

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ibn Khaldoun Tiaret



Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie civil

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

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par :

BENNOUNA TORKIA

BETTAYEB IMEN

Sujet du mémoire

Analyse de la charge critique de
flambement d'une poutre nano-
composite sur fondation élastique.

Soutenu le 28/09/2020 devant le jury composé de :

Pr.	T.H.DAOUADJI	Président
Pr.	M.ZIDOUR	Encadreur
Dr.	T. BENSATTALAH	Examineur
Dr.	A. SAOULA	Examineur

Promotion 2019 /2020

REMERCIEMENTS

Toute notre parfait gratitude et remerciement a Allah le plus puissant qui nous a donné la force, le courage et la volonté pour atteindre notre objectif.

Nous tenons tout d'abord à remercier infiniment, notre promoteur Dr. ZIDOUR MOHAMED, encadreur de notre projet de fin de cycle, pour la confiance qu'il nous a accordé en nous proposant ce fameux sujet. De plus, son enthousiasme, encouragement et son entière disponibilité au cours de ce projet et ses judicieux conseils.

Nous tenons à remercier les honorables membre de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner et évaluer notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous n'oublions pas aussi de remercier tous les enseignants de l'université Ibn Khaldoun qui ont contribué à notre formation.

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

DEDICACE

A nos chers parents qui nous ont guidés durant les moments les plus pénibles de ce long chemin.

Nos mères qui ont été là à nos coté et nous ont soutenu durant toutes notre vie.

Nos pères qui ont sacrifié toute leur vie afin de nous voir devenir ce que nous sommes.

A toutes nos frères et nos sœurs.

A toutes nos familles.

A toutes nos amis (es).

A toute notre promotion.

A toutes personnes qui nous ont aidés à poursuivre nos études.

Enfin à tous ceux qui nous sont très chers.

B. Torkia

B. Imen



Résumé

Résumé :

Dans ce travail de recherche, *une méthode analytique exacte est développée*, d'une part, pour analyser la stabilité au flambement des poutres en nanocomposites à base de nanotube de carbone, et d'autre part, à étudier l'effet de la fondation kerr utilisé sur la charge critique de flambement des poutres.

L'effet de cisaillement transversal est inclus en utilisant une nouvelle théorie d'ordre élevée raffinée de déformation de cisaillement. Le nombre de fonctions inconnues impliqués dans la présente théorie est seulement trois. Le modèle des poutres considérées sont supposées être simplement appuyées posées sur une fondation élastique de type Kerr. Deux types de distributions alignés des nano-renforts sont utilisés: distribution uniforme (UD-CNT) et fonctionnellement graduées (FG-CNT).

Les équations analytiques du présent modèle sont dérivées en utilisant le principe de Hamilton et les solutions exactes pour la charge critique de flambement des poutres sont obtenues. Les solutions obtenues sont validées numériquement par comparaison avec certaines solutions disponibles dans la littérature. L'influence de divers paramètres sur le flambement d'une poutre renforcée par des NTCs, tels que les fractions volumiques, les rapports géométriques de la poutre, les paramètres de rigidité de la fondation et le type de renforcement sont analysés et discutés.

Mot clé: nanotube de carbone; Hamilton; nanocomposite; flambement; Kerr.

Abstract

In this research work, an exact analytical method is developed, on the one hand, for analysis the buckling stability of nanocomposite beams based on carbon nanotube, and on the other hand, to study the effect of the foundation kerr used on the critical buckling load of beams.

The transverse shear effect is included using a new refined high order theory of shear deformation. The number of unknown functions involved in this theory is only three. The model of the considered beams are supposed simply supported to be put on an elastic foundation type Kerr. Two types of aligned distributions of nano-reinforcements are used: uniform distribution (UD-CNT) and functionally graduated (FG-CNT).

The analytical equations of this model are derived using the Hamilton principle and the exact solutions for the critical buckling load of the beams are obtained. The solutions obtained are validated numerically by comparison with certain solutions available in the literature. The influence of various parameters on the buckling of a beam reinforced by NTCs, such as the volume fractions, the geometrical ratios of the beam, the stiffness parameters of the foundation and the type of reinforcement are analyzed and discussed.

Keywords: carbon nanotube; Hamilton; nanocomposite; buckling; Kerr.

ملخص

في هذا العمل البحثي ، تم تطوير طريقة تحليلية دقيقة ، من جهة ، لتحليل ثبات انبعاج الروافد النانو المركبة على أساس النانو الأنابيب الكربونية، ومن جهة أخرى ، لدراسة تأثير القاعدة كير المستعمل على حمل الانبعاج الحرج للروافد.

يتم تأثير القص العرضي باستخدام نظرية جديدة بترتيب عالي الدقة لتشوه القص. عدد المجاهيل المتضمنة في هذه النظرية هو ثلاثة فقط. نفترض أن نموذج الروافد المدروسة مدعوم بمساند بسيطة موضوعة على قاعدة مرنة من نوع كير. يتم استعمال نوعين من التوزيعات المحاذية لتقوية النانو: التوزيع المنتظم (UD-CNT) والتدرج وظيفياً (FG-CNT) .

يتم اشتقاق المعادلات التحليلية لهذا النموذج باستخدام مبدأ هاميلتون ويتم الحصول على الحلول الدقيقة لحمل الانبعاج الحرج للروافد. يتم التحقق عددياً من صحة الحلول التي تم الحصول عليها من خلال المقارنة مع بعض الحلول المتوفرة في الأدبيات. يتم تحليل ومناقشة تأثير معاملات مختلفة على الانبعاج للرافدة المعززة بواسطة NTCs ، مثل الكسور الحجمية ، والنسب الهندسية للرافدة، معاملات صلابة القاعدة ونوع التعزيز.

الكلمات المفتاحية: النانو الأنابيب الكربونية، هاميلتون، النانو المركبة ، الانبعاج، كير.

Table des Matières

Résumé	ii
Abstract	iii
المخلص.....	iv
Liste des figures	viii
Liste des tableaux.....	xi
Liste des abréviations.....	xii
Liste des notations	xiii
Introduction générale.....	01
Chapitre I : Généralités sur les nanotubes de carbone	
I.1 Introduction.....	03
I.2 Historique des nanotubes de carbone.....	04
I.3 Le carbone.....	05
I.4 Les formes classiques du carbone.....	06
I.4.1 Le Graphite.....	06
I.4.2 Le Diamant.....	07
I.4.3 Les autres types de carbone dans la nature.....	08
I.5 Les nouvelles formes du carbone.....	08
I.5.1 Le Graphène.....	09
I.5.2 Fullerènes.....	09
I.6 Classification des nanotubes de carbone.....	10
I.6.1 Les nanotubes de carbone mono-feuillets (Single Walled Carbon Nanotubes ; SWCNT).....	11
I.6.2 Les nanotubes de carbone multi-feuillets (Multi Walled Carbone Nanotubes ; MWCNT).....	12
I.7 Méthodes de synthèse de nanotube de carbone.....	13
I.7.1 Méthode de l'arc électrique.....	13
I.7.2 Ablation laser.....	15
I.7.3 Méthode décomposition catalytique HiPCO.....	17
I.8 Propriétés des nanotubes de carbone.....	17

I.8.1 Propriétés mécaniques.....	18
I.8.2 Propriétés thermiques.....	19
I.8.3 Propriétés optiques.....	20
I.9 Applications des nanotubes de carbone.....	21
I.10 Défaut des nanotubes de carbone.....	22
I.11 Inconvénients (Prix, synthèse et toxicité).....	24
I.12 Conclusion.....	24

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

II.1 Introduction.....	25
II.2 Les Polymères.....	25
II.2 Classification des polymères.....	26
II.2.1 Selon l'origine.....	26
II.2.1.1 des polymères naturels.....	26
II.2.1.2 Les polymères artificiels.....	26
II.2.1.3 Des polymères synthétiques.....	26
II.2.2 selon l'architecture.....	27
II.2.3 selon la structure chimique.....	27
II.2.3.1 Les homopolymères.....	27
II.2.3.2 Les copolymères.....	28
II.3 Utilisation des polymères.....	30
II.4 Présentation des matériaux composites.....	30
II.4.1 Définition d'un matériau composite.....	30
II.4.2 Les domaines d'application des composites.....	31
II.4.2.1 Les composites dans la construction civile.....	31
II.5 Généralités sur les nanocomposite.....	32
II.5.1 Définition d'un nanocomposite.....	32
II.5.2 Différences entre composite et nanocomposite.....	33
II.6 Les différents nanorenforts.....	33
II.6.1 Nanoparticules à trois dimensions nanométriques.....	34
II.6.2 Nanoparticules à deux dimensions nanométriques : nanofibres.....	34
II.6.3 Nanoparticules à une dimension nanométrique : feuillets.....	34

II.7	Classification des nanocomposites selon la nature de la matrice.....	35
II.7.1	Les composites à matrice organique.....	36
II.7.1.1	Les Matrices Thermodurcissables (TD)	36
II.7.1.2	Les Matrices Thermoplastiques (TP)	37
II.7.1.3	Matrices élastomères.....	38
II.7.2	Les Matrices Minérales.....	39
II.7.2.1	Les Matrices Métalliques.....	39
II.7.2.2	Les Matrices céramiques.....	39
II.8	Nano composites (Nanotube de carbone/matrice Polymère)	40
II.9	Propriétés des nano composites (polymères /NTC).....	40
II.9.1	Propriétés thermiques nanocomposites (NTC/polymère).....	40
II.9.2	Propriétés mécaniques des nanocomposites (NTC/polymère).....	41
II.9.3	Propriétés électriques des nanocomposites (NTC/polymère).....	42
II.10	Procédés d'élaboration des nanocomposites (NTC/polymère).....	42
II.10.1	Techniques de la mise œuvre.....	43
II.10.1.1	Mélange en solution.....	43
II.10.1.2	Mélange à l'état fondu.....	44
II.10.1.3	Polymérisation in situ.....	44
II.10.2	Dispersion des renforts.....	45
II.10.2.1	Utilisation des ultrasons.....	45
II.10.2.2	Dispersion mécanique par tricylindre.....	46
II.11	Conclusion.....	48
 Chapitre III : Les théories des poutres et Développement mathématique		
III.1	Introduction.....	49
III.2	Les différentes théories des poutres.....	49
III.2.1	Théorie d'Euler Bernoulli (théorie classique des poutres)	49
III.2.2	Théorie de Timoshenko(FSDT)	50
III.2.3	Théorie d'ordre élevé (HSDT)	52
III.3	Les fondations élastiques.....	54
III.3.1	Le modèle Winkler-pasternak.....	55
III.3.2	Le modèle kerr.....	56
III.4	Développement Mathématique du présent modèle	56

III.4.1 Les propriétés matérielles des poutres composites renforcées par des nanotubes de carbone.....	57
III.4.2 Cinématique et équations constitutives.....	59
III.4.3 Les équations du mouvement.....	60
III.4.4 Les solutions analytiques pour la poutre CNTRC.....	61
III.5 Conclusion.....	62
Chapitre IV : Résultats numériques et discussion	
IV.1 Introduction.....	63
IV.2 Analyse du flambement des poutres CNTRC.....	63
IV.3 Conclusion.....	67
Conclusion générale	68
Bibliographie	69

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Généralités sur les nanotubes de carbone

Figure I.1 : Images MET de nanotubes de carbone, publiées en 1952.....	05
Figure I.2 : Le carbone.....	06
Figure 1.3 : (a) Maille hexagonale et (b) structure lamellaire du graphite.....	07
Figure 1.4 : Structure du Diamant.	08
Figure I.5 : Formes allotropiques du carbones "mal organisées".....	08
Figure 1.6 : Graphène	09
Figure. I.7 : Fullerène C60.....	10
Figure I.8 : Exemples de fullerènes composés de 60, 70 et 80 atomes de carbone.....	10
Figure I.9 : Nanotube de carbone monocouche avec les extrémités fermées.....	11
Figure I.10 : Représentation graphique d'un SWNT (gauche) et image de Microscope électronique à transmission de plusieurs SWNT (droite).....	11
Figure .I.11 : Les trois types des nanotubes de carbone: armchair, zigzag et chiral.....	12
Figure I.12 : Représentation graphique d'un MWNT et image de Microscope électronique à transmission d'un MWNT(en bas).....	13
Figure I.13 : Le principe de la méthode de l'arc électrique.....	14
Figure I.14 : Schéma d'un réacteur de synthèse de nanotubes de carbone par la Méthode de l'arc électrique.....	15
Figure I.15 : Schéma de l'appareillage d'ablation laser.....	16
Figure 1.16 : Schéma de l'installation du procédé par ablation laser utilisé pour La synthèse des nanotubes de carbone.....	16
Figure I.17 : à gauche : Schéma du Production de nanotubes par méthode HiPCO. A droite: Image TEM de nanotubes (HiPCO).....	17
Figure I.18 : Fermeture des nanotubes de carbone.....	22
Figure I.19 : Courbure induite dans un réseau graphitique par un : a. heptagone b. pentagone.....	22
Figure I.20 : Défauts pentagonaux et heptagonaux se traduisant par : a. Un coude ; b. Des jonctions Y ; c. un changement de diamètre.....	23
Figure I.21 : Image MET des extrémités de deux nanotubes multicouches. On a indique quelques-uns des cycles non hexagonaux : (P) indique un pentagone et (H) un heptagone....	23
Figure I.22 : Introduction d'une paire pentagone-heptagone provoquant une variation de	

Diamètre et de chiralité : a- de (11,0) a (12,0) ; b- de (9,0) a (12,0).....24

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

Figure II.1 : Modèle schématique de la synthèse d'un polymère.....26

Figure II .2 : Classification des architectures macromoléculaires selon Tamolia.....27

Figure II .3 : matériau composite.....31

Figure II.4 : Schéma illustratif d'un matériau composite.....31

Figure II.5 : Définition morphologique de nanocomposites.....32

Figure II.6 : fibre de verre.....34

Figure II.7 : fibre de carbone.....34

Figure II.8 : Représentation schématique des différents renforts. (a) nanoparticule ;
(b) nanofibre ; (c) feuillet.....35

Figure II. 9 : Les Différentes familles de matrice.....35

Figure II.10 : Méthodes d'élaborations des nano composites polymères : a) mise en
œuvre dans le fondu, b) mise en solution et c) polymérisation in situ.....44

Figure II.11: 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.....46

Figure II.12: a)Tricylindre Exakt 80E (Source : Exakt Vertriebs GmbH, Allemagne).
b) Schéma du circuit d'un fluide disperse par tricylindre
(Source: IPAT, TUBraunschweig, Allemagne).....47

Chapitre III : Les théories des poutres et Développement mathématique

Figure III.1: Cinématique d'Euler Bernoulli.....49

Figure III.2 : Cinématique de Timoshenko.....51

Figure III.3 : Variation de la fonction de gauchissement $f(z) = z$ et $f'(z)$ en fonction de
l'épaisseur.....52

Figure III.4 : Cinématique de la Théorie d'Ordre Elevé.....52

Figure III.5 : Variation de la fonction de gauchissement $f(z)$ des différents modèles en
fonction de l'épaisseur.....54

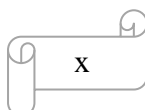
Figure III.6 : Variation de la fonction de gauchissement $f'(z)$ des différentes modelés en

Liste des figures

fonction de l'épaisseur.....	54
Figure III.7: Fondation reposant sur un sol modélisé par des ressorts et un élément d'interaction.....	55
Figure III.8 : une fondation élastique, (A) Winkler, (B) Pasternak.....	55
Figure III.9 : poutre repose sur une fondation élastique à deux paramètres (Winkler-Pasternak) au repos et après déformation.....	56
Figure III.10 : Modèle de Kerr.....	56
Figure III.11 : (a) Géométrie de la poutre.....	57
Figure III.12 : (b) les différents modèles des dispositions des renforts.....	57

Chapitre IV : Résultats numériques et discussion

Figure IV.1: Effet du paramètre du module Winkler sur les charges critiques de flambement des poutres CNTRC ($V_{cnt}^*=0.12, \beta_s = 0, \beta_c = 0.8, L/h = 10$).....	65
Figure IV.2: Effet du paramètre du module Pasternak sur les charges critique de flambement des poutres CNTRC ($V_{cnt}^*=0.12, \beta_w = 0.1, \beta_c = 0.1, L/h = 10$).....	66
Figure IV.3: Effet du paramètre du module de kerr sur les charges critique de flambement des poutres CNTRC ($V_{cnt}^*=0.12, \beta_w = 0.8, \beta_s = 0, L/h = 10$).....	66
Figure IV.4: Les charges critiques de flambement adimensionnelles de la poutre X avec et sans fondation élastique et avec différents rapports d'épaisseur ($V_{cnt}^*=0.12$).....	67



LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : Généralités sur les nanotubes de carbone

Tableau I.1: propriétés des différents types de liaison carbone-carbone.....06

Tableau I.2: Comparaison des propriétés mécaniques des CNT et d'autres matériaux.....19

Chapitre II : Généralités sur les nanocomposites

(polymère-nanotubes de carbone)

Tableau II.1: Présente la structure chimique de quelques polymères.....29

Tableau II.2: Avantages et inconvénients de l'ajout de nanoparticules aux polymères.....33

Tableau II.3: Propriétés Des Résines Thermodurcissables.....37

Tableau II.4: propriétés physiques et mécaniques des thermoplastiques.....38

Tableau II.5: les composites à matrice métallique.....39

Tableau II.6: Comparaison des différentes méthodes d'élaboration des composites polymères/NTC.....45

Chapitre IV : Résultats numériques et discussion

Tableau IV.1: Comparaison des charges critiques adimensionnelles pour des poutres CNTRC avec et sans fondation élastique ($L/h = 15$, $V_{cnt}^* = 0.12$).....63

Tableau IV.2: La liste des valeurs de la charge critique de flambement de la poutre pour les différents types de distributions et valeurs du rapport L/h avec et sans fondation élastique ($V_{cnt}^* = 0.12$).....64

Tableau IV.3: La liste des valeurs de la charge critique de flambement de la poutre pour les différents types de distributions et valeurs du rapport L/h avec et sans fondation élastique ($V_{cnt}^* = 0.17$).....64

Tableau IV.4: La liste des valeurs de la charge critique de flambement de la poutre pour les différents types de distributions et valeurs du rapport L/h avec et sans fondation élastique ($V_{cnt}^* = 0.28$).....65

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AFM:	Microscopie à force atomique.
C-C:	La liaison carbone-carbone.
CBT:	Théorie classique des poutres.
CMM:	Composites à matrice métallique.
CNTs:	Nanotube de carbone.
CNTRC:	Poutre de composite renforcée par des nanotubes de carbone.
CO:	Monoxyde de carbone.
CVD:	Chemical Vapor Deposition.
DWCNT:	Nanotube de carbone double paroi.
FG:	Fonctionnellement gradué.
FSDT:	Théorie de premier ordre de déformation de cisaillement(Timoshenko).
HiPCo:	Décomposition de CO a haute pression.
HSDT:	Théorie d'ordre élevé.
MWCNT:	Nanotube de carbone multi-paroi.
NC:	Nanocomposite.
PA:	Polyamide.
PBT:	Butylénique.
PC:	Polycarbonate.
PE:	Polyéthylène.
PET:	Polytéréphtalate éthylénique.
PMMA:	Le polyméthacrylate de méthyle.
POE:	Le polyoxyde d'éthylène.
PP:	Polypropylène.
PS:	Le polystyrène.
PTFE:	Le polytétrafluoroéthylène.
PVC:	Polychlorure de vinyle.
SWCNT:	Nanotube de carbone mono-paroi.
TD:	Thermodurcissable.
TEM:	Microscopie électronique de transmission.
TP:	Thermoplastique.
UD:	Distribution uniforme.

LISTE DES NOTATIONS

A_{11}	Rigidité de membrane.
A_{110}	Rigidité d'extension ou la valeur de A_{11} d'une poutre homogène.
\vec{a}_1, \vec{a}_2	Les vecteurs de base du graphène.
B_{11}	Rigidité de couplage (membrane-flexion).
β_w, β_s et β_c	Facteurs constants de la fondation élastique.
C60	Fullerène C60.
C70	Fullerène C70.
C80	Fullerène C80.
\vec{c}_h	Le vecteur chiral.
D_{11}	Rigidité de flexion.
E_{11}	Module de Young équivalente l'axe longitudinale.
E_{22}	Module de Young équivalente l'axe transversale.
E_{11}^{cnt}	Module de Young de nanotube de carbone suivant l'axe horizontale.
E_{22}^{cnt}	Module de Young de nanotube de carbone suivant l'axe verticale.
f_e	La réaction de la force de fondation.
$f(z)$	Fonction de forme.
G_{12}	Module de cisaillement équivalent.
G_{12}^{cnt}	Module de cisaillement de nanotube de carbone.
h	Epaisseur de la poutre.
K_c	Constante de rigidité de cisaillement kerr.
K_s	Constante de rigidité de cisaillement Pasternack.
K_w	Constante de rigidité de Winkler.
L	Longueur de la poutre.
MD	Dynamique moléculaire.
(n, m)	Un couple de nombres entiers qui définit la structure du nanotube.
N, M_b, M_s	Les efforts résultants.
\bar{N}	La charge critique adimensionnelle.
N_{cr}	La charge critique de flambement.
N_{x0}	La force de compression axiale.

t	Le temps.
δU	La variation virtuelle de l'énergie de déformation.
$U_0(x)$	Déplacement axiale de la fibre moyenne.
U_m, W_{bm} et W_{sm}	Des paramètres arbitraires.
V_{cnt}	Fraction volumique de nanotube de carbone.
δV	La variation virtuelle de l'énergie potentielle.
V_p	Fraction volumique de la matrice polymère.
V_{cnt}^*	Fraction volumique.
$W_0(x)$	Déplacement transversale de la fibre moyenne.
w_b	Composante de la flexion du déplacement transversal long du plan médian de la poutre.
W_{cnt}	Fraction massique du nanotube de carbone.
w_s	Composante du cisaillement du déplacement transversal long du plan médian de la poutre.
Q_{ij}	Coefficients de rigidité.
sp^1, sp^2, sp^3	Trois formes allotropiques.
S_i	Élément de la matrice.
$\varepsilon_x, \gamma_{xz}$	Composantes de déformation.
ν^{cnt}	Coefficient de poisson de nanotube de carbone.
ν^p	Coefficient du poisson de la matrice polymère.
Θ	Angle chiral.
ρ^{cnt}	La masse volumique de nanotube de carbone.
ρ^p	La masse volumique de la matrice polymère.
σ_x	Contrainte normale.
τ_{xz}	Contrainte tangentielle.
$\eta_i (i = 1, 2, 3)$	Les paramètres d'efficacité.
∂	Dérivée partielle.
[]	Matrice.
{ }	Vecteur colonne.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les nanotubes de carbone (CNTs) sont parmi les plus prometteurs nouveaux matériaux pour le nanotechnologie, en raison de leurs propriétés thermiques, chimiques, optiques, et mécaniques supérieures remarquables. Autres études ont montrée 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, en observant par microscopie électronique un sous-produit de synthèse de fullerènes (C₆₀), des structures tubulaires. Ces tubes, entièrement composés de carbone, sont appelés nanotubes, en référence à leur diamètre qui ne mesure que quelques nanomètres, les (NTC) présentent en effet des propriétés mécaniques exceptionnelles. Un nanotube de carbone est une feuille de graphite formé d'atomes de carbone disposés en réseau hexagonal, comme un nid d'abeilles, et enroulé sur lui-même, qui forme un tube dont le 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.

Les nanotubes de carbone possèdent des propriétés exceptionnelles: 100 000 fois plus fin qu'un cheveu, un nanotube de carbone est 100 fois plus résistantes et 6 fois plus légères que l'acier. Ses avantages ne s'arrêtent pas là : il est aussi flexible et conducteur, un module d'Young très élevé ≈ 1.06 TPa et La liaison C-C du graphite est une liaison chimique forte.

L'utilisation des NTC dans les matériaux permet d'obtenir des nouveaux composites (nanocomposites). En effet, le but de leur fabrication est de profiter des bonnes propriétés de différents matériaux afin d'en former un qui sera mieux adapté à certaines applications, dans lesquels les charges (NTC) sont organisées à l'échelle du nanomètre. Ces composites présentent un grand intérêt dans différents domaines : renfort mécanique, matériau conducteur, Néanmoins, l'utilisation de NTC dans les composites se heurte à un problème majeur à savoir l'agglomération spontanée des NTC entre eux, ce qui limite leurs propriétés potentielles au sein du matériau.

Les propriétés des nanocomposites dépendent de la concentration et de l'état de dispersion des nanocharges dans la matrice. Par exemple la mesure de l'état de dispersion des nanotubes de carbone dans la matrice polymère est un autre enjeu majeur pour l'avenir des

nanocomposites. 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 oeuvre, 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.

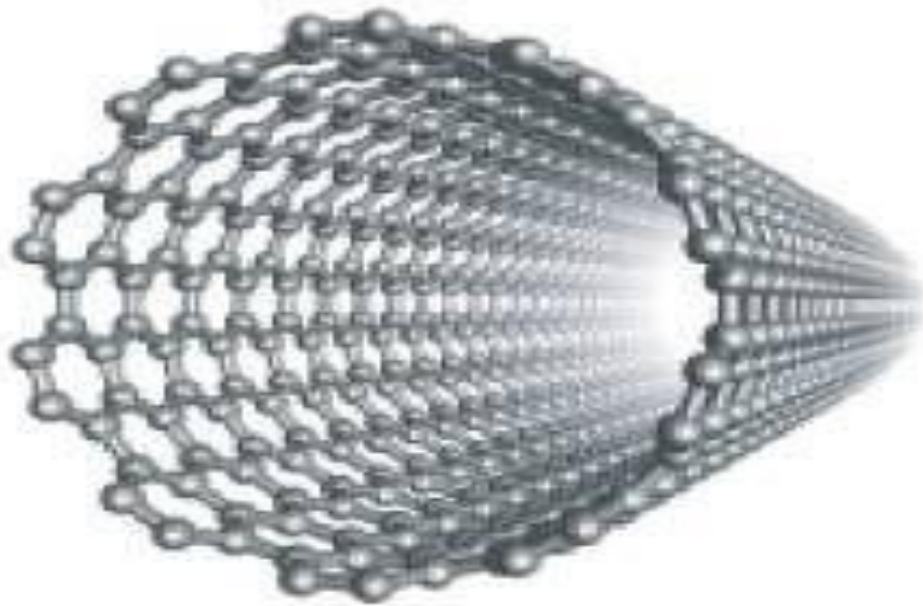
Ce travail est composé de quatre chapitres : Dans le premier chapitre, nous décrirons l'histoire et les différents types de nanotubes de carbone en détaillant leurs classifications, les différentes techniques de synthèse tel que la méthode d'ablation laser, l'arc électrique, la décomposition catalytique (HiPCo), 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 second chapitre présentera des généralités sur les Polymères, leurs classifications et utilisation, encore les matériaux composites et les nanocomposites, plus particulièrement on s'intéressera aux nanocomposite ainsi leur classification et propriétés, ensuit la dispersion des renforts dans la matrice polymère et la production des nanocomposites à base (polymère / NTC).

Dans le troisième chapitre, nous présenterons les différentes théories des poutres (théorie d'Euler-Bernoulli, théorie de Timoshenko(FSDBT) et la théorie d'ordre élevé (HSdT)) tout en donnant les hypothèses de chaque théorie et en montrant les différences entre ces dernières et il décrira aussi d'une façon générale les fondations élastiques, ensuit nous utilisons développements mathématiques de la théorie d'ordre élevé pour étudier la charge critique de flambement de notre modèle.

Le dernier chapitre sera consacré à l'analyser de flambement des poutres en nanocomposites à base de nanotube de carbone situé dans un milieu élastique nous s'intéresserons à l'effet de la fondation élastique de type Kerr. Enfin nous interpréterons les résultats obtenus.

CHAPITRE I :
Généralités sur les nanotubes
de carbone



I.1 Introduction :

Le carbone est l'un des éléments les plus abondants dans la nature, élément chimique non métallique. Il a été employé pendant des siècles allant du présent jusqu'à l'antiquité, mais pourtant beaucoup de nouvelles formes cristallines de carbone tout récemment ont été expérimentalement découvertes dans les dernières décennies.

Le développement des nanotubes de carbone (CNT : Carbone Nanotube) a commencé en 1991 par un groupe de chercheur japonais, selon leur structure ; il ya les nanotubes multi-parois (Multi Walled CNT) qui ont été observés pour la première fois en microscopie électronique à transmission(TEM) par Iijima en 1991, et les nanotubes mono-parois(Single Walled CNT)qui ont été observés indépendamment par Iijima et Béthune en 1993.Ces nanotube ont un diamètre de l'ordre du nanomètre et une longueur de quelques micromètres. Différentes méthodes de synthèse spécifiques ont été mises au point et ont permis l'étude en laboratoire de ces structures, ce qui laisse entrevoir de nombreuses applications, notamment dans les domaines microélectronique et nanoélectronique. Certains nanotube de carbone peuvent être métalliques ou quasi-métalliques et d'autres peuvent être semi-conducteurs.

