

*République Algérienne Démocratique et Populaire*

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ibn Khaldoun Tiaret

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie civil



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

**Spécialité : Génie Civil**

**Option : Structures**

**Présenté par :**

*Boukhris Ikram*

*Djelailia Bahia*

**Sujet du mémoire :**

***Le comportement statique d'une plaque  
sandwich nano-composite sous différente  
distribution de porosité***

*Soutenu publiquement le 18/06/2025 devant le jury composé de :*

Pr. A. SAOULA

Président

Pr. M. ZIDOUR

Encadreur

Dr. A. BENAHMED

Co-Encadreur

Pr. T. HASSAINE DAOUADJI

Examineur

Pr. T. BENSATTALAH

Examineur

Dr. A. KABLIA

Examinatrice

**PROMOTION : 2024/2025**

سَمِيعٌ عَلِيمٌ  
الْحَمْدُ لِلَّهِ  
الَّذِي هَدانا  
لِإِسْلَامِهِ  
وَالْحَمْدُ لِلَّهِ  
الَّذِي هَدانا  
لِإِسْلَامِهِ

## **Remerciements**

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

*Nous tenons tout d'abord à remercier infiniment, notre promoteur Dr. ZIDOUR MOHAMED, l'encadrant de notre projet de fin de cycle et Dr. BENAHMED Abdelillah le co-encadrant, pour la confiance qu'ils nous a accordé en nous proposant ce fameux sujet. De plus, leurs enthousiasmes, encouragement et leurs entières disponibilités et judicieux conseils au cours de ce projet.*

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

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

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

## ***Dédicaces***

*A mes chers parents qui me guidés durant les moments les plus  
Pénibles de ce long chemin.  
Mon pères qui a sacrifié toute leur vie afin de nous voir devenir ce que nous  
sommes  
Mon mari et Ma belle-mère qui ont été là à ma coté et j'ai soutenu durant toutes  
La période.*

*A toutes mes frères et ces enfants  
A toutes ma famille.  
A toutes mes amis (es).  
A toute notre promotion.  
A toutes personnes qui nous ont aidés à poursuivre nos études.  
Enfin à tous ceux qui nous sont très chers*

## **Dédicaces**

*Je dédie cet humble travail avec grand amour, Sincérité et fierté :*

*A **mon père**, rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être, ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous avez consentis pour moi.*

*A ma **très chère mère**, source de tendresse, de noblesse et d'affection, le symbole de la bonté par excellence, l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.*

*A mes frères et mes sœurs, , en témoignage de la fraternité, avec mes souhaits de bonheur de santé et de succès.*

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

*A tous les membres de ma famille.*

*A tous mes amis,*

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

**Djelailia Bahia**

## ***Abstract***

This study analyzes the static behavior of nanocomposite sandwich plates subjected to different porosity distributions. Based on the theory of high-order shear deformation plates, we investigated the influence of several types of carbon nanotube (CNT) distributions—uniform (UD-CNT) and functionally graded (X-CNT, O-CNT, V-CNT,  $\wedge$ -CNT)—on the static behavior of these structures. The originality of this work lies in the analytical study of the impact of porosity on the static behavior of sandwich plates. The results obtained are validated by comparison with existing solutions in the literature. The displacements and stresses of porous polymer-CNT sandwich plates are studied, taking into account the effects of geometric ratios, volume fraction, reinforcement types, and porosity distribution.

**Key-words:** Carbon nanotube; Static; Deformation; Hamilton; Porosity

## ***Résumé***

Cette étude porte sur l'analyse du comportement statique de plaques sandwich nanocomposites soumises à différentes distributions de porosité. En s'appuyant sur la théorie des plaques de déformation par cisaillement d'ordre élevé, nous avons étudié l'influence de plusieurs types de distribution de nanotubes de carbone (NTC) – uniforme (UD-CNT) et fonctionnellement graduée (X-CNT, O-CNT, V-CNT,  $\wedge$ -CNT) – sur le comportement statique de ces structures. L'originalité de ce travail réside dans l'étude analytique de l'impact de la porosité sur le comportement statique des plaques sandwich. Les résultats obtenus, validés par comparaison avec des solutions existantes dans la littérature. Les déplacements et les contraintes des plaques sandwich poreuses à base de polymères et de NTC sont étudiés, en tenant compte des effets des rapports géométriques, de la fraction volumique, des types de renfort et de la distribution de la porosité.

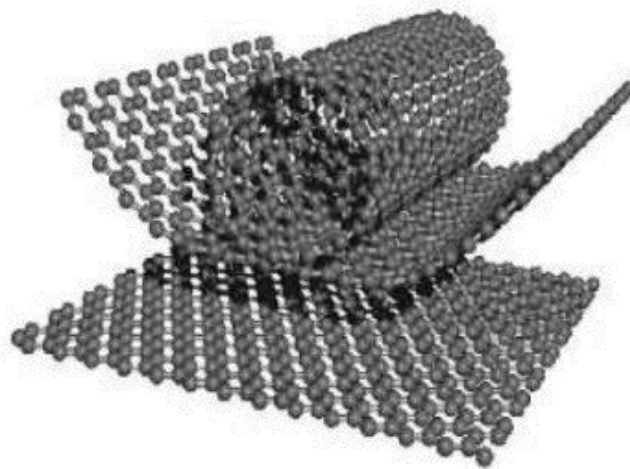
**Mots-clés :** Nanotubes ; Statique ; Déformation ; Hamilton ; Porosité.

## ملخص

تركز هذه الدراسة على تحليل السلوك الثابت لألواح الساندويتش النانوية المركبة المعرضة لتوزيعات مسامية مختلفة. استنادًا إلى نظرية صفائح تشوه القص عالية الترتيب، قمنا بالتحقيق في تأثير العديد من أنواع توزيع أنابيب الكربون النانوية (CNT) - المنتظم (UD-CNT) والمتدرج وظيفيًا (X-CNT، O-CNT، V-CNT، A-CNT) - على السلوك الثابت لهذه الهياكل. تكمن أصالة هذا العمل في الدراسة التحليلية لتأثير المسامية على السلوك الثابت للألواح الساندويتش. تم التحقق من النتائج التي تم الحصول عليها من خلال مقارنتها بالحلول الموجودة في الأدبيات. تمت دراسة الإزاحات والإجهادات للصفائح الساندويتش المسامية القائمة على البوليمرات والأنابيب النانوية الكربونية، مع الأخذ في الاعتبار تأثيرات النسب الهندسية وكسر الحجم وأنواع التعزيز وتوزيع المسامية.

**الكلمات الرئيسية:** أنابيب النانو الكربونية ، الثابت ، تشوه ، هاملتون ، المسامية

# ***Table des matières***



# Table des matières

|                                                                                      |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Abstract.....                                                                        | i    |
| Résumé.....                                                                          | ii   |
| ملخص.....                                                                            | iii  |
| Table des matières.....                                                              | v    |
| Liste des figures.....                                                               | ix   |
| Liste des tableaux.....                                                              | xiii |
| Liste des abréviations.....                                                          | xv   |
| Liste des notations.....                                                             | xvii |
| Introduction générale.....                                                           | 1    |
| <b>Chapitre I : les nanotubes de carbone : structures, propriété et applications</b> |      |
| I.1 Introduction .....                                                               | 5    |
| I.2 Origine des nanotubes de carbone.....                                            | 5    |
| I.3 Les nanotubes de carbone .....                                                   | 6    |
| I.4 Les différentes phases allotropiques naturelles du carbone .....                 | 7    |
| I.4.1 les structures cristallines du Graphite .....                                  | 8    |
| I.4.2 Le Diamant .....                                                               | 8    |
| I.4.3 Carbone mal organisés .....                                                    | 9    |
| I.5 Les formes allotropiques du carbone .....                                        | 9    |
| I.5.1 Le Graphène .....                                                              | 9    |
| I.5.2 Fullerènes .....                                                               | 10   |
| I.6 structure des nanotubes de carbone.....                                          | 11   |
| I.6.1 Nanotubes de carbones mono-feuillets, SWNT (Single Walled Nanotube).....       | 11   |
| I.6.2 Nanotubes de carbones multi-feuillets, MWNT (Multi Walled Nanotubes).....      | 12   |
| I.6.3 Nanotubes de carbones double-feuillets, DWNT (Double Walled Nanotubes).....    | 13   |
| I.7 Méthodes de synthèse de nanotube de carbone.....                                 | 13   |
| I.7.2 Méthode d'ablation laser.....                                                  | 14   |
| I.8 Propriétés des nanotubes de carbone .....                                        | 15   |
| I.8.1 Propriété thermiques .....                                                     | 15   |
| I.8.2 Propriétés optique .....                                                       | 15   |
| I.9 Méthode de purification de carbone.....                                          | 15   |
| I.10 Applications des nanotubes de carbone .....                                     | 16   |
| I.10.1 Application au Génie Civil .....                                              | 17   |
| I.11 L'utilisation des nanotubes de carbone dans le béton.....                       | 17   |
| I.12 Producteur sur le marché.....                                                   | 17   |
| I.13 Conclusion.....                                                                 | 18   |
| <b>Chapitre II : Les nano composites : "concepts de base et classifications"</b>     |      |
| II.1. Introduction.....                                                              | 20   |
| II.2. Généralité sur la structure des polymères .....                                | 20   |
| II.3. Les polymères .....                                                            | 21   |
| II.4.4 Classification selon le comportement thermique.....                           | 22   |
| II.4.4.1 Polymères thermoplastiques.....                                             | 22   |
| II.4.4.2 les polymères thermodurcissables.....                                       | 23   |

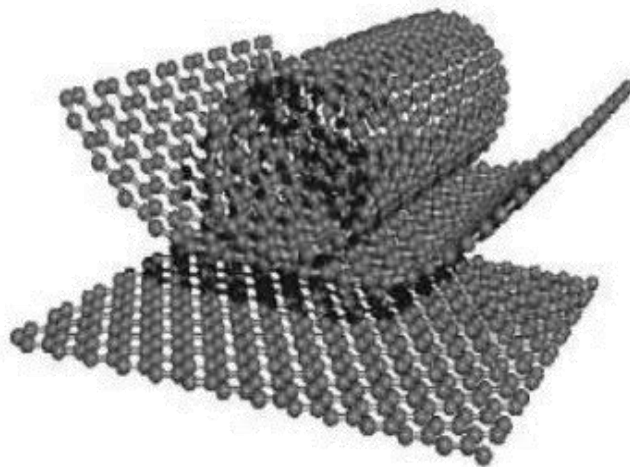
|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.4.4.3 Les élastomères.....                                                                        | 24 |
| II.5 Présentation des matériaux composites.....                                                      | 24 |
| II.5.1 Les propriétés des matériaux composites .....                                                 | 25 |
| II.5.2 Domaines d'application des matériaux composites .....                                         | 25 |
| II.6 Généralité sur les nano composites .....                                                        | 26 |
| II.7 Les différents nano renforts.....                                                               | 26 |
| II.7.1 Renforts de type 1D.....                                                                      | 27 |
| II.7.2 Renforts de type 2D.....                                                                      | 27 |
| II.7.3 Renforts de type 3D.....                                                                      | 27 |
| II.8 Nano Composites (Nanotube de carbone/matrice Polymère) .....                                    | 27 |
| II.9 Propriété des nano composites (polymères/NTC) .....                                             | 27 |
| II.9.1 Propriété thermiques nano composites (NTC/polymère).....                                      | 27 |
| II.9.2 Propriété mécanique.....                                                                      | 28 |
| II.10 Procédés d'élaboration des nano composites (NTC/polymère).....                                 | 28 |
| II.11 Application des nano composites dans le domaine de Génie civil.....                            | 29 |
| II.12 Conclusion .....                                                                               | 30 |
| <b>Chapitre III : La porosité dans les matériaux : principes fondamentaux et caractérisations</b>    |    |
| III.1 Introduction .....                                                                             | 32 |
| III.2 Milieux poreux .....                                                                           | 32 |
| III.3 Les matériaux poreux (interstices) .....                                                       | 33 |
| III.3.1 Porosité .....                                                                               | 34 |
| III.3.2 Perméabilité.....                                                                            | 35 |
| III.4 La caractérisation de la porosité .....                                                        | 35 |
| III.4.1 Porosimétrie par Intrusion d'Eau : .....                                                     | 36 |
| III.4.2 Porosimétrie par intrusion de mercure : .....                                                | 36 |
| III.4.3 Stéréologie : .....                                                                          | 36 |
| III.4.4 La microtomographie : .....                                                                  | 36 |
| III.4.5 Diffusion de rayonnement .....                                                               | 36 |
| III.4.6 Les ultrasons .....                                                                          | 37 |
| III.5 Effet de la porosité sur les propriétés mécaniques des matériaux .....                         | 37 |
| III.5.1 Porosité et module d'élasticité longitudinale (le module de Young/porosité).....             | 38 |
| III.5.2 Porosité et le module de cisaillement (le module de cisaillement /porosité).....             | 39 |
| III.5.3 Porosité et le coefficient de poisson $\nu$ (le coefficient de poisson $\nu$ /porosité)..... | 40 |
| III.6 Conclusion.....                                                                                | 40 |
| <b>Chapitre IV : Plaques et sandwichs</b>                                                            |    |
| IV.1 Introduction. ....                                                                              | 43 |
| IV.2 Description des plaques. ....                                                                   | 43 |
| IV.3 Les Sandwichs.....                                                                              | 44 |
| IV.3.1 Les éléments constitutants des structures sandwichs .....                                     | 45 |
| IV.3.1.1 Les faces de la plaque sandwich - les peaux .....                                           | 45 |
| IV.3.1.2 Cœur de la plaque sandwich - L'âme.....                                                     | 45 |
| IV.3.2 L'interface entre les couches du sandwich (l'adhésif) .....                                   | 46 |
| IV.3.3 Domaine d'application des matériaux sandwichs.....                                            | 46 |
| IV.4 Les hypothèses fondamentales de la théorie des poutres et des plaques.....                      | 47 |

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| IV.4.1 La théorie classique des plaques minces de Love-Kirchhoff (CLPT). ....     | 47 |
| IV.4.2 La théorie de déformation en cisaillement du premier ordre (FSDT).....     | 48 |
| IV.4.3 La théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé (HSDT). ....       | 49 |
| IV.5 Définition et l'intérêt d'une plaque sandwich .....                          | 50 |
| IV.6 Configuration géométrique et propriétés de la plaque sandwich renforcée..... | 51 |
| IV.7 Équations de mouvement.....                                                  | 53 |
| IV.8 Conclusion.....                                                              | 59 |

## **Chapitre V : Résultats et discussion**

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| VI.1 Introduction .....                                                | 60 |
| VI.2 Résultats numériques et discussions .....                         | 60 |
| VI.3 Effet de la géométrie sur la déflexion d'une plaque sandwich..... | 61 |
| VI.4 Conclusion.....                                                   | 75 |
| Conclusion générale.....                                               | 77 |
| Référence Bibliographique.....                                         | 80 |

# *Liste des figures*



# Liste des figures

## Chapitre I : Les nanotubes de carbone : structures, propriété et applications

|                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure I.1</b> : Atome du carbone.....                                                                                                                                                                   | 05 |
| <b>Figure I.2</b> : Image MET de l'extrémité d'un nanotube multicouche.....                                                                                                                                 | 06 |
| <b>Figure I.3</b> : Représentation d'un nanotube de carbone avec les extrémités fermées.....                                                                                                                | 07 |
| <b>Figure I.4</b> : Structure d'un nanotube de carbone.....                                                                                                                                                 | 07 |
| <b>Figure I.5</b> : formes allotropiques du carbone.....                                                                                                                                                    | 07 |
| <b>Figure I.6</b> : Structure du graphite hexagonal.....                                                                                                                                                    | 08 |
| <b>Figure I.7</b> : Structure cristalline de diamant et Orbitales hybrides $sp^3$ de carbone.....                                                                                                           | 09 |
| <b>Figure I.8</b> : Représentation moléculaire de carbone amorphe.....                                                                                                                                      | 09 |
| <b>Figure I.9</b> : Diagramme schématique montrant des composés entre les feuillets de graphène; et image imaginaire de l'enroulement d'un feuillet de graphène.....                                        | 10 |
| <b>Figure I.10</b> : Du C60 au C80 : les atomes ajoutés au C60 pour obtenir le C70 et le C80 sont représentés en rouge.....                                                                                 | 10 |
| <b>Figure I.11</b> : Structure d'un plan de graphène en deux dimensions. Le réseau hexagonal est décrit à partir des deux vecteurs de base $a_1$ et $a_2$ .....                                             | 11 |
| <b>Figure I.12</b> : Les types des nanotubes de carbone.....                                                                                                                                                | 12 |
| <b>Figure I.13</b> : À gauche présentation graphique d'un MWNT et à droite : image de microscope.....                                                                                                       | 12 |
| <b>Figure I.14</b> : type poupée ruse à gauche : type rouleau de parchemin à droite.....                                                                                                                    | 12 |
| <b>Figure I.15</b> : Représentation schématique d'un nanotube à double parois.....                                                                                                                          | 13 |
| <b>Figure I.16</b> : Schéma de principe du procédé de synthèse par arc électrique Marcox (2002).....                                                                                                        | 14 |
| <b>Figure I.17</b> : L'appareille ablation laser .....                                                                                                                                                      | 15 |
| <b>Figure I.18</b> : Image des NTC après procédure d'ultracentrifugation, les s-SWNTs et m-SWNT avec petit diamètre, les SWNTs à grand diamètre, et les fagots séparés et Spectre d'absorption optique..... | 16 |
| <b>Figure I.19</b> : Prévisions d'évolution du marché des nanotubes de carbone de 2012 à 2016.....                                                                                                          | 17 |
| <b>Figure I.20</b> : Secteurs d'activité des nanotubes de carbone en 2012.....                                                                                                                              | 18 |

## Chapitre II : Les nano composites : concepts de base et classifications

|                                                                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure II.1</b> Les liaisons entre les atomes dans les polymères. ....                                                                                                                                      | 20 |
| <b>Figure II.2</b> . Exemple du polypropylène (propène), ( $CHCH_3-CH_2$ ), (a) représentation du monomère, (b) structure atactique, (c) structure isotactique, (d) structure syndiotactique.....              | 23 |
| <b>Figure II. 3</b> : Formation d'une résine époxy réticulée à partir de polymère époxy et d'un Catalyseur.....                                                                                                | 24 |
| <b>Figure II.4</b> : (a) le caoutchouc naturel, un polymère de l'isoprène, (b) pont (S-S) entre chaînes assurant la cohésion de l'ensemble en l'absence de liaisons faibles, dans le caoutchouc vulcanisé..... | 24 |
| <b>Figure II.5</b> : Matériau composite.....                                                                                                                                                                   | 25 |
| <b>Figure II.6</b> : Définition morphologique de nano composites. 1) Composite dans lequel les renforts ont une dimension inférieure ou égale au nanomètre.....                                                | 26 |

### Chapitre III : La porosité dans les matériaux : principes fondamentaux et caractérisations

|                                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure III.1 :</b> (a) la porosité d'interstice, (b) la porosité de fissure.....                                                                                                                                                                                                      | 33 |
| <b>Figure III.2 :</b> Exemples de matériaux poreux.....                                                                                                                                                                                                                                  | 33 |
| <b>Figure III.3 :</b> Schématisation d'un milieu poreux.....                                                                                                                                                                                                                             | 34 |
| <b>Figure III.4:</b> Principe de la méthode de contrôle non destructif par ultrasons de la qualité d'une pièce stratifiée. Le graphe présenté correspond à des séries successives de C-Scan, avec F, D et B les réponses respectives données par la réflexion de l'onde sur le surf..... | 37 |
| <b>Figure III.5:</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.....                                               | 38 |

### Chapitre IV : Plaque et sandwichs

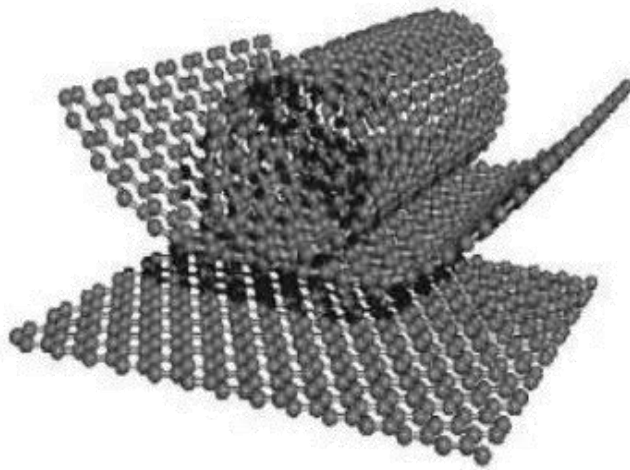
|                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure IV.1</b> Composite une plaque de sandwich.....                                                                                         | 44 |
| <b>Figure IV. 2:</b> Exemples de topologies d'une variété de réseaux cellulaires configurés comme noyaux de structures de panneaux sandwich..... | 45 |
| <b>Figure IV. 3 :</b> Eléments constitutifs d'un panneau sandwich :(a) à âme pleine, (b) à âme creuse.....                                       | 46 |
| <b>Figure IV.4:</b> Illustration de la plaque de Love-Kirchhoff.....                                                                             | 47 |
| <b>Figure IV.5 :</b> Illustration de la plaque de Reissner-Mindlin.....                                                                          | 48 |
| <b>Figure IV.6</b> Description de la déformation d'une plaque selon les théories : classique (CLPT, FSDT, HSDT).....                             | 49 |

### Chapitre V : Résultats et discussion

|                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure V.1 :</b> L'effet de la distribution uniforme de porosité sur la déflexion adimensionnelle $\bar{W}$ de plaque carrée poreuse sandwich sous le type de renforcement (0-X-0).....                                                                                                  | 67 |
| <b>Figure V.2:</b> L'effet de la porosité sur la de flexion adimensionnelle ( $\bar{W}$ ) de la plaque carée poreuse sandwich 0-X-0 sous différents distribution uniforme et asymétrique de porosité ( $V_{cnt}^*=0.11$ ; $P=0.2$ ).....                                                    | 67 |
| <b>Figure V.3 :</b> L'effet de la distribution uniforme de porosité sur la de flexion adimensionnelle $\bar{W}$ de plaque carrée poreuse sandwich sous différents types de renforcement (0-UD-0, 0-X-0, 0-O-0, 0-Λ-0, 0-V-0).....                                                           | 68 |
| <b>Figure V.4 :</b> Effet de la porosité sur la de flexion adimensionnelle $\bar{W}$ de plaque carrée poreuse sandwich renforcée par Face pour différents distribution de porosité.....                                                                                                     | 69 |
| <b>Figure V.5 :</b> L'effet de la combinaison des épaisseurs sur la de flexion adimensionnelle $\bar{w}$ de plaque sandwich carrée en fonction de la porosité pour $a/h=10$ (Renforcement de cœur).....                                                                                     | 70 |
| <b>Figure V.6 :</b> L'effet de la combinaison d'épaisseur sur la déflexion en fonction de la porosité Avec $a/h=10$ (Renforcement des deux faces supérieure et inférieure).....                                                                                                             | 71 |
| <b>Figure V.7 :</b> Effet du rapport $a/h$ sur la de flexion adimensionnelle $\bar{w}$ de plaque carrée poreuse sandwich renforcée 1-2-1 par cœur sous charges uniforme ( $V_{CNT}^*0.11$ ), et coefficient de porosité ( $P=0.2$ ), (a)Renforcement 1-2-1 par cœur de plaque sandwich..... | 72 |
| <b>Figure V.8 :</b> Effet du rapport $a/h$ sur la déflexion adimensionnelle $\bar{W}$ de plaque carrée poreuse sandwich renforcée 1-2-1 par face ou peaux sous charge uniforme ( $V_{cnt}^*=0.11$ ) et coefficient de porosité ( $p=0.2$ ).....                                             | 73 |
| <b>Figure V.9 :</b> Renforcement 1-2-1 par Face de plaque sandwich.....                                                                                                                                                                                                                     | 73 |

**Figure.V.10 :** Effet du rapport  $a/b$  sur la déflexion adimensionnelle ( $\bar{W}$ ) de plaque carrée poreuse sandwich renforcée 1-2-1 par cœur et 1-2-1 par face sous charge uniforme ( $V_{CNT}^*$  (0.11) e coefficient de porosité ( $P=0.2$ ) Renforcement 1-2-1 par Face de plaque sandwich.....74

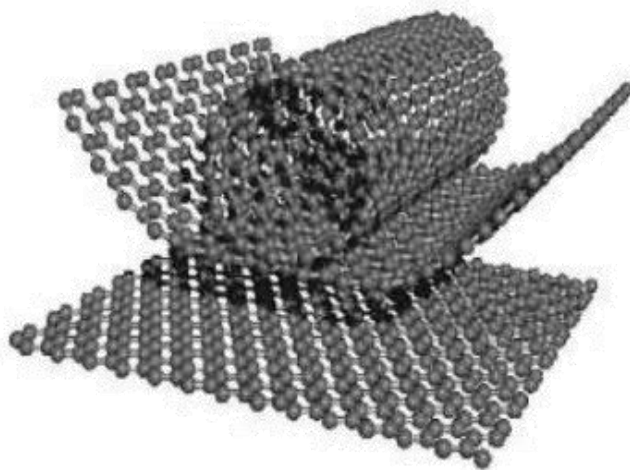
# *Liste des tableaux*



## Liste des tableaux

|                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Chapitre I : Les nanotubes de carbone : structures, propriété et applications</b>                                                                                                                                                                  |    |
| <b>Tableau I.1</b> : Comparaison entre SWNT et MWNT (Lijima et Ichihashi 1993).....                                                                                                                                                                   | 13 |
| <b>Chapitre II : Les nano composites : "concepts de base et classifications"</b>                                                                                                                                                                      |    |
| <b>Tableau II.1</b> Structures chimiques de quelques polymères. [Com 2005a].....                                                                                                                                                                      | 21 |
| <b>Tableau II.2:</b> Comparaison des différentes méthodes d'élaboration des composites polymères/NTC [Chemi2018].....                                                                                                                                 | 29 |
| <b>Chapitre III : La porosité dans les matériaux : principes fondamentaux et caractérisations</b>                                                                                                                                                     |    |
| <b>Tableau III.1</b> : Classification de la porosité selon l'IUPAC.....                                                                                                                                                                               | 34 |
| <b>Tableau III.2</b> : Porosité de quelques matériaux.....                                                                                                                                                                                            | 35 |
| <b>Chapitre IV : Plaque et sandwichs</b>                                                                                                                                                                                                              |    |
| <b>Tableau IV.1</b> : Description des différentes théories de plaques d'ordre supérieur.....                                                                                                                                                          | 50 |
| <b>Tableau IV.2</b> : Distribution nanotube de carbone dans plaque sandwich.....                                                                                                                                                                      | 51 |
| <b>Chapitre V : Résultats et discussion</b>                                                                                                                                                                                                           |    |
| <b>Tableau V.1</b> : Comparaison des flexions adimensionnelles de la plaque sandwich carrée <b>0-1-0</b> renforcée sans porosité sous des charge uniformes et sinusoïdales [ <b>a/h=10</b> ].....                                                     | 61 |
| <b>Tableau V.2</b> : L'effet du rapport géométrique a/h sur les déflexions adimensionnel ( <b>W</b> ) de la plaque sandwich carrée 1-2-1 renforcée sous des charges uniformes et sinusoïdales ( $V_{cnt}=0.17$ ).....                                 | 62 |
| <b>Tableau V.3:</b> L'effet du rapport géométrique a/h sur les déflexions adimensionnel ( <b>W</b> ) de la plaque sandwich carrée poreuse renforcée ( <b>1-2-1</b> ) sous charge uniforme <b><math>V_{cnt}=0.11</math>, <math>P=0.1</math></b> .....  | 63 |
| <b>Tableau V.4:</b> L'effet de la porosité sur la déflexion adimensionnelles $W=-(W_0 / (10^{-2}))$ de la plaque carrée poreuse renforcée 1-2-1 sous des charges uniformes et Sinusoïdales ( $a/h=10$ , $P=0$ ).....                                  | 64 |
| <b>Tableau V.5</b> : l'effet de la combinaison d'épaisseur de la plaque sandwich sur la déflexion et le contraintes adimensionnelle sous charge uniforme pour différentes valeurs d'épaisseur ( $W_{cnt}^*=0.11$ ).....                               | 65 |
| <b>Tableau V.6</b> : Effet des différents types de distribution de porosité en fonction du rapport $a/h=10$ , ( $V_{cnt}=0.11$ , $P=0.2$ ) sur les flexions adimensionnelle ( <b>W</b> ) du plaque sandwich renforcée sous des charges uniformes..... | 66 |

# *Liste des abréviations*



## Liste des abréviations

**AFM** : microscope à force atomique.

**C-C**: La liaison carbone-carbone.

**CNF** : Carbone Nano fibres

**CNF-H** : Carbone Nano fibres type "arêtes de poisson"

**CNF-R** : Carbone Nano fibres "type ruban"

**CNF-P** : Carbone Nano fibres "type plateau"

**CNT** : Carbone Nanotube.

**CO**: Monoxyde de carbone.

**CO<sub>2</sub>**: Dioxyde de carbone.

**CVD** : le dépôt chimique en phase vapeur.

**C60** : Fullerène C60.

**C70** : Fullerène C70.

**C80** : Fullerène C80.

**DGCIS** : la Direction Générale de la Compétitivité de l'Industrie et des Services.

**EPI** : Équipements de protection individuelle.

**FIR** : infrarouge lointain

**FUV** : Ultraviolet Lointain

**HiPCo**: Décomposition de CO à haute pression.

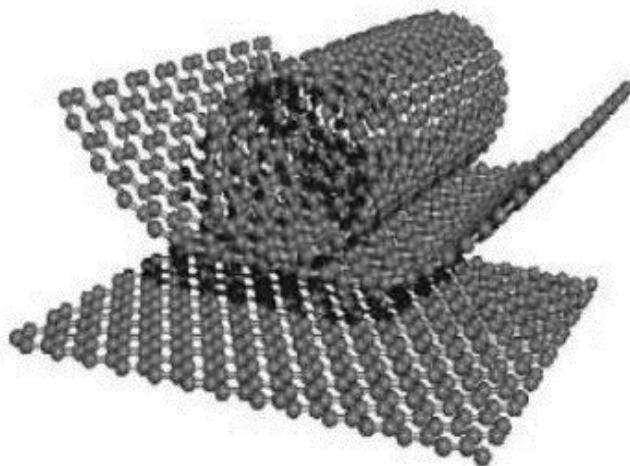
**TEM** : microscopie électronique à transmission.

