

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
Spécialité : Génie Civil
Option : structures

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

Présenté par :
BOUKHATEM Razika
FEGHOULI Haouaria

Sujet du mémoire

L'effet de la porosité sur La charge critique de flambement d'une poutre nanocomposite

SOUTENU LE : Juin 2022. Devant Le Jury Composé de :

Dr. A. SAOULA	Université Ibn Khaldoun-Tiaret	Président
Pr. M. ZIDOUR	Université Ibn Khaldoun-Tiaret	Encadreur
Dr. T. BENSATTALAH	Université Ibn Khaldoun-Tiaret	Examineur
Pr. T.H. DAOUADJI	Université Ibn Khaldoun-Tiaret	Examineur

Promotion : 2021/2022

سنة الف الف يوم

السلام عليكم ورحمة الله وبركاته

Remerciements

*Avant de commencer la présentation de ce travail, nous tenons à remercier sincèrement et profondément en premier lieu notre Dieu *ALLAH* le tout puissant.*

*Nous devons exprimer notre gratitude à Mr *Zidour Mohamed* d'avoir*

Accepté de nous encadrer avec enthousiasme et beaucoup d'attention, ainsi que pour sa gentillesse, sa disponibilité, et ses conseils qui nous ont permis d'avancer, non seulement dans le cadre du mémoire, mais aussi dans nos études.

*Ainsi ne saurons oublier de remercier les honorables membres du **Jury** qui nous ont fait l'immense honneur de Présider et d'examiner ce modeste travail.*

Enfin, à tous ceux qui ont aidés de près ou de loin pour la réalisation de ce projet de fin d'étude.

Dédicace

Avec l'aide de Dieu le tout puissant est enfin achevé ce Travail, lequel je dédie à toutes les personnes qui me sont Chères :

A ma mère, ma raison, ma raison d'être de vivre, la lanterne qui éclaire mon chemin et m'illumine de douceur et d'amour.

À celui qui m'a donné un sens à mon existence, en m'offrant une éducation digne de Confiance et celui qui m'a soutenu nuits et jours, et durant tout mon parcours, à toi mon Père " Tayeb " je te dis merci.

A ma deuxième mère et mon quatrième sœur Denia.

A mes chères sœurs : Amina, Karima et Wissem.

A mes chers frères : Taher, Adel et Hichem.

A mes très chers amis : Wiam et Ichrek,

A tous les membres de ma famille BOUKHATEM, petites et grandes.

A mes chers collègues : Haouaria, Ismahane, Rania.

En témoignage de mon respect et de ma grande affection.

Razika

Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

À mes très chers parents : Ahmed et Kharfia.

À ma sœur Malika et mon frère Miloudet sa fille aussi, Batoul

À mes chers frères et sœurs : Anwar, Kader, Rachida et Ayarafif.

À mon très cher cousin : Fatima, Souad, Warda et Wahiba.

À mes très chers amis : Mounira, Wiam et Rania.

À mon très cher cousin : Imad et Kada

À tous ma famille FEGHOULI.

À mes chers collègues : Razika, Ismahane, Rania, Houda.

À toutes personnes que j'aime

Haouaria

Résumé

Dans le présent travail de recherche, une méthode analytique est développée pour analyser la stabilité au flambement des poutres poreuses en nanocomposites à base de nanotube de carbone.

L'effet de cisaillement transversal est inclus dans cette méthode en utilisant une théorie de déformation d'ordre élevée par cisaillement des poutres (HSDT). Le modèle des poutres considérées sont supposées être simplement appuyées et deux types de poutres poreuses, à savoir les poutres à distribution uniforme des nanotubes de carbone (UD-CNT) et fonctionnellement graduées (FG-CNT) sont pris en compte. Les deux types de poutres sont renforcés par des nanotubes de carbone à paroi simple. Les équations analytiques sont dérivées en utilisant le principe de Hamilton et les solutions de la charge critique de flambement sont obtenues.

Les solutions actuelles sont validées numériquement par comparaison avec certains résultats disponibles dans la littérature. Influence de divers paramètres pour étudier la charge critique de flambement sont étudiés et discutés, tels que les rapports géométriques, la fraction volumique, les types de renforcement et l'effet de la porosité sur la charge critique de flambement des poutres nano composées renforcées.

Mots - clés : nanotubes ; flambement ; déformation par cisaillement ; fraction volumique ; porosité.

Abstract

In this research work, an analytical Method is developed to analyse the buckling stability of porous beams made of carbon nanotube-based nanocomposites.

The transverse shear effect is included in this Method using a high-order beam shear strain theory (HSDT). The model of the beams considered are assumed to be simply supported and two types of porous beams, namely beams with uniform distribution of carbon nanotubes

(UD-CNT) and functionally graded (FG-CNT) are taken into account. Both types of beams are reinforced with single-walled carbon nanotubes. The Analytical equations are derived using Hamilton's principle and the solutions of the critical buckling load are obtained.

Current solutions are digitally validated against some of the results available in the literature. Influence of various parameters to study the critical buckling load are studied and discussed, such as geometric ratios, volume fraction, reinforcement types and the effect of porosity on the critical buckling load of reinforced nanocomposite beams.

Keywords : nanotubes ; buckling ; shear deformation ; volume fraction ; porosity.

ملخص

في هذا العمل البحثي، تم تطوير طريقة تحليلية لتحليل ثبات التواء الحزم النانوية المركبة المسامية على أساس الأنابيب النانوية الكربونية.

يتم تضمين تأثير القص المستعرض في هذه الطريقة باستخدام نظرية تشوه قص الحزمة من الدرجة الأولى (FSDT) يُفترض أن نموذج الحزم المدروسة مدعوم ببساطة ويتم النظر في نوعين من الحزم المسامية، وهما الأنابيب النانوية الكربونية الموزعة بشكل موحد (UD-CNT) والحزم المتدرجة وظيفيًا (FG-CNT). يتم تعزيز كلا النوعين من العوارض بأنابيب نانوية كربونية أحادية الجدار ، ويتم اشتقاق المعادلات التحليلية باستخدام مبدأ هاملتون ويتم الحصول على حلول حمل الالتواء الحرج.

يتم التحقق من صحة الحلول الحالية عدديًا بالمقارنة مع بعض النتائج المتوفرة في الأدبيات. تمت دراسة ومناقشة تأثير المعلمات المختلفة لدراسة حمل الالتواء الحرج، مثل النسب الهندسية وكسر الحجم وأنواع التعزيز وتأثير المسامية على تحليلات الاهتزاز الحر لحزم النانوية المركبة المقواة.

كلمات مفتاحية: الأنابيب النانوية، التواء، تشوه القص، النسبة الحجمية، المسامية.

Sommaire

Sommaire

Remerciements.....	I
Dédicace	ii
Résumé	iv
Abstract.....	v
ملخص.....	vi
Liste des figures	xiii
Liste des tableaux	xvii
Liste des abréviations	xix
Liste des notations.....	xxi
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I : Généralités sur les nanotubes de carbone

I.1 Introduction.....	4
I.2 Historique des nanotubes des carbones.....	4
I.3Le carbone	5
I.4 Les formes classiques du carbone.....	6
I.4.1 Le graphite.....	6
I.4.2 Le diamant.....	7
I.4.3 Carbones "mal organisés".....	7
I.5 Les nouvelles formes du carbone.....	8
I.5.1 Le graphène.....	8
I.5.2 Les fullerènes.....	9
I.6 Les Nanotubes de carbone.....	10
I.7 Structure des nanotubes de carbone.....	11
I.7.1 Nanotubes de carbones mono feuillets, SWNT (Single Walled Nanotube)	11
I.7.2 Nanotubes de carbone multi feuillets, MWNT (Multi Walled Nanotubes).....	13
I.8 Méthodes de synthèses de nanotubes de carbone.....	15
I.8.1 Méthode de l'arc électrique.....	15
I.8.2 Méthode d'ablation laser.....	16
I.8.3 Décomposition catalytique (Hip CO)	17
I.9 propriétés des nanotubes de carbone.....	19
I.9.1 Propriétés mécaniques.....	19
I.9.2 Propriétés thermiques.....	20

Sommaire

I.9.3 Propriétés électrique.....	21
I.9.4 Propriétés optiques.....	21
I.10 Défauts des nanotubes de carbone.....	22
I.11 Applications des nanotubes de carbone.....	24
I.12 Inconvénients des Nanotubes.....	25
I.13 Conclusion.....	26

CHAPITRE II : Généralité sur les matériaux composite et les nanocomposites

II-1 Introduction.....	28
II-2 Définition d'un matériau composite.....	28
II-3 Classification des matériaux composites.....	28
II-3-1 Composites à matrice polymérique.....	29
II-3-2 Composites à matrice métallique.....	29
II-3-3 Composites à matrice céramique.....	29
II-4 Généralités sur la structure des polymères.....	29
II-5 Notions sur les polymères.....	29
II-6 Définition de polymère.....	30
II-7 Classification des polymères	30
➤ II-7-1 Classification suivant l'origine.....	30
- II-7-1-1 Les polymères naturels.....	30
- II-7-1-2 Les polymères artificiels.....	31
- II-7-1-3 Les polymères synthétiques.....	31
➤ II-7-2 Classification en fonction de l'architecture.....	31
- II-7-2-1 Les homopolymères.....	31
- II-7-2-2 Les copolymères.....	31
➤ II-7-3 Classification selon le comportement thermique.....	32
- II-7-3-1 Les thermoplastiques.....	32
- II-7-3-2 Les thermodurcissables.....	32
- II-7-3-3 Les élastomères.....	32
II-8 Utilisation des polymères.....	32
II-9 Les nanocomposites et différences avec les composites.....	32
II-10 Les matériaux nanocomposites.....	33
II-11 Classification des nanocomposites.....	34
➤ II-11-1 Les composites à matrice organique.....	34

Sommaire

- II-11-1-1 composites à matrices thermoplastiques.....	34
- II-11-1-2 composites à matrices thermodurcissables.....	34
- II-11-1-3 Les composites à matrice métallique.....	34
- II-11-1-4 Les composites à matrice céramique.....	35
II-12 Nanocomposites (Nanotube de carbone/matrice Polymère)	35
II-13 Propriétés des nanocomposites polymères.....	35
- II-13-1 Propriétés mécaniques.....	35
- II-13-2 Propriétés électriques.....	36
- II-13-3 Conductivité thermiques.....	36
- II-13-4 Propriétés au feu.....	36
II-14 Interface matrice-renfort dans les nanocomposites à matrice polymère.....	36
II-15 Elaboration des nanocomposites (NTC/polymère)	37
- II-15-1 Polymérisation in situ.....	37
- II-15-2 Mélange en solution.....	38
- II-15-3 Mélange à l'état fondu.....	38
II-16 Dispersion des renforts.....	39
- II-16-1 Utilisation des ultrasons.....	39
Les inconvénients de l'utilisation des ultrasons.....	40
- II-16-2 Dispersion mécanique par tri-cylindre.....	40
II-17 Marché.....	41
II-18 Application des nanocomposites dans le domaine de Génie civil.....	42
II-19 Conclusion.....	43

CHAPITRE III : Les matériaux poreux et la porosité

III.1 Introduction	45
III.2 les matériaux poreux et la porosité	45
III.2.1 les matériaux poreux (interstices)	46
III.3 Porosité	47
III.4 La caractérisation de la porosité.....	48
III.4.1 Porosimétrie par Intrusion d'Eau	48
III.4.2 Porosimétrie par intrusion de mercure.....	48
III.4.3 Stéréologie	49
III.4.4 La micro tomographie	49

Sommaire

III.4.5 Diffusion de rayonnement.....	49
III.4.6 Les ultrasons.	50
III.5 Effet de la porosité sur les propriétés mécaniques des matériaux	50
III.5.1 Porosité et module d'élasticité longitudinale (le module de Young/porosité) ...	51
III.5.2 Porosité et le module de cisaillement (le module de cisaillement /porosité)	53
III.5.3 Porosité et le coefficient de Poisson ν (le coefficient de Poisson ν /porosité).....	53
III .6 Conclusion.....	54

CHAPITRE IV : Les théories des poutres et développement mathématique

IV.1 introduction.....	56
IV.2 les différentes théories des poutres.....	56
IV.2.1 Théories Euler-Bernoulli (théorie classique des poutres)	56
IV.2.2 Théorie de Timoshenko.....	57
IV .2. 3 La théorie d'ordre élevé (HSDT).....	59
IV.3 Géométrie et propriétés de la poutre nanocomposite avec porosité.....	62
IV.4 Cinématique et équations constitutives.....	64
IV.4.1 Les équations du mouvement.....	65
IV.5 Les solutions analytiques pour la poutre CNTRC.....	66
IV.6 Conclusion.....	67

CHAPITRE V : Résultats et discussion

V.1 Introduction	69
V.2 Conclusions	76
Conclusion générale.....	78
Références Bibliographique.....	80

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1: Image TEM de l'extrémité d'un nanotube multicouche.....	5
Figure I.2: quelques dates intéressantes dans le développement des nanotubes de carbone....	5
Figure I.3: Vue d'une particule de noir de carbone en coupe.....	6
Figure I.4 : Structure du graphite hexagonal.....	7
Figure I.5: Forme et structure du diamant.....	7
Figure I.6 : Graphène à partir du graphite.....	8
Figure I.7: Du C60 au C80 : les atomes ajoutés au C60 pour obtenir le C70 et leC80 sont représentés en rouge.....	10
Figure I.8 : Représentation d'un nanotube de carbone avec les extrémités fermée.....	10
Figure I.9 : Structure d'un nanotube de carbone.....	11
Figure I.10: Représentation de la structure tubulaire creuse de : a) nanotube mon paroi ; b) nanotube bi-parois et c) nanotube multi-parois.....	11
Figure I.11.a: Nanotubes de carbone mon feuillet (SWNT).....	12
Figure I.11.b: Différent structures de carbone.....	12
Figure I.12: à gauche : Représentation graphique d'un MWNT et adroite : image de microscope Electronique a transmission de plusieurs MWNT.....	13
Figure I.13: Nanotubes de carbones multi-feuillets observent en microscopie électronique en transmission.....	14
Figure I.14: Structures possibles des MWNT. Gauche : type poupée russe. Droite : type rouleau de.....	14
Figure I.15 : Représentation des structures moléculaires d'un nanotube mono feuille (SWNT) et d'un nanotube multi feuillet (MWNT).....	14
Figure I.16 : Schéma d'un réacteur de synthèse de nanotubes de carbone par la méthode De l'arc électrique.....	16
Figure I.17: Schéma de l'appareillage d'ablation laser.....	17
Figure I.18: Réacteur de synthèse laser continu (CO2) de l'ONERA.....	17
Figure I.19 : Production de nanotubes par méthode Hip Co.....	18
Figure I.20: Propriétés électroniques des nanotubes de carbones monocouches en fonction de leurs indices de chiralité (n, m)	21
Figure I.21: Influence du type de cycle sur la courbure de la surface.....	22
Figure I.22 : Image MET des extrémités de deux nanotubes multicouches.....	23

Liste des figures

Figure I.23: Introduction d'une paire pentagone-heptagone provoquant une variation de Diamètre et de chiralité : a- de (11,0) à (12,0) ; b- de (9,0) à (12,0)	23
Figure I.24 : Défauts pentagonaux et heptagonaux se traduisant par des jonctions.....	23
Figure I.25 : Image (MET) d'un échantillon de nanotube (collerette brute produite par arc électrique)	24

Chapitre II :

Figure II .1 : Exemple de matériau composite.....	28
Figure II.2 : modèle schématique de la synthèse d'un polymère.....	30
Figure II.3 : Illustration schématique de la préparation de Nanocomposites nylon-6/Argile par Polymérisation in-situ d'après.....	37
Figure II.4 : Méthodes d'élaborations des nanocomposites polymères.....	38
Figure II.5: L'influence de la dispersion des (CNTs) par ultrasons.....	40
Figure II.6 : a) Tri cylindre Exakt80E. b) Schéma du circuit d'un fluide dispersé partir cylindre.....	41
Figure II.7 : Production mondiale (en tonnes) de nanocomposites polymères.....	42
Figure II.8 : Production mondiale (montant en millions de dollars) de nanocomposites polymères.....	42

Chapitre III :

Figure III.1 : (a) la porosité d'interstice, (b) la porosité de fissure.....	46
Figure III.2 : Exemples de matériaux poreux.....	46
Figure III.3 : Schématisation d'un milieu poreux.....	47
Figure III.4: Représentation schématique de l'influence de la porosité sur les propriétés mécaniques de matériau poreux.....	51

Chapitre IV :

Figure IV.1 : Cinématique d'Euler Bernoulli.....	57
Figure IV.2 : Cinématique de Timoshenko.....	58
Figure IV.3 : Variation de la fonction de gauchissement $f(z) = z$ et $f'(z)$ en fonction de l'épaisseur.....	59
Figure IV .4 : Cinématique de la Théorie d'Ordre Elevé.....	59

Liste des figures

Figure IV.5 : Variation de la fonction de gauchissement $f(z)$ des différents modèles en fonction de l'épaisseur.....	61
Figure IV.6 : Variation de la fonction de gauchissement $f'(z)$ des différents modèles en fonction de l'épaisseur.....	61
Figure IV.7 : Géométrie de la poutre.....	62
Figure IV.8 : géométrie de la poutre poreuse renforcée par des nanotubes de carbone.....	62

Chapitre V :

Figure V.1 : Les charges critiques de flambement de la poutre X-CNT avec différents rapports d'épaisseur (L/h)	70
Figure V.2 : La charge critique de flambement de la poutre O-CNT différents rapports d'épaisseur (L/h)	71
Figure V.3 : Effet du rapport de forme (L/h) et de la porosité sur les charges critiques de flambement ($V_{cnt}^*=0.12$)	73
Figure V.4 : Effet du rapport de forme a/h et de la porosité sur les charges critiques de flambement ($V_{cnt}^*=0.12$)	74
Figure V.5 : Effet du rapport de forme (L/h) et de la porosité sur les charges critiques de flambement pour différents types de renforcement ($V_{cnt}^*=0.12, p=0\%$)	75
Figure V.6 : Effet du rapport de forme (L/h) et de la porosité sur les charges critiques de flambement pour différents types de renforcement ($V_{cnt}^*=0.12, P=2\%$)	75

Liste des tableaux

Chapitre I :

Tableau I.1 : Comparaison des propriétés mécaniques des CNT et d'autres matériaux..... 20

Chapitre II :

Tableau II.1 : Avantages et inconvénients de l'ajout de nanoparticules aux polymères.... 33

Tableau II.2 : Comparaison des différentes méthodes d'élaboration des composites polymères/NTC..... 39

Chapitre V :

Tableaux V.1 : comparaison des résultats de la charges critique de flambement pour une poutre renforcée par des nanotubes de carbone ($L/h=15, V_{cnt}^*=0.12$) 69

Tableaux V.2 : Comparaison des charge critiques de flambement adimensionnelle des poutres CNTRC ($L/h=15$) 70

Tableaux V.3: Valeurs de la charge critique de longueur poutre poreuse pour les différents types de distribution, porosité et pourcentage de porosité P, ($L/h=10, V_{cnt}^*=0.12$) 72

Tableaux V.4 : Valeurs de la chargé critique de la poutre de type (X-CNT) pour les différents types de porosité, fraction volumique et valeurs du rapport L/h..... 72

Liste des abréviations

Liste des abréviations

AFM	Microscopie à force atomique.
CCVD	Catalytic Chemical Evapore Déposition.
CNT	Nanotube de carbone.
CVD	Chemical Evapore Déposition.
Hip Co	Décomposition de CO à haute pression.
MWCNT	Nanotube de carbone multi-paroi.
SWCNT	Nanotube de carbone mono-paroi.
DWCNT	Nanotube de carbone bi-paroi.
PA	le polyamide.
CO	Monoxyde de carbone.
CO2	Dioxyde de carbone.
TSDT	théories d'ordre élevé et du troisième ordre.
CNTRC	Poutre composite renforcée par des nanotubes de carbone.
GPa	Giga pascalle.
TPa	Terra pascalle.
TEM	Microscopie électronique de transmission.
NTC	Nanotube de carbone.
PVC	le polychlorure de vinyle.
PE	le polyéthylène.
PP	le polypropylène.
PS	le polystyrène.
PA	le polyamide.
PC	le polycarbonate.
TP	Thermoplastiques.
TD	Thermodurcissables.
PMMA	Poly méthacrylate de Mé MMCs.
MMCs	Composites à matrice métallique.
FSDT	Théorie de premier ordre de déformation de cisaillement (Timoshenko).
HSDT	Théorie d'ordre élevé.

Liste des notations

Liste des notations

sp^1, sp^2, sp^3	Trois formes allotropiques
c_c	La liaison carbone-carbone
A	La surface de la section d'un nanotube.
C60	Fullerène C60.
C70	Fullerène C70.
C80	Fullerène C80.
d	diamètre du nanotube interne.
T	L'épaisseur de la couche d'un nanotube.
$\Phi(z)$	La fonction de gauchissement.
u	Déplacement axial.
w	Déplacement transversale.
$u_0(x)$	Déplacement axial de la fibre moyenne.
$w_0(x)$	Déplacement transversale de la fibre moyenne.
$\gamma_{xz}, \varepsilon_x$	Composantes de déformation.
ϕ_{xz}	Déplacement due au cisaillement.
ϕ_x	La rotation due au cisaillement.
τ_{xz}	Contrainte tangentielle.
G_{xz}	Le module de cisaillement.
φ_x	La rotation autour d'axes x.
β	Coefficient de correction.
L	Longueur de la poutre.
h	Epaisseur de la poutre.
f(z)	Fonction de forme.
G_{12}	Module de cisaillement équivalent.
E_{22}	Module de Young équivalente l'axe transversale.
$E_{11}^{cnt}, E_{22}^{cnt}$	Modules de Young des nanotubes de carbone.
G_{12}^{cnt}	Module de cisaillement des nanotubes de carbone.
G_P, E_P	propriétés matérielles de la matrice polymérique.
E_{11}	Module de Young longitudinal.
E	Module de Young.
$\eta_i (i=1, 2,3)$	Les paramètres d'efficacité.
V_{cnt}	Fraction volumique des nanotubes de carbone.
V_P	Fraction volumique de la matrice polymère.

Liste des notations

ν	Coefficient de Poisson.
ρ^{cnt}	Masse volumique du nanotube de carbone.
ρ^p	Masse volumique de la matrice polymère.
ν^{CNT}	Coefficient du poisson du nanotube de carbone.
ν^p	Coefficient du poisson de la matrice polymère.
V_{cnt}^*	Fraction volumique du nanotube de carbone.
σ_x	Contrainte normale dans la direction x.
$U_m, W_{bm} \text{ et } W_{sm}$	Des paramètres arbitraires.
δU	La variation virtuelle de l'énergie de déformation.
δV	La variation virtuelle de l'énergie potentielle.
N, M, Q	Les efforts résultants.
A_{11}	Rigidité de membrane.
B_{11}	Rigidité de couplage.
D_{11}	Rigidité de flexion.
$\delta u_0, \delta w_0$	Champ virtuel de déplacement.
Θ	Angle chiral.
N_{cr}	La charge du critique de flambement.
\bar{N}_{cr}	La charge critique Adminisionale.
w_b	Composante de la flexion du déplacement transversal long du plan médian de la poutre.
w_s	Composante du cisaillement du déplacement transversal long du plan médian de la poutre.

Introduction générale

Introduction générale

Les nanotubes de carbone (CNTs) sont parmi les plus prometteurs nouveaux matériaux ou la nanotechnologie, en raison de leurs propriétés thermiques, chimiques, optiques, et mécaniques supérieures remarquables. Autres études ont montré qu'ils ont de bonnes propriétés de sorte qu'ils peuvent être utilisés pour la nanoélectronique, nano-outils et nanocomposites.

Cette émergence des nanotechnologies et des nanosciences nécessite le développement de nouvelles techniques d'observation capables de s'adapter à cette miniaturisation des objets, afin d'étudier les propriétés physiques à l'échelle nanométrique. La mesure et la compréhension des propriétés mécaniques d'objets nanométriques peuvent en effet apporter des informations très utiles concernant leur structure, leurs applications pratiques et aussi, dans le cas de nanostructures biologiques, d'approfondir notre connaissance du fonctionnement du monde du vivant.

Depuis la découverte des nanotubes de carbone par hasard en 1991 par le japonais Sumio Iijima, et l'utilisation des nano charges notamment le graphène, les nanotubes de carbone, les fullerènes, les nano fibres de carbone, le graphite ; permet de fabriquer des nouveaux matériaux composites à hautes performances dite nanocomposites, à cause de leurs excellentes propriétés mécaniques, thermiques, électriques et optiques. Cela permet d'avoir de nombreuses applications dans les secteurs industriels. Les nanocomposites à base de polymères sont considérés comme l'un des piliers de la science des nanomatériaux.

L'étude des nanocomposites n'est que très récente et s'explique par un besoin grandissant de miniaturisation des appareillages sans pour autant perdre les propriétés des matériaux utilisés, mais la réalisation d'expériences avec des spécimens à l'échelle nanométrique n'est pas seulement très compliquée et difficile, mais aussi très coûteuse, en raison des limites des analyses mécaniques des nanostructures. Ainsi, la modélisation théorique et la simulation numérique deviennent une question importante concernant ses applications de nanocomposites.

Les propriétés des nanocomposites dépendent de la concentration et de l'état de dispersion des nano charges dans la matrice. Il n'existe aujourd'hui aucune méthode directe permettant de déterminer l'état de dispersion des nanotubes dans la matrice. Certes, les microscopes électroniques actuels permettent d'avoir des vues très précises des nanocomposites. Du fait de leur légèreté, propriétés élastiques, thermiques ou encore la facilité de mise en œuvre, les polymères ont été utilisés dans les nanocomposites comme matrice.

Le but de ce travail est d'analyser la stabilité au flambement des poutres en nanocomposites renforcées par des nanotubes de carbone, pour cela on a développé le modèle élastique de la poutre d'ordre élevée raffinée.

