures IV.3 et IV.4 montres l'effet de rapport ( $L/h$ ) des nanotubes de carbone sur la flèche de la poutre (X-CNT) de sorte qu'une augmentation de ce rapport ( $L/h$ ) entraîne une diminution de la flèche de la poutre. Cette diminution est attribuée à l'élancement de la poutre.

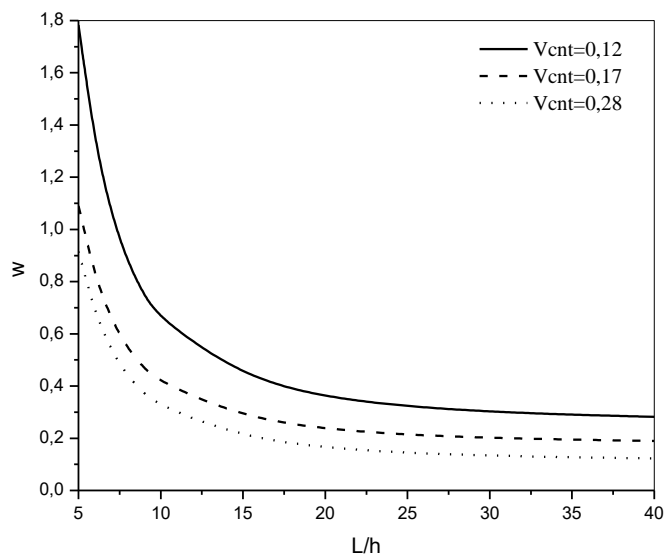


**Figure IV.5 :** d'effet de la porosité (uniforme) sur la flèche sous d'efférents type de renforcement (UD-CNT , O-CNT , X-CNT , V-CNT,VR-CNT ), ( $V_{cnt} = 0.12$  ;  $L/h = 10$  )

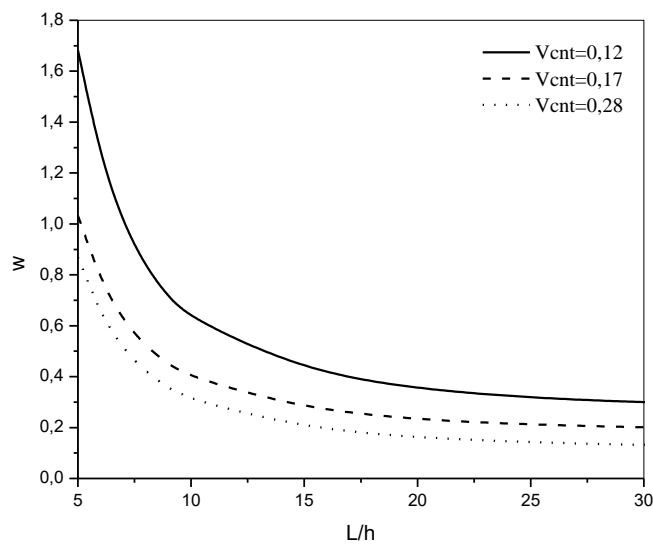


**Figure IV.6 :** l'effet de porosité de type distributions symétrique 1 sur la flèche sous d'efférents type de renforcement (UD-CNT , O-CNT , X-CNT , V-CNT, VR-CNT ), ( $V_{cnt}=0.12$  ;  $L/h=10$  )

Les figures IV.5 et IV.6 montres l'effet de rapport de la porosité (uniforme et symétrique 1) sur la flèche de la poutre. A partir de ces figures, on remarque lorsque le rapport de la porosité augmente, la flèche de la poutre augmente linéairement.



**Figure IV.7 :** L'effet du rapport géométrique ( $L/h$ ) et les fractions volumiques sur la flèche des poutres pour la distribution (X-CNT) avec une porosité de type uniforme ( $P=0.3$ )



**Figure IV.8 :** L'effet du rapport géométrique ( $L/h$ ) et les fractions volumiques sur la flèche des poutres pour la distribution (X-CNT) avec une porosité de type symétrique 2 ( $P=0.3$ )

Les figures IV.7 et IV.8 montrent les effets des fractions volumiques CNT et les rapports ( $L/h$ ) sur la flèche de la poutre X. L'augmentation des fractions volumiques des nanotubes de carbone

entraîne une diminution des flèches. On remarque que l'augmentation de la fraction volumique des nanotubes de carbone augmente la rigidité de la poutre.