**ITO** : oxyde d'étain-indium

**MWCNT** : (Multi-Walled Carbon Nanotubes): nanotubes à parois multiples.

**ZnO** : d'oxyde de zinc

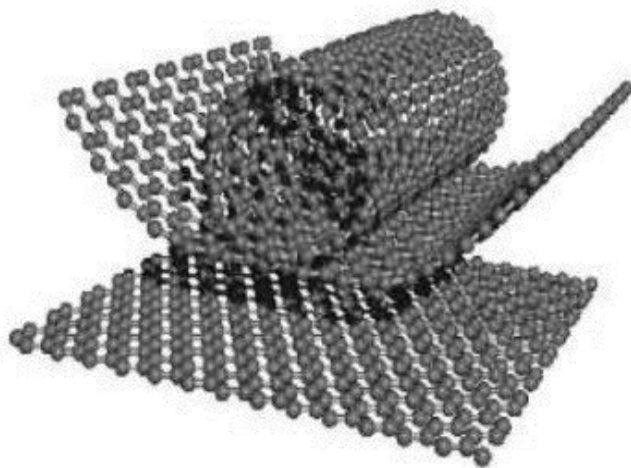
# *Liste des notations*



## Liste des notations

- $A_{ij}$ ,  $B_{ij}$ ,  $C_{ij}$ ,  $D_{ij}$  : Sont la rigidité de la plaque,
- $b$  : Paramètre dépend de la nature et de la géométrie du matériau
- $E$  : est le module de Young à la porosité  $P$ ,
- $E_{11}$  : Module de Young équivalente l'axe longitudinal
- $E_{22}$  : Module de Young équivalente l'axe transversal.
- $E_{11}^{cnt}$  : Module de Young de nanotube de carbone suivant l'axe horizontale
- $E_{22}^{cnt}$  : Module de Young de nanotube de carbone suivant l'axe verticale
- $f_E$  : Le paramètre dépendant de la morphologie du grain et de la géométrie des pores
- $f_G$  : L'exposant caractéristique du module de cisaillement.
- $G$  : Le module de cisaillement.
- $G_{12}$  : Module de cisaillement équivalent
- $G_{12}^{cnt}$  : Module de cisaillement de nanotube de carbone
- $h$  : Epaisseur de la plaque.
- $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ,  $\eta_3$  : Les paramètres d'efficacité.
- $\phi_x$ ,  $\phi_y$  : Les rotations de la normale au plan moyen autour des axes  $x$  et  $y$ .
- $P$  : est la porosité
- $P_c$  : Est la porosité critique (seuil de percolation) à laquelle le module de Young effectif devient égal zéro
- $Q_x$  et  $Q_y$  Sont des résultantes des contraintes transversales de cisaillement.
- $Q_{ij}$  : sont les constants élastiques transformés
- $\delta U, \delta V$  : Sont la variation virtuelle de l'énergie de déformation
- $u_0$ ,  $v_0$  : Déplacement des membranes dans les directions  $x$  et  $y$ , respectivement,
- $U_{MN}, V_{MN}, W_{MN}, \theta x_{MN}, \theta y_{MN}$  : sont des paramètres arbitraires .
- $V_s$  : Volume du solide.
- $V_p$  : Volume des pores.
- $V_t$  : Volume total de l'échantillon.
- $V_{cnt}$  : Fraction volumique de nanotube de carbone.
- $V_{CNT}^*$  : Fraction volumique
- $V^p$  : Fraction volumique de la matrice polymère
- $w_0$  : La flèche de la plaque,
- $w_{cnt}$  : Fraction massique du nanotube de carbone
- $\frac{\partial w_0}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial w_0}{\partial y}$  : Les rotations dues à la flexion (sans cisaillement).
- $\rho^{cnt}$  : La masse volumique de la matrice polymère.
- $\rho^p$  : La masse volumique de la matrice polymère.

# ***Introduction générale***



## **Introduction générale**

La science des matériaux est aujourd'hui confrontée à des enjeux majeurs, notamment l'envolée considérable des coûts des matières premières et l'émergence de normes environnementales de plus en plus strictes édictées par les autorités nationales et internationales. Ces défis complexes incitent la communauté scientifique à intensifier ses efforts de recherche pour optimiser les matériaux existants et développer des familles de matériaux innovants. Dans ce contexte, Un nouveau paradigme technologique est en train d'émerger, ouvrant la voie à des innovations transversales: miniaturisation accrue des dispositifs, optimisation des performances informatiques, avancées dans les télécommunications, progrès thérapeutiques ciblés, ainsi que des solutions pour un écosystème plus durable et des habitats mieux intégrés. Cette révolution s'incarne dans le nanomonde domaine interdisciplinaire regroupant les nanosciences et les nanotechnologies. Apparu il y a deux décennies grâce aux progrès conjoints des techniques de caractérisation et de manipulation à l'échelle atomique, ce champ offre des réponses novatrices aux défis technoscientifiques contemporains. Toutefois, si ces disciplines sont parfois présentées comme une panacée, leur transposition à l'échelle industrielle hors des environnements contrôlés demeure complexe. Les premières applications commercialisées n'ont pas constitué une rupture radicale, mais ont plutôt permis des améliorations incrémentales de produits existants.

Parmi les nanostructures, les nanotubes de carbone se distinguent par l'engouement médiatique qu'ils ont suscité, en raison de leurs propriétés physico-chimiques exceptionnelles. Toutefois, ils incarnent également les risques potentiels associés aux nanotechnologies, alimentant les débats sur leur sécurité. Pour exploiter pleinement leurs performances remarquables, la communauté scientifique a rapidement identifié un impératif technique: la nécessité de les disperser de manière individuelle et, idéalement, de les organiser selon un alignement contrôlé. Ces étapes sont essentielles pour optimiser leur intégration dans des applications industrielles ou technologiques.

Ce champ de recherche émergent, à l'interface de multiples disciplines scientifiques (biologie, physique, chimie, etc.), préfigure une révolution industrielle sans précédent. Le développement de systèmes, dispositifs ou architectures à l'échelle nanométrique offre des avantages majeurs en termes d'économie d'énergie et de réduction de l'utilisation de matières premières, tant lors de leur fabrication que lors de leur fonctionnement opérationnel. Parmi les nanostructures étudiées, les matériaux carbonés constituent un axe central de recherche. Jusqu'en 1985, seules deux phases cristallines du carbone étaient identifiées: le diamant et le graphite. Cette année-là, les travaux pionniers de Kroto et Smalley [Kroto 1985] révélèrent une troisième forme allotropique: les fullerènes. Ces nanostructures en cage fermée, composées exclusivement d'atomes de carbone, ont immédiatement suscité un engouement scientifique international. Par la suite, en 1991, S. Iijima [Iijima 1991] découvrit fortuitement des structures tubulaires au sein des sous-produits de synthèse de fullerènes. Baptisés nanotubes de carbone (NTC) en raison de leur diamètre nanométrique, ces matériaux présentent des propriétés mécaniques remarquables, notamment une résistance exceptionnelle. Toutefois, leur exploitation industrielle se heurte encore à des défis techniques liés à leur manipulation. Leur organisation spatiale et leur intégration fonctionnelle dans des dispositifs complexes.

Depuis trois décennies, une nouvelle famille de matériaux, les nanocomposites, s'est imposée grâce à l'intégration de nanoparticules. Ces matériaux suscitent un intérêt majeur dans les milieux académiques et industriels en raison des propriétés améliorées qu'ils offrent. Leur conception vise à exploiter les caractéristiques avantageuses de composants distincts, créant ainsi un système synergétique optimisé pour des applications spécifiques. Cette approche permet de

répondre à des exigences techniques accrues tout en élargissant les possibilités d'innovation dans divers secteurs.

La fabrication des nanocomposites à renfort de nanotubes de carbone à gradient fonctionnel (FG-CNT) présente des défis techniques importants, notamment en raison de la complexité des procédés industriels susceptibles d'induire des défauts de porosité. Ces imperfections, sous forme de microcavités contenant des résidus gazeux, résultent principalement d'une extraction imparfaite de l'air lors de la production, influencée par des paramètres tels que la viscosité de la matrice polymère, les conditions de pression sous vide ou l'humidité résiduelle lors du stockage. Ces porosités altèrent significativement les propriétés mécaniques des structures, comme le démontre l'étude de [Sahmani 2018] sur le comportement en flexion non linéaire de micro/nano-poutres poreuses à gradient fonctionnel renforcées de graphène, modélisé via la théorie des gradients de déformation non locaux.

Cette étude a pour finalité d'examiner, dans un cadre statique, les propriétés mécaniques de plaques sandwich nanocomposites présentant des distributions de porosité variables. Dans cette optique, une méthodologie analytique fondée sur la théorie des plaques à déformation en cisaillement d'ordre supérieur a été mobilisée.

Ce mémoire de master rassemble l'ensemble des recherches et résultats obtenus sur les structures sandwich poreuses renforcées à l'aide de nanotubes de carbone. Structuré en cinq chapitres, il présente la démarche chronologique et scientifique adoptée pour répondre aux objectifs définis, tout en mettant en lumière les conclusions significatives issues de cette étude.

Le premier chapitre portera une synthèse bibliographique axée sur les nanotubes de carbone, En Commençons par un bref historique et les différentes allotropies de nanotubes de carbone en détaillant leurs classifications, les différentes techniques de synthèse tel que la méthode d'ablation laser, l'arc électrique, dépôt chimique en phase vapeur et la méthode dite (HiPCO), en plus les propriétés mécaniques et optiques, Nous discuterons ensuite des méthodes de purification du carbone. . De nombreuses applications seront ensuite présentées. Enfin, nous donnerons les Défauts des nanotubes de carbone et nous s'intéressons à leurs applications et leurs risques.

Le second chapitre abordera les notions fondamentales relatives aux polymères, en détaillant leurs classifications et leurs domaines d'application. Il étendra ensuite cette analyse aux matériaux composites et nanocomposites, avec un focus spécifique sur ces derniers. Une attention particulière sera portée à la caractérisation des nanocomposites, incluant leur typologie, leurs propriétés physico-chimiques, ainsi que les mécanismes de dispersion des charges renforçantes au sein de la matrice polymère. Enfin, le chapitre examinera les procédés de fabrication des nanocomposites à base de polymères chargés de nanotubes de carbone (NTC), en mettant l'accent sur les méthodes d'intégration optimale des nanorenforts.

Le troisième chapitre sera consacré à l'exposition de la problématique centrale de cette étude, en décrivant la configuration géométrique spécifique d'une structure sandwich intégrant un nanotube de carbone comme élément de renforcement. Une analyse méthodique sera développée pour expliciter le processus de modélisation, en détaillant les différentes étapes de modélisation et présenté les déférentes théories de déformation afin d'établir rigoureusement les fondements de la formulation mathématique associée au système.

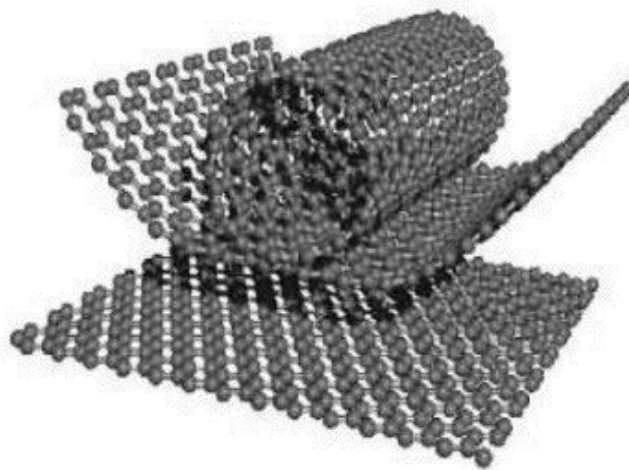
Afin d'approfondir la compréhension des mécanismes liés à la porosité dans les matériaux, le troisième chapitre est consacré à l'étude des matériaux poreux et de leurs caractéristiques porométriques.

Le dernier chapitre sera dédié à la présentation des résultats et à l'analyse critique du modèle développé. Il exposera les données numériques issues de cette étude analytique, portant sur le comportement statique de plaques sandwich nous composites soumises à différentes distributions de porosité. En s'appuyant sur la théorie des plaques de déformation par cisaillement d'ordre élevé, nous avons étudié l'influence de plusieurs types de distribution de nanotubes de carbone (NTC) - uniforme (UD-CNT) f fonctionnellement graduée (X-CNT, O-CNT, V-CNT, A-CNT) sur le comportement statique de ces structures (Impact de la porosité et des distributions de NTC sur le comportement statique des plaques sandwich).

Nous allons présenter des résultats qui concernent l'étude du Le comportement statique d'une plaque sandwich nano-composite sous différente distribution de porosité sous forme des tableaux et des graphes.

Pour terminer, nous clôturons notre étude par une synthèse globale des résultats issus de cette recherche, en intégrant des pistes de réflexion pour des travaux ultérieurs.

# ***Chapitre I : Les nanotubes de carbone : structures, propriété et applications***



## I.1 Introduction :

La découverte des nanotubes de carbone (CNT : Carbone Nanotube) a commencé en 1991 par un groupe de chercheur japonais, selon leur structure, il y a les nanotubes multi-parois (Multi Walled CNT) qui ont été observés pour la première fois en microscopie électronique à transmission (TEM) par Iijima en 1991, et les nanotubes mono-parois (Single Walled CNT) qui ont été observés indépendamment par Iijima et Béthune en 1993 a permis d'explorer un nouveau monde à l'échelle nanométrique qui nous promet des produits plus petits, plus légers et moins onéreux. Les propriétés mécaniques et électriques exceptionnelles des NTCs ont éveillé l'esprit des scientifiques afin de concevoir des systèmes touchant le domaine de la nanotechnologie.

Les nanotubes de carbone (NTCs) constituent l'une des classes de nanomatériaux les plus intensivement étudiées en raison de leur utilisation potentielle dans un certain nombre d'applications.

Les nanotubes de carbone sont une forme allotropique du carbone appartenant à la famille des fullerènes. Ils sont composés d'un ou plusieurs feuillets d'atomes de carbone disposés en réseau hexagonal, comme un nid d'abeilles, et enroulé sur lui-même comme un cigare. Les NTC sont chimiquement liés par des liaisons  $sp^2$ , une forme extrêmement forte d'interaction moléculaire. Cette caractéristique, combinée à l'inclinaison naturelle des nanotubes de carbone à se relier par les forces de Vander Waals, offre l'opportunité de développer des matériaux ultra-résistants et légers. Le tube peut être fermé ou non à ses extrémités par une demi-sphère. On distingue les nanotubes de carbone simple-feuillet et multi-feuillets.

Les nanotubes de carbone (100000) fois plus fin qu'un cheveu et (100) fois plus résistant et (6) fois plus léger que l'acier. Leurs avantages ne s'arrêtent pas là, il est flexibles, conducteurs et possèdent d'excellentes propriétés mécaniques, thermiques et électriques, toutes ces propriétés conduisent de nombreuses applications notamment dans la conception de nouveaux matériaux. [Haouli et Hallouz 2018]

## I.2 L'origine des nanotubes de carbone :

Élément fondamental de la vie, le carbone est un atome capable de se lier d'une manière variée à un grand nombre d'atomes différents, ce qui lui permet d'offrir des possibilités de synthèse multiples. Cette versatilité est due à sa structure électronique particulière [ $1s^2_2s^2_2p^2$ ].

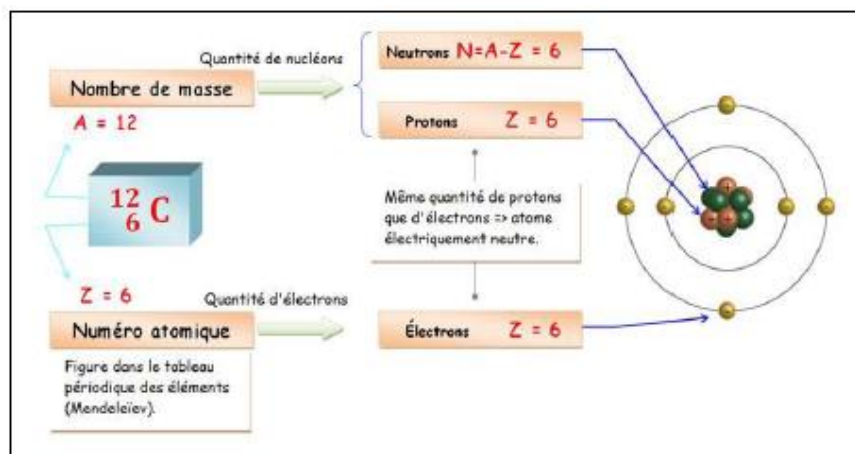
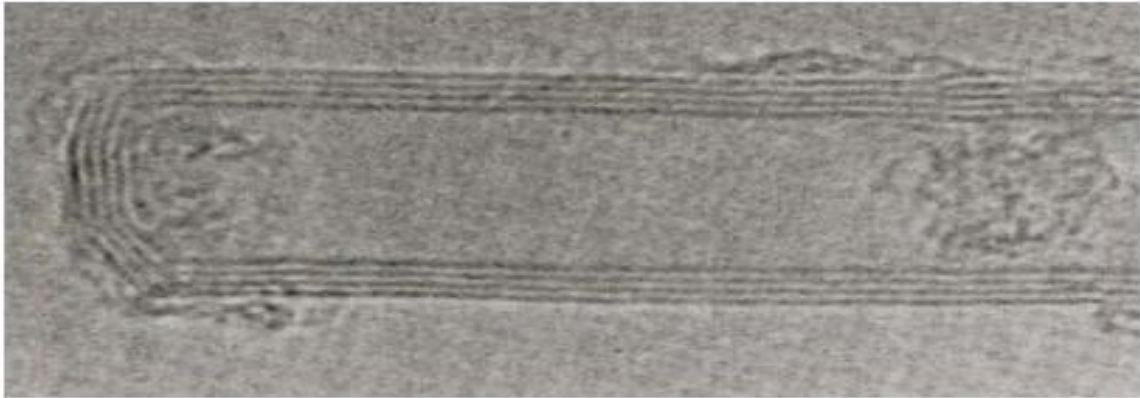


Figure I. 1 : Atome du carbone

Les formes traditionnelles du carbone sont le graphite, le diamant, les carbones mal organisés. De nouvelles formes du carbone ont été récemment découvertes, tels que les fullerènes, les nanotubes multi feuillets, les nanotubes mono feuillets. [Charlotte Bernard 2007].

L'étude des nanotubes de carbone a été poursuivie dans les années 60 où ils ont tout d'abord été considérés comme un sous-produit d'un procédé chimique industriel pour la production de fullerènes par Bacon.



**Figure I.2 :** Image MET de l'extrémité d'un nanotube multicouche.

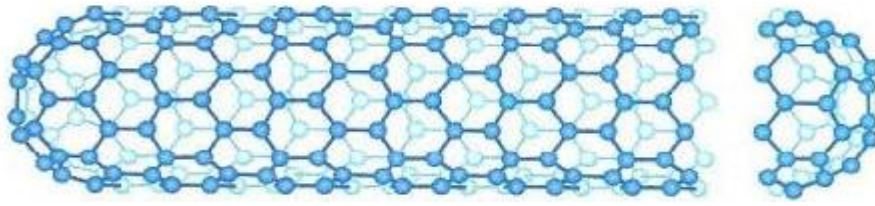
Les nanotubes de carbone furent découverts en 1991 par le japonais Sumio Iijima, dans des suies issues d'une synthèse de fullerènes par arc électrique. [Iijima 1993]. En 1992, Thomas Ebbesen, un collègue d'Iijima, mettait au point une méthode de synthèse de nanotubes multicouches en grandes quantités [Ebbesen 1992]. Il s'agissait également d'un réacteur à arc électrique, mais à des pressions en He plus élevées (500 torr) que celles employées pour la synthèse du (C60).

En 1993, les équipes d'Iijima [Chih-Chao Yen 1996] et de Béthune [Chih-Chao Yen 1999] publient successivement la découverte de l'existence des nanotubes de carbones mono-parois SWCNTs. Depuis, un intense effort de recherche a été entreprise pour améliorer notre connaissance des NTCs.

### **I.3 Les Nanotubes de carbone:**

Les nanotubes de carbone (CNT) ont été découverts en 1991 par le chercheur japonais Sumio Iijima, lors de l'analyse de suies issues de la synthèse de fullerènes par arc électrique [Iijima 1993]. Ces structures ont été observées dans les dépôts de suie obtenus lors de la décharge d'un arc électrique entre deux électrodes de carbone.

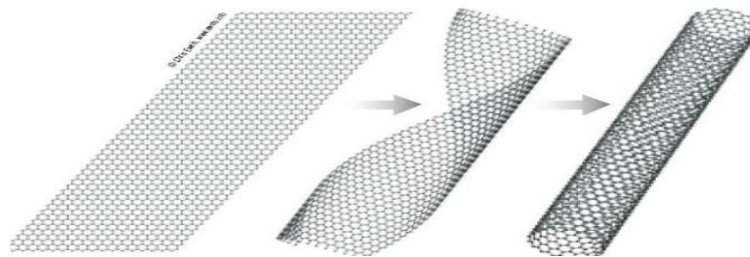
D'un point de vue structurel, un nanotube de carbone est composé d'un ou de plusieurs feuillets de graphène enroulés sur eux-mêmes, formant une géométrie tubulaire. Un nanotube de carbone parfait voit généralement une demi-sphère de fullerène fermer chaque extrémité du tube (Figure I.3).



**Figure I.3 :** Représentation d'un nanotube de carbone avec les extrémités fermées

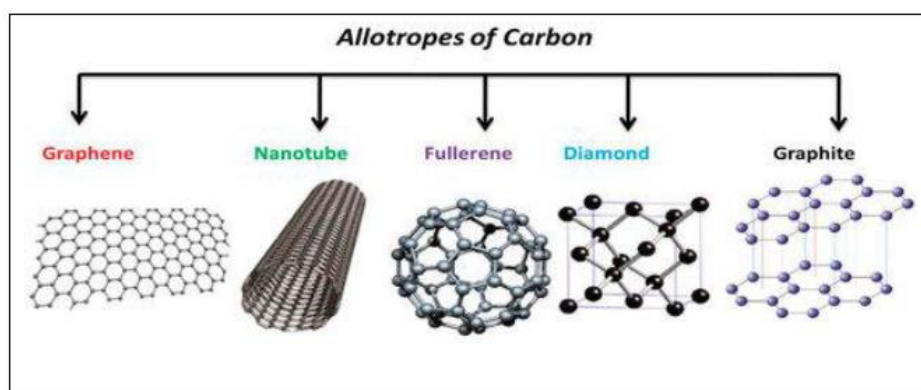
Ainsi, à partir de la structure bidimensionnelle (2D) du feuillet de graphène, on obtient un CNT avec une structure cylindrique unidimensionnelle (1D) dont le diamètre est de l'ordre du nanomètre [Bozlar, 2007]. La courbure des plans de graphène constitutifs des CNT induit une modification partielle de l'hybridation des liaisons C-C. Plus la courbure du tube est importante, et donc le diamètre petit, plus l'hybridation  $sp^2$  sera altérée. On observe alors un caractère  $sp^3$  partiel des liaisons constitutives des parois des CNT.

La courbure des plans de graphène constitutifs des CNT induit une modification partielle de l'hybridation des liaisons C-C. Plus la courbure du tube est importante, et donc le diamètre petit, plus l'hybridation  $sp^2$  sera altérée. On observe alors un caractère  $sp^3$  partiel des liaisons constitutives des parois des CNT [Florent, 2011].



**Figure I.4 :** Structure d'un nanotube de carbone

#### I.4 Les différentes phases allotropiques naturelles du carbone :



**Figure I.5 :** formes allotropiques du carbone

Les différentes hybridations du carbone sont à l'origine de la formation des formes allotropiques du carbone, les diamants, les graphites et les fullerènes.

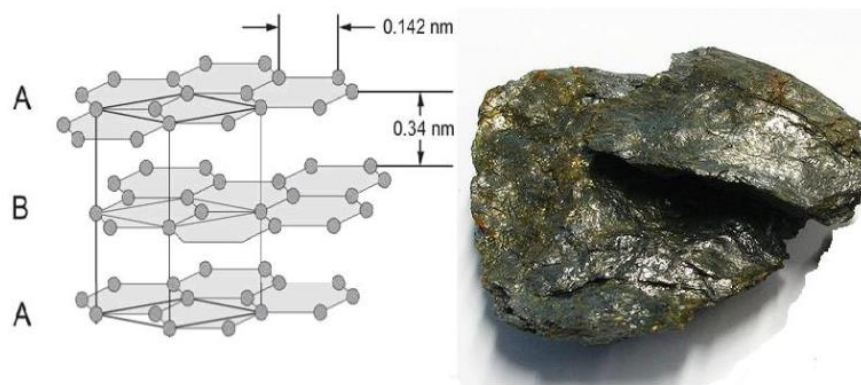
**I.4.1 Les structures cristallines du graphite:**

Le graphite se caractérise par une structure en couches, chaque couche étant un plan de graphène constitué d'atomes de carbone hybridés  $sp^2$ . Ces atomes forment un réseau hexagonal régulier, avec un paramètre de maille de 0,243 nm et une longueur de liaison C-C de 0,142 nm.

L'empilement de ces plans de graphène peut se faire de deux manières, donnant naissance à deux formes cristallines distinctes:

- ✚ Graphite hexagonal: C'est la forme la plus stable. Les plans de graphène s'empilent de manière régulière, avec une distance inter-feuillets de G, 335 (voir Figure I.6.1).
- ✚ Graphite rhomboédrique : Cette forme est métastable. L'empilement des plans de graphène est différent, chaque plan étant décalé d'une longueur de liaison par rapport au précédent. La distance inter-feuillets reste de 0,335 nm.

Bien que la croissance de monocristaux de graphite soit possible, le graphite courant est généralement un poly cristal. Il est constitué de petites cristallites de graphite hexagonal, orientés de manière aléatoire. C'est ce type de graphite que l'on trouve par exemple dans les mines de crayon.



**Figure I.6:** Structure du graphite hexagonal.

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

**I.4.2 Le diamant :**

Le diamant est l'allotropie de carbone la plus connue. Il est constitué d'un assemblage d'atomes de carbone en hybridation  $sp^3$ , où chaque atome est lié à quatre atomes de carbone par des liaisons covalentes fortes  $\sigma$ .



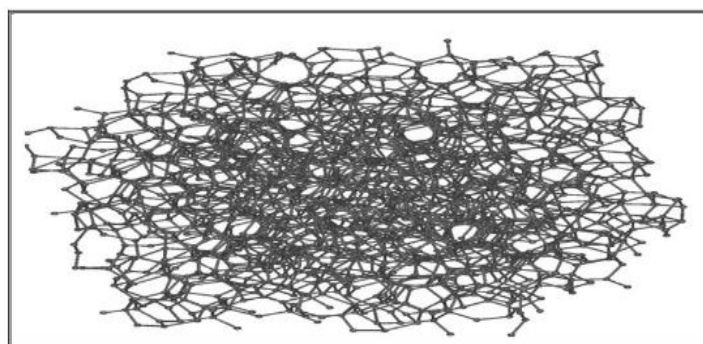
**Figure I.7:** a) Structure cristalline b) Orbitales hybrides  $sp^3$  de carbone de diamant

Les atomes de carbone dans cette structure se combinent entre eux, par des liaisons covalentes, dans des tétraèdres pour former un réseau tridimensionnel, qui sont des structures cristallines cubiques à faces centrées. En conséquence, le diamant a une dureté et conductivité thermique les plus élevées. Les diamants ne réagissent généralement pas avec les réactifs chimiques, y compris les acides et les bases forts. Parmi les utilisations des diamants, nous citons : les outils de coupe, de perçage et de meulage, les bijoux, et dans l'industrie des semi-conducteurs [Falcao and Wudl 2007].

### I.4.3 Carbone "mal organisé" :

Le carbone amorphe se caractérise par un arrangement désordonné de ses atomes, contrairement aux structures cristallines ordonnées comme le diamant ou le graphite. Il présente des Hybridations  $sp^2$  et  $sp^3$ , ce qui signifie que les atomes de carbone peuvent former des liaisons avec leurs voisins de différentes manières.

Le carbone amorphe est utilisé dans diverses applications industrielles, notamment comme revêtement pour améliorer la tenue mécanique de pièces. Dans ce cas, il est souvent combiné à de l'hydrogène. Une autre forme de carbone mal organisée est le noir de carbone, composé de nanoparticules sphériques utilisées dans l'encre de Chine.



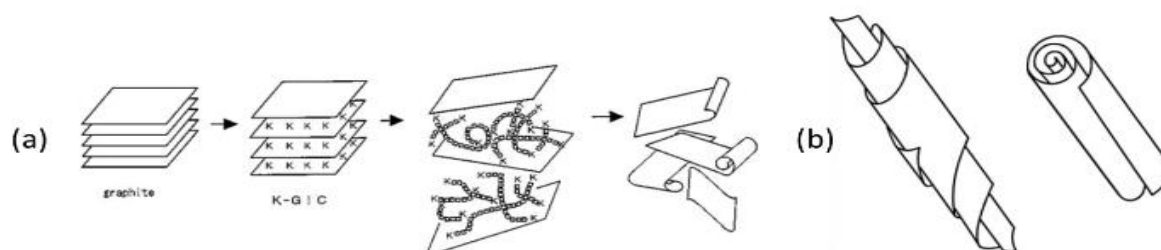
**Figure I.8 :** Représentation moléculaire de carbone amorphe

## I.5 Les formes allotropiques du carbone :

### I.5.1 Le Graphène :

Déjà connu de la communauté scientifique, le graphène est le plan monoatomique de carbone  $sp^2$  qui compose le graphite. Pendant longtemps, le plan de graphène bidimensionnel (2D) isolé

est resté un objet théorique, utilisé notamment pour décrire les propriétés des différents matériaux graphitiques. De nombreux scientifiques ont consacré leurs recherches dans l'extraction de feuillets de graphène à partir de graphite. Les premières tentatives ont débuté avec des travaux d'intercalation du graphite, c'est-à-dire d'intercalation de molécules assez grosses pour pouvoir séparer les feuillets de graphène. Les résultats permirent d'établir que les feuillets isolés ne sont pas stables et s'enroulent sur eux même.



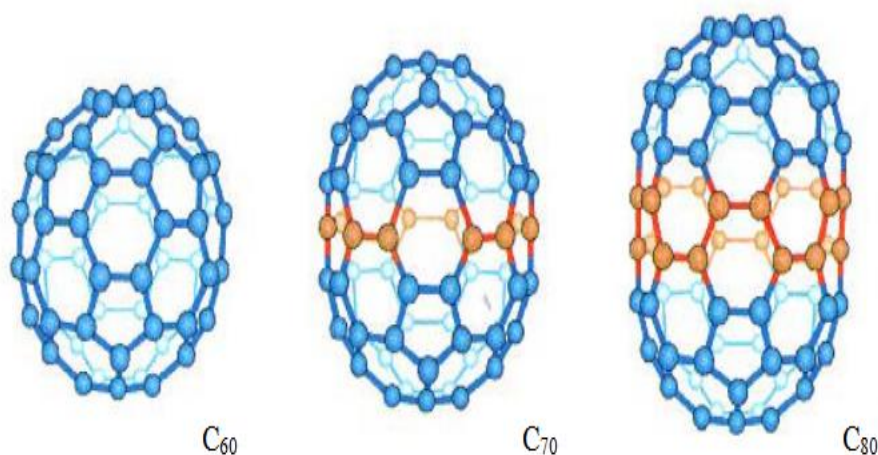
**Figure I.9 :**(a) Diagramme schématisant des composés entre les feuillets de graphène; (b) image imaginaire de l'enroulement d'un feuillet de graphène

Le graphène est dorénavant plus facilement synthétisable que les nanotubes de carbone et peut dès lors concurrencer l'industrie du silicium pour l'électronique

### I.5.2 Fullerène :

Les fullerènes ont été découverts en 1985 par Harold Kroto, Robert Curl et Richard Smalley.

Les fullerènes sont des allotropies du carbone constitué de molécules ayant la forme d'une sphère, d'un ellipsoïde, d'un tube (nanotube) ou d'un anneau. Les fullerènes sont similaires au graphite, composé de feuilles d'anneaux hexagonaux liés, mais ils comportent des anneaux pentagonaux et parfois heptagonaux, ce qui courbe la feuille. Les fullerènes sont la troisième forme allotropique connue du carbone, après le graphite et le diamant.



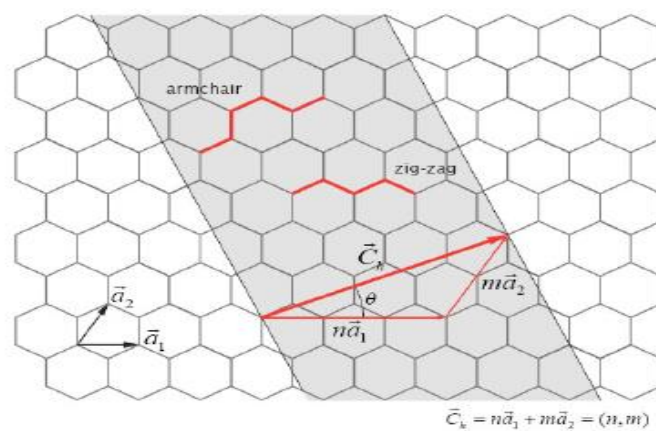
**Figure I.10 :** Du C<sub>60</sub> au C<sub>80</sub> : les atomes ajoutés au C<sub>60</sub> pour obtenir le C<sub>70</sub> et le C<sub>80</sub> sont Représentés en rouge.