Nous avons consacré ce chapitre aux nanotubes de carbone. La structure des nanotubes est comparée à la structure des autres formes de carbone, que ce 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 de carbone :

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

Jusqu'en 1985, les seules formes cristallines connues du carbone étaient le graphite et le diamant. En 1985, R.E. [Smalley et al 1997] [Liu 1989] ont découvert une nouvelle forme de carbone, la molécule de fullerène C₆₀ constituée de 60 atomes de carbone répartis sur les sommets d'un polyèdre régulier constitué de facettes hexagonales et pentagonales, ce qui leur valut le prix Nobel de chimie en 1996. L'histoire des nanotubes de carbone est réellement amorcée par la découverte du fullerène C₆₀. En 1991, Iijima [Iijima 1991] met en évidence l'existence d'un nouvel état solide carboné en relation avec le fullerène, en observant des structures tubulaires par microscopie électronique dans des fibres de carbone qu'il nomme nanotubes de carbone, produits secondaires de la formation de fullerènes par la méthode à arc électrique. Iijima était la première personne à identifier les nanotubes de carbone comme une nouvelle forme allotropique du carbone. Deux ans plus tard, les équipes d'Iijima [Iijima 1993 (2)] et de Béthune [Bethune 1993] publient successivement la découverte de l'existence des nanotubes de carbone mono-parois SWCNTs. Depuis, un intense effort de recherche a été entreprise pour améliorer notre connaissance des NTCs. Mais des travaux antérieurs ont déjà publié des structures de nanotubes de carbone sans pour autant pouvoir les définir [Editorial 2006]. D'ailleurs, en 1952, Radushkevich et Lukyanovich ont publié dans un journal russe des images de nanotubes de carbone d'environ 50 nanomètres de diamètre [Radushkevich 1952].

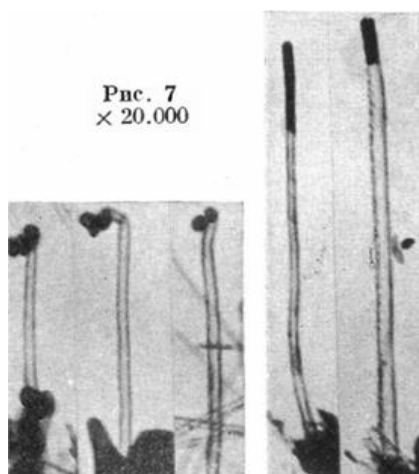


Figure I.1 : Images MET de nanotubes de carbone, publiées en 1952. [Radushkevich 1952]

Plus tard, en 1958, Hillert et Lange ont noté la formation de filaments graphitiques ayant une texture concentrique déterminée par diffraction d'électrons [Hillert 1958]. En 1976, un article d'Oberlin et Endo montre des fibres de carbone creuses de taille nanométrique obtenues par CVD (Chemical Vapor Deposition) [Oberlin 1976]. Ils montrent aussi, par une image au microscope électronique à transmission (MET), un nanotube constitué d'un seul feuillet de graphène (Figure I-1).

En outre, en 1979, John Abrahamson a décrit les nanotubes de carbone comme des fibres de carbone produites sur une anode de carbone après formation d'un arc électrique [Abrahamson 1973]. En 1982, un groupe de scientifiques soviétiques [Nesterenko 1982] a publié des résultats de la caractérisation chimique et structurale de nanoparticules de carbone produites par dismutation thermocatalytique de monoxyde de carbone. En utilisant des images MET et aux rayons X, les auteurs suggèrent que leurs cristaux tubulaires multicouches de carbone ont été formés par enroulement de couches de graphène en cylindres. [Haddad 2010].

I.3 Le carbone :

Le carbone, sixième élément chimique dans l'ordre du tableau périodique est le quatrième élément le plus abondant dans l'univers et dans notre système solaire.

Contrairement aux trois premiers éléments : hydrogène, hélium et lithium, le carbone ne s'est pas formé durant le big-bang mais dans les étoiles. Au cours de leur vie, les étoiles produisent de l'hélium à partir d'hydrogène. Cet hélium vient s'accumuler en leur cœur et des quantités gigantesques d'hélium sont ainsi produites. Lorsque toute la quantité d'hydrogène est épuisée, le cœur de l'étoile s'effondre et la température atteint alors 100 millions de degrés. A cette température les atomes d'hélium fusionnent pour donner du béryllium Be^8 en émettant un rayon gamma. Le béryllium 8 n'est pas stable et se décompose en 2 atomes d'hélium. En

revanche si le béryllium 8 a le temps de réagir avec un troisième atome d'hélium alors il forme un atome de carbone C12 stable en émettant un nouveau rayon gamma.

Dans la nature le carbone peut également se trouver sous forme de cristaux purs en carbone appelés aussi formes allotropiques. Parmi ces différentes formes, le graphite et le diamant sont les formes cristallines les plus connues. Mais d'autres variétés allotropiques plus rares existent, souvent méconnues. Enfin plus récemment de nouvelles formes allotropiques de carbone ont été synthétisées par l'homme [Viory 2010]



Figure I.2 : Le carbone.

Tableau I.1: propriétés des différents types de liaison carbone-carbone [Mouatsi 2013].

Liaison	Hybridation	Energie de liaison (KJ/mol)	Longueur de liaison (nm)
C-C	Sp ³	370	0.15
C=C	Sp ²	680	0.14
C≡C	Sp	890	0.12

I.4 Les formes classiques du carbone :

I.4.1 Le Graphite :

Le graphite présente une structure lamellaire constituée d'un empilement de feuillets. Chaque feuillet, ou plan de graphène, est constitué d'atomes de carbone en état d'hybridation sp², formant un réseau hexagonal de paramètre de maille 0,243 nm, la longueur de la liaison C-C étant de 0,142 nm. Il existe deux façons d'empiler les plans de graphène sur eux-mêmes, résultant en deux formes cristallines différentes de graphite. La forme cristalline stable est le graphite hexagonal [Park 1993]. Les plans de graphène sont empilés, la distance inter-feuillets est de 0,335 nm.

L'autre forme cristalline possible est le graphite rhomboédrique, phase métastable du graphite hexagonal. Les plans de graphène sont ici aussi empilés, mais chaque plan est décalé d'une longueur de liaison par rapport au plan précédent. Le graphite se rencontre rarement sous la forme d'un monocristal, bien que la croissance de monocristaux macroscopiques soit possible. Le graphite courant, celui des mines de crayon, est un polycristal, constitué de cristallites de graphite hexagonal orienté aléatoirement. [Chemi 2018]

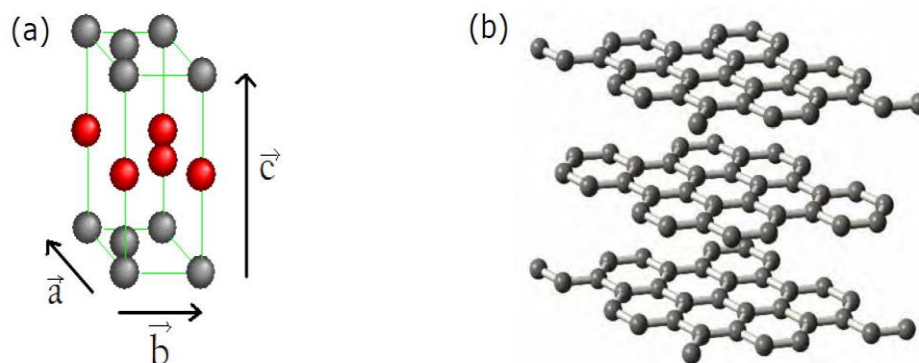


Figure 1.3 : (a) Maille hexagonale et (b) structure lamellaire du graphite.

I.4.2 Le Diamant :

Depuis la nuit des temps le diamant n'a cessé de fasciner les hommes, il est synonyme de beauté et d'éternité. Il se forme à l'intérieur de la terre, généralement entre 150 et 200 km de profondeur, là où ses conditions de stabilité sont réunies (un millier de degré Celsius et plusieurs giga pascals).

Le diamant est la seconde forme allotropique compacte du carbone. Il possède une structure cubique à faces centrées. Dans le diamant, les atomes de carbone sont en état d'hybridation sp^3 , et donc tétravalents. Contrairement aux cas du graphite, tous les électrons de valence sont impliqués dans des liaisons covalentes, donc le diamant est isolant électrique. En fois supérieure à celle du cuivre. Le diamant possède également des propriétés mécaniques uniques puisqu'il est le plus dur des matériaux naturels. [Berd 2013]

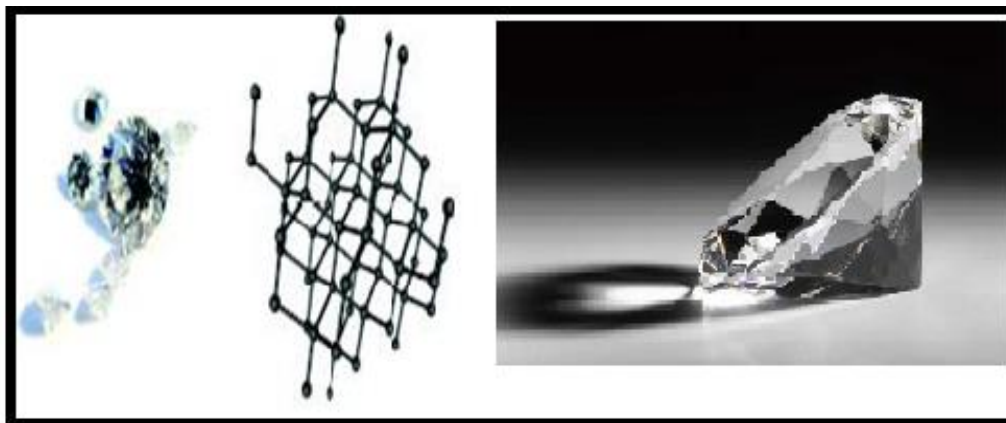


Figure 1.4 : Structure du Diamant.

I.4.3 Les autres types de carbone dans la nature :

Il en existe aussi d'autres types de carbone mal structurés comme le cas du carbone amorphe. Il s'agit d'un réseau désordonné d'atome de carbone présentant des états d'hybridation sp^2 et sp^3 . A l'état naturel, le carbone amorphe est rare. Il est présent dans les particules des couches extérieures de l'atmosphère des étoiles froides, appelées poussières d'étoiles. Aussi par dépôt de plasma, on obtient le carbone amorphe synthétisé sous formes de couches minces. 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 couches de protection. On peut rencontrer le carbone sous une forme partiellement organisée. Le désordre structural est créé par des défauts d'empilement des plans de graphène, ce qui éloigne la structure de ce graphite des formes ordonnées vues précédemment, en perdant l'ordre orientationnel et en augmentant la distance inter-feuillets. Pour le différencier de graphite hexagonal et rhomboédrique, on parle de graphite turbostratique [Boumia 2017]

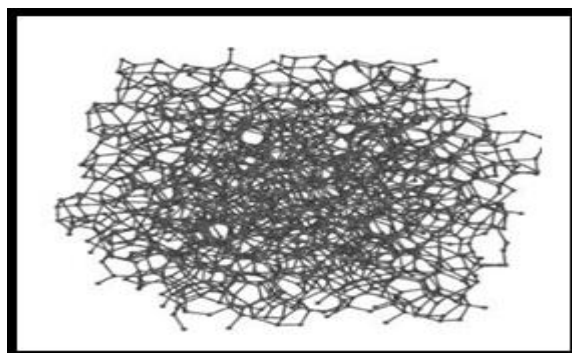


Figure I.5 : Formes allotropiques du carbonnes "mal organisées".

I.5 Les nouvelles formes du carbone :

I.5.1 Le Graphène :

Le graphène est un cristal bidimensionnel d'atomes de carbone, c'est un plan de graphite isolé. Il possède donc une structure hexagonale avec des liaisons de type sp^2 . Jusqu'à récemment, il était juste un objet théorique, servait notamment de modéliser les propriétés des nanotubes. Depuis quelques années, des techniques expérimentales permettent de l'isoler et donc de l'étudier expérimentalement.

Bien que connu comme faisant partie intégrante de ces allotropies, on a longtemps pensé que le graphène ne pouvait exister. Jusqu'à récemment, il était utilisé comme objet théorique permettant de modéliser les propriétés des autres matériaux carbonés. En 2004, le modèle devint réalité lorsque les premiers plans de graphène furent isolés [Geim 2007], [Boumia 2017], [Novoselov 2004]. Il fait ainsi depuis quelques années l'objet d'un intérêt croissant [Novoselov 2005].

Jusqu'en 2004, les scientifiques étaient persuadés qu'obtenir une couche stable de carbone monoatomique était impossible. A. Geim et K. Novoselov ont démontré le contraire, avec une méthode très simple, ils ont extrait des feuillets de graphène d'un cristal de graphite, en les exfoliant à l'aide d'un ruban adhésif, puis en les déposant sur du silicium. Ils ont même réussi à faire les premières mesures électriques. Depuis 2005, les études sur le graphène ont explosé et plusieurs méthodes ont été proposées. [Berd 2013].

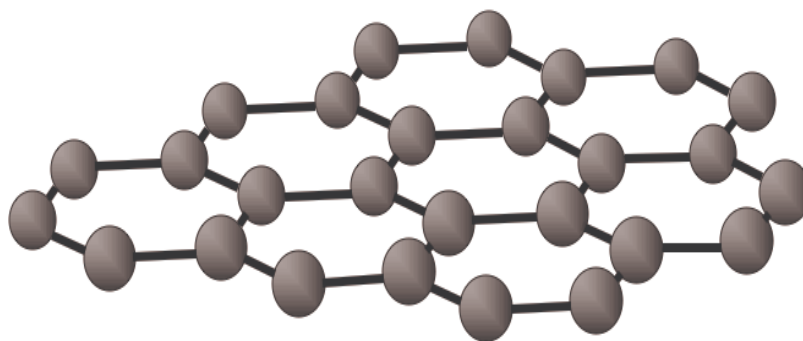


Figure 1.6 : Graphène [Berd 2013].

I.5.2 Fullerènes :

En 1985, H. Kroto, R.F. Curl et R.E. Smalley découvrent une structure stable de 60 atomes de carbone. Pour expliquer cette stabilité tout en respectant la valence du carbone, ils proposent un modèle de structure comparable à celle d'un ballon de football où les sommets sont remplacés par des atomes de carbone, soit un polygone composé de 32 faces : 12 pentagones et 20 hexagones [Kroto 1985]. De cette structure similaire à celle du dôme géodésique de l'architecte Buckminster Fuller, ils baptisèrent ce nouvel allotrope du carbone

Buckminster fullerène ou plus simplement fullerènes. Cette découverte leur valut le prix Nobel de chimie en 1996. [Garrido 2010].

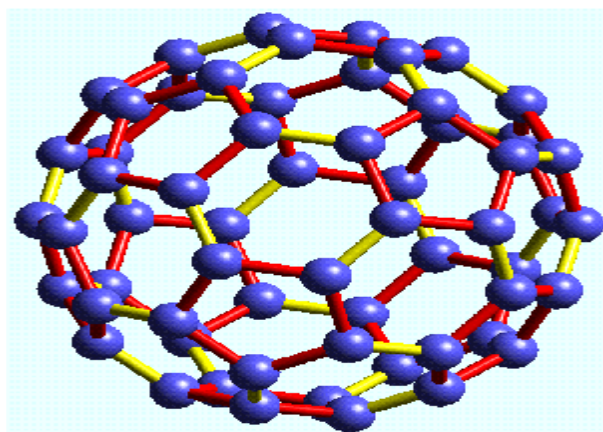


Figure. I.7 : Fullerène C60 [Chemi 2018].

L'hybridation des atomes de carbone d'un NTC idéal, est sp^2 et chaque atome de carbone présente une liaison double et deux simples avec les atomes voisins. [ELSawi 2010]. Avec les fullerènes et leur diamètre estimé à 7 Å, on entre dans le domaine des

Nanomatériaux. Immédiatement Kroto, Curl et Smalley imaginent des dérivés du C60 combinés avec d'autres éléments (C60Fe, C60F60) ou la possibilité de mettre un atome à l'intérieur donnant ainsi naissance à de nouvelles molécules pouvant avoir des propriétés inhabituelles. Le fullerène C60 est la forme la plus étudié de cette famille mais il en existe une grande variété (C70, C72, C76, C84, ...) offrant ainsi de nouvelles. Bases pour développer de nouvelles branches de la chimie organique ou inorganique. [Garrido 2010]

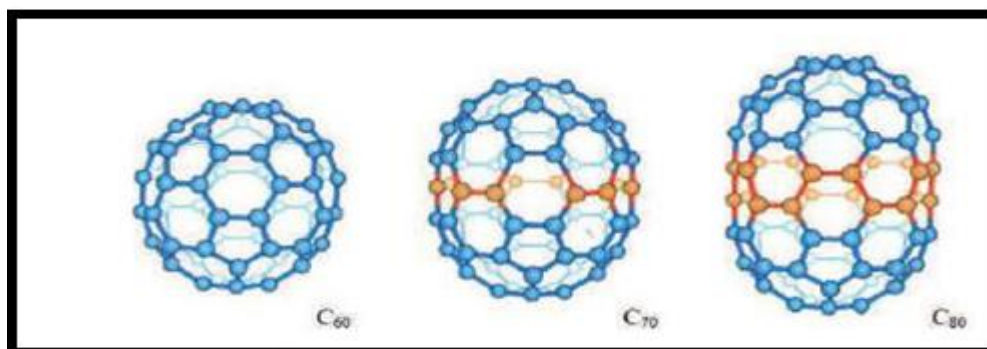


Figure I.8 : Exemples de fullerènes composés de 60, 70 et 80 atomes de carbone [Marcoux 2002].

I.6 Classification des nanotubes de carbone :

Comme leur nom l'indique, ces nanotubes sont composés d'une seule feuille de Graphène enroulée sur elle-même. Le diamètre d'un nanotube de carbone monofeuillet est typiquement

entre 1 et 2 nm et sa longueur atteint facilement quelques micromètres. Comme la molécule de fullerène dont il dérive, le nanotube de carbone obéit au théorème de Descartes-Euler. Le tube parfait étant composé d'hexagones (en nombre non limité) et de deux demi-sphères aux extrémités qui correspondent à des demi-fullerènes. [Tagrara 2017].

Les nanostructures de carbone telles que les nanotubes mono- et multicouches, les fullerènes ou encore les oignons de carbone peuvent être produits par de nombreuses méthodes. [Marcoux 2002].

I.6.1 Les nanotubes de carbone mono-feuillets (Single Walled Carbon Nanotubes ; SWCNT) :

Les nanotubes de carbone ont une forme cylindrique et selon les cas, les extrémités sont fermées ou non par des demi-sphères. Leur diamètre varie entre 1,4 nm et plusieurs nanomètres et leur longueur est de l'ordre de 100 μm (cette longueur peut atteindre 1 mm). [Chantal 2010]

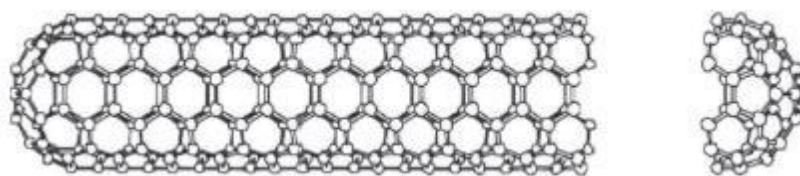


Figure I.9 : Nanotube de carbone monocouche avec les extrémités fermées

Dont la structure peut être représentée par un feuillet de graphène enroulé sur lui-même et fermé à ses deux extrémités par une demi-sphère. Les atomes de carbone restent dans un état d'hybridation sp^2 . La façon dont le feuillet de graphène est enroulé sur lui-même définit un paramètre appelé hélicité qui fixe la structure du nanotube.

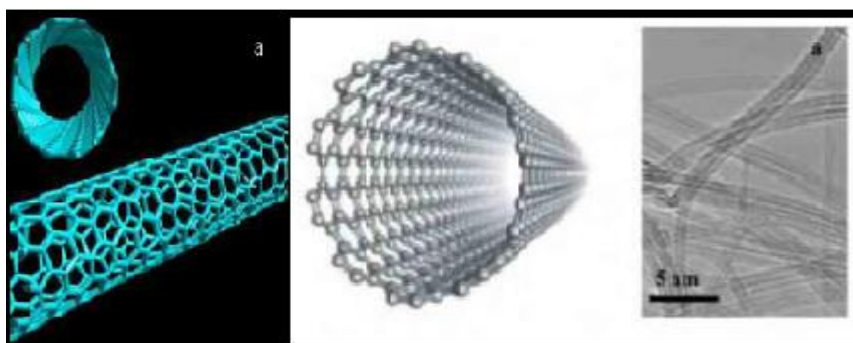


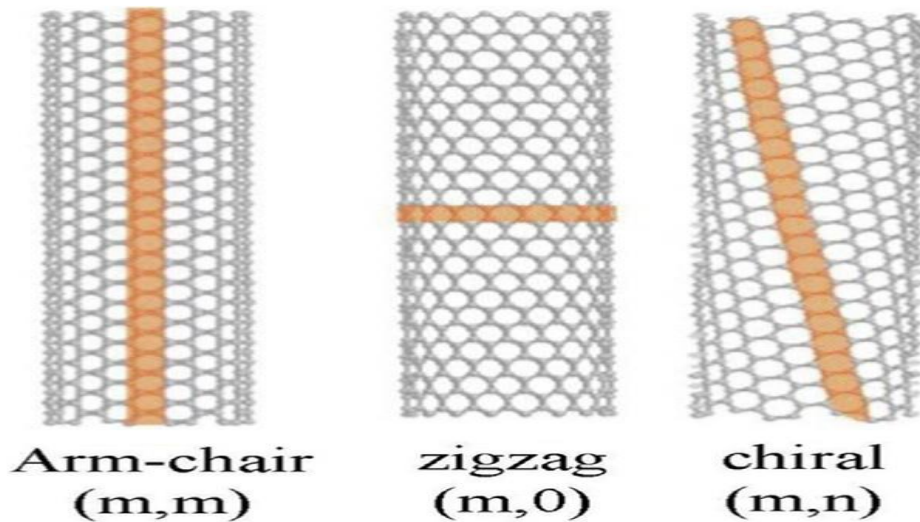
Figure I.10 : Représentation graphique d'un SWNT (gauche) et image de microscope électronique à transmission de plusieurs SWNT (droite).

La structure de type « nid d'abeille » du graphène est représentée par deux vecteurs directeurs a_1^{\rightarrow} et a_2^{\rightarrow} du système cristallin qui définissent le vecteur de chiralité c_h^{\rightarrow} , axe selon lequel le graphène est enroulé pour former le nanotube.

Ce vecteur peut être décomposé en deux scalaires, m et n, tel que : $c_h^{\rightarrow} = na_1^{\rightarrow} + ma_2^{\rightarrow}$

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

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



**Figure .I.11 : Les trois types des nanotubes de carbone: armchair, zigzag
Et chiral**

I.6.2 Les nanotubes de carbone multi-feuillets (Multi Walled Carbon Nanotubes ; MWCNT):

Sont constitués de plusieurs feuillets de graphène enroulés les uns autour des autres. Ils se présentent comme des tubes creux concentriques avec un diamètre interne de l'ordre du nanomètre et une longueur de l'ordre de quelques micromètres. Il existe deux modèles pour décrire la structure des nanotubes multi feuillets :

- Le modèle « poupée russe » : les plans de graphène sont arrangés en cylindres concentriques par emboîtement.

- Le modèle « parchemin » : un seul feuillet de graphène est enroulé en spirale sur lui même. [Haddad 2010]

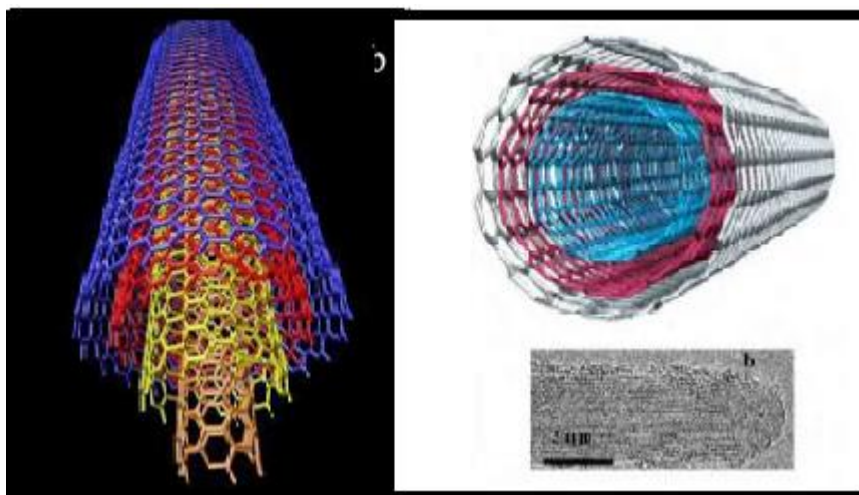


Figure I.12 : Représentation graphique d'un MWNT et image de Microscope électronique à transmission d'un MWNT(en bas).

I.7 Méthodes de synthèse de nanotube de carbone :

Il existe plusieurs méthodes de production de nanotube de carbone mono ou multi parois .Bien que tout différentes, ces méthodes présentent des éléments en commun : une source de carbone (solide, gazeuse ou même liquide) des températures élevées (de 700 à 3000 C), une atmosphère inerte et un ou des catalyser (s) métallique(s). [Salmi 2008].

La différence majeure entre la production de nanotubes multi- couche et de nanotubes mono- couche est la nécessité d'utiliser un ou plusieurs catalyseurs pour obtenir la forme mono- couche des nanotubes de carbone. Les recherches sur la synthèse conditionnent toutes les études et les éventuelles applications des nanotubes de carbone, il est donc important de pouvoir comparer les résultats des différentes méthodes de synthèse. Il existe plusieurs enjeux dans la production des nanotubes de carbone mono couche. Tout d'abord, il faut avoir un contrôle de la distribution en diamètre et de la chiralité des échantillons. La chiralité, comme nous le verrons plus loin, représente la façon dont la feuille de graphite est enroulée. De plus, il est nécessaire d'avoir un contrôle sur la "pureté" des échantillons. Enfin, pour ce qui est d'éventuelles applications industrielles, la production de nanotubes en grandes quantités (kg/jour) est la première étape à réaliser. Nous présentons dans cette partie les procédés de synthèse les plus répandus en nous attachant à exposer les avantages et les inconvénients de chacun d'entre eux. Nous présentons successivement la méthode d'ablation laser, de l'arc électrique, et enfin la méthode dite HiPCo. [Chemi 2018].

I.7.1 Méthode de l'arc électrique :

La synthèse par arc électrique à été utilisé dans les années 60 pour produire des fibres de

carbone .En1991, en utilisant cette méthode, Ijima a identifié les nanotubes de carbone.
[Salem 2012]

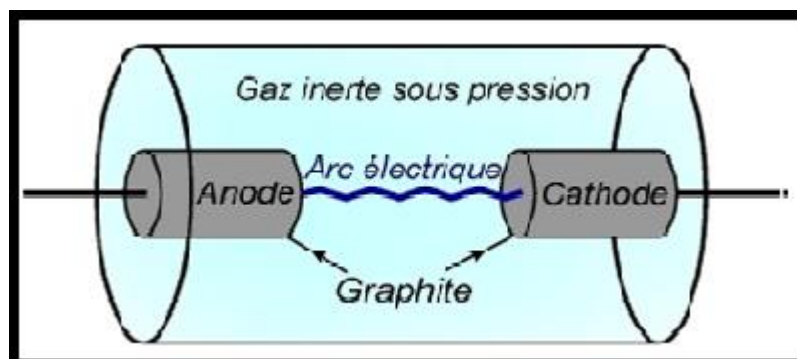


Figure I.13 : Le principe de la méthode de l'arc électrique. [Zemri 2015]

L'arc électrique produit l'évaporation ($> 3000^{\circ}\text{C}$) d'atomes de carbone d'une cible (électrode de carbone). Avec cette méthode on peut obtenir des nanotubes monopari et multi pari [Journet 1997], ainsi que d'autres produits carbonés comme des suies ou des fullerènes [Krätschmer 1990]. Pour obtenir des nanotubes mono parois l'utilisation d'un catalyseur, comme par exemple Co, Ni, Fe, est nécessaire. [Calfat 2008]

Ce procédé implique l'utilisation de deux électrodes de graphite de grande pureté (Une anode et une cathode) placées ensemble dans une enceinte où règne une atmosphère inerte (argon ou hélium). Sous l'application d'un fort courant, un arc électrique se forme entre les deux électrodes. L'anode se consume alors pour former un plasma dont la température peut atteindre 6000°C . Le plasma ainsi générés condense sur l'autre électrode, la cathode, en un dépôt caoutchouteux et filamenteux évoquant une toile d'araignée. L'extérieur est très dense, semblable à une écorce renfermant à l'intérieur un cœur mou contenant les NTC et d'autres nanoparticules de carbone.

Généralement, la qualité et le rendement des NTC dépendent des conditions de Synthèse employées telles que le refroidissement de la cathode, la distance entre les deux électrodes, la pression de l'enceinte de réaction, l'uniformité de l'arc du plasma, la température du plasma. Les NTC obtenus sont des MWNT. Pour obtenir des SWNT, l'anode doit être dopée avec une petite quantité de catalyseurs métalliques. Ceux-ci peuvent être des métaux de transition tels que Fe, Co ou Ni, des terres rares ou bien des métaux du groupe du platine tels que Rh, Ru et Pt.