#### **IV.5. Conclusion :**

L'étude de l'effet de la porosité sur le comportement mécanique des poutres révèle que la présence de vides dans les matériaux peut avoir des conséquences profondes sur la rigidité de la poutre. Les résultats de ce chapitre soulignent l'importance de prendre en compte la porosité lors de la conception et de l'analyse des poutres, afin de garantir des prédictions précises et fiables. Les résultats obtenus mettent en évidence plusieurs points importants. Premièrement, il est observé que l'augmentation de la porosité entraîne une diminution de la rigidité de la poutre. De plus, la flèche sous une charge uniforme est plus importante que sous une charge sinusoïdale. Ensuite, la distribution symétrique 02 présente la plus faible valeur de flèche par rapport aux autres distributions. De manière intéressante, les deux distributions de porosité asymétrique 01 et 02 affichent des valeurs de flèche identiques. Par ailleurs, les poutres sans renforcement montrent des flèches plus élevées en comparaison avec les poutres renforcées. Enfin, il est constaté que l'augmentation de la fraction volumique des nanotubes de carbone entraîne une augmentation de la rigidité de la poutre. Cette compréhension approfondie permet non seulement d'optimiser les matériaux de construction, mais ouvre également la voie à l'innovation dans le domaine de l'ingénierie.

# *Conclusion générale*

**Conclusion générale :**

Dans cette étude sur l'influence de la distribution de porosité sur le comportement statique d'une poutre nano-composite (FG-CNT), nous avons exploré plusieurs aspects cruciaux. À travers les différents chapitres, nous avons commencé des généralités sur les nano charges, puis nous nous sommes plongés dans la compréhension des nano-composites, en mettant l'accent sur les types de carbone et de polymères utilisés.

Par la suite, nous avons approfondi l'étude sur les théories des poutres et de la porosité, en analysant comment ces deux éléments interagissent et influencent le comportement mécanique des poutres. Dans le quatrième chapitre, nous avons focalisé notre attention sur l'effet de la porosité sur le comportement mécanique des poutres, en particulier lors de l'études statique.

À travers nos recherches, nous avons observé que la distribution de la porosité joue un rôle crucial dans la résistance des poutres nano-composites. Les variations dans la distribution de la porosité peuvent entraîner des changements significatifs dans les propriétés mécaniques, ce qui souligne l'importance de comprendre et de contrôler ce paramètre lors de la conception et de la fabrication de ces matériaux avancés.

cette étude souligne l'importance de prendre en compte la distribution de porosité dans la conception et l'analyse des poutres nano-composites. Une compréhension approfondie sur l'effet du rapport géométrique, la fraction volumique, les types de renforcement et la distribution de la porosité.

Les résultats obtenus mettent en évidence plusieurs points importants.

Premièrement, il est observé que l'augmentation de la porosité entraîne une diminution de la rigidité de la poutre. De plus, la flèche sous une charge uniforme est plus importante que sous une charge sinusoïdale. Ensuite, la distribution symétrique 02 présente la plus faible valeur de flèche par rapport aux autres distributions. De manière intéressante, les deux distributions de porosité asymétrique 01 et 02 affichent des valeurs de flèche identiques. Par ailleurs, les poutres sans renforcement montrent des flèches plus élevées en comparaison avec les poutres renforcées. Enfin, il est constaté que l'augmentation de la fraction volumique des nanotubes de carbone entraîne une augmentation de la rigidité de la poutre.

En perspective, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour explorer davantage les interactions complexes entre la porosité, la structure et les propriétés mécaniques des poutres nano-composites, Une stratégie expérimentale doit être envisagée afin de fabriquer cette nouvelle

structure renforcée graduellement. Il est intéressant d'utiliser des nouvelles formulations et méthodes dans les Prochaines recherches pour étudier des poutres et des plaques poreuses en FG-CNTRC. Enfin, cette étude peut être considérée comme une base de données pour les chercheurs afin de développer et d'approfondir les connaissances en focalisant l'attention sur les bénéfices structurels, fonctionnels et économiques souhaités