## I.6 structure des nanotubes de carbone :

### I.6.1 Nanotubes de carbones mono-feuillets, SWNT (Single Walled Nanotube) :

Les nanotubes de carbones mono feuillets (Single Wall Nanotubes, SWNT) ont été découverts en parallèle par Béthune et Iijima en 1993.

Le SWNT [Obratzsova,04; Williams,99] est une structure tubulaire parfaitement rectiligne constituée d'un seul feuillet de graphène enroulée sur elle-même, de manière à former un cylindre unique. Le nano-objet obtenu est alors unidimensionnel. Les atomes de carbone restent dans un état d'hybridation  $sp^2$ . Le nanotube idéal ainsi formé présente deux extrémités, qui peuvent être fermées par deux dômes, comme des demi-fullerènes, mais pouvant comporter des défauts dans le cas d'un nanotube réel. [Charlotte 2007].



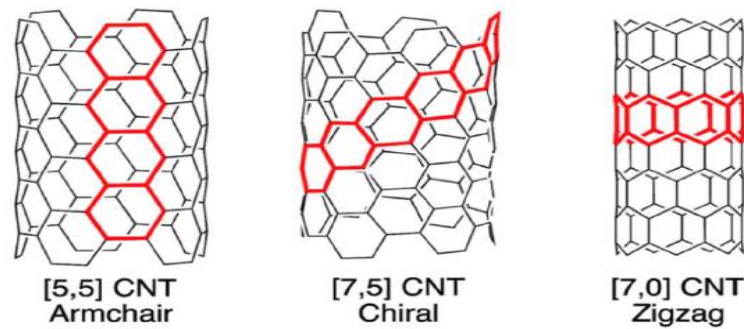
**Figure I.11 :** Structure d'un plan de graphène en deux dimensions. Le réseau hexagonal est décrit à partir des deux vecteurs de base  $\mathbf{a}_1$  et  $\mathbf{a}_2$ .

Il existe deux bases possibles pour définir des coordonnées sur un plan hexagonal comme le graphène. L'angle entre les vecteurs de base  $\mathbf{a}_1$  et  $\mathbf{a}_2$  peut être de  $60^\circ$  ou de  $120^\circ$ . Hamada, a utilisé une base de  $120^\circ$  pour définir les coordonnées des nanotubes, tandis que Dunlop, a utilisé une base de  $60^\circ$ . La notation à deux indices retenue aujourd'hui utilise la base de  $60^\circ$  de Dunlop, mais est appelée, abusivement, relation de Hamada.

L'angle  $\theta$  entre  $\mathbf{C}_n$  et le vecteur de base  $\mathbf{a}_1$  est appelé angle chiral. Les nanotubes se divisent en deux familles les nanotubes chiraux et les nanotubes non chiraux. Les nanotubes non chiraux possèdent une symétrie miroir, ce qui n'est pas le cas des nanotubes chiraux. Les hexagones dessinent une hélice sur la surface du nanotube.

Selon les valeurs de  $m$  et  $n$ , on définit trois types de nanotubes :

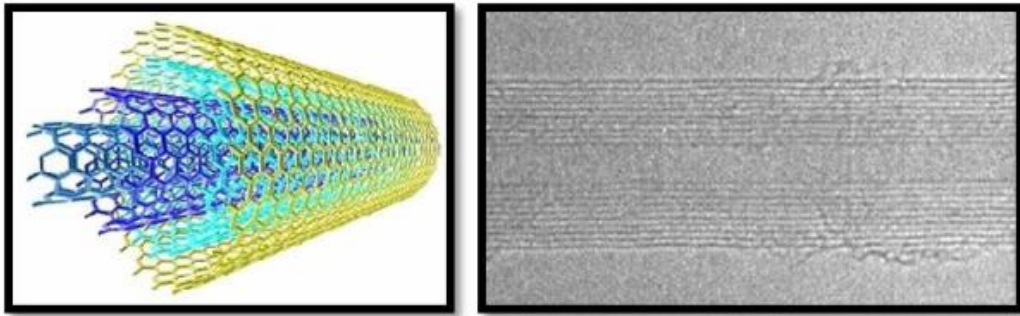
- Si  $m=0$  ou  $n=0$ , on dira que le nanotube a une structure de type zig-zig.
- Si  $m=n$ , on dira que le nanotube a une structure de type fauteuil ou armchair.
- Dans les autres cas, on dira que le nanotube est chiral. [Haddad 2010]



**Figure I.12 :** Les types des nanotubes de carbone : armchair, zig-zig et chiral

### I.6.2 Nanotubes de carbones multi-feuillets, MWNT (Multi Walled Nanotubes) :

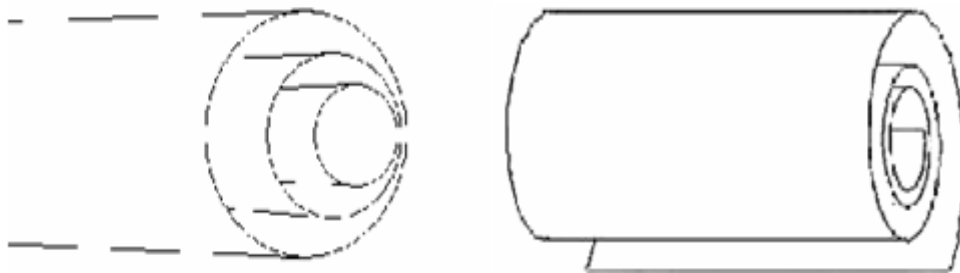
Qui sont constitués de plusieurs feuillets de graphène de 0.340nm enroulés les uns autour des autres. Ils se présentent comme des tubes creux concentriques avec un diamètre interne de l'ordre du nanomètre et une longueur de l'ordre de quelques micromètres (figure I.17).



**Figure I.13:** À gauche : présentation graphique d'un MWNT et à droite : image de microscope électronique à transmission de plusieurs MWNT

Il existe deux modèles pour décrire la structure des nanotubes multi feuillets.

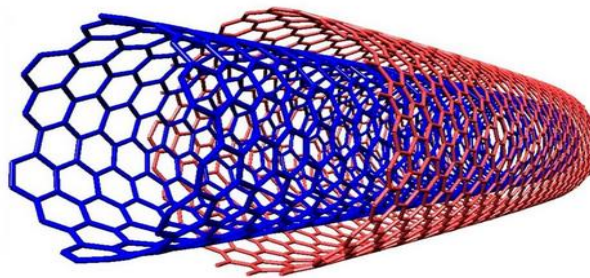
- Le modèle poupée russe: les plans de graphène sont arrangés en cylindres concentriques.
- Le modèle parchemin: un seul feuillet de graphène est enroulé sur lui-même, comme une feuille de papier.



**Figure I.14 :** type poupée ruse à gauche : type rouleau de parchemin à droite

### I.6.3 Nanotubes de carbones double feuillets, DWNT (double Walled Nanotubes) :

Les nanotubes de carbone à double paroi (DWCNTs), schématisés dans la Figure I.8.3.a, sont typiquement composés d'un grand nombre de feuilles de graphène imbriquées les unes dans les autres. Le diamètre externe d'un DWCNT peut varier de 1,6 à 5 nm, tandis que le diamètre interne se situe entre 0,8 et 1,2 nm. Des études ont montré que les DWCNTs utilisés comme émetteurs d'électrons sous champ [ZHA 2013] ont des tensions de seuil similaires à celles des SWCNTs, mais avec une durée de vie beaucoup plus longue. De plus, la fonctionnalisation chimique de la surface externe des DWCNTs pourrait conduire à de nouveaux matériaux fonctionnels à base de CNTs, avec un nanotube externe fonctionnalisé et un nanotube interne intact.



**Figure I.15:** Représentation schématique d'un nanotube à double parois

**Tableau I.1 :** Comparaison entre SWNT et MWNT [Iijima et Ichihashi 1993]

| SWNT                                                                                                                          | MWNT                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Une seule feuille de graphène                                                                                                 | Plusieurs feuilles de graphène                                                          |
| Sa synthèse nécessite un catalyseur                                                                                           | Peut être produit sans catalyseur                                                       |
| La synthèse en masse est difficile car elle nécessite un contrôle approprié de la croissance et des conditions atmosphériques | La synthèse en masse est facile                                                         |
| La pureté est faible                                                                                                          | La pureté est élevée                                                                    |
| La chance de défaut est plus importante pendant le fonctionnement                                                             | La chance de défaut est moindre, mais une fois survenu, il est difficile de s'améliorer |
| Moins d'accumulation dans le corps                                                                                            | Plus d'accumulation dans le corps                                                       |
| La caractérisation et l'évaluation sont faciles                                                                               | Il a une structure très complexe                                                        |
| Il peut être facilement tordu et est plus Souple                                                                              | Il ne peut pas être facilement tordu                                                    |

### I.7 Méthode de synthèse de nanotube de carbone :

Les méthodes de synthèse existent pour produire des NTC. Les trois principales méthodes de production utilisées pour la synthèse des CNT sont la décharge à l'arc, l'ablation au laser et le dépôt chimique en phase vapeur (CVD). [Francis 2016]

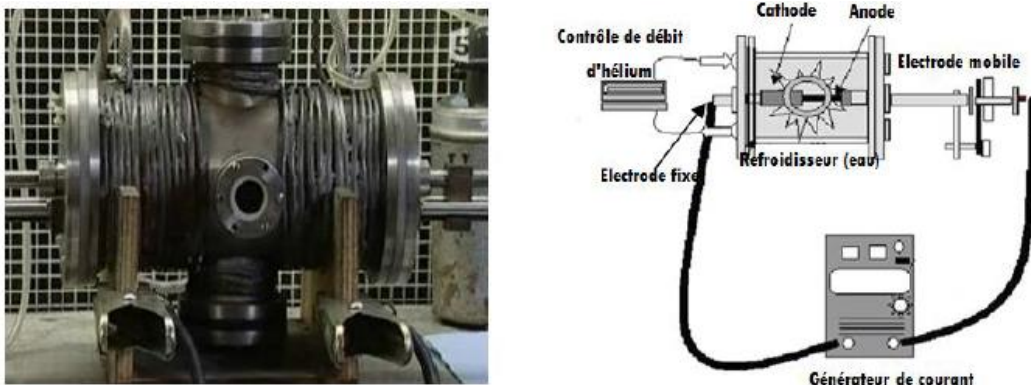
### **I.7.1 Méthode de l'arc électrique**

La méthode de synthèse de nanotubes de carbone mono-paroi par arc électrique a été décrite pour la première fois par Iijima.

La méthode est schématisée sur la figure I.9.1. Dans cette méthode, on utilise des électrodes de carbone d'environ 5-20 mm de diamètre, séparées d'environ 1 mm. Entre ces électrodes, on applique une tension de 20-25 V et un courant continu d'environ 50-120 A.

L'expérience s'effectue généralement sous une pression d'hélium d'environ 500 tons et avec un flux d'environ 5-15 ml.s<sup>-1</sup>. Lorsque l'arc électrique est en fonctionnement, un dépôt de carbone se forme autour de la cathode. C'est dans ce dépôt qu'on trouve les nanotubes de carbone. D'une façon générale, la méthode de synthèse par arc électrique produit des nanotubes avec un diamètre  $\leq 1.5$  nm [Iijima 1993]. Comme pour la méthode d'ablation laser, il est nécessaire d'utiliser des catalyseurs pour obtenir des nanotubes de carbone mono-paroi. Ce sont les mêmes types de catalyseurs qui sont utilisés dans les deux méthodes.

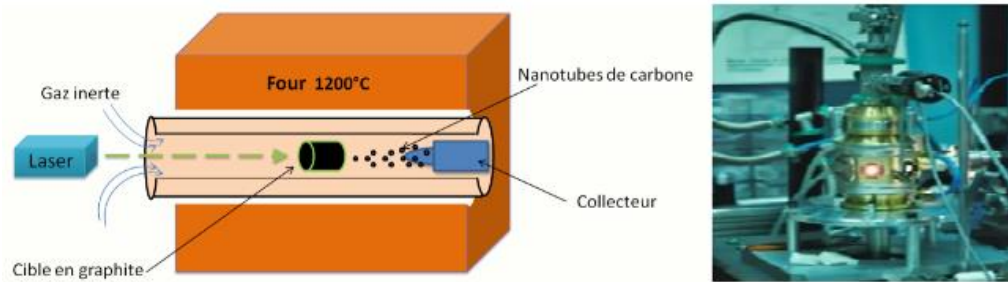
Le produit brut contient lui aussi du carbone amorphe, des fullerènes (en faible quantité), et des restes de catalyseur. Il est donc nécessaire, comme pour la méthode d'ablation laser, de purifier le produit brut avant de pouvoir disposer d'un échantillon ne contenant que des nanotubes, avec les conséquences néfastes que cela entraîne sur la qualité des nanotubes. Enfin, comme la méthode d'ablation laser, la méthode de l'arc électrique permet de produire d'assez grandes quantités de nanotubes de carbone mono-paroi (de l'ordre du gramme/Jour) [Journat 1997].



**Figure I.16:** Schéma de principe du procédé de synthèse par arc électrique (Marcox (2002))

### **I.7.2 Méthode d'Ablation laser :**

Dans la technique d'ablation laser, un laser pulsé vaporise une cible de graphite contenant un catalyseur métallique. Un schéma du dispositif d'ablation laser pour la production de CNT est montré dans la Figure 3.4. La cible de graphite est placée dans un four à environ 1200°C dans une atmosphère inerte. Les CNT se déposent sur la surface plus froide du réacteur, lorsque le carbone vaporisé se condense. Le rendement de la synthèse des nanotubes par ce processus est d'environ 70% [Francis 2016].



**Figure I.17:** L'appareil ablation laser [BOULEROUAH 2011]

## **I.8 Propriétés des nanotubes de carbone :**

Généralement les NTC possèdent les propriétés physiques exceptionnelles, nous allons présenter ici quelques propriétés mécaniques, électroniques, thermiques, optiques et électriques de ces nano systèmes.

### **I.8.1 Propriété thermiques :**

Les nanotubes de carbone ont une conductivité thermique supérieure à celle de l'argent, du cuivre et du diamant (entre 1000 et 2600 W/mK) et constituent les meilleurs conducteurs thermiques connus.

Dans l'industrie, les matériaux carbonés et les fibres de graphite, sont très utilisés dans l'amélioration de la conductivité thermique, où aux alentours de la température ambiante, le diamant et le graphite présentent les plus hautes conductivités thermique jamais mesurées, à titre d'exemple, la conductivité thermique tangentielle du graphite est entre 1000 et 2600 W/mK.

Les mesures montrent que les valeurs de conductivité thermique longitudinale allant de 1800 à 6000 Wm-1K-1 pour un fagot isolé et à température ambiante, où ces valeurs très élevées sont dues à un libre parcours moyen particulièrement élevé pour les phonons.

### **I.8.2 Propriétés optique :**

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

Les nanotubes présentent donc des propriétés d'absorption intéressantes dans l'infrarouge.

## **I.11 Méthode de purification des nanotubes de carbone:**

Différentes stratégies de purification des nanotubes de carbone :

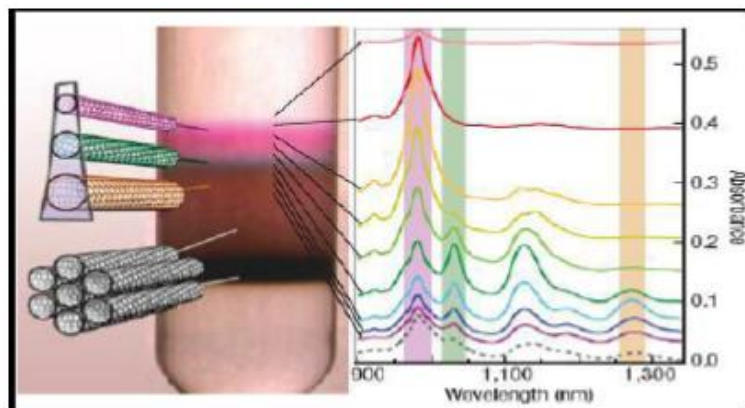
La purification des nanotubes de carbone (NTC) est une étape cruciale pour de nombreuses applications. Elle fait appel à des méthodes variées, allant de l'oxydation sélective (méthode chimique) à la filtration ou la centrifugation (méthodes physiques). Il est rare qu'une seule

technique suffise à atteindre une pureté optimale. Par conséquent, on combine souvent plusieurs approches chimiques et physiques.

Défis posés par les mélanges de nanotubes, Les produits issus de la synthèse de NTC sont souvent des mélanges complexes contenant différents types de nanotubes, notamment des nanotubes multi parois (MWCNT) et des nanotubes mono parois (SWCNT). Ces derniers peuvent avoir des propriétés électroniques distinctes, voire incompatibles pour certaines applications. Par exemple, un mélange de nanotubes métalliques et semi-conducteurs peut poser problème.

### **Techniques de séparation des nanotubes :**

Pour surmonter ces difficultés, des techniques de séparation ont été développées. L'ultracentrifugation en gradient de densité, combinée à l'utilisation de tensioactifs, est une méthode efficace pour séparer les différents types de nanotubes. Cette technique permet de fractionner les fagots de nanotubes, les SWCNT de grand diamètre, les MWCNT de petit diamètre, ainsi que les SWCNT métalliques et semi-conducteurs (**voir Figure I.17**).



**Figure I.18 :** Image des NTC après procédure d'ultracentrifugation, les s-SWNTs et m-SWNT avec petit diamètre, les SWNTs à grand diamètre, et les fagots séparés (à gauche). Spectre d'absorption optique (à droite). [Bernard 2013]

La purification des NTC est un processus complexe qui nécessite une approche multi-étapes. Différentes techniques, telles que l'oxydation, la sonication, l'extraction dynamique initiée par l'hydrothermie et la filtration, sont souvent combinées pour obtenir des NTC de haute pureté avec un rendement élevé.

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

Les applications des NTC dans différents domaines sont énumérées ci-dessous :

Les propriétés électroniques et optoélectroniques des nanotubes de carbone sont à la base d'un vaste domaine d'applications .Les NTC possèdent des propriétés et des qualités remarquables en tant que matériaux de structure, leurs applications potentielles incluent :

- ❖ Les armures corporelles : Les fibres de CNT sont utilisées comme gilet de combat. Les vestes servent à surveiller l'état du porteur et à protéger des balles.
- ❖ Le béton : Les CNT dans le béton augmentent sa résistance à la traction et arrêtent-la propagation de la fissure.

- ❖ Le polyéthylène : Les fibres de CNT peuvent être utilisées comme polyéthylène. Le polyéthylène à base de CNT peut augmenter le module d'élasticité des polymères de 30%.
- ❖ Le matériel de sport : balle de golf, bâtons de golf, raquettes de tennis plus fortes et plus légères, pièces de bicyclettes et bâtons de baseball.
- ❖ Les ponts : Les CNT peuvent être en mesure de remplacer l'acier dans les suspensions et les ponts.

### **I.10.1 Application au Génie Civil :**

Les propriétés spécifiques des nanotubes de carbone peuvent ainsi être transposées dans des matrices, à condition d'assurer une bonne dispersion de l'additif dans le composite.

Des matériaux composites haute performance ou des polymères conducteurs contenant des nanotubes peuvent ainsi être trouvant leurs applications dans l'automobile (peintures conductrices évitant l'emploi de solvants polaires), l'aéronautique (ailes d'avions, trains

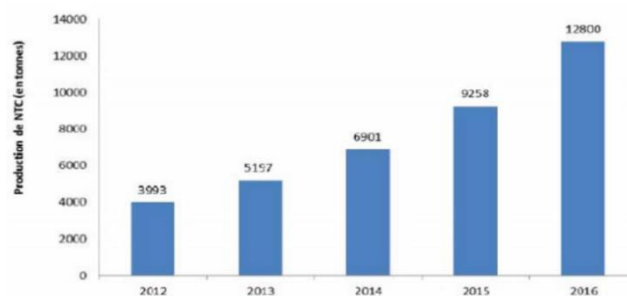
d'atterrissage des hélicoptères, etc.), Il existe d'ailleurs déjà des prototypes utilisés par des sportifs de haut niveau (cyclistes utilisant des vélos dont le cadre est un matériau composite contenant des nanotubes, joueurs de tennis utilisant des raquettes à base de nanotubes de carbone, joueurs de hockey utilisant des crosses dopées en nanotubes de carbone...). Ils peuvent aussi être utilisés comme une peinture anti-fouling enrichie en nanotubes de carbone. [Bernard 2007].

### **I.11 L'utilisation des nanotubes de carbone dans le béton :**

L'utilisation de nanotubes de carbone (NTC) dans le béton vise à améliorer ses propriétés mécaniques, notamment sa résistance à la traction et à la compression, ainsi qu'à améliorer sa durabilité et sa perméabilité. En intégrant les NTC dans le béton, on peut créer un béton renforcé avec une meilleure résistance aux fissures et une meilleure résistance à l'abrasion, tout en réduisant le coût de la construction.

### **I.12 La production mondiale des nanotubes de carbone :**

Aujourd'hui, une centaine de groupes sont connus pour produire des NTC, mais ce nombre pourrait doubler d'ici cinq ans. Par ailleurs, environ 1000 entreprises et institutions sont activement impliquées dans la recherche et le développement de ces technologies.

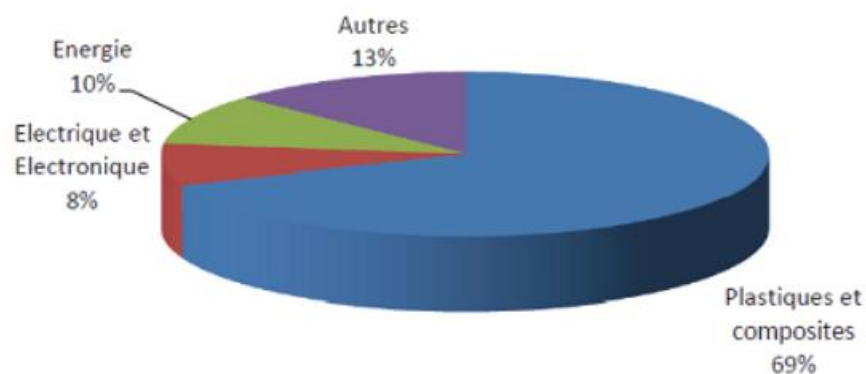


**Figure I.19:**Prévisions d'évolution du marché des nanotubes de carbone de 2012 à 2016, [Tagrara, 2017]

Bien sûr, voici une reformulation du texte, tout en conservant le sens original:

Le marché mondial des nanotubes de carbone (NTC) est principalement dominé par des acteurs clés issus de divers secteurs, et situés majoritairement en Asie (44% en 2010), aux États-Unis (29% en 2010) et en Europe (24%). La production mondiale a connu une croissance importante ces dernières années, dépassant les 2500 tonnes en 2010 et atteignant potentiellement 13000 tonnes en 2016 [Patel, 2011].

Une étude menée par la société de conseil des Consultants pour la Direction Générale de la Compétitivité de l'Industrie et des Services (DGCIS) auprès des entreprises françaises actives dans le domaine des nanomatériaux (NM) a révélé qu'en 2010, 11% des entreprises productrices de NM se positionnaient sur la production de nano fibres et de nanotubes de carbone, ce qui représente plusieurs dizaines de tonnes produites par an pour un budget d'environ 100 M€ .



**Figure I.20:** Secteurs d'activité des nanotubes de carbone en 2012[Maxime, 2013], [Tagrara, 2017]

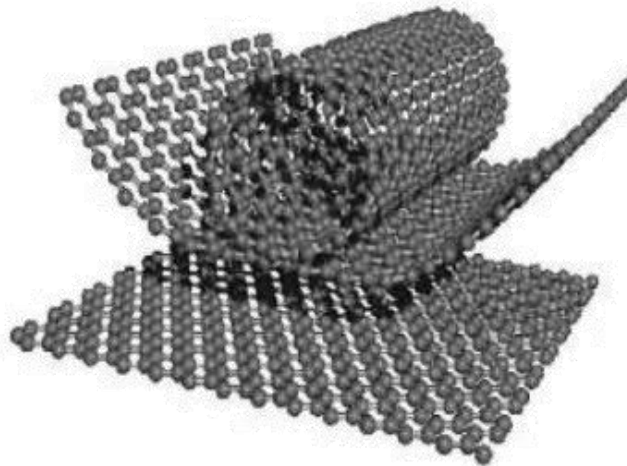
### **I.13 Conclusion :**

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

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

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

## ***Chapitre II : Les nanocomposites: concepts de base et classifications***



**II.1. Introduction :**

Depuis leur découverte les nanotubes de carbone attirent l'attention dans différents domaines des nanosciences et des nanotechnologies et cela grâce à leurs propriétés électroniques et structurales particulières. En 1994, fut le premier à incorporer les nanotubes de carbone dans le composite (Nanotube de carbone-Polymère) pour améliorer les propriétés mécaniques de son matériau (Depuis leur découverte, les nanotubes de carbone NTC sont considérés comme une fascinante réalisation de l'homme).

Afin d'utiliser les CNTs dans des applications réelles, en profitant leurs différentes propriétés extraordinaires, des nano composites CNTs polymères ont été développés. Actuellement, les nano composites à base de matrice polymère sont le plus grand domaine d'application des CNTs. Ces nano composites sont utilisés dans différents domaines, notamment les secteurs des transports, de l'automobile, de l'aérospatiale, de la défense, de l'énergie et des infrastructures. Cela est dû à sa durabilité élevée, sa conductivité électrique élevée, sa haute résistance, sa légèreté, sa conception et sa flexibilité de fonctionnement. De plus, une bonne liaison interrassiale est également requise pour obtenir un transfert de charge significatif à la matrice polymère, une condition nécessaire pour améliorer les propriétés mécaniques des composites.

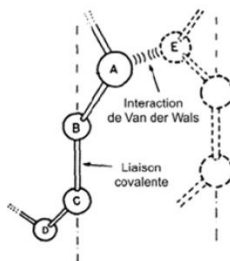
**II.2. Généralité sur la structure des polymères :**

Le terme polymère vient du grec "polus" plusieurs et "méros" parties, ce qui signifie que les polymères sont des matériaux constitués de longues chaînes macromoléculaires.

Les macromolécules sont des structures complexes composées de longues chaînes de petites unités identiques, appelées monomères, qui se répètent. Ces monomères sont liés entre eux par des liaisons chimiques fortes.

En physique, on définit l'unité structurale, ou segment élémentaire, comme la plus petite partie du monomère capable de rotation autour d'une liaison. Chaque segment est caractérisé par sa longueur et l'angle qu'il forme avec les segments voisins.

Les polymères, qui sont un type de macromolécules, sont généralement constitués d'un ensemble restreint d'éléments chimiques: carbone, hydrogène, azote, oxygène, fluor, silicium, phosphore, soufre et chlore.



**Figure II.1** Les liaisons entre les atomes dans les polymères. [Gse 1988]

Le squelette de la macromolécule est le plus souvent composé d'atomes de carbone. D'autres atomes ou des groupements latéraux peuvent être attachés au squelette par liaison primaire. Le [tableau II.1] présente la structure chimique de quelques polymères.

**Tableau (II.1)** Structures chimiques de quelques polymères. [Com 2005]

| Type de polymère                               | Structure chimique                                                                                                                                                                                                   | Domaine d'utilisation                                                                                                                      |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (PE)<br>polyéthylène                           | $H_2C = CH_2$ $* \left( \begin{array}{c} \text{C} - \text{C} \\   \quad   \\ H_2 \quad H_2 \end{array} \right)_n *$                                                                                                  | C'est le matériau d'emballage par excellence.<br>Réservoirs de voitures, bouteilles, flacons, bidons.                                      |
| (PP)<br>polypropylène                          | $H_2C = \begin{array}{c} CH \\   \\ CH_3 \end{array}$ $* \left( \begin{array}{c} \text{C} - \text{C} \\   \quad   \\ H_2 \quad H \\   \quad   \\ CH_3 \quad CH_3 \end{array} \right)_n *$                            | C'est un plastique dur. On le retrouve dans tous les matériaux de plomberie.<br>bouteilles rigides, intérieures de lave vaisselles, cordes |
| (PVC)<br>Le polychlorure de vinyle             | $H_2C = \begin{array}{c} CH \\   \\ Cl \end{array}$ $* \left( \begin{array}{c} \text{C} - \text{C} \\   \quad   \\ H_2 \quad H \\   \quad   \\ Cl \quad Cl \end{array} \right)_n *$                                  | Tuyauterie, pots de margarine, blisters, bouteilles d'eau minérale, barrières extérieures, films d'emballage alimentaire                   |
| (PTFE)<br>Le polytétrafluoroéthylène           | $F_2C = CF_2$ $* \left( \begin{array}{c} F \quad F \\   \quad   \\ \text{---} \text{---} \text{---} \\   \quad   \\ F \quad F \end{array} \right)_n *$                                                               | Tuyaux, joints et raccords.<br>Robinet et vannes pour matériel de laboratoire, revêtements anti-adhérents                                  |
| (PS)<br>Le polystyrène                         | $H_2C = \begin{array}{c} CH \\   \\ PH \end{array}$ $* \left( \begin{array}{c} \text{C} - \text{C} \\   \quad   \\ H_2 \quad H \\   \quad   \\ PH \quad PH \end{array} \right)_n *$                                  | emballages, pots de yaourt, armoire de toilette, cassettes audio, brosses à dents.                                                         |
| (POE)<br>Le poly oxyde d'éthylène              | $H_2C - \begin{array}{c} \text{---} \\ \diagup \quad \diagdown \\ O \end{array} - CH_2$ $* \left( \begin{array}{c} \text{C} - \text{C} - O \\   \quad   \\ H_2 \quad H_2 \end{array} \right)_n *$                    | On l'utilise en cosmétique.                                                                                                                |
| (PMMA)<br>Le poly méthacrylate de méthyle      | $\begin{array}{c} CH_3 \\   \\ H_2C = C \\   \\ O = C - OCH_3 \end{array}$ $* \left( \begin{array}{c} \text{C} - \text{C} \\   \quad   \\ H_2 \quad H \\   \quad   \\ COOCH_3 \quad COOCH_3 \end{array} \right)_n *$ | Plaques pour vitres, globes, feux arrière de voiture, lentilles d'appareils photo                                                          |
| (PA)<br>Les polyamides avec l'exemple du nylon | $H_2N - (CH_2)_{10} - COOH$ $* \left( \begin{array}{c} N - (CH_2)_{10} - C(=O) - O \\   \quad \quad \quad    \\ H \quad \quad \quad O \end{array} \right)_n *$                                                       | On s'en sert pour la fabrication de fibres synthétiques.                                                                                   |

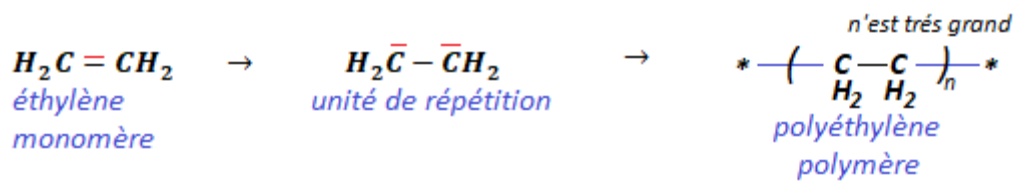
### II.3 Les polymères :

Depuis l'aube de la civilisation, l'homme a utilisé des polymères naturels comme matière à partir de laquelle il pourrait produire des armes, des outils, des vêtements, et un abri. Aujourd'hui, les polymères naturels qui comprennent des matériaux tels que le bois, le caoutchouc, la laine, le coton, la soie, le cuir et le papier ont été par des certaines de polymères synthétiques, communément connu sous le nom de plastique. Les polymères, ces dernières années, ont trouvé une utilisation dans une variété d'application. Certains sont utilisés dans des applications dentaires et médicales. Leur excellente isolation les rend bien adaptés aux applications électriques. En outre, ils ont un usage intensif comme matériaux d'emballage. En

termes d'application mécanique, dans certains systèmes, les roulements, les pignons, les joints sont faits de plastique. En remplacement des métaux, ils sont maintenant largement utilisés pour la fabrication des tubes pour le transport des fluides [Hachour 2010].