Ce travail est composé de cinq chapitres. Le premier chapitre portera une synthèse bibliographique sur les nanotubes de carbone, nous décrirons l'histoire et les différents types de nanotubes de carbone en détaillant leurs classifications, les différentes techniques de synthèse tel que la méthode d'ablation laser, l'arc électrique, la décomposition catalytique (Hip Co), en plus les propriétés mécaniques, thermiques et optiques. De nombreuses applications seront ensuite présentées. Enfin, nous donnerons les Défauts des nanotubes de carbone et nous s'intéressons à leurs inconvénients. Le deuxième chapitre présentera une description générale sur les matériaux nanocomposites, leurs classifications et utilisation, encore les matériaux composites et les nanocomposites, plus particulièrement on s'intéressera aux nanocomposite ainsi leur classification et propriétés, ensuit la dispersion des renforts dans la matrice polymère et la production des nanocomposites à base (polymère / NTC). Le troisième chapitre présentera Les matériaux poreux et la porosité, on étudiera l'effet de la porosité sur les propriétés mécaniques des matériaux, tel que (le module de cisaillement /porosité), (le coefficient de Poisson ν /porosité) et en particulier l'effet de la porosité sur le module d'élasticité longitudinal (le module de Young/porosité),Le quatrième chapitre sera consacré aux les différentes théories des poutres (théorie d'Euler-Bernoulli, théorie de Timoshenko(FSDT) et la théorie d'ordre élevé (HSDT) tout en donnant les hypothèses de chaque théorie et consacré aux formulations mathématiques, un développement des différents modèles sera présenté et qui permettra d'étudier analytiquement les poutres poreuses en nanocomposites renforcées par des nanotubes de carbone. Le dernier chapitre présentera les résultats obtenus. Ils seront comparés avec d'autres résultats déjà obtenus par d'autre auteur.

CHAPITRE I

Généralités sur les nanotubes de
carbone

I.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à une présentation générale des nanotubes de carbone. Nous commencerons par décrire les différentes formes du carbone tel que le graphite, le Diamant et les Carbones "mal organisés" ainsi que Les nouvelles formes du carbone comme le Graphene, Le fullerène, les nanotubes multicouches et monocouche.

La structure des nanotubes est comparée à la structure des autres formes de carbone, que soit les formes traditionnelles, ou les nouvelles formes récemment apparues. Nous discuterons également les propriétés mécaniques, thermiques et optiques, des nanotubes de carbone et leurs applications.

I.2 Historique des nanotubes des carbones

L'histoire des fullerènes démarre avec la découverte du(C60) à l'Université de Rice, publiée en 1985, **[Kroto 1985]** et récompensée par le Prix Nobel de Chimie en 1996. Le (C60) fut à l'origine produit par vaporisation laser d'une cible de graphite à basse pression. Un « nuage » de vapeurs de carbone se formait au-dessus de la cible. Une injection d'hélium entraînait ces vapeurs dans une tuyère jusqu'à des vitesses supersoniques. Puis le mélange des gaz était détendu et refroidi. C'est à ce moment que les molécules de(C60) se formaient. Elles étaient en suite ionisées par un faisceau d'électrons et accélérées jusqu'à un spectromètre de masse. Le pic dominant, à (720u.m.a.), était la seule preuve de la présence de (C60).

Un pic considérablement plus faible, mais distinct, était observé à (840 u.m.a.) et attribué à la présence de(C70).

Cette signature spectroscopique fut également découverte par une équipe d'Exxon mais ils l'attribuèrent à une espèce polygyne. **[Rohlfing 1984]** Peu de temps après, des considérations théoriques confirmaient l'existence de telles molécules sphériques constituées uniquement de carbone. **[Haymet 1986]** En outre, le groupe de Rice réalisa une expérience de vaporisation laser sur une cible de carbone dopée aul. **[Heath 1985]** Un fort pic apparaissait dans le spectre à (859 u.m.a), attribué à un atome de (Lanthane) encapsulé dans une cage de (C60). Cela apportait une preuve supplémentaire de la nature sphérique du (C60) et constituait le premier exemple de fullerène remplie 1990 fut mise au point une méthode de synthèse de(C60) en grosses quantités : il s'agissait d'une méthode d'arc électrique entre deux électrodes de carbone sous atmosphère inerte (100 torrs). Le (C60) et le (C70) produits étaient isolés du carbone amorphe. **[Krätschmer 1990]**

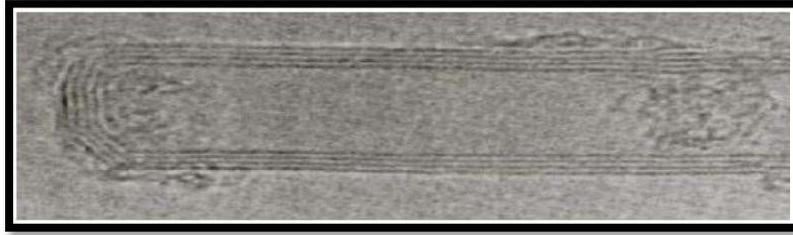


Figure I.1: Image TEM de l'extrémité d'un nanotube multicouche

En 1993, les nanotubes de carbone monocouches furent découverts indépendamment par Iijima [Iijima 1993], Ils étaient également synthétisés dans un réacteur à arc électrique sous atmosphère inerte (500 torr), mais le graphite était mélangé à un catalyseur métallique (Ni et Co). Lorsque le carbone gazeux se condensait, les nanoparticules de métal servaient de « germes » à partir desquelles les nanotubes pouvaient croître. Il est à noter qu'aujourd'hui encore, les mécanismes de croissance des nanotubes sont relativement méconnus et demeurent un sujet d'étude de premier plan. [Zidour 2012] L'histoire des nanotubes ne s'arrête pas ici, voici quelques dates intéressantes dans le développement des nanotubes de carbone.

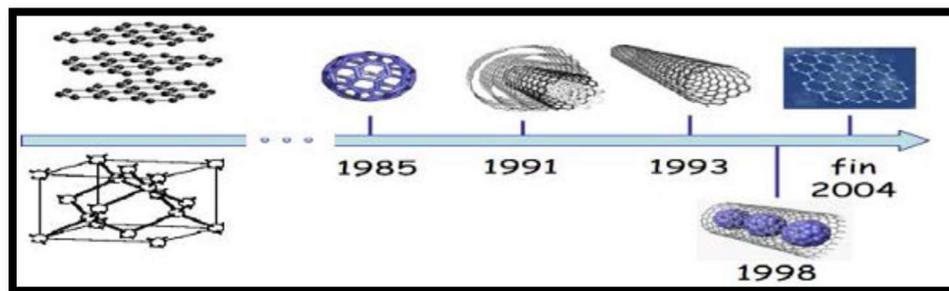


Figure I.2: quelques dates intéressantes dans le développement des nanotubes de carbone.

I.3 Le carbone

Le carbone est le quatrième élément le plus abondant dans le système solaire et le sixième plus abondant dans l'univers. Il existe dans la croûte terrestre à la teneur moyenne de 18 ppm, Il existe sous forme de composés, et dans l'atmosphère sous forme de CO₂ CO et de méthane. [Zidour 2012]

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

La seule forme stable du carbone est le graphite hexagonal, et les autres formes de carbone sont métastables dans les conditions normales de pression et de température [Zidour 2012]. À l'état

naturel le carbone se trouve sous trois formes cristallines, le graphite, le diamant, et les carbones mal organisés (amorphe).

Il existe des nouvelles formes du carbone récemment découvertes telle que la famille des Fullerènes, et les nanotubes de carbone monocouches et multicouches.

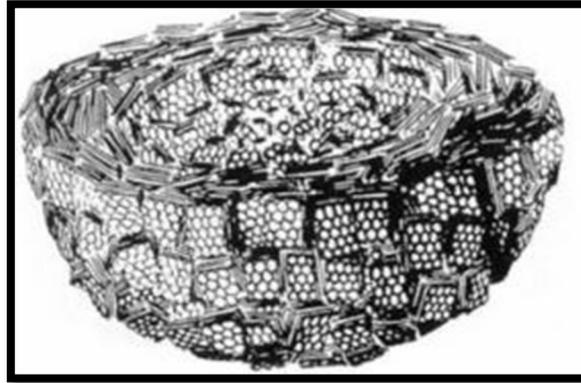


Figure I.3: Vue d'une particule de noir de carbone en coupe [Hassar 2013]

I.4 Les formes classiques du carbone

I.4.1 Le graphite

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

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

Le graphite peut être disponible naturellement ou synthétisé. Le graphite synthétique est fabriqué à partir de précurseurs organiques. Le précurseur est d'abord soumis à un processus de carbonisation, consistant en un chauffage progressif sous atmosphère inerte jusqu'à atteindre des températures de près de (1300°C). A ce stade, il subsiste du carbone amorphe et du graphite poly

cristallin. Un traitement thermique à (2500°C) permet ensuite une graphitisation de ce carbone pour donner le graphite. [Lassagne 2006]

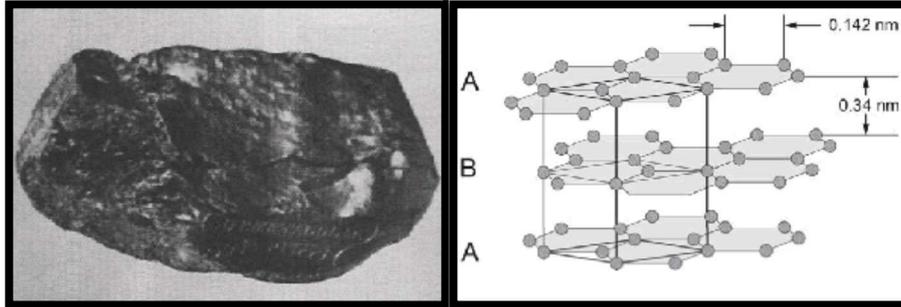


Figure I.4 : Structure du graphite hexagonal. [Tagrara 2017]

I.4.2 Le diamant

Le diamant est la forme la plus compacte du carbone. De manière naturelle, il nées forme qu'à haute température et haute pression ($> 1000^{\circ}\text{C}$ et plusieurs GPa) et n'est, en théorie, stable qu'à haute pression. Cependant, c'est une forme métastable du carbone, ce qui lui permet donc d'exister aux conditions ambiantes.

Le diamant possède une structure cubique à faces centrées avec la moitié des sites tétraédriques occupés. Chaque atome est lié à quatre autres atomes de carbone par des liaisons hybridées sp^3 formant ainsi des tétraèdres réguliers. Ainsi, contrairement au cas du graphite, tous les électrons de valence sont impliqués dans les liaisons covalentes. C'est cette structure rigide qui fait du diamant le minéral naturel le plus dur qui soit. [BenYounes 2016]

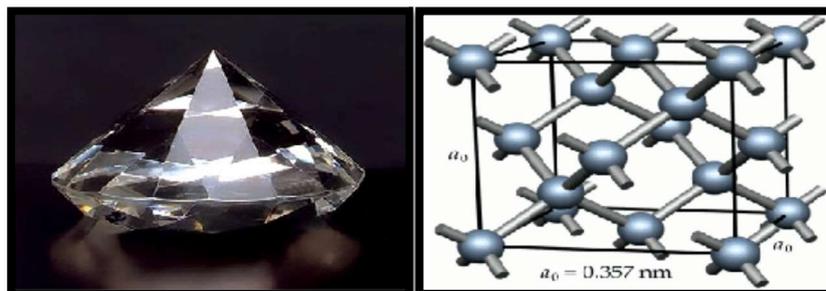


Figure I.5: Forme et structure du diamant [Boulerouah 2011].

I.4.3 Carbones "mal organisés"

Le carbone ne présente pas toujours une organisation cristalline. Des formes de carbone mal organisées peuvent exister. C'est notamment le cas du carbone amorphe. Il s'agit d'un réseau désordonné d'atomes de carbone présentant des états d'hybridation (sp^2 et sp^3) à l'état naturel, le carbone amorphe estrade. Il est présent dans les particules des couches extérieures de l'atmosphère des étoiles froides, appelées poussières d'étoiles. Plus proche de nous, le carbone amorphe est synthétisé sous forme de couches minces, obtenues généralement par dépôt plasma.

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

[Izard 2004]

I.5 Les nouvelles formes du carbone

I.5.1 Le graphène

La nanotechnologie ouvre des nouvelles frontières en science des matériaux et de l'ingénierie pour répondre aux besoins de l'humanité en créant des nouveaux matériaux, en particulier des nanomatériaux de carbone. Après avoir que Geim et Novoselov ait eut un prix Nobel pour leurs travaux sur le graphène, des efforts considérables ont été faits pour exploitez matériau dans des diverses application. [Liu 2012]

Le graphène est constitué d'une seule couche d'atomes de carbonnes. En termes simples, le graphène est une mince couche de carbone pur. Il s'agit d'une seule couche d'atomes de carbone étroitement liée qui sont liées ensemble dans un treillis en nid d'abeille hexagonal. En termes plus complexes, il s'agit d'une allotropie de carbone dans la structure d'un plan d'atomes liés sp^2 avec une longueur de liaison moléculaire de 0,142 nm. Ainsi, les couches de graphène empilées les unes sur les autres forment du graphite, avec un espacement inter planaire de 0,335 nm [Garaj 2010]. Dans ce sens, des développements nouveaux sont en Cours de réalisation, ayant comme objectif d'atteindre une production économique et de haute qualité. [Boussaboun 2016]

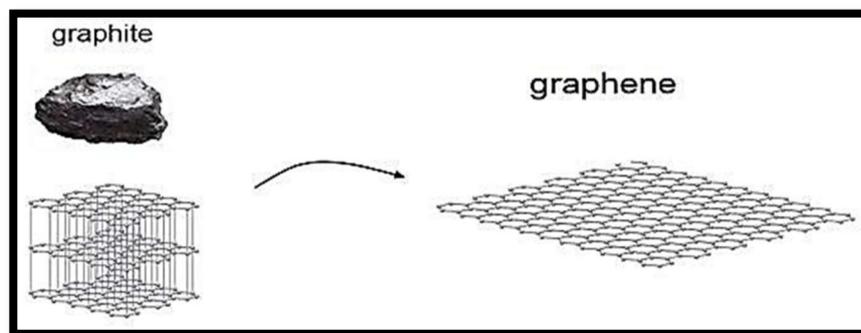


Figure I.6 : Graphène à partir du graphite. [Boussaboun 2016]

Bien que connu comme faisant partie intégrante de ces allotropies, on a longtemps pensé que le graphène ne pouvait exister. Jusqu'à récemment, il était utilisé comme objet théorique permettant de modéliser les propriétés des autres matériaux carbonés. En 2004, le modèle devint réalité lorsque les premiers plans de graphène furent isolés. [Wang 2012]

Il fait ainsi depuis quelques années l'objet d'un intérêt croissant [Jiang 2004] En somme, il existe donc plusieurs formes allotropiques du carbone. Parmi celles-ci, deux sont naturelles : le diamant et le graphite. Les fullerènes, les NTC et le graphène sont trois nouveaux allo tropes du carbone, découverts coup sur coup lors des trois dernières décennies.

I.5.2 Les fullerènes

L'élément principal du graphite, et également point de départ pour la construction de nouvelles nanostructures carbonées, est le plan de graphène, que l'on peut se représenter comme une feuille plane pavée d'hexagones, chacun de ses plans possède un très grand nombre d'atomes de carbone. Si l'on réduit beaucoup ce nombre d'atomes, le nombre de liaisons pendantes sur les bords d'un plan graphène devient élevé : la structure doit alors « se refermer » sur elle-même. Si le nombre de carbones est inférieur à quelques centaines, les structures stables sont fermées il s'agit des fullerènes [Izard 2004].

En 1985, par les travaux des chercheurs H. Kroto et al [Kroto 1985], ils réussirent à isoler une forme majoritaire constituée de 60 atomes de carbone. Cette molécule, refermée sur elle-même comme une cage. On prédit alors de nombreuses propriétés et applications à cette nouvelle forme allotropique du carbone. Synthétisée par la méthode de l'arc électrique dans une cloche remplie d'hélium cette molécule a la particularité d'avoir une structure formée de cages moléculaires fermées. En effet, elle a la forme et la symétrie d'un ballon de football, chaque atome de carbone étant situé à l'un des 60 sommets d'un polyèdre inscrit dans une sphère (figure. I.7). [Enouz 2003]

Avec 12 pentagones et 20 hexagones on forme le fameux (C_{60}). Ce fullerène a deux types de liaisons (C-C) : celles qui sont communes à deux hexagones sont appelées liaisons 6-6, celles qui sont communes à un hexagone et un pentagone sont nommées liaisons 5-6. En coupant en deux parties égales le (C_{60}) et en ajoutant des atomes de carbone avant de refermer la structure, on peut construire le (C_{70}) (25 hexagones, 12 pentagones) et le (C_{80}) (30 hexagones, 12 pentagones).

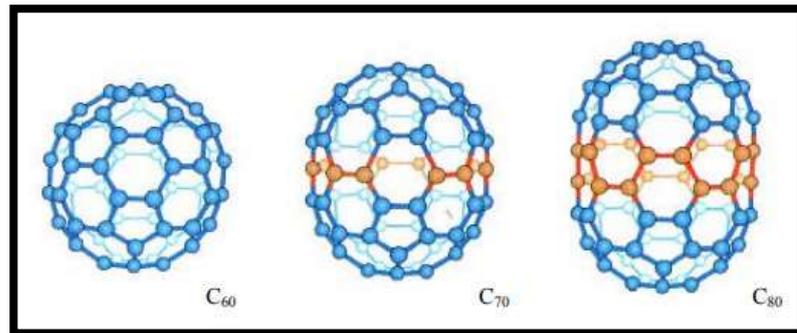


Figure I.7: Du C60 au C80 : les atomes ajoutés au C60 pour obtenir le C70 et le C80 sont représentés en rouge. [Marcoux 2002]

Les nanotubes de carbone sont donc composés d'une ou plusieurs feuilles de graphène roulées sur elles-mêmes, formant un tube. Un nanotube de carbone parfait voit généralement une demi-sphère de fullerène fermer chaque extrémité du tube. (Figure I.8) [Tagrara 2017]

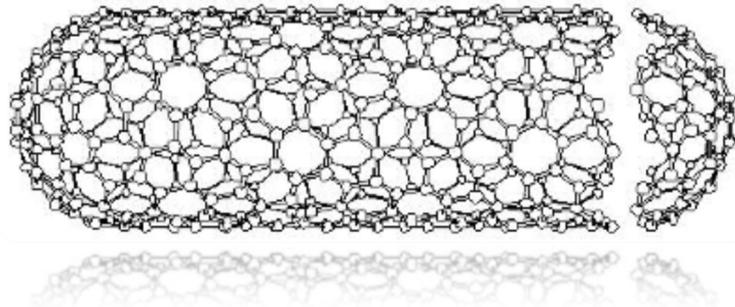


Figure I.8 : Représentation d'un nanotube de carbone avec les extrémités fermées. [Marcoux 2002]

I.6 Les Nanotubes de carbone

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]

Un nanotube de carbone est un feuillet de graphite formé d'atomes de carbone disposés en réseau hexagonal (Figure I.9), comme un nid d'abeilles, et enroulé sur lui-même. Son diamètre est de l'ordre du nanomètre, sa longueur peut atteindre plusieurs micromètres. À chacune de ses deux extrémités se trouve une demi-molécule de fullerène. Cette molécule est constituée de 60 atomes de carbone, son diamètre est d'environ un nanomètre et elle est formée d'hexagones et de pentagones qui lui donnent une forme presque sphérique, semblable à un ballon de football. [Baghdadi 2015]

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 sera importante, et donc le diamètre petit, plus l'hybridation sp^2 sera altérée. En sera en présence donc du caractère sp^3 partiel des liaisons constitutives des parois de CNT. [Florent 2011]

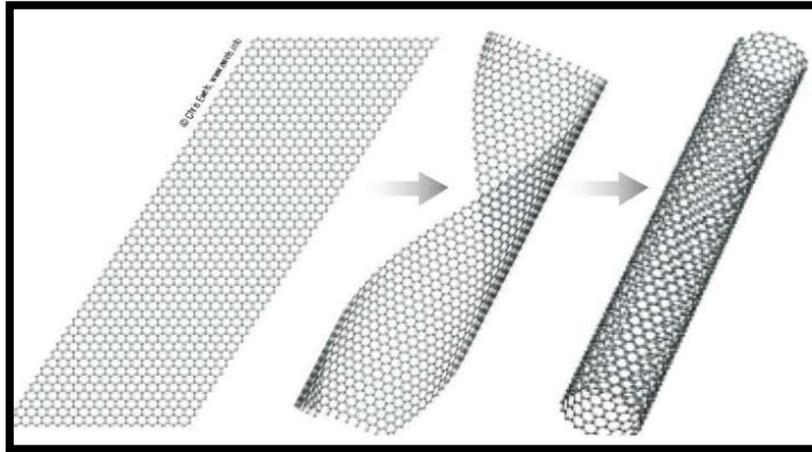


Figure I.9 : Structure d'un nanotube de carbone

I.7 Structure des nanotubes de carbone

Plusieurs types de nanotubes de carbone existent suivant leurs dimensions et L'arrangement des plans de graphène qui les composent. Ils sont classés en deux grandes familles :

Les nanotubes de carbone multi-parois (MWCNT), bi-paroi (DWNT) et mono-paroi (SWCNT) comme illustré sur (figure I.10) ci-dessous :

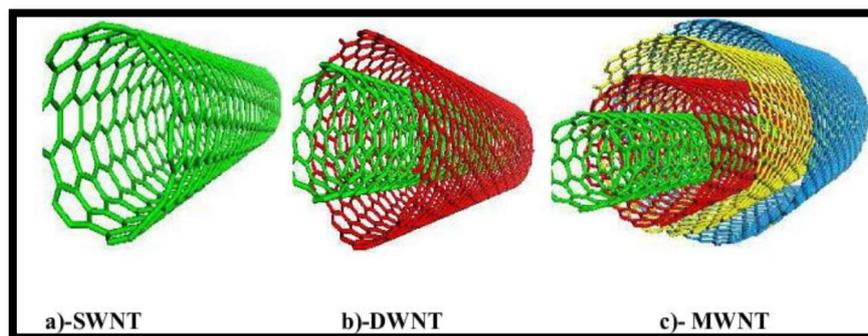


Figure I.10: Représentation de la structure tubulaire creuse de : a) nanotube mon paroi ; b) nanotube bi-parois et c) nanotube multi-parois.

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

Les nanotubes de carbones mono feuillets ont été découverts en parallèle par Béthune et Iijima en 1993. [Iijima 1993], [Béthune 1993] Intéressons-nous donc à la structure de ces fascinants objets, sujets principaux de ce travail 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 . 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. L'enroulement de la feuille de graphène va définir la structure et les propriétés du nanotube formé (figure I.7.a). [Dai 1996]

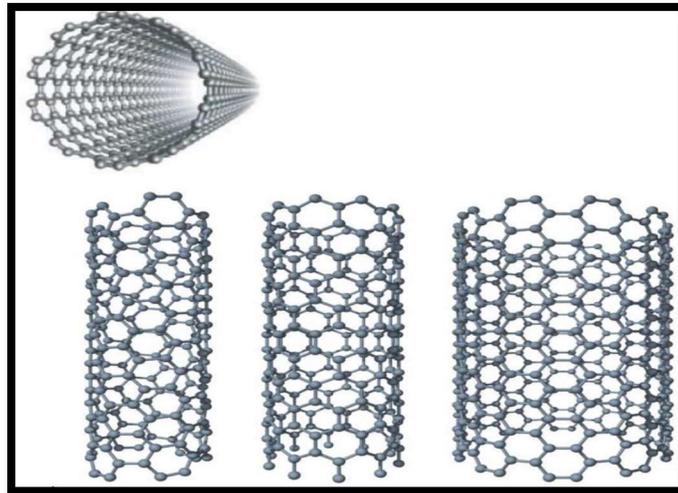


Figure I.11.a: Nanotubes de carbone mon feuillet (SWNT)

À gauche : Nanotube chiral (6,4)

-au centre : Nanotube (10,0) zigzag (notez la découpe transversale du tube en forme de zigzag)

-à droite : Nanotube (10,10) arm chair (notez la découpe transversale du tube en forme de chaise).

Les tubes ont des diamètres respectifs 0.68 nm, 0.78 nm et 1.36 nm. [Izard 2004]

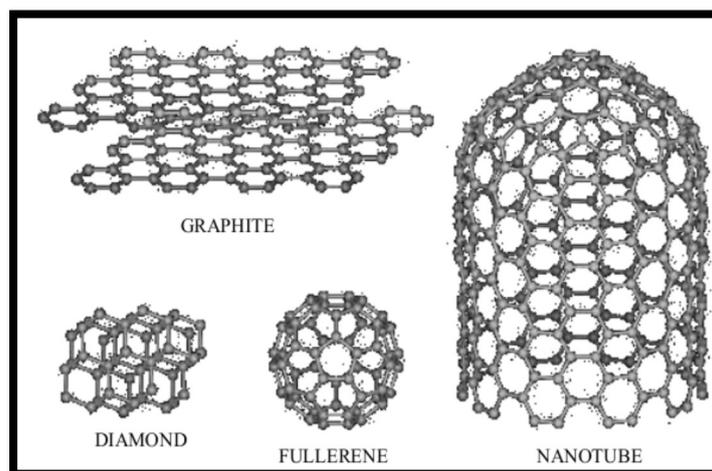


Figure I.11.b: Différentes structures de carbone.

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

Ces nanotubes multi feuillets sont constitués d'un arrangement concentrique de feuilles de graphène, repliées sur elles-mêmes de manière à former des cylindres (*Figure.11*). Cette structure est communément appelée poupée russe, par analogie avec le jeu de poupées qui s'emboîtent les unes dans les autres.