# *Références Bibliographique*

## Bibliographie

- [1] J.-R. Abrial: *The B-Book*. Cambridge University Press, 1996. T. V. Hughes, C. R. Chambers, Manufacture of Carbon Filaments, US Patent No. 405, 480, 1889.
- [2] L. V. Radushkevich and V. M. Lukyanovich, Zh. Fiz. Khim. 26, 88 (1952).
- [3] H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl, and R. E. Smalley, Nature 318,162 (1985)
- [4] S. Iijima, Nature 354 56 (1991).
- [5] Y. Chen, Z. L. Wang, J. S. Yin, D. J. Johnson, and R.H. Prince, Chem. Phys. Lett. 272, 178 (1997)
- [6] M. R., Vengatesan, and V. Mittal. Nanoparticle-and nanofiber-based polymer nanocomposites: an overview. Spherical and fibrous filler composites, 1(1).(2016).
- [7] M. Berge. Le développement du nano-argent : entre représentations hygiénistes, déterminisme technoscientifique et marché : analyse sociologique. (2013).
- [8] F. Pang., H. Li., J. Cui., Y. Du., and C. Gao. Application of Flugge thin shell theory to the solution of free vibration behaviors for spherical-cylindrical-spherical shell: a unified formulation. European journal of mechanics-A/solids, 74, 381-393. (2019).
- [9] J. Yin., F. Zhan., T. Jiao., H. Deng., G. Zou., Z. Bai., ... and Q. Peng. Highly efficient catalytic performances of nitro compounds via hierarchical PdNPs-load MXene/polymer nanocomposites synthesized through electrospinning strategy for wastewater treatment. Chinese Chemical Letters, 31(4), 992-995. (2020).
- [10] N. Olivera., T. Rouf. B., J.C. Bonilla., J. G. Carriazo., N. Dianda., and J. Kokini. L. Effect of LAPONITE® addition on the mechanical, barrier and surface properties of novel biodegradable kafirin nanocomposite films. Journal of Food Engineering, 245, 24-32 (2019).
- [11] H.W. Kroto, J.R. Heath., S.C. O'Brien., R.F. Curl., R.E. Smalley., C60 Buckminsterfullerene, Nature, 318,162,163 (1985).
- [12] E.T. Thostenson., Z. Ren., T.W. Chou., Composites Science and Technology, 61, 1899–1912. (2001)
- [13] W. Krätschmer, L. Lamb, K. Fostiropoulos et D. Huffman : Nature, 347, 354– 358, 1990. 38.
- [14] THÈSE- Sandra RIZK(2009).
- [15] H. Dai, A. G. Rinzler, P. Nikolaev, A. Thess, D. T. Colbert, R. E. Smalley, Chem. Phys. Lett., 260- 471(1996).
- [16] E. Coureau, H. Hernadi, J.W. Seo, L. Thiên-Nga, C. Miko, R. Gaal, L. Forro, Chem. Phys. Lett. 378: 9-17 (2003).
- [17] Pascal Mailley, Edward A. Cummings, Sophie Mailley, Serge Cosnier, Brian R. Eggins, Eric McAdams, Bioelectrochemistry, 63, 291, 2004.
- [18] G. Overney, W. Zhong, D. Tománek, Z. Phys. D, 27, 93, 1993.
- [19] M. M. Treacy, T. W. Ebbesen, J. M. Gibson, Nature, 381, 678, 1996.
- [20] Tensile loading of ropes of single wall carbon nanotubes and their mechanical properties, M.-F. Yu, B. S. Files, S. Arepalli, R. S. Ruoff, Phys. Rev. Lett., 84, 5552- 5555, 2000.