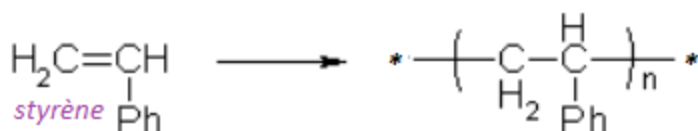
Les polymères sont de grandes molécules (macromolécules), organiques ou inorganiques, composées de chaînes répétées de petites unités, les monomères par des liaisons covalentes. La formation d'un polymère à partir de monomères appelée polymérisation.

**Exemple :**

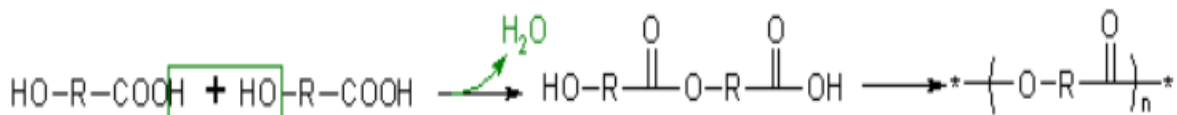


**-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-** est l'unité du polymère.

Tout monomère comporte au minimum deux sites réactifs. La polymérisation sur la double liaison du monomère correspond à l'ouverture de la double liaison.



Il n'y a pas que des doubles liaisons qui forment des polymères :



## II.4 Classification selon le comportement thermique :

Il existe trois grandes familles de polymères selon leurs propriétés thermiques :

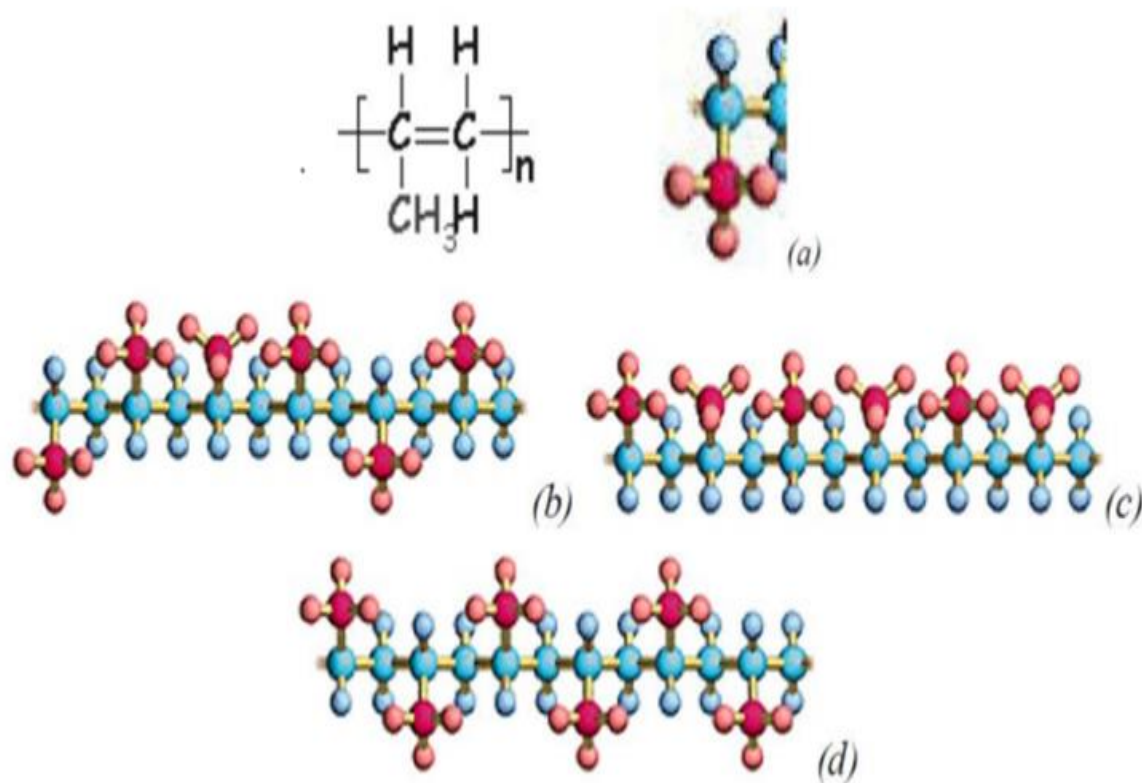
- ✚ Les Polymères thermoplastiques ;
- ✚ Polymères thermodurcissables ;
- ✚ Élastomères.

### II.4.1 Polymères thermoplastiques :

Les thermoplastiques sont des matériaux qui ramollissent à la chaleur, deviennent malléables, puis durcissent en refroidissant. Ce processus, qui conserve leurs propriétés, les rend facilement recyclables. Leur structure moléculaire linéaire, avec des liaisons faibles, permet cette flexibilité sous l'effet de la chaleur ou de contraintes, les rendant remodelables à volonté.

On distingue ainsi trois structures pour les macromolécules à température ambiante. Les structures : atactique, isotactique et syndiotactique. Lorsque la structure est atactique (faible

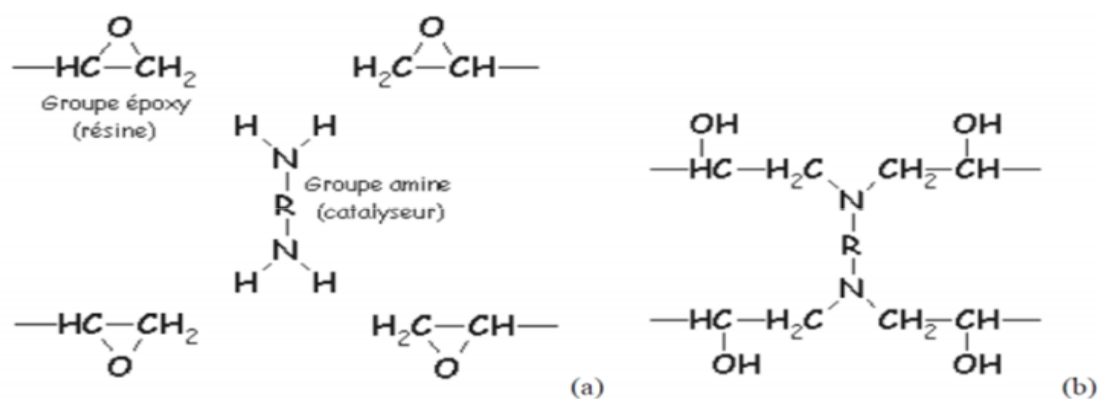
rigidité moléculaire) les groupements sont distribués aléatoirement de chaque côté de la molécule. Compte tenu des interactions établies entre groupements à l'intérieur de la macromolécule, la structure isotactique peut alors prendre une forme hélicoïdale dans l'espace afin de minimiser les énergies d'interaction. Enfin, lorsque la structure est syndiotactique, les groupements alternent de part et d'autre de la chaîne, la molécule peut présenter une forme de zigzag dans un plan.



**Figure II.2.** Exemple du polypropylène (propène), (CHCH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>), (a) représentation du monomère, (b) structure atactique, (c) structure isotactique, (d) structure syndiotactique.

#### II.4.2 les polymères thermodurcissables :

Ces polymères sont constitués de réseaux à mailles serrées. On peut les fabriquer à base de polymères thermoplastiques. Sous l'effet de la chaleur ou en employant un catalyseur, ils forment de nombreuses liaisons covalentes entre chaînes, cette réaction est appelée la réticulation de la résine. Ils durcissent et deviennent alors très rigides. Les ponts entre chaînes ne pourront plus être « fondus » en augmentant la température, ces polymères ne sont pas recyclables. Exemples, la résine époxy, résine polyuréthanes, résine urée formaldéhyde.



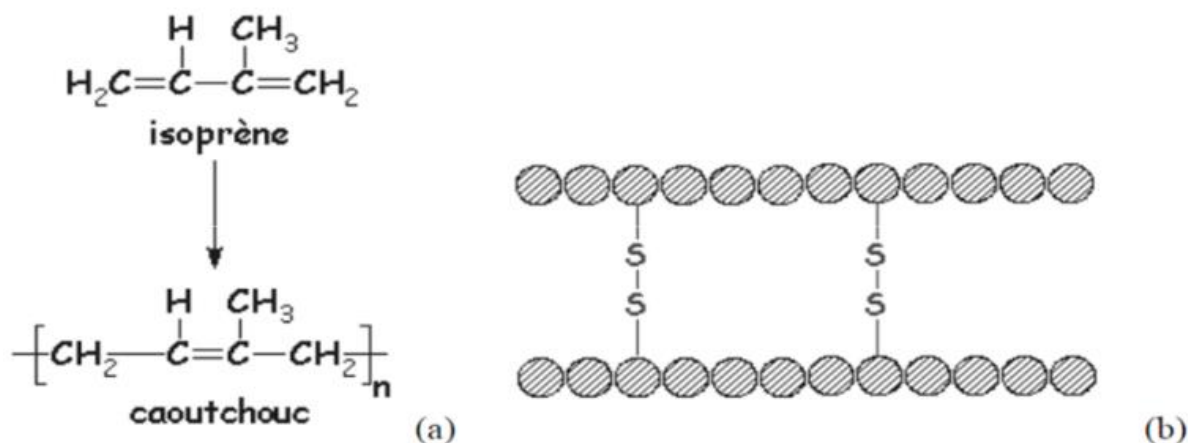
**Figure II. 3 :** Formation d'une résine époxy réticulée à partir de polymère époxy et d'un Catalyseur

### II.4.3 Les élastomères :

Ces polymères sont constitués de réseaux à mailles larges, en outre à température ambiante les liaisons faibles sont fondues. Comme les polymères thermodurcissables, les ponts entre chaînes se forment sous l'effet de la chaleur ou en employant un catalyseur, mais ces ponts restent rares.

Ces polymères ne sont pas recyclables.

Le caoutchouc naturel par exemple est un polymère linéaire de l'isoprène. Il faut charger ce polymère en soufre puis lui appliquer un traitement thermochimique pour que se forment des ponts entre chaînes (pont S). Ce traitement s'appelle la vulcanisation. Alors le caoutchouc devient un élastomère c'est-à-dire un matériau capable de très grandes déformations viscoélastiques.

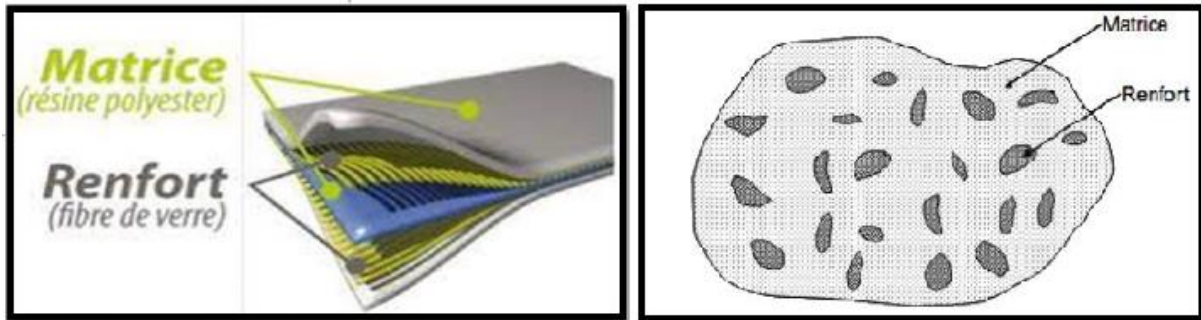


**Figure II.4 :**(a) le caoutchouc naturel, un polymère de l'isoprène, (b) pont (S-S) entre chaînes assurant la cohésion de l'ensemble en l'absence de liaisons faibles, dans le caoutchouc vulcanisé.

### II.5 Présentation des matériaux composites :

Un matériau composite est une combinaison de deux ou plusieurs phases non miscibles qui sont séparés par une interface, ayant des rôles et des propriétés physico-chimiques différentes, et qui se complètent, dans lesquels l'un de ses phases est une phase majeure continue, appelée matrice qui assure la cohésion et le transfert des contraintes vers d'autres phases discontinues mineurs, appelés renforts (dispersée dans la matrice), et son rôle est d'assurer la fonction de

résistance mécanique aux efforts. Le matériau résultant (composite) possède des caractéristiques différentes de celles des composants individuels. Il est spécialisé pour effectuer certains travaux dans certaines situations, par exemple pour devenir plus fort, plus léger, conducteur ou résistant à l'électricité. Ils peuvent également améliorer la force, la rigidité, la flexibilité, etc. Les composites se retrouvent naturellement dans le bois, les dents, etc. [ZERROUKI 2022].



**Figure II.5:** Matériau composite.

### **II.5.1 Les propriétés des matériaux composites :**

Dépendent de trois facteurs :

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

Les renforts au sein d'un matériau composite se distinguent par leur forme, leur taille, leur concentration et leur orientation. La concentration, exprimée en fraction volumique ou massique est un facteur déterminant des propriétés du composite.

La manière dont les renforts sont répartis dans le volume est également cruciale, car elle influence de nombreuses propriétés, comme le démontre la théorie de la percolation, une distribution uniforme garantit que les mesures ne varient pas en fonction du point de prélèvement.

De plus, la géométrie et l'orientation des renforts permettent de contrôler l'anisotropie des caractéristiques souhaitées du composite.

La diversité des formes et des natures des constituants permet de classer les matériaux composites. Selon leur forme, on distingue principalement deux grandes catégories : les composites à particules et les composites à fibres [Berthelot 1999].

### **II.5.2 Domaines d'application des matériaux composites :**

Les matériaux composites fibres-résine sont très prisés pour les structures en raison de leurs excellentes performances mécaniques, notamment leur légèreté et leur résistance. Leur principal atout réside dans leur anisotropie contrôlable, permettrait d'adapter la rigidité et la résistance aux contraintes. Cette capacité d'optimisation pour chaque application, en plaçant le renfort précisément là où il est nécessaire, garantit des performances élevées et une légèreté inégalée. Cependant, leur coût de fabrication élevé limite leur utilisation à des domaines spécifiques! D'où leurs domaines d'application :

- Electricité et électronique,
- Bâtiment et travaux publics,
- Transports routiers, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux (notamment militaire),
- Santé (instrumentation médicale),
- Sports et loisirs (skis, raquette de tennis, planche à voile, surf, club de golf,...)
- Construction navale...

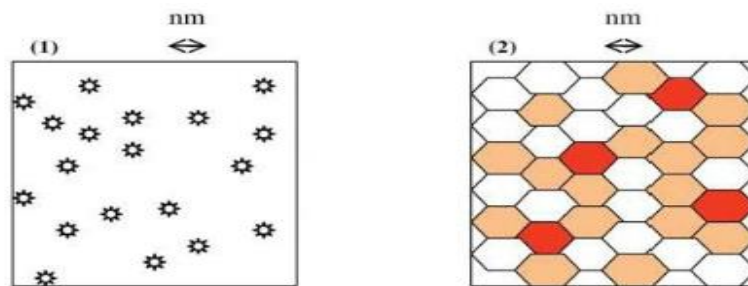
## II.6 Généralité sur les nano composites :

L'idée de combiner des matériaux aux propriétés distinctes pour en améliorer les performances est une pratique ancienne. Des exemples historiques de ce que nous appellerions aujourd'hui des nano composites existent: les peintures mayas, par exemple, utilisaient des nanoparticules métalliques et d'oxyde intégrées dans une matrice de silicate amorphe pour obtenir des colorations spécifiques. De même, en 1917, l'ajout de noir de carbone aux pneumatiques a permis de quintupler leur durée de vie.

Dans le domaine industriel, les composites sont généralement constitués d'une matrice et d'un renfort. Le renfort, qui peut prendre la forme de particules, de tissus ou de structures, assure la résistance mécanique du matériau. La matrice, souvent un polymère, lie les éléments de renfort et contribue à la transmission des contraintes.

Un nano composite, plus précisément, est un système hétérogène composé de plusieurs phases, dont l'une, le renfort, possède au moins une dimension nanométrique. Ce type de matériau présente des propriétés qu'aucun de ses composants ne posséderait seul.

Les nano composites ne sont pas un nouveau phénomène, au contraire, Il se manifeste dans de nombreuses structures naturelles comme les os, les toiles d'araignée, et certaines nanostructures qui produisent par les bactéries ... etc. [ZERROUKI 2022].



**Figure II.6 :** Définition morphologique de nano composites.

- 1) Composite dans lequel les renforts ont une dimension inférieure ou égale au nanomètre
- (2) Matériaux résultant de mélanges multiphasiques, dont la répartition en tailles caractéristiques est voisine de la centaine de nanomètres [Andres 2008]

## II.7 Nano composites à matrice polymères :

Des nanoparticules de formes diverses (lamellaires, tubulaires ou fibrillaires) sont dispersées dans une matrice polymère pour former des nano composites polymères.

Cette dispersion permet d'obtenir des matériaux aux propriétés améliorées ou nouvelles. On peut ainsi classer les nano composites polymères selon la dimension de la charge incorporée. On en distingue trois types:

**II.7.1 Renforts de type 1D :**

Une des dimensions de la charge est de l'ordre du nanomètre. La charge se présente sous la forme de feuillets, tels que des feuillets de graphite ou des feuillets d'argile, comme la montmorillonite [Fabio et al, 2006].

**II.7.2 Renforts de type 2D :**

Si deux des dimensions sont à l'échelle nanométrique, le matériau se forme soit en tubes (nanotubes de carbone), soit en fibres (comme la sépiolite, un silicate aciculaire)

**II.7.3 Renforts de type 3D :**

Ces charges sont des particules sphériques dont les trois dimensions sont à l'échelle nanométrique. On peut citer comme exemples la silice, fréquemment employée dans les silicones, et le noir de carbone, utilisé pour renforcer les pneus [Fina et al 2006].

**II.8 Nano Composites (Nanotube de carbone/matrice Polymère) :**

Les nano composites polymères (PNC) sont des systèmes multi phases largement utilisés dans l'industrie des plastiques (95% de la production).

Ils consistent en une matrice polymère renforcée par des nanoparticules (1-50 nm) de différentes géométries. Ces nanoparticules, incluant les nanotubes de carbone (CNT) et les argiles, confèrent aux composites des propriétés améliorées, telles qu'une résistance mécanique accrue et une conductivité électrique et thermique supérieure.

Les nano composites polymères-CNT se distinguent par leur potentiel multifonctionnel, grâce aux propriétés intrinsèques des CNT."

**II.9 Propriété des nano composites (polymères/NTC) :**

L'incorporation de CNT dans la matrice de polymère a abouti à une modification significative des propriétés mécaniques, optique et thermiques des matrices polymères. De nombreux facteurs qui influent sur la modification des propriétés sont des techniques de traitement, le type de CNT, le rapport d'aspect et le contenu CNT. On observe généralement qu'une méthode de traitement particulière qui est bonne pour une propriété ne peut pas être bonne pour l'autre. Un tel exemple est la modification de la surface du CNT qui améliore généralement les propriétés mécaniques, mais détériore les propriétés électroniques. Il est donc très important d'optimiser les différentes conditions pour obtenir le nano composite avec des propriétés souhaitées. Un certain nombre d'études ont eu pour but d'évaluer les propriétés mécaniques, optique et thermiques du nano composite CNT / polymère dans des conditions différentes et la charge de remplissage.

**II.9.1 Propriété thermiques nano composites (NTC/polymère)**

L'analyse thermogravimétrique (ATG) révèle que l'incorporation de silicates lamellaires exfoliés renforce la stabilité thermique des polymères, autorisant leur emploi dans des environnements à températures accrues. L'efficacité de cette amélioration est étroitement liée à la manière dont les silicates sont dispersés au sein du polymère.

Les nano composites à base de PMMA, qu'il soit linéaire ou réticulé, démontrent une température de décomposition de 40 à 50°C plus élevée que le PMMA non modifié. Cette augmentation de la stabilité est due à l'effet barrière des feuillets d'argile, qui entrave l'absorption d'oxygène et la diffusion des produits de décomposition gazeux.

**II.9.2 Propriété mécanique :**

L'ajout de charges rigides (fibres, particules) à un polymère augmente sa rigidité (module de Young), mais réduit souvent sa ténacité (résistance aux fissures). Pour les nano composites (polymères avec des nano charges comme l'argile), une bonne dispersion et répartition des nano charges sont essentielles pour améliorer la rigidité, en particulier dans les polymères moins flexibles et les thermodurcissables. De même, la ténacité dépend de la dispersion des nanocharges. Des plaquettes d'argile bien dispersées et alignées sont plus efficaces pour renforcer la rigidité.

- ❖ Les charges rigides augmentent la rigidité, mais diminuent la ténacité des polymères.
- ❖ Une bonne dispersion des nanocharges est cruciale pour améliorer les propriétés mécaniques des nano composites.
- ❖ L'alignement des nanocharges, comme les plaquettes d'argile, optimise la rigidité.

**II.10 Procédés d'élaboration des nano composites (NTC/polymère) :**

Afin de disperser des nanoparticules dans un milieu organique, le principal problème à affronter est le risque d'une mauvaise dispersion de ces nanoparticules au sein de la matrice. En effet, quel que soit l'aspect morphologique des nanoparticules, elles ont en règle générale tendance à former des agrégats stabilisés par divers types d'interactions (ioniques, ponts hydrogène, Van der Waals, etc.). Ces interactions sont le plus souvent plus importantes que les interactions entre la surface des nanoparticules et celle de la matrice organique dans laquelle on souhaite les disperser. Ces types d'interactions conduisent par exemple les nanotubes de carbone à s'agglomérer en fagots. De la même façon, ces interactions, plus particulièrement d'attraction anioniques dans le cas des feuillets de montmorillonite, maintiennent ces feuillets stables créant ainsi un espace inter feuillet hautement hydrophile empêchant la pénétration d'un grand nombre de molécules organiques bien souvent hydrophobes. Il est donc, la plus part du temps, nécessaire de « prétraiter » les nanocharges en utilisant des agents de comptabilisation (greffages chimiques) ou des surfactants pour améliorer leur dispersion et leur distribution au sein de la matrice qui les reçoit. Il existe alors plusieurs techniques d'élaboration des nano composites à matrice polymères. [Boukhors et mridja 2023].

**Tableau II.2:** Comparaison des différentes méthodes d'élaboration des composites polymères/NTC [Chemi 2018]

| Méthode de Préparations | Principe                                                                                                                                                                               | Avantage                                                                                   | Inconvénients                               |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Mélanges-en solution    | Dispersion des NTC et du polymère en solution aqueuse aidée par les ultrasons et/ou la fonctionnalisation des NTC.                                                                     | L'utilisation de faible taux de NTC.                                                       | L'utilisation et l'élimination des solvants |
| Mélange a l'état fondu  | L'extrusion et l'injection sont les méthodes les plus utilisées afin d'obtenir de meilleures dispersions. La fonctionnalisation et la comptabilisation des NTC peuvent être utilisées. | Facile à produire à l'échelle industrielle (simple, propre, sans solvant).                 | La viscosité élevée dans le système.        |
| Polymérisât ion in situ | Il existe deux types de polymérisation in situ :<br>- Polymérisation classique en présence de NTC (dans ce cas pas de liaison covalente avec les NTC).<br>- Le « grafting From »       | Dans le cas du « grafting from », les propriétés mécaniques des composites sont améliorées | Technique généralement longue               |

### II.11 Application des nano composites dans le domaine de Génie civil :

Bien que les nano composites soient un sujet de recherche intense, leur commercialisation reste limitée. L'industrie se concentre sur le développement de nano composites à base de polymères. visant à élargir leurs applications et à améliorer leurs propriétés. Les objectifs incluent l'allègement et le renforcement des structures, l'amélioration des propriétés optiques l'augmentation de la durabilité, ainsi que la résistance au feu, aux températures élevées et aux chocs thermiques.

Les efforts portent sur la création de céramiques, pigments, poudres et catalyseurs multifonctionnels et plus efficaces, ainsi que sur le développement de technologies de col sans colle, de nouvelles techniques de soudage, de couches fonctionnelles (antiadhésives antistatiques, etc.), de peintures et de vitres innovantes.

- ❖ **Industrie céramique:** Renforcement des céramiques par l'ajout de nano poudrent, telles les nanoparticules de nitrure de silicium, pour améliorer la résistance de l'alumine.

- ❖ **Industrie du bâtiment:** Intégration de capteurs miniaturisés dans les habitations pour améliorer le confort et la sécurité, ainsi que le développement de revêtements plus résistants anti-salissures ou antidérapants.
- ❖ **Génie civil:** Renforcement des matériaux de construction pour améliorer la sécurité des infrastructures. Une avancée majeure concerne les matériaux cimentaires, avec un nouveau procédé nano technologique remplaçant la fumée de silice, une ressource limitée, dans les bétons haute performance.
- ❖ Le professeur Arezki Tagnit-Hamou de l'Université de Sherbrooke explique que la nano poudre de verre, ou nano silice, obtenue à partir de déchets recyclés, est transformée en une poudre fine. Les nano sphères présentes dans cette poudre densifient le béton, le rendant plus résistant et moins perméable. Cette innovation ouvre de nouvelles perspectives pour l'utilisation de cette ressource, étant donné la production mondiale de béton, qui dépasse quatre milliards de mètres cubes par an, ce qui en fait le matériau le plus utilisé après l'eau.

## **II.12 Conclusion :**

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

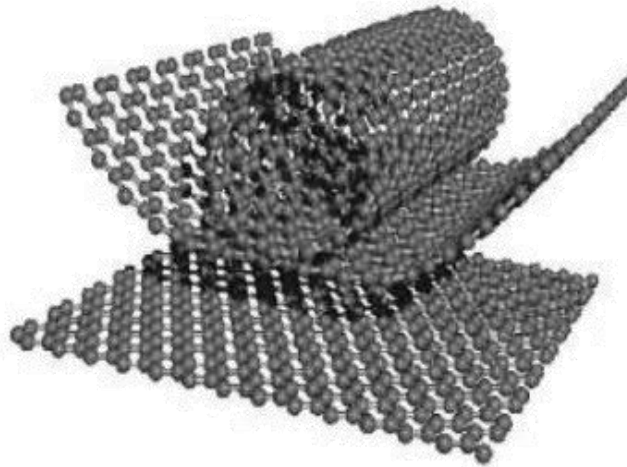
Nous avons vu que l'utilisation des NTCs dans un composite est la méthode la plus rapide afin d'exploiter les propriétés physiques des NTCs. Suivant les matériaux utilisés, l'apport des NTCs améliore la dissipation ou la tenue thermique des céramiques ou des métaux, de même ils peuvent aussi augmenter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

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

Les différentes études sur les composites polymère/NTC montrent un manque de cohérence entre elles. En effet, plusieurs facteurs sont mis en jeu dans chacune des études, ce qui rend confuse la comparaison. Mais la tendance globale montre une amélioration des propriétés (mécaniques et optiques...) des matrices polymères en présence de NTC.

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

***Chapitre III : La porosité  
dans les matériaux :  
principes fondamentaux et  
caractérisations***



### **III.1 Introduction :**

La porosité dans les matériaux composites suscite des opinions divergentes. Certains la considèrent comme un défaut inévitable lors de la fabrication de ces matériaux. La présence de pores affaiblit les propriétés mécaniques, tant en statique qu'en fatigue, en agissant comme point de départ des fissures [Almeida, 1994]. Une porosité élevée a un impact significatif sur des caractéristiques telles que le module d'Young, le module de cisaillement, le coefficient de Poisson et la résistance à la rupture [Yokota, 1978].

Cependant, une autre perspective valorise la porosité comme une qualité recherchée. Des matériaux de pointe exploitent leur grande surface spécifique, que les chimistes s'efforcent de contrôler précisément. Les zéolites, par exemple, des céramiques cristallines nanoporeuses, sont utilisées comme catalyseurs dans l'industrie chimique. De plus, la légèreté des matériaux poreux est un atout majeur pour l'industrie aéronautique, permettant de réduire la consommation énergétique [Heyvaert, 2015].

Pour mieux comprendre le rôle de la porosité dans les matériaux, ce chapitre est consacré à l'étude des matériaux poreux et de la porosité.

### **III.2 Qu'est-ce que un milieu poreux ?**

Un milieu poreux est une structure composée d'une matrice solide et de l'habitat vide ou des pores au sein duquel peuvent se tenir des fluides. La matrice solide peut présenter deux qualités :

**Consolidée:** la matrice est rigide et ne peut se désagréger en grains ou fibres individuels. On trouve ce type de matrice dans des matériaux tels que les roches calcaires, le béton, le grès, l'argile, le bois, les céramiques, les poudres frittées et les tissus végétaux et animaux.

**Non consolidée (granulaire):** la matrice est composée d'un groupe de grains ou de fibres non attachés les uns aux autres. Les graviers, les sables, les limons, les billes de verre et d'acier, et divers autres matériaux granulaires en sont des exemples.

Les pores peuvent être interconnectés ou isolés les uns des autres.

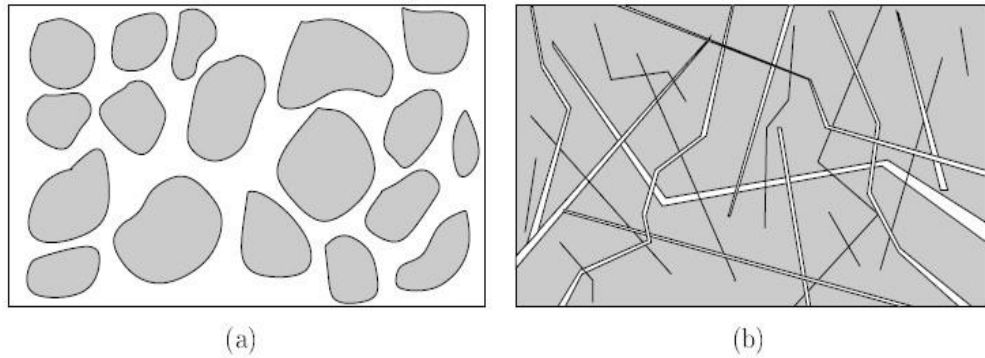
#### **Types de porosité**

On distingue principalement deux types de porosité:

**Porosité d'interstices:** elle est égale aux espaces vides qui se trouvent entre les particules solides formant la matrice.

**Porosité de fissure:** elle résulte de la présence de fractures et de fissures dans le matériau.

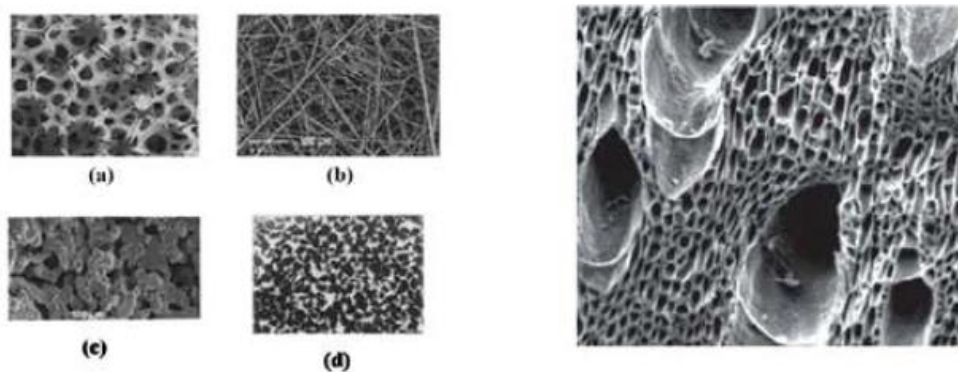
Dans le cadre de cette recherche, nous nous intéresserons uniquement à la porosité d'interstices



**Figure III.1 :** (a) la porosité d'interstice, (b) la porosité de fissure

### III.3 Les matériaux poreux (interstices) :

Les matériaux poreux, caractérisés par la présence d'espaces vides entre leurs atomes, sont omniprésents dans notre environnement. On les retrouve dans divers contextes: la matière vivante (peau, cartilage, os), les éléments naturels (sols, strates sédimentaires, roches) et les produits industriels (bétons, ciments, poudres, textiles) (figure IV. 2).