Le diamètre du plus petit tube interne détermine la taille du canal central du nanotube. Le diamètre interne d'un nanotube multi feuillets est de l'ordre de deux nanomètres, tandis que le diamètre externe est de l'ordre d'une vingtaine de nanomètres. Cependant, les nanotubes multi feuillets peuvent aller jusqu'à la centaine de nanomètres de diamètre.

La façon dont les différentes couches graphitiques des nanotubes multi feuillets s'empilent est a priori aléatoire. Il n'a pas été mis en évidence un empilement selon des règles préférentielles entre les différents feuillets.

La distance moyenne inter-feuillets est de 0,344nm, ce qui rapproche sa structure de celle du graphite turbo statique. La structure des nanotubes multi feuillets de type poupée russe décrite précédemment est communément.

Enfin, une étude postérieure montre que la structure de type poupée russe est la plus fréquemment rencontrée, les nanotubes ne croissant selon le type rouleau de parchemin que dans des conditions particulières. [Baghdadi 2015]

Le diamètre en question peut varier jusqu'à plusieurs dizaines de nanomètres. La longueur moyenne des tubes est de l'ordre du micromètre et peut cependant atteindre la centaine de micromètres, ce qui leur procure alors un facteur de forme (rapport longueur/diamètre) exceptionnellement grand (de 100 à 100 000). Ces paramètres dépendent fortement des conditions de synthèse des nanotubes. [Tagrara 2017]

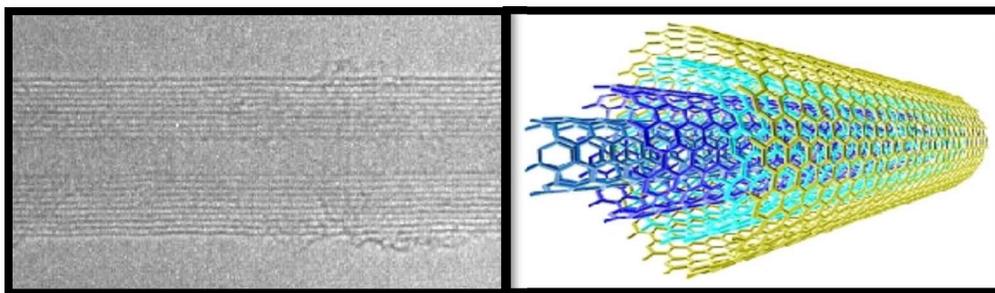


Figure I.12: à gauche : Représentation graphique d'un MWNT et à droite : image de microscope Electronique a transmission de plusieurs MWNT. [Saint-Auban 2010]

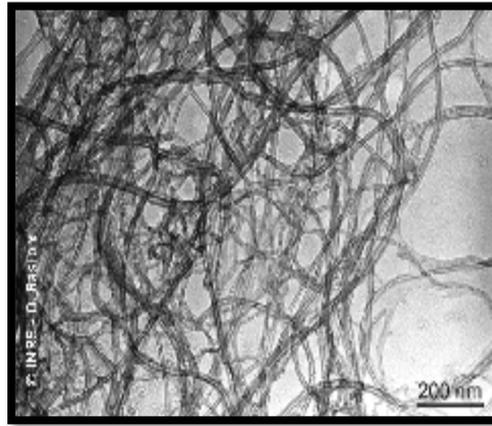


Figure I.13: Nanotubes de carbones multi-feuillets observés en microscopie électronique en transmission

La structure des nanotubes multi feuillets décrite précédemment est communément admise, mais ce n'est pas la seule structure possible.

Ainsi, certaines études expérimentales [Zhou 1994] laissent envisager que les nanotubes multi feuillets pourraient avoir une structure de type rouleau de parchemin (Figure I.13). [Marcoux 2002]

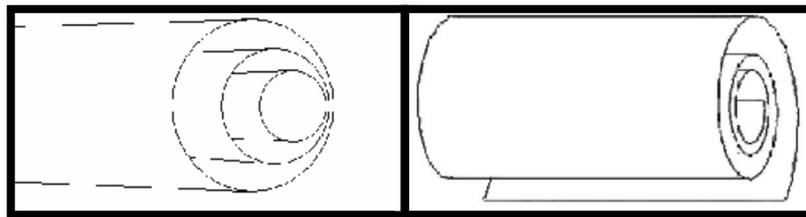


Figure I.14: Structures possibles des MWNT. Gauche : type poupée russe. Droite : Type rouleau de Parchemin. [Izard 2004]

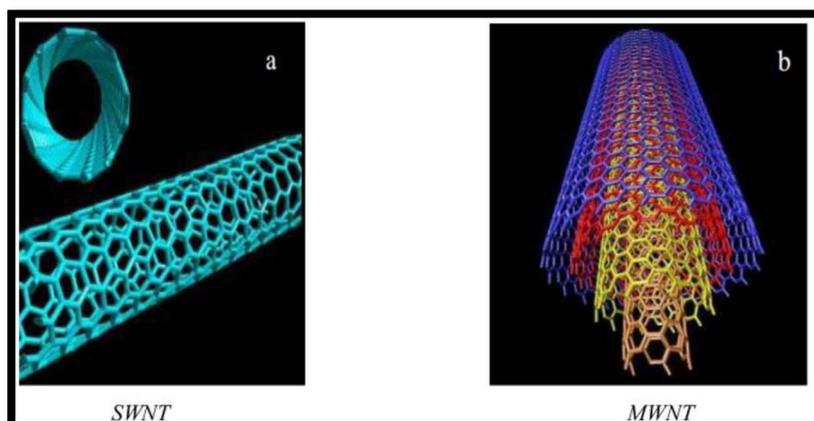


Figure I.15 : Représentation des structures moléculaires d'un nanotube mono feuille (SWNT) et d'un nanotube multi feuille (MWNT). [Penu 2008]

I.8 Méthodes de synthèses de nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone peuvent être préparés par différentes méthodes. Si la synthèse par décharge d'un arc électrique entre deux électrodes de graphite [Journet et al 1998] est historiquement la plus répandue, d'autres procédés tels que l'ablation laser [Guo et al 1995] ou la décomposition catalytique de molécules contenant du carbone sont disponibles.

Les NTC peuvent aussi être obtenus par voie électronique à l'aide d'électrodes de graphite en milieu sels fondus [Laurent et al 1998] par vaporisation – condensation de graphite dopé (Co, Ni) l'aide de l'énergie solaire [Fieldies et al 1996] par pyrolyse de polymère organique. [Cho et al 1992]

La différence majeure entre la production de nanotubes multi parois et de nanotubes mon paroi est la nécessité d'utiliser un catalyseur, allié à un gaz carboné, le tout à une température adaptée afin d'obtenir la forme mono paroi des nanotubes de carbone. Nous présenterons ici les procédés de synthèse les plus répandus en exposant les avantages et les inconvénients de chacun d'eux. [Zidour 2012]

I.8.1 Méthode de l'arc électrique

L'appareillage utilisé pour la synthèse des NTC par décharge d'un arc électrique est semblable à celui mis en œuvre pour la préparation de fullerènes [Ajayan 1992] ont proposé des améliorations en vue de la synthèse à grande échelle de NTC. Si les NTC multi feuillets peuvent être synthétisés sans l'aide d'un catalyseur métallique (les diamètres sont généralement compris entre 0,7 nm et 5 nm selon le catalyseur utilisé [Iijima et al 1993] et leur longueur n'excèdent pas quelques μm . Les échantillons obtenus ne contiennent pas uniquement des NTC mais aussi les nanoparticules, des fullerènes, et beaucoup de carbone amorphe. La purification par traitement thermique permet.

D'aboutir à des tubes mon feuillets purs, mais le rendement en masse est très faible et avoisine 1%.

La quantité et la qualité des NTC obtenus dépendent des nombreux paramètres expérimentaux inhérents au procédé mais surtout du mélange catalyseur-graphite utilisé. De nombreux métaux, purs ou alliés, ont testés par différents auteurs et les résultats obtenus varient de façon significative. [Journet et al 1998]

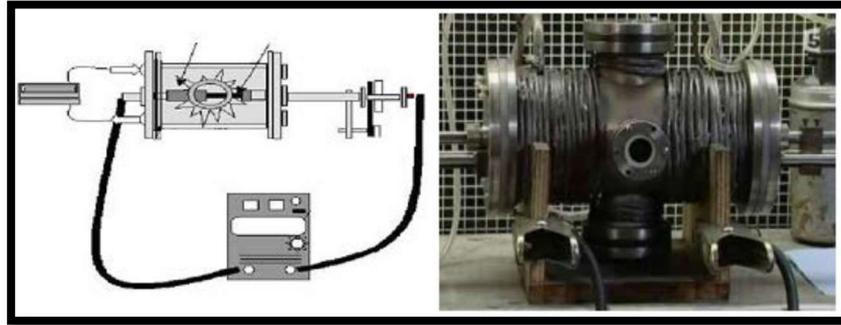


Figure I.16 : Schéma d'un réacteur de synthèse de nanotubes de carbone par la méthode De l'arc électrique. [Rakrak 2018]

En utilisant des électrodes en graphite pur, seuls des MWNT sont obtenus [Iijima 1991]. Pour la synthèse de SWNT, les électrodes doivent contenir quelques pour-cent d'un métal catalytique. Il peut s'agir de métaux de transition tels que le fer [Iijima 1993], le cobalt ou le nickel, des terres rares (Gadolinium, Lanthane, Cérium) ou bien d'éléments appartenant au groupe du platine (Rh, Pt...). Mais c'est en utilisant des alliages Ni-Y, Pt-Ru que les meilleurs rendements (>70%), compatibles avec une production de masse, sont observés. [Boumia 2017]

I.8.2 Méthode d'ablation laser

La technique de synthèse par ablation laser est la méthode qui a permis à Kroto et Smalley de découvrir les fullerènes en 1985 [Kroto 1985]. Cette technique repose sur l'évaporation d'un disque de graphite par irradiation laser, la cible étant placée dans un four à (1200°C). [Thess 1996]. Le laser employé est un laser *Nd-YAG* impulsionnel nanoseconde. Sous l'effet de l'irradiation, la température de la cible atteint localement (4000 K). Pour assurer une sublimation homogène, la cible est en rotation à l'intérieur de l'enceinte, afin que le faisceau laser balaye sa surface. Deux impulsions lasers successives sont employées pour améliorer le rendement de synthèse. La première impulsion utilise l'harmonique du *Nd-YAG* (532 nm), tandis que l'utilise le fondamental (1064 nm). La seconde impulsion permet d'augmenter la dissociation des agrégats de carbone formés par la première impulsion. Un flux de gaz inerte (*Ar*) permet d'évacuer les produits formés, qui sont récoltés sur un collecteur en cuivre refroidi à l'eau. Comme dans le cas de la synthèse par arc électrique, il est nécessaire d'utiliser un catalyseur métallique mélangé à la cible en graphite pour former des nanotubes mono feuillets. [Izard 2004]



Figure I.17: Schéma de l'appareillage d'ablation laser.

Cette propriété est très intéressante pour toutes les utilisations des propriétés d'émission de champ des nanotubes. L'un des inconvénients de cette méthode est qu'elle ne permet pas, pour le moment, de fabriquer de grandes quantités de nanotubes mono parois.

Enfin, le fait de faire croître les nanotubes à un endroit donné peut aussi s'avérer être un inconvénient puisque de ce fait, on ne peut pas les manipuler facilement (on ne peut pas les recueillir, les déplacer). [Bernard 2007]

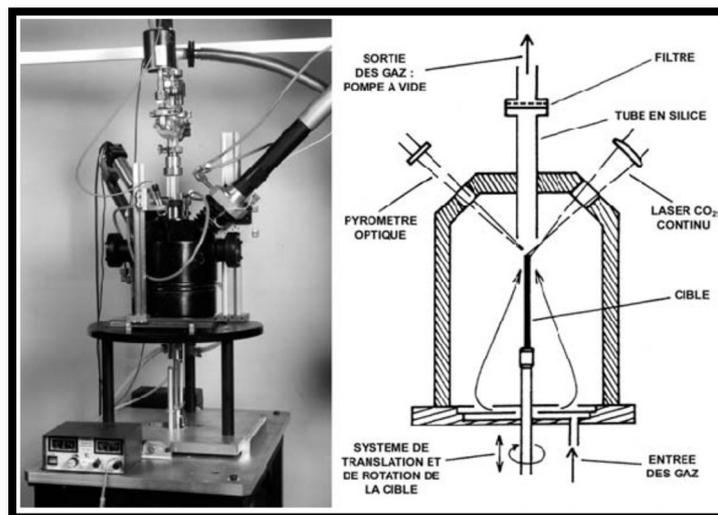


Figure I.18: Réacteur de synthèse laser continu (CO₂) de l'ONERA. [Castignolles 2004]

I.8.3 Décomposition catalytique (Hip CO)

Le procédé (Hip CO) (High Pressure dis mutation of CO) a été développé par le groupe de R. Smalley. Ce procédé fait partie de la famille des procédés de décomposition catalytique à moyenne température. Un flux continu de penta carbonyle de fer ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) et de monoxyde de carbone (CO) est introduit sous une pression de (10 atm) dans une enceinte chauffée à (1200°C). L'originalité du procédé tient au fait que le catalyseur, nécessaire à la croissance des tubes mono

feuilletés, est formé in situ par la décomposition du gaz précurseur. De surcroît, le monoxyde de carbone utilisé comme source de carbone pour la croissance des tubes ne se pyrolyse pas à (1200°C), ce qui permet d'obtenir des nanotubes de carbone mono feuilletés. [Izard 2004]

L'avantage de cette méthode est de permettre la production d'échantillons de nanotubes, a priori sans carbone amorphe. Les seules "impuretés" dans le produit de Synthèse sont les particules de catalyseurs métalliques (Figure I.18).

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

De plus, cette méthode permet d'obtenir des nanotubes avec un diamètre moyen plus petit de l'ordre de (0,7 nm). D'ailleurs, une société commerciale [Carbone Nano technic] propose des nanotubes synthétisés par cette technique. [Izard 2004]

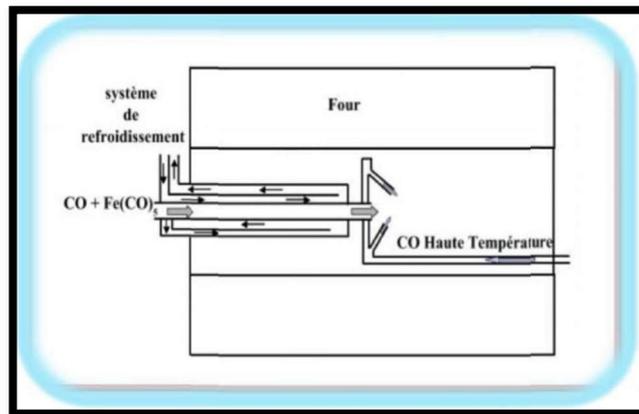


Figure I.19 : Production de nanotubes par méthode Hip Co. [Nikolaev 1999]

Le schéma de principe de l'expérience est décrit sur la figure. Deux gaz sont envoyés dans un four. Le premier gaz, composé de monoxyde de carbone et de fer penta carbonyle ($\text{Fe}(\text{CO})_5$), est maintenu à température ambiante jusqu'à l'intérieur du four.

Le deuxième gaz est du monoxyde de carbone qui est préchauffé (800–1200°C) à l'entrée Dufour. Le modèle qui est proposé pour la croissance est le suivant : des clusters de métal reforment en premier jusqu'à atteindre des tailles de l'ordre du futur diamètre des nanotubes.

Ensuite, le monoxyde de carbone se sépare au contact des clusters suivant la réaction $\text{CO} + \text{CO} \rightarrow \text{C(s)} + \text{CO}_2$ et les atomes de carbone se fixent sur ces clusters. Enfin, les nanotubes de carbone se forment de façon continue à partir de ces atomes de carbone. L'avantage de cette méthode est de permettre la production d'échantillons de nanotubes, a priori sans carbone amorphe. Les seules "impuretés" dans le produit de synthèse sont les particules de catalyseur métalliques.

D'autre part, cette méthode permet de produire des nanotubes dans des quantités comparables à celles obtenues par la méthode d'ablation laser. [Lauret 2004]

I.9 propriétés des nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone sont tout d'abord uniques par leurs dimensions car avec un diamètre (d) de l'ordre du nanomètre et une longueur (L) de plusieurs microns ils possèdent un facteur de forme $a = L/d$ entre 100 et 1000. Au-delà de ces caractéristiques géométriques, les nanotubes possèdent des propriétés électriques, thermiques, mécaniques, optique. [Thomas périe 2011]

Les nanotubes de carbone possèdent des propriétés physiques exceptionnelles.

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

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

I.9.1 Propriétés mécaniques

Le dopage avec l'azote modifie également la résistance mécanique des nanotubes de carbone. Une étude théorique sur les nanotubes de carbone dopés montre une réduction de 50% dans l'allongement à la rupture tandis que le module de Young reste à peu près inchangé par rapport aux nanotubes de carbone simples [Cru 2009]. Le processus de fracturation commence avec la rupture de la liaison C-C par le dopant, mais au lieu de libérer le stress de la reconstruction du réseau ou de la réorganisation, elle est suivie par un processus de « déchirure » qui continue au travers les liaisons C-C voisines. [Benyounes 2016]

Tableau I .1 : Comparaison des propriétés mécaniques des CNT et d'autres matériaux. [Bellifa 2015]

Matériau	Module de Young (Gpa)	Résistance à la traction (Gpa)	Densité
SWNT	1050	150	-
MWNT	1260	150	2.6
Fibres de Carbone	230	3.5	1.75
Acier	208	0.4	7.8
Résines époxydes	3.5	0.005	1.25
Bois	16	0.008	0.6

I.9.2 Propriétés thermiques

La conductivité thermique théorique des nanotubes de carbone a été calculée dans le sens longitudinal pour un SWNT arm chair par Bercher et al (2000) à température ambiante. Une valeur voisine de 6 600 W.m-1. K-1 a été obtenue mais la structure des nanotubes était alors supposée sans défaut. Che et al (2000) ont démontré que les défauts altéraient fortement cette grandeur qui peut alors chuter de plus de 50 % si les calculs les prennent alors en considération.

C'est avec ces valeurs théoriques « corrigées » que les valeurs expérimentales sont les plus cohérentes. Small et al (2003) et Fujii et al (2005) ont respectivement mesuré des conductivités de 3 000 et 2 069 W.m-1. K-1 pour des MWNT de diamètres compris entre 14 et 9,8 nm. Fujii et al ont d'ailleurs tiré la conclusion que cette conductivité augmentait à mesure que le diamètre du tube isolé diminuait. Cependant, ces valeurs impressionnantes de conductivité thermique (égales voir supérieures à celle du diamant pur entre 2000 et 2500 W.m-1. K-1) chutent lorsque celles-ci ne sont pas calculées dans le sens longitudinal des nanotubes de carbone. Che et al (2000) ont effectué la mesure théorique sur un fagot de SWNT de configuration chirale (10,10), dans le sens longitudinale et transversale (pour des valeurs respectives de 950 et 5,6 W.m-1. K-1).

Les valeurs obtenues sont donc fortement anisotropes et du même ordre que celles du graphite qui présentent le même type d'anisotropie. [Tagrara 2017]

I.9.3 Propriétés électrique

L'orientation des motifs hexagonaux de carbone par rapport à l'axe du tube déterminée Comportement métallique ou semi-conducteur théorique des SWNT. [Saito 1992].

Les nanotubes de configuration dite « Arm chair » ont des propriétés électroniques comparables à celles des conducteurs métalliques, alors qu'une configuration « Zigzag » ou « Chiral » engendre un comportement semi-conducteur, de ces règles de construction, lors de la synthèse des NTC mono-feuillets et en tenant Compte de toutes les chiralités possibles, 1/3 des NTC auront un comportement métallique et 2/3 un comportement semi-métallique Ouse conducteur. [Saito 1992]

Du fait de leur structure électronique unidimensionnelle, le transport électronique est dit balistique sur de longues distances dans les NTC. [Frank 1998]

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

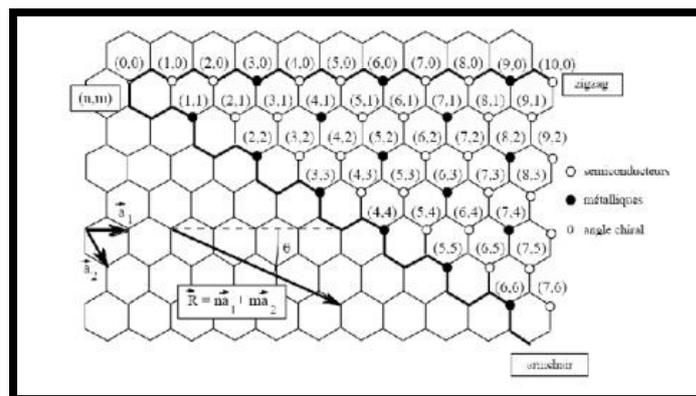


Figure I.20: Propriétés électroniques des nanotubes de carbones monocouches en fonction De leurs indices de chiralité (n, m) .

I.9.4 Propriétés optiques

Les nanotubes possèdent des propriétés de limitation optique dans une large gamme de longueurs d'onde, depuis le visible jusqu'au proche infrarouge. Des seuils faibles de non linéarité et de grandes densités optiques ont été obtenues lors de l'étude de dispersions aqueuses de nanotubes monocouches. [Vivien 1999]

Ces performances égalent ou surpassent celles d'autres bons limiteurs optiques, comme le (C60) ou le noir de carbone, que ce soit dans le visible ou le proche infrarouge.

Les dispersions liquides de nanotubes monocouches apparaissent donc comme des systèmes prometteurs pour une limitation optique à bande large. D'autres solvants ont été essayés, comme l'éthylène glycol [Mishra 2000] ou le chloroforme. [Vivien 1999]

Plusieurs phénomènes optiques non linéaires peuvent être à l'origine d'une limitation optique : réfraction, absorption, diffusion.

L'origine de la limitation dans le cas des nanotubes est essentiellement une forte diffusion non linéaire engendrée par la formation de bulles de solvant à la surface des nanotubes et par une sublimation des tubes à plus forte fluence. [Vivien 2000] Il est noté que des (MWNTs) dispersés dans un film de polymère, en l'occurrence du (PMMA), ont montré également des propriétés délimitation optique large bande. [Sun 1998]

Le développement des sources laser intenses a entraîné la nécessité de concevoir des systèmes de protection pour l'œil et les détecteurs optiques. Les systèmes de protection actifs sont appelés limiteurs optiques. Idéalement, ils transmettent la lumière pour de faibles flux lumineux tandis que pour de forts flux ils limitent la transmission, de manière à maintenir l'intensité en dessous du seuil de dommage du détecteur. [Marcoux 2002]

Des études commencent à porter également sur l'utilisation de nanotubes comme détecteur infrarouge. [Xu 2001]

I.10 Défauts des nanotubes de carbone

Du fait d'interactions van der Waals attractives entre parois, les nanotubes Monocouches ont la plupart du temps tendance à s'agglomérer en faisceaux de nanotubes appelés fagots. Du fait de la présence de cycles non hexagonaux, il existe des défauts dans le réseau graphène constitutif d'une paroi, qu'il s'agisse d'un (MWNT) ou d'un (SWNT). Un pentagone introduit une courbure positive tandis qu'un heptagone conduira à une courbure négative (Figure I.20). [Marcoux 2002]

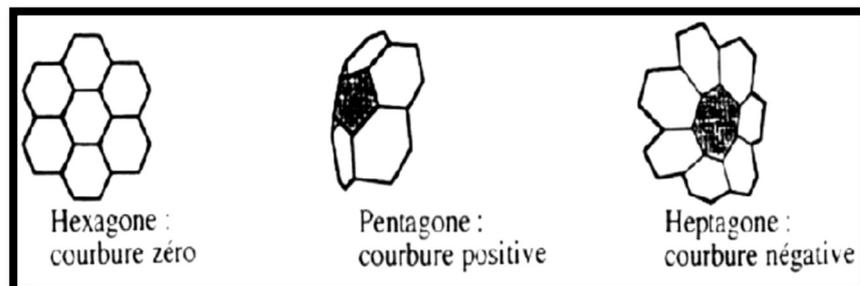


Figure I.21: Influence du type de cycle sur la courbure de la surface.

Sur la (Figure I.21) on peut voir l'influence des cycles non hexagonaux sur les feuillets de 2 Nanotubes multicouches :

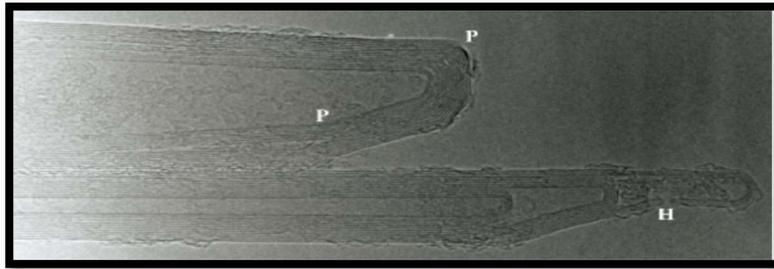


Figure I.22 : Image MET des extrémités de deux nanotubes multicouches.

On a indiqué quelques-uns des cycles non hexagonaux : (P) indique un pentagone et (H) un Heptagone. (Image : Annick L'oiseau, Jean-Michel Benoît).

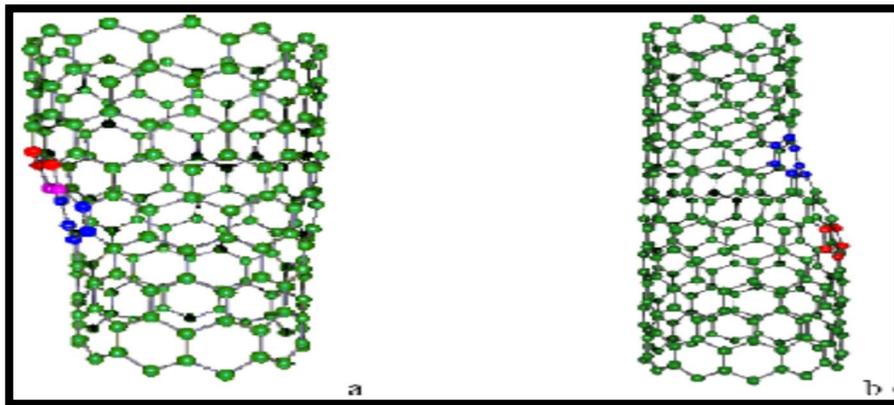


Figure I.23: Introduction d'une paire pentagone-heptagone provoquant une variation de diamètre et de chiralité : a- de (11,0) à (12,0) ; b- de (9,0) à (12,0).