En 1992, Ebbesen et Ajayan réalisent la production et la purification d'environ 1 gramme de MWNT. Depuis la technique a été améliorée et permet maintenant d'obtenir

plusieurs grammes de NTC par jour. Cependant, cette méthode ne permet pas le développement d'une production à l'échelle industrielle. [Garrido 2010]

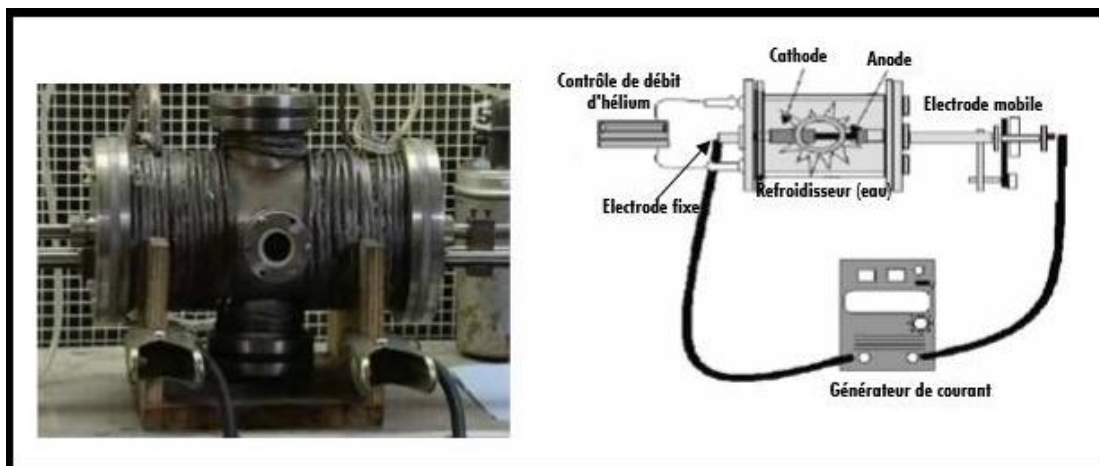


Figure I.14 : Schéma d'un réacteur de synthèse de nanotubes de carbone par la Méthode de l'arc électrique [Marcoux 2002].

I.7.2 Ablation laser :

Après que la première construction du laser a été faite en 1960, les physiciens ont immédiatement en fait usage comme un moyen de concentrer une grande quantité d'énergie dans un tout petit volume dans un temps relativement court. La conséquence de cette entrée de l'énergie dépend naturellement des caractéristiques de l'appareil utilisé. Au cours de l'interaction entre le faisceau laser et le matériau, de nombreux phénomènes se produisent en même temps, et chacun de ces phénomènes est influencé par différents paramètres tels que les caractéristiques du faisceau laser, la densité de puissance d'entrée (également appelée la fluence), la nature de la cible et l'environnement qui l'entoure. Par exemple, la cible solide peut simplement chauffer, fondre ou vaporiser en fonction de la puissance fournie.

Bien que cette technique a été utilisée avec succès pour synthétiser des structures liées au fullerène pour la première fois [Kroto et al 1985] synthèse de SWNT par ablation laser au fallu dix ans de recherche. [T.Guo et al 1995]

La méthode consiste à focaliser un faisceau laser pulsé sur une cible constituée du graphite .L'interaction cible –faisceau entraîne l'arrachement de la matière constituant la cible, par pulvérisation, évaporation, voire fracturation mécanique, qui peut ainsi venir se déposer sur un substrat placé en vis-à-vis de la tâche laser .Cette technique permet la synthèse de NTC sans catalyser, elle produite alors majoritairement des MWNT.L'ajout de particules métalliques dans la cible permet également l'obtention de SWNT. [Bethune et al 1993]



Figure I.15 : Schéma de l'appareillage d'ablation laser.

La modification des paramètres de l'impulsion laser permet le contrôle du produit final. Parmi les inconvénients de cette méthode est l'utilisation des lasers de puissance qui rend la méthode coûteuse et donc peu adaptée au niveau industriel. [Zemri 2015]

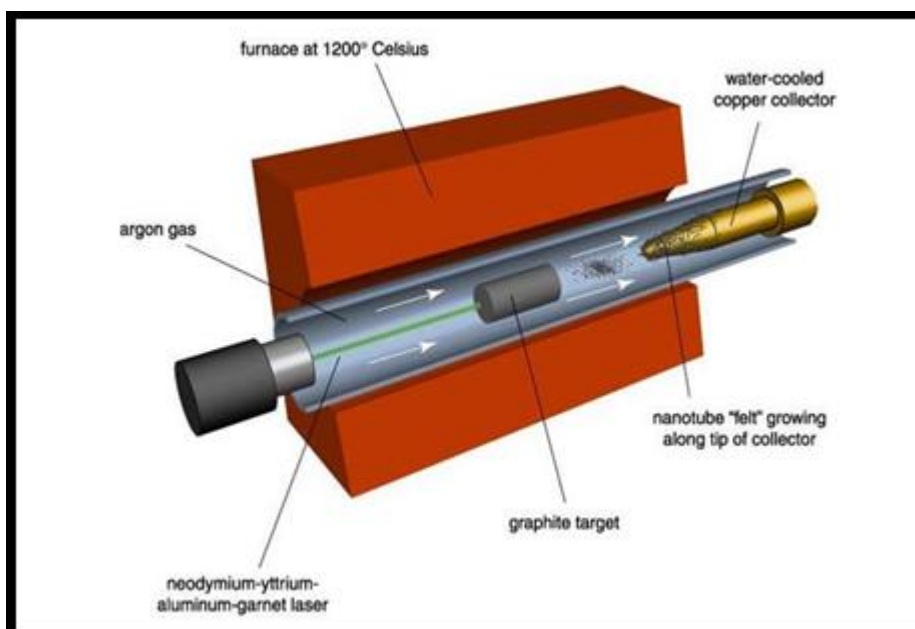


Figure 1.16 : Schéma de l'installation du procédé par ablation laser utilisé pour La synthèse des nanotubes de carbone [Benyounes 2016]

I.7.3 Méthode décomposition catalytique HiPCO :

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

Les nanotubes formés par cette technique sont assez originaux. Ils présentent une large distribution de longueurs (dont des nanotubes très petits), mais contiennent beaucoup de catalyseur résiduel. Cette technique permet la synthèse à grande échelle de nanotubes mono feuillets. Le procédé de fabrication est à flux continu, ce qui est très positif pour une industrialisation. Une société commerciale propose des nanotubes synthétisés par cette technique.

En outre, le fait de pouvoir obtenir des nanotubes avec un diamètre moyen très petit (de l'ordre de 0,7 nm) est un avantage en ce qui concerne les propriétés optiques puisque cela ramène la bande interdite des nanotubes semi-conducteurs vers des régions spectrales où les détecteurs sont les plus sensibles. [Besseghire 2011]

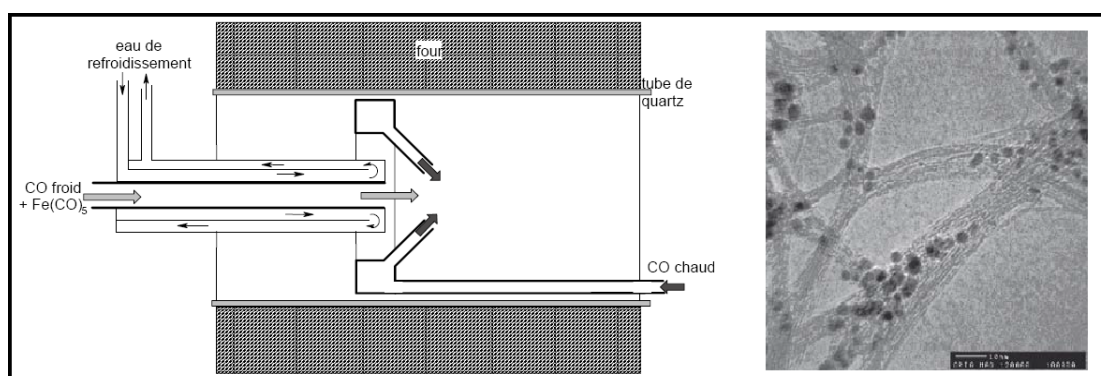


Figure I.17: à gauche : Schéma de la Production de nanotubes par méthode HiPCO [Marcoux2002]. A droite: Image TEM de nanotubes (HiPCO). [Nikolaev 1999]

I.8 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 2012]

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⁻¹K⁻¹) contre 400 pour le cuivre.
- Conductivité électrique : même niveau que le cuivre.

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

I.8.1 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]

La présence de fortes liaisons chimique C-C dans le graphite rend les propriétés des nanotubes de carbone exceptionnelles. En effet une importante énergie, équivalente à 348 KJ.mol⁻¹, est nécessaire pour dissocier une telle liaison. Grâce à ces liaisons fortes entre les atomes, les nanotubes de carbone présente un module de Young équivalent à celui du diamant. De nombreux travaux théoriques entrepris montrent un module d'Young des nanotubes de carbone très élevé : Les calculs de Yakobson et son équipe, [Yakobson 1996] montrent un module de Young de l'ordre de 1Tpa pour une feuille de graphène. De plus, les tests de flexibilité réalisés sur les nanotubes derniers peuvent être soumis à d'importantes contraintes (longitudinales ou transverses) sans montrer de signe de déformation plastique, de fracture fragile ou de réarrangement atomique. Sous l'effet de la contrainte, les défauts produits sont distribués sur l'ensemble de la structure et les atomes de carbone peuvent changer d'hybridation sp² et passer à une Géométrie tétragonale caractéristique d'une

hybridation sp^3 et inversement. Le Nanotube possède ainsi une grande facilité à se courber ou se tordre selon son axe. Selon les calculs du module d'Young réalisés par l'équipe d'Overney, [Overney 1993] sur un SWCNT, le résultat est similaire à celui de Yakobson. En utilisant un modèle empirique [Lu 1997], Lu quant à lui, prévoit un module d'Young de 0.97 TPa pour les nanotubes multi parois et de 1.1 TPa pour les nanotubes mono parois. Il indique aussi que le module d'Young, ainsi que d'autres modules élastiques (cisaillement, ...) sont indépendants des caractéristiques géométriques des tubes (chiralité, diamètre...). Avec une extrémité libre, les nanotubes vibrent sous l'effet du mouvement brownien. En étudiant leur vibration par TEM (Transmission Electron Microscopy), il est possible de remonter à leur module d'Young. [Krishnan et al 1998] obtiennent par cette méthode une valeur de 1.25 TPa avec une marge d'erreur de 0.5 TPa pour des nanotubes mono parois. Par ailleurs, la nano manipulation des nanotubes par AFM a permis de montrer que ces derniers peuvent supporter de larges déformations réversibles et une résistance à la rupture importante. Un nanotube coudé à 180 peut être remis dans une configuration linéaire par nano manipulation à l'aide de la pointe d'AFM [Avouris 1999] ; [Decossas 2001]. L'équipe de [Yu 2000], ont pu mesurer expérimentalement par AFM, des valeurs de résistance à la rupture comprise entre 13 et 52 GPa, valeurs bien plus importante de celle de l'acier (200MPa). Récemment, Huang et al ont montré expérimentalement que des SWCNT pouvaient présenter des caractéristiques de superplasticité. Un nanotube peut ainsi s'étendre à 280% de sa longueur. [Huang 2006]

Tableau I.2: 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.8.2 Propriétés thermiques:

De même que pour les propriétés électroniques, l'unidimensionnalité des nanotubes laisse espérer des propriétés thermiques originales. Le diamant présente la conductivité thermique la

tous les matériaux connus à ce jour environ (103 à $300 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Le plan de graphène possède une conductivité comparable, mais le graphite présente des propriétés moindres dues à l'anisotropie. La structure particulière des nanotubes permet de penser que leur conductivité doit également être grande le long de l'axe du nanotube. [Lassagne 2006]

La mesure des propriétés thermiques d'un nano-objet comme les nanotubes est délicate. Cependant, quelques études expérimentales ont permis de mesurer la conductivité thermique de nanotubes multi feuillets. Leur conductivité est grande, mais significativement plus faible que celle du graphite. Ces résultats sont a priori décevants, mais ils peuvent s'expliquer en considérant le fait que tous les feuillets ont participé à la conduction thermique alors que seul le feuillet externe a été utilisé pour les mesures. Ces considérations permettent d'estimer la magnitude de la conduction d'un tube mono feuillet au même ordre de grandeur que celle du graphite. [Izard 2004] Les matériaux carbonés sont utilisés industriellement pour améliorer la conductivité thermique C'est pourquoi la découverte des nanotubes en 1991 a rapidement conduit à prédire, [Ruoff 1995]. Pour cette nouvelle forme allotropique unidimensionnelle de carbone une conductivité thermique égale ou supérieure à celle du diamant ou du graphite. Les propriétés thermiques de nanotubes, qu'ils soient multicouches ou monocouches, ont encore été relativement peu explorées. Des mesures aboutirent à des valeurs de conductivité thermique longitudinale allant de (1800 à $6000 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$) pour un fagot isolé et à température ambiante. Des valeurs aussi élevées sont imputées à un libre parcours moyen particulièrement élevé pour les phonons (de l'ordre de 100 nm). Une valeur de ($6600 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$) fut obtenue pour un nanotube ($10,10$) isolé et à température ambiante, [Berber 2000]. Ce qui est comparable à la conductivité thermique d'un hypothétique feuillet de graphène isolé. [Bellifa 2015].

I.8.3 Propriétés optiques:

Les nanotubes de carbone possèdent des propriétés optiques intéressantes. En effet, le matériau le plus noir jamais conçu par l'homme est un tapis de nanotubes disposés verticalement, réalisé par des chercheurs l'Université Rice autour du professeur Pulickel Ajayan ; indice de réflexion avec un de $0,045\%$, il est 30 fois plus sombre que le carbone, ce qui lui permet d'absorber $99,9\%$ de la lumière qu'il reçoit. C'est 3 fois « mieux » que ce que permettait l'alliage de nickel-phosphore qui était le matériau réputé le plus sombre. Ces inventions pourraient intéresser les secteurs militaire, de la communication, de l'énergie (solaire notamment), de l'observation, des colorants, etc. [Bellifa 2015] Des études

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

I.9 Applications des nanotubes de carbone:

Du fait de leurs propriétés exceptionnelles, les CNTs sont adaptés pour des Applications multifonctionnelles couvrant une gamme variée de matériaux pour des usages biologiques ou électroniques et en passant par les composites. [Bozlar 2009]

Des nombreuses applications des nanotubes de carbone sont enregistrées dans les différents domaines car leurs propriétés exceptionnelles énoncées précédemment ouvrent de nombreuses perspectives. D'abord les propriétés électriques des nanotubes de carbone semblent en faire un matériau de choix pour l'électronique, la miniaturisation dans ce domaine étant très importante. Les nanotubes conducteurs et pouvant supporter des courants qui font fondre un fil de cuivre de mêmes dimensions, peuvent être considérés un modèle de ce que seront les fils conducteurs utilisés en connectique dans les années à venir. [Rakrak 2018].

La grande rigidité des CNTs, ainsi que leur diamètre nanométrique et leur flexibilité a permis à Dai et al. De réaliser dès 1996 une pointe pour microscopie à champ proche en collant un CNT sur une pointe de microscope à force atomique (AFM). Wong et al. Ont développé une méthode permettant de réaliser de l'imagerie avec un contraste chimique en collant un CNT fonctionnalisé sur une pointe d'AFM commerciale. Plus récemment, Hafner et al. Sont parvenus à faire croître par CVD des CNTs directement sur une pointe d'AFM en Si. Le procédé (imprégnation) est rapide et peu coûteux ; il permet d'obtenir des images de haute résolution d'une qualité exceptionnelle. L'émission de champ par les CNTs est peut-être à l'heure actuelle leur application la Plus prometteuse. De nombreux auteurs ont étudié le phénomène et Saito et al. (Samsung, Corée) ont réalisé des dispositifs comportant une cathode de CNTs et un écran phosphorescent, capables d'émettre dans le visible avec une brillance excellente. Ces dispositifs consomment très peu d'énergie et sont d'un coût de fabrication concurrentiel. Il s'agit de la première application industrielle utilisant des CNTs. [Besseghier 2011]

Il s'agit du principal secteur d'application des nanotubes pour lequel ils sont utilisés comme renforts dans des composites hautes performances (hautes résistances et de faible masse). Ce type de nano composites peut intéresser alors les équipements sportifs comme les structures aéronautiques. Les nanotubes s'avèrent, par exemple dans cette dernière application, être un renfort aux fibres conventionnelles comme celles de carbone. [Veedu 2006].

- Améliorer un matériau est une application importante des nanotubes car ils possèdent une solidité supérieure à celle de l'acier tout en restant léger. On pourrait ainsi les utiliser pour des câbles.
- En médecine, les nanotubes pourraient régénérer des cellules plus rapidement après leur Destruction, Se servir des nanotubes pour des muscles artificiels serait une avancée, notamment pour des engins robotiques destinés à des températures extrêmes, même servir pour des traitements anti-cancer ciblés et moins risqués pour la personne en traitement. [Wei 2001]
- 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. [Tegrara 2017].

I.10 Défaut des nanotubes de carbone:

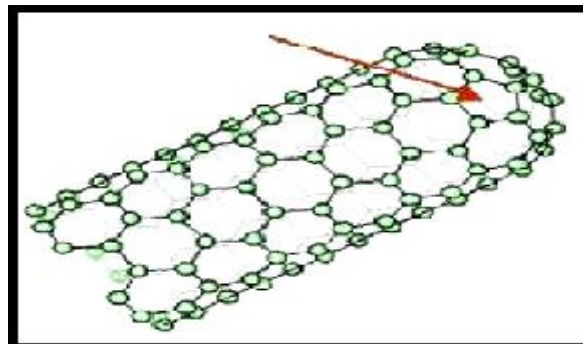


Figure I.18 : Fermeture des nanotubes de carbone

La courbure positive est obtenue par la présence de pentagones (flèche Figure I.18). Il faut ainsi six pentagones à chaque extrémité, soit douze au total, pour satisfaire la Condition de fermeture (condition bien connue des mathématiciens sous le nom de théorème d'Euler).

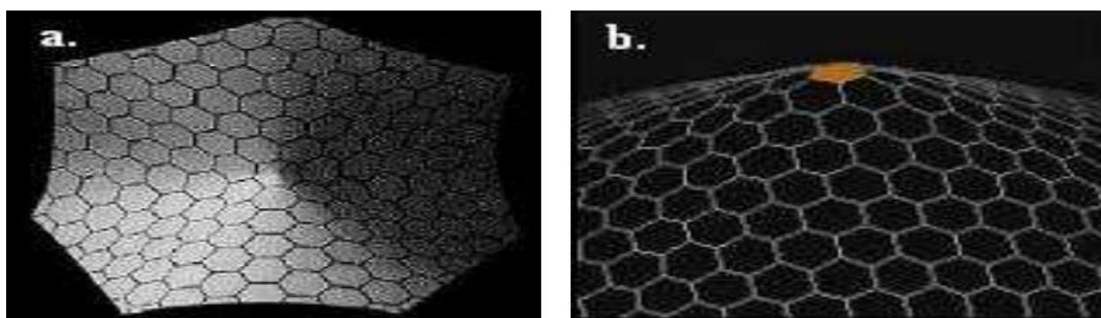


Figure I.19 : Courbure induite dans un réseau graphitique par un :
a. heptagone b. pentagone

Si la courbure provoquée par l'introduction d'un pentagone dans un réseau graphitique est positive, la présence d'un heptagone provoque elle une courbure négative (Figure I.19.a). Il est alors possible, en combinant ces défauts, de faire varier le diamètre du tube ou créer des coudes. Des connexions entre les nanotubes de carbone peuvent aussi être envisagées sous la forme de jonction en Y, T ou en X. (Figure I.20). [Chemi 2018]

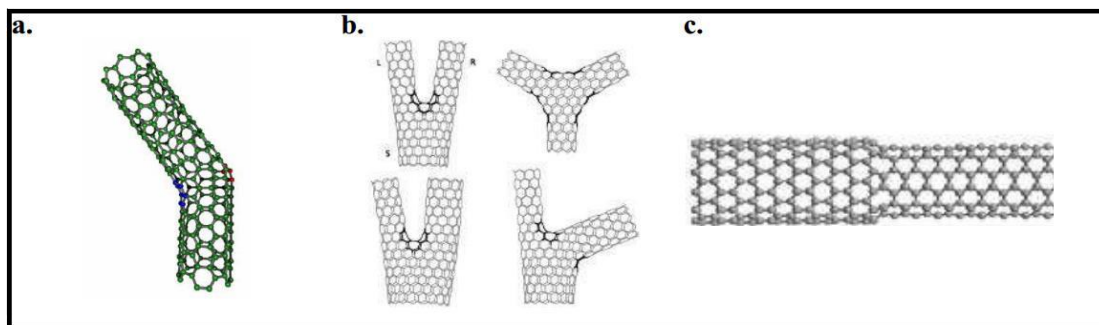


Figure I.20 : Défauts pentagonaux et heptagonaux se traduisant par :

a. Un coude ; b. Des jonctions Y ; c. un changement de diamètre

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

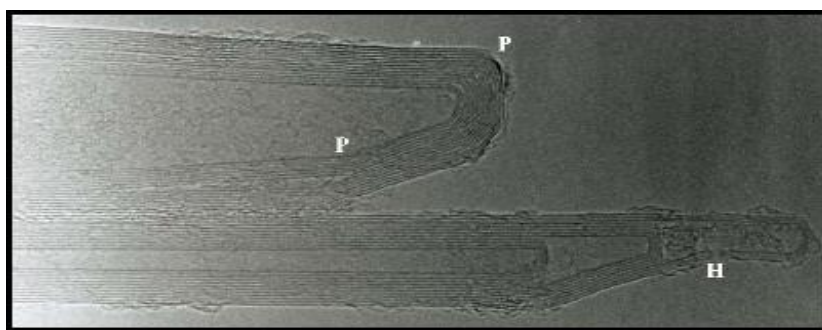


Figure I.21:Image MET des extrémités de deux nanotubes multicouches. On a indiqué quelques-uns des cycles non hexagonaux : (P) indique un pentagone et (H) un heptagone.
[Zidour 2012]

La combinaison de plusieurs de ces défauts sur un tube peut induire un grand nombre de géométries particulières. Ainsi, du fait de l'annulation de leurs courbures respectives à un niveau global mais non à un niveau local, une paire heptagone-pentagone (appelé défaut de Stone-Wales [Stones 1986]) peut provoquer une variation de diamètre et de chiralité le long du tube. [Zidour 2012]

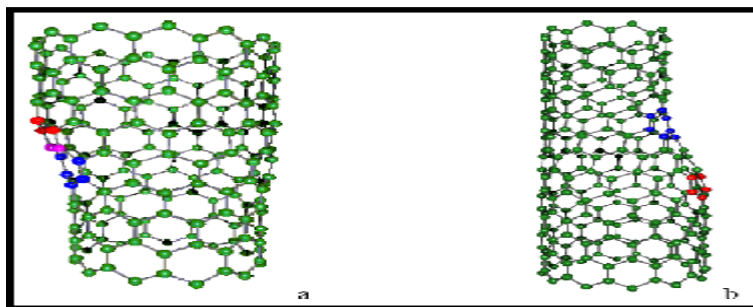


Figure I.22: Introduction d'une paire pentagone-heptagone provoquant une variation de diamètre et de chiralité : a- de (11,0) a (12,0) ; b- de (9,0) a (12,0).

I.11 Inconvénients (Prix, synthèse et toxicité) :

La production industrielle de NTC est encore à ses balbutiements. Néanmoins, depuis quelques années, plusieurs entreprises se sont lancées dans la production en grande quantité.

Aujourd'hui on trouve sur le marché des SWCNT (pureté > 90%) à un prix de: (95\$/1g ; 760\$/10g; 5900\$/100g) et MWNT courts (pureté > 95%) à un prix de: (49\$/1g ; 249\$/25g; 650\$/100g), Les fullerènes C₆₀ (pureté > 99,9%) à un prix de: (175\$/0,5g; 335 \$/1g) [web 1].

La toxicité, un autre inconvénient majeur des NTC, est directement liée à leur taille nanométrique et surtout à leur grand facteur de forme. En effet, tout comme les fibres d'amiante, les NTC peuvent facilement infiltrer les cellules et provoquer à long terme des cancers. Il y a encore très peu d'études sur la toxicité des NTC néanmoins, l'Institut National de Recherche et de Sécurité recommande de prendre le plus de précautions possibles lors de leur manipulation [Chemi 2018].

I.12 Conclusion :

Ce chapitre, qui constitue une revue 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.

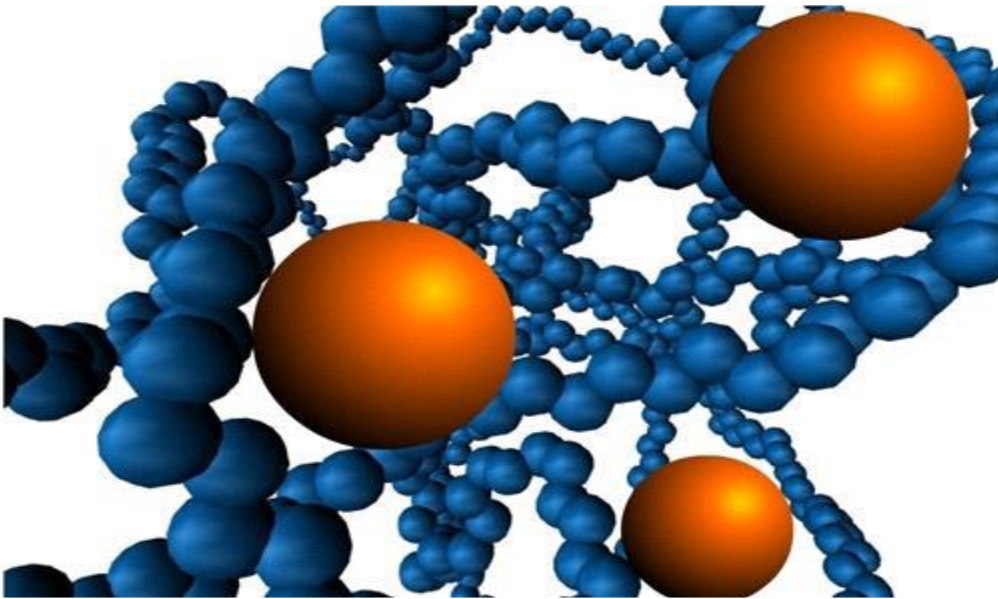
Ensuite, nous avons vu des classifications qui donnent deux types de nanotubes de carbone (mono-feuillets, multi-feuillets), et nous avons détaillé trois méthodes de synthèse de NTC aussi les différentes propriétés des nanotubes (mécanique, électriques, thermiques...) encore leur vaste champ d'application pour cela nous avons noté les inconvénients et nous avons cité les défauts des nanotubes de carbone.

Enfin, Les NTC sont très résistants et excellent matériaux pour le renforcement dans une matrice polymère permet d'obtenir des matériaux nano composites avec des propriétés exceptionnelles.

CHAPITRE II

Généralité sur les Nanocomposites

(polymère –nanotube de carbone)



I.1 Introduction :

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

Les nanocomposites sont des matériaux constitués d'au moins deux phases dont l'une en générale est une phase continue et représente la matrice, et les autres constituent les charges dispersées à l'intérieur de cette matrice. Dans ce chapitre à pour objectif de définir les polymères, leurs types, ainsi que leur utilisation, Ensuite on verra la transition du composite au nanocomposite, en décrivant leurs classification suivant différents types de matrices et Les différents nanorenforts ainsi que leur propriétés. Plus particulièrement on s'intéressera aux nanocomposite à matrice polymère et a renforts de (NTC).

Enfin, nous trouvons trois procédés pour élaborer des nanocomposites a base (polymère / NTC) et deux pour la dispersion des renforts dans la matrice polymère.

II.2 Les Polymères :

Un polymère est défini comme étant une molécule à très longue chaîne qu'on appelle macromolécule. Elle est formée par la répétition d'entités chimiques simples appelées monomères reliées par des liaisons. Les polymères sont synthétisés en reliant des molécules de monomères entre elles par des liaisons chimiques covalentes : ce sont les réactions de polymérisation. Il existe essentiellement deux types de réactions de polymérisation qui se différencient par leur cinétique réactionnelle :

- La polymérisation en chaîne appelée aussi polyaddition, dans laquelle les unités monomères sont additionnées une à une à un centre actif. Une oligomère, constituée de moins de 30 unités, est d'abord généré, avant d'évoluer vers le stade de polymère. Cette voie de synthèse représente à elle seule plus de 90 % de la production mondiale des matières plastiques. La majorité des polymères tels que le polyéthylène, le polypropylène, le polybutadiène, le polystyrène, le polyméthacrylate de méthyle, le polychlorure de vinyle, le poly (acétate de vinyle) et le polyacrylonitrile sont produits par polymérisation en chaîne.

- La polymérisation par étapes connue aussi sous le nom de polycondensation, au cours de laquelle des espèces réactives comportant des groupes fonctionnels réagissent entre elles de manière aléatoire. Elle représente moins de 10 % de la production mondiale des matières plastiques. Les polycondensats fournissent un ensemble de molécules dotées de propriétés nouvelles et à grande valeur ajoutée : matériaux à haute résistance thermique ou chimique, fibres à haute ténacité, mousses rigides à porosité contrôlée, etc. La plupart des polymères techniques comme les polyesters, polyamides, polyuréthanes, polycarbonates, polyamides et polysiloxanes, les polymères cristaux liquides, les polysulfures, et la plupart des thermodurcissables (époxydes, phénol- formaldéhyde) sont produits par polycondensation. [Abdoulaye 2008]

Le terme polymère vient du grec "polus" plusieurs et "meros" parties, ce qui signifie que les polymères sont des matériaux constitués de longues chaînes macromoléculaires. Chaque macromolécule est formée de plusieurs dizaines à plusieurs milliers d'unités de répétition identiques appelées "mères" et liées entre elles par des liaisons primaires. [Zidour 2012]

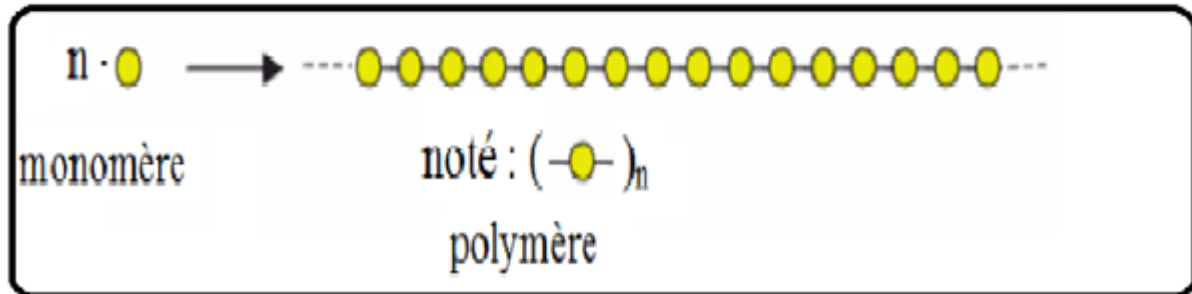


Figure II.1 : Modèle schématique de la synthèse d'un polymère.