Divers types de milieux poreux (a) mousse métallique, (b) matériaux fibreux, (c) matériaux céramique, (d) sable.

Micrographie d'un morceau de bois

**Figure III.2 :** Exemples de matériaux poreux.

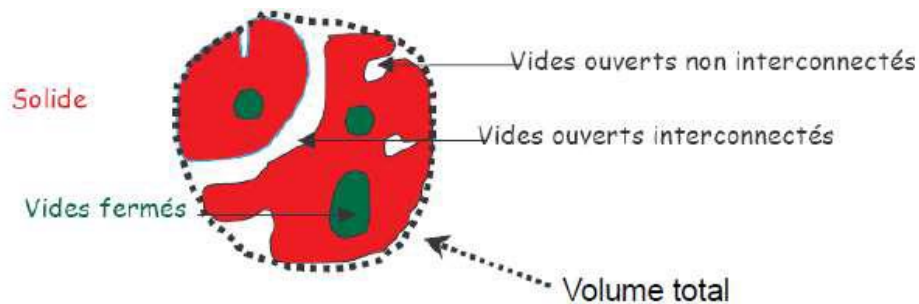
Les propriétés de ces matériaux sont directement influencées par la quantité, la répartition, la taille et la forme de ces pores, ainsi que par leur interconnexion.

L'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée (IUPAC) a établi une classification des pores en fonction de leur diamètre: les micropores (moins de 2 nm), les mésopores (entre 2 et 50 nm) et les macropores (plus de 50 nm).

**Tableau IV.1 :** Classification de la porosité selon l'IUPAC

| Taille des pores   | Classe     |
|--------------------|------------|
| Inférieure à 2nm   | Micropores |
| Entre 2 et 50 nm   | Mésopores  |
| Supérieure à 50 nm | Macropores |

Les matériaux nanoporeux englobent les micro et mésopores. De manière générale, les matériaux poreux sont définis par des paramètres macroscopiques et microscopiques tels que la porosité, la perméabilité, la tortuosité, la surface spécifique et la distribution de la taille des pores.



**Figure III.3 :** Schématisation d'un milieu poreux

### III.3.1 Porosité :

Une mesure du vide dans les matériaux. La porosité d'un matériau quantifie l'espace vide qu'il contient. Elle est définie comme le rapport entre le volume des vides (pores) et le volume total de l'échantillon. Mathématiquement, cela s'exprime par :

$$\emptyset = \frac{V_p}{V_t} = \frac{V_p}{V_s + V_p} \quad (3.1)$$

Où

- $V_s$  est le volume du solide.
- $\emptyset$  représente la porosité
- $V_p$  est le volume des pores.
- $V_t$  est le volume total de l'échantillon.

La porosité est une valeur sans dimension, variant de 0 (matériau complètement dense) à 1 (matériau très poreux, comme les aérogels). On l'exprime souvent en pourcentage.

#### Exemple :

- ✓ pour le sable et le gravier  $25 \leq \emptyset \leq 40\%$  ;
- ✓ pour les argiles  $40 \leq \emptyset \leq 50\%$  ;
- ✓ pour la craie  $10 \leq \emptyset \leq 40\%$ .

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.

La porosité est une caractéristique essentielle des matériaux, influençant leurs propriétés physiques et chimiques. Elle permet de comprendre comment les fluides peuvent circuler à travers un matériau, ou combien d'espace il y a à l'intérieur d'un produit.

#### III.3.2 Perméabilité :

La perméabilité  $K$  des milieux poreux dépend de la porosité et de la géométrie de la matrice solide. La valeur de la perméabilité est déterminée par une mesure expérimentale. La perméabilité est donnée en fonction de la géométrie du milieu poreux.

Perméabilité ( $k$ ) d'un milieu poreux est sa faiblesse en laissant un fluide s'infiltrer à la suite d'une dénomination de pression. Cette qualité spécifique au milieu dépend de la morphologie des grains, de la porosité et de la relation des pores. Il ne dépend pas de la qualité du fluide. Elle est la quantité de fluide passant par une section donnée, perpendiculaire à la direction d'écoulement, pour unité de temps et pour une différence de pression donnée.

Elle est indiquée en  $\text{cm}^2$ , unité correspondant à la taille moyenne des pores au carré.

#### Exemple :

- Pour les grés  $5.10^{-12} \leq k \leq 3.10^{-8} \text{cm}^2$ ;
- Pour les sols  $3.10^{-9} \leq k \leq 10^{-7} \text{cm}^2$ .

La porosité effective de quelques matériaux est présentée dans le tableau suivant :

Tableau III.2 : Porosité de quelques matériaux

| Matrice                  | Perméabilité [ $\text{m}^2$ ]             |
|--------------------------|-------------------------------------------|
| Briques                  | $4.8 \cdot 10^{-15} - 2.2 \cdot 10^{-13}$ |
| Pierre à chaux, Dolomite | $2.0 \cdot 10^{-15} - 4.5 \cdot 10^{-14}$ |
| Cuir                     | $9.5 \cdot 10^{-14} - 1.2 \cdot 10^{-13}$ |
| Poudre d'ardoise noire   | $4.9 \cdot 10^{-14} - 1.2 \cdot 10^{-13}$ |
| Fibre de verre           | $2.4 \cdot 10^{-11} - 5.1 \cdot 10^{-11}$ |
| Cheveux artificiels      | $8.3 \cdot 10^{-10} - 1.2 \cdot 10^{-9}$  |

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

La diversité des caractérisations de porosité est fonction de la diversité des matériaux poreux et de l'objectif spécifique de chaque travail. Par exemple, dans les cas d'adsorbants et de catalyseurs, les analyses de surface sont généralement favorisées. À contrario, si on se propose

de contrôler les diamètres des pores, la détermination de la distribution granulométrique se révèle plus utile.

Ces techniques de caractérisation sont étroitement liées à la classification des matériaux poreux, qui peuvent se faire en fonction de plusieurs critères: le type de porosité (ouverte ou fermée), l'origine des pores (inter-particulaire ou intra-particulaire), la résistance mécanique (rigidité ou fragilité) ou encore la taille des pores, Voici quelques exemples permettant d'illustrer la variété des techniques employées.

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

En mesurant le poids d'un échantillon de matériau poreux à différents niveaux d'humidité, la Porosimétrie à l'eau permet d'obtenir des informations précieuses. On peut ainsi déterminer la porosité totale accessible à l'eau, le volume apparent de l'échantillon et sa saturation en eau. Cette méthode est très pratique pour étudier les pores de très faible diamètre, jusqu'à 0,5 nm (ou deux fois la taille d'une molécule d'eau), en raison de la petite taille des molécules d'eau.

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

La Porosimétrie par intrusion de mercure (PIM) est une technique analytique rapide et efficace permettant de caractériser les propriétés géométriques des réseaux poreux, notamment pour des diamètres de pores compris entre 3 nm et 800  $\mu\text{m}$ . Les paramètres déterminés incluent le volume des pores accessibles au mercure, la surface spécifique, le volume de mercure intrudé en fonction du diamètre des pores, et la distribution de la taille des pores.

Le mercure, en raison de son caractère non-mouillant, ne pénètre pas spontanément dans les pores d'un matériau. Une pression externe doit être appliquée pour forcer son intrusion.

#### **III.4.3 Stéréologie :**

L'analyse microscopique, qu'elle soit optique ou électronique, consiste à examiner une section du matériau. L'image obtenue peut ensuite être traitée afin d'accentuer le contraste entre les pores et la matrice. Cette technique permet de déterminer des caractéristiques géométriques clés de la porosité, notamment le rapport entre la surface des pores et celle de la matrice, pour une zone donnée de la section observée.

#### **III.4.4 La microtomographie :**

Microtomographie est une technique d'analyse tridimensionnelle non destructive à haute résolution capable de recouper une image volumique de la distribution spatiale du coefficient d'absorption linéaire des rayons X ( $\mu$ ). Elle s'avère très bien adaptée à l'étude des matériaux composites, où des contrastes clairs de  $\mu$  entre les constituants (matrice, renfort, porosités) présentent un choix facile et efficient pour segmentation et extraction d'images 3D distinctes.

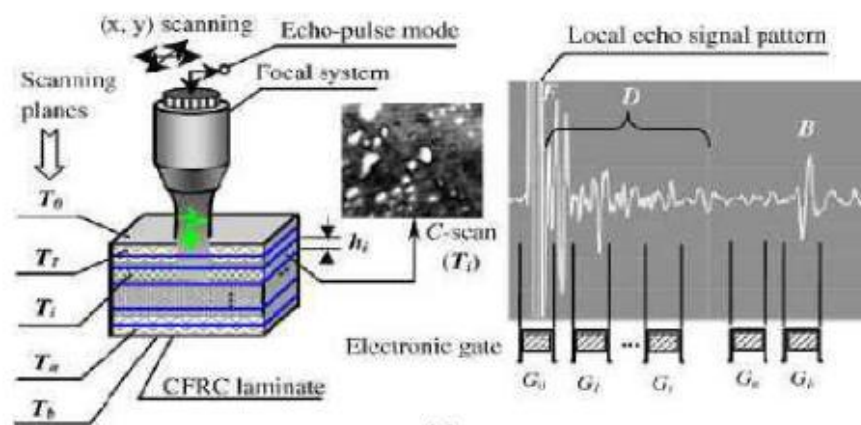
#### **III.4.5 Diffusion de rayonnement :**

Cette méthode d'analyse s'applique uniquement aux matériaux solides dont la structure poreuse et la matrice permettent d'évaluer la distribution de la taille et d'arrangement des pores via la mesure de l'intensité de rayonnement diffusé en fonction de l'angle.

Un faisceau de rayonnement monochromatique (lumière, rayons X ou neutrons) est dirigé vers la surface du matériau. Cette technique est particulièrement adaptée à l'étude des pores de dimensions moléculaires. Toutefois, il est essentiel de considérer l'influence de la rugosité de surface, car elle peut affecter la diffusion du rayonnement.

#### III.4.6 Les ultrasons :

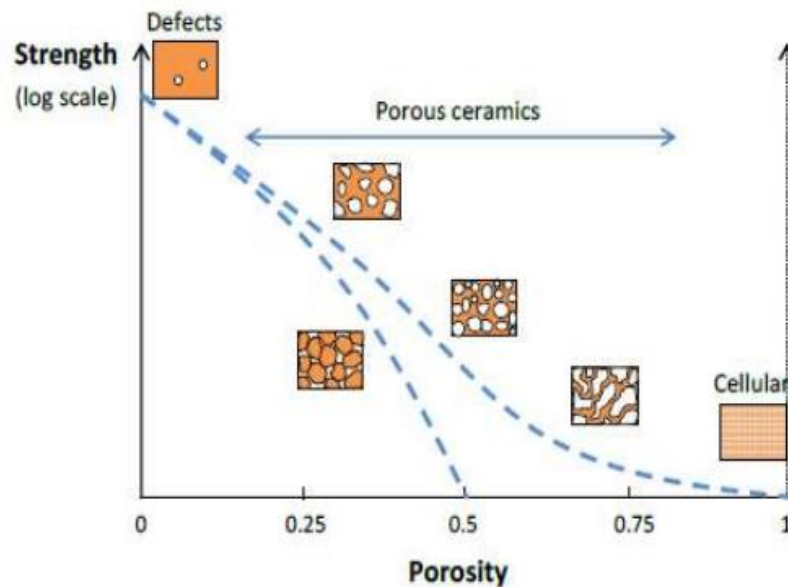
La technique d'analyse par ultrasons, largement employée dans l'industrie en raison de son caractère non destructif, permet une évaluation rapide et globale du volume d'une pièce afin de quantifier sa porosité. La présence de porosités dans les matériaux composites perturbe significativement la propagation des ondes ultrasonores. Ainsi, en comparant l'amplitude du signal d'entrée à celle du signal de sortie, il est possible d'estimer la quantité de porosités présentes dans la pièce.



**Figure III.4:** Principe de la méthode de contrôle non destructif par ultrasons de la qualité d'une pièce stratifiée. Le graphe présenté correspond à des séries successives de C-Scan, avec  $F$ ,  $D$  et  $B$  les réponses respectives données par la réflexion de l'onde sur le surf

#### III.5 Effet de la porosité sur les propriétés mécaniques des matériaux :

Les propriétés mécaniques des matériaux poreux sont largement influencées par leur porosité. En général, une porosité accrue entraîne une réduction de ces propriétés (**voir Figure III.5**)



**Figure III.5:** 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

Cependant, il est important de noter que d'autres facteurs, tels que la forme et la distribution de la taille des pores, ainsi que la nature des interconnexions entre les particules, jouent également un rôle crucial, bien que le taux de porosité reste le facteur dominant.

### III.5.1 Porosité et module d'élasticité longitudinale (le module de Young/porosité) :

Des recherches approfondies, tant expérimentales que théoriques, ont été menées pour comprendre l'interaction complexe entre la microstructure d'un matériau et ses propriétés mécaniques. Dans le cadre de notre étude, nous avons choisi d'examiner spécifiquement l'effet de la porosité sur le module de Young. Les expressions (relations empiriques) suivantes sont parmi les plus fréquemment employées pour modéliser ce comportement.

$$E = E_0(1 - bP) \quad (3.2)$$

- ✓  $E$  : est le module de Young à la porosité  $P$ ,
- ✓  $E_0$  : le module de Young à porosité nulle
- ✓  $b$  : Paramètre dépend de la nature et de la géométrie du matériau

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

$$E = E_0(e^{-bP}) \quad (3.3)$$

[SPRIGGS] a été le premier à utiliser la relation **exponentielle** (9),  $E = E_0(e^{-bP})$ , afin d'évaluer l'influence de la porosité sur le module d'élasticité de l'oxyde d'aluminium polycristallin, un matériau réfractaire.

$$E = E_0(1 - P)/1 + bP \quad (3.4)$$

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

$$E = E_0(1 - bP^{2/3}) \quad (3.5)$$

[MARIN] et [HAYNES] ont établi cette relation, exprimée à la puissance 2/3, pour déterminer le module de Young des matériaux poreux. Cette relation a ensuite été largement utilisée pour analyser les données de divers matériaux.

Un problème majeur de ces modèles réside dans leur incapacité à couvrir l'ensemble des valeurs de porosité. Pour qu'un modèle soit efficace sur toute cette étendue, il est essentiel qu'il soit le plus simple possible, qu'il utilise un minimum de paramètres ajustables et qu'il intègre la notion de porosité critique (seuil de percolation) [KOVÁČIK 2008]. Le modèle exponentiel de Knudsen et Spriggs, illustré par l'équation(3.2), s'avère donc inadéquat, car il ne prend pas en compte ce seuil de percolation. De plus, il n'est pas applicable aux mousses, car il ne respecte pas la condition limite  $E = 0$  pour  $P = 1$  (où  $E$  représente le module de Young et  $P$  la porosité).

Les avancées récentes dans la prédiction des propriétés élastiques des matériaux poreux, pour toutes les valeurs de porosité, sont étroitement liées à la relation empirique de Phani et Niyogi, basée sur une loi de puissance.

$$E = E_0 \left(1 - \frac{P}{P_c}\right)^{f_E} \quad (3.6)$$

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

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

#### III.5.2 Porosité et le module de cisaillement (le module de cisaillement porosité) :

$$G = G_0 \left(1 - \frac{P}{P_c}\right)^{f_G} \quad (3.7)$$

L'équation (3.7) décrit la relation entre le module de cisaillement ( $G$ ) et la porosité ( $P$ ) des matériaux poreux, en utilisant un modèle de percolation similaire à celui appliqué au module de Young.

➤ Cette relation s'exprime par:  $G = G_0 \left(1 - \frac{P}{P_c}\right)^{f_G}$

Où :

- $G$  : est le module de cisaillement.
- $G_0$  : est le module de cisaillement à porosité nulle.
- $P$  : est la porosité.
- $P_c$  : est le seuil de percolation.
- $f_G$  : est l'exposant caractéristique du module de cisaillement.

- Il est attendu que le seuil de percolation ( $P_c$ ) soit identique pour les modules de Young et de cisaillement, reflétant ainsi la stabilité mécanique du système.
- Cependant, les exposants caractéristiques respectifs de ces deux modules ( $f_G$  et celui du module de Young) diffèrent généralement.
- Plusieurs facteurs influencent les modules de Young et de cisaillement des matériaux poreux, notamment:
  - ❖ La taille et la distribution des particules de poudre.
  - ❖ La méthode de préparation du matériau.
  - ❖ La forme et la distribution des pores.

Le comportement du module de cisaillement dans les matériaux poreux peut être modélisé à l'aide d'une équation de percolation, similaire à celle utilisée pour le module de Young. Bien que le seuil de percolation soit commun aux deux modules, leurs exposants caractéristiques varient en fonction de divers paramètres liés à la microstructure du matériau.

#### III.5.3 Porosité et le coefficient de Poisson $\nu$ (le coefficient de Poisson $\nu$ /porosité) :

Dans le cas de matériaux isotropes homogènes, le coefficient de Poisson  $\nu$  peut être déterminé à l'aide du module d'élasticité  $E$  et du module de cisaillement  $G$  comme suit :

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (3.8)$$

Après le remplacement des équations 12 et 13 dans l'équation 14 nous obtenons

$$\nu = \frac{E_0}{2G_0} \left( \frac{P_c - P}{P_c} \right)^{f_E - f_G} - 1 \quad \text{Pour } P \leq P_c \quad (3.9)$$

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

$$\nu = (\nu_0 + 1) \left( \frac{P_c - P}{P_c} \right)^{f_\nu} - 1 \quad \text{Pour } P \leq P_c \quad (3.10)$$

Dans ce cas, le seuil de percolation est à nouveau considéré comme identique du point de vue de la stabilité mécanique. Cependant, comme les exposants caractéristiques du module de Young et du module de cisaillement ne sont pas toujours les mêmes, il est nécessaire de considérer un nouvel exposant caractéristique pour le coefficient de Poisson Où  $f_\nu = f_E - f_G$  [KOVÁČIK 2008]

#### III.6 Conclusion :

Ce chapitre s'appuie sur une synthèse approfondie des études consacrées à la caractérisation des matériaux poreux. Il explore la dualité de perception de la porosité, oscillant entre défaut et qualité recherchée, notamment au sein des matériaux composites.

Une analyse bibliographique exhaustive de la porosité a permis de développer divers modèles quantifiant son influence sur les propriétés mécaniques. Ces modèles examinent les

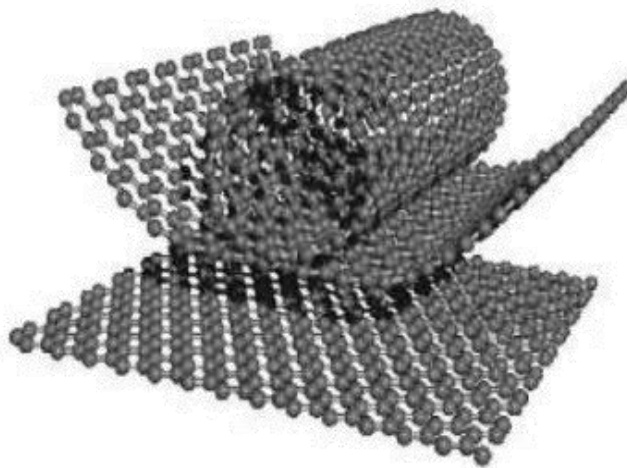
relations entre la porosité et le module de cisaillement, le coefficient de Poisson ( $\nu$ ), et plus particulièrement le module d'élasticité longitudinale (module de Young).

Il est important de souligner que les modèles présentés présentent la porosité comme un facteur de dégradation des propriétés mécaniques.

La présence de pores au sein d'un composite est généralement associée à une diminution de sa performance mécanique.

Pourtant, on sait que l'influence de la porosité sur le module de Young des matériaux poreux est un domaine qui nécessite des recherches supplémentaires pour améliorer les modèles existants et explorer les domaines dans lesquels la porosité peut être utilisée de manière positive.

## ***Chapitre IV : Plaques et sandwichs***



**IV.1 Introduction :**

Il est nécessaire de choisir la bonne théorie qui décrit correctement le comportement statique et dynamique de la structure ainsi que la méthode de résolution à appliquer afin de résoudre les problèmes des structures ayant comme éléments structuraux des poutres et des plaques dans le domaine élastique. C'est en 1888 que Love utilisa les hypothèses de Gustav Kirchhoff, elles-mêmes inspirées des hypothèses d'Euler-Bernoulli pour fonder une théorie des plaques minces (également appelée théorie classique ou théorie de Love-Kirchhoff). La théorie des plaques semi-épaisses (théorie des déformations du premier ordre) a été consolidée par Mindlin à partir des travaux de [Rayleigh 1877], [Timoshenko 1921], [Reissner 1945] et [Uflyand 1948]. [Medani 2022].

Ensuite, des théories d'ordre supérieur sont venues améliorer les hypothèses des théories classiques et du premier ordre lorsque l'épaisseur de la plaque devient plus importante. Les différentes théories existantes peuvent donc être classées en trois principales catégories: théorie classique des plaques minces (appelée aussi théorie de Kirchhoff-Love), théorie des plaques semi-épaisses du premier ordre (appelée aussi théorie de Reissner -Mindlin), théories d'ordre supérieur applicables aux plaques épaisses (comme celle de Reddy). [Boullal 2021].

Les plaques sont essentielles dans de nombreux domaines industriels principaux (sous-marin, aérospatial, génie civil, énergie). Leur rôle croissant nécessite une connaissance approfondie de leur comportement mécanique. Ces recherches sont essentielles pour la conception de structures plus efficaces.

Les matériaux composites sandwichs disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ils contribuent au renforcement de la sécurité grâce à une meilleure tenue aux chocs et au feu. Ils offrent une meilleure isolation thermique ou phonique et, pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, aptes à remplir plusieurs fonctions.

Dans chacun des marchés d'application (automobile, bâtiment, électricité, équipements industriels,...), ces performances remarquables sont à l'origine de solutions technologiques innovantes.

**IV.2 Description des plaques :**

Dans la construction, les plaques se réfèrent à des structures planes qui ont une faible profondeur par rapport à la longueur et à la largeur. Elles sont généralement soumises à des charges qui produisent à la fois des déformations de flexion et d'étirement. Dans la plupart des cas, l'épaisseur d'une plaque ne dépasse pas un dixième de sa dimension minimale dans un certain plan. La finesse de l'épaisseur nécessite souvent l'utilisation de modèles d'élasticité tridimensionnels pour des calculs précis.

Pour la construction architecturale, les plaques sont définies comme des structures à deux dimensions ayant une épaisseur et une hauteur. Elles incluent également des types de surfaces et de murs moins courants, comme des surfaces paraboliques et hyperboliques. À l'intérieur de ces structures, les dimensions existantes sont inférieures à l'épaisseur, ce qui signifie que la construction est essentiellement plane. Lorsque la surface est courbée, elles sont appelées coques ou dômes. Lorsqu'elle est plane, une distinction supplémentaire est nécessaire:

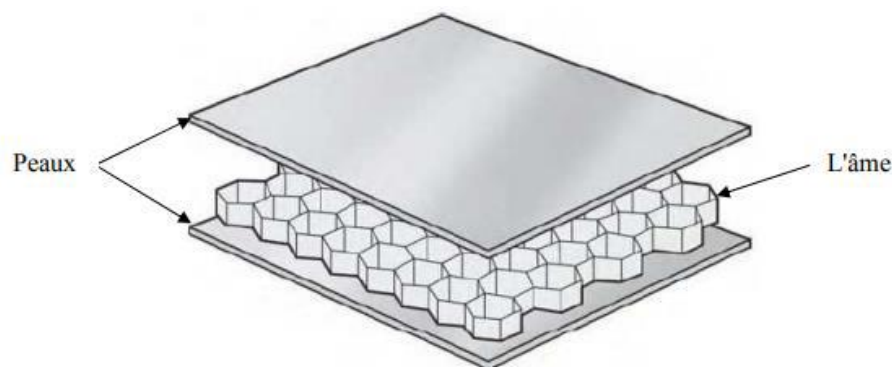
- ✓ Murs de panneaux plats, où les charges se trouvent principalement dans le plan des murs.
- ✓ Dalles, où les charges sont principalement verticales par rapport à la surface.

En ce qui concerne les structures énumérées ci-dessus, celles provenant de la conception d'un différenciateur complexe sont les plus avancées.

### **IV.3 Les Sandwichs :**

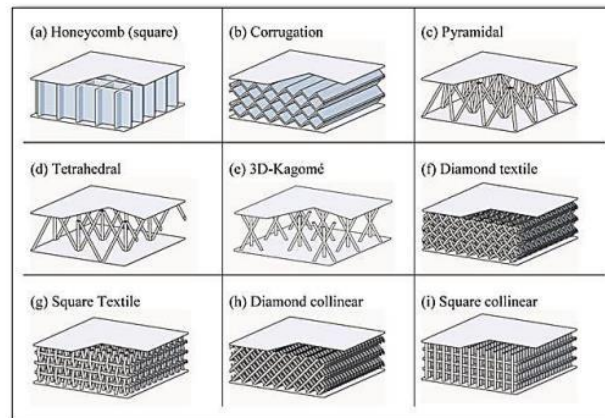
Les matériaux sandwichs sont constitués de deux couches de surface minces et solides, appelées peaux, et d'un noyau central plus épais et de faible densité. Cette structure composite offre une combinaison avantageuse de rigidité élevée, de résistance à la rupture et de légèreté. Malgré les efforts de recherche, la manière dont ces matériaux se dégradent sous contrainte est encore mal comprise. Leur faible poids en flexion et leurs capacités d'isolation thermique sont des atouts majeurs.

Fondamentalement, un sandwich est une structure à trois couches se composant deux peaux (faces) inférieure et supérieure et d'une âme (cœur) intermédiaire. Aux interfaces, l'âme et les faces sont collées ensemble. Le rôle principal des peaux est de supporter les charges dans le plan tandis que le rôle principal de l'âme, est de maintenir la distance respective entre les faces, assurant de ce fait une rigidité à la flexion élevée avec un faible poids, une tâche additionnelle de l'âme peut être la reprise des forces transversales [Mertani Boubekur 2011].



**Figure IV.1** Composite une plaque de sandwich

Les peaux minces rigides et résistantes sont collées sur un cœur fait d'un matériau tendre et léger. Les matériaux sandwichs ont ainsi une très bonne résistance à la flexion et une très grande légèreté.



**Figure IV. 2:** Exemples de topologies d'une variété de réseaux cellulaires configurés comme noyaux de structures de panneaux sandwich.

La performance globale des structures en sandwich dépend des propriétés des matériaux constitutifs (feuilles de face, adhésif et noyau), des dimensions géométriques et du type de chargement. La conception et l'application appropriées de la construction en sandwich dépendent d'une caractérisation et d'une compréhension approfondies non seulement des matériaux constitutifs du sandwich, mais également de la structure dans son ensemble sous des charges quasi statiques et dynamiques. Aujourd'hui, une grande variété de noyaux sandwichs est appliquée en génie des structures (voir fig. IV.2).

#### IV.3.1 Les éléments constitutifs des structures sandwichs :

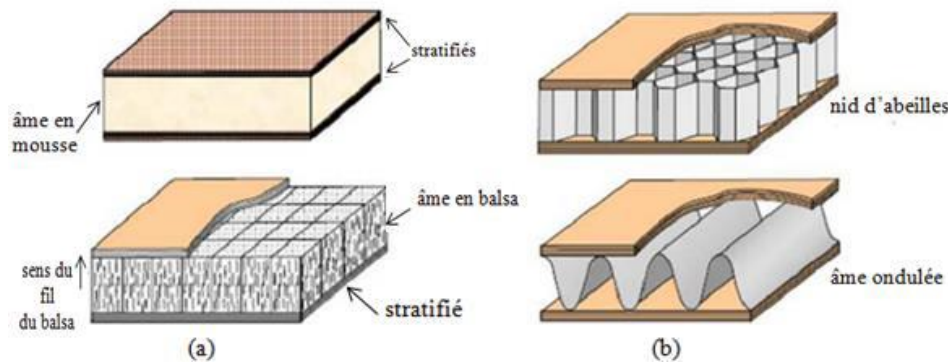
Les principaux éléments constitutifs des plaques sandwich sont généralement deux faces latérales dites peaux et qui enveloppent une couche au cœur de la plaque dite âme. L'âme et les faces ont des propriétés différentes.

##### IV.3.1.1 Les faces de la plaque sandwich – les peaux :

Généralement de faibles épaisseurs, les peaux sont constituées de tout matériau pouvant être obtenu sous forme de couche. Elles peuvent être en bois, métal ou matériau composite. Le choix de la nature et de la séquence des couches dépendra de l'utilisation des matériaux composites. Les peaux ont pour but de reprendre les efforts de flexion traduits par des contraintes normales (traction ou compression).

##### IV.3.1.2 Cœur de la plaque sandwich - L'âme

Légère, l'âme a en général une très faible résistance à la flexion. La fonction essentielle de l'âme du sandwich est de transmettre par cisaillement transverse, les actions mécaniques d'une peau à l'autre. Elle peut être réalisée avec différents matériaux.



**Figure IV. 3 :** Eléments constitutifs d'un panneau sandwich :  
(a) à âme pleine, (b) à âme creuse.

**Mousses :** Ces matériaux légers peu onéreux, facilement usinables et ont cependant de très faibles caractéristiques mécanique.

**Balsa :** Est un bois bien connu pour ces différentes utilisations et de leurs principales qualités que la légèreté, le haut pouvoir d'isolation thermique et acoustique et la non déformation aux variations thermiques.

**Nid d'abeille :** Cette structure est réalisée généralement à partir de matériau en plaques minces (alliage d'aluminium, papier polyamide). Des raies de colle sont disposées en bande régulières sur les plaques qui sont collées entre elles pour former un bloc, ce dernier est coupé en tranches qui seront, transformées à leur tour en planche de nida ' Nid d'abeille.

### III.3.2 L'interface entre les couches du sandwich (l'adhésif)

L'assemblage de la structure sandwich peut être réalisé par collage, soudage ou brasage. Lors des simulations numériques, on suppose que, quel que soit le mode d'assemblage des différentes couches, le lien est parfait entre les constituants.

### III.3.3 Domaine d'application des matériaux sandwichs :

L'usage des structures sandwichs, continue à augmenter rapidement pour diverses applications qui vont des satellites, avions, bateaux, automobiles, voitures sur rail, éoliennes et construction de pont pour n'en mentionner, que quelques-unes. Les performances des structures sandwichs comme matériau, sont en constante évolution avec à chaque fois de nouvelles fonctionnalités comme l'amortissement des vibrations et des bruits, la haute résistance au feu et aux environnements agressifs. Il y a, aujourd'hui, de bonnes raisons de penser que dans la prochaine décennie, les ingénieurs et les constructeurs voudront construire des structures industrielles et des engins de transports encore plus grands et certainement plus légers. Avec la technologie actuelle, il est possible de remplacer de grandes parties des structures et superstructures, souvent en matériau conventionnel, avec un matériau sandwich. Ceci permettra à la structure d'être plus légère, plus stable et plus économiques grâce à une moindre consommation de fuel. Le sandwich est aussi utilisé par une large gamme de constructions navales et maritimes et de nouveaux marchés sont encore à venir.

Les conceptions de terres d'aujourd'hui permettent uniquement l'utilisation du béton, de l'acier et de quelques alliages d'aluminium. Dans le futur le concept du sandwich peut être introduit

comme matériau de substitution pour différents modules composant ces structures, telles que les chambres de stockage et l'isolation en période hivernale.