- [21] Jose-Yacamán, M.; Miki-Yoshida, M.; Rendon, L.; Santiesteban, J. G. *Applied Physics Letters*, 62, 202–204 (1993).
- [22] M, Mayne L'hemite.; S, Palacin.; P,Chenevier.; J , Chancolon.; A, Gohirt. capteur chimique a base de nanotubes de carbone, procedé de préparation et utilisation. (2006).
- [23] R, Saito, M, Fujita , M.S Dresselhaus. *Appl. Phys. Lett.* 60 2204 (1992)
- [24] S. Frank, P. Poncharal, Z.L. Wang, and W.A de Heer. *Science*, 280 :1744, (1998).
- [25] Z. Yao, C. Dekker et P. Avouris : *Top. Appl. Phys.*, 80, 147–171, 2001.
- [26] W. Steinhogel, G. Schindler, G. Steinlesberger, M. Traving, M. Engelhardt, *J. Appl. Phys.* 97 (2) (2005).
- [27] A. Naeemi, G. Huang, J.D. Meindl, *Electronic Component and Technology Conference. ECTC '07. Proceedings.* 57th, May 29 2007–June 1 2007, pp. 420–428. , 2007.
- [28] E.Castillejos .; R,Chico. ; R. Bacsas.; S.Coco; P. Espinet.; M . Pérez-Cadenas.; A. Guerrero-Ruiz; I. Rodriguez-Ramos, ; P. Serp.; *European Journal of Inorganic Chemistry* 2010, 32, 5096–5102.
- [29] E, Castillejos ; P. Debouttière, P.-J ; L. Roiban.,; A. Solhy; V. Martinez.; Y. Kihn; O Ersen.; K. Philippot.; B. Chaudret.; P. Serp ; *Angewandte Chemie International Edition*, 48, 2529–2533(2009).
- [30] P, Serp.;E, Castillejos.; *ChemCatChem*, 2, 41–47,2010.
- [31] P,Serp.;M, Corrias.; P, Kalck.; *Applied Catalysis A: General*, 253, 337–358 2003.
- [32] Aissani Khadija , thèse Etude du comportement mécanique des macros et nano structures sur des fondations élastiques UNIVERSITE DJILLALI LIABES SIDI BEL ABBES.(2016).
- [33] J.L. Acosta, C.M. Rocha, M.C. Ojeda, A. Linares, M. Arroyo, *Die .Angew .Makromol Chem* ,126, p. 51–57(1984).
- [34] S.J. Balci, *Chem. Tech. Biotechnol* ,66 , p. 72–78(1996).
- [35] S. Dermakar: *Matériaux composites à matrice métallique. Techniques de l'Ingénieur*, M 250, pp. 1-16; 2001.
- [36] F. D. Brian Cantor, Ian Stone, *Metal and Ceramic Matrix Composites*, Editeur: Institute of Physics Publishing, 2004.
- [37] Xiong, J.; Zheng, Z.; Qin, X.; Li, M.; Li, H.; Wang, X., The thermal and mechanical properties of a polyurethane/multi-walled carbon nanotube composite. *Carbon* , 44 (13), 2701-2707 2006.
- [38] Michael Bozlar, *Modification de surface des nanotubes de carbone par un polymère conducteur électro généré pour la réalisation de nano-composites multifonctionnels*, thèse de doctorat, l'Université« ÉCOLE CENTRALE PARIS » école normal supérieure de cachan- Paris, (2009).
- [39] G. Sui, W. H. Zhong, X. P. Yang, Y. H. Yu and Zhao, *Polym. Adv. Technol*, vol.19, pp. 1543-1549, 2008.
- [40] J. Liu, A. Rasheed, M. L. Minus, S. Kumar, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 112, pp. 142–156, 2009.
- [41] U. Khan, K. Ryan, W. J. Blau and J. N. Coleman, *Composites Science and Technology*, vol.67, Issues 15-16, pp. 3158-3167, 2007.
- [42] C.Aubry, *Développement et mise en oeuvre de structures textiles multifonctionnelles contenant des nanotubes de carbone – Application aux capteurs chimiques pour la détection de solvants*, L'Université des sciences et technologiques de Lille, 2009.

- [43] S. H. Lee, M. W. Kim, S. H. Kim and J. R. Youn, *European Polymer Journal*, vol. 44, pp. 1620–1630, 2008.
- [44] R.Andrews, D.Jacques, D.Qian, T.Rantell,*Comptes de recherche chimique*,35,1008-1017, 2002
- [45] L.Le Pluart, *Nanocomposites montomorillonite/époxyde*, Influence de la nature de la charge et de la matrice sur les propriétés mécaniques; Thèses de doctorat, INSA de Lyon,(2002).
- [46] V .Babraukas, R-D. Peacock,*Fire Safety Journal*, 18, p. 255-261 (1992),
- [47] C. Y, Wei., Adhesion and reinforcement in carbon nanotube polymer composite. *Applied Physics Letters* 2006, 88 (9).
- [48] Malvault, Guillaume. Détermination expérimentale de la distribution de taille de pores d'un milieu poreux par l'injection d'un fluide à seuil ou analyse harmonique. Thèse de doctorat. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM.(2013).
- [49] Loretz, Mathilde. Caractérisation des Propriétés Thermiques de Mousses Céramiques et Métalliques à partir d'Analyses Tomographiques aux Rayons X. Thèse de doctorat. PhD Thesis, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, Villeurbanne, France (2008).
- [50] 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. Français. tel-00845579, 2012.
- [51] Inagaki, Michio. Pores in carbon materials-importance of their control. *New Carbon Materials*, vol. 24, no 3, p. 193-232, (2009).
- [52] C, Gallé. Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry: a comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying. *Cement and Concrete Research*, vol. 31, no 10, p. 1467-1477,(2001).
- [53] L.K, Frevel. et L.J, Kressley. Modifications in Mercury Porosimetry. *Analytical Chemistry*, vol. 35, no 10, p. 1492-1502,(1963).
- [54] Schüth, Ferdi, Sing, Kenneth Stafford William, et Weitkamp, Jens. *Handbook of porous solids*. Wiley-Vch, (2002).
- [55] Boher, Cedric. Etude expérimentale et modélisation de la diffusion gazeuse à travers des milieux poreux partiellement saturés en eau. Application aux verres Vycor, géopolymères et pâte de ciment CEM V. Thèse de doctorat. Toulouse, INSA, (2012).
- [56] Clément, Phillipe. Détermination des propriétés mécaniques de céramiques poreuses par essais de microindentation instrumentée sphérique. Thèse de doctorat. INSA de Lyon ( 2013).
- [57] S, Meille. Communication. EuroMat 2011. Montpellier,(2011).
- [58] Staub, Déborah. Étude du comportement mécanique à rupture des alumines de forte porosité: Application aux supports de catalyseurs d'hydrotraitement des résidus. Thèse de doctorat. INSA de Lyon. (2014).
- [59] Ogasawara, Nagahisa, Chiba, Norimasa, et Chen, Xi. Erratum: "Representative strain of indentation analysis"[*J. Mater. Res.* 20, 2225 (2005)] and "Limit analysis-based approach to determine the material plastic properties with conical indentation"[*J. Mater. Res.* 21, 947 (2006)]. *Journal of Materials Research*, vol. 21, no 10, p. 2699-2700, 2006.
- [60] E.A, Dean, et J.A, Lopez. Empirical dependence of elastic module on porosity for ceramic materials. *Journal of the American Ceramic Society*, 1983, vol. 66, no 5, p. 366.