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

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

II.2 Classification des polymères :

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

II.2.1 Selon l'origine :

Les polymères classés selon l'origine peuvent être :

II.2.1.1 des polymères naturels :

Ils sont très nombreux et existent dans la nature. On les divise généralement suivant leur provenance végétale, animale ou minérale. [Weiss 2010]

II.2.1.2 Les polymères artificiels :

Sont obtenue par modification chimique de polymères naturels de façon à transformer certaines de leurs propriétés. [Emmanuelle 2002]

II.2.1.3 Des 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. [Tomalia 2001].

II.2.2 selon l'architecture :

Selon Tomalia, les architectures macromoléculaires peuvent être divisées en quatre grandes familles : les polymères linéaires, ramifiés, réticulés et plus récemment, les polymères dendritiques. [Moingeon 2006]

Les polymères d'architecture linéaire sont essentiellement obtenus par des techniques de polymérisation en chaîne (« vivante », depuis de nombreuses années, ou radicalaire contrôlée, plus récemment) ou des réactions de polymérisation par étapes ou polycondensation (entre monomères strictement di fonctionnels). [Sinha 2003]

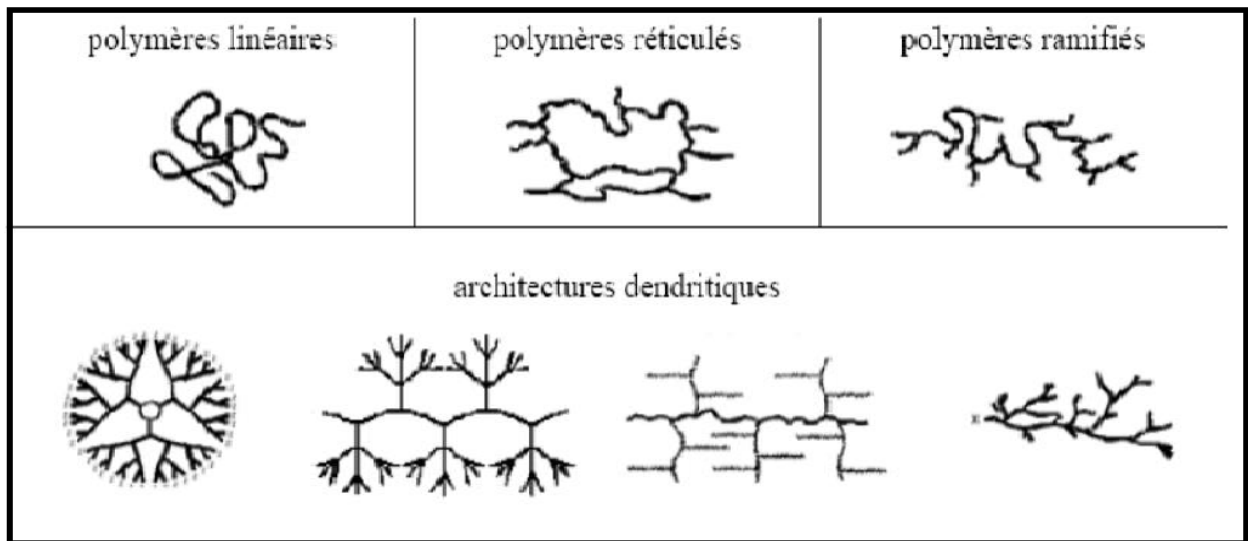


Figure II .2 : Classification des architectures macromoléculaires selon Tamolia. [Tomalia 2001].

II.2.3 selon la structure chimique :

La structure chimique des motifs permet une classification des composés macromoléculaires en homopolymères et copolymères.

II.2.3.1 Les homopolymères :

Sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité, ces homopolymères sont des longues chaînes formées par la répétition d'un monomère, leurs propriétés mécaniques, écoulement à l'état fondu, optique, sont dues à la structure chimique des monomères et à la longueur des chaînes. [Jouenne 2005]

Il existe au sein des homopolymères différentes familles, on trouve: les homopolymères linéaires, branchés et étoilés.

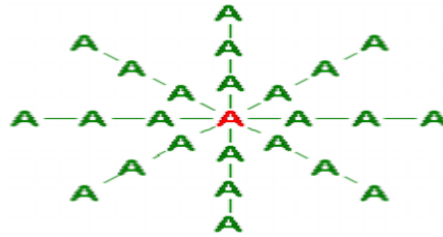
- Les homopolymères linéaires (linear).



- Les homopolymères branchés (branched).



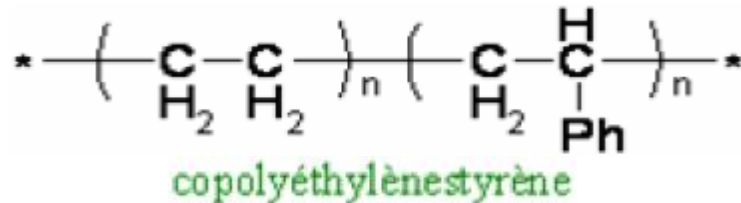
- Les homopolymères tridimensionnels (crosslinked).



(A) est l'unité de l'homopolymère.

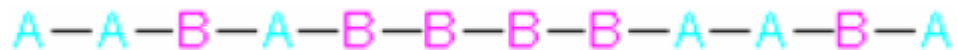
II.2.3.2 Les copolymères:

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



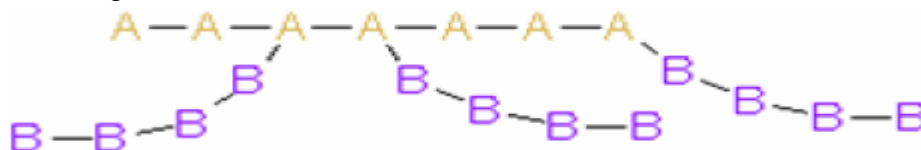
- Le mode alterné.



- Le mode séquencé.



- Le mode greffé.



(A) et (B) seront deux unités différentes du copolymère.

Les polymères, qu'ils soient homo ou copolymères, peuvent être réticulés. Un polymère réticulé est un polymère dont certaines de ses chaînes sont reliées entre elles par des ponts chimiques covalents. La plupart des polymères doivent être réticulés avant leur utilisation. En effet, un polymère est un liquide et pour le maintenir en place, il faut le réticuler. [Zidour 2012].

Tableau II.1: Présente la structure chimique de quelques polymères. [Zidour 2012]

Type de polymère	structure chimique	Domaine d'utilisation
(PE) Polyéthylène	$H_2C=CH_2 \rightarrow \left(\begin{array}{c} C-C \\ \quad \\ H_2 \quad H_2 \end{array} \right)_n \rightarrow$	C'est le matériau d'emballage par excellence. Réservoirs de voitures, bouteilles, flacons, bidons,
(PP) Polypropylène	$H_2C=CH \begin{array}{c} \\ CH_3 \end{array} \rightarrow \left(\begin{array}{c} C-H \\ \quad \\ H_2 \quad CH_3 \end{array} \right)_n \rightarrow$	C'est un plastique dur. On le retrouve dans tous les matériaux de plomberie. bouteilles rigides, intérieures de lave vaisselles, cordes
(PVC) Le polychlorure de Vinyle	$H_2C=CH \begin{array}{c} \\ Cl \end{array} \rightarrow \left(\begin{array}{c} C-H \\ \quad \\ H_2 \quad Cl \end{array} \right)_n \rightarrow$	Tuyauterie, pots de margarine, blisters, bouteilles d'eau minérale, barrières extérieures, films d'emballage alimentaire
(PTFE) Le polytétrafluoroéthylène	$F_2C=CF_2 \rightarrow \left(\begin{array}{c} F-F \\ \quad \\ F \quad F \end{array} \right)_n \rightarrow$	Tuyaux, joints et raccords. Robinet et vannes pour matériel de laboratoire, revêtements anti adhérents
(PS) Le polystyrène	$H_2C=CH \begin{array}{c} \\ Ph \end{array} \rightarrow \left(\begin{array}{c} C-H \\ \quad \\ H_2 \quad Ph \end{array} \right)_n \rightarrow$	emballages, pots de yaourt, armoire de toilette, cassettes audio, brosses à dents
(POE)		On l'utilise en cosmétique

Le polyoxyde d'éthylène	$\text{H}_2\text{C}-\text{CH}_2 \text{---} \left(\text{---} \underset{\text{H}_2}{\text{C}} \text{---} \underset{\text{H}_2}{\text{C}} \text{---} \text{O} \text{---} \right)_n \text{---}$	
(PMMA) Le polyméthacrylate de méthyle	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{H}_2\text{C}=\text{C} \\ \\ \text{O}=\text{C}-\text{OCH}_3 \end{array} \text{---} \left(\text{---} \underset{\text{H}_2}{\text{C}} \text{---} \underset{\text{COOCH}_3}{\text{C}} \text{---} \right)_n \text{---}$	Plaques pour vitres, globes feux arrière de voiture, lentilles d'appareils photo
(PA) Les polyamides avec l'exemple du nylon	$\text{H}_2\text{N}-(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$ $\text{---} \left(\text{---} \underset{\text{H}}{\text{N}} \text{---} (\text{CH}_2)_{10} \text{---} \overset{\text{O}}{\parallel} \text{C} \text{---} \text{O} \text{---} \right)_n \text{---}$	On s'en sert pour la fabrication de fibres synthétiques

II.3 Utilisation des polymères :

Depuis l'aube de la civilisation, l'homme a utilisé des polymères naturels comme matière à partir de laquelle il pourrait produire des armes, des outils, des vêtements, et un abri. Aujourd'hui, les polymères naturels qui comprennent des matériaux tels que le bois, le caoutchouc, la laine, le coton, la soie, le cuir et le papier ont été par des certaines de polymères synthétiques, communément connu sous le nom de plastique.

Les polymères, ces dernières années, ont trouvé une utilisation dans une variété d'application. Certains sont utilisés dans des applications dentaires et médicales. Leur excellente isolation les rend bien adaptés aux applications électriques. En outre, ils ont un usage intensif comme matériaux d'emballage. En termes d'application mécanique, dans certains systèmes, les roulements, les pignons, les joints sont faits de plastique. En remplacement des métaux, ils sont maintenant largement utilisés pour la fabrication des tubes pour le transport des fluides. [Hachour 2010]

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 revêtement et peintures, dans les emballages, les pneus, les fibres textiles, les produits médicaux, chirurgicaux, prothèses, produits d'hygiène, articles de loisirs, pièces de structures dans les véhicules de transport, les équipements électriques, les circuits électroniques, les colles. Ils s'infiltrèrent aussi dans l'alimentation, les produits cosmétiques...etc. [Nodal 2001]

II.4 Présentation des matériaux composites :

II.4.1 Définition d'un matériau composite :

Les matériaux composites sont constitués d'au moins deux phases élémentaires différentes. L'une de ces phases est continue, c'est la matrice (résistance mécanique faible) à l'intérieur de laquelle est dispersée la seconde phase, nommée renfort (résistance mécanique plus élevée). Lorsqu'une contrainte est exercée sur un matériau composite, c'est la matrice qui va emmagasiner les contraintes puis les transmettre vers les renforts. L'intérêt élémentaire d'une structure composite est par conséquent la rigidité mécanique. Cependant, du fait de leurs différentes propriétés exceptionnelles, les CNTs peuvent idéalement servir de renforts dans les matrices polymères pour des applications électroniques ou thermiques. [Chemi 2018]

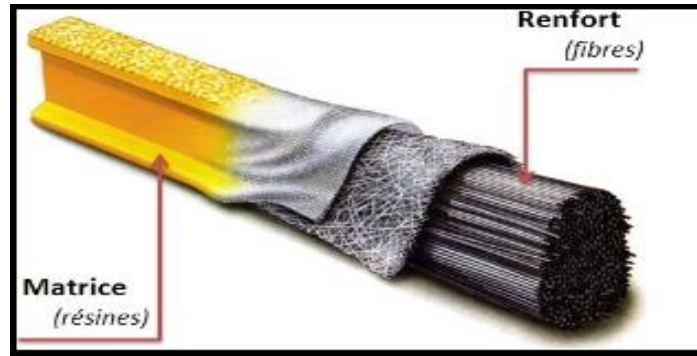


Figure II .3 : matériau composite

Un matériau composite est un matériau hétérogène composé d'au moins deux matériaux non miscibles. Il est constitué de renforts se trouvant dans une matrice qui les protège. Les renforts vont supporter les efforts mécaniques, la matrice sert de liant et répartit les efforts mécaniques. Le matériau composite a donc des propriétés spécifiques que ses matériaux constitutifs seuls ne possèdent pas. Les renforts peuvent être des fibres courtes ou des fibres longues (carbone, verre, kevlar, fibres végétales,...). Les matrices peuvent être des matrices organiques (thermodurcissables ou thermoplastiques), céramiques ou métalliques. [Maxime 2011]

Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue .La phase discontinue, appelée renfort ou matériau renforçant, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue, appelée matrice. [Agoudjil 2008]

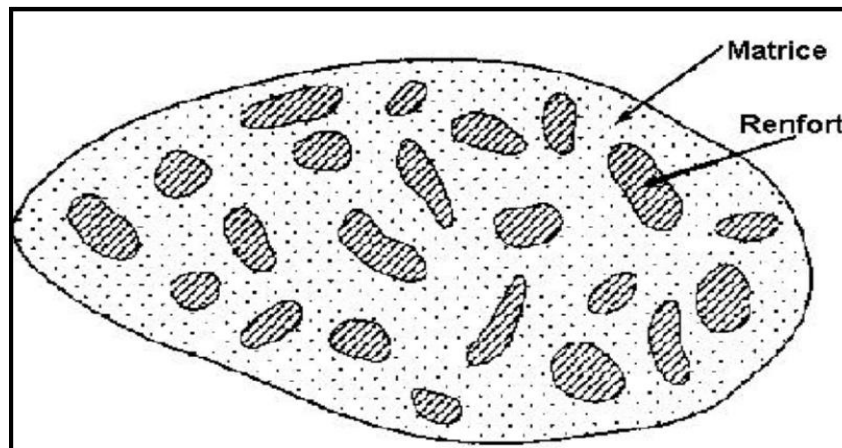


Figure II.4 : Schéma illustratif d'un matériau composite

II.4.2 Les domaines d'application des composites :

II.4.2.1 Les composites dans la construction civile :

L'utilisation des composites dans la construction civile est un nouveau créneau, qui commence à intéresser nos bâtisseurs. Le nombre de dégâts causés par les séismes à travers le monde a poussé les chercheurs à s'intéresser aux composites. Le handicap majeur de l'utilisation des matériaux composites dans la construction civile, reste leur cout, qui est encore excessif. L'utilisation des composites renforcés de fibres de carbone, en complément

des composites à fibre de verre (TD et TP) pourra se développer dans le secteur de la construction civile lorsque leur prix deviendra inférieur à 6€/kg. [Menail 2009]

Les composites apportent au bâtiment la souplesse des formes, la résistance aux contraintes climatiques, et les composites renforcés de fibres de carbone la résistance aux séismes. L'utilisation des composites dans le bâtiment ne pourra se développer que si les prescriptions techniques actuelles sont mieux adaptées à leur spécificité. [Ait Atman 2011]

II.5 Généralités sur les nanocomposites :

II.5.1 Définition d'un nanocomposite :

Qu'est-ce qu'un Nanocomposite? Le nanocomposite à base polymérique est un mélange de nanoparticules appelées nano-charges et d'une résine polymérique. Le produit qui en découle possède de meilleures propriétés mécaniques, Un nanocomposite, également appelé «matériau hybride », est défini par Sanchez comme étant un « système organon minéral ou biominéral dans lequel l'une au moins des composantes, organique ou inorganique, se situe dans le domaine de taille compris entre le dixième de nanomètre et la dizaine de nanomètres ».

Les matériaux hybrides peuvent être classés selon la composition chimique relative des composantes organiques et minérales ou par la nature des interactions mises en jeu entre les deux entités. [Xabier 2012]

Les nanocomposites 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 nanocharges peuvent être monodimensionnelles (NTC), bidimensionnelles (argiles en feuillets) ou encore tridimensionnelles (nanosphères). [Penu 2008]

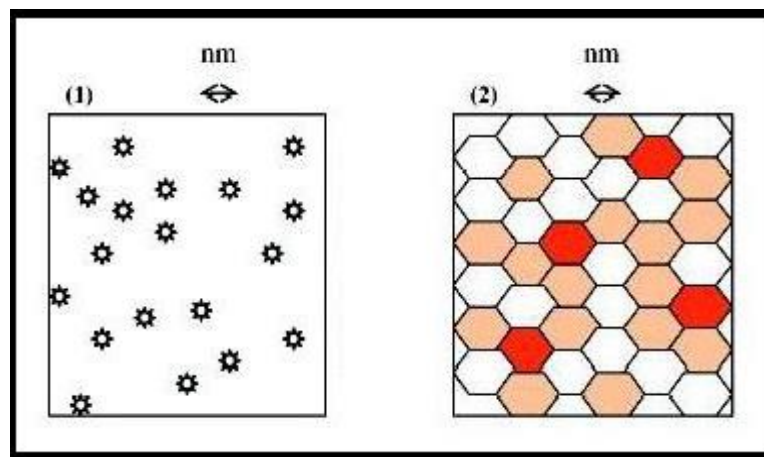


Figure II.5 : Définition morphologique de nanocomposites :

- (1) Composite dans lequel les renforts ont une dimension inférieure ou égale au nanomètre.
- (2) Matériaux résultant de mélanges multiphasiques, dont la répartition en tailles caractéristiques est voisine de la centaine de nanomètres. [Tagrara 2017]

Tableau II.2 : Avantages et inconvénients de l'ajout de nanoparticules aux polymères.
[Koo 2006]

Propriétés améliorées	Inconvénients
-Propriétés mécaniques (ténacité, rigidité). -Barrière aux gaz. -Retardateurs de flammes. -Expansion thermique. -Conductivité thermique. -Résistance chimique. -Renforcement.	-Augmentation de la viscosité (processabilité). -Difficultés de dispersion. - Coloration noire lorsque des particules de carbone sont utilisées.

II.5.2 Différences entre composite et nanocomposite :

Un composite est un matériau en phase solide constitué d'au moins deux constituants dont les qualités respectives se complètent pour former un matériau aux performances globales améliorées. Les matériaux composites contiennent des inhomogénéités mais qui sont suffisamment petites pour que les matériaux restent homogènes à l'échelle macroscopique.

Des matériaux composites existent naturellement, comme le bois, constitué de lignine dans lequel sont placés des fibres de cellulose.

Ce qui diffère dans le cas des nanocomposites, est la taille des charges qui sont présentes dans la matrice. Leurs tailles sont de l'ordre de 10 nm et ils sont présents sous différentes formes: monodimensionnelles (NTC), bidimensionnelles (graphène et argile) ou tridimensionnelles (nanosphère). L'os est un exemple de nanocomposite.

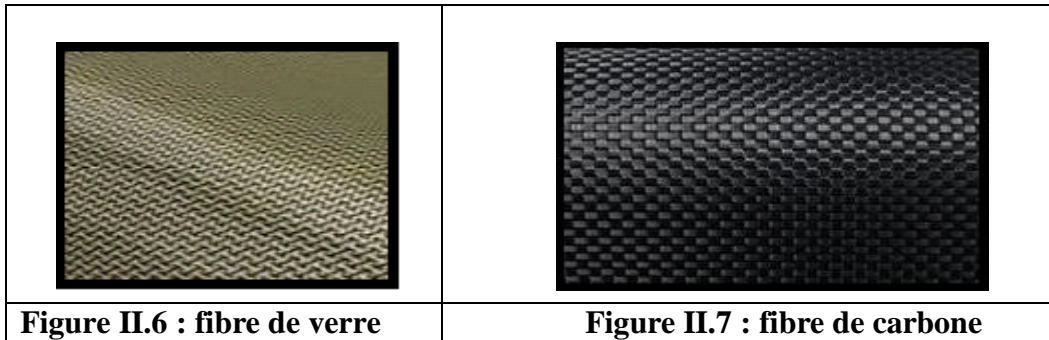
Etant donné que les charges ajoutées dans les matrices sont de petites tailles, la surface interfaciale est donc plus grande, ce qui permet une amélioration notable des propriétés en comparaison au composite classique. De plus, la teneur en charge est jusqu'à 20 fois inférieure à celle utilisée pour des charges macroscopiques. [Chantal 2010]

II.6 Les différents nanorenforts :

- **Le renfort**

Le renfort se présente généralement sous forme de fibres courtes ou longues. Celles-ci possèdent une bonne résistance à la traction, mais une résistance à la compression faible. Les fibres peuvent être de différentes natures, telles que :

Verre, carbone, carbure de silicium,... [Chemi 2018]



Les renforts ont au moins une de leurs dimensions morphologiques inférieure à 100 nm et peuvent être classés en fonction de leur géométrie.

II.6.1 Nanoparticules à trois dimensions nanométriques:

Les trois dimensions de la particule sont de l'ordre du nanomètre. Dans cette catégorie on compte, par exemple :

- Les agrégats d'atomes
- Les nanoparticules métalliques (or, fer, cobalt, argent, platine...)
- Les fullerènes

Le gain de propriétés physiques particulières (optiques, électriques, magnétiques...) est recherché lors de l'ajout de ce type de particule ; le renfort mécanique n'est ici que secondaire. [Tagrara 2017]

II.6.2 Nanoparticules à deux dimensions nanométriques : nanofibres

Les nanofibres sont des particules dont deux dimensions sont de l'ordre du nanomètre. La troisième est beaucoup plus grande. La grandeur caractéristique est le facteur de forme. Il est défini comme le rapport de la longueur sur le diamètre de la fibre et est souvent supérieur à 100. Il existe des fibres creuses, les plus connues étant les nanotubes de carbone, et des fibres pleines (nanofils). [Tagrara 2017]

II.6.3 Nanoparticules à une dimension nanométrique : feuillets

Les feuillets possèdent deux directions privilégiées. La particule possède une dimension de l'ordre du nanomètre et les deux autres de l'ordre du micromètre. Le facteur de forme est alors défini comme le rapport de la longueur du feuillet sur l'épaisseur. L'arrangement des feuillets et leur orientation vont engendrer les propriétés souhaitées. Cette famille de particules est issue de matériaux naturellement feuilletés. Les principaux précurseurs utilisés pour la fabrication de nanocomposites à matrice polymère sont d'une part les hydroxydes doubles à feuillets et d'autre part, les argiles gonflantes aussi appelées smectites. Ces nanofeuillets sont caractérisés respectivement par des charges positives et négatives en surface. [Tagrara2017]

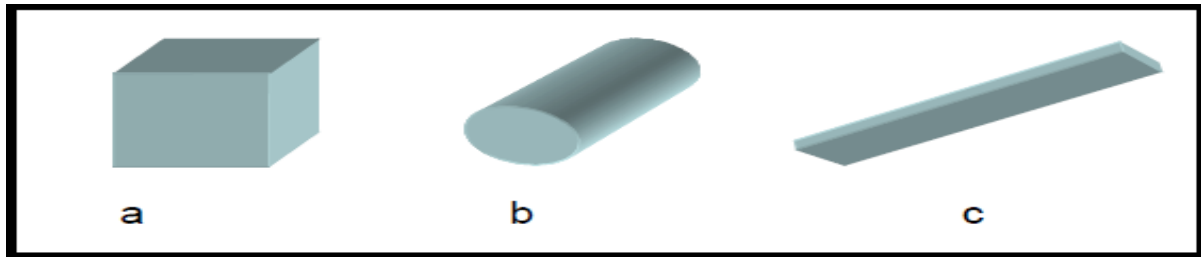


Figure II.8 : Représentation schématique des différents renforts. (a) nanoparticule ; (b) nanofibre ; (c) feuillet [Wautelet 2003].

II.7 Classification des nanocomposites selon la nature de la matrice :

• Matrice

Différentes classes de matériaux peuvent servir de matrice pour un matériau composite. Ainsi, on peut principalement citer trois types de matrices :

- celles dites organiques, qui regroupent essentiellement les polymères ;
- les métalliques (aluminium, nickel,...) ;
- les céramiques (carbure de silicium).

L'utilisation de matrices métalliques renforcées par des CNTs fut d'actualité à une période, mais celle-ci a été rapidement écartée pour laisser la place aux polymères. [Chemi 2018]

La classification classique des composites peut être appliquée 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 degrés pour une matrice métallique et jusqu'à 1000 degrés pour une matrice céramique. [Xabier 2012]

La matrice a pour rôle de :

- ❖ Lier les fibres de renforts.
- ❖ Répartir les contraintes.
- ❖ Apporter la tenue chimique de la structure.
- ❖ Donner la forme désirée au produit final.

Le schéma ci-dessous arbore les différentes familles de matrices. [Kassimi 2011]

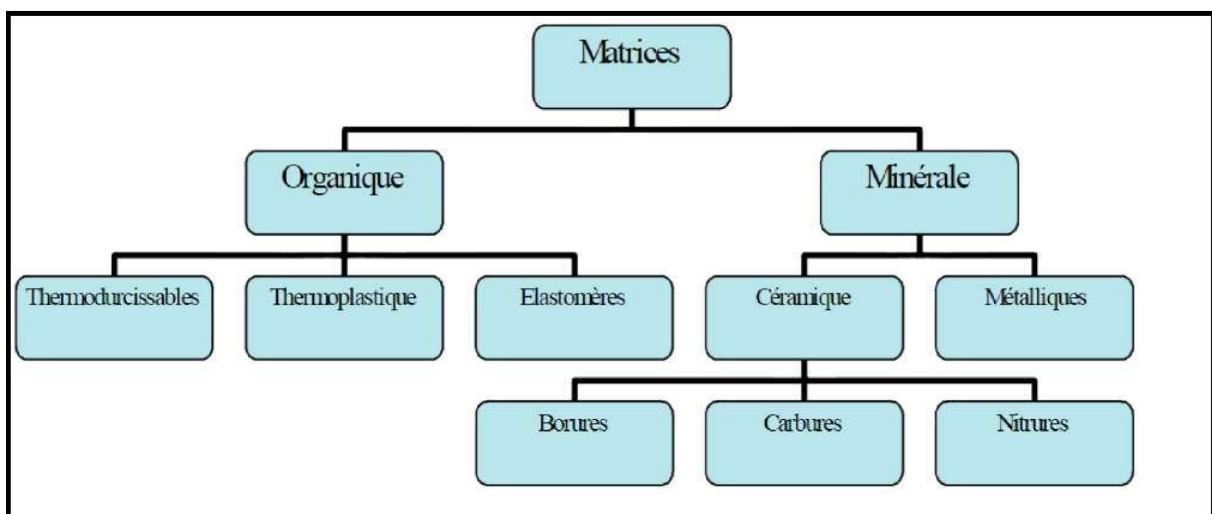


Figure II. 9: Les Différentes familles de matrice.

II.7.1 Les composites à matrice organique :

Généralement, les polymères organiques sont utilisés comme matrices dans les matériaux composites, elles assurent le transfert des charges entre les renforts du composite, de les protéger des chocs, des frottements et de l'environnement extérieur. En outre, elle présente l'avantage d'être chimiquement réactive, ce qui permet de liaisons fortes avec le renfort. Elle apporte aussi la tenue chimique de la structure et enfin d'assurer la forme de la structure. Les polymères organiques sont choisis selon le domaine d'utilisation du matériau composite. Cela a donné différentes matrices utilisées selon la fonction pour laquelle le composite est destiné. Ce qui a donné naissance à un matériau nouveau, modulable et adaptable aux caractéristiques mécaniques exigées. Il existe trois grandes familles de polymères: Polymères thermoplastiques, Polymères thermodurcissables et Élastomères. [LFMC 2001]

II.7.1.1 Les Matrices Thermodurcissables (TD):

Contrairement aux matrices thermoplastiques, les matrices thermodurcissables (ou résines thermodurcissables) ne peuvent être mises 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, les matrices thermodurcissables possèdent des propriétés mécaniques et thermiques plus élevées que les matrices thermoplastiques. [Tagrara 2017]

Cette caractéristique confère à ces résines de meilleures performances thermomécaniques. Ces polymères ne sont pas recyclables, et ce phénomène pose un problème, qui n'a pas encore de solution fiable.

Les principales résines thermodurcissables sont :

- **Les vinylesters** : On peut la considérer comme une variante des polyesters produite à partir d'acides acryliques. Elles possèdent une bonne résistance à la fatigue et un excellent comportement à la corrosion, mais demeure combustible.

- **Les phénoliques** : Elles sont issues de la polycondensation du phénol et du formol se caractérise par une bonne tenue au feu et à hautes températures, elles sont fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à colorer et à mettre en œuvre.