De telles combinaisons peuvent expliquer la forme torsadée de certains nanotubes multicouches produits par décomposition catalytique d'hydrocarbures. En introduisant ces défauts en plus grand nombre dans le réseau graphitique, il est possible d'imaginer une grande quantité de structures variées (jonctions en Y, en T, etc.) (Figure I.23).

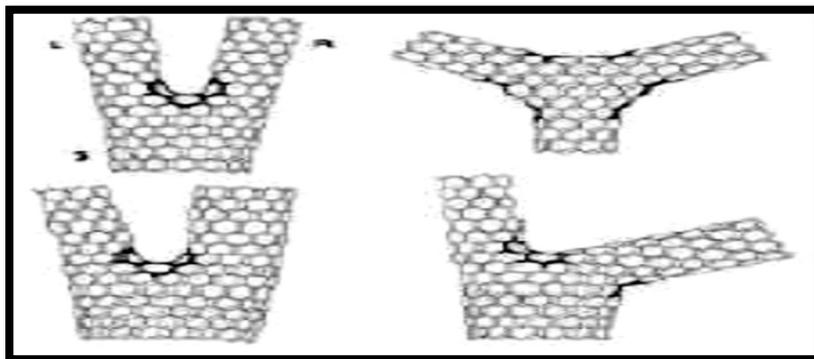


Figure I.24 : Défauts pentagonaux et heptagonaux se traduisant par des jonctions.

En plus de ces défauts qu'on pourrait qualifier d'intrinsèques, il faut tenir compte d'impuretés, carbonées ou non, s'ajoutant aux nanotubes. La nature de ces impuretés dépend naturellement du mode de synthèse des nanotubes : [Marcoux 2002]

1. Lorsqu'un catalyseur métallique est employé dans la synthèse on le retrouve dans l'échantillon brut. Il est d'autant plus difficile de s'en séparer qu'il est le plus souvent sous forme de particules nanométriques (rendant difficile une séparation par filtration ou centrifugation) et recouvert de plusieurs feuillets graphitiques (rendant peu efficace une élimination par oxydation).
2. Tout le carbone présent dans un échantillon brut n'est malheureusement pas sous forme de nanotubes. On trouve des particules de graphite et du carbone amorphe plus ou moins structuré (Figure I.24). Des molécules carbonées de faible masse peuvent également être présentes, comme du (C60) ou des hydrocarbures poly aromatiques. [Marcoux 2002]

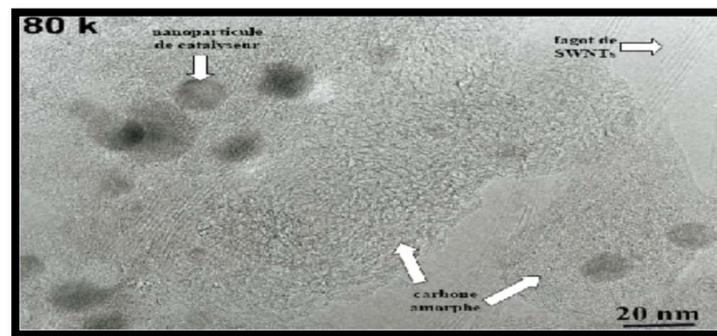


Figure I.25: Image (MET) d'un échantillon de nanotube (collerette brute produite par arc électrique).

On peut distinguer, en plus des (SWNTS), des particules de catalyseur et deux formes de carbone amorphe.

I.11 Applications des nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone et Grâce à Leur dimension nanométrique et leurs propriétés spécifiques sont des matériaux très intéressants du point de vue des applications. De par leur très important facteur de forme, ils sont d'excellents émetteurs d'électrons sous faible champ. Cela keywords : nanotubes ; buckling ; shear déformation ; volume fraction ; porosity.

Téresse particulièrement l'industrie des écrans plats. Ils peuvent stocker une quantité importante d'hydrogène et intéressent donc l'industrie des batteries L'application la plus directe envisagée consiste à les utiliser comme additifs pour polymères (thermoplastiques, thermodurcissables et élastomères). [Houdyp 2006]

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

Des matériaux composites haute performance ou des polymères conducteurs contenant des Nanotubes peuvent ainsi être trouvant leurs applications dans l'automobile (peintures

conductrices évitant l'emploi de solvants polaires), l'aéronautique (ailes d'avions, trains d'atterrissage des hélicoptères, etc.), Il existe d'ailleurs déjà des prototypes utilisés par des sportifs de haut niveau (cyclistes utilisant des vélos dont le cadre est un matériau composite contenant des nanotubes, joueurs de tennis utilisant des raquettes à base de nanotubes de carbone, joueurs de hockey utilisant des crosses dopées en nanotubes de carbone. . .).

Ils peuvent aussi être utilisés comme une peinture antifouling enrichie en nanotubes de carbone.

Nous verrons par la suite que leur rigidité, leur grande flexibilité et leur très faible diamètre. Les nanotubes de carbone sont utilisés comme pointes dans les microscopies à force atomique, de plus, sous forme de fibres macroscopiques. **[Bernard 2007]**

I.12 Inconvénients des Nanotubes

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

I.13 Conclusion

Ce chapitre, qui constitue une recherche bibliographique sur les nanotubes de carbone a montré l'importance de ces nano-objets tant dans le domaine des nanosciences que dans leur côté applicatif. Leurs dimensions particulières ainsi que leurs propriétés diverses ouvrent à l'industrie des perspectives d'innovations nombreuses et prometteuses.

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

Enfin, les nanotubes de carbone sont très résistants excellent matériaux pour le renforcement dans une matrice polymère permet d'obtenir des matériaux nanocomposites avec des propriétés exceptionnelles.

CHAPITRE II

Généralité sur les matériaux composite et les
nanocomposites

II.1 Introduction

Le développement de nanocomposites est depuis quelque décennie, l'une des premières préoccupations des chercheurs, L'idée de départ consiste à incorporer des nanoparticules dans une matrice polymère. En effet, lorsque ces nanoparticules ou nano charges sont dispersées dans un polymère, elles peuvent développer une interface bien supérieure aux Charges classiques, avec une très faible quantité.

Donc, Dans ce chapitre, on introduira les différents types de matrices existants ainsi leur classification et propriétés. Plus particulièrement on s'intéressera aux nanocomposite à matrice polymère et à renforts de (NTC). Enfin, nous traitons particulièrement la dispersion des renforts dans la matrice polymère et la production mondiale des nanocomposites à base (polymère / NTC).

II.2 Définition d'un matériau composite

Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux composant non miscibles (mais ayant une forte capacité de pénétration) dont les propriétés se complètent. Le nouveau matériau ainsi constitué, hétérogène, possède des propriétés que les composants seuls ne possèdent pas.

Ce phénomène, qui permet d'améliorer la qualité de la matière face à une certaine utilisation (légèreté, rigidité à un effort etc..) explique l'utilisation croissant des matériaux composites différents secteurs industriels. Néanmoins, la description fine des composites reste complexe du point de vue mécanique de par le non homogénéité du matériau.

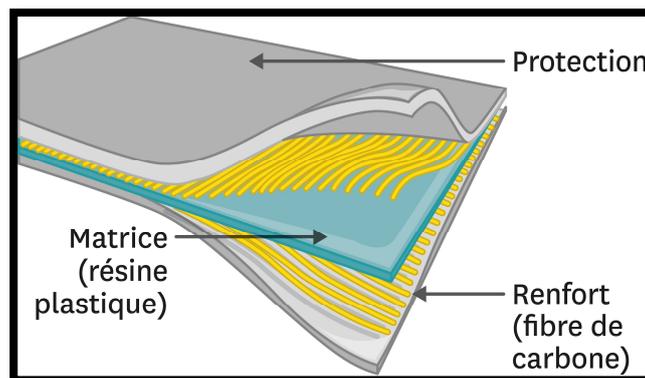


Figure II.1 : Exemple de matériau composite.

II.3 Classification des matériaux composites

La classification des matériaux composites peut être effectuée selon plusieurs façons. en fonction de la nature de la matrice, les matériaux composites peuvent se classer selon les trois familles suivantes :

II.3.1 Composites à matrice polymérique

Ce type de composites a été développé surtout pour les applications aéronautiques où la réduction de masse est essentielle. Les polymères sont donc caractérisés par une faible densité, une résistance mécanique relativement faible, et une grande déformation à rupture.

II.3.2 Composites à matrice métallique

Dans ces composites, la matrice est métallique comme l'aluminium ou le titane qui sont renforcés par des renforts généralement non-métalliques, souvent des céramiques.

Leurs propriétés mécaniques sont donc meilleures ou plus adaptables au chargement que leurs matrices polymériques. Ils sont largement appliqués dans les fabrications des moteurs d'automobile.

II.3.3 Composites à matrice céramique

Les matériaux céramiques tels que le verre et le carbure de silicium (SiC) sont utilisés pour la matrice de ce type de composite. La matrice peut être associée aux renforts comme des métaux, le carbone, et des céramiques. Ce type de composite est développé dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques telles que la ténacité, et la résistance au choc thermique. Une manière plus utilisée consiste à les classer selon les types des renforts.

II.4 Généralités sur la structure des polymères

Les matériaux polymères sont généralement utilisés pour leurs propriétés mécaniques particulières et leur aptitude à être mis en œuvre. Ces qualités sont étroitement liées à leur structure et il est possible, à partir d'une structure moléculaire donnée, d'imaginer la morphologie qui en découle et les propriétés qui s'y rattachent. Ce chapitre a pour objet une présentation des principales générales sur les polymères, et en particulier le polystyrène.

II.5 Notions sur les polymères

Ce n'est que dans les années 1920 que la notion de macromolécule a commencé à être largement acceptée par la communauté scientifique. Herman Staudinger, professeur de chimie à l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich entre 1912 et 1926, ensuite professeur à Fribourg en brisgau et notamment Prix Nobel de chimie en 1953, en a été l'un des principaux artisans. Il a démontré que les matières polymères comme la cellulose, la soie et le caoutchouc étaient formées de longues chaînes moléculaires, qualifiées de macromolécules. Cette idée a ouvert la voie à une recherche plus systématique, tant chimique que physique, sur la synthèse, la structure et le comportement des polymères solides.

II.6 Définition de polymère

Le terme polymère (du grec polus qui signifie « nombreux, plusieurs » et mēros qui signifie « unité, partie ») ; qui sont typiquement regroupés toute matériau formées par la répétition d'un très grand nombre n de petites molécules de faible masse moléculaire appelées monomères qui liés entre eux par des liaisons primaires (liaisons covalentes) sachent que le monomère est une molécule de base (pouvant être par exemple non saturée ou cyclique ou encore comportant des fonctions réactives à ses extrémités). L'assemblage des monomères pour l'obtention de polymères (ou macromolécules) s'appelle la polymérisation. La réaction de polymérisation est également utilisée par les organismes vivants. (Figure II.2).

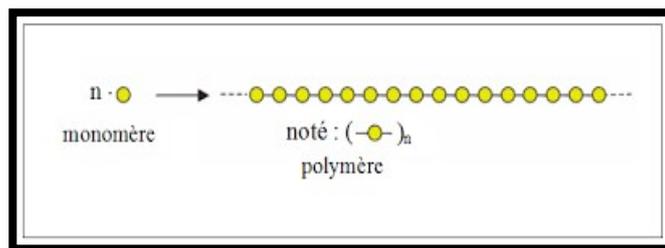


Figure II.2 : modèle schématique de la synthèse d'un polymère.

La lettre n est appelée « degré de polymérisation » ou « indice de polymérisation », pour des valeurs élevées de n ($n > 100$), on parle de macromolécules.

La plupart des macromolécules synthétiques se présentent de façon semblable, sous forme de fils longs et souple.

Un polymère peut être caractérisé par son degré de polymérisation ou sa masse moléculaire. Le degré de polymérisation est le nombre total de monomères contenus dans une macromolécule. La polymérisation, qui désigne la réaction chimique de fabrication des macromolécules. Lorsque ce degré de polymérisation (DP) est inférieur à 30, on parle d'oligomère et lorsqu'il est supérieur à 30, c'est un polymère.

II.7 Classification des polymères

Il existe plusieurs modes de classification des polymères que peuvent être classés :

II.7.1 Classification suivant l'origine

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

II.7.1.1 Les polymères naturels

Issus des règnes végétal, animal ou minéral leur économique et le rôle qu'ils jouent dans les mécanismes vitaux leur à assurer une place de premier choix depuis une trentaine d'années.

Exemples :

- ♣ Les polysaccharides (cellulose, amidon...).
- ♣ Les protéines (la laine, la soie ...).
- ♣ Le caoutchouc naturel

II.7.1.2 Les polymères artificiels

(Dérivés des polymères naturels) Sont obtenue par modification chimique de polymères naturels de façon à transformer certaines de leurs propriétés.

Exemples :

- ♣ Les esters cellulosiques (nitrocellulose, acétate de cellulose ...etc.).
- ♣ Ébonite (caoutchouc fortement réticulé par le soufre).

II.7.1.3 Les polymères synthétiques

Les molécules monomères qui permettent de les obtenir n'existent pas dans la nature. Cependant, on peut remarquer que les structures réalisées par synthèse sont souvent proches de celles des polymères naturels.

II.7.2 Classification en fonction de l'architecture

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

II.7.2.1 Les homopolymères

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

- les homopolymères linéaires.
- les homopolymères branchés.
- Les homopolymères étoilés.

II.7.2.2 Les copolymères

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

Parmi les différents modes de copolymères, nous trouvons : le mode statistique, le mode alterné, le mode séquencé, le mode greffé.

Les polymères, qu'ils soient homos ou copolymères, peuvent être réticulés. Un polymère réticulé est un polymère dont certaines de ses chaînes sont reliées entre elles par des ponts chimiques covalents. La plupart des polymères doivent être réticulés avant leur utilisation. En effet, un polymère est un liquide et pour le maintenir en place, il faut le réticuler.

II.7.3 Classification selon le comportement thermique

Les polymères sont souvent classés d'après leurs propriétés thermodynamiques en trois types :

II.7.3.1 Les thermoplastiques

Ramollissent sous l'effet de la chaleur, il devient souple, malléables et durcissent à nouveau quand on les refroidit, ces matériaux conservent leurs propriétés et ils sont facilement recyclables. Leurs polymères de base sont constitués par des macromolécules linéaires reliées par des liaisons faibles qui peuvent être rompues sous l'effet de la chaleur ou de fortes contraintes, elles peuvent alors glisser les unes par rapport aux autres pour prendre une forme différente et quand la matière refroidit, les liaisons se reforment et les thermoplastiques gardent leurs nouvelles formes.

II.7.3.2 Les thermodurcissables

Les matières thermodurcissables sont les produits dont la transformation conduit, par une réaction chimique, à des composés macromoléculaires tridimensionnels qui sont des matières thermo durcies ou thermo rigides. Dans ce cas les chaînes de départ sont beaucoup plus courtes et plus réactives, ces chaînes vont se lier ensemble chimiquement, cette réaction conduit à des liens chimiques rigides et met en jeu toutes les molécules présentes pour former un réseau tridimensionnel.

II.7.3.3 Les élastomères

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

II.8 Utilisation des polymères

On rencontre les polymères dans les petits objets usuels de la maison comme les appareils électroménagers, et aussi en tant que matériaux de construction, en revêtements et peintures dans les emballages, les pneus, les fibres textiles, les produits médicaux, chirurgicaux, prothèses, produits d'hygiène, articles de loisirs, de structures dans les véhicules de transport, les équipements électriques, les circuits électroniques, les colles. Ils s'infiltrent aussi dans l'alimentation, les produits cosmétiques...etc. [Buerschaper 1944]

II.9 Les nanocomposites et différences avec les composites

Les nanocomposites (NTC/Polymère) font l'objet d'une littérature très abondante. [Yam 1995]. Ils sont également composés d'une matrice contenant des charges. La différence par rapport aux matériaux composites classiques provient du fait que les charges possèdent au moins

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

Tableau II.1 : Avantages et inconvénients de l'ajout de nanoparticules aux polymères. [Koo 2006]

Propriétés améliorées	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> -Propriétés mécaniques (ténacité, rigidité) -Barrière aux gaz -Retardateurs de flammes -Expansion thermique -Conductivité thermique -Résistance chimique -Renforcement 	<ul style="list-style-type: none"> -Augmentation de la viscosité (processabilité) -Difficultés de dispersion - Coloration noire lorsque des particules de carbone sont utilisées

II.10 Les matériaux nanocomposites

L'idée d'améliorer les propriétés des matériaux en combinant deux phases aux propriétés différentes n'est pas nouvelle. On retrouve à travers l'histoire des exemples de matériaux que l'on peut considérer comme nanocomposites, certaines colorations de peintures mayas proviennent d'inclusion de nanoparticules métalliques et d'oxyde dans un substrat de silicate amorphe. En 1917, le noir de carbone a été introduit dans la composition des pneumatiques, ce qui a eu pour conséquence de multiplier par cinq leur durée de vie. [Gloaguen 2007]

Pour les applications industrielles, la plupart des composites sont constitués d'une matrice et d'un renfort. Le renfort se présente généralement sous forme de particules, tissus ou structures et

assure la tenue mécanique, la matrice est généralement un polymère qui lie les points de renfort et participe au transfert des contraintes subit par le matériau final. [Andres 2008]

Plus particulièrement, on appelle un nanocomposite, un système hétéro-phase constitué de plusieurs composants et qui possède des propriétés qu'aucun des constituants ne posséderait seul, dont le renfort possède au moins une des trois dimensions de l'ordre du nanomètre. [Bizet 2004]

II.11 Classification des nanocomposites

On peut appliquer la classification classique des composites suivant la nature de la matrice, dans l'ordre croissant de la température d'utilisation. Les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés que dans un domaine de températures ne dépassant pas 200 à 300 °C, alors que les autres types de composites sont utilisés au-delà : jusqu'à 600 °C pour une matrice métallique et jusqu'à 1000 °C pour une matrice céramique. [Zidour 2012]

II.11.1 Les composites à matrice organique

Aussi appelés composites à matrice polymère, ils sont sûrement les plus développés du fait de l'importance commerciale de ces derniers et de la maîtrise (coût et savoir-faire) de nombreux processus de fabrication. Les composites à matrice organique se subdivisent en deux groupes

II.11.1.1 composites à matrices thermoplastiques

L'intérêt des thermoplastiques réside dans leur faible coût, résultant à la fois de matières premières disponibles et des procédés de fabrication. Toutefois, ce faible coût est lié à des propriétés mécaniques et thermomécaniques faibles. Cependant, ils possèdent la propriété de pouvoir être mis en forme plusieurs fois par chauffage et refroidissement successifs. Ils peuvent donc être récupérés et facilement recyclés.

II.11.1.2 composites à matrices thermodurcissables

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

II.11.1.3 Les composites à matrice métallique

Dont certains procédés de fabrication s'inspirent de la métallurgie des poudres. Les particules de seconde phase peuvent être des oxydes, borures, carbures, nitrures. Les composites à matrice métallique encore appelés (MMCs) (métal-matrix composites) se sont développés grâce à la facilité et à la maîtrise des procédés de fabrication ainsi qu'à leur faible coût.

II.11.1.4 Les composites à matrice céramique

Ils sont utilisés pour des applications à plus haute température comme des oxydes, carbures ou nitrures. L'utilisation des céramiques est limitée notamment par leur ténacité à rupture, leur résistance à la fatigue et aux chocs thermiques. Pour résoudre ces problèmes, l'incorporation d'une seconde phase ductile dans la matrice céramique est une solution. [Zidour 2012]

II.12 Nanocomposites (Nanotube de carbone/matrice Polymère)

Un nanocomposite de polymère (ou PNC, polymère nanocomposite en anglais) est constitué par un ou plusieurs polymères avec des nanoparticules ou nano charges dispersées dans la matrice polymère. Les nanoparticules existent sous différentes formes, par exemple feuillets, fibres, ou sphères, mais possèdent au moins une dimension comprise entre 1 et 50 nanomètres. Ce sont des systèmes multi phases qui représentent actuellement environ 95 % de la production de plastiques. Les nanoparticules jouent le rôle d'un renfort ou d'un comptabilisant qui donnent de meilleures propriétés aux composites obtenus. Les nanoparticules, tels les nanotubes de carbone et les argiles, sont de plus en plus utilisées ces dernières années. [Xiao 2007]

La particularité des nanocomposites polymère-CNT réside dans la finalité multifonctionnelle du matériau obtenu, du fait des propriétés intrinsèques des CNTs. En effet, l'ajout de CNTs dans une matrice polymère lui confère en plus de la rigidité mécanique, des augmentations significatives de conductivités électrique et thermique. [Bozlar 2009]

II.13 Propriétés des nanocomposites polymères

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

II.13.1 Propriétés mécaniques

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

La résistance à la rupture de ces composites est améliorée lorsque la matrice et les charges possèdent une énergie inter faciale suffisante pour permettre le transfert des efforts de la matrice au renfort. La dispersion des nanotubes dans une matrice polyéthylène téréphtalate permet d'augmenter le module d'Young du polymère de (1,5 GPa à 1,9 GPa) ainsi que la contrainte à la

rupture de (60 MPa à 68 MPa) avec (2%) de (NTC). [Kim 2007] Avec ce même taux de charge une augmentation de (214%) du module d'élasticité est observée dans une matrice polyamide [Liu 2004]. Dans une matrice polyéthylène une amélioration de (89% et 56%) respectivement du module d'Young et de la contrainte à la rupture peut être observée à (10%) de charges.

II.13.2 Propriétés électriques

Les matrices polymères sont généralement des matériaux diélectriques (leur conductivité moyenne est proche de 10^{-7}S.m^{-1}). L'ajout de charges électriquement conductrices donne la possibilité d'obtenir un matériau alliant les propriétés structurales du polymère et de bénéficier partiellement de la conductivité électrique des particules. Ainsi, il est possible d'obtenir des composites et nanocomposites permettant la dissipation de charges électrostatiques. Ce comportement est très prisé dans les domaines de l'aéronautique et de l'électronique entre autres. Des matrices électriquement isolantes peuvent par exemple atteindre des valeurs de conductivités électriques dépassant 1 S.M^{-1} grâce à l'incorporation de très faibles fractions massiques de nanotubes de carbone [Sandler et al 2003].

II.13.3 Conductivité thermiques

L'élaboration d'un matériau composite avec un niveau de conductivité thermique élevé est un défi important à relever du fait des applications prometteuses, en particulier dans la réalisation de composants électroniques. Diverses études ont récemment montré une augmentation de (40%) de la conductivité thermique d'une résine époxy ou du polyuréthane chargée à (0,5%) en masse de (CNTs). [Cai 2008].

II.13.4 Propriétés au feu

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

II.14 Interface matrice-renfort dans les nanocomposites à matrice polymère

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

Il est à rappeler que pour la plupart des matrices polymères, la compatibilité avec les (CNTs) est faible du fait de leurs structures chimiques très différentes. En effet, l'adhésion entre un CNT et un polymère est mauvaise du fait des tensions superficielles trop élevées. [Gao 2005]

Ce désagrément empêche par ailleurs une dispersion efficace et homogène des (CNTs) à l'intérieur de la matrice. De nombreuses études sont menées afin de comprendre et d'améliorer les phénomènes à l'interface. [Wei 2006]

Il s'agit principalement de travailler au niveau de la cohésion entre les deux éléments constitutifs du composite. Ceci peut être réalisé grâce à une modification de surface des (CNTs) avant leur insertion dans la matrice.

II.15 Elaboration des nanocomposites (NTC/polymère)

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

II.15.1 Polymérisation in situ

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

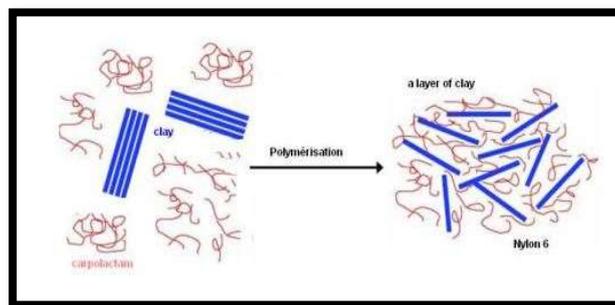


Figure II.3 : Illustration schématique de la préparation de Nanocomposites nylon-6/Argile par Polymérisation in-situ d'après. [Usuki 1993]

II.15.2 Mélange en solution

Le principe d'élaboration repose sur la possibilité de disperser la silice dans un solvant dans lequel le polymère est soluble, le solvant est ensuite évaporé lentement afin d'éviter la formation de bulles d'air, on obtient le nanocomposite. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet d'abaisser la viscosité et la température de mise en œuvre. En revanche, l'étape d'extraction du solvant est cruciale car il faut empêcher les nano charges de s'agréger à nouveau. [Senani 2004]

II.15.3 Mélange à l'état fondu

Cette technique consiste à mélanger directement le polymère thermoplastique avec l'argile à une température élevée. Elle présente un grand intérêt puisqu'elle permet de travailler en absence de solvants et l'utilisation des procédés conventionnels de mise en œuvre des polymères thermoplastiques, comme l'extrusion et le moulage par injection. Or, cette méthode exige des conditions particulières, notamment la compatibilité entre la matrice et l'argile, qui peut conduire à une lente pénétration (transport) des chaînes polymériques entre les feuillets de l'argile.