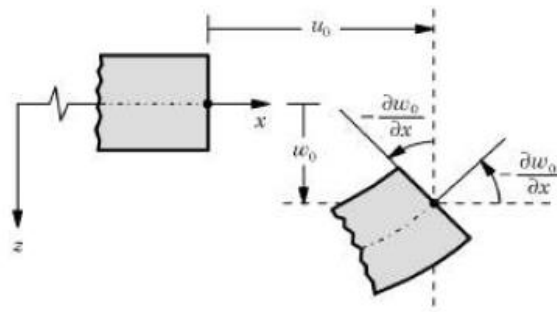
#### IV.4 Les hypothèses fondamentales de la théorie des plaques :

Développement de modèles théoriques pour les plaques implique la création d'hypothèses simplificatrices dans le but de rendre les calculs permettant. Ces hypothèses, même si simplificatrices, doivent se tenir au niveau accepté en comparaison des comportements actuels des structures.

L'une des principales différences entre les différentes théories existantes réside dans l'inclusion ou non de l'effet du cisaillement. Parmi les théories les plus utilisées à l'époque actuelle, il est possible de citer les suivantes :

##### IV.4.1 La théorie classique des plaques minces de Love-Kirchhoff (Classical Laminated Plate theory CLPT) :

La théorie classique des plaques CPT se présente comme la plus simple des approches, elle est fondée sur les hypothèses de Love-Kirchhoff , selon lesquelles une droite normale au plan moyen de la plaque reste perpendiculaire après déformation (figure IV.4), ce qui revient à négliger les effets de déformation en cisaillement transverse, cette théorie convient aux plaques minces où la flèche générée par les déformations de cisaillement reste négligeable devant la flèche générée par la courbure de la plaque.



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

Dans le cas d'une plaque homogène isotrope, la part de cisaillement dans la flèche est directement reliée à l'élancement ( $L/h$ ). [Timoshenko, Ashton].

Le champ de déplacements de Love-Kirchhoff s'écrit alors.

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

**Où:**

$u_0$  et  $v_0$  : Les déplacements de membrane dans les directions  $x$  et  $y$ , respectivement,

$w_0$  : La flèche de la plaque,

$\frac{\partial w_0}{\partial x}$  et  $\frac{\partial w_0}{\partial y}$  : Les rotations dues à la flexion (sans cisaillement).

Le plan principal de la plaque est le plan (o, x, y) et l'épaisseur est orienté selon l'axe  $z \in [-h/2 ; h/2]$ .

Puisque ce modèle ne tient pas en compte l'effet de cisaillement transverse, il donne des résultats imprécis pour les plaques épaisses.

#### IV.4.2 La théorie de déformation en cisaillement du premier ordre (First Order Shear Déformation Théory (FSDT)) :

La théorie de déformation en cisaillement du premier ordre (FSDT) a prolongé la théorie classique des plaques en tenant compte de l'effet de cisaillement transverse, cette théorie dite de Mindlin suppose que les sections droites, initialement normales au plan moyen, restent planes et non nécessairement perpendiculaire à celui-ci après déformation. D'autres variantes de la théorie supposent que ces sections ne restent ni droites, ni normales après déformation. Dans la littérature on peut trouver trois approches d'approximation pour les plaques épaisses à savoir :

L'approche de Reissner suppose un champ de déplacement mixte contenant les contraintes normales dans le plan et les contraintes de cisaillement. L'approche de Henchy-Mindlin suppose un champ de déplacement linéaire dans le plan à travers l'épaisseur, tandis que l'approche d'Ambartsumyan suppose un champ de contraintes normales et de cisaillement.

Etant donné que la théorie de déformation en cisaillement du premier ordre (FSDT) ne satisfait pas les conditions aux limites au niveau des surfaces supérieure et inférieure de la plaque (contraintes de traction non nulles), un facteur de correction en cisaillement à travers l'épaisseur est nécessaire. La valeur de ce facteur de correction dépend de la géométrie de la plaque, de la variation du coefficient de Poisson à travers l'épaisseur, du chargement appliqué et des conditions aux limites imposées. Pour résumer L'hypothèse cinématique de Mindlin est la suivante :

La normale reste droite mais non perpendiculaire à la surface moyenne (à cause de l'effet du cisaillement transverse) dans la configuration déformée (Figure IV.5).

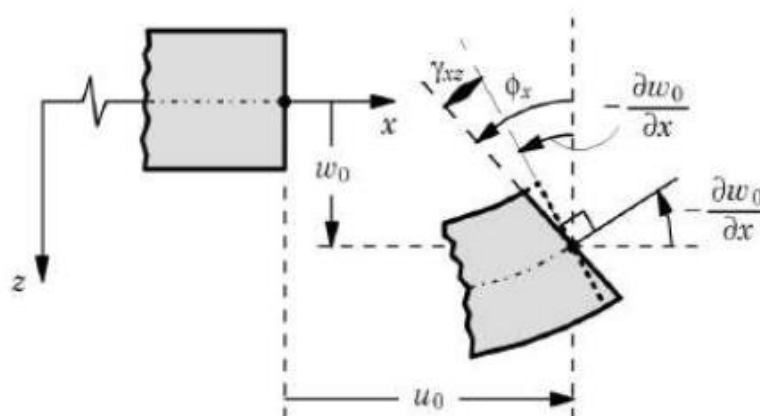


Figure IV.5 : Illustration de la plaque de Reissner-Mindlin

Le champ de déplacement de la théorie de déformation en cisaillement du premier ordre est donné par :

$$\begin{cases} u = u_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial x} + z \phi_x \\ v = v_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial y} + z \phi_y \\ w = w_0 \end{cases} \quad (4.2)$$

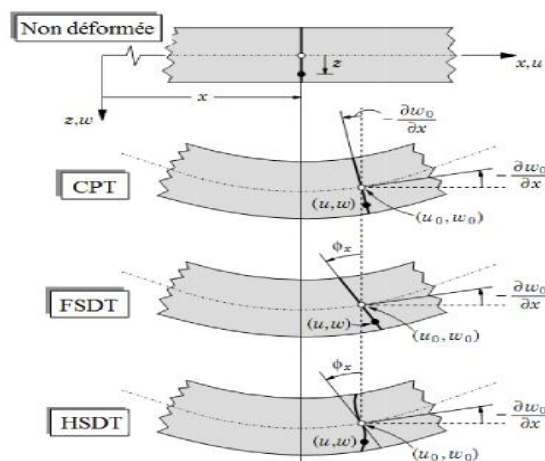
Ou :

$\phi_x$  et  $\phi_y$ : Les rotations de la normale au plan moyen autour des axes x et y.

#### IV.4.3 La théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé (Higher order Shear Déformation theory HSDT) :

Cette classe de théories plus fines a pour base un développement du déplacement dans l'épaisseur l'ordre deux ou plus. Ces théories sont particulièrement bien adaptées à la modélisation du comportement des plaques épaisses ou poutres courtes, où la déformation transverse joue un rôle prédominant. La plupart de ces modèles utilisent un développement en série de Taylor, la théorie d'ordre élevé est basée sur une distribution non linéaire des champs dans l'épaisseur (figure III.4). Par conséquent, on tient compte des effets de la déformation transversale de cisaillement et/ou de la déformation normale transversale. Ces modèles n'exigent pas des facteurs de correction. Les références sur de tels modèles peuvent être trouvées dans [HILDERBRAND 2002]. Le champ de déplacement est généralement écrit comme suit :

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



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

Tableau IV.1 : Description des différentes théories de plaques d'ordre supérieur

| Théorie                                    | Intitulé                                           | Fonction de forme $f(z)$                                                                                                                                                                                | Distribution de $\gamma_{xz}$ et $\gamma_{yz}$ Suivant $z$ | Coefficient de correction | Validité                               |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------|
| <b>Ambartsu ma-in</b>                      | Théorie d'ordre supérieur                          | $\frac{z}{h} \left( \frac{h^2}{4} - \frac{z^2}{3} \right)$                                                                                                                                              | Quadratique                                                | Non Requis                | Plaques minces et moyennement épaisses |
| <b>Reissner</b>                            | Théorie d'ordre supérieur                          | $\frac{5}{4}z \left( 1 - \frac{4z^2}{3h^2} \right)$                                                                                                                                                     | Parabolique                                                | Non Requis                | Plaques minces et épaisses             |
| <b>TSDPT Touratier</b>                     | Théorie de déformation trigonométrique des plaques | $\frac{h}{\pi} \sin\left(\frac{\pi z}{h}\right)$                                                                                                                                                        | Parabolique                                                | Non Requis                | Plaques minces et épaisses             |
| <b>ESDPT Karama</b>                        | Théorie de déformation exponentielle des plaques   | $z e^{-2\left(\frac{z}{h}\right)^2}$                                                                                                                                                                    | Parabolique                                                | Non Requis                | Plaques minces et épaisses             |
| <b>PSDPT Levinson Reddy Murthy</b>         | Théorie de déformation exponentielle des plaques   | $z \left( 1 - \frac{4z^2}{3h^2} \right)$                                                                                                                                                                | Parabolique                                                | Non Requis                | Plaques minces et épaisses             |
| <b>Ait atmane et al [Ait atmane, 2010]</b> | Théorie raffinée des plaques                       | $\frac{\cosh\left(\frac{\pi}{2}\right) z}{\cosh\left(\frac{\pi}{2}\right) - 1} - \frac{\left(\frac{h}{\pi}\right) \sinh\left(\frac{\pi}{h} z\right)}{\left[\cosh\left(\frac{\pi}{2}\right) - 1\right]}$ | Parabolique                                                | Non Requis                | Plaques minces et épaisses             |

#### IV.5 Définition et l'intérêt d'une plaque sandwich :

Les plaques sandwich, largement utilisées dans l'ingénierie moderne, se distinguent par leur conception composite, composée de deux surfaces externes, souvent rigides, appelées peaux, maintenues à une distance fixe par un noyau léger et généralement peu dense.

Les trois parties du sandwich sont liées par un film d'adhésif, la liaison entre deux couches successives est appelée l'interface, Ces couches peuvent être de nature différente.

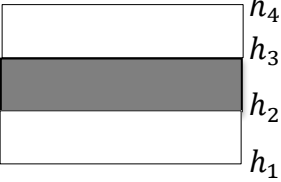
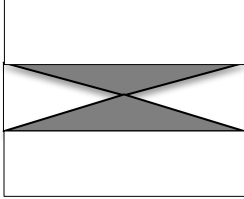
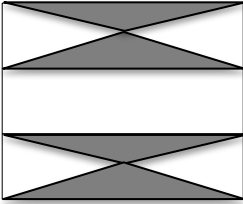
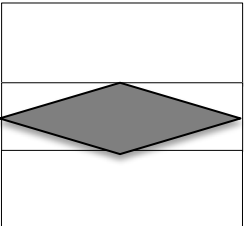
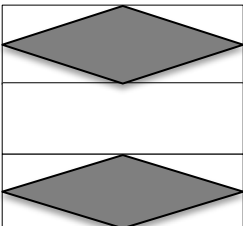
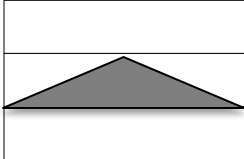
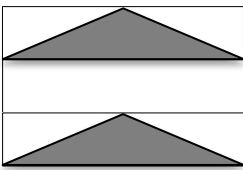
Ces plaques offrent une combinaison unique de légèreté, de rigidité et de résistance, ce qui les rend idéales pour une gamme variée d'applications dans des domaines tels que l'aérospatiale, l'automobile, la construction navale et la construction légère.

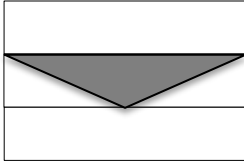
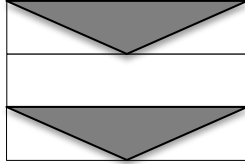
En plus de leur haute résistance structurelle, les plaques sandwich présentent également d'excellentes propriétés d'isolation thermique et acoustique, ce qui les rend particulièrement adaptées pour des applications nécessitant une régulation thermique ou une atténuation du bruit.

#### IV.6 Configuration géométrique et propriétés de la plaque sandwich renforcée :

Dans cette étude, nous analysons une plaque composite constituée de trois couches d'épaisseur uniforme. Cette plaque, visible dans les figures III.6 et III.7, possède les dimensions suivantes: longueur a, largeur b et épaisseur h. Les faces supérieure et inférieure de la plaque sandwich se trouvent respectivement à  $z=+h/2$  et  $z=-h/2$ . Les trois couches élastiques qui composent la plaque sont numérotées de bas en haut : couche 1 [ $h_1=-h/2$ ], couche 2 [ $h_2$ ], et couche 3 [ $h_3=h/2$ ]."

**Tableau IV.2 :** Distribution nanotube de carbone dans plaque sandwich

|                                                                                                     |                                                                           |                                                                                                      |                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>0-UD-0</b><br>  | $V_3=0$<br>$V_2=V_{CNT}^*$<br>$V_1=0$                                     | <b>UD-0-UD</b><br> | $V_3=V_{CNT}^*$<br>$V_2=0$<br>$V_1=V_{CNT}^*$                                                                                                                     |
| <b>0-X-0</b><br>  | $V_3=0$<br>$V_2=2\left(\frac{- Z }{h_2}\right) * V_{CNT}^*$<br>$V_1=0$    | <b>X-0-X</b><br>  | $V_3=2\left(\left \frac{(h_4+h_3)-2Z}{h_4-h_3}\right \right) V_{CNT}^*$<br>$V_2=0$<br>$V_1=2\left(\left \frac{(h_1+h_2)-2Z}{h_1-h_2}\right \right) V_{CNT}^*$     |
| <b>0-O-0</b><br> | $V_3=0$<br>$V_2=2\left(\frac{ Z }{h_2} + 1\right) V_{CNT}^*$<br>$V_1=0$   | <b>O-0-O</b><br> | $V_3=2\left(1 - \left \frac{h_4+h_3-2Z}{h_4-h_3}\right \right) V_{CNT}^*$<br>$V_2=0$<br>$V_1=2\left(1 - \left \frac{h_2+h_1-2Z}{h_2-h_1}\right \right) V_{CNT}^*$ |
| <b>0-Λ-0</b><br> | $V_3=0$<br>$V_2=2\left(\frac{h_3-Z}{h_3-h_2}\right) V_{CNT}^*$<br>$V_1=0$ | <b>Λ-0-Λ</b><br> | $V_3=2\left(\frac{h_4-Z}{h_4-h_3}\right) V_{CNT}^*$<br>$V_2=0$<br>$V_1=2\left(\frac{h_2-Z}{h_2-h_1}\right) V_{CNT}^*$                                             |

|                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p style="text-align: center;"><b>0-V-0</b></p>                                                                             | <p style="text-align: center;"><b>V-0-V</b></p>                                                                                                                               |
| <p style="text-align: center;"><math>V_3=0</math></p> <p style="text-align: center;"><math>V_2=2\left(\frac{Z-h_2}{h_3-h_2}\right)V_{CNT}^*</math></p> <p style="text-align: center;"><math>V_1=0</math></p> | <p style="text-align: center;"><math>V_3=V_2=2\left(\frac{Z-h_3}{h_4-h_3}\right)V_{CNT}^*</math></p> <p style="text-align: center;"><math>V_2=0</math></p> <p style="text-align: center;"><math>V_1=V_2=2\left(\frac{Z-h_2}{h_2-h_1}\right)V_{CNT}^*</math></p> |

Les propriétés mécaniques du polymère/CNT composite sont prédites par la règle de mélange d'Esawi (2007). Plus précisément, on utilise l'expression de [SHEN 2009] qui propose des paramètres d'efficacité ( $\eta_1, \eta_2, \eta_3$ ) pour une estimation du module de Young et du module de cisaillement efficaces du composite. Ce qui peut s'exprimer par :

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

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

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

Où  $E_{11}^{cnt}, E_{22}^{cnt}$  et  $G_{12}^{cnt}$  indiquer les modules de Young et le module de cisaillement des SWCNT, respectivement, et  $E^p$  et  $G^p$  représentent les propriétés de la matrice isotrope.

$\eta_1, \eta_2$  et  $\eta_3$  Sont les paramètres d'efficacité de matrice / CNT,  $V_{cnt}$  et  $V_p$  sont les fractions volumiques des nanotubes de carbone et de la matrice, respectivement, et il est à noter que la somme des fractions volumiques des deux constituants est égale à l'unité. Pour d'autres propriétés en termes de coefficient de poisson ( $\nu$ ) et de masse volumique ( $\rho$ ), celles-ci peuvent être écrites comme suit:

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

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

$$V_{cnt}^* = \frac{W_{cnt}}{w_{cnt} + (\rho^{cnt} / \rho^m)(1 - W_{cnt})} \quad (4.6)$$

Où  $V_{cnt}^*$  est la fraction massique du nanotube de carbone dans la plaque nano-composite.

Dans cette étude, les paramètres d'efficacité du CNT ( $V_{cnt}^*$ ) associé à la fraction volumique donnée sont [ZHU.P 2012] :

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

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

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

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

**Uniforme Porosité :**

$$\triangleright E_p = E_{p_0} * \left(1 - \frac{2(1-\sqrt{1-p_0})}{\pi}\right)^2 \quad (4.7a)$$

$$\triangleright \rho_p = \rho_{p_0} * \left(1 - \frac{2(1-\sqrt{1-p_0})}{\pi}\right)^2 \quad (4.7b)$$

**Symétrique porosité – 1 :**

$$\triangleright E_p = E_{p_0} * \left(1 - p_0 * \cos\left(\frac{\pi z}{h}\right)\right) \quad (4.8a)$$

$$\triangleright \rho_p = \rho_{p_0} * \left(1 - p_m * \cos\left(\frac{\pi z}{h}\right)\right) \quad (4.8b)$$

**Symétrique porosité – 2 :**

$$\triangleright E_p = E_{p_0} * \left(1 - p_0 * \cos\left(-\left|\frac{\pi z}{h}\right| + \frac{\pi}{2}\right)\right) \quad (4.9b)$$

$$\triangleright \rho_p = \rho_{p_0} * \left(1 - p_m * \cos\left(-\left|\frac{\pi z}{h}\right| + \frac{\pi}{2}\right)\right) \quad (4.9b)$$

**Asymétrique porosité :**

$$\triangleright E_p = E_{p_0} * \left(1 - p_0 * \cos\left(-\left|\frac{\pi z}{2h}\right| + \frac{\pi}{4}\right)\right) \quad (4.10b)$$

$$\triangleright \rho_p = \rho_{p_0} * \left(1 - p_m * \cos\left(-\left|\frac{\pi z}{2h}\right| + \frac{\pi}{4}\right)\right) \quad (4.10b)$$

Ou :

$$P_m = 1 - \sqrt{1 - p_0}$$

#### IV.7 Équations de mouvement :

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

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= u_0(x, y) - z \frac{\partial w_x}{\partial x} + f(z) \phi_{,x}, \\ v(x, y, z) &= u_0(x, y) - z \frac{\partial w_y}{\partial y} + f(z) \phi_{,y}, \\ w(x, y, z) &= w_0(x, y), \end{aligned} \quad (4.11)$$

Dans le quel  $u_0$ ,  $v_0$  et  $w_0$  sont les déplacements suivant les directions x, y et z dans le plan médian de la plaque.

$\phi_x$  et  $\phi_y$  : sont les rotations totale de courbure de la section transversale en un point quelconque de le plan de référence, à savoir la théorie de la déformation par cisaillement du premier ordre (FSDT). Si le dernier terme de l'équation (4.11) est négligé, les déplacements sont réduits à la théorie des plaques classique (CPT).

Il est à noter que le champ de déplacement dans l'équation (4.11) peut être facilement adapté à diverses théories des plaques en choisissant une fonction de forme appropriée,  $Y(z)$ . Par exemple, la théorie classique des plaques (CPT) est obtenue en posant  $Y(z) = 1$ , et la théorie de la déformation par cisaillement du premier ordre (FSDT),  $Y(z) = z$ . En termes de théories de la déformation par cisaillement d'ordre supérieur, les fonctions de forme correspondantes sont définies comme suit.

✚ Théorie de la déformation par cisaillement sinusoïdale:

$$f(z) = h * \sinh\left(\frac{z}{h}\right) - z * \cosh\left(\frac{1}{2}\right) \quad (4.12)$$

Les composantes de déformation associées au champ de déplacement dans l'équation (4.11) peuvent être exprimées comme :

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + f(z) \frac{\partial \phi_x}{\partial x}, \quad (4.13a)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} + f(z) \frac{\partial \phi_y}{\partial y} \quad (4.13b)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} + f(z) \left( \frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \right) \quad (4.13c)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial \psi(z)}{\partial z} \phi_x, \gamma_{yz} = \frac{\partial \psi(z)}{\partial z} \phi_y, \quad (4.13d)$$

L'expression des relations constitutives est écrite sous la forme

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.14)$$

Où  $Q_{ij}$  sont les constants élastiques transformés

$$Q_{11} = \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{22} = \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{12} = \frac{\nu_{21}E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (4.15a)$$

$$Q_{66} = G_{12}, \quad Q_{55} = G_{13}, \quad Q_{44} = G_{23} \quad (4.15b)$$

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

$$\delta U + \delta V = 0 \quad (4.16)$$

Où,  $\delta U$ ,  $\delta V$  et  $\delta K$  sont la variation virtuelle de l'énergie de déformation, le travail virtuel effectué par des forces externes et l'énergie cinétique virtuelle.

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

$$\delta U = \sum_{n=1}^3 \int_{h_n}^{h_{n+1}} \int_A (\sigma_{xx} \delta \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} \delta \varepsilon_{yy} + \sigma_{xy} \delta \gamma_{xy} + \sigma_{yz} \delta \gamma_{yz} + \sigma_{xz} \delta \gamma_{xz}) dA dx \quad (4.17)$$

En substituant Eq. (4.17) dans Eq. (4.18), on obtient

$$\delta U = \sum_{n=1}^3 \int_{h_n}^{h_{n+1}} \int_A \{ N_{xx} \delta u_{0,x} - M_{xx} \delta \varphi_{x,x} + P_{xz} \delta (\varphi_x + w_{0,x}) + N_{yy} \delta v_{0,y} + M_{yy} \delta \varphi_{y,y} + P_{yz} \delta (\varphi_y + w_{0,y}) + N_{xy} (\delta u_{0,y} + \delta v_{0,x}) + M_{xy} \delta (\varphi_{x,y} + \varphi_{y,x}) \} dx dy \quad (4.18)$$

Où les résultats des forces et les moments peuvent être définis comme suit:

$$(N_{xx}, N_{yy}, N_{xy}) = \sum_{n=1}^3 \int_{h_n}^{h_{n+1}} (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}) dz \quad (4.19a)$$

$$(M_{xx}, M_{yy}, M_{xy}) = \sum_{n=1}^3 \int_{h_n}^{h_{n+1}} z (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}) dz \quad (4.19b)$$

$$(Q_{xz}, Q_{yz}) = \sum_{n=1}^3 \int_{h_n}^{h_{n+1}} (\sigma_{xz}, \sigma_{yz}) dz \quad (4.19c)$$

$$R_{yz} = \sum_{n=1}^3 \int_{h_n}^{h_{n+1}} \frac{\partial f(z)}{\partial z} \sigma_{yz} dz ; R_{xz} = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\partial f(z)}{\partial z} \sigma_{xz} dz ; \quad (4.19d)$$

Pour exprimer les résultantes de contrainte sous forme de composantes de rigidité et de déplacement du matériau, on peut utiliser les relations constitutives de l'équation (4.15). Par conséquent, l'expression des résultantes de contrainte en termes de forces normales et de cisaillement, de moments et de leurs ordres supérieurs peut alors s'écrire comme suit :

$$\begin{Bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(0)} \\ \varepsilon_{yy}^{(0)} \\ \gamma_{xy}^{(0)} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & 0 \\ B_{12} & B_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(1)} \\ \varepsilon_{yy}^{(1)} \\ \gamma_{xy}^{(1)} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(3)} \\ \varepsilon_{yy}^{(3)} \\ \gamma_{xy}^{(3)} \end{Bmatrix} \quad (4.20a)$$

$$\begin{Bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & 0 \\ B_{12} & B_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(0)} \\ \varepsilon_{yy}^{(0)} \\ \gamma_{xy}^{(0)} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(1)} \\ \varepsilon_{yy}^{(1)} \\ \gamma_{xy}^{(1)} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & 0 \\ E_{12} & E_{22} & 0 \\ 0 & 0 & E_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(3)} \\ \varepsilon_{yy}^{(3)} \\ \gamma_{xy}^{(3)} \end{Bmatrix} \quad (4.20b)$$

$$\begin{Bmatrix} P_{xx} \\ P_{yy} \\ P_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(0)} \\ \varepsilon_{yy}^{(0)} \\ \gamma_{xy}^{(0)} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & 0 \\ E_{12} & E_{22} & 0 \\ 0 & 0 & E_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(1)} \\ \varepsilon_{yy}^{(1)} \\ \gamma_{xy}^{(1)} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & 0 \\ F_{12} & F_{22} & 0 \\ 0 & 0 & F_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(3)} \\ \varepsilon_{yy}^{(3)} \\ \gamma_{xy}^{(3)} \end{Bmatrix} \quad (4.20c)$$

$$\begin{Bmatrix} R_{yz} \\ R_{xz} \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} H_{44} & 0 \\ 0 & H_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{yz}^{(0)} \\ \gamma_{xz}^{(0)} \end{Bmatrix} \quad (4.20d)$$

Ou :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(0)} \\ \varepsilon_{yy}^{(0)} \\ \gamma_{xy}^{(0)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{Bmatrix}; \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(1)} \\ \varepsilon_{yy}^{(1)} \\ \gamma_{xy}^{(1)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix}; \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(\psi)} \\ \varepsilon_{yy}^{(\psi)} \\ \gamma_{xy}^{(\psi)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \end{Bmatrix}; \begin{Bmatrix} \gamma_{yz}^{(0)} \\ \gamma_{xz}^{(0)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \phi_y \\ \phi_x \end{Bmatrix} \quad (4.21)$$

Il est défini que  $A_{ij}$ ,  $B_{ij}$ ,  $C_{ij}$ ,  $D_{ij}$ ,  $E_{ij}$ ,  $F_{ij}$  et  $H_{ij}$  sont les composantes de rigidité du matériau qui peuvent être obtenues à partir des équations suivantes :

$$[A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}] = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{ij} [1, z, z^2] dz; \quad i, j=1, 2, 6 \quad (4.22a)$$

$$[C_{ij}, E_{ij}, F_{ij}] = \int_{-h/2}^{h/2} f(z) [1, z, \psi(z)] dz \quad i, j=1, 2, 6 \quad (4.22b)$$

$$H_{44} = \int_{-h/2}^{h/2} \left( \frac{\partial f(z)}{\partial z} \right)^2 Q_{44} dz; \quad H_{55} = \int_{-h/2}^{h/2} \left( \frac{\partial f(z)}{\partial z} \right)^2 Q_{55} dz \quad (4.22c)$$

Pour les plaques CNTRC sous charge de flexion  $q$ , est :

$$\delta V = - \int_A q \delta w_0 dx dy \quad (4.23)$$

Les équations de mouvement basées sur la théorie de la plaque de déformation de cisaillement généralisée de la plaque CNTRCA reposant sur la fondation élastique sont obtenues en remplaçant  $\delta U_0$ ,  $\delta U_f$  et  $\delta V$  dans l'Eq. (4.23). Ensuite, intégrant par parties et collecte les coefficients de  $\delta u_0$ ,  $\delta v_0$ ,  $\delta w_0$ ,  $\delta \phi_x$ ,  $\delta \phi_y$  défini comme les inerties. Conduit au mouvement des équations suivantes.

$$\delta u_0: \frac{\partial N_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} = 0 \quad (4.24a)$$

$$\delta v_0: \frac{\partial N_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} = 0 \quad (4.24b)$$

$$\delta w_0: \frac{\partial p_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yz}}{\partial y} + q = 0 \quad (4.24c)$$

$$\delta\phi_x: \frac{\partial M_{xx}}{\partial x} - P_{xz} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} = 0 \quad (4.24d)$$

$$\delta\phi_y: \frac{\partial M_{yy}}{\partial y} - P_{yz} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} = 0 \quad (4.24e)$$

La méthode de Navier est utilisée pour formuler les solutions sous forme fermée aux problèmes de flexion des plaques CNTRC simplement supportées. En suivant la procédure de solution de Navier, nous supposons la forme de solution suivante pour les fonctions de déplacement développées en double série trigonométrique qui satisfait les conditions aux limites,

$$\begin{aligned} u_0(x, y) &= \sum_{M=1}^{\infty} \sum_{N=1}^{\infty} U_{MN} \cos(\alpha x) \sin(\zeta y) \\ v_0(x, y) &= \sum_{M=1}^{\infty} \sum_{N=1}^{\infty} V_{MN} \sin(\alpha x) \cos(\zeta y) \\ w_0(x, y) &= \sum_{M=1}^{\infty} \sum_{N=1}^{\infty} W_{MN} \sin(\alpha x) \sin(\zeta y) \end{aligned} \quad (4.25)$$

$$\phi_x(x, y) = \sum_{M=1}^{\infty} \sum_{N=1}^{\infty} \theta x_{MN} \cos(\alpha x) \sin(\zeta y)$$

$$\phi_y(x, y) = \sum_{M=1}^{\infty} \sum_{N=1}^{\infty} \theta y_{MN} \sin(\alpha x) \cos(\zeta y)$$

$$\text{Ou : } \alpha = \frac{M\pi}{a} \text{ et } \zeta = \frac{N\pi}{b} \cdot i = \sqrt{-1}$$

Ou :  $U_{MN}, V_{MN}, W_{MN}, \theta x_{MN}, \theta y_{MN}$  sont des paramètres arbitraires.

La charge transversale (q) est également étendue comme suit:

$$q(x, y) = \sum_{M=1}^{\infty} \sum_{N=1}^{\infty} Q_{MN} \sin(\alpha x) \sin(\zeta y) \quad (4.26)$$

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

$$\text{For sinusoidal load } Q_{MN} = q_0, (M = N = 1) \quad (4.27)$$

$$\text{For Uniform load } Q_{MN} = \frac{16q_0}{MN\pi^2}, (M=N=1, 3, 5, \dots) \quad (4.28)$$

En substituant l'Eq. (4.29) dans l'Eq. (4.28), on obtient les solutions sous forme fermée qui sont présentées sous la forme matricielle suivante.

$$\left( \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & S_{34} & S_{35} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & S_{44} & S_{45} \\ S_{15} & S_{25} & S_{35} & S_{45} & S_{55} \end{bmatrix} \right) \left\{ \begin{matrix} U_{MN} \\ V_{MN} \\ W_{MN} \\ \theta x_{MN} \\ \theta y_{MN} \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ q_{mn} \\ 0 \\ 0 \end{matrix} \right\} \quad (4.29)$$

Où

$$\begin{aligned}
 S_{11} &= -A_{11}\alpha^2 + A_{66}\zeta^2, & S_{12} &= -\alpha\zeta(A_{12} + A_{66}), & S_{13} &= 0, \\
 S_{14} &= -B_{11}\alpha^3 - B_{66}\zeta^2, & S_{15} &= -B_{12}\alpha\zeta - B_{66}\alpha\zeta, & S_{21} &= S_{12}, \\
 S_{22} &= -A_{66}\alpha^2 - A_{22}\zeta^2, & S_{23} &= 0, & S_{24} &= -B_{12}\alpha\zeta - B_{66}\alpha\zeta, \\
 S_{25} &= -B_{66}\alpha^2 - B_{22}\zeta^2, & S_{31} &= S_{13}, & S_{32} &= S_{23}, \\
 S_{33} &= -D_{55}\alpha^2 - D_{44}\zeta^2, & S_{34} &= -D_{55}\alpha, & S_{35} &= -D_{44}\zeta, \\
 S_{41} &= S_{14}, & S_{42} &= S_{24}, & S_{43} &= S_{34}, \\
 S_{44} &= -C_{11}\alpha^2 - C_{66}\zeta^2 - D_{55}, & S_{45} &= -\alpha\zeta(C_{12} + C_{66}), & S_{51} &= S_{15}, \\
 S_{52} &= S_{25}, & S_{53} &= S_{35}, & S_{54} &= S_{45}, \\
 S_{55} &= -D_{44} - C_{66}\alpha^2 - C_{22}\zeta^2
 \end{aligned} \tag{4.30}$$

Les paramètres adimensionnels utilisés pour présenter les résultats numériques des analyses de flexion des plaques CNTRC sont les suivants.