- **Polyimides** : Ces résines sont surtout utilisées dans les composites HP, lorsque l'on cherche une bonne stabilité sous hautes températures ($>250^{\circ}\text{C}$). Elles restent toutefois très onéreuses et difficiles à mettre en œuvre.

- **Les résines époxydes**: Les résines époxydes sont des résines thermodurcissables qui réticulent de façon irréversible. Elles polymérisent à l'aide d'un durcisseur et d'un accélérateur. La polymérisation a lieu à température ambiante également. [Zidour 2012]

Le tableau suivant regroupe les caractéristiques physiques et mécaniques de différents types de résines thermodurcissables:

Tableau II.3: Propriétés Des Résines Thermodurcissables. [Ait Atman 2011]

Matrice TP	Masse Volumique (Kg.m-3)	Module d'élasticité Longitudinal (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %
Epoxyde	1200	4500	1600	0.4	130	2
Phénolique	1300	3000	1100	0.4	70	2.5
Polyester	1200	4000	1400	0.4	80	2.5
Polycarbonate	1200	2400	/	0.35	60	/
Vinyl-ester	1150	3300	/	/	75	4
Silicone	1100	2200	/	0.5	35	/
Uréthane	1100	700 à 7000	/	/	30	100
Polyimide	1400	4000 à 19000	1100	0.35	70	/

II.7.1.2 Les Matrices Thermoplastiques (TP) :

La famille des matrices thermoplastiques (on parle de "plastique") est très vaste et peut être séparée en plastique de grande diffusion et en plastique technique. Les plastiques de grande diffusion sont mis en œuvre soit par injection pour obtenir des objets moulés, soit par extrusion pour obtenir des films, des plaques, des tubes, des profilés, etc. Les plastiques techniques sont généralement mis en œuvre par injection. Parmi les résines thermoplastiques, nous citerons : le polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le polystyrène (PS), le polyamide (PA), le polycarbonate(PC), etc.

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. [Tagrara 2017]

Les principales matrices TP utilisées (possédant tous une tenue en température supérieure à (100 °C) sont les suivantes:

- Polyamide (PA): tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures.
- Polytéraphthalate éthylénique et butylénique (PET, PBT) : bonne rigidité, bonne ténacité.
- Polycarbonate (PC): tenue au choc.
- Polysulfure de phénylène (PPS): résistance à l'hydrolyse.
- Polyoxyméthylène (POM): bonne tenue à la fatigue.
- Polysulfure (PSU et PPS): bonne stabilité chimique, peu de fluage, tenu au chaud.
- Polypropylène (PP): peu onéreux et assez stable en température, mais combustible.

De plus en plus, on utilise des thermoplastiques (tenue thermomécanique est de l'ordre de 140°C), en particulier les suivants: - Polyamide-imide (PAI); - Polyéther-imide (PEI); - Polyéther-sulfone (PES); - Polyéther-éther-cétone (PEEK).

Dans le tableau qui suit des Propriétés physiques et mécaniques de plusieurs types de résines Thermoplastiques sont présentés: [Zidour 2012]

Tableau II.4: propriétés physiques et mécaniques des thermoplastiques. [Zidour 2012]

Matrice TP	Masse Volumique (kg.m3)	Module d'élasticité longitudinal (MPa)	Coefficient De Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPA	Allongement à rupture%
PP	900	1200	0.4	30	20 à 400
PPS	1300	4000	/	65	100
PA	1100	2000	0.35	70	200
PES	1350	3000	/	85	60
PEI	1150	3300	/	105	60
PEEK	1300	4000	/	90	50

II.7.1.3 Matrices élastomères :

Les élastomères, sont fortement répandus dans le domaine de l'industrie. La multiplicité des utilisations des élastomères provient de caractéristiques mécaniques très intéressantes:

- Capacité à subir de grandes déformations sous faible compressibilité.
- Capacité à dissiper de l'énergie, phénomène qui permet d'obtenir des propriétés d'isolation vibratoire et acoustique. Le préfixe "élasto" rappelle les grandes déformations élastiques possibles, tandis que le suffixe "mère" évoque leur nature de polymères, et donc leur constitution macro moléculaire. A l'état brut, le caoutchouc n'a guère de possibilités d'emploi pratique. Pour obtenir un produit présentant de meilleures propriétés mécaniques, le caoutchouc brut doit subir un traitement chimique appelé vulcanisation : ce procédé consiste à

malaxer du caoutchouc brut, à y ajouter du soufre et à chauffer le mélange. L'ensemble se transforme en un matériau élastique, stable dans une gamme de température beaucoup plus large, et résistant au fluage sous contrainte. Ce procédé de vulcanisation, fut découvert accidentellement par Goodyear en 1839. [ElSawi 2010].

II.7.2 Les Matrices Minérales:

II.7.2.1 Les Matrices Métalliques :

Les polymères métalliques ou les matrice métallique ont été développés à partir des années 1960-1965 en deux vagues successives. Des efforts importants de recherche ont été menés aux États-Unis et en France dans les années 60 autour d'un composite à matrice métallique. Ce composite métal-métal était pénalisé par le coût très élevé de la fibre. À cette date, les applications envisagées étaient exclusivement orientées vers l'aéronautique et l'espace. L'utilisation de matériaux composites à des températures supérieures à (300°C). Les plus employées sont les métaux légers et leurs alliages en particulier l'aluminium, le titane et le nickel. Voici quelques composites à matrices métalliques:

Tableau II.5: les composites à matrice métallique. [Ait Atman 2011]

Symbole	Définition
CMAI	composite à matrice aluminium
CMM	composite à matrice métallique
CMMg	composite à matrice magnésium
CMTi	composite à matrice titane
PAN	Polyacrylonitrile
PCS	Polycarbosilane
PTCS	Polytitanocarbosilane

II.7.2.2 Les Matrices céramiques :

Dans les années 80, la disponibilité de nombreux nouveaux matériaux céramiques devait relancer les recherches dans ce domaine avec des perspectives de développement industriel plus encourageantes. Des exemples d'applications industrielles ont été développés dans l'automobile, à l'initiative de l'industrie japonaise.

Lorsque les températures d'utilisation sont supérieures à (1000°C), on a recours aux polymères céramiques. Ces matériaux sont développés essentiellement dans le domaine aérospatial en tant que structure thermique en raison de leur haute résistance thermomécanique spécifique. [Ait Atman 2011]

L'ajout de renfort dans une matrice céramique peut produire un composite plus ductile pouvant absorber plus d'énergie mécanique compare le comportement d'un composite à matrice céramique avec la matrice pure. L'ajout du renfort augmente la ductilité, mais réduit la contrainte à la rupture. La rigidité, au départ, est la même, mais après un certain point, le composite se déforme plastiquement grâce à sa ductilité. Avec les CMM, l'objectif est d'augmenter la rigidité du matériau. Or avec les CMC, l'objectif est d'obtenir un matériau plus ductile, donc d'une certaine façon à l'inverse des CMM. [Zhang 2006]

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

Un nano composite de polymère (ou PNC, polymernanocomposite en anglais) est constitué par un ou plusieurs polymères avec des nanoparticules ou nanocharges 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 multiphasés 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, telles les nanotubes de carbone et les argiles, sont de plus en plus utilisées ces dernières années. [Xiao 2007].

La particularité des nano composites 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.9 Propriétés des nano composites (polymères /NTC):

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

II.9.1 Propriétés thermiques nanocomposites (NTC/polymère) :

La plupart des polymères présentent une conductivité thermique très faible (entre 0,1 et 0,4 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$). [Han et al 2011] Les conductions thermiques aux interfaces NTC/polymère et NTC/NTC ont été évaluées. S'il apparaît que l'interface entre les nanotubes et le polymère n'est pas bonne (le transfert de phonons entre ces deux phases n'est pas assuré [Huxtable et al 2003], D'autres études ont confirmé expérimentalement que l'alignement des nanotubes est bénéfique au transfert de chaleur dans le nanocomposite. Le chevauchement des nanotubes est alors accentué et le nombre de contacts NTC/NTC est réduit par rapport à une orientation aléatoire en 3 dimensions [Gonnet et al 2006]. Grâce à leur conductivité thermique intrinsèque exceptionnelle et à leur grand facteur de forme qui leur permet de former un réseau à de faibles fractions volumiques, les nanotubes de carbones apparaissent comme des candidats tout à fait pertinents [Choi et al 2001], [Hong et al 2008].

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). [Wang 2009]

Les principales améliorations recherchées par l'incorporation de l'argile à des polymères sont la stabilité thermique et la tenue au feu. En effet, l'ajout de ces charges améliore et stabilise les Polymères thermiquement. Cette stabilité thermique est généralement évaluée par analyse thermogravimétrie sous atmosphère inerte ou oxydante. L'existence d'une argile ou silicates lamellaires exfoliés dans une matrice polymérique augmente sa température de dégradation [Zhu 1999] [Yang 1999], ce qui valorise le polymère et permet son utilisation à de plus hautes températures. Un autre objectif souvent désiré est l'augmentation de la résistance à la chaleur ou au feu. Les polymères organiques supportent mal les températures élevées et se décomposent rapidement. Pour améliorer ce comportement, les charges doivent augmenter la tortuosité dans la matrice, diminuant ainsi la diffusion, ou bien réagir lors de la montée en température en subissant des transformations endothermiques. C'est le cas par exemple du polyamide 6 dont la tenue thermique a été améliorée de 87 °C par l'ajout de 4 % de montmorillonite organophile. [Kojima 1993]

D'autres propriétés ont également été mises en évidence avec l'ajout de nano charges, telle que l'augmentation de la biodégradabilité, la stabilité dimensionnelle, les caractéristiques optiques, la conductivité ionique ou encore des propriétés électriques dans les polymères conducteurs (CPC) [Stejskal al 2012]

II.9.2 Propriétés mécaniques des nanocomposites (NTC/polymère) :

Les propriétés mécaniques sont influencées de manières différentes par l'ajout de NTC par rapport aux propriétés électriques. En effet, même si l'addition d'une faible quantité semble être bénéfique, l'ajout d'un taux élève de nanotubes n'entraîne pas forcément une amélioration des propriétés mécaniques. Il crée souvent une modification conséquente du comportement mécanique, avec notamment l'apparition de nombreux défauts (dus aux agglomérats) ainsi qu'une perte de cohésion entre le polymère et les NTC. De ce fait, de plus en plus de chercheurs visent à fonctionnaliser les NTC afin d'améliorer l'interface charge/polymère. Ils modifient chimiquement les NTC afin de les comptabiliser avec du polyuréthane. Ils arrivent ainsi à améliorer les propriétés mécaniques en augmentant la force de rupture de 370 %. On trouve dans la littérature une grande diversité de résultats concernant les propriétés mécaniques des nanocomposites polymère/NTC en fonction des différentes affinités matrice/charge. [Aurélié 2010]

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

lorsque la matrice et les charges possèdent une énergie interfaciale suffisante pour permettre le transfert des efforts de la matrice au renfort. La dispersion des nanotubes dans une matrice polyéthylène téréphtalate permet d'augmenter le module d'Young du polymère de (1,5 GPa à 1,9 GPa) ainsi que la contrainte à la rupture de (60 MPa à 68 MPa) avec (2%) de (NTC) [Kim 2007]. 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. [Xiao 2007]

II.9.3 Propriétés électriques des nanocomposites (NTC/polymère) :

La littérature cite énormément de travaux de recherche visant à mettre au point un matériau composite à base de CNTs avec des performances électriques satisfaisantes. Les différentes approches s'intéressent notamment à favoriser l'apparition du phénomène de percolation qui met en évidence le passage du caractère isolant à celui de conducteur du composite. Hart et al ont fabriqué un composite à base de CNTs et une matrice polymère en polystyrène ayant une conductivité électrique de 10 S/cm à 2 wt% en CNTs. [Chemi 2018]

Les polymères sont caractérisés par leurs effets isolants notamment les thermoplastiques, dans le but de diminuer leurs résistivités afin d'assurer des propriétés conductrices et antistatiques, ils sont renforcés par des amochages de noir de carbone ou des particules métalliques qui ont de bonnes propriétés électriques, permettant la réduction de l'accumulation de charges statiques de surface, et la diminution des effets des radiations électromagnétiques sur les équipements électroniques. Un autre exemple est l'ajout des charges est dans les peintures pour colorer, mais également pour améliorer la conduction électrique et permettre les dépôts par cataphorèse. [Amarelis 2005]

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 1S.m^{-1} grâce à l'incorporation de très faibles fractions massiques de nanotubes de carbone. [Sandler et al 2003]

II.10 Procédés d'élaboration des nanocomposites (NTC/polymère)

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

La liaison entre la matrice et les renforts est un phénomène physico-chimique fondamental qui est créée lors de la phase d'élaboration du matériau composite. C'est l'interface

(matrice/renfort) qui sera déterminante au niveau des propriétés finales du composite, et notamment du point de vue mécanique. [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], [Ajayan 2000]. Il s'agit principalement de travailler au niveau de la cohésion entre les deux éléments constitutifs du composite. Ceci peut être réalisé grâce à une modification de surface des (CNTs) avant leur insertion dans la matrice.

II.10.1 Techniques de la mise œuvre :

Les méthodes d'élaboration des nanocomposites polymères sont toutes basées sur une première étape de dispersion des nanoparticules dans un liquide, elles diffèrent toutefois par le type de phase organique et par le traitement à effectuer ensuite : traitement thermique, élimination du solvant éventuel. [Althues 2007]

Afin d'obtenir des matériaux performants, avec d'excellentes propriétés électriques et mécaniques la méthode d'élaboration est cruciale. Différentes stratégies d'élaboration ont été développées. Actuellement les techniques les plus utilisées sont la dispersion en solution [Wang et al 2009], [Bin et al 2003], [Wang et al 2003], la dispersion à l'état fondu [Grossiord et al 2008], [Jin et al 2001] et la polymérisation in situ en présence des NTC [Putz et al 2004].

II.10.1.1 Mélange en solution :

Cette méthode est notamment utilisée pour l'élaboration d'élastomère [Sui 2008]. Mais aussi pour certain type de (TP) [Liu 2008]. Encore utilisée dans le cas du poly oxyde d'éthylène [Aranda 1992], [Wu 1993], [Choi 2001] en utilisant différents solvants plus ou moins polaires, mais aussi avec de nombreux autres polymères. Le principal désavantage de cette méthode est la forte quantité de solvant qui doit être utilisée, et qui est en totale opposition avec les défis environnementaux d'aujourd'hui et des applications industrielles. [Anthony 2006]. Etant particulièrement adaptée pour la synthèse de NC en faibles quantités, cette technique fut pendant longtemps privilégiée du fait de la faible disponibilité et du fort coût de fabrication des NTC. Cette méthode consiste à mélanger les NTC et le polymère dissous dans une solution. La dispersion des NTC dans la solution se fait généralement à l'aide des ultrasons ou via l'ajout d'un surfactant. Un des principaux inconvénients de cette méthode est l'utilisation et l'élimination du solvant. [Chemi 2018]

Un autre inconvénient provient de l'utilisation des ultrasons, qui bien que très efficaces pour disperser les (NTC), peuvent également détruire les chaînes macromoléculaires. [Aubry 2009]

II.10.1.2 Mélange à l'état fondu :

Le polymère et le nanotube sont incorporés dans la plupart des cas, dans une extrudeuse chauffée ou un malaxeur. Les NTC peuvent ainsi circuler au sein du polymère fondu et le cisaillement apporté par la rotation des vis détermine la qualité de la dispersion des charges. De nombreux thermoplastiques sont chargés en NTC en voie fondue : polypropylène [Bao, Tjong 2008] polycarbonate. [Pottschke, Fornes 2002]. [Aurelie 2010] Des nanocomposites à base de polyéthylène, polypropylène, polyamide, polycarbonate, polyéthylène téréphtalate, polylactide, polyméthacrylate de méthyle et autres polymères thermoplastiques ont été obtenus par cette méthode [Aubry 2009]. L'inconvénient de cette méthode est que la viscosité augmente considérablement avec le taux de (NTC) [Lee et al 2008].

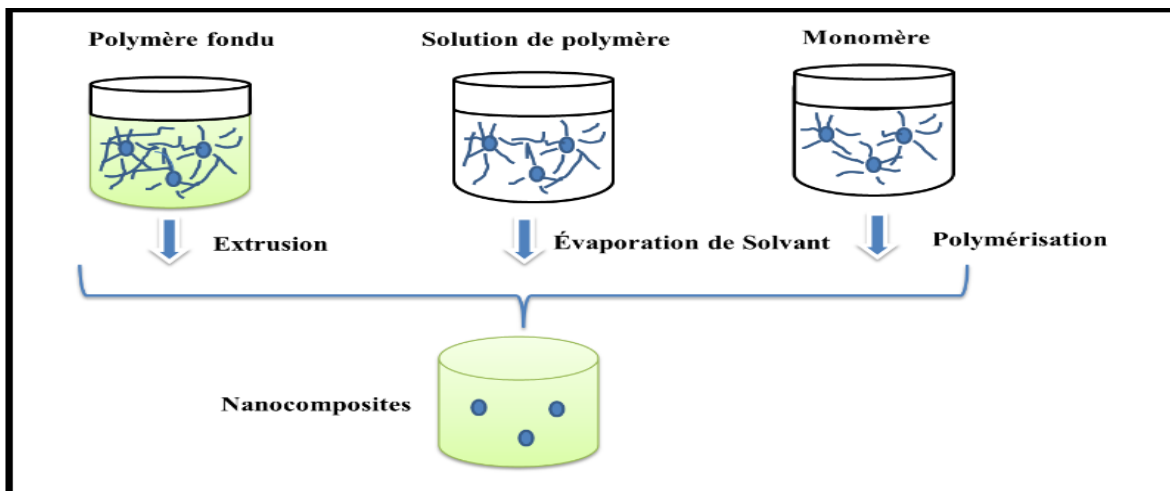


Figure II.10 : Méthodes d'élaborations des nano composites polymères : a) mise en œuvre dans le fondu, b) mise en solution et c) polymérisation in situ [Althues et al 2007]

II.10.1.3 Polymérisation in situ:

La fabrication de (NC) par un procédé de polymérisation in situ est divisée en plusieurs étapes. Dans un premier temps, les charges sont ajoutées au monomère liquide. Etant donné la faible viscosité de ce dernier, la dispersion des charges peut s'effectuer grâce à l'utilisation d'ultrasons ou encore via agitation mécanique en régimes turbulents. Une fois les charges bien dispersées dans la matrice, on débute la polymérisation.

Lorsque la polymérisation est achevée, il ne reste plus qu'à extraire le monomère résiduel (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. [Zidour 2012]

Tableau II.6: Comparaison des différentes méthodes d'élaboration des composites polymères/NTC [Chemi 2018]

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 à produire à l'échelle industrielle (simple, propre, sans solvant).	La viscosité élevée dans le système.
Polymérisat ion 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 « grafting From »	Dans le cas du « grafting from », les propriétés mécaniques des composites sont améliorées	Technique généralement longue.

II.10.2 Dispersion des renforts :

II.10.2.1 Utilisation des ultrasons :

L'usage des ultrasons, est une technique très connue et utilisée en abondance dans le domaine [Xiong 2006], [Sluzarenko 2006]. Ce procédé consiste à utiliser les vibrations de la solution dans un bain US pour casser les enchevêtrements de (CNTs) en deux étapes:

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

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

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

Les images ci-dessous montrent que l'usage des ultrasons peut fournir des résultats assez satisfaisants. En effet, un tel procédé permet de briser les gros agrégats de (CNTs). Cependant, des observations au microscope optique sur une gouttelette de la solution constituée de base + (CNTs) (après 2 heures de passages aux ultrasons) montrent que des agglomérats de tailles micrométriques persistent (fig II.11). [Bozlar 2009]

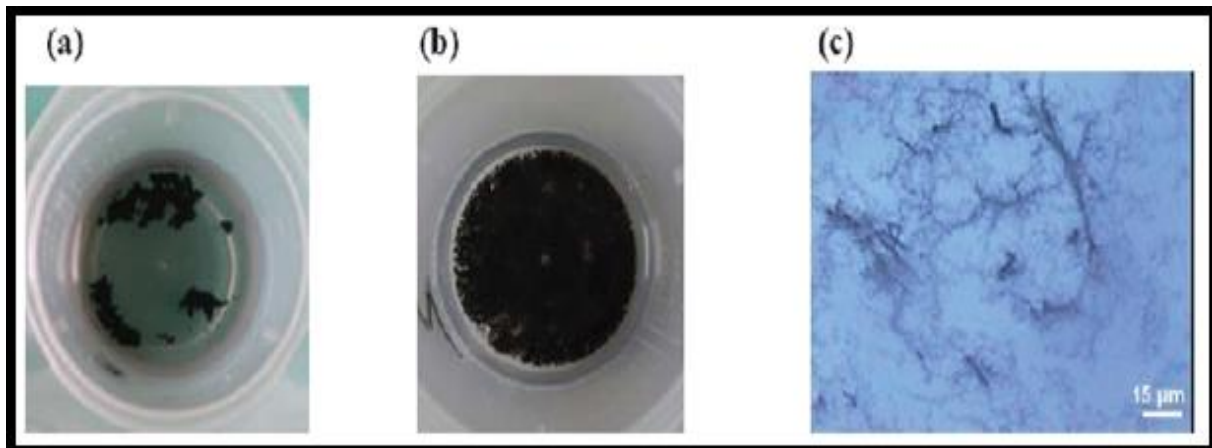


Figure II.11: L'influence de la dispersion des (CNTs) par ultrasons. (a) (CNTs) dans l'éthanol avant passage aux ultrasons. (b) Après 1 heure aux ultrasons. (c) Image microscope optique d'une gouttelette de base + (CNTs) après 2 heures de dispersion. Des agrégats sont encore présents. [Bozlar 2009]

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 «désagglomérer» 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.10.2.2 Dispersion mécanique par tricylindre:

A l'origine, cet appareil a été conçu pour broyer des produits dans l'industrie pharmaceutique ou alimentaire (fig II.12 a). Son utilisation pour disperser les (CNTs) est récente. Thostenson et al [Thostenson 2006], ont montré que le tricylindre est un outil assez performant pour disperser de manière homogène les (CNTs) dans une résine époxy. Ils ont pu ainsi obtenir des niveaux de conductivités électriques et thermiques supérieurs à d'autres travaux (utilisant notamment les ultrasons).

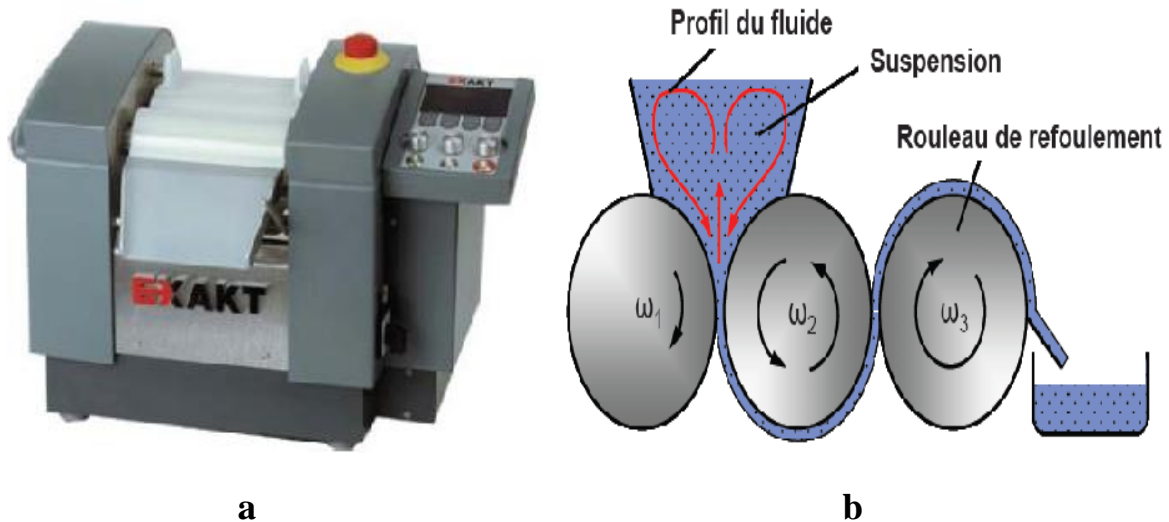


Figure II.12: a) Tricylindre Exakt 80E (Source : Exakt Vertriebs GmbH, Allemagne).

b) Schéma du circuit d'un fluide dispersé par tricylindre (Source: IPAT, TUBraunschweig, 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. (fig II.12b) Le cylindre du milieu (numéro 2) tourne dans un sens opposé aux deux autres. On peut modifier la vitesse de rotation du rouleau de refoulement ω_3 (*tr/min*), qui peut varier entre (30 et 600 *tr/min*). Ensuite, les deux autres cylindres tournent à des vitesses de rotation différentes avec un rapport de démultiplication tel que: [Bozlar 2009]

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_2 = \frac{1}{3} \omega_3 \\ \omega_1 = \frac{1}{3} \omega_3 \end{array} \right.$$

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.11 Conclusion :

Les polymères présentent des propriétés variées et abondantes qui font d'eux des candidats idéals pour la fabrication des nanocomposites, en particulier ceux renforcés avec des NTCs.

Le terme de nanocomposite décrit un matériau biphasé dont la phase de renfort présente une dispersion de taille nanométrique. La matrice peut être métallique, céramique ou polymère. Nous avons savoir Les trois principales techniques de traitement, nommément, polymérisation de solution, fondu et in situ ont leurs avantages uniques : fabrication nano composites NTC /polymère, Bien que les solutions mélange composite de haute qualité de produit mais le compound âge de fondu est beaucoup plus simple et option pour la production à grande échelle. L'amélioration maximale des propriétés mécaniques de la matrice de polymère est observée dans le cas de polymérisation in situ qui produit la liaison covalente entre le NTC et polymère de matrice ; Cependant il négativement influence les propriétés électroniques du composite.

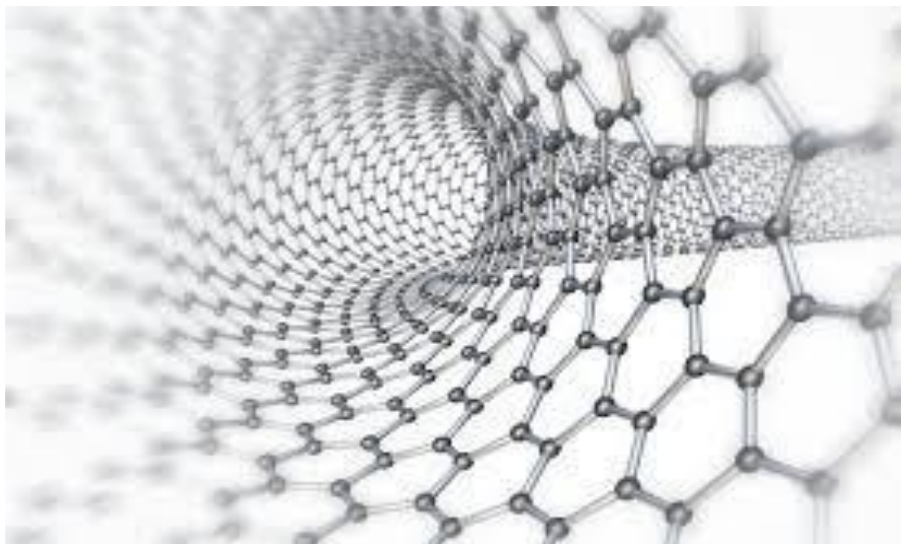
Finalement, nous pouvons conclure que NTC est idéal pour la fabrication de polymères composites, mais certains problèmes doivent être abordés avant de réaliser pleinement les propriétés extraordinaires graves du nanocomposites (NTC en polymère).

CHAPITRE III

Les théories des poutres

Et Développement

mathématique.



III.1 Introduction :

L'étude du comportement mécanique des poutres reposant sur milieux élastiques a une importante signification dans la conception et le calcul des constructions modernes.

La théorie des poutres est un modèle utilisé dans le domaine de la résistance des matériaux, 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 statique et dynamique de la structure ainsi que la méthode de résolution à appliquer. Dans ce chapitre, on a présenté les propriétés matérielles des poutres étudiées et qui sont faites d'une matrice polymère renforcées par des nanotubes de carbone. Ces nanofibres sont disposés à travers l'épaisseur de la poutre selon quatre formes différentes.

On a utilisé une fonction raffinée trigonométrique pour analyser la charge critique de flambement des poutres CNTRC. les équations sont obtenues à partir du principe d'Hamilton. En effet, Il existe plusieurs théories de poutres et des modèles d'interaction solide- milieu élastique pour répond au besoin de travail.

III.2 Les différentes théories des poutres:

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

III.2.1 Théorie d'Euler Bernoulli (théorie classique des poutres) :

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

- Après déformation, les déformations dues au cisaillement transversal sont négligées (pas de cisaillement sur la hauteur de la poutre).
- La section reste perpendiculaire à la ligne moyenne de la poutre et la section plane reste plane.
- La fonction qui décrit la répartition de déplacement suivant l'épaisseur de la poutre $\Phi(z)$ égale à zéro.