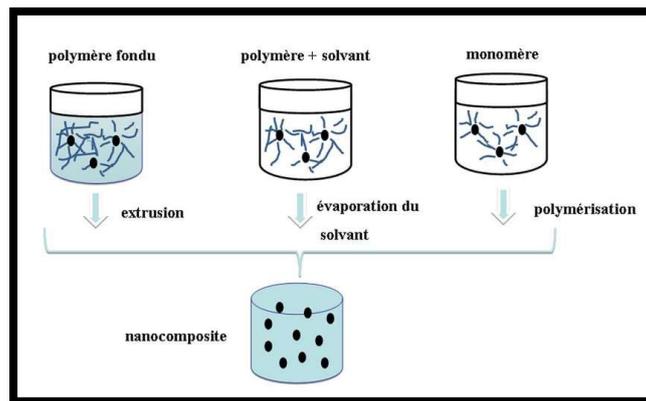


Figure II.4 : Méthodes d'élaborations des nanocomposites polymères : a) mise en œuvre dans le fondu, b) mise en solution et c) polymérisation in situ. (Althues et al 2007)

Ce procédé de réalisation par voie fondue consiste à introduire les nano charges dans l'outil de mélange type malaxeur (Bra Bender) ou extrudeuse (monovis, bivis) soit au début de la transformation avec les autres composants (matrice, agent comptabilisant) à l'état solide, soit au cours de la transformation lorsque ces composants sont fondus. Cette méthode peut être utilisée pour réaliser une variété de nanocomposites, comme le nylon-6, le polystyrène, les polyoléfines et le polyéthylène téréphtalate.

Tableau II.2 : Comparaison des différentes méthodes d'élaboration des composites polymères/NTC.

Méthode de Préparations	Principe	Avantages	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 a produire a l'échelle industrielle (simple, propre, Sans solvant)	La viscosité élevée dans le système
Polymérisation in situ	Il existe deux types de polymérisation in situ : - Polymérisation classique en présence de NTC (dans ce cas pas de liaison covalente avec les NTC). -Le « graftingfrom »	Dans le cas du « graftingfrom », les propriétés mécaniques des composites sont améliorées	Technique généralement longue

II.16 Dispersion des renforts

II.16.1Utilisation des ultrasons

L'usage des ultrasons, est une technique très connue et utilisée en abondance dans le domaine. Ce procédé consiste à utiliser les vibrations de la solution dans un bain US pour casser les enchevêtrements de (CNTs) en deux étapes : Dans un premier temps, la masse appropriée de (CNTs) est introduite dans un volume d'éthanol et placée aux ultrasons pendant (~ 1 heure), jusqu'à l'évaporation du solvant. Ensuite la poudre de (CNTs) est ajoutée à la base et à nouveau.

La dernière étape d'élaboration du composite consiste à rajouter le catalyseur à la solution précédente pour procéder à la réticulation du polymère. Les images ci-dessous montrent que l'usage des ultrasons peut fournir des résultats assez satisfaisants. En effet, un tel procédé permet de briser les gros agrégats de (CNTs). Cependant, des observations au microscope optique sur une gouttelette de la solution constituée de base + (CNTs) (après 2 heures de passages aux ultrasons) montrent que des agglomérats de tailles micrométriques persistent (Figure II.5)

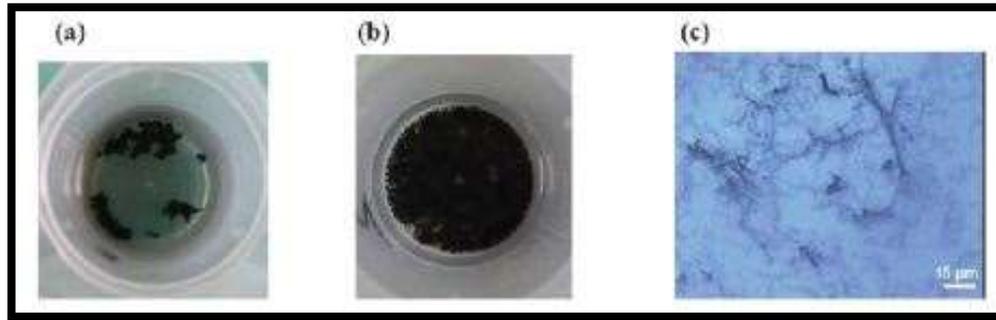


Figure II.5: L'influence de la dispersion des (CNTs) par ultrasons. (a) (CNTs) dans l'éthanol avant passage aux ultrasons. (b) Après 1 heure aux ultrasons. (c) Image microscope optique d'une gouttelette de base + (CNTs) après 2 heures de dispersion. Des agrégats sont encore présents. [Bozlar 2009]

Les inconvénients de l'utilisation des ultrasons sont

- Volume de matière limité.
- Nécessite des liquides de basse viscosité pour qu'elle soit efficace.
- l'US n'engendre pas suffisamment de force de cisaillement pour « dés agglomérer » les (NTC).
- Des recherches [Lu 1996], [Gu 2008] ont montré que l'énergie fournie par les vibrations aux fréquences ultrasonores induit des défauts, voire même la coupure des (NTC). Malgré ces points négatifs, l'utilisation d'ultrasons reste bien souvent nécessaire pour disperser les (NTC) lorsque ceux-ci sont en suspension dans un solvant (avant de mélanger ce dernier à la matrice polymère).

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

II.16.2 Dispersion mécanique par tri cylindre

A l'origine, cet appareil a été conçu pour broyer des produits dans l'industrie pharmaceutique ou alimentaire. Son utilisation pour disperser les (CNTs) est récente. Thostenson et al [Thostenson 2006].

Ont montré que le tri cylindre est un outil assez performant pour disperser de manière homogène les (CNTs) dans une résine époxy. Ils ont pu ainsi obtenir des niveaux de conductivités électriques et thermiques supérieurs à d'autres travaux (utilisant notamment les ultrasons).

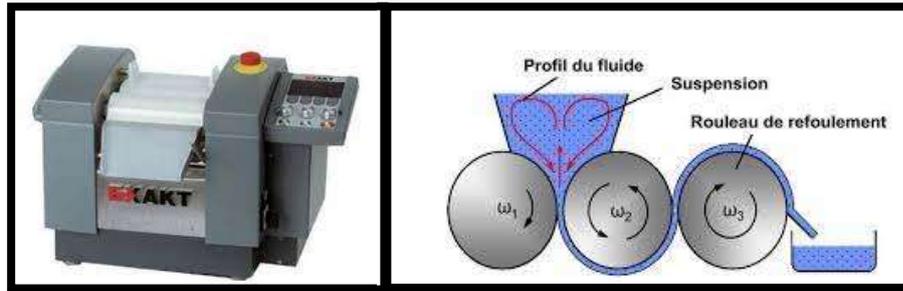


Figure II.6 : a) Tri cylindre Exakt80E (Source : Exact Vertriebs GmbH, Allemagne). b) Schéma du circuit d'un fluide dispersé à partir d'un cylindre (Source : IPAT, TUBra unschweig, Allemagne). [Bozlar 2009]

Le principe général de ce système mécanique consiste à appliquer une combinaison de forces de cisaillements et de pressions sur un fluide en régime laminaire. La solution à disperser est introduite au niveau des rouleaux 1 et 2. (Figure II.6) Le cylindre du milieu (numéro 2) tourne dans un sens opposé aux deux autres. Le second paramètre que l'on peut modifier avec cet appareil est la distance entre chaque rouleau. Elle peut être comprise entre (5 et 130 μm). La combinaison de ces deux paramètres permettant aussi bien de régler la vitesse de rotation des rouleaux (forces de cisaillement) et la distance (pression exercée sur le fluide). L'avantage que nous voyons à ce procédé est qu'il permet une grande cadence de fabrication. Ce procédé a été récemment utilisé par les membres de l'équipe de K. Schulte à Hambourg [Goj 2004] et celle de Thostenson à Virginia Tech. (USA) [Tho 2005] pour disperser des (NTC) dans des polymères époxyde.

II.17 Marché

D'après un rapport de la Business Communication Co. Inc. (Norwalk, CT) le marché mondial total pour les nanocomposites polymères, en 2003, a atteint 11 123 tonnes pour une valeur de 90,8 millions de dollars. Avec une croissance annuelle estimée à 18,4%, il devrait représenter, en 2008, 36 000 tonnes soit une valeur de 211 millions de dollars. Même si les productions des thermo durcis et thermoplastiques sont sensiblement les mêmes en volume (Figure II.7) actuellement, la valeur totale des thermoplastiques est 3,5 fois plus importante (Figure II.8). En 2008, les thermoplastiques devraient représenter 77 % de la production en volume et 85% en valeur.

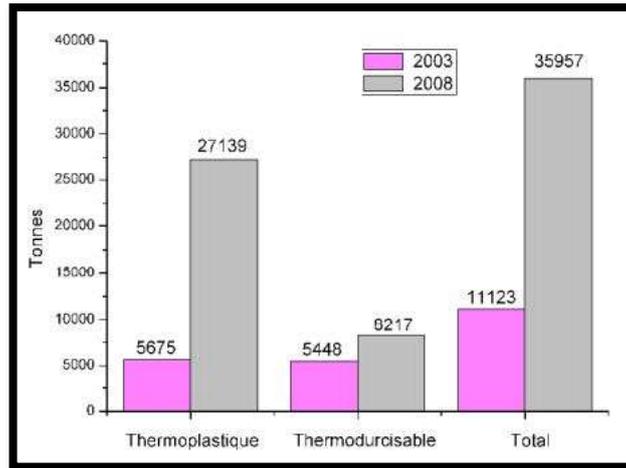


Figure II.7 : Production mondiale (en tonnes) de nanocomposites polymères.

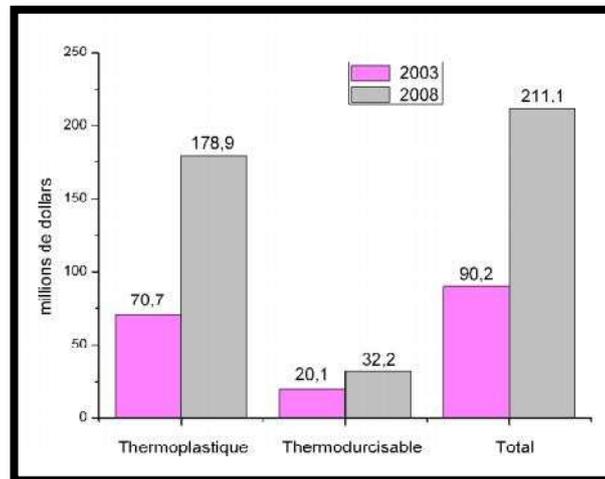


Figure II.8 : Production mondiale (montant en millions de dollars) de nanocomposites polymères.

II.18 Application des nanocomposites dans le domaine de Génie civil

Même si les nanocomposites sont très présents au niveau de la recherche, peu sont déjà viables commercialement. Les enjeux de l'industrie portent essentiellement sur le développement de nanocomposites à matrice polymère, l'élargissement des domaines d'application des polymères et l'amélioration de certaines propriétés (allègement et renforcement des structures, amélioration des propriétés optiques, augmentation de la durabilité, mais également résistance au feu, aux températures élevées et aux chocs thermiques). Il s'agit notamment d'obtenir des céramiques, pigments, poudres et catalyseurs multifonctionnels et plus efficaces, des technologies de collage sans colle, de nouvelles technologies de soudage, des couches fonctionnelles (antiadhésif, antistatique, etc.), des peintures, vitres, etc. L'industrie des produits céramiques cherche à renforcer les céramiques en introduisant des nano poudres comme les nanoparticules de nitrure de silicium qui permettent de renforcer l'alumine. L'industrie du bâtiment développe des capteurs miniaturisés qui seront intégrés dans l'habitat afin d'améliorer le confort et la sécurité. Des

recherches sont en cours pour réaliser des revêtements plus résistants ou présentant des propriétés antisalissures ou antidérapantes. D'autre part, dans le domaine du génie civil et des grands ouvrages, l'amélioration de la sûreté passe par le renforcement des matériaux de construction. Une des réalisations exceptionnelles touche le secteur des matériaux cimentaires. Un nouveau procédé basé sur les nanotechnologies permet en effet le remplacement de la fumée de silice, une ressource peu accessible employée dans les bétons haute performance. « La nano poudre de verre ou nano silice provenant des déchets recyclés est transformée en fine poudre, explique le professeur Arezki TagnitHamou de l'Université de Sherbrooke. « Les nano sphères contenues dans la poudre de verre densifient le béton, le rendant encore plus résistant et moins perméable. » Une avenue qui laisse présager un bel avenir pour cette ressource, quand on sait que la production de béton dans le monde dépasse les quatre milliards de mètres cube par année et constitue la matière la plus utilisée sur la terre après l'eau. [Tagrara 2017]

II.19 Conclusion

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

Nous avons également découvert des avantages au nanocomposites qui surmontent les nanocomposites classiques :

- Une amélioration significative des propriétés mécaniques notamment de la résistance sans compromettre la ductilité du matériau car la faible taille des particules ne crée pas de larges concentrations de contraintes.
- Une augmentation de la conductivité thermique et de diverses propriétés.

En fin, et selon ce chapitre on a noté que l'ajout de particules nanométriques améliore, de manière notable, certaines propriétés avec des fractions volumiques beaucoup plus faibles que pour les particules micrométriques.

CHAPITRE III

Les matériaux poreux et la
porosité

III.1 Introduction

Il existe deux points de vue divergents sur la porosité en particulier dans les matériaux composites. Ce que certains voient comme un défaut, lors de la synthèse de ces matériaux l'apparition de la porosité est inévitable, la présence de pores à l'intérieur d'un composite dégrade les propriétés mécaniques en statique et en fatigue où les pores peuvent agir comme un point d'initiation de fissures. [Almeida 1994] Et pour des taux plus élevés de la porosité [Yokota 1978], les propriétés mécaniques comme le module d'Young, le module de cisaillement, le coefficient de poisson ou les contraintes à la rupture sont affectées de manière significative. [Gauthier 2017]

Une autre vision de la porosité, c'est de la considérer comme une qualité recherchée dans les matériaux, Certains matériaux plus technologiques tirent leur fonctionnalité de leur grande surface spécifique, que les chimistes cherchent à contrôler finement en guidant la formation de leur porosité.

III.2 les matériaux poreux et la porosité

Un milieu poreux est constitué par une matrice solide qui peut être, consolidée quand l'espace poreux est creusé dans la matrice solide. Dans ce cas, la matrice solide compacte ne peut pas se diviser en grains ou fibres (roches calcaires, béton, grès, argiles, bois, céramiques, poudres frittées, tissus végétaux et animaux...), non consolidée (granulaire) la phase solide est formée d'un empilement de grains ou de fibres non soudés entre eux (gravier, sables, limons, billes de verre et d'acier, matériaux divers...). Et de petits espaces de vide ou de cavités appelés pores, remplis de fluides et peuvent être connectés ou non. D'une manière générale on distingue deux types de porosité [Franck 2007], la porosité d'interstices et la porosité de fissure. La porosité d'interstices (figure 1a) représente les vides autour des particules solides plus ou moins liées les uns aux autres. Tandis que la porosité de fissure correspond à des fractures, fissures dans le matériau (figure 1b). Dans ce chapitre on s'intéresse exclusivement à la porosité d'interstices.

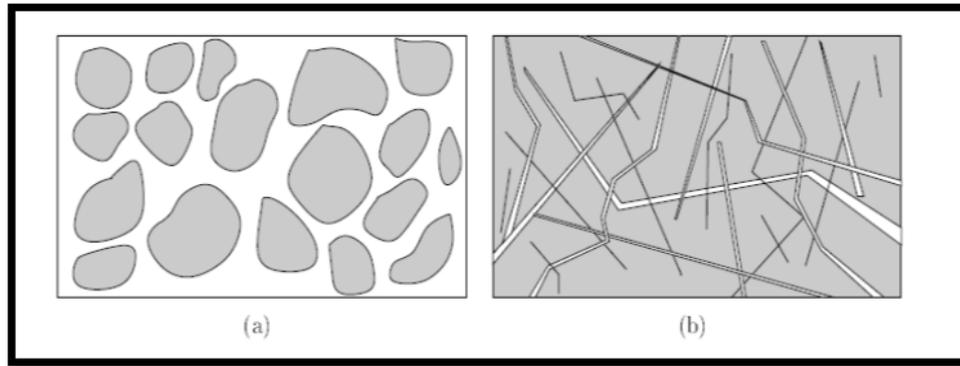


Figure III.1 : (a) la porosité d'interstice, (b) la porosité de fissure. [Franck 2007]

III.2.1 les matériaux poreux (interstices)

Les matériaux poreux, comme son nom l'indique son composé d'atomes liés les uns aux autres de façon à former des interstices, ils se rencontrent quasiment partout autour de nous [Oukhlef 2011], que ce soit dans la matière vivante (peau humaine, cartilage, os, ...), inerte (sols, couches sédimentaires, roches, ...) ou industrielle (bétons, ciments, poudres, textiles, ...) (figure III.2)

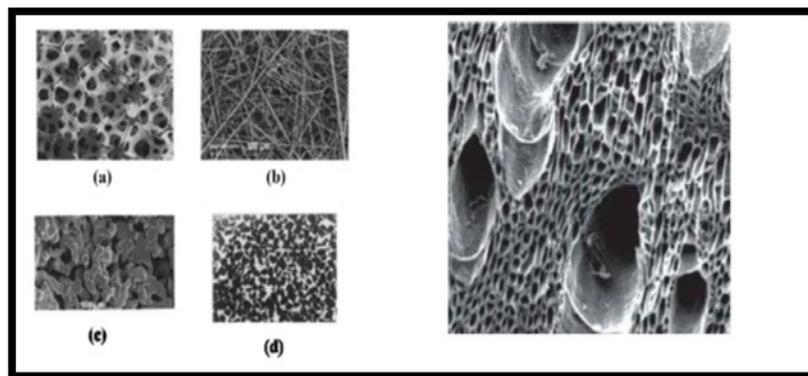


Figure III.2 : Exemples de matériaux poreux. [Oukhlef 2011]

Divers types de milieux poreux Micrographie d'un morceau de

- (a) mousse métallique, bois
- (b) matériaux fibreux
- (c) matériaux céramiques,
- (d) sable

Les propriétés des matériaux poreux sont gouvernées par : le nombre, la distribution de la taille et la forme des pores ainsi que par leurs connectivités. (International Union of Pure and Applied Chemistry) (IUPAC) a précédé à une classification des pores en fonction de leur taille: [Everett 1972] Les microporeux (diamètres des pores inférieurs à 2 nm), Les méso poreux (diamètre de pores Compris entre 2 ET 50 nm), les macroporeux (diamètres des pores supérieurs à 50 nm), Les nano poreux sont les micros et méso poreux. D'une manière générale, les matériaux poreux

sont définis principalement par des invariants macroscopiques et microscopiques tels que la porosité, la perméabilité, la tortuosité, la surface spécifique et la distribution de tailles de pores.

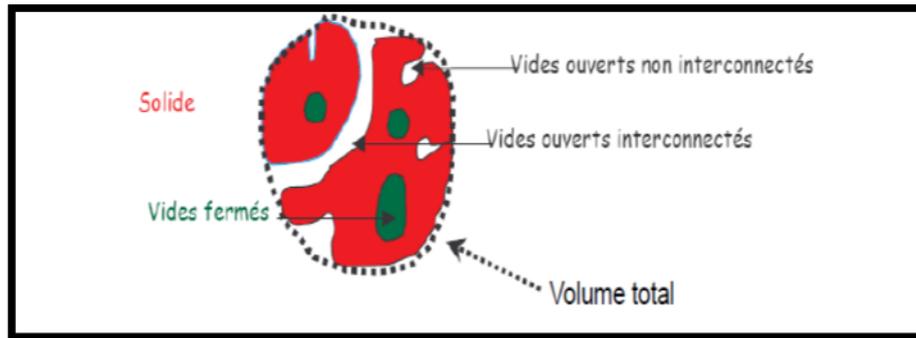


Figure III.3 : Schématisation d'un milieu poreux

III.3 Porosité

La porosité est définie comme le rapport du volume des vides (pores) V_p sur le volume total V_t de l'échantillon. Autrement dit, c'est la fraction volumique du matériau occupé par les pores (percolant ou pas). Elle s'écrit

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

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

Exemples :

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

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.

III.4 La caractérisation de la porosité

La variété des méthodes d'évaluation de la porosité est liée à la diversité des matériaux poreux et aux objectifs de chaque approche. Ainsi, dans l'étude d'un adsorbant ou d'un matériau utilisé dans la catalyse, une mesure de la surface spécifique, par exemple, peut être privilégiée. Par contre, si l'objectif concerne le contrôle de la taille des pores, les méthodes de détermination de la distribution de taille seront une préférence. [Félix 2012]

Les méthodes de caractérisation de la porosité sont très souvent liées à une classification des matériaux poreux suivant des critères donnés. Les matériaux poreux peuvent être classés suivant le type de porosité dominante (fermée ou ouverte), l'origine de la porosité (inter ou intra particule), la résistance mécanique (rigide ou fragile) ou la taille des pores. [InaGaki 2009]. Voici quelques exemples permettant d'illustrer la variété des techniques employées

III.4.1 Prosimètre par Intrusion d'Eau

Le prosimètre à l'eau est une technique reposant sur l'exploitation de pesées d'un échantillon de matériau poreux à différents états hydriques. Cette technique simple permet notamment de mesurer la porosité totale accessible à l'eau, le volume apparent d'un échantillon et la saturation en eau. Grâce à la taille des molécules d'eau, le prosimètre l'eau permet d'investir des pores jusqu'à 0,5 nm de diamètre (taille de deux molécules d'eau). [Gallé 2001]

III.4.2 Prosimètre par intrusion de mercure

La Prosimètre par Intrusion de Mercure (PIM) permet d'obtenir rapidement sur les caractéristiques géométriques d'un réseau poreux pour des diamètres de pores compris entre 3nm et 800µm. Les caractéristiques déterminées sont notamment : le volume des pores accessibles au mercure, la surface spécifique, le volume introduit en fonction de la taille des cols d'accès aux pores, et la répartition en taille des cols d'accès aux pores. [Frevel 1963]

Grâce à son caractère non-mouillant, le mercure ne peut pas entrer de lui-même dans les pores d'un matériau : il faut exercer une pression afin qu'il puisse y pénétrer. Si le pore est supposé cylindrique, la relation entre pression exercée et rayon du pore considéré est donnée par l'équation de Washburn. [Boher 2012]

$$P_{\text{Hg}} = \frac{2\gamma_{\text{Hg}} \cos\theta}{r_p} \quad (3.2)$$

Avec P_{Hg} , la pression exercée sur le mercure [Pa], γ_{Hg} , la tension superficielle du mercure [N.m], θ l'angle de contact entre le mercure et la surface du pore, et r_p , le rayon du po

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

III.4.3 Stéréologie

Elle consiste à observer au moyen d'un microscope optique ou électronique une coupe du matériau dont l'image peut être traitée pour augmenter le contraste entre les pores et la matrice. Cette méthode permet d'obtenir certaines caractéristiques géométriques de la porosité comme, entre autres, le rapport de la surface des pores à celle de la matrice pour une image (surface) de la coupe considérée. [Haynes 1973]

III.4.4 La micro tomographie

La micro tomographie est une technique non destructive d'analyse 3D très récente, fournissant une image volumique de la répartition du coefficient (μ) d'absorption linéaire des rayons X [Ledru 2009]. Lorsque l'échantillon considéré est un multi matériau dont les constituants présentent des différences marquées de valeur de μ , il est possible d'extraire par segmentation une image 3D de la distribution spatiale des différents constituants.

Les matériaux organiques d'une part, inorganiques d'autre part et le gaz de l'atmosphère n'ayant pas les mêmes coefficients d'absorption des rayons X, il est possible d'obtenir une cartographie 3D du réseau fibreux d'un matériau composite à renfort fibre de verre et matrice époxy. [Schell 2016]. Ces mêmes travaux montrent qu'il est aussi possible d'obtenir une cartographie 3D des porosités présentes dans ce matériau. Il est alors facile de calculer le pourcentage volumique de ces interstices dans ce matériau, mais aussi d'analyser (leur morphologie, leurs ré partitions etc...). Cependant, cette technique reste actuellement relativement onéreuse et surtout applicable à de très petits volumes pas forcément représentatifs de la pièce, notamment en raison du très grand nombre de données générées par échantillon.

III.4.5 Diffusion de rayonnement

Cette technique n'est applicable que sur des solides dont les pores et la matrice présentent des caractéristiques (distribution de la taille et de la répartition des pores. . .) accessibles à partir de la mesure de la distribution angulaire de l'intensité du rayonnement diffusé. [Mazumder 2004]. La surface du matériau est placée sous un faisceau incident d'un rayonnement électromagnétique monochromatique (rayon lumineux ou rayon X) ou de neutrons. Cette technique est particulièrement adaptée pour les pores de dimension moléculaire. Mais l'effet de la rugosité de

surface, entre autres, doit être pris en compte, puisqu'elle peut avoir une influence sur la diffusion du rayonnement.

III.4.6 Les ultrasons

Très utilisée dans le milieu industriel car non destructif, cette méthode permet d'analyser rapidement la totalité du volume d'une pièce et d'évaluer la quantité de porosité qu'elle renferme. En effet, la présence de porosité dans ces matériaux vient perturber fortement la propagation d'ondes ultrasonores. En comparant la différence d'amplitude entre le signal d'entrée et le signal de sortie, une estimation de la quantité de porosités présentes dans la pièce peut être déterminée. [Mascaro 2006]. Cependant, cette technique repose sur la comparaison de l'atténuation mesurée sur la pièce par rapport à l'atténuation mesurée sur des éprouvettes étalons. On obtient ainsi des estimations sur le taux volumique de porosité et sur l'homogénéité générale des pièces (répartition de la porosité, répartition de la matrice...). En revanche, peu d'informations relatives à la répartition de la porosité dans l'épaisseur, à leurs morphologies, ni de valeur précise de leur taux volumique au sein de la pièce peuvent être avancées. De plus, la conception et la quantification des défauts au sein des éprouvettes étalons peuvent amener quelques interrogations, car hormis la micro tomographie, aucune méthode ne donne de valeur précise du taux volumique de porosité. Cela constitue par ailleurs l'objectif majeur de cette étude.