- [61] Einstein, Albert. Einstein bestimmung der moleküldimensionen. *Annalen der Physik* vol. 324, no 2, p. 289, 1906,
- [62] R.M, Spriggs. Expression for effect of porosity on elastic modulus of polycrystalline refractory materials, particularly aluminum oxide. *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 44, no 12, p. 628, 1961.
- [63] D.P.H, Hasselman. On the porosity dependence of the elastic module of polycrystalline refractory materials. *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 45, no 9, p. 452, 1962.
- [64] Zvi, Hashin. The elastic module of heterogeneous materials. *Journal of Applied Mechanics*, vol. 29, no 1, p. 143, 1962.
- [65] R, Marin. Bruce et Haynes, R Russell R. Theoretical analysis of the Effects of Air Voids in Concrete. In : *Journal Proceedings*. p. 36. 1971.
- [66] J, Kováčik. Correlation between elastic modulus, shear modulus, poisson's ratio and porosity in porous materials. *Advanced Engineering Materials*, vol. 10, no 3, p. 250, 2008.
- [67] Phani, Kalyan Kumar et Niyogi, S. K. Young's modulus of porous brittle solids. *Journal of materials science*, vol. 22, no 1, p. 257, 1987.
- [68] Wagh, A. S., Poepfel, R. B., et Singh, J. P. Open pore description of mechanical properties of ceramics. *Journal of materials science*, vol. 26, no 14, p. 3862, 1991.
- [69] Phani, Kalyan K. et Niyogi, S. K. Elastic modulus.
- [70] Boccaccini, A.R., Ondracek, G., et Mombello, E. Determination of stress concentration factors in porous materials. *Journal of materials science letters*, vol. 15, no 6, p. 534, 1996.
- [71] Maitra, A. K. et Phani, Kalyan Kumar. Ultrasonic evaluation of elastic parameters of sintered powder compacts. *Journal of materials science*, vol. 29, no 17, p. 4415, 1994.
- [72] Lam, David CC, Lange, F Fred., et Evans, G Anthony . Mechanical properties of partially dense alumina produced from powder compacts. *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 77, no 8, p. 2113, 1994.
- [73] J, Kováčik. Correlation between shear modulus and porosity in porous materials. *Journal of materials science letters*, vol. 20, no 21, p. 1953, 2001.
- [74] J, Kováčik. Correlation between Young's modulus and porosity in porous materials. *Journal of materials science letters*, vol. 18, no 13, p. 1007, 1999.
- [75] J, kováčik. Correlation between Poisson's ratio and porosity in porous materials. *Journal of materials science*, vol. 41, no 4, p. 1247, 2006.
- [76] N, Wattanasakulpong., & V, Ungbhakorn.. Analytical solutions for bending, buckling and vibration responses of carbon nanotube-reinforced composite beams resting on elastic foundation. *Computational Materials Science*, 71, 201-208, (2013).
- [77] M.H, Yas., & N, Samadi. . Free vibrations and buckling analysis of carbon nanotube-reinforced composite Timoshenko beams on elastic foundation. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 98, 119-128, (2012).
- [78] Tagrara, S. H., Benachour, A., Bouiadjra, M. B., and 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).
- [79] E, Reissner. The effect of transverse shear deformation on the bending of elastic plates.(1945).