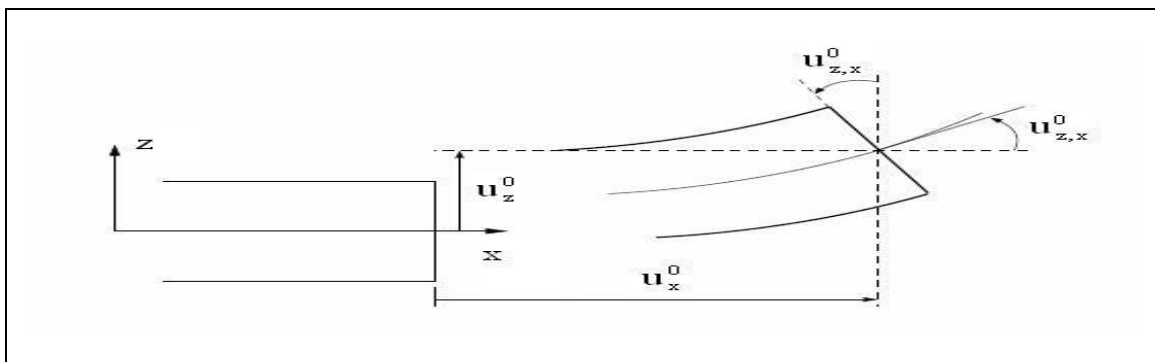


Figure III.1: Cinématique d'Euler Bernoulli [Dufort 2000]

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

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

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

$$U(M) = \begin{cases} u(x, z) = u^0(x) - zw'_x(x) \\ w(x, z) = w^0(x) \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

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

La rotation autour de l'axe y, provoquée par la flexion est tel que:

$$w''_x(x) = \frac{\partial w^0}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (\text{III.3})$$

$u^0(x)$ et $w^0(x)$ sont les composantes de déplacement au milieu de la section et sur la ligne moyenne de la poutre, respectivement le long des axes x et z.

Lorsque cette théorie est utilisée pour l'analyse des fréquences naturelles des poutres, les flèches sont sous-estimées. Ceci est la conséquence de négliger la déformation transversal.

III.2.2 Théorie de Timoshenko(FSDT):

Les études sur la théorie de déformation en cisaillement du premier ordre (FSDT)s'applique pour le cas des poutres courtes , elle est basée sur le principe; qu'après déformation, la section plane reste plane mais elle perte sa perpendicularité par rapport à la ligne moyenne de la poutre (figure III.2). Ceci est dû au cisaillement transversal, découvert par Timoshenko, sur l'épaisseur de la poutre. Cette théorie peuvent être référée dans[Reissner 1945],[Mindlin 1951] qui a mené au modèle de plaque de Reissner-Mindlin. Ainsique [Timoshenko 1959], [Reddy 1997]

Dans le cas où nous avons un élancement faible, l'effet du cisaillement devient plus important sur la déformée. Dans ce cas, la fonction $\Phi(z)$ est égale à Z. Il existe un cisaillement uniforme et les déformations dues au cisaillement transversal ne sont pas négligées. C'est la théorie de premier ordre (FSDBT).

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

$$U(M) = \begin{cases} U(x, z) = u^0(x) - zw'_x(x) + z \gamma^0_{xz}(x) \\ W(x, z) = w^0(x) \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

γ^0_{xz} : est la distorsion ou la déformation angulaire mesurée sur la ligne moyenne de la poutre.

Tel que :

$$\gamma_{xz}^0(x) = w_{,x}^0(x) - \varphi^0(x) \tag{III.5}$$

$\varphi^0(x)$: Etant la rotation totale de la section mesurée sur la ligne moyenne de la poutre.

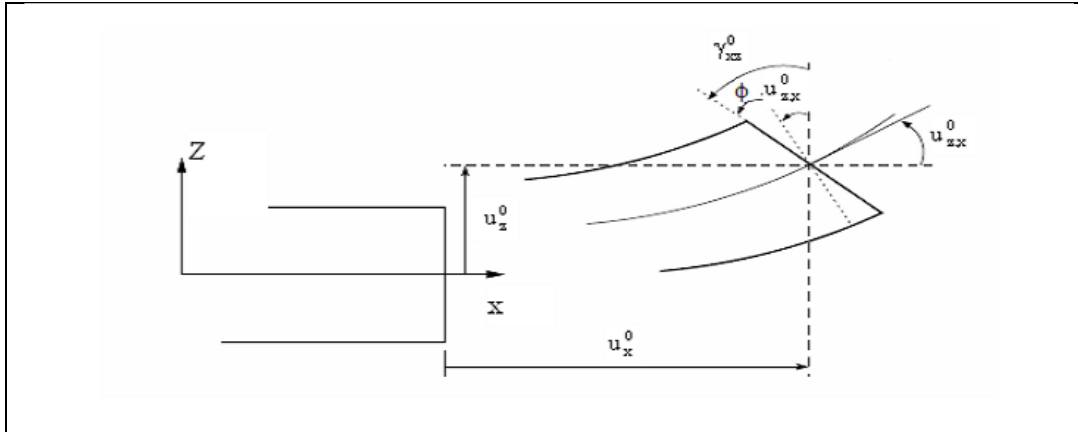


Figure III.2 : Cinématique de Timoshenko [Timoshenko et al 1972]

Par définition, la distorsion est donnée par la relation suivante:

$$\gamma_{xz}(x) = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = -w_{,x}^0(x) + \gamma_{xz}^0(x) + w_{,x}^0(x) \tag{III.6}$$

$$\gamma_{xz}(x) = \gamma_{xz}^0(x) \tag{III.7}$$

Sachant que la contrainte de cisaillement est égale:

$$\tau_{xz} = G_{xz} \gamma_{xz} = G_{xz} \gamma_{xz}^0 \tag{III.8}$$

G_{xz} : est le module de cisaillement transversal qui est supposé constant.

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

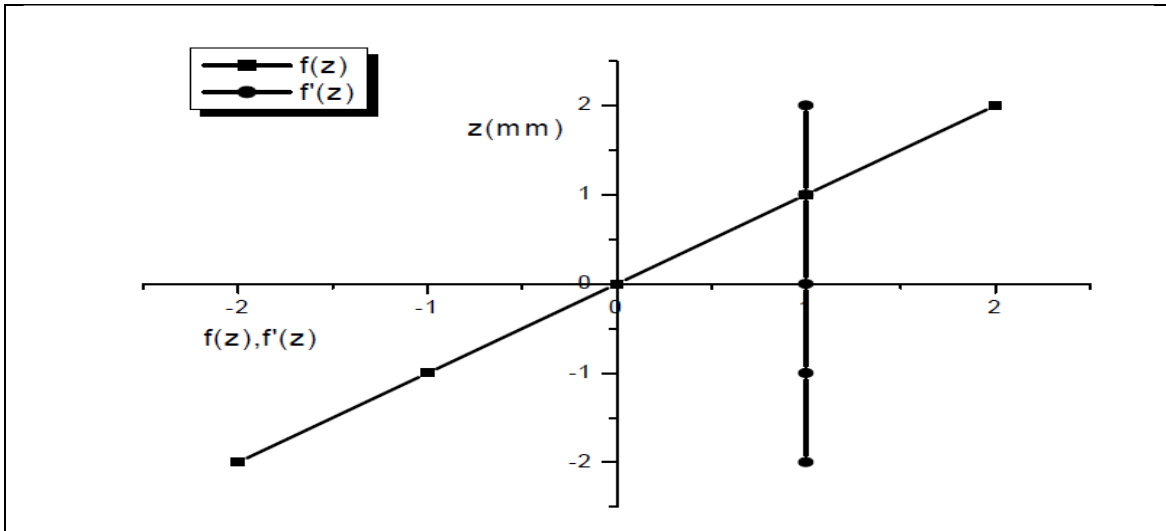


Figure III.3 : Variation de la fonction de gauchissement $f(z) = z$ et $f'(z)$ en fonction de l'épaisseur.

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".

III.2.3 Théorie d'ordre élevé (HSDT) :

Dans cette théorie la distribution des champs de déplacement est non linéaire selon l'épaisseur de la poutre. Elle est plus précise que la théorie du premier ordre puisqu'elle introduit une fonction qui tient compte du phénomène de "gauchissement».Ce phénomène apparaît lorsque la section transversale de la poutre perd sa planéité (figure III.4). La fonction $\Phi(z)$ représente le gauchissement et sa dérivée $\Phi'(z)$ le cisaillement.

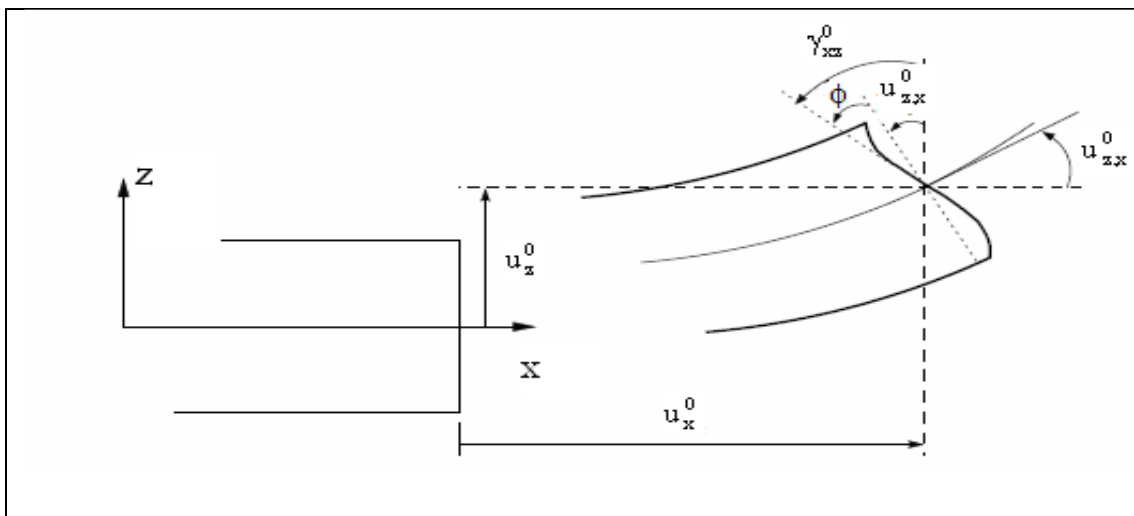


Figure III.4 : Cinématique de la Théorie d'Ordre Elevé.

Dans ce cas, le champ de déplacement devient:

$$U(M) = \begin{cases} U(x, z) = u^0(x) - zw'_{,x}(x) + \Phi(z) \gamma_{xz}^0(x) \\ W(x, z) = w^0(x) \end{cases} \quad (III.9)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = -w'_{,x}(x) + \Phi'(z) \gamma_{xz}^0(x) + w'_{,x}(x) \quad (III.10)$$

Donc on obtient :

$$\gamma_{xz} = \Phi'(z) \cdot \gamma_{xz}^0(x) \quad (III.11)$$

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

$$\Phi'(z) | z = \pm \frac{h}{2} \quad (III.12)$$

C'est la condition qui nous permet d'avoir une répartition parabolique des contraintes de cisaillement sur l'épaisseur de la poutre d'une part et de choisir correctement des fonctions cubiques qui répondent à la condition (III.11).

Selon l'expression de la fonction de gauchissement $\Phi(z)$, quelques modèles sont présentés dans la littérature des nano-poutres :

1-) Le modèle Euler-Bernoulli (la théorie des poutres classiques) (CLBT):

$$\Phi(z) = 0 \quad (III.13)$$

2-) Le modèle de Timoshenko ou bien la théorie du premier ordre (FSDBT):

$$\Phi(z) = z \quad (III.14)$$

3-) Le modèle d'ordre élevé, avec l'approche de [Levinson 1980], [Murthy 1981] et [Reddy1984]:

$$\Phi(z) = z \left(1 - \frac{az^2}{3h^2} \right) \quad (III.15)$$

4-) Le modèle exponentiel proposé par [Afaq et al 2003]

$$\Phi(z) = z e^{-2\left(\frac{z}{h}\right)^2} \quad (III.16)$$

5-) Le modèle d'Aydogdu [Aydogdu 2005]

$$\Phi(z) = z \alpha^{\frac{-2\left(\frac{z}{h}\right)^2}{\ln \alpha}} \quad (III.17)$$

Avec, h: étant l'épaisseur de la poutre.

Le choix de la fonction exponentielle permet un développement en puissance pair et impair de la variable z alors que la fonction "sinus" de Touratier ne permet qu'un développement en puissance impair. [Tagrara 2017]

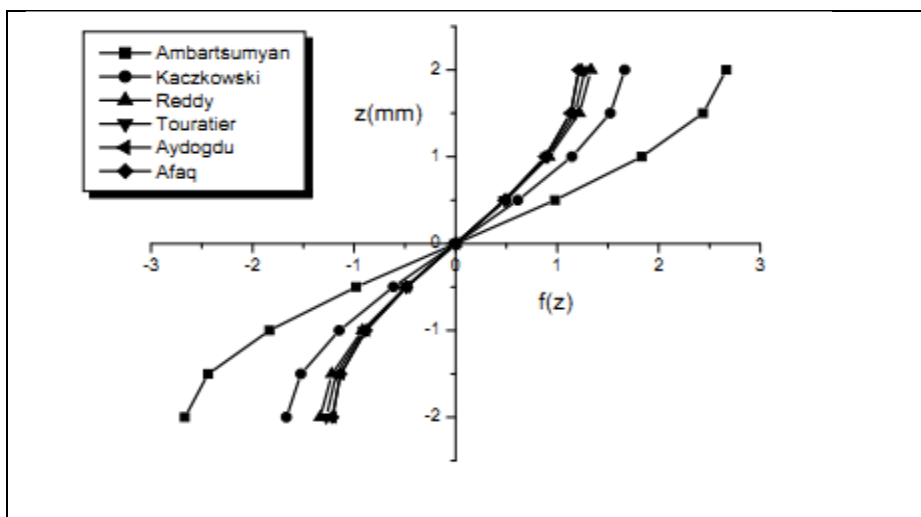


Figure III.5 : Variation de la fonction de gauchissement $f(z)$ des différents modèles en fonction de l'épaisseur.

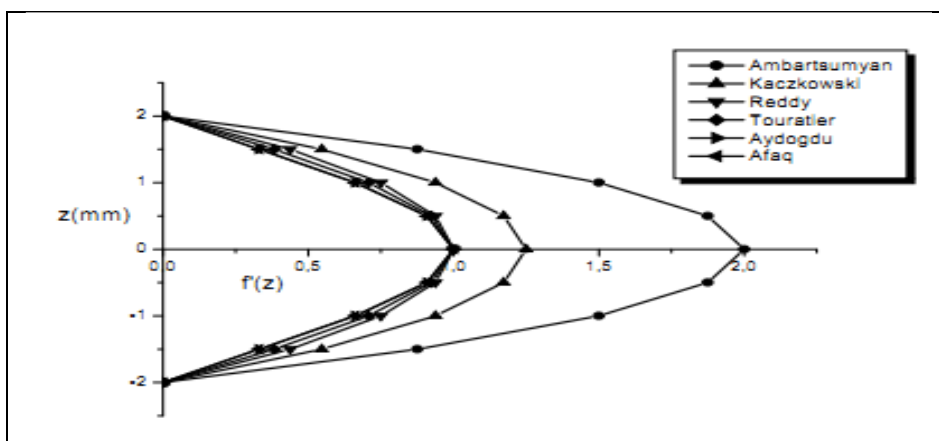


Figure III.6 : Variation de la fonction de gauchissement $f'(z)$ des différentes modèles en fonction de l'épaisseur.

La figure III.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'Ambartsumyan 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 III.6, on remarque aussi la divergence des deux approches d'Ambartsumyan et de Kaczkowski par rapport aux autres approches.

III.3 Les fondations élastiques:

Il existe de nombreuses études sur la modélisation de fondation élastique Winkler dans la littérature. Zhou [Zhou 1993] et Eisenberger [Eisenberger 1994] ont étudié une solution générale aux vibrations des poutres sur différent fondation élastique Winkler. Eisenberger et

Clastornik [Eisenberger 1987] ont étudié la vibration et le flambement d'une poutre sur différent fondation élastique Winkler. Une réponse dynamique d'une poutre de Timoshenko avec une masse en mouvement concentré a été résolue par Lee [Lee 1998]. En outre, certains chercheurs [Ma 2009] [Civalek 2007] ont étudié l'analyse des fondations élastiques avec les modèles Winkler-Pasternak. [Zidour 2012]

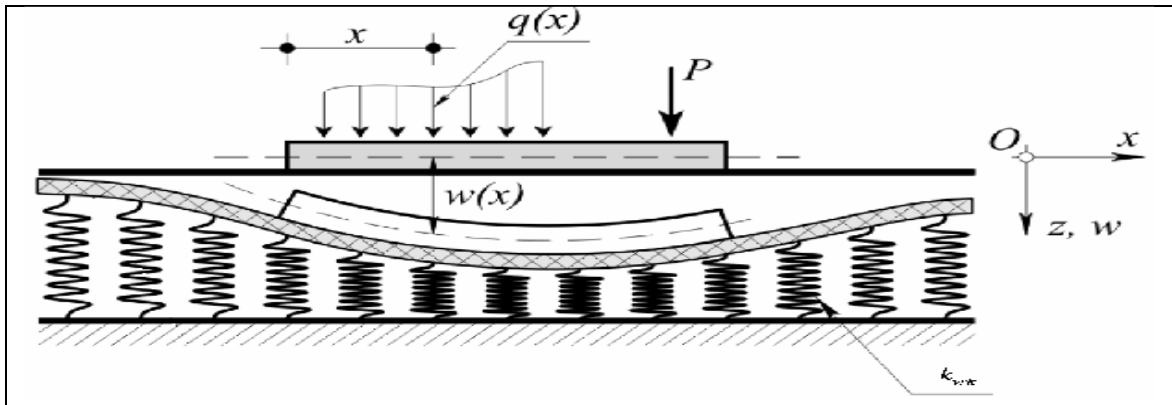


Figure III.7: Fondation reposant sur un sol modélisé par des ressorts et un élément d'interaction. [Jahangir 2011]

III.3.1 Le modèle Winkler-pasternak:

Le modèle le plus simple concernant la base élastique est le modèle de Winkler, qui considère la base comme une série de ressorts séparés sans effets d'accouplement. Pour calculer les contraintes s'exerçant sous une fondation reposante sur un milieu élastique, Winkler (1867) a supposé que la réaction du sol à chaque point sous la fondation est proportionnelle à la déflexion de la fondation à ce point. La déformation verticale caractéristique de la fondation est donc définie par l'utilisation de ressorts identiques, indépendants, étroitement espacés, discrets et linéairement élastiques. La constante de proportionnalité de ces ressorts est connue comme étant le coefficient de réaction du sol. L'inconvénient de ce modèle est qu'il ne prend pas en compte l'interaction entre les ressorts.

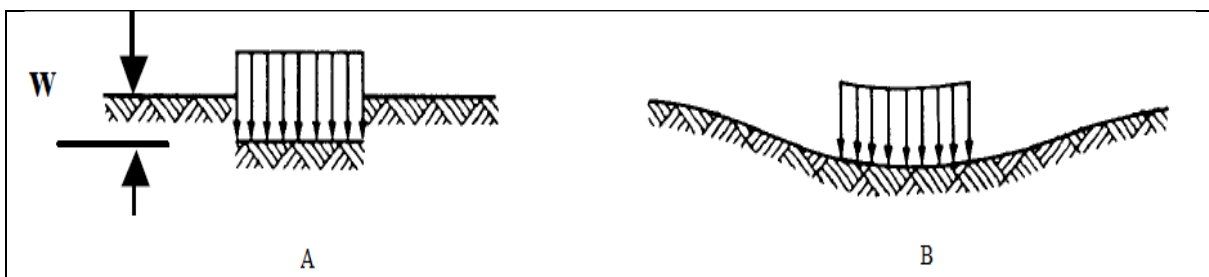


Figure III.8 : une fondation élastique, (A) Winkler, (B) Pasternak

Ceci a été amélioré plus tard par Pasternak (1954) qui a tenu compte des interactions entre les ressorts séparés dans le modèle de Winkler en présentant un nouveau paramètre dépendant. Dès lors, le modèle de Pasternak a été largement employé pour décrire le comportement mécanique des interactions (structures-bases).

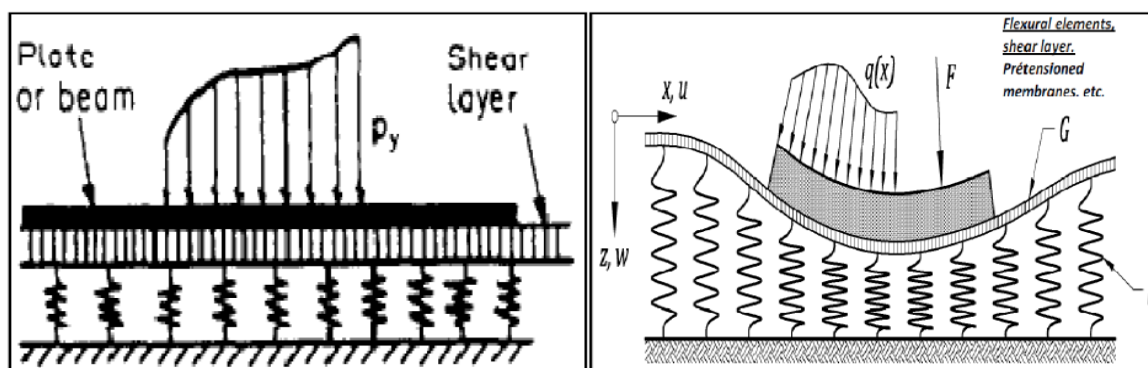


Figure III.9 : poutre repose sur une fondation élastique à deux paramètres (Winkler-Pasternak) au repos et après déformation [Belmahi 2020]

III.3.2 Le modèle kerr:

Des théories pour améliorer le modèle de Winkler ont été établies, en visualisant divers types d'interconnexions telles que des couches de cisaillement le long des ressorts introduites par Winkler. Parmi eux, un cas de (Kerr, 1964). Ces théories ont pour objectifs de donner une représentation la plus proche à la réalité du support de fondation.

En tant que généralisation du concept de Pasternak, Kerr a proposé en 1964 un modèle de fondation à trois paramètres composé de deux couches de ressorts élastiques de raideurs différentes k_1 et k_2 et reliées entre elles par une couche de cisaillement d'un module de cisaillement G (Figure 10). [Kerr 1964] [Belmahi 2020]

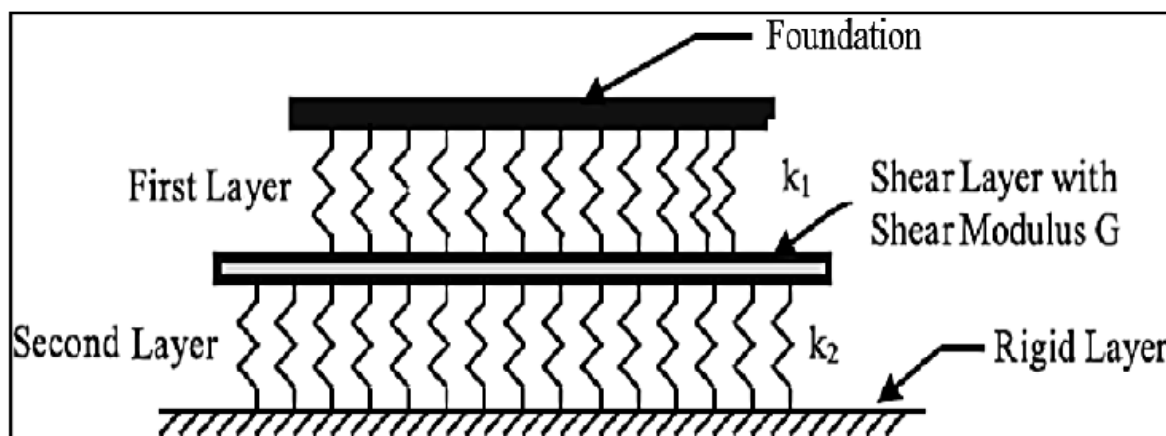


Figure III.10 : Modèle de Kerr [Madhav 2015]

III.4 Développement Mathématique du présent modèle :

Dans ce chapitre on a essayé de suivre le modèle d'ordre élevée raffinée de déformation de cisaillement, qui est plus précise cette théorie basée sur la distribution des champs de déplacement est non linéaire selon l'épaisseur de la poutre on tient compte des effets de la déformation transversale de cisaillement (la section transversale perd sa planéité), Ces modèles n'exigent pas des facteurs de correction.

III.4.1 Les propriétés matérielles des poutres composites renforcées par des nanotubes de carbone

Les poutres CNTRC étudiées dans ce présent travail sont faites à partir d'un mélange de matrice polymère isotrope et des SWCNTs. La figure (III11.a) montre une poutre CNTRC ayant une longueur (L) et une épaisseur (h), reposant sur une fondation élastique de type Kerr. Quatre modèles différents de la distribution des renforts à travers l'épaisseur sont pris en considération dans cette étude comme indiqué dans la Figure (III12.b).

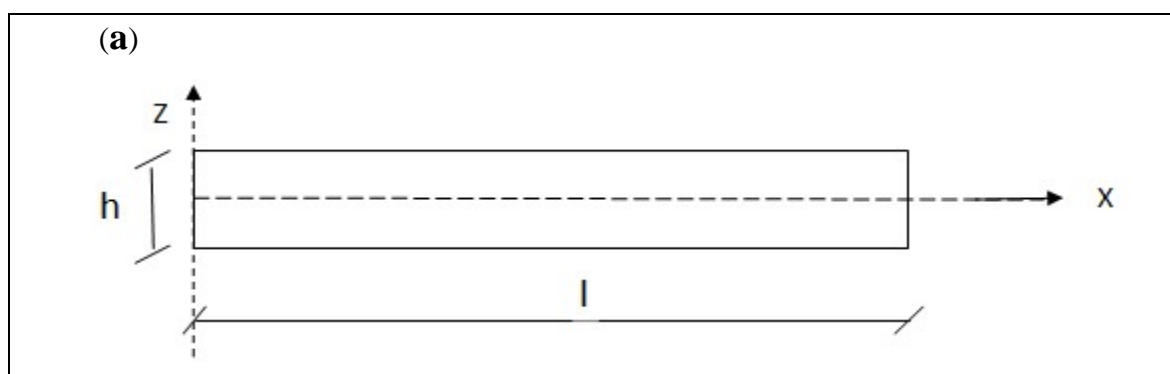


Figure III.11 : (a) Géométrie de la poutre

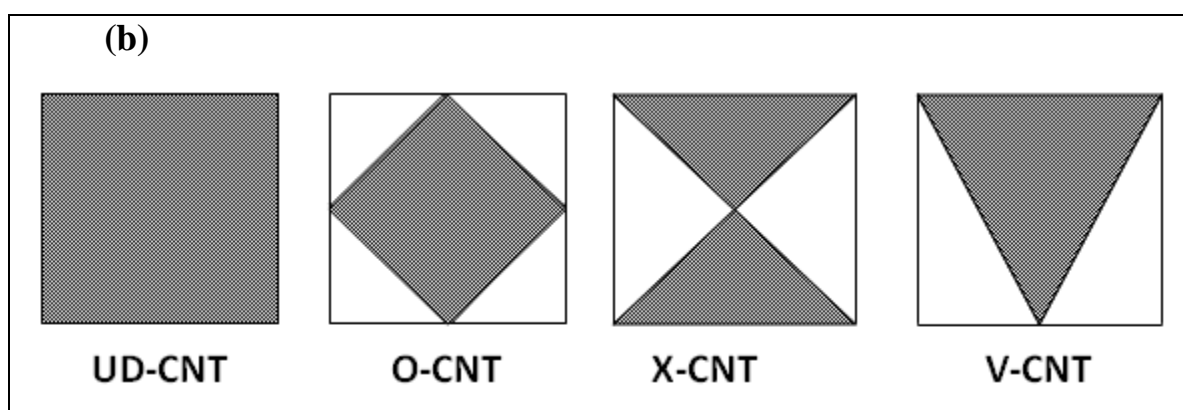


Figure III.12 : (b) les différents modèles des dispositions des renforts

Les propriétés matérielles de la poutre CNTRC peuvent être calculées en utilisant la loi du mélange qui donne les modules effectifs de Young et de cisaillement des poutres CNTRC [Bakhti et al 2013], [Kaci et al 2012]

$$E_{11} = \eta_1 V_{cnt} E_{11}^{cnt} + V_p E_p \quad (III.1a)$$

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

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

Avec :

E_{11}^{cnt} ; E_{22}^{cnt} et 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 :

$$V_{cnt} + V_p = 1 \quad (III.2a)$$

Pour introduire les propriétés matérielles des nanotubes dépendant de l'échelle, on introduit les paramètres d'efficacité du CNT, η_i ($i = 1, 2, 3$) sont considérés, et qui peuvent être déterminé en faisant correspondre le module d'élasticité de la CNTRCs à partir des résultats de simulation de la dynamique moléculaire MD avec les résultats numériques obtenus à partir de la loi de mélange [Han et Elliott 2007].

En utilisant la même loi, le coefficient de Poisson (ν) et la densité de masse (ρ) des poutres CNTRC sont définis par:

$$\nu = V_{cnt} \nu^{cnt} + V_p \nu^p, \rho = V_{cnt} \rho^{cnt} + V_p \rho^p \quad (III.2b)$$

Ou : ν^{cnt} , ν^p et ρ^{cnt} , ρ^p : sont respectivement les coefficients de poisson et les masses volumiques du CNT et de la matrice polymère.

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 (III.12.b), les fonctions mathématiques employées pour montrer les distributions de constituants matériels sont exprimés ci-dessous:

•poutre UD :
$$V_{cnt} = V_{cnt}^* \quad (III.3a)$$

•poutre O :
$$V_{cnt} = 2\left(1 - 2\frac{|z|}{h}\right) V_{cnt}^* \quad (III.3b)$$

•poutre X :
$$V_{cnt} = 4\frac{|z|}{h} V_{cnt}^* \quad (III.3c)$$

•poutre V :
$$V_{cnt} = \left(1 + \frac{2z}{h}\right) V_{cnt}^* \quad (III.3d)$$

Ou V_{cnt}^* : est la fraction volumique considérée du CNTs, elle est déterminée à partir de la relation suivante :

$$V_{cnt}^* = \frac{W_{cnt}}{W_{cnt} + (\rho^{cnt}/\rho^m)(1 - W_{cnt})} \quad (III.4)$$

Avec W_{cnt} : est la fraction massique des nanotubes de carbone.