Pour le problème de flexion :

$$\begin{aligned}
 \bar{w} &= \frac{10^3 D_0}{q_0 a^2} w\left(\frac{a}{2}, \frac{b}{2}\right); \quad \bar{u} = \frac{10^3 D_0}{q_0 a^4} u\left(0, \frac{b}{2}, -h/2\right); \quad \bar{v} = \frac{10^3 D_0}{q_0 a^4} v\left(a/2, 0, -h/2\right) \\
 \bar{\sigma}_{xx} &= -\frac{h^2}{q_0 a^2} \sigma_{xx}(a/2, b/2, -h/2); \quad \bar{\sigma}_{xy} = \frac{h^2}{q_0 a^2} \sigma_{xy}(0, 0, -h/2)
 \end{aligned} \tag{4.31}$$

$$\bar{\sigma}_{xz} = -\frac{h^2}{q_0 a^2} \sigma_{xz}(0, b/2, -h/2)$$

Où :

$$D_0 = \frac{E^p h^3}{12[1-(v^p)^2]}$$

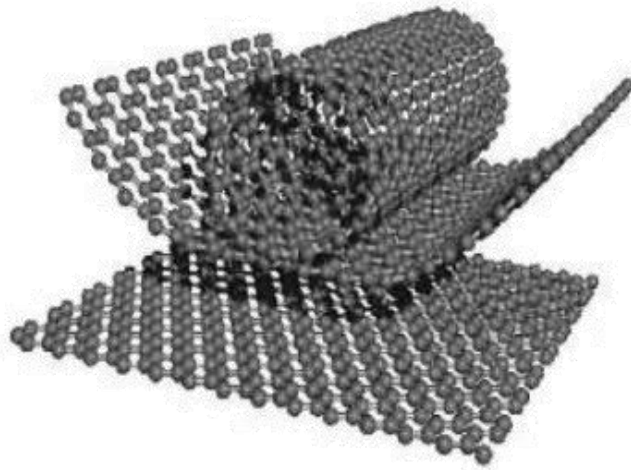
#### IV.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exploré les différentes théories des plaques, des outils essentiels pour simplifier l'analyse des problèmes complexes. Une comparaison détaillée des théories classiques, du premier ordre et d'ordre supérieur a été effectuée, mettant en lumière leur capacité à décrire la déformation de cisaillement des plaques. Il est important de noter que d'autres théories, dérivées de celles présentées ici, peuvent offrir des résultats satisfaisants dans des contextes spécifiques.

Mais peu de fois parvient-on à trouver une théorie universalisable, réductible à toutes les applications (matériaux composés anisotropes, isotropes, stratifiés, sandwich, etc.) et tous les phénomènes sous étude (statique, dynamique, flambement, etc.) tout en devant être simple, rapide et économe par rapport au calcul. Toutes les théories ont des pros et des contre, et ce sont leurs développements qui vont varier avec le domaine du problème.

En utilisant le principe de Hamilton, nous avons établi les équations du mouvement. Ces équations nous ont permis de dériver les équations différentielles générales décrivant la flexion d'une plaque sandwich renforcée par deux types de distribution (UD, FG).

# ***Chapitre V : Résultats et discussion***



### V.I Introduction :

À partir des équations mécaniques régissant la résistance des nanocomposites développées précédemment, une simplification est opérée via l'imposition de conditions aux limites et de symétrie. Cette démarche permet la résolution analytique des équations afin d'établir une solution générale décrivant le comportement statique d'une plaque sandwich nano-composite sous différente distribution de porosité. (UD et FG) dans les peaux et l'âme. Pour cette phase de modélisation, la théorie des déformations par cisaillement au premier ordre (FSDT) a été sélectionnée parmi les trois approches théoriques existantes pour l'analyse des plaques.

Les solutions analytiques obtenues seront ensuite validées par comparaison avec les modèles de référence issus de la littérature scientifique, notamment les travaux de [Wattanasakulpong 2015].

Les solutions analytiques obtenues seront ensuite validées par comparaison avec les modèles de référence issus de la littérature scientifique, notamment les travaux de [Zhu 2012].

### V.2 Résultats numériques et discussions :

L'étude porte sur l'analyse du comportement statique d'une plaque sandwich nano-composite sous différente distribution de porosité, La matrice polymère utilisée est le poly (méta-phenylènevinylène) (PMPV), caractérisée par les propriétés suivantes :

- Masse volumique:  $\rho_o^p = 1150 \text{ kg/m}^3$ ,
- Module d'Young:  $E_o^p = 2.1 \text{ GPa}$ ,
- Coefficient de Poisson:  $\nu^p = 0.34$ .

Le renforcement est assuré par des nanotubes de carbone monoparoi (SWCNT) de type armchair (10,10), dont les propriétés mécaniques, issues des travaux de Zhu et al. (2012), sont:

- Fraction volumique:  $V_{12}^{CNT} = 0.175$ ,
- Masse volumique:  $\rho_{CNT} = 1400 \text{ kg/m}^3$ ,
- Modules d'Young:  $E_{11}^{CNT} = 5.6466 \text{ TPa}$ ,  $E_{22}^{CNT} = 7.0800 \text{ TPa}$ ,
- Modules de cisaillement :  $G_{11}^{CNT} = G_{11}^{CNT} = G_{11}^{CNT} = 1.9445 \text{ TPa}$ ,

La modélisation repose sur la théorie de déformation en cisaillement de ordre élevé , qui intègre un facteur de correction de cisaillement pour satisfaire les conditions d'équilibre aux faces supérieure et intérieure des plaques, Les équation différentielles couplées du mouvement sont résolues via le principe de Hamilton, en appliquant la méthode de Navier sous des conditions aux limites simplement appuyées sur les quatre côtés de la plaque.

L'étude compare deux configurations de distribution des nanotubes :

1. Distribution uniforme (UD-CNT).
2. Distribution fonctionnellement graduée (FG-CNT).

Avec et sans prise en compte de la porosité. Les résultats analysent notamment :

- Le profil de contrainte de cisaillement à travers l'épaisseur.
- La flèche (déflexion) de la plaque.

Cette approche permet une caractérisation précise des performances mécanique des structures sandwich poreuses renforcées de SWCNT, en mettant en lumière l'impact de la répartition des nanotubes et de la porosité sur leur réponse statique.

**Tableau V.1** : Comparaison des flexions adimensionnelles de la plaque carrée **0-1-0** renforcée sans porosité sous des charge uniformes et sinusoïdales (**ah=10**)

| Vcnt        |                | Uniforme load |        |        |           |        | Sinusoïdal load |        |        |           |        |
|-------------|----------------|---------------|--------|--------|-----------|--------|-----------------|--------|--------|-----------|--------|
|             |                | UD            | X      | O      | $\Lambda$ | V      | UD              | X      | O      | $\Lambda$ | V      |
| <b>0.11</b> | <b>TSDT*</b>   | 0.7356        | 0.6206 | 1.0705 | 0.8806    | 0.8806 | 0.4964          | 0.4227 | 0.7080 | 0.5869    | 0.5869 |
|             | <b>SSDT*</b>   | 0.7340        | 0.6179 | 1.0743 | 0.8792    | 0.8792 | 0.4953          | 0.4208 | 0.7104 | 0.5859    | 0.5859 |
|             | <b>Present</b> | 0.7357        | 0.6208 | 1.0701 | 0.8806    | 0.8806 | 0.4964          | 0.4228 | 0.7078 | 0.5870    | 0.5870 |
| <b>0.14</b> | <b>TSDT*</b>   | 0.6475        | 0.5583 | 0.9235 | 0.7655    | 0.7655 | 0.4395          | 0.3817 | 0.6148 | 0.5133    | 0.5133 |
|             | <b>SSDT*</b>   | 0.6458        | 0.5559 | 0.9267 | 0.7640    | 0.7640 | 0.4383          | 0.3800 | 0.6168 | 0.5121    | 0.5121 |
|             | <b>Present</b> | 0.6476        | 0.5585 | 0.9231 | 0.7656    | 0.7656 | 0.4396          | 0.3818 | 0.6146 | 0.5133    | 0.5133 |
| <b>0.17</b> | <b>TSDT*</b>   | 0.4712        | 0.4012 | 0.6844 | 0.5663    | 0.5663 | 0.3177          | 0.2723 | 0.4526 | 0.3769    | 0.3769 |
|             | <b>SSDT*</b>   | 0.4702        | 0.4001 | 0.6862 | 0.5655    | 0.5655 | 0.3170          | 0.2715 | 0.4537 | 0.3763    | 0.3763 |
|             | <b>Present</b> | 0.4712        | 0.4012 | 0.6842 | 0.5663    | 0.5663 | 0.3177          | 0.2724 | 0.4525 | 0.3769    | 0.3769 |

\* [Wattanasakulpong 2015]

Les différentes valeurs de fraction volumique de nanotube de carbone et divers renforcements de (cœur et peaux) de la plaque sandwich sous chargement uniforme et sinusoïdale avec le rapport géométrique de la plaque ( $ah=10$ ) sont considérés dans le tableau (IV.1). On peut constater à partir de cette comparaison le bon accord entre nous résultat et les résultats de (**wattanasakulpong**) [Wattanasakulpong 2015].

De plus, si la fraction volumique augmente, On constate une diminution de la flèche pour les différents modèles de distribution des nanotubes de carbone.

### V.3 Effet de la géométrie sur la déflexion d'une plaque sandwich :

Après avoir démontré l'impact de la fraction volumique des nanotubes de carbone (CNT) sur la déflexion de la plaque sandwich, nous examinons à présente l'influence d'un autre paramètre clé : le rapport géométrique  $a/h$ .

**Tableau V.2 :** L'effet du rapport géométrique  $a/h$  sur les déflexions adimensionnel ( $W$ ) de la plaque sandwich carrée 1-2-1 renforcée sous des charges uniformes et sinusoïdales ( $V_{cnt}=0.17$ ).

| plaque sandwich renforcée en cœur (0-UD-0) |                     |               |           |           |                 |           |           |
|--------------------------------------------|---------------------|---------------|-----------|-----------|-----------------|-----------|-----------|
|                                            |                     | Uniforme load |           |           | Sinusoïdal load |           |           |
| $a/h$                                      |                     | $\bar{U}$     | $\bar{V}$ | $\bar{W}$ | $\bar{U}$       | $\bar{V}$ | $\bar{W}$ |
| 10                                         | Madani**<br>Présent | 0.1959        | 0.2414    | 1.4477    | 0.1189          | 0.1695    | 0.8373    |
|                                            |                     | 0.2095        | 0.2512    | 1.4874    | 0.1283          | 0.1437    | 0.9538    |
| 20                                         | Madani**<br>Présent | 0.1000        | 0.1134    | 1.3029    | 0.0620          | 0.0813    | 0.7586    |
|                                            |                     | 0.1018        | 0.1147    | 1.3134    | 0.0630          | 0.0651    | 0.8376    |
| 50                                         | Madani**<br>Présent | 0.0402        | 0.0445    | 1.2619    | 0.0242          | 0.0321    | 0.7362    |
|                                            |                     | 0.0404        | 0.0446    | 1.2636    | 0.0251          | 0.0252    | 0.8043    |

| plaques sandwich renforcée en peaux (UD-0-UD) |                     |               |           |           |                 |           |           |
|-----------------------------------------------|---------------------|---------------|-----------|-----------|-----------------|-----------|-----------|
|                                               |                     | Uniforme load |           |           | Sinusoïdal load |           |           |
| $ah$                                          |                     | $\bar{U}$     | $\bar{V}$ | $\bar{W}$ | $\bar{U}$       | $\bar{V}$ | $\bar{W}$ |
| 10                                            | Madani**<br>Présent | 0.0408        | 0.1019    | 0.5254    | 0.0290          | 0.0830    | 0.2782    |
|                                               |                     | 0.0481        | 0.1039    | 0.5246    | 0.0305          | 0.0531    | 0.3524    |
| 20                                            | Madani**<br>Présent | 0.0207        | 0.0359    | 0.3277    | 0.0111          | 0.0332    | 0.1688    |
|                                               |                     | 0.0217        | 0.0362    | 0.3279    | 0.0142          | 0.0172    | 0.2217    |
| 50                                            | Madani**<br>Présent | 0.0083        | 0.0125    | 0.2711    | 0.0043          | 0.0110    | 0.1379    |
|                                               |                     | 0.0084        | 0.0126    | 0.2711    | 0.0056          | 0.0058    | 0.1838    |

\*\*[Madani 2019]

On considère trois valeurs de ce rapport, 10, 20 et 50 pour lesquels on détermine les valeurs des flexions  $W$  avec les mêmes configurations précédentes de renforcement cœur et peaux.

Ce tableau récapitule l'effet du rapport géométrique  $a/h$  sur les déflexions adimensionnelles ( $w$ ) de plaque sandwich carrée renforcée (1-2-1) sous des charges uniformes et sinusoïdales avec différentes valeurs de fraction volumique en nanotubes de carbone pour différents renforts de plaque.

D'après les résultats, il est clair que les flèches des plaques soumises à une charge uniforme sont plus important que celles des plaques soumises à une charge sinusoïdale, ces résultats nous ont permis de choisir le type de plaque sandwich avec renforcement correspondant à la charge appliquée.

**TableauV.3:** Effet du rapport géométrique  $a/h$  sur les déflexions adimensionnel ( $W$ ) de la plaque sandwich carrée poreuse renforcée (1-2-1) sous charge uniforme  $V_{cnt} = 0.11$ ,  $P = 0.1$

| plaque sandwich renforcée en cœur (0-UD-0)    |         |        |        |        |        |
|-----------------------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|
| ah                                            | 0-UD-0  | 0-X-0  | 0-O-0  | 0-Λ-0  | 0-V-0  |
| 10                                            | 2.3139  | 1.9166 | 3.0468 | 2.7103 | 2.7103 |
| 20                                            | 2.0161  | 1.5860 | 2.8006 | 2.4448 | 2.4448 |
| 50                                            | 1.9307  | 1.4906 | 2.7307 | 2.3691 | 2.3691 |
| plaques sandwich renforcée en peaux (UD-0-UD) |         |        |        |        |        |
| ah                                            | UD-0-UD | X-0-X  | O-0-O  | Λ-0-Λ  | V-0-V  |
| 10                                            | 0.8276  | 0.8024 | 0.8528 | 0.8359 | 0.8359 |
| 20                                            | 0.5089  | 0.4975 | 0.5204 | 0.5142 | 0.5142 |
| 50                                            | 0.4171  | 0.4096 | 0.4248 | 0.4217 | 0.4217 |

Le TableauV.3 synthétise l'étude paramétrique du rapport d'épaisseur  $a/h$  (10,20,50) sur les déflexions adimensionnelles  $W$  d'une plaque carrée sandwich poreuse a configuration de renforts faciaux et de cœur identique, pour une fraction volumique fixe de nanotubes de carbone ( $V_{cnt} = 0.11$ ) Les résultats mettent en évidence une variation significative de la rigidité structurale :  $a/h = 10$  (plaque épaisse), on observe  $W = 0.8024$ ,  $a/h = 50$  (plaque mince), la déflexion diminue a  $W = 0.4096$  cette tendance s'explique par la relation inverse entre l'épaisseur de la plaque et sa déformation sous chargement une augmentation du rapport  $a/h$  (plaque plus minces) réduit le moment d'inertie de la section, entraînant une amplification des déflexions. A l'inverse, un faible rapport  $a/h$  (plaque épaisses) renforce la rigidité flexionnelle, limitant ainsi la fléchées observations confirment le rôle critique de l'optimisation géométrique dons la conception de structures sandwich légères à hautes performances mécanique.

**Tableau V.4:** L'effet de la porosité sur la déflexion adimensionnelles de la plaque carrée poreuse renforcée 1-2-1 sous des charges uniformes et Sinusoïdales ( $a/h = 10$ ,  $P = 0.1$ )

| plaque sandwich renforcée en cœur (0-UD-0)    |         |               |                 |
|-----------------------------------------------|---------|---------------|-----------------|
| Vcnt                                          |         | Uniforme load | Sinusoïdal load |
| 0.11                                          | 0-UD-0  | 2.3139        | 1.4869          |
|                                               | 0-X-0   | 1.9166        | 1.2395          |
|                                               | 0-O-0   | 3.0468        | 1.9434          |
|                                               | 0-Λ-0   | 2.7103        | 1.7335          |
|                                               | 0-V-0   | 2.7103        | 1.7335          |
| 0.14                                          | 0-UD-0  | 2.0479        | 1.3204          |
|                                               | 0-X-0   | 1.6827        | 1.0929          |
|                                               | 0-O-0   | 2.7631        | 1.7657          |
|                                               | 0-Λ-0   | 2.4312        | 1.5587          |
|                                               | 0-V-0   | 2.4312        | 1.5587          |
| 0.17                                          | 0-UD-0  | 1.5417        | 0.9895          |
|                                               | 0-X-0   | 1.2633        | 0.8160          |
|                                               | 0-O-0   | 2.0649        | 1.3154          |
|                                               | 0-Λ-0   | 1.8248        | 1.1656          |
|                                               | 0-V-0   | 1.8248        | 1.1656          |
| plaques sandwich renforcée en peaux (UD-0-UD) |         |               |                 |
| Vcnt                                          |         | Uniforme load | Sinusoïdal load |
| 0.11                                          | UD-0-UD | 0.8276        | 0.5577          |
|                                               | X-0-X   | 0.8024        | 0.5411          |
|                                               | O-0-O   | 0.8528        | 0.5740          |
|                                               | Λ-0-Λ   | 0.8359        | 0.5629          |
|                                               | V-0-V   | 0.8359        | 0.5629          |
| 0.14                                          | UD-0-UD | 0.7393        | 0.5011          |
|                                               | X-0-X   | 0.7144        | 0.4845          |
|                                               | O-0-O   | 0.7637        | 0.5169          |
|                                               | Λ-0-Λ   | 0.7468        | 0.5057          |
|                                               | V-0-V   | 0.7468        | 0.5057          |
| 0.17                                          | UD-0-UD | 0.5445        | 1.1656          |
|                                               | X-0-X   | 0.5266        | 0.3545          |
|                                               | O-0-O   | 0.5608        | 0.3769          |
|                                               | Λ-0-Λ   | 0.5492        | 0.3692          |
|                                               | V-0-V   | 0.5492        | 0.3692          |

Le tableau de données met clairement en évidence l'impact de la porosité intégrée au sein de la structure sandwich, renforcée au niveau de cœur ou des peaux. Cette observation se vérifie de manière cohérente pour l'ensemble des réponses mécaniques analysées, incluant les flèches adimensionnelles ( $W$ ). Les contraintes ( $xx$ ,  $xy$ ) et la fréquence propre adimensionnelle ( $W$ ), sous différentes conditions de sollicitation. Les résultats soulignent ainsi l'influence significative de la répartition de la porosité sur les performances globales du composite.

Les plaques soumises à un chargement uniforme et Sinusoïdal.

**Tableau V.5 :** Effet de la combinaison d'épaisseur de la plaque sandwich sur la déflexion et les contraintes adimensionnelle sous charge uniforme pour différentes valeurs d'épaisseur ( $W_{cnt}^*=0.11$ )

| plaque sandwich renforcée en cœur   |         |           |           |                     |                   |
|-------------------------------------|---------|-----------|-----------|---------------------|-------------------|
|                                     |         | $\bar{U}$ | $\bar{W}$ | $\bar{\sigma}_{xx}$ | $\bar{\tau}_{xy}$ |
| 1-1-1                               | 0-UD-0  | 0.5364    | 3.5635    | 0.2212              | 0.1297            |
|                                     | 0-X-0   | 0.4683    | 3.1752    | 0.1929              | 0.1141            |
|                                     | 0-O-0   | 0.6302    | 4.0881    | 0.2582              | 0.1509            |
|                                     | 0-Λ-0   | 0.6489    | 3.6034    | 0.2263              | 0.1380            |
|                                     | 0-V-0   | 0.6489    | 3.8656    | 0.2593              | 0.1459            |
| 1-2-1                               | 0-UD-0  | 0.3212    | 2.3139    | 0.1291              | 0.0801            |
|                                     | 0-X-0   | 0.2535    | 1.9166    | 0.0984              | 0.0640            |
|                                     | 0-O-0   | 0.4476    | 3.0468    | 0.1844              | 0.1095            |
|                                     | 0-Λ-0   | 0.4472    | 2.7103    | 0.1424              | 0.0917            |
|                                     | 0-V-0   | 0.4472    | 2.7103    | 0.1766              | 0.1006            |
| 2-1-2                               | 0-UD-0  | 0.7014    | 4.4822    | 0.2840              | 0.1668            |
|                                     | 0-X-0   | 0.6721    | 4.3238    | 0.2736              | 0.1602            |
|                                     | 0-O-0   | 0.7336    | 4.6531    | 0.2949              | 0.1739            |
|                                     | 0-Λ-0   | 0.7616    | 4.5811    | 0.2792              | 0.1684            |
|                                     | 0-V-0   | 0.7616    | 4.5811    | 0.3015              | 0.1735            |
| 1-4-1                               | 0-UD-0  | 0.1860    | 1.5047    | 0.0688              | 0.0484            |
|                                     | 0-X-0   | 0.1400    | 1.2328    | 0.0481              | 0.0370            |
|                                     | 0-O-0   | 0.2915    | 2.1272    | 0.1161              | 0.0734            |
|                                     | 0-Λ-0   | 0.2854    | 1.8197    | 0.0796              | 0.0572            |
|                                     | 0-V-0   | 0.2854    | 1.8197    | 0.1074              | 0.0654            |
| plaques sandwich renforcée en peaux |         |           |           |                     |                   |
|                                     |         | $\bar{U}$ | $\bar{W}$ | $\bar{\sigma}_{xx}$ | $\bar{\tau}_{xy}$ |
| 1-1-1                               | UD-0-UD | 0.0704    | 0.7972    | 0.8477              | 0.0246            |
|                                     | X-0-X   | 0.0655    | 0.7555    | 1.6103              | 0.0271            |
|                                     | O-0-O   | 0.0761    | 0.8414    | 0.0229              | 0.0226            |
|                                     | Λ-0-Λ   | 0.0819    | 0.8121    | 1.5293              | 0.0275            |
|                                     | V-0-V   | 0.0819    | 0.8121    | 0.0244              | 0.0230            |
| 1-2-1                               | UD-0-UD | 0.0747    | 0.8276    | 0.9285              | 0.0262            |
|                                     | X-0-X   | 0.0717    | 0.8024    | 1.8001              | 0.0294            |
|                                     | O-0-O   | 0.0778    | 0.8528    | 0.0247              | 0.0236            |
|                                     | Λ-0-Λ   | 0.0839    | 0.8359    | 1.7032              | 0.0293            |
|                                     | V-0-V   | 0.0839    | 0.8359    | 0.0260              | 0.0241            |
| 2-1-2                               | UD-0-UD | 0.0691    | 0.7818    | 0.8239              | 0.0241            |
|                                     | X-0-X   | 0.0622    | 0.7263    | 1.5267              | 0.0261            |
|                                     | O-0-O   | 0.0773    | 0.8441    | 0.0228              | 0.0226            |
|                                     | Λ-0-Λ   | 0.0825    | 0.8033    | 1.4754              | 0.0270            |
|                                     | V-0-V   | 0.0825    | 0.8033    | 0.0245              | 0.0230            |
| 1-4-1                               | UD-0-UD | 0.0864    | 0.8967    | 1.1390              | 0.0303            |
|                                     | X-0-X   | 0.0850    | 0.8852    | 2.2334              | 0.0343            |
|                                     | O-0-O   | 0.0877    | 0.9077    | 0.0306              | 0.0271            |
|                                     | Λ-0-Λ   | 0.0934    | 0.9003    | 2.1367              | 0.0340            |

|  |              |        |        |        |        |
|--|--------------|--------|--------|--------|--------|
|  | <b>V-0-V</b> | 0.0934 | 0.9003 | 0.0317 | 0.0274 |
|--|--------------|--------|--------|--------|--------|

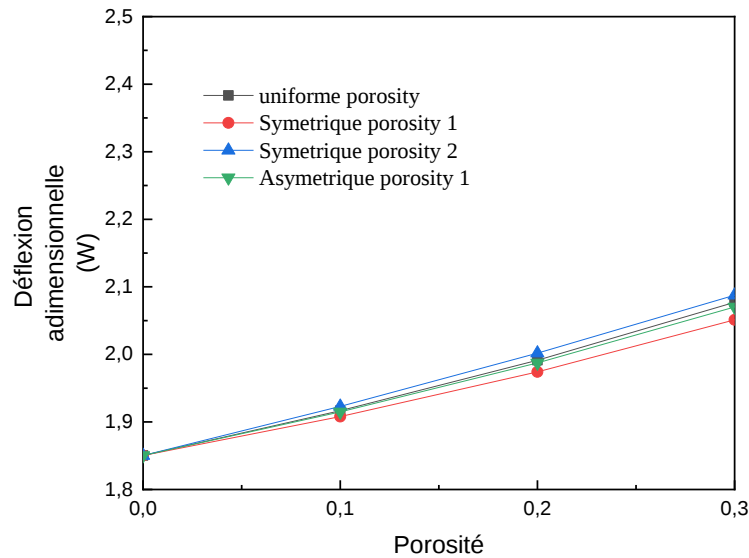
On peut constater que les déformations et contraintes adimensionnelle dépendent de la combinaison d'épaisseur des couches de la plaque sandwich, La plage minimale est observée pour la configuration (1-4-1), tandis que la plage maximale correspond à (2-1-2) dans les panneaux sandwich à âme renforcée. La tendance inverse est constatée pour les structures renforcées aux peaux supérieure et inférieure. Cette différence s'explique probablement par les variations d'épaisseur des couches renforcées, influençant directement le comportement mécanique. Comme Il est établi qu'un renfort localisé au niveau des peaux (extrémités) de la structure sandwich conféré une rigidité accrue comparativement à un renfort centré sur la partie médiane de la plaque. Cette configuration optimise ainsi les performances mécaniques par une répartition stratégique des matériaux

**Tableau 6 :** Effet des différents types de distribution de porosité en fonction du rapport  $a/h=10$ , ( $V_{cnt} = 0.11$ ,  $P=0.2$ ) sur les flexions adimensionnelle ( $W$ ) du plaque sandwich renforcée sous des charges uniformes.

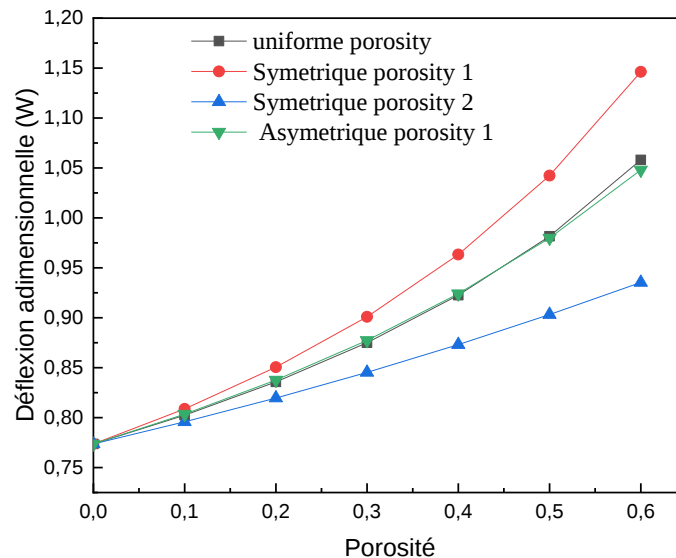
| plaque sandwich renforcée en cœur   |                |              |              |              |              |
|-------------------------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                                     | <b>0-UD-0</b>  | <b>0-X-0</b> | <b>0-O-0</b> | <b>0-Λ-0</b> | <b>0-V-0</b> |
| <b>uniforme porosité</b>            | 1.5498         | 1.2896       | 2.0394       | 1.8139       | 1.8139       |
| <b>Symétrique porosité 1</b>        | 1.5236         | 1.2776       | 1.9790       | 1.7701       | 1.7701       |
| <b>Symétrique porosité 2</b>        | 1.5693         | 1.2970       | 2.0892       | 1.8491       | 1.8491       |
| <b>Asymétrique porosité</b>         | 1.5444         | 1.2868       | 2.0274       | 1.8129       | 1.8129       |
| plaques sandwich renforcée en peaux |                |              |              |              |              |
|                                     | <b>UD-0-UD</b> | <b>X-0-X</b> | <b>O-0-O</b> | <b>Λ-0-Λ</b> | <b>V-0-V</b> |
| <b>uniforme porosité</b>            | 0.8626         | 0.8357       | 0.8896       | 0.8714       | 0.8714       |
| <b>Symétrique porosité 1</b>        | 0.8778         | 0.8505       | 0.9051       | 0.8867       | 0.8867       |
| <b>Symétrique porosité 2</b>        | 0.8459         | 0.8196       | 0.8724       | 0.5784       | 0.5784       |
| <b>Asymétrique porosité</b>         | 0.5835         | 0.5658       | 0.6011       | 0.5895       | 0.5895       |

On remarque à travers le tableau IV.6 que la valeur de la charge critique de flambement adimensionnelle la plus élevée est détectée dans le cas de **0-X-0** pour la distribution de la porosité de type (symétrique2) dans le cas de la plaque sandwich renforcé en cœur. Ce si peut être expliqué par la concentration du renfort près de la surface supérieur et inférieur qui favorise l'élargissement de la plage de la rigidité des poutres **0-X-0** par rapport à la distribution (**0-UD-0**, **0-X-0**, **0-O-0**, **0-Λ-0**, **0-V-0**). Par contre, la concentration de la porosité en peaux de la section Asymétrique2.

Rendre la plaque plus rigide et donne des flexions adimensionnelles pour les plaques sandwich renforcée en peaux On observer aussi une grande diminution des flèches ou des flexions adimensionnelle  $\bar{w}$  plus important. Cette diminution est attribuée au fait que les extrémités ou les faces sont bien renforcée. On constant que la diminution de la flèche rend la plaque plus rigide et support plus de charges.



**Figure V.1 :** L'effet de la distribution uniforme de porosité sur la déflexion adimensionnelle  $\bar{W}$  de plaque carrée poreuse sandwich sous le type de renforcement (0-X-0)



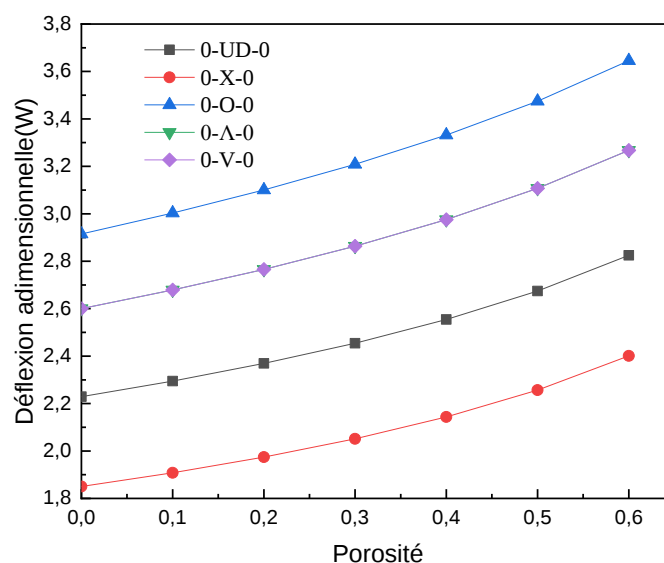
**Figure V.2:** L'effet de la porosité sur la de flexion adimensionnelle ( $\bar{W}$ ) de la plaque carrée poreuse sandwich 0-X-0 sous différents distribution uniforme et asymétrique de porosité ( $V_{cnt^*} = 0.11$ ;  $P=0.2$ )

Les figures V.1 et V.2 illustrent l'effet de la porosité sur la de flexion adimensionnelle ( $\bar{W}$ ) de plaque carrée poreuse sandwich 0-X-0 et sous différents types de distribution de porosité (uniforme, symétrique1, symétrique2, asymétrique1 et asymétrique2) pour les déférentes pourcentage de la porosité P[0%,0.1%,0.2%,0.3%,0.4%,0.5% et0.6% ].