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

L'étude des propriétés mécaniques des matériaux poreux se résume généralement à déterminer une corrélation entre la porosité et les propriétés mécaniques : une augmentation de la fraction volumique de pores implique une diminution des propriétés mécaniques (Figure, III.4). [Clément 2013].

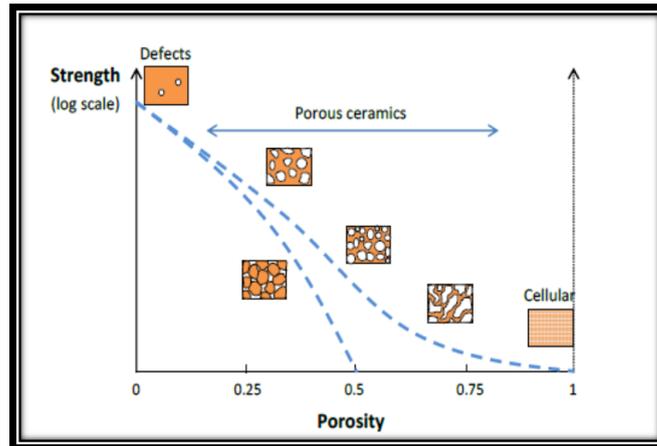


Figure III.4: Représentation schématique de l'influence de la porosité sur les propriétés mécaniques de matériaux poreux. Les deux courbes pointillées décrivent l'évolution des propriétés de deux microstructures différentes. [Meille 2011]

La majorité des études disponibles dans la littérature portent sur l'effet du taux de porosité, qui reste le principal facteur d'influence, La forme des pores, la distribution de leur taille ou encore la nature des interconnexions entre les particules solides ont également une influence sur la corrélation entre les propriétés mécaniques et la porosité. [Ogasawara 2006]

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

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

$$E = E_0 (1 - b_P) \quad (3.3)$$

Où :

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

Ce modèle **linéaire** (3.3) repris dans la théorie de l'élasticité d'Einstein [Einstein 1906], qui l'utilisait pour décrire le comportement élastique d'un fluide avec une suspension de sphères dures

$$E = E_0(e^{-b_P}) \quad (3.4)$$

Cette relation exponentielle (3.4) a été utilisée pour la première fois par [Spriggs 1961] pour analyser l'effet de la porosité sur le module élastique de la matière réfractaire poly cristalline, oxyde d'aluminium.

$$E = E_0 (1 - P / (1 + bP)) \quad (3.5)$$

Ce modèle non linéaire (3.5) à été proposé par [Hasselman 1962] est directement basé sur les expressions obtenues par [Hashin 1962] pour les modules de matériaux avec suspensions diluées de pores sphériques.

$$E = E_0 (1 - bP)^{2/3} \quad (3.6)$$

Cette relation (3.6) à puissance (2/3) a été dérivée par [Haynes 1973] pour le module de Young des matériaux poreux et a été utilisée tardivement pour analyser les données de plusieurs matériaux.

Le principal inconvénient de ces modèles est qu'ils ne peuvent pas être utilisés pour toute la plage de porosité. Il semble que certaines conditions doivent être remplies par un bon modèle pour toute la plage de porosité : il doit être aussi simple que possible, doit posséder le plus petit nombre possible de paramètres d'ajustement et il est nécessaire d'intégrer la porosité critique (seuil de percolation) [Kovacik 2008] au modèle. Pour cette raison, le modèle exponentiel de Knudsen et Springs équation ne convient pas car aucun seuil de percolation n'est pris en compte. De plus, il est également inapplicable pour les mousses, car il ne satisfait pas la condition limite $E = 0$ pour $P = 1$ (E est le module de Young et P est la porosité).

Au cours des dernières années, les progrès dans la prédiction des propriétés élastiques des matériaux poreux sur toute une plage de porosité ont été étroitement liés à la relation empirique loi-puissance de Phani et de Niyogi. [Phani 1987]

$$E = E_0 \left(1 - \frac{P}{P_c}\right)^{f_E} \quad (3.7)$$

Où P_c est la porosité critique (seuil de percolation) à laquelle le module de Young effectif devient égal à zéro et f_E est le paramètre dépendant de la morphologie du grain et de la géométrie des pores du matériau poreux [Kovacik 2008] Comme l'ont noté [Wang et al 1991]. Les ajustements des données expérimentales à cette équation donnent souvent $P_c = 1$ [Phani 1987] et n'expliquent pas les données avec précision. Dans des travaux expérimentaux récents, soit $P_c = 1$ est utilisé de préférence [Maitra 1994], soit un modèle linéaire ($f_E = 1$) [Lam 1994] est utilisé, où P_c est considéré comme une porosité initiale de la poudre, car les matériaux poreux sont de préférence préparés à partir de poudres dont la taille et la forme des particules peuvent varier de manière significative. Pendant la consolidation de la poudre, différentes porosités peuvent être

obtenues en faisant varier les paramètres technologiques tels que la température, la pression externe ou le temps.

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

Le même modèle de percolation est valable pour le module de cisaillement [Lam 1994] de matériaux poreux.

$$G = G_0 \left(1 - \frac{P}{P_c}\right)^{f_G} \quad (3.8)$$

Où f_G est l'exposant caractéristique du module de cisaillement. Du point de vue de la stabilité mécanique du système, on peut s'attendre à ce que le seuil de percolation soit évidemment le même pour le module de Young et le module de cisaillement. Cependant, les exposants caractéristiques du module de Young et du module de cisaillement ne sont pas identiques en général. Il existe de nombreux paramètres qui influencent le module de Young et le module de cisaillement des matériaux poreux [Kovacic 2006] Les principales sont : L'influence de la taille de la poudre et de sa distribution de la méthode de préparation et de la forme et de la distribution de la poudre.

III.5.3 Porosité et le coefficient de Poisson ν (le coefficient de Poisson ν /porosité)

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

$$\nu = \frac{-E}{2G} - 1 \quad (3.9)$$

Après le remplacement des équations (3.7) et (3.8) dans l'équation (3.9) nous obtenons

$$\nu = \frac{E_0}{2G_0} \left(\frac{P_c - P}{P_c}\right)^{f_E - f_G} - 1 \text{ Pour } P \leq P_c \quad (3.10)$$

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

$$\nu = (\nu_0 + 1) \left(\frac{P_c - P}{P_c}\right)^{f_\nu} - 1 \text{ Pour } P \leq P_c \quad (3.11)$$

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 $f_\nu = f_E - f_G$. [Kovacic 2006]

III .6 Conclusion

Dans ce chapitre on a, donné un aperçu général sur la porosité en particulier dans les matériaux composites. Les pores peuvent agir comme un point d'initiation de fissures.

Ensuite et après une synthèse bibliographique sur la porosité on à essayer de présenter les différents modèles de l'effet de la porosité sur les propriétés mécaniques des matériaux.

CHAPITRE IV

Théories des poutres et développement
mathématique

IV.1 introduction

L'étude du comportement mécanique des milieux continus, est fondé sur des théories pour un calcul approximatif des grandeurs généralisées sur la base d'un système d'équations d'équilibre, de compatibilité et de conditions aux limites sur les bords de la structure, complétée par une loi de comportement reliant les contraintes et les déformations généralisées.

Nous présentons dans une première partie les différentes théories de déformation des poutres. Pour résoudre les problèmes des structures ayant comme éléments structuraux des poutres dans le domaine élastique, il est nécessaire de choisir la bonne théorie écrivant correctement le comportement mécanique de la structure ainsi que la méthode de résolution à appliquer. Les théories des poutres sont des modèles utilisés dans le domaine de la résistance des matériaux. On utilise trois modèles, La théorie d'Euler-Bernoulli, qui néglige l'influence du cisaillement ; la théorie de Timoshenko qui prend en compte l'effet du cisaillement en exigeant un facteur de correction cette théorie nécessite un coefficient de correction pour assurer la nullité des contraintes tangentielles aux faces supérieur et inférieur de la poutre. La théorie d'ordre élevé qui prend en compte l'effet du cisaillement.

Ensuite, une solution analytique générale de la charge critique a été dérivée par l'application des équations d'équilibres en utilisant le principe de Hamilton. Les solutions pour une poutre simplement appuyée sont obtenues en utilisant la solution de Navier., nous présentons une étude de l'effet de la porosité sur la charge critique d'une poutre poreuse renforcées par des nanotubes de carbone, on propose une formulation analytique, a fin de déduire les expressions mathématiques pour analyser l'effet de la porosité.

IV.2 les différentes théories des poutres

La construction d'une théorie de poutre nécessite introduction de certaines hypothèses, qui représentent des simplifications acceptables de la réalité. Plusieurs théories dans la littérature jouent sur la prise en compte ou non du cisaillement. On cite, dans ce suit, les trois les plus répandues. [Zemri 2015]

IV.2.1 Théories Euler-Bernoulli (théorie classique des poutres)

La théorie classique des poutres (classiques beams théorie - CBT) se base sur les hypothèses d'Euler- Bernoulli, selon lesquelles une section plane et normale au plan moyen de la poutre reste normale et perpendiculaire après déformation (figure IV.1)

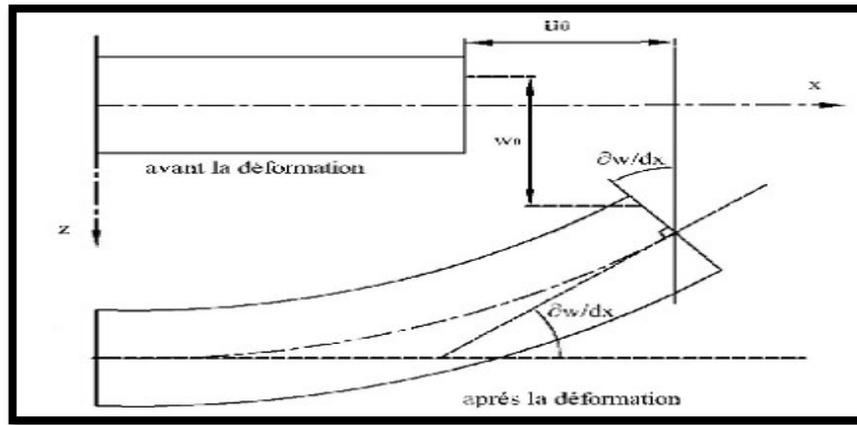


Figure IV.1 : Cinématique d'Euler Bernoulli. [Dufort 2000]

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

$$\phi(z) = \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (4.1)$$

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

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

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

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

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{\partial w_0}{\partial x} + \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (4.3)$$

Qui en résulte une contrainte nulle de cisaillement

$$\tau_{xz} = G\gamma_{xz} = 0 \quad (4.4)$$

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

IV.2.2 Théorie de Timoshenko

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

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

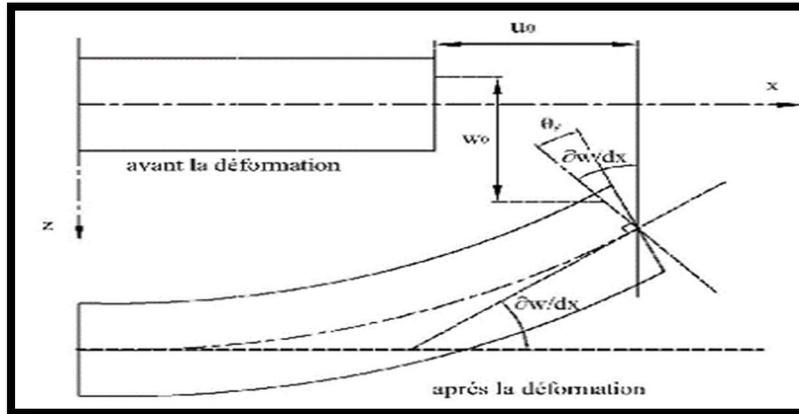


Figure IV.2 : Cinématique de Timoshenko. [Timoshenko et al 1972]

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

$$u(x, z) = u_0(x) - z \frac{\partial w_0(x)}{\partial x} + z \Phi_x \quad (4.5)$$

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

Le déplacement dû au cisaillement $z\Phi_x$, où Φ_x est la rotation due au cisaillement.

Si on veut calculer la contrainte de cisaillement

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{\partial w_0}{\partial x} + \frac{\partial w_0}{\partial x} + \Phi_x = \Phi_x \quad (4.6)$$

$$\tau_{xz} = G\gamma_{xz} \neq 0 \quad (4.7)$$

Donc, cette théorie a corrigé le défaut de la théorie classique qui ne tient pas compte du cisaillement transverse, mais au même temps ces contraintes sont constantes à travers l'épaisseur, ce qui ne représente pas la réalité. Pour cela, les chercheurs ont trouvé des coefficients correcteurs pour régler ce problème.

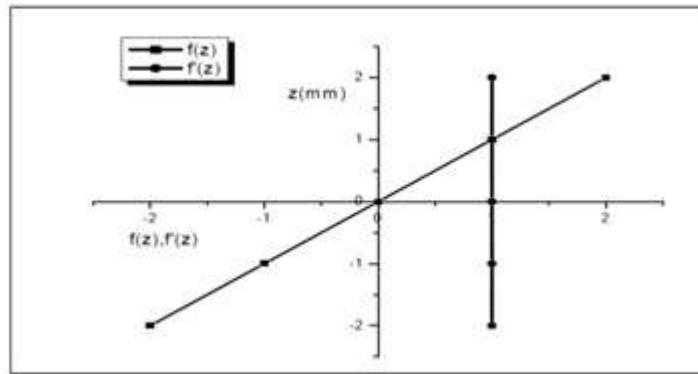


Figure IV.3 : Variation de la fonction de gauchissement $f(z) = z$ et $f'(z)$ en fonction de l'épaisseur.

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

IV .2. 3 La théorie d'ordre élevé (HSDT)

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

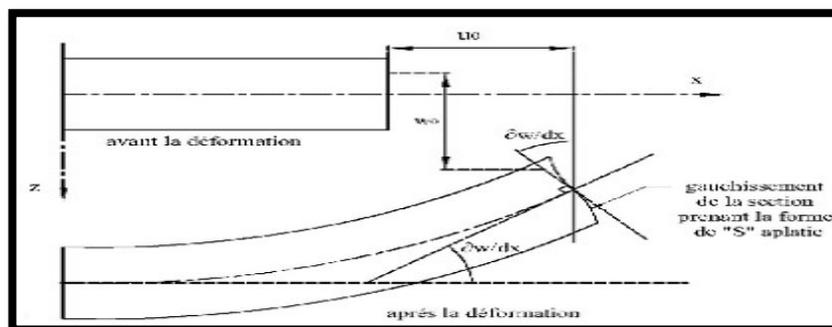


Figure IV.4 : Cinématique de la Théorie d'Ordre Elevé. [Rakrak 2018]

Dans ce cas, le champ de déplacement devient :

$$u(x, z) = u_0(x) - z \frac{\partial w_0(x)}{\partial x} + f(z)\varphi_0(x) \tag{4.8}$$

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

$$\gamma_{xz}(x) = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial w_0(x)}{\partial x} + f(z)\varphi_0(x) + \frac{\partial w_0(x)}{\partial x} \tag{4.9}$$

$$\gamma_{xz}(x) = f(z)\varphi_0(x) \tag{4.10}$$

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

$$f(z) = f\left(+\frac{h}{2}, -\frac{h}{2}\right) = 0 \quad (4.11)$$

C'est la condition qui nous permet d'avoir une répartition parabolique des contraintes de cisaillement sur l'épaisseur matériau d'une part et de choisir correctement des fonctions cubiques qui répondent à la condition (4.10). Selon l'expression de la fonction de gauchissement, $f(z)$ quelques modèles sont présentés dans la littérature des nanomatériaux :

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

$$f(z)=0 \quad (4.12)$$

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

$$f(z)=z \quad (4.13)$$

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

$$f(z)=\frac{5z}{z} \left(1 - \frac{4z^2}{3h^2}\right) \quad (4.14)$$

Le modèle exponentiel proposé par [Afaq 2003]

$$f(z)=ze^{-2\left(\frac{z}{h}\right)^2} \quad (4.15)$$

Le modèle d'Aydogdu [Aydogdu 2005]

$$f(z)=z\alpha \frac{-2\left(\frac{z}{h}\right)^2}{\ln\alpha} \quad (4.16)$$

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

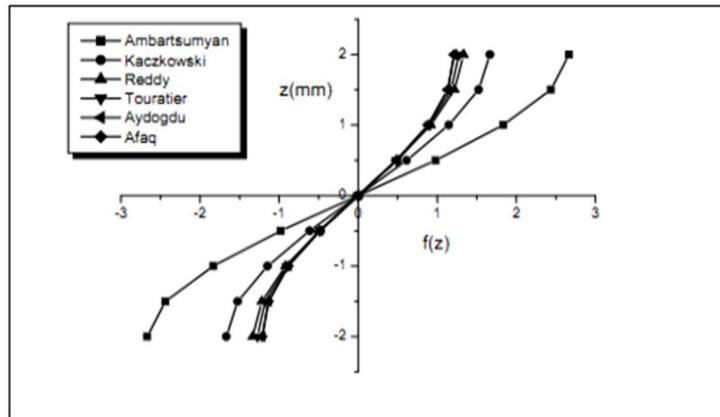


Figure IV.5 : Variation de la fonction de gauchissement $f(z)$ des différents modèles en fonction de l'épaisseur.

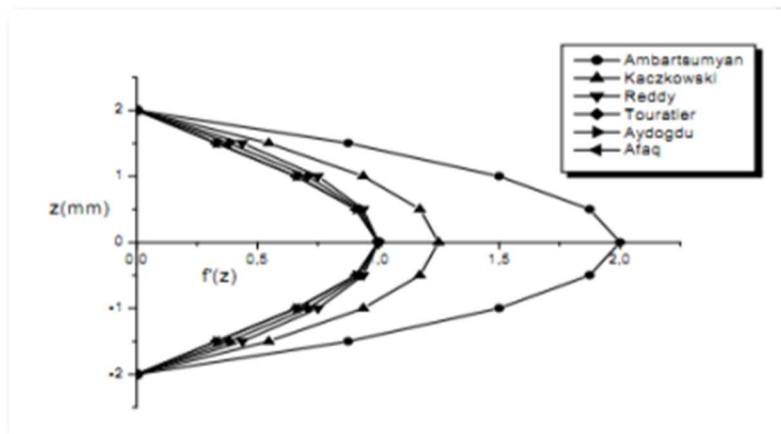


Figure IV.6 : Variation de la fonction de gauchissement $f'(z)$ des différents modèles en fonction de l'épaisseur.

La (figure IV.6) ci-dessus, illustre la variation de la fonction de gauchissement $f(z)$ des différents modèles en fonction de l'épaisseur de la poutre. Cette fonction est symétrique par rapport au plan moyen de la poutre. On remarque que les deux approches d'Ambartsumian et de Kaczkowski sont un peu loin des autres fonctions de forme ; elles ont servies comme éléments de base pour développer les autres fonctions qui sont plus proches de l'analyse 3D. Dans la (figure IV.6), on remarque aussi la divergence des deux approches d'Ambartsumian et de Kaczkowski par rapport aux autres approches.

IV.3 Géométrie et propriétés de la poutre nanocomposite avec porosité

Considérons une poutre poreuse de largeur (l), et épaisseur (h), mentionné par rapport aux coordonnées cartésiennes rectangulaires (x, z) (Figure IV.7). Dans cette étude, les faces supérieure et inférieure de la poutre sont à $z = (\pm h / 2, a)$.

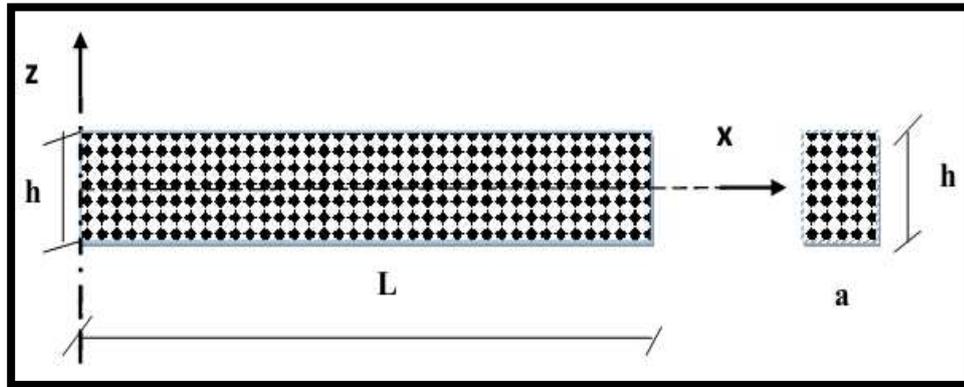


Figure IV.7 : Géométrie de la poutre.

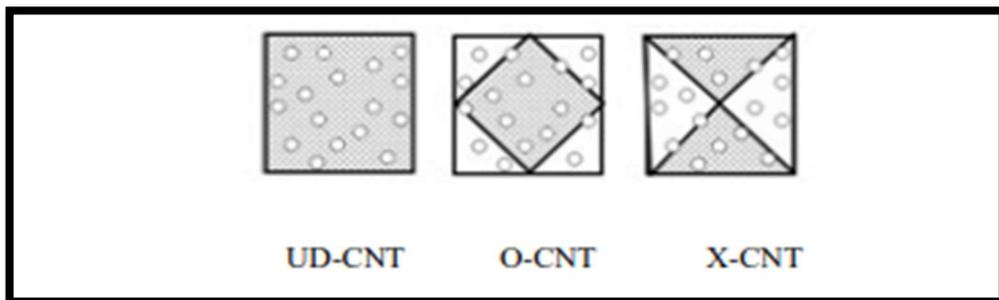


Figure IV.8 : géométrie de la poutre poreuse renforcée par des nanotubes de carbone.

La poutre poreuse proposée est renforcée par trois types différents de distribution. La poutre UD-CNT représente la distribution uniforme et les poutres O-CNT, X-CNT, sont les distributions fonctionnellement graduées des CNT (figure IV.8). Dans la surface, la densité des NTC est constante et la fraction volumique varie en fonction de l'épaisseur de la poutre. Selon la règle de mélange des NTC en introduisant les paramètres d'efficacité des NTC (η_1, η_2, η_3), le module de Young effectif et le module de cisaillement de la poutre peuvent être exprimés comme suit [Bhakti 2013]

$$E_{11} = \eta_1 V_{cnt} E_{11}^{cnt} + V_p E_p \tag{4.17a}$$

$$\frac{\eta_2}{E_{22}} = \frac{V_{cnt}}{E_{22}^{cnt}} + \frac{V_p}{E_p} \tag{4.17b}$$

$$\frac{\eta_3}{G_{12}} = \frac{V_{cnt}}{G_{12}^{cnt}} + \frac{V_p}{G_p} \tag{4.17c}$$

$E_{11}^{cnt}, E_{22}^{cnt}, G_{12}^{cnt}$ Sont respectivement les modules de Young et le module de cisaillement des nanotubes de carbone et E^P ; G^P correspond aux propriétés matérielles de la matrice polymérique.