A partir des équations (3), on peut constater que les poutres du type O, X et V sont des poutres fonctionnellement graduées ou leurs propriétés matérielles varient d'une façon continue à travers leurs épaisseurs, alors que la poutre UD possède une distribution uniforme des renforts CNT.

Dans ce travail, les paramètres d'efficacité (η_i) du CNT associés aux fractions de volumiques (V_{cnt}^*) sont données comme suit :

$\eta_1 = 1.2833$ et $\eta_2 = \eta_3 = 1.0566$ pour $V_{cnt}^* = 0,12$; $\eta_1 = 1.3414$ et $\eta_2 = \eta_3 = 1.7101$ pour $V_{cnt}^* = 0.17$; $\eta_1 = 1.3238$ et $\eta_2 = \eta_3 = 1.7380$ pour $V_{cnt}^* = 0.28$ [Yas et Samadi 2012].

III.4.2 Cinématique et équations constitutives

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

$$u(x, z, t) = u_0(x, t) - z \frac{\partial w_b}{\partial x} - f(z) \frac{\partial w_s}{\partial x} \quad (III.5.a)$$

$$w(x, z, t) = w_b(x, t) + w_s(x, t) \quad (III.5.b)$$

Où u_0 : est le déplacement 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]:

$$f(z) = z - \frac{h}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{h} z\right) \quad (III.6)$$

Le champ de déformation associé au champ de déplacement est :

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x^0 + z k_x^b + f(z) k_x^s \quad (III.7a)$$

$$\gamma_{xz} = g(z) \gamma_{xz}^s \quad (III.7b)$$

Où :

$$\varepsilon_x^0 = \frac{\partial u_0}{\partial x}, \quad k_x^b = -\frac{\partial^2 w_b}{\partial x^2}, \quad k_x^s = -\frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2}, \quad \gamma_{xz}^s = \frac{\partial w_s}{\partial x} \quad (III.7c)$$

$$g(z) = 1 - f'(z) \quad \text{et} \quad f'(z) = \frac{df(z)}{dz} \quad (III.7d)$$

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

$$\sigma_x = Q_{11}(z)\varepsilon_x \text{ et } \tau_{xz} = Q_{55}(z)\gamma_{xz} \quad (\text{III.8a})$$

Avec :

$$Q_{11}(z) = \frac{E_{11}(z)}{1-\nu^2} \text{ et } Q_{55}(z) = G_{12}(z) \quad (\text{III.8b})$$

III.4.3 Les équations du mouvement

Les équations du mouvement sont établies à partir du principe d' Hamilton [Talha et Singh 2010]; [Li et al 2010]; [Shahrjerdi et al 2011]; [Jha et al 2012]; [Jha et al 2013]:

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta U + \delta V) dt = 0 \quad (\text{III.9})$$

Avec :

δU : La variation virtuelle de l'énergie de déformation;

δV : La variation virtuelle de l'énergie potentielle ;

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

$$\begin{aligned} \delta U &= \int_0^l \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_x \delta \varepsilon_x + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz}) dz dx \quad (\text{III.10}) \\ &= \int_0^l (N \frac{d\delta u_0}{dx} - M_b \frac{d^2 \delta w_b}{dx^2} - M_s \frac{d^2 \delta w_s}{dx^2} + Q \frac{d\delta w_s}{dx}) dx \end{aligned}$$

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

$$(N, M_b, M_s) = \int_{-h/2}^{h/2} (1, z, f) \sigma_x dz \text{ et } Q = \int_{-h/2}^{h/2} g(z) \tau_{xz} dz \quad (\text{III.11})$$

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]; [Zidi et al 2014]; [Yaghoobi et Fereidoon 2014]; [Yaghoobi et al 2014] :

$$\delta V = \int_0^l [(-f_e)(\delta w_b + \delta w_s) - N_{x0} \frac{d(w_b + w_s)}{dx} \frac{d(\delta w_b + \delta w_s)}{dx}] dx \quad (\text{III.12})$$

Avec :

$$f_e = \frac{1}{1 + \frac{K_w}{K_c}} \left[K_w w_0 - K_s \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} - \frac{K_s D_0}{K_c} \frac{\partial^6 w_0}{\partial x^6} \right] \quad (\text{III.13})$$

Où : K_w, K_s et K_c sont les constantes de la rigidité de Winkler, pasternak et kerr qui sont données par :

$K_w = \beta_w A_{110}/L^2, K_s = \beta_s A_{110}$ et $K_c = \beta_c A_{110}/L^2$ avec β_w, β_s et β_c sont des facteurs constants de la rigidité des ressorts; A_{110} : est la rigidité de l'extension ou la valeur de A_{11} de la poutre homogène constituée uniquement du polymère d'une matrice de matériau pure.

$$\text{avec : } D_0 = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E_p}{1-(\nu^p)^2} ; E_p=2.5 \text{ et } \nu^p=0.3.$$

En substituant les expressions de δU et δV des équations (III.10), (III.12) et en les remplaçant dans l'équation (III.9) 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 :

$$\delta u_0: \frac{dN}{dx} = 0 \quad (\text{III.14a})$$

$$\delta w_b: \frac{d^2 M_b}{dx^2} - f_e - N_{x0} \frac{d^2(w_b+w_s)}{dx^2} = 0 \quad (\text{III.14b})$$

$$\delta w_s: \frac{d^2 M_s}{dx^2} + \frac{dQ}{dx} - f_e - N_{x0} \frac{d^2(w_b+w_s)}{dx^2} = 0 \quad (\text{III.14c})$$

En substituant l'équation (III.7) dans l'équation (III.8) et en remplaçant les résultats suivants dans l'équation (III.11), les équations du mouvement en fonction des déplacements s'écrivent :

$$N = A_{11} \frac{du_0}{dx} - B_{11} \frac{d^2 w_b}{dx^2} - B_{11}^S \frac{d^2 w_s}{dx^2} \quad (\text{III.15a})$$

$$M_b = B_{11} \frac{du_0}{dx} - D_{11} \frac{d^2 w_b}{dx^2} - D_{11}^S \frac{d^2 w_s}{dx^2} \quad (\text{III.15b})$$

$$M_s = B_{11}^S \frac{du_0}{dx} - D_{11}^S \frac{d^2 w_b}{dx^2} - H_{11}^S \frac{d^2 w_s}{dx^2} \quad (\text{III.15c})$$

$$Q = A_{55}^S \frac{dw_s}{dx} \quad (\text{III.15d})$$

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

$$(A_{11}, B_{11}, D_{11}, B_{11}^S, D_{11}^S, H_{11}^S) = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{11}(1, z, z^2, f(z), zf(z), f^2(z)) dz \quad (\text{III.16a})$$

Et
$$A_{55}^S = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{55} [g(z)]^2 dz \quad (\text{III.16b})$$

Les équations (III.14) peuvent être exprimées en termes de déplacement (u_0, w_b, w_s) en utilisant les deux équations (III.14) et (III.15), comme suit:

$$A_{11} \frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} - B_{11} \frac{\partial^3 w_b}{\partial x^3} - B_{11}^S \frac{\partial^3 w_s}{\partial x^3} = 0 \quad (\text{III.17a})$$

$$B_{11} \frac{\partial^3 u_0}{\partial x^3} - D_{11} \frac{\partial^4 w_b}{\partial x^4} - D_{11}^S \frac{\partial^4 w_s}{\partial x^4} - f_e - N_{x0} \frac{d^2(w_b+w_s)}{dx^2} = 0 \quad (\text{III.17b})$$

$$B_{11}^S \frac{\partial^3 u_0}{\partial x^3} - D_{11}^S \frac{\partial^4 w_b}{\partial x^4} - H_{11}^S \frac{\partial^4 w_s}{\partial x^4} + A_{55}^S \frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2} - f_e - N_{x0} \frac{d^2(w_b+w_s)}{dx^2} = 0 \quad (\text{III.17c})$$

III.4.4 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 :

$$\begin{pmatrix} U_0 \\ W_b \\ W_s \end{pmatrix} = \sum_{m=1}^{\infty} \begin{pmatrix} U_m \cos(\lambda x) e^{i\omega t} \\ W_{bm} \sin(\lambda x) e^{i\omega t} \\ W_{sm} \sin(\lambda x) e^{i\omega t} \end{pmatrix} \quad (\text{III.18})$$

Où : U_m , W_{bm} et W_{sm} sont des paramètres arbitraires à déterminer, $\lambda = m\pi/L$.

En substituant les expressions de u_0 , w_b , w_s des équations (III.18) dans les équations du mouvement (III.17), les solutions analytiques peuvent être obtenus à partir des équations suivantes :

$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_m \\ W_{bm} \\ W_{sm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{III.19})$$

Avec :

$$\begin{aligned} S_{11} &= A_{11}\lambda^2, S_{12} = -B_{11}\lambda^3, S_{13} = -B_{11}^s\lambda^3 \\ S_{22} &= D_{11}\lambda^4 + (K_w + K_s\lambda^2 + (K_s D_0 \lambda^6)/K_c) / (1 + \frac{K_w}{K_c}) - N_{x0}\lambda^2 \\ S_{23} &= D_{11}^s\lambda^4 + (K_w + K_s\lambda^2 + (K_s D_0 \lambda^6)/K_c) / (1 + \frac{K_w}{K_c}) - N_{x0}\lambda^2 \\ S_{33} &= H_{11}^s\lambda^4 + A_{55}^s\lambda^2 + (K_w + K_s\lambda^2 + (K_s D_0 \lambda^6)/K_c) / (1 + \frac{K_w}{K_c}) - N_{x0}\lambda^2 \end{aligned} \quad (\text{III.20})$$

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur les différentes théories des poutres à savoir:

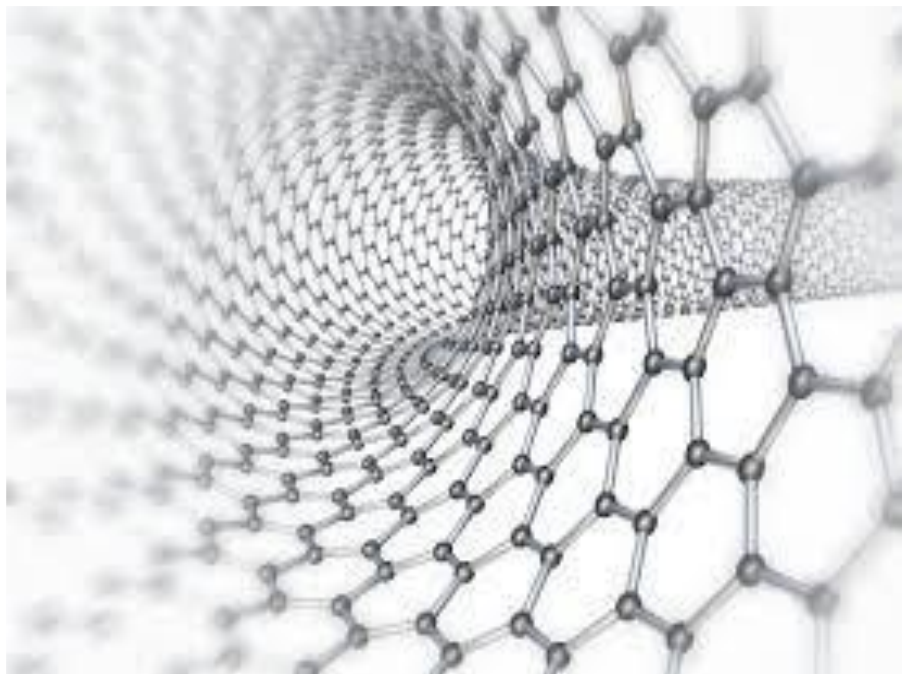
- La théorie classique des poutres (Euler-Bernoulli), qui néglige l'influence du cisaillement ;
- La théorie de déformation en cisaillement du premier ordre (Timoshenko) qui prend en compte l'effet du cisaillement en exigeant un facteur de correction ;
- La théorie de déformation de cisaillement d'ordre élevé qui prend en compte l'effet du cisaillement.

On a observé à travers ce chapitre la complexité ou les défaillances dans l'utilisation de chaque théorie. On a aussi donné une définition générale des fondations élastiques.

Les solutions analytiques du comportement statique, flambement des poutres nanocomposites renforcées par des nanotubes de carbone sont obtenues en utilisant une théorie raffinée trigonométrique et qui n'exige pas de facteur de correction de cisaillement, Les poutres étudiées sont reposées sur une fondation élastique de type kerr, Les propriétés matérielles des poutres sont évaluées en utilisant la loi de mélange.

CHAPITRE IV

**Résultats numériques
et
discussion.**



IV.1 Introduction :

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

Les caractéristiques matérielles effectives des poutres CNTRC sont données comme suit : Poly méthacrylate de méthyle (PMMA) est utilisé comme matrice et ses propriétés matérielles sont les suivantes: $\nu^p = 0.3$; $\rho^p = 1190 \text{ kg} / \text{m}^3$ et $E^p = 2.5 \text{ GPa}$. Le matériau de renforcement est choisi avec les propriétés suivantes: $\nu^{cnt} = 0.19$; $\rho^{cnt} = 1400 \text{ kg} / \text{m}^3$;

$E_{11}^{cnt} = 600 \text{ GPa}$; $E_{22}^{cnt} = 10 \text{ GPa}$ et $G_{12}^{cnt} = 17.2 \text{ GPa}$.

Pour étudier le comportement en flambement des poutres CNTRC la formule adimensionnelle suivante est utilisée: $\bar{N} = \frac{N_{x0}}{A_{110}}$ (IV.1)

IV.2 Analyse du flambement des poutres CNTRC

Dans cette section, les résultats numériques du flambement 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 troisième ordre et la théorie de Timoshenko étudiés respectivement par [Wattanasakulpong et Ungbhakorn 2013] et [Yas et Samadi 2012], comme c'est montré dans le tableau IV.1. En raison de la présence du couplage membrane – flexion dans la poutre V à cause de son asymétrie, ce couplage engendre des flèches et des moments de flexion lorsque la poutre est sous une charge de compression. Par conséquent, la poutre V n'aura pas de bifurcation de type de flambement [Liew et al 2003]. Selon l'étude de flambement, la poutre X est la plus rigide et qui prend la plus grande charge du flambement, suivie par la poutre UD et la poutre O.

Tableau IV.1: Comparaison des charges critiques adimensionnelles pour des poutres CNTRC avec et sans fondation élastique ($L/h = 15$, $V_{cnt}^* = 0.12$).

Source	$\beta_w = 0, \beta_s = 0, \beta_c = \infty$			$\beta_w = 0.1, \beta_s = 0.02, \beta_c = \infty$		
	UD-CNT	O-CNT	X-CNT	UD-CNT	O-CNT	X-CNT
TSDT [Wattanasakulpong et Ungbhakorn 2013]	0.0985	0.0575	0.1291	0.1287	0.0876	0.1590
Ref [Yas et Samadi 2012]	0.0986	0.0588	0.1288	0.1287	0.0889	0.1590
Tagrara [Tagrara 2017]	0.0985	0.0575	0.1291	0.1286	0.0876	0.1592
Présente	0.0985	0.0575	0.1291	0.1286	0.0876	0.1592

Les tableaux IV.2, IV.3 et IV.4 montrent l'effet des fractions volumiques des nanotubes de carbone sur la charge critique de flambement. La diminution des fractions volumiques des CNT ($V_{\text{cnt}}^*=0.28$, $V_{\text{cnt}}^*=0.17$, $V_{\text{cnt}}^*=0.12$) conduit à la réduction des charges de flambement. Ce décroissement considérable de la charge critique est observé de rapport d'épaisseur $L/h = 10$ par rapport à $L/h = 60$, donc l'augmentation de rapport d'épaisseur entraîne une diminution de la charge critique de flambement, ce dernier diminue pour tous les types de renforcement, pareil pour le changement de la fraction volumique V_{cnt}^* . La poutre X-CNT donne la plus grande valeur de la charge critique de flambement tandis que la poutre en O-CNT donne la plus faible valeur de la charge critique de flambement

Tableau IV.2: La liste des valeurs de la charge critique de flambement de la poutre pour les différents types de distributions et valeurs du rapport L/h avec et sans fondation élastique ($V_{\text{cnt}}^*=0.12$).

			L /h=10			L /h=60		
β_w	β_s	β_c	UD-CNT	O-CNT	X-CNT	UD-CNT	O-CNT	X-CNT
0	0	∞	0.1645	0.1052	0.2007	0.0084	0.0043	0.0122
0.1	0	∞	0.1746	0.1153	0.2108	0.0185	0.0145	0.0224
0.1	0.02	∞	0.1946	0.1353	0.2308	0.0385	0.0345	0.0424
0.1	0.02	0.1	0.2770	0.2177	0.3132	0.0261	0.0221	0.0300

Tableau IV.3: La liste des valeurs de la charge critique de flambement de la poutre pour les différents types de distributions et valeurs du rapport L/h avec et sans fondation élastique ($V_{\text{cnt}}^*=0.17$).

			L /h=10			L /h=60		
β_w	β_s	β_c	UD-CNT	O-CNT	X-CNT	UD-CNT	O-CNT	X-CNT
0	0	∞	0.2580	0.1624	0.3160	0.0123	0.0063	0.0180
0.1	0	∞	0.2681	0.1725	0.3261	0.0224	0.0165	0.0281
0.1	0.02	∞	0.2881	0.1925	0.3461	0.0424	0.0365	0.0481
0.1	0.02	0.1	0.3704	0.2749	0.4284	0.0301	0.0241	0.0358

Tableau IV.4: La liste des valeurs de la charge critique de flambement de la poutre pour les différents types de distributions et valeurs du rapport L/h avec et sans fondation élastique ($V_{cnt}^*=0.28$).

			L /h=10			L /h=60		
β_w	β_s	β_c	UD-CNT	O-CNT	X-CNT	UD-CNT	O-CNT	X-CNT
0	0	∞	0.3560	0.2413	0.4105	0.0195	0.0101	0.0284
0.1	0	∞	0.3661	0.2514	0.4206	0.0297	0.0202	0.0386
0.1	0.02	∞	0.3861	0.2714	0.4406	0.0497	0.0402	0.0586
0.1	0.02	0.1	0.4685	0.3537	0.5230	0.0373	0.0278	0.0462

Les figures IV.1, IV.2 et IV.3 montrent respectivement l'influence des trois paramètres le module Winkler, le module Pasternak et le module de kerr sur la charge critique pour les différentes types des poutres CNTRC. On observe que les charges critiques augmentent avec l'augmentation des facteurs constants de la rigidité et de la fondation élastique.

La poutre X donne la plus grande valeur de la charge critique tandis que la poutre en O donne la plus petite valeur, les poutres UD est intermédiaire, on peut dire que la poutre la plus souple est la poutre en O, tandis que la poutre en X représente la poutre la plus rigide.

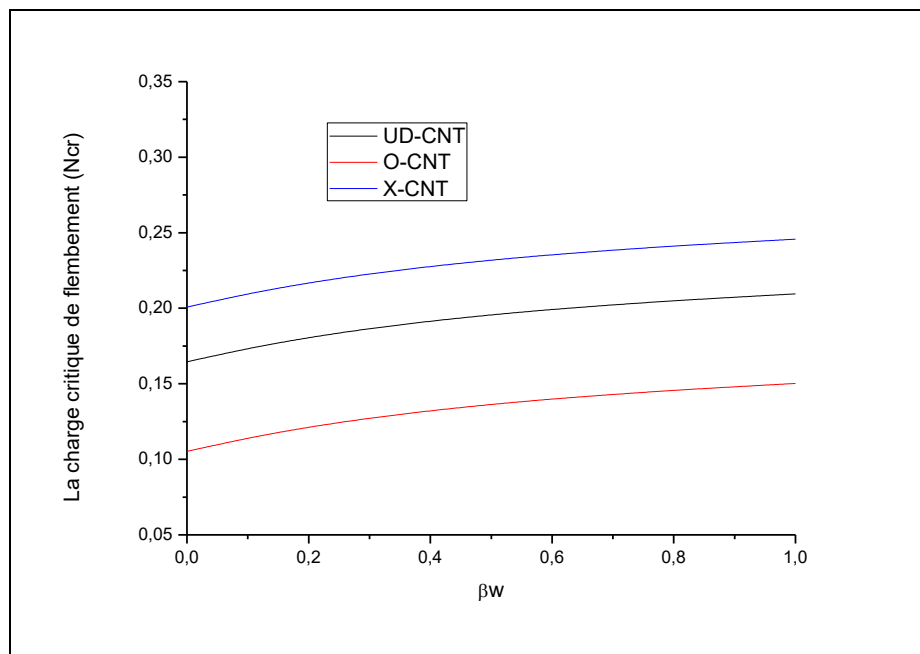


Figure IV.1: Effet du paramètre du module Winkler sur les charges critiques de flambement des poutres CNTRC ($V_{cnt}^*=0.12, \beta_s = 0, \beta_c = 0.8, L/h = 10$).

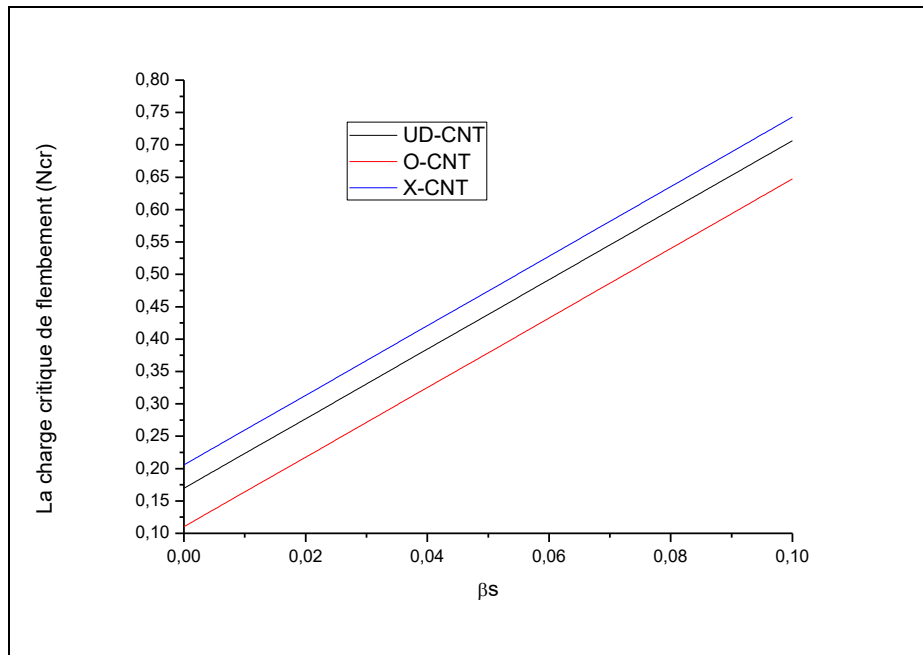


Figure IV.2: Effet du paramètre du module Pasternak sur les charges critique de flambement des poutres CNTRC ($V_{cnt}^*=0.12$, $\beta_w = 0.1$, $\beta_c = 0.1$, $L/h = 10$).

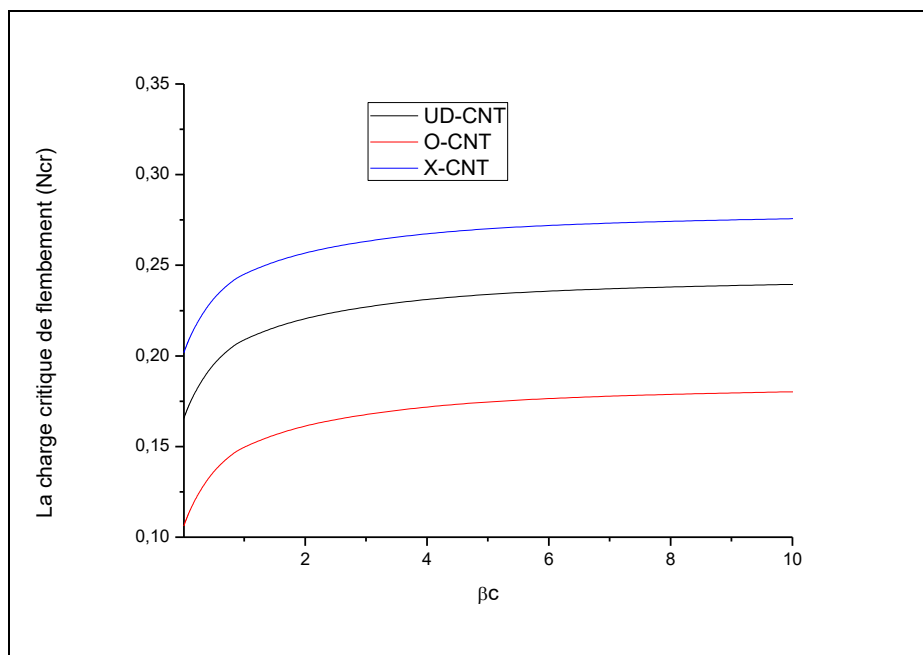


Figure IV.3: Effet du paramètre du module de kerr sur les charges critique de flambement des poutres CNTRC ($V_{cnt}^*=0.12$, $\beta_w = 0.8$, $\beta_s = 0$, $L/h = 10$).

L'effet des différents types de fondation élastique sur la charge critique de flambement de la poutre la plus rigide (la poutre X) est représenté dans la figure IV.4 en utilisant la théorie des poutres raffinée trigonométrique.

On observe que pour différents modèles de milieu élastique, la charge de flambement diminue lorsque le rapport L/d augmente. De plus, on observe qu'il y a une influence

significative du type de milieu élastique sur les charges critiques de flambement de la poutre la plus rigide (X-CNT). A partir la figure IV.4 on remarque que La fondation kerr donne les plus grande valeurs de la charge critique pour les poutres courtes ($L/h = 5$ à $L/h = 25$), par contre dans les poutres longues La fondation kerr et Pasternak donne les plus grande valeurs de la charge critique, Il n'y a pas de grand variation entre eux.

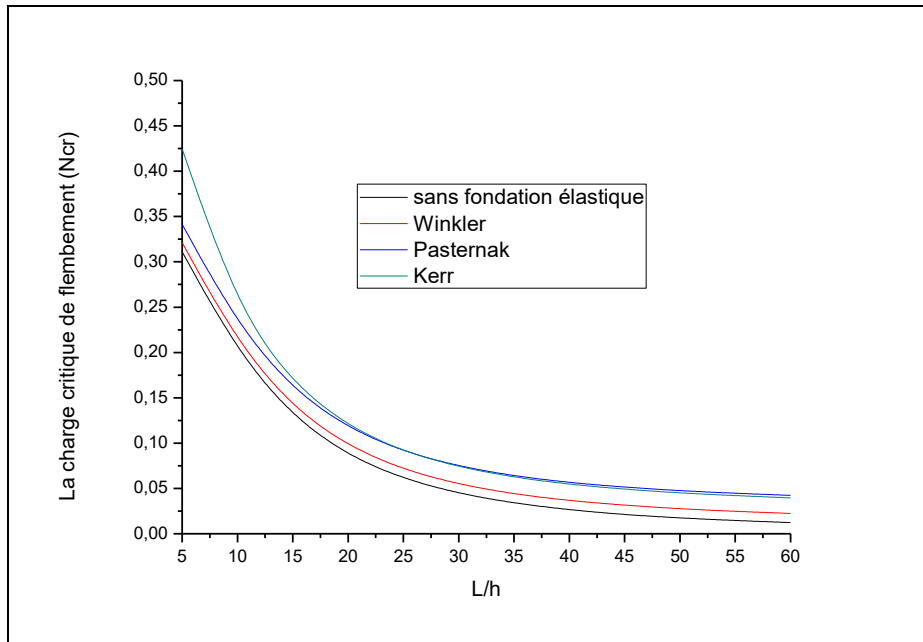


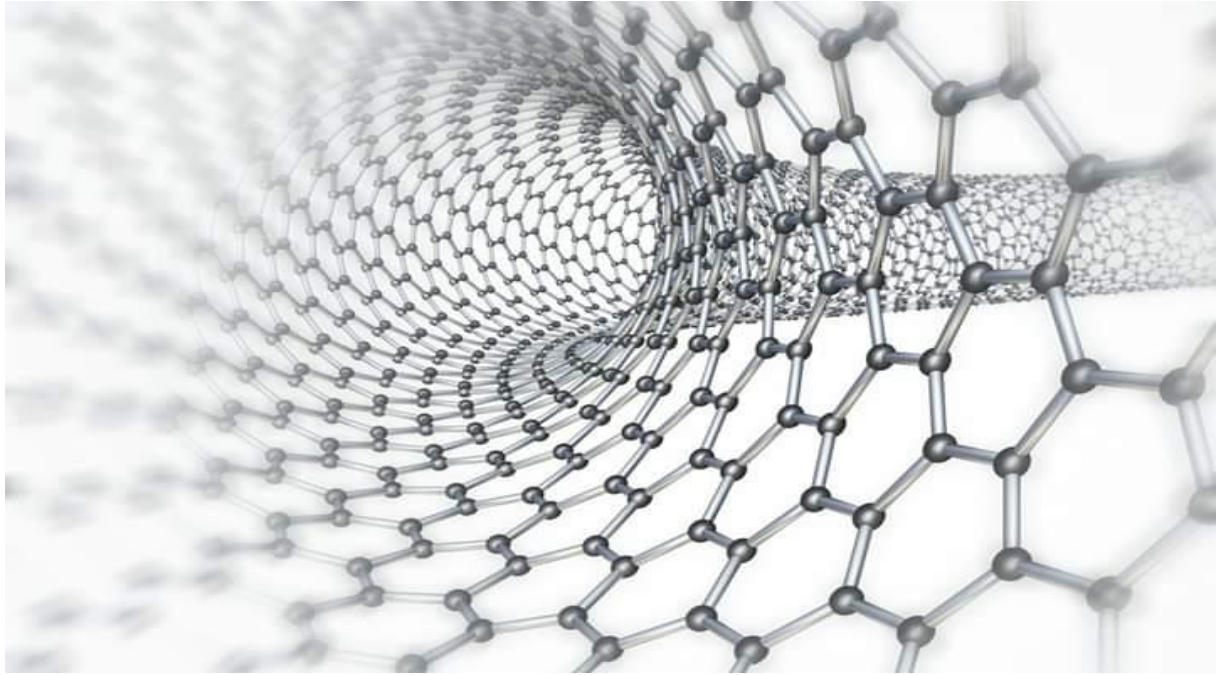
Figure IV.4: Les charges critiques de flambement adimensionnelles de la poutre X avec et sans fondation élastique et avec différents rapports d'épaisseur ($V_{cnt}^*=0.12$).