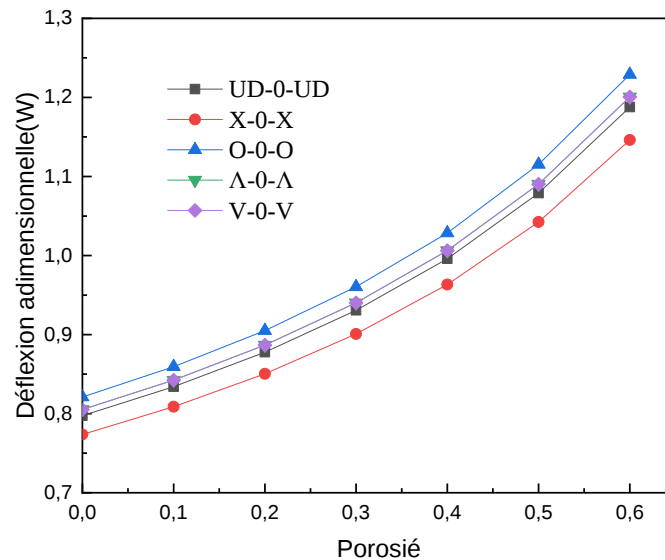
On observe une augmentation de la valeur de la déflexion par rapport à la plaque sans porosité et pour les (4) type de distribution de porosité en CNT .Cela est peut être expliqué par le fait que la porosité influe sur le module de Young en provoquant un changement de rigidité de la plaque sandwich. Donc la porosité augmente la flèche et directement proportionnelle à la distribution de porosité des nanotubes de carbone.

Pour une mise en évidence de l'influence des différents paramètres pris en considération sur le comportement de la plaque sandwich poreuse, on détermine la déflexion adimensionnelle en fonction de la porosité à différentes distribution de porosité de la structure sandwich soumise aux différents renforcement cœur et face .comme le montre les figures .1 et V.2 .L'allure de l'ensemble des courbes de la déflexion est croissante, cela est dû à l'influence de la porosité sur la rigidité de la plaque. Des écarts de valeurs de déflexions entre les différentes courbes selon la distribution de porosité. La variation de ces écarts n'est pas linéaire avec la distribution de porosité en CNT traduisant son influence sur la résistance de l'ensemble de la structure de la plaque sandwich. Quantitativement, les valeurs de la de flexion adimensionnelles dans le cas du renforcement faciales sont relativement inférieures à celles trouvées dans le cas de cœur renforcée. Cette différence peut être expliquée par le faite que le renforcement facial consolide doublement la plaque sandwich par rapport au cas de cœur renforcée.

Il est à noter que pour les types de renforcement des plaques sandwichs, la plus grande valeur de la déflexion pour P=0, et UP est inférieure à celle de P=0.6 à AS1 , Autrement dit ,l'inconvénient de la porosité qui est de favoriser la déflexion est compensé par la concentration dans la distribution de porosité en CNT . Les CNT renforcent les structures poreuses. Le caractère de renforcement est justifié et confirmé.

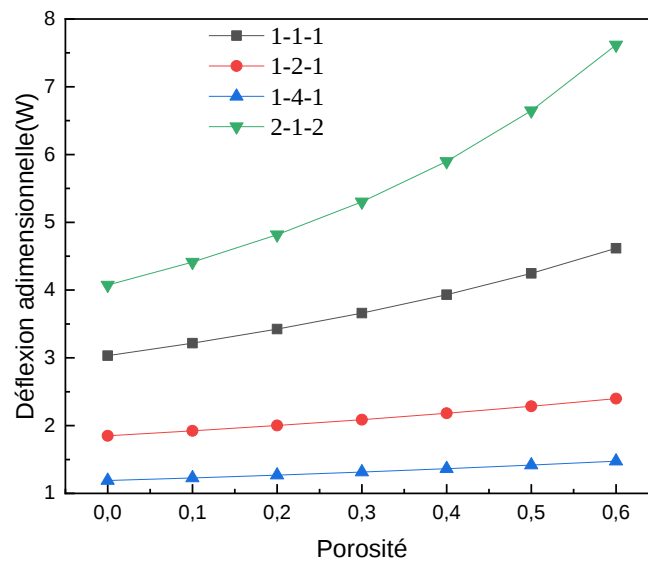


**Figure V.3 :** L'effet de la distribution uniforme de porosité sur la de flexion adimensionnelle  $\bar{W}$  de plaque carrée poreuse sandwich sous différents types de renforcement (0-UD-0, 0-X-0, 0-O-0, 0- $\Lambda$ -0, 0-V-0).



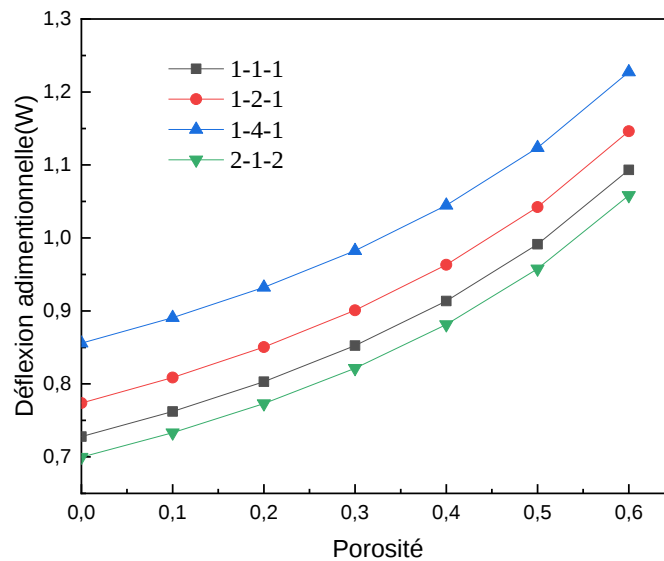
**Figure V.4 :** Effet de la porosité sur la de flexion adimensionnelle  $\bar{W}$  de plaque carrée poreuse sandwich renforcée par Face pour différents distribution de porosité.

Les résultats présentés en évidence l'influence de la porosité sur la rigidité des poutres composites renforcées de nanotubes de carbone (CNT). Pour un rapport d'élancement  $a/h=10$  et une fraction volumique de CNT  $V_{cnt}=0.11$  une augmentation systématique des déflexions adimensionnelle est observée avec l'augmentation du taux de porosité et ce pour toutes les configurations de renforcement étudiées : CNT unidirectionnels (UD-0-UD, X-0-X, O-0-O,  $\Lambda$ -0- $\Lambda$ , V-0-V). Toute fois la configuration X-0-X présenté des performances mécaniques supérieures, avec des valeurs de déflexions adimensionnelle significativement plus faible que les autres cas, Cette amélioration été attribuée à la répartition stratégique des CNT, concentrés préférentiellement sur les faces supérieure et inférieure de la plaque, optimisant ainsi la résistance à la déflexion par une meilleure répartition des contrainte.



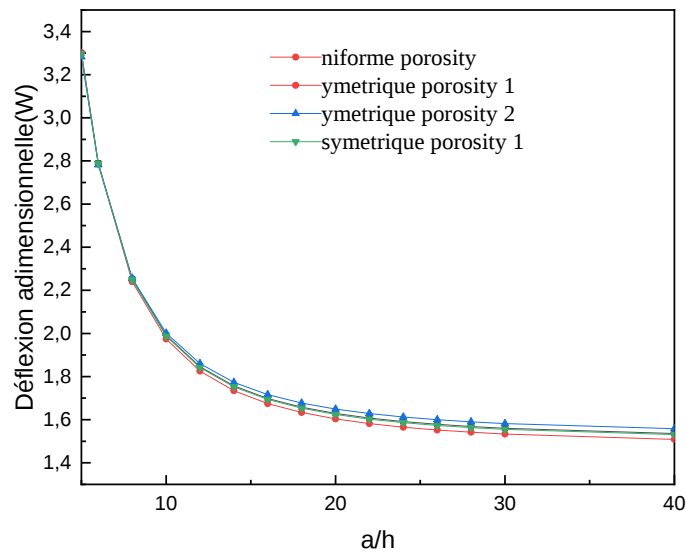
**Figure V.5 :** L'effet de la combinaison des épaisseurs sur la de flexion adimensionnelle  $\bar{w}$  de plaque sandwich carrée en fonction de la porosité pour  $a/h=10$  (Renforcement de cœur)

Les courbes de la figure montrent la dépense de la déflexion en fonction des épaisseurs de différentes couches de la plaque sandwich poreuse. On constate que la courbe de la combinaison (2-1-2) enregistre des déflexions supérieures que celles des autres combinaisons D'épaisseurs, elle atteint une valeur de  $\bar{W} = 7.6171$  pour une porosité de 0.6. Par contre les valeurs de la déflexion adimensionnelle de la combinaison d'épaisseurs (1-4-1) sont les plus faibles. L'allure des quatre courbes est semblable et sont croissantes en fonction de la porosité. Cependant la plaque dont la combinaison (2-1-2) est moins rigide que celle (1-4-1). Cette figure confirme que le renforcement de cœur à épaisseur doublé par rapport aux couches supérieures et inférieure augmente le moment d'inertie de la plaque sandwich qui influe sur le comportement de la structure vis-à-vis de la déflexion. De la même manière, on met en évidence l'impact du renforcement des deux faces en CNT sur la déflexion de la plaque pour les quatre combinaisons d'épaisseurs. La figure V.6 montre l'effet de la combinaison d'épaisseur sur la déflexion en fonction de la porosité et pour  $a/h=10$  dans le cas du renforcement de faces supérieure et inférieure.



**Figure V.6 :** L'effet de la combinaison d'épaisseur sur la déflexion en fonction de la porosité  
Avec  $a/h=10$  (Renforcement des deux faces supérieure et inférieure)

Les courbes illustrées mettent en évidence l'évolution de la déflexion de la plaque en fonction des configurations d'épaisseurs stratifiées. La combinaison 1-4-1 présente une déflexion plus marquée que les trois autres assemblages, traduisant une rigidité réduite. A l'inverse, la configuration (2-1-2) affiche les déflexions minimales, signe d'une rigidité structurale optimisée. Il est notable que les déflexions maximales observées lors du renforcement des faces restent nettement inférieures à celles générées par le renforcement de l'âme, même à porosité nulle. Par exemple, pour une porosité de 0.6 ( $W = 1.2274$ ) avec renforcement des faces, la déflexion maximale est inférieure à la déflexion minimale du cas où l'âme est renforcée sans porosité ( $W = 1.1902$ ). Cette divergence souligne l'efficacité du renforcement des couches supérieure et inférieure par des nanotubes de carbone (CNT), dont l'épaisseur doublée améliore la résistance mécanique: une face optimise la résistance en compression, tandis que l'autre renforce la traction, réduisant ainsi conjointement la déformation globale. Ces résultats confirment que le renforcement des faces, même avec une porosité de 0.6, confère à la plaque sandwich une rigidité supérieure à celle d'une âme renforcée sans défauts, validant l'importance stratégique de l'architecture des couches dans la performance structurale.

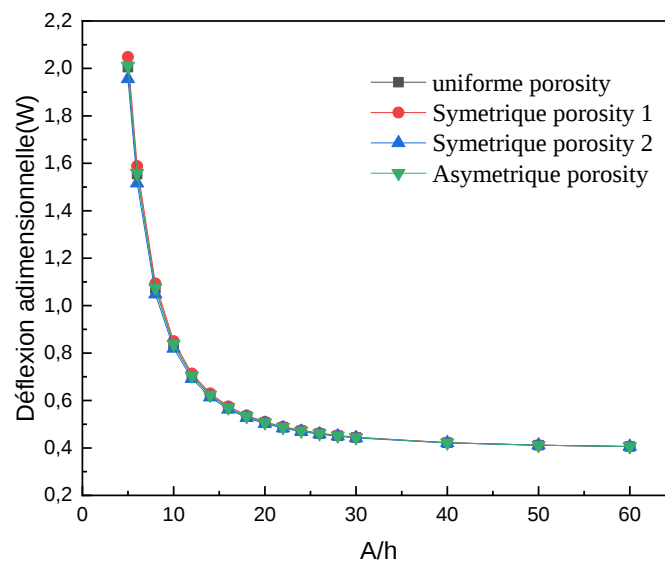


**Figure V.7 :** Effet du rapport  $a/h$  sur la de flexion adimensionnelle  $\bar{w}$  de plaque carrée poreuse sandwich renforcée 1-2-1 par cœur sous charges uniforme ( $V_{CNT}^*0.11$ ), et coefficient de porosité ( $P=0.2$ ),

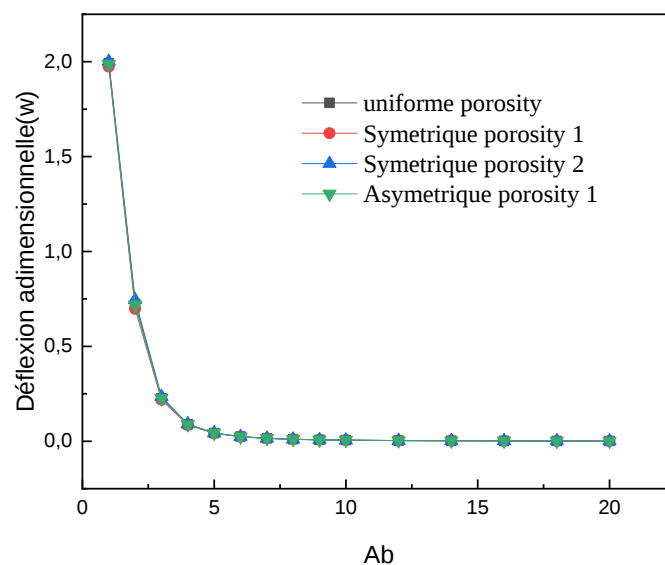
(a)Renforcement 1-2-1 par cœur de plaque sandwich

L'étude compare deux stratégies de renforcement : Par cœur et par face (Peaux) en utilisant la distribution en X-0-X, tout en évaluant l'influence de la porosité et de l'épaisseur relative du noyau.

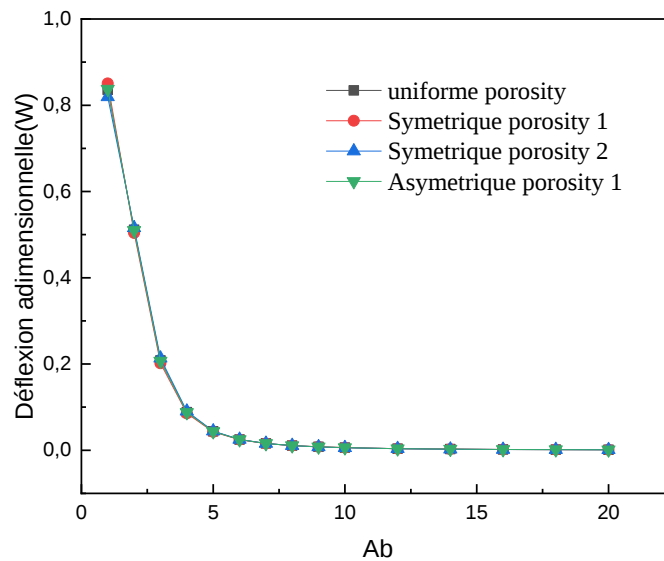
Pour le renforcement par Cœur, la déflexion diminue significativement lorsque  $a/h$  augmente jusqu'à 30, au-delà duquel elle se stabilise en un palier horizontal. Dans le cas du renforcement des faces, cette stabilisation intervient à partir de  $a/h = 35$ . Cette tendance confirme une relation inverse entre le rapport géométrique  $a/h$  et la déflexion, attribuée à l'accroissement du moment d'inertie. L'épaisseur de l'âme joue ainsi un rôle déterminant dans la rigidité flexionnelle de la structure, modulant la réponse mécanique globale. Par ailleurs, une élévation du coefficient de porosité entraîne systématiquement une augmentation de la déflexion, soulignant la sensibilité des performances structurales à la densité du matériau poreux. Les résultats démontrent que le comportement mécanique des plaques sandwich est principalement gouverné par les propriétés de l'âme, notamment sa distribution de porosité et son mode de renforcement (X-NTC), contrairement aux faces dont l'impact reste secondaire. Cette observation met en lumière l'important d'optimiser la conception du noyau pour contrôler efficacement la déformation des structures sandwich.



**Figure V.8 :** Effet du rapport  $a/h$  sur la déflexion adimensionnelle  $\bar{W}$  de plaque carrée poreuse sandwich renforcée 1-2-1 par face ou peaux sous charge uniforme ( $V_{cnt}^*=0.11$ ) et coefficient de porosité ( $p=0.2$ )



**Figure V.9 :** Renforcement 1-2-1 par cœur de plaque sandwich



**Figure.V.10 :** Effet du rapport  $a/b$  sur la déflexion adimensionnelle ( $\bar{W}$ ) de plaque carrée poreuse sandwich renforcée 1-2-1 par cœur et 1-2-1 par face sous charge uniforme ( $V_{CNT}^* = 0.11$ ) e coefficient de porosité ( $P=0.2$ ).  
Renforcement 1-2-1 par Face de plaque sandwich.

La variation des flexions adimensionnelles de l'âme renforcé et des peaux d'une plaque sandwich carré 1-2-1 sous charge uniforme avec fraction volumique de nanotubes ( $V_{cnt}^*=0.17$ ) sont présentés dans (figure V.9 et V.10) respectivement.

Leurs résultats montrent la dépendance des fréquences adimensionnelles avec le facteur géométrique et le type de renforcement de la plaque sandwich. Dans ce cas, on peut voir que la différence entre la fréquence adimensionnelle de UD-CNT et FG-CNT est très faible pour tous les modes. De plus, la plage de fréquence adimensionnelle augmente avec l'augmentation du nombre des modes et diminue avec l'augmentation du rapport largeur / hauteur ( $a/h$ ), Puis se stabilise pour les valeurs les plus élevées.

D'autre part, la réduction de la fréquence adimensionnelle est plus prononcée dans la plaque sandwich à âme renforcée.

L'effet du rapport géométrique  $a/h$  sur la déflexion adimensionnelle et les contraintes de la plaque sandwich carrée renforcée pour divers schémas sous charge uniforme est présenté dans le tableau (IV.6) avec ( $V_{cnt}^*=0.17$ ).

#### V.4 Conclusion :

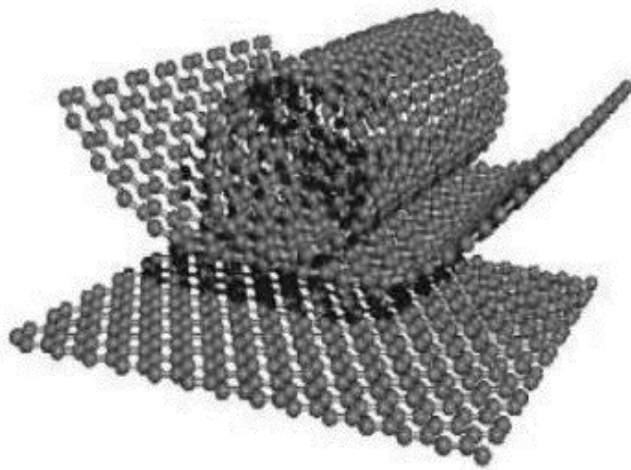
Cette recherche a révélé plusieurs résultats significatifs susceptibles d'entraîner des conséquences notables. Les conclusions majeures concernent principalement l'influence du rapport géométrique, de la fraction volumique, de la répartition des épaisseurs de la plaque et du

coefficient de porosité sur les paramètres mécaniques tels que la déflexion, le déplacement et les contraintes générées.

Les résultats obtenus par la présente étude sont :

- ✓ La déflexion et les déplacements augmentent à mesure que l'indice de porosité augmente.
- ✓ Le choix de renforcement par cœur ou par face influe sur la déflexion adimensionnelle
- ✓ La comparaison établie entre les flèches des plaques sous la charge uniforme et la charge sinusoïdale montre que, les valeurs les plus significatives sont celle des plaques soumises à une charge uniforme.
- ✓ déflexions adimensionnelles augmentent proportionnellement avec le nombre de modes et la porosité.
- ✓ Les déplacements et les contraintes adimensionnels pour les combinaisons d'épaisseurs de la plaque poreuse sandwich dépendent du type de distribution des NTC.
- ✓ -Le rapport longueur sur épaisseur et la déflexion adimensionnelle sont inversement proportionnelles.
- ✓ La combinaison (2-1-2) semble la plus adaptée avec le renforcement facial.
- ✓ La combinaison (1-4-1) pour le renforcement de cœur convient pour les plaques sandwich sollicitées par des flexions.

## ***Conclusion générale***



## **Conclusion Générale :**

Les matériaux composites intégrant des nanotubes de carbone (NTC) s'imposent comme une solution prometteuse dans le domaine des matériaux composites innovants, en raison de leurs propriétés structurales et électroniques exceptionnelles. Ces caractéristiques uniques ouvrent des perspectives significatives pour des applications avancées en ingénierie des matériaux et en technologies de pointe.

cette mémoire de Master a permis d'atteindre les objectifs initiaux portant sur l'étude de l'influence des paramètres clés sur le comportement statique de plaques sandwich composites renforcées par des nanotubes de carbone (CNT) et présentant une porosité, en s'appuyant sur la théorie des déformations par cisaillement d'ordre élevée. Les équations différentielles gouvernant le système, intégrant ces paramètres, ont été résolues via le principe de Hamilton. Les analyses ont fourni les résultats de flexion adimensionnelle pour deux types de plaques sandwich poreuses, mettant en évidence, à travers une étude paramétrique, l'impact de l'aspect ratio, de la fraction volumique, du type de renforcement et de l'épaisseur de la plaque sur leur réponse mécanique, pour deux niveaux de porosité distincts.

Les résultats numériques démontrent que la distribution des CNT en surface (FG-CNTRC) confère une résistance supérieure aux déformations comparativement aux autres configurations de renfort, par ailleurs, une augmentation de la porosité entraîne systématiquement une hausse de la déflexion, quel que soit le type de plaque étudié. Une comparaison des performances sous chargement uniforme et sinusoïdal révèle des déflexions plus marquées dans le premier cas, en raison d'une sollicitation globale de la structure, contrairement au chargement sinusoïdal localisé au centre. Les déflexions et contraintes adimensionnelles varient significativement selon l'épaisseur des couches et le type de renforcement. Pour les plaques à âme renforcée, une configuration d'épaisseur (1-2-1) minimise la déflexion, tandis que la géométrie (2-1-2) présente l'effet inverse. À l'opposé, un renforcement facial favorise des performances optimales avec une répartition (2-1-2).

Enfin, le rapport longueur/épaisseur influence inversement la déflexion adimensionnelle. La configuration (2-1-2) s'avère idéale pour un renforcement facial, tandis que le schéma (1-2-1) optimise la résistance en flexion des plaques à âme renforcée.

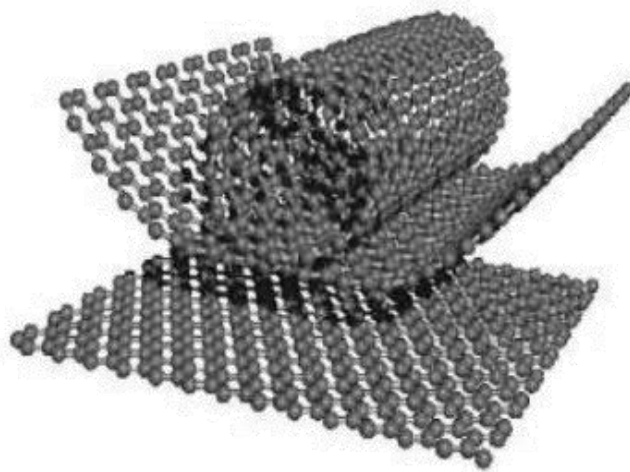
Cette contribution s'inscrit dans l'axe de recherche de notre laboratoire dédié aux matériaux nanocomposites à base de nanotubes de carbone. Cette étude constitue une référence scientifique pour les travaux futurs, offrant une base de connaissances structurée afin d'approfondir les savoirs existants et d'explorer des applications innovantes de ces nanocomposites dans divers domaines technologiques.

En perspective, il serait pertinent d'étendre ces travaux à l'analyse de plaques composites intégrant des distributions variables de nanotubes de carbone. Des investigations complémentaires pourraient porter sur:

- ✚ L'impact des types de sollicitations mécaniques,
- ✚ L'influence des conditions aux limites mécaniques,
- ✚ Les effets thermiques couplés aux charges structurales,
- ✚ Ainsi que l'application de théories avancées de modélisation.

Cette approche permettrait d'élargir le champ d'application des nanocomposites tout en renforçant leur optimisation pour des usages spécifiques.

# ***Références Bibliographiques***



[B]

[Barlow 1991] A. Barlow, The chemistry of polyethylene insulation, IEEE, Electrical Insulation Magazine, Vol. 7, N° 1, pp. 8-19, (1991).

[Berthelot 1999] J.M. Berthelot, « Matériaux composites, comportement et analyse des structures », Edition TEC & DOC, Cachan, 1999

[Boukhors et Meridja 2023] : L'effet de la porosité sur la vibration libre d'une poutre (FG-CNT) reposant sur une fondation élastique, Université Ibn khaldoun -Tiaret.

[Bordere, 2011] : Ordere, S., J.M. Corpart, NE. El Bounia, P. Gaillar, d, N. Passade- Boupat, P. M. Piccione, D. Plée. Industrial production and applications of carbon nanotubes, (2011).

[BOWLES, Kenneth J. et FRIMPONG, Stephen]. *Void effects on the interlaminar shear strength of unidirectional graphite-fiber-reinforced composites. Journal of composite materials*, 1992, vol. 26, no 10, p. 1487-1509.

[Bozlar 2009] : M. Bozlar, Modification de surface des nanotubes de carbone par un polymère conducteur électro généré pour la réalisation de nano composites multifonctionnels, École Normale Supérieure de Cachan - Paris, 2009

[Buerschaper 1944] Buerschaper. R. A, Thermal and electrical conductivity of graphite and carbon at Löw températures, Journal of Applied Physics, 15(5), 452-454, (1944).

[BRUN, Maurice, LALLEMAND, André, QUINSON, Jean-François], et al. A new method for the simultaneous determination of the size and shape of pores: the thermoporometry. *Thermochimica acta*, 1977, vol. 21, no 1, p. 55-57.

[C]

[Charlotte Bernard 2007] : Bernard C, Propriétés mécaniques des nanotubes de carbone en tant que nano sondes et leurs fonctionnalisation par Bio-nanoparticules, l'Université Bordeaux I, (2007).

[F]

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

[Florent, 2011] : Florent Seichepine, « Réalisation d'interconnexions de faible résistivité à base de nanotubes de carbone bi parois pour la microél électronique», Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, (2011).

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

[H]

[HASHIN, Zvi] : The elastic module of heterogeneous materials. *Journal of Applied Mechanics*, 1962, vol. 29, no 1, p. 143

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

[Haouli et Hallouz 2018] : Analyse de vibration libre d'un nano-poutre entouré par une matrice polymère.

[HEYVAERT, Laurent]. Modélisation de la formation des structures et des microporosités durant la solidification d'alliages d'aluminium. 2015. Thèse de doctorat. Université de Lorraine.

[I]

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

[J]

[Journat C et al] : Nature, 388 :756,1997.

[K]

[K. Hachour 2010], K. Hachour, Zaïri, Fahmi, Naït-abdelaziz, Moussa, et al. Experiments and modeling of high crystalline polyethylene yielding under different stress states. International journal of plasticity, (2014), vol. 54, p. 1-18.

[KOVÁČIK, J] : *Correlation between elastic modulus, shear modulus, poisson's ratio and porosity in porous materials. Advanced Engineering Materials*, 2008, vol. 10, no 3, p. 250

[KOVÁČIK, J] : *Corrélation between Poisson's ratio and porosity in porous materials. Journal of materials science*, 2006, vol. 41, no 4, p. 1247.

[L]

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

[LEDRU, Yohann]. Etude de la porosité dans les matériaux composites stratifiés aéronautiques. 2009. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse

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

[Lu 1996]: K.L. Lu, R. M. Lago, Y. K. Chen, M. L. H. Green, P. J. F. Harris, S. C. Tsang, Carbon, vol. 34, pp. 814-816, 1996.

[M]

[Madani 2019] : Etude Statique et Dynamique des Structures en Polymère à Base de Nanotubes de Carbone, université de Djillali liabes – sidi bel Abbes.

[Marcoux 2002] : Marcoux. P. R, Réactivité et manipulation de nanotubes de carbone monocouches : fonctionnalisation de surface par greffage covalent et mise en œuvre comme agent structurant, Université d'Angers, (2002).

[MARIN, R. Bruce et HAYNES, Russell R] : *Theoretical analysis of the Effects of Air Voids in Concrete. In : Journal Proceedings. 1971. p. 36*

[M.J. Yokota], 'Process controlled curing of resin matrix composites', *Sample Journal*, p11-17, July/Augus, 1978.

[Moingeon 2006], Moingeon. F, « Synthèse de polymères dendronisés par polymérisation anionique », thèse de doctorat option chimie, Université Louis Pasteur Strasbourg I, (2006).

[P]

[PERRET, Anouk]. Méthodologie de caractérisation microstructurale 3D de matériaux poreux structurés pour la thermique. 2015. Thèse de doctorat. INSA de Lyon.

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

[R]

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

[S]

**[SPRIGGS, R. M]** : Expression for effect of porosity on elastic modulus of polycrystalline refractory materials, particularly aluminum oxide. Journal of the American Ceramic Society, 1961, vol. 44, no 12, p. 628

**[SWEATMAN, M. B. et QUIRKE, N]**. Characterization of porous materials by gas adsorption: comparison of nitrogen at 77 K and carbon dioxide at 298 K for activated carbon. Langmuir, 2001, vol. 17, no 16, p. 5011-5020.

**[T]**

**[TANG, Jian-Mao, LEE, Woo I., et SPRINGER, George S]**. Effects of cure pressure on resin flow, voids, and mechanical properties. Journal of composite materials, 1987, vol. 21, no 5, p. 421-440.

**[Taylor et Francis 2016]** : Livre de Taylor et Francis, 6000 Broken sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742.

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

**[Tomalia 2001]**, Tomalia.D.A, J. M .J. Fréchet, « Dendrimers and other Dendritic Polymers », Ed. Wiley, New York, (2001).

**[W]**

**[Wattanasakulpong 2015]** Wattanasakulpong, N. and Chaikittiratana, A. “Exact solutions for static and dynamic analyses of carbon nanotube-reinforced composite plates With Pasternak elastic

**[X]**

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

**[Xu 2001]** : M. xu Highly ordered carbon nanotubes arrays and IR detection, Infrared Physics & Technology, (2001), 42, 485-491.  
Toulouse, (2014).

**[Y]**

**[YOSHIDA, H., OGASA, T., et HAYASHI, R]**. Statistical approach to the relationship between ILSS and void content of CFRP. Composites Science and Technology, 1986, vol. 25, no 1, p. 3-18.

**[Z]**

**[ZERROUKI 2022]** : thèse d’Etude de l’influence de la distribution des Nano charges sur le Comportement Mécanique du Nano composite, Université Ibn Khaldoun-Tiaret.