V_{cnt}, V_p : sont les fractions volumiques des nanotubes de carbone et de la matrice et qui Sont donnés par la relation suivante :

$$V_{cnt} + v_p = 1 \quad (4.18)$$

Le module de Young de la matrice polymère, qui peut être fonction du changement de porosité, est défini par :

$$E^P = E_0^P (1 - p/p_c) \quad (4.19)$$

Où E_p est le module de Young effectif de la matrice poreuse avec la porosité P, E_0^P est le module de Young de matrice sans porosité, Où P_c est la porosité critique (seuil de percolation) à laquelle le module de Young effectif devient égal à zéro. Autres propriétés en termes de masse volumique (ρ) et coefficient de Poisson (ν), ceux-ci peuvent être définis comme :

$$\nu = V_{cnt} \nu^{cnt} + V_p \nu^p \quad (4.20a)$$

$$\rho = V_{cnt} \rho^{cnt} + V_p \rho^p \quad (4.20b)$$

Où V_{cnt} et V_p sont les fractions volumiques du CNT et de la matrice poreuse, respectivement. La masse volumique est peut également être fonction du changement de porosité

$$\rho^p = \rho_0^p (1 - p/p_c) \quad (4.21)$$

Pour les différentes formes de la distribution des nanotubes de carbone à l'intérieur des sections transversales de la matrice polymère comme il est représenté dans la (Figure IV.8), les fonctions mathématiques employées pour montrer les distributions de constituants matériels sont exprimés ci-dessous :

$$\text{UD-CNT: } V_{cnt} = V_{cnt}^* \quad (4.22a)$$

$$\text{O-CNT: } V_{cnt} = 2 \left(1 - 2 \frac{|z|}{h} \right) V_{cnt}^* \quad (4.22b)$$

$$\text{X-CNT: } V_{cnt} = 4 \frac{|z|}{h} V_{cnt}^* \quad (4.22c)$$

Où V_{cnt}^* est la fraction en volume de CNTs, qui peut être obtenue à partir de l'équation :

$$V_{cnt}^* = \frac{W_{cnt}}{W_{cnt} + (\rho^{cnt}/\rho^m)(1 - W_{cnt})} \quad (4.23)$$

Où W_{cnt} est la fraction massique des NTC dans la poutre nanocomposite. Dans cette étude, les paramètres d'efficacité des NTC (η) liés à la fraction volumique (V_{cnt}^*) sont donnés par [Tagrara 2015]

$$\eta_1 = 1.2833; \eta_2 = \eta_3 = 1.0566 \rightarrow V_{cnt}^* = 0.12 \quad (4.24a)$$

$$\eta_1 = 1.3414; \eta_2 = \eta_3 = 1.7101 \rightarrow V_{cnt}^* = 0.17 \quad (4.24b)$$

$$\eta_1 = 1.3238; \eta_2 = \eta_3 = 1.7380 \rightarrow V_{cnt}^* = 0.28 \quad (4.24c)$$

IV.4 Cinématique et équations constitutives

Le champ de déplacement de cette présente théorie est exprimé en se basant sur la théorie des poutres de [Larbi et al 2013] :

$$u(x, z, t) = u_0(x, t) - z \frac{\partial w_b}{\partial x} - f(z) \frac{\partial w_s}{\partial x} \quad (4.25a)$$

$$w(x, z, t) = w_b(x, t) + w_s(x, t) \quad (4.25b)$$

Où u_0 : les déplacements axial, w_b et w_s sont respectivement les composantes de la flexion et du cisaillement du déplacement transversal le long du plan médian de la poutre. Dans ce travail, la fonction de forme $f(z)$ est une fonction trigonométrique [Bouderba et al 2013]

$$f(z) = z - \frac{h}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{z} z\right) \quad (4.26)$$

Le champ de déformation associé au champ de déplacement est :

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x^0 + z k_x^b + f(z) k_x^s \quad (4.27a)$$

$$\gamma_{xz} = g(x) \gamma_{xz}^s \quad (4.27b)$$

Où: $\varepsilon_x^0 = \frac{\partial u_0}{\partial x}$, $k_x^b = -\frac{\partial^2 w_b}{\partial x^2}$, $k_x^s = -\frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2}$, $\gamma_{xz}^s = \frac{\partial w_s}{\partial x}$ (4.27c)

$$g(z) = 1 - f'(z) \quad , \quad f'(z) = \frac{df(z)}{dz} \quad (4.27d)$$

En supposant que le comportement de la poutre CNTRC est linéaire élastique, les relations constitutives s'écrivent comme suit :

$$\sigma_x = Q_{11}(z) \varepsilon_x \quad \text{et} \quad \gamma_{xz} = Q_{55}(z) \gamma_{xz} \quad (4.28a)$$

Avec : $Q_{11}(z) = \frac{E_{11}(z)}{1-\nu^2}$ et $Q_{55}(z) = G_{12}(z)$ (4.28b)

IV.4.4 Les équations du mouvement

Les équations du mouvement sont obtenues en utilisant le principe d'Hamilton qui est donné par :

$$\delta U + \delta V = 0 \quad (4.29)$$

Avec :

δU : la variation virtuelle de l'énergie de déformation

δV : la variation virtuelle de l'énergie de potentielle

La variation virtuelle de l'énergie de déformation de la poutre s'écrit :

$$\begin{aligned} \delta U &= \int_0^l \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_x \delta \varepsilon_x + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz}) dz dx \\ &= \int_0^l \left(N \frac{d\delta u_0}{dx} - M_b \frac{d^2 \delta w_b}{dx^2} - M_s \frac{d^2 \delta w_s}{dx^2} + Q \frac{d\delta w_s}{dx} \right) dx \end{aligned} \quad (4.30)$$

Où : N, M_b, M_s et Q sont les efforts résultants définis comme suit :

$$(N, M_b, M_s) = \int_{-h/2}^{h/2} (1, z, f) \sigma_x dz \text{ et } Q = \int_{-h/2}^{h/2} g(z) \tau_{xz} dz \quad (4.31)$$

La variation virtuelle de l'énergie potentielle de la force de compression axiale N_{x0} et la densité de la réaction de la force de fondation f_e peuvent être écrit comme suit [Akavci 2014]

$$\delta V = - \int_0^l \left[N_{x0} \frac{d(w_b + w_s)}{dx} \frac{d(\delta w_b + \delta w_s)}{dx} \right] dx \quad (4.32)$$

En substituant les expressions de δU , δV et des équations (4.30), (4.32) et en les remplaçant dans l'équation (4.29) et après intégration par partie par rapport aux deux variables la surface et le temps, on obtient les équations du mouvement de la poutre CNTRC en fonction des efforts suivantes :

$$\delta u_0: \frac{dN}{dx} = 0 \quad (4.33a)$$

$$\delta w_b: \frac{d^2 M_b}{dx^2} + N_{x0} \frac{d^2 (w_b + w_s)}{dx^2} = 0 \quad (4.33b)$$

$$\delta w_s: \frac{d^2 M_s}{dx^2} + \frac{dQ}{dx} + N_{x0} \frac{d^2 (w_b + w_s)}{dx^2} = 0 \quad (4.33c)$$

En substituant l'équation (4.27) dans l'équation (4.28) et en remplaçant les résultats suivants dans l'équation (4.31), les équations du mouvement en fonction des déplacements s'écrivent :

$$N = A_{11} \frac{du_0}{dx} - B_{11} \frac{d^2 w_b}{dx^2} - B_{11}^s \frac{d^2 w_s}{dx^2} \quad (4.34a)$$

$$M_b = B_{11} \frac{du_0}{dx} - D_{11} \frac{d^2 w_b}{dx^2} - D_{11}^s \frac{d^2 w_s}{dx^2} \quad (4.34b)$$

$$M_s = B_{11}^s \frac{du_0}{dx} - D_{11}^s \frac{d^2 w_b}{dx^2} - H_{11}^s \frac{d^2 w_s}{dx^2} \quad (4.34c)$$

$$Q = A_{55}^s \frac{dw_s}{dx} \quad (4.34d)$$

Où A_{11} , B_{11} , etc., sont les coefficients de la rigidité de la poutre, définis comme suit :

$$(A_{11}, B_{11}, D_{11}, B_{11}^s, D_{11}^s, H_{11}^s) = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{11}(1, z, z^2, f(z), z, f^2(z)) dz \quad (4.35a)$$

Et
$$A_{55}^s = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{55}[g(z)]^2 dz \quad (4.35b)$$

Les équations (4.32) peuvent être exprimées en termes de déplacement (u_0, w_b, w_s) en utilisant les deux équations (4.32) et (4.33), comme suit :

$$A_{11} \frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} - B_{11} \frac{\partial^3 w_b}{\partial x^3} - B_{11}^s \frac{\partial^3 w_s}{\partial x^3} = 0 \quad (4.36a)$$

$$B_{11} \frac{\partial^3 u_0}{\partial x^3} - D_{11} \frac{\partial^4 w_b}{\partial x^4} - D_{11}^s \frac{\partial^4 w_s}{\partial x^4} + N_{x0} \frac{d^2(w_b + w_s)}{dx^2} = 0 \quad (4.36b)$$

$$B_{11}^s \frac{\partial^3 u_0}{\partial x^3} - D_{11} \frac{\partial^4 w_b}{\partial x^4} - H_{11}^s \frac{\partial^4 w_s}{\partial x^4} + A_{55}^s \frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2} + N_{x0} \frac{d^2(w_b + w_s)}{dx^2} = 0 \quad (4.36c)$$

IV.5 Les solutions analytiques pour la poutre CNTRC

La méthode de Navier est utilisée pour obtenir les solutions analytiques pour une poutre CNTRC simplement appuyée. La solution est supposée être sous la forme suivante :

$$\begin{Bmatrix} u_0 \\ w_b \\ w_s \end{Bmatrix} = \sum_{m=1}^{\infty} \begin{Bmatrix} U_m \cos(\lambda x) e^{i\omega t} \\ W_{bm} \sin(\lambda x) e^{i\omega t} \\ W_{sm} \sin(\lambda x) e^{i\omega t} \end{Bmatrix} \quad (4.37)$$

Où : U_m, W_{bm} et W_{sm} sont des paramètres arbitraires à déterminer, ω est la fréquence propre associée à m nième mode propre et $\lambda = m\pi / L$.

En substituant les expressions de u_0, w_b, w_s des équations (4.37) dans les équations du mouvement (4.36), les solutions analytiques peuvent être obtenues à partir des équations suivantes :

$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} U_m \\ W_{bm} \\ W_{sm} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4.38)$$

Avec :

$$S_{11} = A_{11}\lambda^2, S_{12} = -B_{11}\lambda^3, S_{13} = -B_{11}^s x^3, S_{22} = D_{11}\lambda^4 + N_{x0}\lambda^2 \quad (4.39)$$

$$S_{23} = D_{11}^s x^4 + N_{x0}x^2, S_{33} = H_{11}^s x^4 + A_{55}^s x^2 + N_{x0}x^2$$

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur les différentes théories des poutres à savoir la théorie classique des poutres (Euler-Bernoulli), la théorie de déformation en cisaillement du premier ordre (Timoshenko) et la théorie de déformation de cisaillement d'ordre élevé et par la suite une étude des solutions analytiques du comportement statique, flambement et de vibration des poutres nanocomposites renforcées par des nanotubes de carbone.

Les équations du mouvement sont obtenues par le principe de Hamilton. Les solutions sont obtenues en utilisant la solution de Navier. Dans le chapitre suivant on va présenter les résultats, où on va calculer la charge critique de flambement.

CHAPITRE V

Résultats et discussions

V.1 Introduction

Dans ce chapitre, les résultats numériques du comportement au flambement des poutres CNTRC sont présentés et discutés.

Les caractéristiques matérielles effectives des poutres CNTRC à la température ambiante employée tout au long de ce travail sont données comme suit : Poly méthacrylate de méthyle (PMMA) est utilisé comme matrice et ses propriétés matérielles sont les suivantes :

$\nu^p = 0.3, \rho^p = 1190 \text{ Kg/m}^3, E^p = 2.5 \text{ GPa}$. Pour le matériau utilisé pour renforcer le matrice polymère, les nanotubes de carbone type arm chair (10,10) est choisi avec les propriétés suivantes : [Yas and Samadi 2012] : $\nu^{cnt} = 0.19, \rho^{cnt} = 1400 \text{ kg/m}^3, E_{11}^{cnt} = 600 \text{ GPa}, E_{22}^{cnt} = 10 \text{ GPa}$ et $G_{12}^{cnt} = 17.2 \text{ GPa}$.

La formule adimensionnelle suivante est utilisée :

$$\bar{N} = \frac{N_{cr}}{A_{110}} \quad (5.1)$$

Avec : A_{110} : est la rigidité de l'extension ou la valeur de la poutre homogène constituée uniquement du polymère d'une matrice de matériau pure.

Dans cette section, les résultats numériques de la charge critique des poutres CNTRC sont discutés. On constate que les résultats trouvés à partir de la présente théorie raffinée trigonométrique sont en bon accord avec ceux trouvés en utilisant la théorie des poutres de la déformation en cisaillement du d'ordre élevé et étudiés respectivement par [Wattanasakulpong et Ungbhakorn 2013] et [Yas and Samadi 2012], comme c'est montré dans le tableau (5.1), la poutre X-CNT est la plus rigide et qui prend la plus grande charge du flambement, suivie par la poutre UD-CNT et la poutre O-CNT.

Tableaux V.1: comparaison des résultats de la charges critique de flambement adimensionnels pour une poutre renforcée par des nanotubes de carbone ($L/h=15, V_{cnt}^*=0.12$)

Sources	UD-CNT	O-CNT	X-CNT
Wattanasakulpong et Ungbhakorn 2013	0.0985	0.0575	0.1291
Yas and Samadi 2012	0.0986	0.0588	0.1288
Présent	0.0985	0.0575	0.1291

D'après ce tableau, on remarque qu'il y a un bon accord entre les résultats de la présente théorie et les résultats trouvés par [Wattanasakulpong et Ungbhakorn 2013] et [yas and samadi 2012] cela pour les différents types de renforcement et de la fraction volumique ($V_{cnt}^*=0.12$).

Tableaux V.2 : Comparaison des charge critiques de flambement adimensionnelle des poutres CNTRC ($L/h=15$)

V_{cnt}^*	Source	UD-CNT	O-CNT	X-CNT
0.12	yas and samadi 2012	0.0986	0.0588	0.1288
	Présent	0.0985	0.0575	0.1291
0.17	yas and samadi 2012	0.1506	0.0877	0.1999
	Présent	0.1503	0.0863	0.1981
0.28	yas and samadi 2012	0.2209	0.1337	0.2897
	Présent	0.2198	0.1324	0.2762

D'après ce tableau, on remarque qu'il y a un bon accord entre les résultats de la présente théorie et les résultats trouvés par [yas and samadi 2012] cela pour les différents types de renforcement et de la fraction volumique ($V_{cnt}^* = 0.12, V_{cnt}^* = 0.17, V_{cnt}^* = 0.28$).

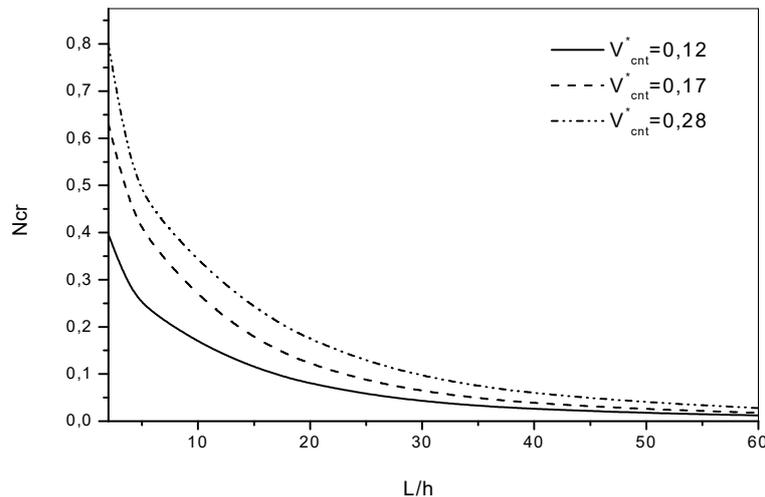


Figure V.1 : Les charges critiques de flambement de la poutre X-CNT avec différents rapports d'épaisseur (L/h)

Le renforcement X-CNT est montré dans (figure V.1). L'augmentation des fractions volumiques de NTC conduit à une augmentation de la charge critique de flambement. On constate que le renforcement de la poutre par les nanotubes de carbones lui rendre plus rigide.

Avec l'augmentation du rapport géométrique, la charge critique de flambement adimensionnelle diminue. Cette diminution est due à la longueur de la poutre.

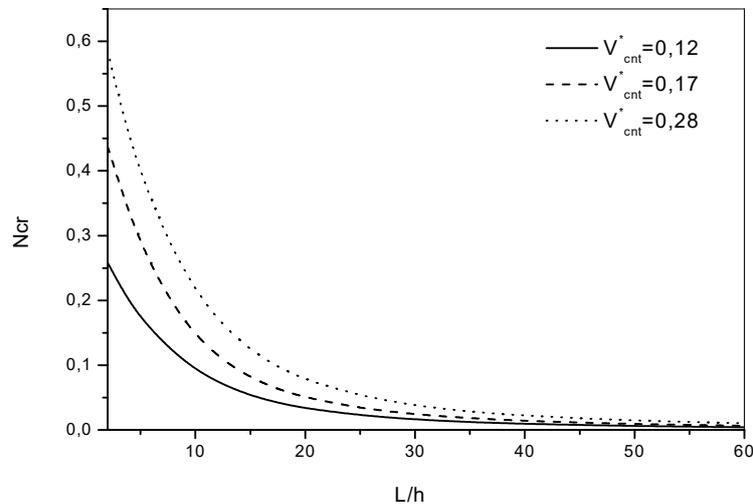


Figure V.2 : La charge critique de flambement de la poutre O-CNT On fonction de rapport L/h pour trois types de fraction volumique

La (figure V.2) représente l'effet des fractions volumiques des nanotubes de carbone sur la charge critique de flambement adimensionnelle en utilisant la théorie d'ordre élevé. La diminution des fractions volumiques des CNT conduit à la réduction des charges de flambement.

Pour donner une idée de l'effet de la porosité sur les charges critiques de flambement adimensionnelle des poutres renforcées, une distribution différente des NTC est considérée. En comparant les résultats, on peut constater que les charges critiques de flambement dimensionnelles diminuent avec l'augmentation de la porosité. La diminution des charges critiques est attribuée à l'effet de la porosité sur la rigidité de la poutre poreuse. D'autre part, la poutre renforcée X-CNT a des charges critiques de flambement plus élevées que celles des autres types de renforcement pour chaque cas de poutre poreuse.

Tableaux V.3 : Valeurs de la charge critique de longueur poutre poreuse pour les différents types de distribution, porosité et pourcentage de porosité P, ($L/h=10, V_{cnt}^*=0.12$)

	P=0%	P=0.5%	P=1%	P=2%
UD-CNT	0.1645	0.1542	0.1424	0.1128
O-CNT	0.1052	0.1001	0.0940	0.0780
X-CNT	0.2007	0.1860	0.1696	0.1300

D'après ce tableau on remarque que la poutre en type X-CNT donne la plus grande valeur de la charge critique. Pour les différents pourcentages de porosité tandis que la poutre en O-CNT donne la plus faible valeur.

L'augmentation de la porosité P conduit à une diminution de la valeur de la charge critique ce dernier diminue pour tous les types de renforcement.

Tableaux V.4 : Valeurs du chargé critique de la poutre de type (X-CNT) pour les différents Types de porosité, fraction volumique et valeurs du rapport L/h.

V_{cnt}^*	L/h	P=0%	P=0,5%	P=1%	P=2%
0,12	10	0.2007	0.1860	0.1696	0.1300
	15	0.1291	0.1227	0.1151	0.0948
	20	0.0863	0.0833	0.0797	0.0692
0,17	10	0.3160	0.2941	0.2695	0.2090
	15	0.1981	0.1891	0.1783	0.1490
	20	0.1304	0.1264	0.1214	0.1069
0,28	10	0.4105	0.3783	0.3427	0.2590
	15	0.2762	0.2609	0.2429	0.1962
	20	0.1900	0.1826	0.1735	0.1480

Selon les résultats, il est clair que les charges critiques de flambement augmentent avec l'augmentation de la fraction volumique de nanotubes de carbone pour tous les types de poutre poreuse. On conclut que l'augmentation de la fraction volumique de nanotubes de carbone V_{cnt}^* rendu la poutre plus rigide.

Pour donner une idée de l'effet de la porosité sur les charges critiques de flambement adimensionnelle des poutres renforcées. En comparant les résultats, on peut constater que les charges critiques de flambement dimensionnelles diminuent avec l'augmentation de la porosité.

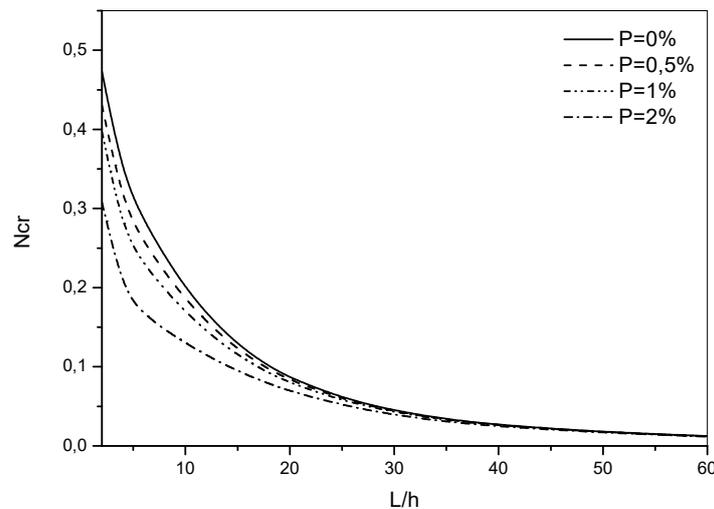


Figure V.3 : Effet du rapport de forme (L/h) et de la porosité sur les charges critiques de flambement adimensionnelles de la poutre X-CNT ($V_{cnt}^*=0.12$)

La (figure V.3) ci-dessous illustre les charges critiques de flambement d'une poutre poreuse renforcée (X-CNT) sous charge de compression pour différentes valeurs du rapport de forme (L/h) afin d'analyser l'effet de la porosité. On observe que, lorsque le rapport de forme augmente, les charges critiques de flambement diminuent. Diminution des charges critiques est attribuée à la variation de longueur de la poutre.

De plus, la poutre renforcée sans porosité présente une résistance au flambement élevée par rapport à la poutre poreuse car celle-ci est affectée par l'augmentation de la porosité c-à-dire diminution de la rigidité.

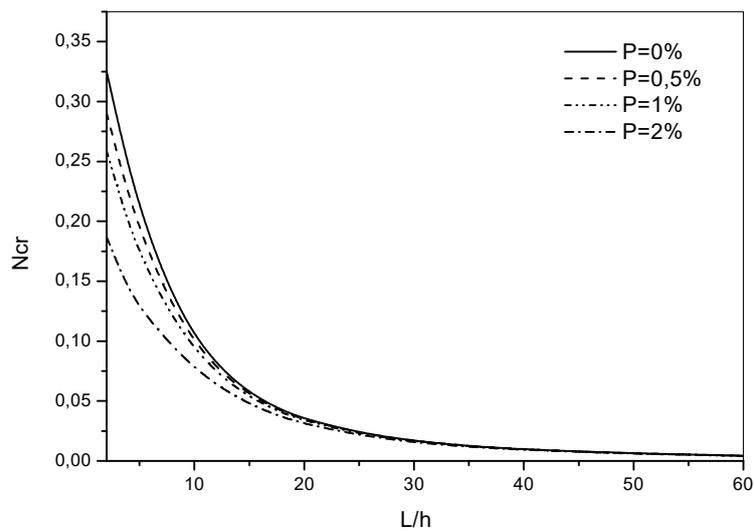


Figure V.4 : Effet du rapport de forme et la porosité sur les charges critiques de flambement adimensionnels de la poutre **O-CNT** ($V_{cnt}^*=0.12$)

La (figures V.4) illustre l'effet du rapport de forme (L/h) sur les charges critiques de flambement de la poutre poreuse renforcée (O-CNT) de NTCR. On prend La fraction volumique de nanotubes. On observe sur la (figure V.4) que l'augmentation ou la diminution des charges critiques de flambement renforcées est affectée par la variation de longueur de la poutre.

De plus, les charges critiques de flambement sont réduites en augmentant la porosité qui influe sur la rigidité.

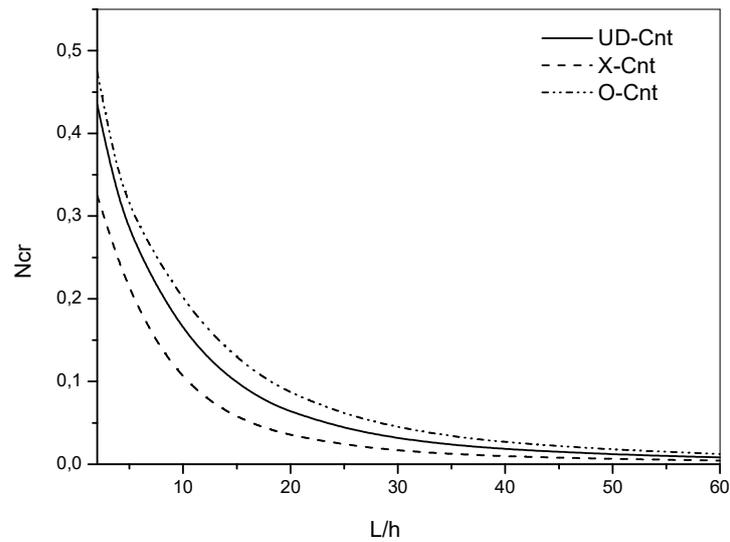


Figure V.5 : Effet du rapport forme et le type de renforcement sur les charges critiques de flambement des poutres ($V_{cnt}^*=0.12$, $p=0\%$)

La figure (V.5) montre l'influence du rapport géométrique L/h et la distribution des NTCs à l'intérieur de la poutre sur la charge critique de flambement. On observe que les charges critiques diminuent avec l'augmentation du rapport L/h .

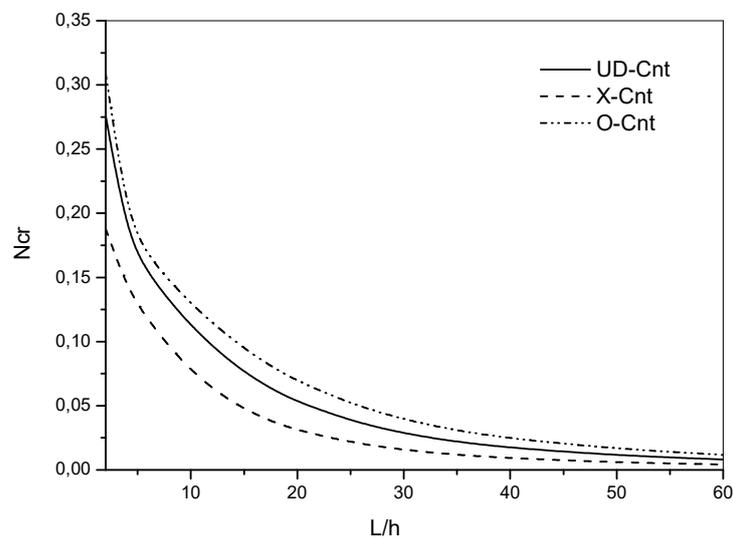


Figure V.6: Effet du rapport de forme (L/h) sur les charges critiques de flambement adimensionnels pour différents types de renforcement ($V_{cnt}^*=0.12$, $P=2\%$)

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

Les résultats obtenus représentés sur la (figure V.5) et (figure V.6), montre que l'existence de la porosité met en évidence la rigidité de la poutre poreuse renforcée NTC. Pour un facteur de forme ($L/h = 10$) et pour une fraction volumique du NTC ($V_{cnt}^* = 0.12$). Sur ces figures, on constate que les charges critiques de flambement des poutres poreuses renforcées diminuent dans tous les cas de types de renforcement (UD-CNT), (X-CNT) et (O-CNT).

V.2 Conclusions

Dans ce chapitre, Les résultats obtenus de l'analyse des charges critiques de flambement adimensionnels indiquent que la poutre renforcée X-CNT présente une résistance élevée au phénomène de flambement par rapport aux autres types de renforcement car la concentration des nanotubes est au niveau des faces supérieure et inférieure de la poutre.

En termes d'analyses de porosité, on constate que les charges critiques de flambement de la poutre poreuse renforcée diminuent en augmentant la porosité de la poutre en polymère.

Les conclusions suivantes ont été observées à partir des résultats obtenus pour différents paramètres :

- Les charges de flambement adimensionnel diminuent avec l'augmentation de la porosité,
- L'augmentation ou la diminution des charges critiques de flambement adimensionnels renforcés est affectée par la variation de la longueur de la poutre (L/h).
- Il est conclu que l'augmentation de la fraction volumique de nanotubes de carbone V_{cnt}^* peut rendre la poutre plus rigide, ce qui nécessite une plus grande charge de flambement critique.

Conclusion générale

Conclusion générale

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

Nous avons, dans le cadre de ce travail, l'étude de la charge critique de flambement et les différents paramètres pouvant influencer sur le comportement des poutres renforcées. Cette étude est basée sur la théorie d'ordre élevée, il est utilisé pour l'analyse de flambement des poutres nanocomposites. Les poutres sont renforcées par des nanotubes de carbone selon trois formes différentes. (UD-CNT, O-CNT, X-CNT).

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

Au regard des résultats trouvés par la formulation proposée, on peut dire que la distribution des nanotubes de carbone dans la matrice polymère influe sur les charges critiques de flambement, on a trouvé que la distribution des renforts type X-CNT rend les poutres plus rigides.

Ensuite, pour les poutres contenant des fractions volumiques des nanotubes de carbone plus élevées on a trouvé que les charges critiques sont plus importantes ce qui rend ces poutres plus rigides.

D'après les résultats, on a remarqué que la distribution O-CNT donne la charge critique de flambement la plus faible par rapport les autres renforcements.

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

En perspective, il est intéressant d'étudier des poutres avec d'autres types d'appuis tout en changeant le chargement et la fonction de cisaillement.

Références Bibliographique

Références Bibliographique

[A]

- [Afaq 2003] Afaq. K. S, Karama. M, Mistou. S, Un nouveau modèle raffiné pour les structures multicouches, *Comptes-rendus des*, 13, 289-292, (2003).
- [Ajayan 2007] Ajayan. P. M, Tour. J. M, Materials science - Nanotube composites, *Nature*, 447 (7148), 1066-1068, (2007).
- [Ajayan 2000] Ajayan. P. M, Schadler. L. S, Giannaris.c, Rubio. A, Single-walled carbone nanotube polymère composites : Strength and weakness, *Adv. Mater*, 12 (10), 750-753, (2000).
- [Althues et al 2007] Althues. H, Henle. J, Kaskel. S, Functional inorganic nanofillers for transparent polymers, *Chemical Society Reviews*, 36(9), 1454-1465, (2007).
- [Aurélié 2010] Aurélié. C, Thèse, Elaboration de détecteurs souples de température – mise en œuvre et caractérisation de multifilaments à base de polymères immiscibles chargés en nanotubes de carbone, L'Université des sciences et technologiques de Lille école doctorale des sciences pour l'ingénieur, (2010).
- [Akavci 2014] Akavci, S.S, An efficient shear déformation theory for free vibration of functionally graded thick rectangulaire plates on élastique fondation, *Compos Struct*, 108, 667–676 (2014).
- [Andrews 2002] Andrews. R, Jacques. D, Qian. D, Rantell. T, Multiwall carbon nanotubes : synthesis and application, *Accounts of chemical research*, 35(12), 1008-1017, (2002).
- [Aydogdu 2005] Aydogdu. M, Vibration analysis of cross-ply laminated beams with general boundary conditions by Ritz method, *International Journal of Mechanical Sciences*, 47(11), 1740-1755, (2005).

[B]

- [Bakhti 2013] Bakhti. K, Kaci. A, Bousahla. A.A, Houari. M.S.A, Tounsi. A, Adda Bedia. E.A, Large déformation analyses for fonctionnely graded carbone nanotube-renforce composite plates using an efficient and simple refined theory, *Steel and Composite Structures*, 14(4), 335-347, (2013).
- [Balima 2012] Balima. F, Thèse, Structure et porosité de systèmes lamellaires sous haute pression : cas du graphite et de la vermiculite, Université Claude Bernard-Lyon I, (2012).
- [Boccaccini et al 1996] Boccaccini. A. R, Ondracek. G, Mombello. E, Determination of stress concentration factors in porous materials, *Journal of matériels science lettres*, 15(6), 534, (1996).
- [Bouderba et al 2013] Bouderba. B, Houari, M.S.A, Tounsi, A, Thermo mechanical bending réponse of FGM thick plates resting on Winkler–Pasternak élastique fondations, *Steel and Composite Structures*, 14(1), 85 – 104, (2013).
- [Bellifa 2015] Bellifa. H, Thèse, Application de la théorie du gradient de déformation à l'étude de la réponse des structures multi échelles, université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbes, (2015).
- [Benyounes 2016] Benyounes. A, Thèse, Synthèse de nanotubes de carbone dopes à l'azote et leur application catalytique, université de Toulouse, (2016).
- [Bernard 2007] Bernard. C, Thèse, Propriétés mécaniques des nanotubes de carbone en tant que nano sondes et leur fonctionnalisation par bio-nanoparticules, l'Université Bordeaux I, (2007).
- [Béthune 1993] Béthune. D. S. C, Kiang. C. H, de Vries. M. S, Gorman. G, Savoy. R, Vazquez. J, Beyers.R, Cobalt-catalysed growth of carboné nanotubes with single-atomic-layer wall, *Nature*, 363, 605, (1993).
- [Boher 2012] Boher. C, Thèse, Etude expérimentale et modélisation de la diffusion gazeuse à travers des milieux poreux partiellement saturés en eau. Application aux verres Vycor, géo polymères et Pâte de ciment CEM V, Toulouse, INSA, (2012).
- [Boumia 2017] Boumia. L, Thèse, les Propriétés physiques et mécaniques des nanotubes en carbone, université Abou-bekr Belkaid-Tlemcen, (2017).

Références Bibliographique

[Boulerouah 2011] Boulerouah. A, Thèse, Propriétés thermiques et électriques de composites à base de nanotubes de carbone et application à la détection de gaz, Université du Littoral-Côte d'opale, (2011).

[Boussaboun 2016] Boussaboun. Z, Synthèse et caractérisation de nanocomposites d'argile et de graphène formés à partir de précurseurs organiques, Mémoire Présenté A L'école De Technologie Supérieure, Université Du Québec 2016 Bordeaux I, (2007).

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

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

[C]

[Cai 2008] Cai. D. Y, Song. M, Latex technology as a simple route to improve the thermal conductivity of a carbon nanotube/polymer composite, *Carbon*, 46 (15), 2107-2112, (2008).

[Chemi 2018] Chemi. A, Thèse, La charge critique de flambement d'un nanotube de carbone, l'université Djilali liabes Sidi Bel Abbes, (2018).

[Chiu 2005] Chiu. C. K, Chien. C. S, Lin. C. P, Hsiao. C. Y, Understanding hospital employee job stress and turnover intentions in a practical setting : The moderating role of locus of control, *Journal of management development*, (2005).

[Clément 2013] Clément. P, Thèse, Détermination des propriétés mécaniques de céramiques poreuses par essais de micro indentation instrumentée sphérique, INSA de Lyon, (2013).

[Coleman 2006] Coleman. J. N, Khan. U, Blau. W. J, Gun'ko. Y. K, Small but strong: a review of the mechanical properties of carbon nanotube-polymer composites, *Carbon*, 44(9), 1624-1652, (2006).

[D]

[Dai 1996 (1)] Dai. H, Rinzler. A. G, Nikolaev. P, Thess. A, Colbert. D. T, Smalley. R. E, Single-wall nanotubes produced by metal-catalyzed disproportionation of carbon monoxide, *Chemical physics letters*, 260(3-4), 471-475, (1996).

[Dai 1996 (2)] Dai. H, Hafner. J. H, Rinzler. A. G, Colbert. D. T, Smalley. R. E, Nanotubes as nano probes in scanning probe microscopy, *Nature*, 384(6605), 147-150, (1996).

[Dean 1983] Dean. E. A, Lopez. J. A, Empirical dependence of elastic moduli on porosity for ceramic materials, *Journal of the American Ceramic Society*, 66(5), 366-370, (1983).

[Dufort 2000] Dufort. L, Thèse, Etude de cisaillement transverse dans des poutres stratifiées et sandwich : Aspect théorique et expérimentaux, l'université Blaise Pascal Clermont I, (2000).

[E]

[Einstein 1906] Einstein. A, bestimmung der moleculare dimensionen, *Annale der Physik*, 324 (2), 289-306, (1906).

[Enouz 2003] Enouz. S, Etude de nanotubes de carbone dopés à l'azote par Microscopie Electronique en Transmission Haute Résolution et Spectroscopie de Pertes d'Energie, Stage de DEA Matière et Rayonnement, Université de Rennes1, (2003).

[Everett 1972] Everett. D. H, Définitions, terminology and symbols in colloid and surface chemistry, *Pure Appl. Chem*, 31(4), 577-638, (1972).

[F]

[Fields 1996] Fields. C. L, Pitts. R. J, Mischler. D, Bingham. C, Lewandowski. A, Schulz. D. L, Bekkedahl. T. A, Jones. K. M, Heben. M. J, Proc.Inc.Symp, on Solar Thermal Concentrating Technologies, 66-11, (1996).

[Félix 2012] Félix. B, Thèse, Structure et porosité de systèmes lamellaires sous haute pression : cas du graphite et de la vermiculite, Université Claude Bernard-Lyon I, (2012).

Références Bibliographique

[**Florent 2011**] Florent. S, Thèse, Réalisation d'interconnexions de faible résistivité à base de nanotubes de carbone bi paroi pour la microélectronique, Université Paul Sabatier, Toulouse III, (2011).

[**Frank 1998**] Frank. S, Poncharal. P, Wang. Z. L, Heer. W. A. D, Carbone nanotube quantum résistors, *science*, 280(5370), 1744-1746, (1998).

[**Franck 2007**] Frank. L, Thèse, Écoulements de particules dans un milieu poreux, Université Rennes 1, (2007).

[**Frevel 1963**] Frevel. L. K, Kressley. L. J, Modifications in Mercury Porosimetry, *Analytical Chemistry*, 35(10), 1492-1502, (1963).

[G]

[**Gallé 2001**] Gallé. C, Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry: A comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying, *Cement and concrete research*, 31(10), 1467-1477, (2001).

[**Gao 2005**] Gao. J, Itkis. M. E, Yu. A, Bekyarova. E, Zhao. B, Haddon. R. C, Continuous spinning of a single-walled carbon nanotube– nylon composite fiber, *Journal of the American Chemical Society*, 127(11), 3847-3854, (2005).

[**Gauthier 2017**] Gauthier. E, Guillaumat. L, Caractérisation probabiliste du défaut de porosité pour un composite stratifié, *In Journées Nationales sur les Composites*, (2017).

[**Gloaguen 2007**] Gloaguen. J.M, Lefebvre. J. M, Nanocomposites polymères/silicates en feuillets, Techniques de l'ingénieur, Plastiques et composites, *Paris*, 5205(6), 19p, (2007).

[**Goj 2004**] Gojny, F. H, Wichmann. M. H, G, Köpke. U, Fiedler. B, Schulte. K, Carbon nanotube-reinforced epoxy-composites : enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube content, *Composites Science and Technology*, 64(15), 2363-2371, (2004).

[**Gu 2008**] Gu. H, Swager. T. M, Fabrication of free-standing, conductive, and transparent carbon nanotube films, *Advanced Materials*, 20(23), 4433-4437, (2008).

[**Guo et al 1995**] Guo. T, Nikolaev. P, Thess. A, Colbert. D. T, Smalley. R. E, Catalytic growth of single-walled nanotubes by laser vaporization, *Chemical physics letters*, 243(1-2), 49-54, (1995).

[H]

[**Hassar 2013**] Hassar .M, Thèse, Influence des nano-charges de noir de carbone sur le comportement mécanique de matériaux composites : Application au blindage électromagnétique, Université de technologie de Compiègne, (2013).

[**Hasselman 1962**] Hasselman. D. P. H, On the porosity dependence of the elastic moduli of polycrystalline refractory materials, *J. Amer. Ceram. Soc*, 45, 452-453, (1962).

[**Hashin 1962**] Hashin. Z, The elastic module of heterogeneous materials, *Journal of Applied Mechanics*, 29(1), 143, (1962).

[**Haymet 1986**] Haymet. A. D, Footballene : a theoretical prediction for the stable, truncated icosahedral molecule C₆₀, *Journal of the American Chemical Society*, 108(2), 319-321, (1986).

[**Haynes 1973**] Haynes. J. M, Stereological analysis of pore structure, *Matériaux et Construction*, 6(3), 175-179, (1973).

[**Heath 1985**] Heath. J. R, O'brien. S. C, Zhang. Q, Liu. Y, Curl. R. F, Tittel. F. K, Smalley. R. E, Lanthanum complexes of spheroidal carbon shells, *Journal of the American Chemical Society*, 107(25), 7779-7780, (1985).

[**Houdyp 2006**] Houdyp. P, Brechignac. C, Lahmani .M, Les nanosciences, Nanomatériaux et nano chimie : La collection Échelles, *Éditions Belin*, 687, (2006).

[I]

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

Références Bibliographique

[Iijima 1993 (1)] Iijima. S, Ichihashi. T, Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter, *nature*, 363(6430), 603-605, (1993).

[Iijima 1993 (2)] Iijima. S, Ichihashi. T, Single-shell carbon nanotubes of 1 nm diameter, *Nature*, 363,603, (1993).

[InaGaki 2009] Inagaki. M, Pores in carbon materials-importance of their control, *New Carbon Materials*, 24(3), 193-232, (2009).

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

[J]

[Jiang 2004] Jiang. K, Schadler. L. S, Siegel. R. W, Zhang. X, Zhang. H, Terrones. M, Protein immobilization on carbon nanotubes via a two-step process of diimide-activated amidation, *Journal of Materials Chemistry*, 14(1), 37-39, (2004).

[Journet 1998] Journet. C, Bernier. P, Production of carbon nanotubes, *Applied physics A : Materials science & processing*, 67(1), (1998).

[K]

[Kim 2007] Kim. J. Y, Park. H. S, Kim. S. H, Multiwall-carbon-nanotube-reinforced poly (ethylene terephthalate) nanocomposites by melt compounding, *Journal of applied polymer science*, 103(3), 1450-1457, (2007).

[Koo 2006] Koo. J. H, Polymer nanocomposites : processing, characterization, and applications, Editeur : McGraw-Hill, (2006).

[Kováčik 1999] Kováčik. J, Correlation between Young's modulus and porosity in porous materials, *Journal of materials science letters*, 18(13), 1007-1010, (1999).

[Kováčik 2001] Kováčik. J, Correlation between shear modulus and porosity in porous materials, *Journal of materials science letters*, 20(21), 1953-1955, (2001).

[Kováčik 2006] Kováčik. J, Correlation between Poisson's ratio and porosity in porous materials, *Journal of materials science*, 41(4), 1247-1249, (2006).

[Kováčik 2008] Kováčik, J, Correlation between elastic modulus, shear modulus, poisson's ratio and porosity in porous materials, *Advanced Engineering Materials*, 10(3), 250-252, (2008).

[Krättschmer 1990] Krättschmer. W, Lamb. L. D, Fostiropoulos. K. H. D. R, Huffman. D. R, Solid C60 : a new form of carbon, *Nature*, 347(6291), 354-358, (1990).

[Kroto 1985] Kroto. H. W, Heath. J. R, O'Brien. S. C, Curl. R. F, Smalley, R. E, C60 : Buckminster fullerene, *nature*, 318(6042), 162-163, (1985).

[L]

[Lam 1994] Lam. D. C, Lange. F. F, Evans. A. G, Mechanical properties of partially dense alumina produced from powder compacts, *Journal of the American Ceramic Society*, 77(8), 2113-2117, (1994).

[Larbi et al 2013] Larbi. L. O, Kaci. A, Houari. M. S. A, Tounsi. A, An efficient shear deformation beam theory based on neutral surface position for bending and free vibration of functionally graded beams, *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 41(4), 421-433, (2013).

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

[Lau 2002] Lau. A. K. T, Hui. D, The revolutionary creation of new advanced materials carbon nanotube composites, *Composites Part B : Engineering*, 33(4), 263-277, (2002).

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

[Laurent 1998] Laurent. C, Flahaut. E, Peigney. A, Rousset. A, Metal nano particles for the catalytic synthesis of carbon nanotubes, *New Journal of Chemistry*, 22(11), 1229-1237, (1998).

Références Bibliographique

[Ledru et al 2009] Ledru. Y, Piquet. R, Michel. L, Schmidt. F, Bernhart. G, Quantification 2-D et 3-D de la porosité par analyse d'images dans les matériaux composites stratifiés aéronautiques, In *JNC*, 16, 11, (2009).

[Liao 2004] Liao. Y. H, Marietta-Tondin. O, Liang. Z, Zhang. C, Wang. B, Investigation of the dispersion process of SWNTs/ SC-15 epoxy resin nanocomposites, *Materials Science and Engineering : A*, 385(1-2), 175-181, (2004).

[Liu 2004] Liu. T, Phang. I. Y, Shen. L, Chow. S. Y, Zhang. W. D, Morphology and mechanical properties of multiwalled carbon nanotubes reinforced nylon-6 composites, *Macromolecules*, 37(19), 7214-7222, (2004).

[Lu 1996] Lu. K.L, Lago. R. M, Chen. Y. K, Green. M. L. H, Harris. P. J. F, Tsang. S. C, Mechanical damage of carbon nanotubes by ultrasound, *Carbon*, 34(6), 814-816, (1996).

[M]

[Maitra 1994] Maitra. A. K, Phani. K. K, Ultrasonic evaluation of elastic parameters of sintered powder compacts, *Journal of materials science*, 29(17), 4415-4419, (1994).

[Marcoux 2002] Marcoux. P. R, Thèse, 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).

[Mascaro et al 2006] Mascaro. B, Caractérisation ultrasonore de la porosité dans les composites, *PhD The-sis, UPS, Toulouse*, 170, (2006).

[Mazumder 2004] Mazumder. S, Sen. D, Patra. A. K, Characterization of porous materials by small-angle scattering, *Pramana*, 63(1), 165-173, (2004).

[Meille 2011] Meille. S, Communication, Euro Mat, Montpellier, (2011).

[Mishra 2000] Mishra. S. R, Rawat. H. S, Mehendale. S. C, Rustagi. K. C, Sood. A. K, Bandyopadhyay. R, Rao. C. N. R, Optical limiting in single-walled carbon nanotube suspensions, *Chemical Physics Letters*, 317(3-5), 510-514, (2000).

[N]

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

[O]

[Ogasawara 2006] Ogasawara. N, Chiba. N, Chen. X, Erratum : Representative strain of indentation analysis [J. Mater. Res. 20, 2225 (2005)] And Limit analysis-based approach to determine the material plastic properties with conical indentation [J. Mater. Res. 21, 947 (2006)], *Journal of Materials Research*, 21(10), 2699-2700, (2006).

[Oukhlef et al 2011] Oukhlef. A, Ambari. A, Champmartin. S, Despeyroux. A, Détermination de la distribution de tailles de pores d'un milieu poreux par la méthode des fluides à seuil, In *CFM 2011-20ème Congrès Français de Mécanique*, AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie, (2011).

[P]

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

[Pet 2003] Pet, *Compte Rendu de Physique*, 4, 967-974, (2003).

[Phani 1987] Phani. K. K, Niyogi. S. K, Young's modulus of porous brittle solids, *Journal of materials science*, 22(1), 257-263, (1987).

[Pop 2004] Popov. V. N, *Materials Science and Engineering R*, 43,61-102, (2004).

[R]

[Rak 2001] Rakov. E. G, *Russ. Chem. Rev*, 70, 827 - 863, (2001).

Références Bibliographique

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

[**Reddy 1984**] Reddy. J. N, A simple higher-order theory for laminated composite plates, *51*, 745-752, (1984).

[**Rohlfing 1984**] Rohlfing. E. A, Cox. D. M, Kaldor. A, Production and characterization of supersonic carbon cluster beams, *The Journal of chemical physics*, *81*(7), 3322-3330, (1984).

[S]

[**Saint-Auban 2010**] Saint-aubin. K, Thèse, Etude de dispersions de nanotubes de carbone par des polymères pour l'élaboration de composites conducteurs et structurés, l'Université Bordeaux I, (2010).

[**Saito 1992**] Saito. R, Fujita. M, Dresselhaus. G, Dresselhaus. M. S, Electronic structure of graphene tubules based on C 60, *Physical Review B*, *46*(3), 1804, (1992).

[**Sandler et al 2003**] Sandler. J, Kirk. J. E, Kinloch. I. A, Shaffer. M. S. P, Windle. A. H, Ultra-low electrical percolation threshold in carbon-nanotube-epoxy composites, *Polymer*, *44*(19), 5893-5899, (2003).

[**Schell et al 2006**] Schell. J. S. U, Renggli. M, van Lenthe. G. H, Müller. R, Ermanni. P, Micro-computed tomography determination of glass fibre reinforced polymer meso-structure, *Composites Science and Technology*, *66*(13), 2016-2022, (2006).

[**Senani 2004**] de Monredon-Senani. S, Thèse, Interaction Organosilanes /Silice de précipitation Du milieu hydro-alcoolique au milieu aqueux, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, *64*, 2087-2089, (2004).

[**Spriggs 1961**] Spriggs. R.M, Expression for effect of porosity on elastic modules of polycrystalline refractory materials, particularly aluminum oxide, *Journal of the american ceramic society*, *44*(12), 628, (1961).

[**Sun 1998**] Sun. X, Yu. R. Q, Xu. G. Q, Hor. T. S. A, Ji. W, Broadband optical limiting with multiwalled carbon nanotubes, *Applied Physics Letters*, *73*(25), 3632-3634, (1998).

[T]

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

[**Tagrara 2017**] Tagrara. S, H, Thèse, Analyse de la flexion statique, le flambement et la vibration des structures composites renforcées par des nanotubes de carbone, Université de Sidi Bel Abbès-Djillali Liabes, (2017).

[**Thess 1996**] Thess. A, Lee. R, Nikolaev. P, Dai. H, Petit. P, Robert. J, Smalley. R. E, Crystalline ropes of metallic carbon nanotubes, *science*, *273*(5274), 483-487, (1996).

[**Tho 2001**] Thostenson. E. T, Ren. Z, Chou. T-W, *Composites Science and Technology*, *61*(13), 1899-1912, (2001).

[**Tho 2005**] Thostenson. E. T, Li. C, Chou. T. W, Nanocomposites in context, *Composites science and technology*, *65*(3-4), 491-516, (2005).

[**Thomas 2011**] Thomas. P, Thèse, Dispersion de nanotubes de carbone dans les polymères : de la nano structuration aux composites hautes performances, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, (2011).

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

[**Timoshenko et al 1972**] Timoshenko. S.P, Gere. J.M, *Mechanics of Materials*, New York :D. Van Nostrand Company, (1972).

[U]

[Usuki 1993] Usuki. A, Kawasuni. M, Kojima. Y, Okada. A, Kuranchi. T, Kamigato. O, Swelling behaviour of montmorillonite cation-exchange for ω -amino acids by ϵ caprolactam, *J.Mater.Res*, 8, 1174-1178, (1993).

[V]

[Vivien 1999] Vivien. L, Anglaret. E, Riehl. D, Bacou. F, Journet. C, Goze. C, Hache. F, Single-wall carbon nanotubes for optical limiting, *Chemical Physics Letters*, 307(5-6), 317-319, (1999).

[Vivien 2000] Vivien. L, Riehl. D, Anglaret. E, Hache. F, Pump-probe experiments at 1064 nm in single wall carbon nanotube suspensions, *IEEE journal of quantum electronics*, 36(6), 680-686, (2000).

[W]

[Wang 2009] Wang. S, Liang. R, Wang. B, Zhang. C, Dispersion and thermal conductivity of carbon nanotube composites, *Carbon*, 47(1), 53-57, (2009).

[Wang 2012] Wang. D, Yang. G, Ma. Q, Wu. M, Tan. Y, Yoneyama. Y, Tsubaki. N, Confinement effect of carbon nanotubes : copper nano particles filled carbon nanotubes for hydrogenation of methyl acetate, *Acs Catalysis*, 2(9), 1958-1966, (2012).

[Wattanasakulpong et Ungbhakorn 2013] Wattanasakulpong. N, Ungbhakorn. V, Analytical solutions for bending, buckling and vibration responses of carbon nanotube reinforced composite beams resting on elastic foundations, *Compt. Mater. Sci*, 71, 201-208, (2013).

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

[X]

[Xiao 2007] Xiao. K. Q, Zhang. L. C, Zarudi. I, Mechanical and rheological properties of carbon nanotube-reinforced polyethylene composites, *Composites Science and Technology*, 67(2), 177-182, (2007).

[Xu 2001] Xu. J. M, Highly ordered carbon nanotube arrays and IR detection, *Infrared Physics & Technology*, 42(3-5), 485-491, (2001).

[Y]

[Yam 1995] Yambe. T, Synthetic Metals, 70, 1511-1518, (1995).

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

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

[Yokota 1978] Yokota. M.J, Process controlled curing of resin matrix composites, *Sample Journal*, 11-17, (1978).

[Z]

[Zemri 2015] Zemri. A, Thèse, Etude comparative entre la théorie locale et non locale d'élasticité : Application aux structures homogènes, l'Université de Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, (2015).

[Zeng 2005] Zeng. Q. H, Yu. A. B, GQ (Max) Lu, DR Paul, Clay-based polymer nanocomposites : research and commercial development, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 5, 1574-1592, (2005).

[Zhou 1994] Zhou. O, Fleming. R. M, Murphy. D. W, Chen. C. H, Haddon. R. C, Ramirez. A. P, Glarum. S. H, Defects in carbon nanostructures, *Science*, 263(5154), 1744-1747, (1994).

[Zidour 2012] Zidour. M, Thèse, Etude du comportement mécanique des nanotubes en carbone entourés par une matrice polymère, Université Djilali Liabes De Sidi Bel Abbes, (2012).