IV.3 Conclusion

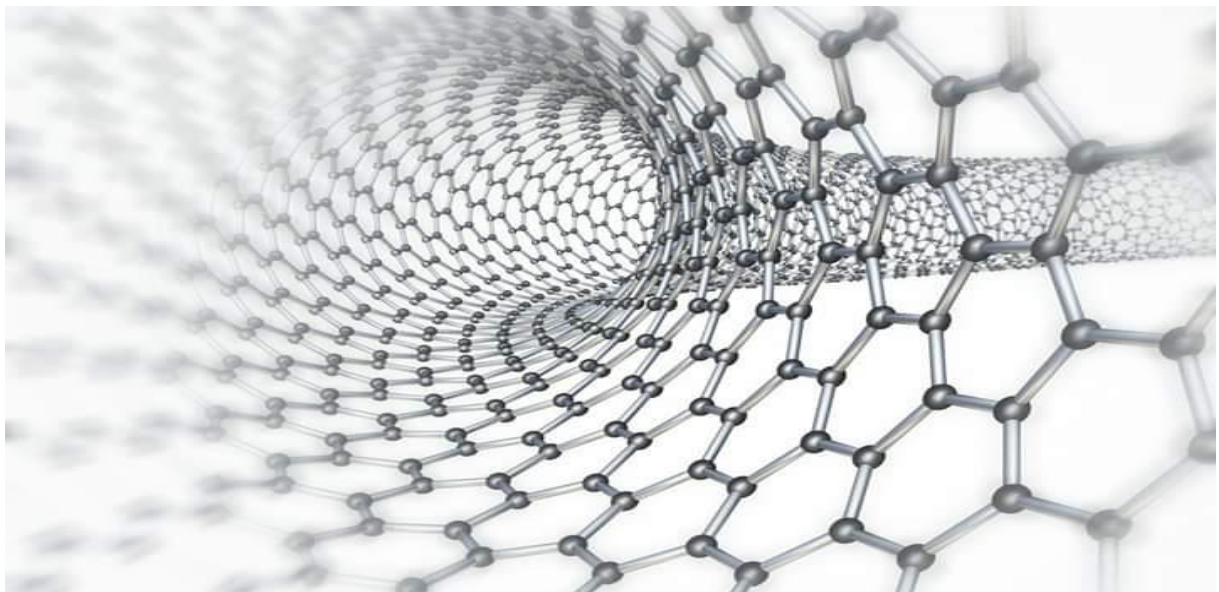
Dans ce chapitre, on a montré l'exactitude de la théorie raffinée trigonométrique utilisée avec seulement trois inconnus en comparant les résultats obtenus avec ceux trouvés dans la littérature.

On peut conclure d'après l'étude faite sur les poutres nanocomposites renforcées par des nanotubes de carbones et la comparaison entre les trois distribution de nanotubes de carbone (UD-CNT ,O-CNT,X-CNT) que la disposition des nanotubes de carbone dans la matrice polymère influe sur la rigidité de la poutre, on a trouvé que la poutre X est la plus rigide par rapport aux autres types des poutres CNTRC avec des charges critiques plus élevées. Les poutres contenant des fractions volumiques les plus élevées ont des charges critiques les plus importantes. Les valeurs des charges critiques diminuent avec l'augmentation du rapport (L/h) et augmentent avec l'augmentation de la fraction volumique V_{cnt}^* .

Finalement, la poutre X est la plus rigide et qui prend la plus grande charge du flambement, suivie par la poutre UD et la poutre O, la fondation kerr donne les plus grande valeurs de la charge critique pour les poutres courtes par rapport aux autres types de fondation.



CONCLUSION GENERALE



CONCLUSION GÉNÉRALE

L'incorporation de nanotubes de carbone dans une matrice polymère permet d'obtenir des matériaux nanocomposites avec des propriétés exceptionnelles.

Nous avons, dans le cadre de ce travail, le développement d'une étude analytique. Cette étude détermine les différents paramètres qui pouvant influencer le flambement d'une poutre en polymère renforcée par des nanotubes de carbone selon trois formes différentes de distribution (UD-CNT, O-CNT, X-CNT), une théorie raffinée trigonométrique est utilisée pour l'analyse de flambement des poutres nanocomposites reposant sur des fondations élastiques de type Kerr. La précision de cette théorie est vérifiée numériquement par comparaison avec les résultats disponibles dans la littérature.

Au regard des résultats trouvés par la formulation proposée, on peut dire que la disposition des nanotubes de carbone dans la matrice polymère influe sur la charge critique, on a trouvé que la distribution des renforts en forme X rend les poutres CNTRC plus rigides tandis que la distribution en forme O les rend plus souples.

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 (\bar{N}) 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}^* .

Ensuite, pour les poutres contenant des fractions volumiques des nanotubes de carbone plus élevées on a trouvé que les charges critiques est 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 le plus faible par rapport les autres renforcements.

L'augmentation des paramètres de la fondation élastique nous a donné une augmentation des charges critiques. Cependant, il a été montré que l'influence du paramètre de kerr est plus significative par rapport à paramètre de Pasternak et Winkler.

En perspective, il est intéressant d'étudier des poutres et des plaques avec d'autres types d'appuis et différents théories, introduire de l'effet de la température pour l'analyse de la charge critique de flambement aussi on utilisant la méthode des éléments finis, tout en changeant le chargement et la fonction de cisaillement.

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 pour les applications dans les domaines civils.

*Bibliographie***-A-**

- [**Abdoulaye 2008**] Abdoulaye Seyni, Propriétés physico-chimiques et d'usage de matériaux composites à charge dégradable produits par co-broyage, thèse de doctorat, l'Université DE TOULOUSE, (2008).
- [**Abrahamson 1973**] J.Abrahamson Carbon, **1973**, 11, 337
- [**Afaq et al 2003**] Afaq.K.S, Karama.M, Mistou. S, "Un nouveau modèle raffiné pour les structures multicouches". In Comptes-rendus des 13^{ème} Journées nationales sur les Composites, pages: 289-292. Strasbourg, (2003).
- [**Agoudjil 2008**] Agoudjil, B ,L. Ibos, J. C. Majesté, Y. Candau, and Y. P. Mamunya, "Corrélation between transport properties of Ethylene Vinyl Acetate/glass, silver-coated glass spheres composites," Composite: Part A, vol. 39, pp. 342-351, (2008).
- [**Ait Atman 2011**] Ait Atman Hassen, Vibration des structures composites en tenant compte de l'effet du cisaillement, thèse de doctorat, L'Université Djilali Liabes de Sidi bel Abbes, (2010).
- [**Ajayan 2000**] P. M. Ajayan, L. S. Schadler, C. Giannaris, A. Rubio, Single-walled carbon nanotubepolymer composites: Strength and weakness. *Adv. Mater.* 2000, 12 (10), 750-753.
- [Ajayan 2007] Ajayan.A.M, J. M.Tour, *Materials science - Nanotube composites.* Nature, 447(7148), 1066-1068, (2007).
- [**Akavci 2014**] Akavci, S.S, "An efficient shear deformation theory for free vibration of functionally graded thick rectangular plates on elastic foundation", *Compos Struct*, 108, 667–676 (2014).
- [**Althues 2007**] Althues .H, J. Henle, et S. Kaskel, Functional inorganic nanofillers for transparent polymers. *Chemical Society Reviews*, **36**(9):1454–1465, (2007). [**Amarelis 2005**] P. Amarelis, Nanocomposites polyméthacrylate de méthyle - silicates lamellaires. Influence de la nature de la charge et de l'interface sur les propriétés mécaniques et sur la transition vitreuse, octobre (2005).
- [**Andrews 2002**] R. Andrews, D. Jacques, D. Qian, T. Rantell, *Accounts of Chemical Research*, 2002, 35, 1008-1017.
- [**Anthony 2006**] Anthony Loiseau, thèse, Elaboration et caractérisation de Nano composites modèles Laponite/Poly oxyde d'éthylène, Université du Maine UMR CNRS 6120 UFR Sciences etTechniques, (2006).
- [**Aranda 1992**] Aranda P, Ruiz-Hitzky E, Poly (ethylene oxide)-Silicate Intercalation Materials. *Chemistry of Materials*, 4 (6): p. 1395-1403, (1992).
- [**Arias 2007**] Arias -Diana Lucio, Loet Leydesdorff, *Scientometrics*, **2007**, 70, 603
- [**Aubry 2009**] C. Aubry, Développement et mise en oeuvre de structures textiles multifonctionnelles contenant des nanotubes de carbone – Application aux capteurs

chimiques pour la détection de solvants, L'Université des sciences et technologiques de Lille, 2009.

[**Aurélié 2010**] Aurelie Cayla, Elaboration de détecteurs souples de température –mise en œuvre et caractérisation de multifilaments à base de polymères immiscibles chargés en nanotubes de carbone, thèse de doctorat, L'Université des sciences et technologiques de Lille école doctorale des sciences pour l'ingénieur, (2010).

[**Avouris 1999**] P. Avouris, T. Hertel, R. Martel, T. Schmidt, H.R. Shea, R.E. Walkup, Appl. Surf. Sci., **141**, 201(1999)

[**Aydogdu 2005**] Aydogdu.M, “Vibration analysis of cross-ply laminated beams with general boundary conditions by Ritz method”, International Journal of Mechanical Sciences **47**, pages: 1740 – 1755, (2005).

-B-

[**Bakhti et al 2013**] Bakhti K, Kaci A, Bousahla A.A, Houari M.S.A, Tounsi A, Adda Bedia E.A, “Large deformation analysis for functionally graded carbon nanotube-reinforced composite plates using an efficient and simple refined theory”, Steel and Composite Structures, 14(4), 335-347, (2013).

[**Bao, Tjong 2008**] Bao S.P, Tjong S.C, Mechanical behaviors of polypropylene /carbon nanotube nanocomposite: the effects of loading rate and temperature. Materials science and engineering A, 485, P.508-516, (2008).

[**Bellifa 2015**] Bellifa Hichem, Application de la théorie du gradient de déformation à l'étude de la réponse des structures multi échelles, Thèse de Doctorat, l'Université de Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes(2015).

[**Belmahi 2020**] M. Belmahi Samir, Étude de la vibration d'un nanotube de carbone situé dans un milieu élastique, thèse de doctorat, Université Djilali Liabes De Sidi Bel Abbes, (2020).

[**Benyounes 2016**] Benyounes Anas, Synthèse de nanotubes de carbone dopés à l'azot et leur application catalytique, thèse de doctorat, l'Université Toulouse (2016).

[**Berber 2000**] S. Berber, Y.-K. Kwon, D. Tománek, Unusually high thermal conductivity of carbon nanotubes, Phys. Rev. Lett., (2000), 84, 4613-4616.

[**Berd 2013**] Berd Mourad, Synthèse, comportement, et caractérisation de nanostructures carbonées composites nanotubes/ fullerènes (« peapods »), l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

[**Besseghier 2011**] Besseghier Abderrahmane, Propriétés mécaniques et acoustiques multiphases Thèse de doctorat l'Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes(2011).

[**Bethune 1993**] D. S. Bethune, C. H. Kiang, M. S. de Vries, G. Gorman, R. Savoy, J. Vazquez, R. Beyers, Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer wall, Nature, 363, 605 (1993).

[**Bin et al 2003**] Y. Bin, M. Kitanaka, D. Zhu, M. Matsuo, Development of Highly Oriented Polyethylene Filled with Aligned Carbon Nanotubes by Gelation /Crystallization from Solutions. Macromolecules. 2003, 36(16), 6213-9.

[Bouderba et al 2013] Bouderba, B., Houari, M.S.A., Tounsi, A, “Thermomechanical bending response of FGM thick plates resting on Winkler–Pasternak elastic foundations”, *Steel and Composite Structures*, 14(1), 85 – 104, (2013).

[Boumia 2017] Boumia Lakhdar Les propriétés physique et mecaniques des nanotubes en carbone, thèse de doctorat, l'Université Abou-Belkaid Tlemcen, (2017).

[Bozlar 2009] Michael Bozlar, Modification de surface des nanotubes de carbone par un polymère conducteur électrogénéré pour la réalisation de nanocomposites multifonctionnels, thèse de doctorat, l'Université« ÉCOLE CENTRALE PARIS » école normal supérieure de cachan- Paris, (2009).

-C-

[Calafat 2008] Calafat Maria, Formation de poudres dans des décharges d'acétylène en Plasma Micro-onde Multipolaire excité à la Résonance Cyclotronique Electronique Répartie. Etude des nanocomposites carbone-carbone et leurs applications, thèse de doctorat, l'Université de Toulouse, (2008).

[Chantal 2010] Chantal Semaan, Polymère nanostructures à base de nanotube de carbone, thèse de doctorat, l'Université de BORDEAUX 1, (2010).

[Chemi 2018] Chemi Awda, La charge critique de flambement d'un nanotube de carbone thèse de doctorat, l'Université Djilali Liabes Sidi Bel-Abbes, (2018).

[Choi 2001] Choi H.J, Kim S.G, Hyun Y.H, Jhon M.S, Preparation and Rheological Characteristics of Solvent Cast Poly (ethylene oxide)/Montmorillonite Nano composites. *Macromol. Rapid Commun*, 22 (5): p. 320-325, (2001).

[Choi et al 2001] Choi S. U. S., et al, Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube, (2001).

[Civalek 2007] O. Civalek, Nonlinear analysis of thin rectangular plates on Winkler-Pasternak elastic foundations by DSC-HDQ methods. *Applied Mathematical Modeling* 31 (2007), 606-624.

[Cruz 2009] E. Cruz-Silva, F. Lopez-Urias, E. Minoz-Sandoval, B.G. Sumpter, H. Terrones, J.C Charlier, V. Meunier, M. Terrones, *ACS Nano* 3,1913-1921, (2009).

-D-

[Decossas 2001] S .Decossas, Nanotribologie par Microscopie de Force Atomique (AFM) sur des nanotubes de carbone, Thèse de Doctorat, Université Grenoble I - Joseph Fourier, (2001).

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

-E-

[Editorial 2006] Editorial Guest, *Carbon*, 2006, 44, 1621

[Eisenberger 1987] M. Eisenberger, J. Clastornik, Vibrations and buckling of a beam on a variable Winkler elastic foundation. *Journal of Sound and Vibration* 115 (1987), 233-241.

[Eisenberger 1994] M. Eisenberger, Vibration frequencies for beams on variable one- and two-paramter elastic foundations. *Journal of Sound and Vibrations* 176(5) (1994), 577-584.

[**ELSawi 2010**] Ihab EL SAWI, Dispersion de nanotubes de carbone et intégration de la fonction de conductivité électrique dans les matériaux composites structuraux, l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, (2010).

[**Emmanuelle 2002**] Emmanuelle Chaber, Propriétés Mécaniques de nanocomposites a matrice polymère : approche expérimentale et modélisation, Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, (2002).

-G-

[**Gao 2005**] J.Gao, M. E.Itkis, A.Yu, E.Bekyarova, B.Zhao, R. C.Haddon, Continuous Spinning of a Single-Walled Carbon Nanotube à Nylon Composite Fiber. Journal of the American Chemical Society 2005, 127 (11), 3847-3854.

[**Garrido 2010**] Garrido Elsa, thèse, Fonctionnalisation de nanotubes de carbone pour leur incorporation dans des matrices métalliques, thèse de doctorat, université de Bordeaux, (2010).

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

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

[**Gonnet et al 2006**] Gonnet P., et al, Thermal conductivity of magnetically aligned carbon nanotube buckypapers and nanocomposites, Current Applied Physics, 6, (1), 119-122, (2006).

[**Grossiord et al 2008**] N. Grossiord, J. Loos, L. Van Laake, M. Maugey, C. Zakri, C.E. Koning, A.J. Hart, High- Conductivity Polymer Nanocomposites Obtained by Tailoring the Characteristics of Carbon Nanotube Fillers. Adv. Funct. Mater, 2008, 18 (20), 3226-3234.

[**Gu 2008**] H. Gu and T. M. Swager, Adv. Mater, vol. 20, pp. 4433–4437, (2008).

-H-

[**Hachour 2010**] Hachour. K, « contribution a l'élaboration d'un critère de plasticité pour le Pehd », thèse de doctorat en génie mécanique, université mouloud mammeri tizi ouzou, (2010).

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

[**Han et al 2011**] Han Z., et al, Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites : A review, Progress in Polymer Science, **36**, (7), 914-944, (2011).

[**Han et Elliott 2007**] Han Y, Elliot J, "Molecular dynamics simulations of the elastic properties of polymer/carbon nanotube composites", Comp. Mater. Sci., 39, 315–323, (2007).

[**Hillert 1958**] M. Hillert N.Lange, Z Zeitschrift fuer Kristallographie, Kristallgeometrie, Kristallphysik, Kristallchemie, **1958**, 111, 24.

[**Hong et al 2008**] Hong W.T., et al, "Investigations on the thermal conductivity of composites, (2008).

[**Huang 2006**] Huang, J.Y., Chen, S., Wang, Z.Q., Kempa, K., Wang, Y.M., Jo, S.H., Chen, G., Dresselhaus, M.S., Ren. Z.F., Nature **439** 281, (2006).

[**Huxtable et al 2003**] Huxtable S. T., et al, Interfacial heat flow in carbon nanotube

suspensions, *Nature Materials*, **2**, (11), 731-734, (2003).

-I-

[**Iijima 1991**] S. Iijima, *Nature*, 354 :56, (1991).

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

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

-J-

[**Jahangir 2011**] Jahangir E, Phénomènes d'interaction sol-structure vis-à-vis de l'aléa retrait gonflement pour l'évaluation de la vulnérabilité des ouvrages, (2011).

[**Jha et al 2012**] Jha, D.K., Kant, T., Singh, R.K, "Higher order shear and normal deformation theory for natural frequency of functionally graded rectangular plates", *Nucl. Eng. Des.* 250, 8–13, (2012).

[**Jha et al 2013**] Jha, D.K., Kant, T., Singh, R.K, "A critical review of recent research on functionally graded plates", *Compos. Struct.* 96, 833 – 849, (2013).

[**Jin et al 2001**] Z. Jin, K.P. Pramoda, G. Xu, S.H. Goh. Dynamic mechanical behavior of melt processed multi walled carbon nanotube/poly (methyl methacrylate) composites. *Chemical Physics Letters*, 2001, 337(1-3), 43-7.

[**Jouenne 2005**] Jouenne.S, Thèse de Doctorat, option chimie et physicochimie des polymères, Université Pierre et Marie Curie, paris, (2005).

[**Journet 1997**] C. Journet, W. K. Maser, P. Bernier, A. Loiseau, M. Lamy de la Chapelle, S. Lefrant, P. Deniard, R. Lee, J. E. Fischer, Large-scale production of single-walled carbon nanotubes by the electric-arc technique, *Nature*, 388, 756-758, (1997).

-K-

[**Kaci et al 2012**] Kaci A, Tounsi A, Bakhti K, Adda Bedia E.A, "Nonlinear cylindrical bending of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite plates", *Steel and Composite Structures*, 12(6), 491- 504, (2012).

[**Kassimi 2011**] Kassimi Nora, Etude des contraintes d'interface d'une poutre FGM renforcées par une plaque en matériaux composites Université Djilali Liabes De Sidi Bel Abbes, (2011).

[**Kerr 1964**] Kerr, A.D,Kerr, Elastic and viscoelastic foundation models, *J. Appl. Mech.-ASME*, 31, 491-498, (1964).

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

[**Kojima 1993**] Kojima Y, A. Usuki, M. Kawasumi, A. Okada, Y. Fukushima, T. Kurauchi, O. Kamigaito, *J. Mater.Res.*1993 , 8, p1185-1189.

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

[**Krätschmer 1990**] W. Krätschmer, L. D. Lamb, K. Fostiropoulos, D. R. Huffman, *Nature*, 347, 354 (1990).

[Krishnan 1998] A. Krishnan, E. Dujardin, T.W. Ebbesen, et al. Young's modulus of single-walled nanotubes. *Phys Rev B* 1998;58(20):14013–9.

[Kroto 1985] H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl, R. E. Smalley, *Nature*, 318 162, (1985).

-L-

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

[Lee 2008] S. H. Lee, M. W. Kim, S. H. Kim and J. R. Youn, *European Polymer Journal*, vol. 44, pp. 1620–1630, 2008.

[Lee 1998] H.P. Lee, Dynamic response of a Timoshenko beam on a Winkler foundation subjected to a moving mass. *Applied Acoustics* 55 (1998), 203-215.

[Levinson 1980] Levinson. M, "An accurate simple theory of the statics and dynamics of elastic plates". *Mechanics Research Communication*, Volume 7, pages: 343-350, (1980).

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

[Li et al 2010] Li, X.F., Wang, B.L., Han, J.C, "A higher-order theory for static and dynamic analyses of functionally graded beams", *Arch Appl Mech*, 80(10), 1197–1212,(2010).

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

[Liu 2004] T.X. Liu, I.Y. Phang, L. Shen, S.Y. Chow, W.D. Zhang, *Macromolecules*, 2004, 37, 7214.

[Liu 2008] J. Liu, A. Rasheed, M. L. Minus, S. Kumar, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 112, pp. 142–156, 2009.

[Liu 1986] Liu .Y Sc.O'Brien, Q.Zhang, J.R.Heath, F.K.Tittel, R.F.Curl, H.W.Kroto, R.E.Smalley, *Chemical Physics Letters*, **1986**, 126, 215

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

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

-M-

[Ma 2009] X. Ma, J.W. Butterworth, G.C. Clifton, Static analysis of an infinite beam resting on a tensionless Pasternak foundation. *European Journal of Mechanics A/Solids* 28, 697-703, (2009).

[Madhav 2015] Madhav Madhira, Abhishek S.V. and Rajyalakshmi K. (2015) *Modelling Ground–Foundation Interactions*, *Innovations in Structural Engineering*, 1-17, Conference Paper, (2015).

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

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

[**Maxime 2011**] Maxime Bertin, fatigue thermomecanique de multicouches polymere/composite, thèse de doctorat, l'Université de Poitiers(2011).

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

[**Mindlin 1951**] Mindlin, R. D, Thickness-shear and flexural vibrations of crystal plates. Journal of applied physics, 22(3), 316-323, (1951).

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

[**Mouatsi 2013**] Mouatsi Abdelmalek , Composants à hétérostructure : Application en nanoélectronique et nanophotonique, thèse de doctorat, l'Université Constantine 1

[**Murthy 1981**] Murthy. M.V.V, "An Improved Transverse Shear Deformation Theory for Laminated Anisotropic Plate". Rapport technique, NASA, (1981).

-N-

[**Nesterenko 1982**] A.M.Nesterenko N.F.Kolesnik, S.Akhmatov Yu, V.I.Sukhomlin, O.V.Prilutskii, Izvestiya Akademii Nauk SSSR Metally, **1982**, 3, 12

[**Nikolaev 1999**] P. Nikolaev, M.J. Bronikowski, R.K. Bradley, F. Rohmund, D.T. Colbert, K.A. Smith, R.E. Smalley, Gas-phase catalytic growth of single-walled carbon nanotubes from carbon monoxide, Chemical Physics Letters, 313 (1999) 91.

[**Nodal 2001**] Nodal Consultants, L'industrie française des matériaux composites Etude stratégique, Rapport final 17 décembre, (2001).

[**Novoselov 2004**] K. S.Novoselov, M. Monthieux, Nanotubes et nanofilaments de carbone, l'actualité chimique. Mars – Avril 2006- n° 295-296. pp. 109-114, (2004).

[**Novoselov 2005**] K. S. Novoselov, P.K. Taygi et al. Thin Solid Films, 469, 127 (2005).

-O-

[**Oberlin 1976**] A. Oberlin, M. Endo, T. Koyama, Journal of Crystal Growth, **1976**, 32, 335.

[**Ould Larbi et al 2013**] Ould Larbi, L, 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, 421–433, (2013).

[**Overney 1993**] G. Overney, W. Zhong, and D .Tománe, Zeitschrift für Physik D Atoms Molecules and Clusters **27**, (1993).

-P-

[**Park 1993**] B. Park, J.W. Shim, H.J. Choi, Y.W. Park, Synthetic Metals, 1993, 56, 3258.

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

[**Pottschke, Fornes 2002**] Pottschke P, T.D Fornes, D.R.Paul, rheological behavior of multi walled carbone nanotube /polycarbonate composites polymer, vol 43, P.3247-3255, (2002).

[Putz et al 2004] K.W. Putz, C.A. Mitchell, R. Krishnamoorti, P.F. Green. Elastic modulus of single-walled carbon nanotube/poly (methyl methacrylate) nanocomposites. Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics, 42(12), 2286-93, (2004).

-R-

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

[Rakrak 2018] Rakrak Kaddour, Etude de la vibration libre D'un nanotube en carbone These de doctorat, l'Université de Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes (2018).

[Reddy 1997] Reddy, J.N, "On locking-free shear deformable beam finiteelements", Comput. Meth. Appl. Mech. Eng., 149, 113-132, (1997).

[Reddy1984]Reddy, « A simple higher-order theory for laminated composite plates », Journal of Applied Mechanics, vol. 51, pp. 745-752, (1984).

[Reissner 1945] Reissner, E. The effect of transverse shear deformation on the bending of elastic plates. J. appl. Mech., A69-A77, (1945).

[Ruoff 1995] R. S. Ruoff, D. C. Lorents, Carbon, (1995), 33, 925.

-S-

[Salem 2012] Diana Salem, Synthèse de nanotubes de carbone monofeuilles individuels et composites modèles polymères –nanotubes de carbone. Application à l'effet photovoltaïque, thèse de doctorat, l'Université de Strasbourg.

[Salmi 2008] Salmi Aicha, Syntése et propriétés de matériaux nanocomposites à renforts graphitiques et cellulosiques thèse de doctorat, l'Université EL Hadj Lakhdar –Batna.

[Sandler et al 2003] Sandler J. K. W., et al, Ultra-low electrical percolation threshold in carbonnanotube-epoxy composites, Polymer, 44, (19), 7, (2003).

[Shahrjerdi et al 2011]Shahrjerdi, A., Mustapha, F., Bayat, M., Majid, D.L.A, "Free vibration analysis of solar functionally graded plates with temperature-dependent material properties using second order shear deformation theory", Journal of Mechanical Science and Technology, 25 (9), 2195 – 2209, (2011).

[Sinha 2003] Sinha Ray, S. et M. Okamoto, Polymer/layered silicate Nano composites: a review from preparation toprocessing, Progress in Polymer Science, 28 (11): p. 1539-1641, (2003).

[Sluzarenko 2006] N.Sluzarenko, B.Heurtefeu, M.Maugey, C.Zakri, P.Poulin, S.Lecommandoux, Diblock copolymer stabilization of multi-wall carbon nanotubes in organic solvents and their use in composites. Carbon 2006, 44 (15), 3207-3212.

[Smalley 1997] R. E. Smalley, D. T. Colbert, T. Guo, A. G. Rinzler, P. Nikolaev, A. Thess, International Patent, 13 March (1997), international publication number WO 97/09272.

[Stejskal al 2012] Stejskal J et al, Polymer Degradation and Stability, 97, 1026-1033, (2012).

[Stones 1986] A. J. Stones, D. J. Wales, Chem. Phys. Lett., (1986), 128, 501.

[Sui 2008] G. Sui, W. H. Zhong, X. P. Yang, Y. H. Yu and Zhao, Polym. Adv. Technol, vol.19, pp. 1543- 1549, (2008).

-T-

[**Tagrara 2017**] **Tagrara** Samira Hassiba, Analyse de la flexion statique, le flambement et la vibration des structures composites renforcées par des nanotubes de carbone, thèse de doctorat, l'Université de Djilali Liabes Sidi Bel-Abbes, (2017).

[**Talha et Singh 2010**] Talha, M., Singh, B.N, “Static response and free vibration analysis of FGM plates using higher order shear deformation theory”, Appl. Math. Model., 34(12), 3991–4011, (2010).

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

[**Thomas Périé 2011**] M. Thomas Périé Dispersion de nanotubes de carbone dans les polymères : de la nanostructuration aux composites hautes performances, Thèse de doctorat, l'Université de Pierre et marie curie(2011).

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

[**Timoshenko 1959**] Timoshenko, S. P., & Woinowsky-Krieger, S. Theory of plates and shells. McGraw-hill, (1959).

[**Timoshenko et al 1972**] S.P.Timoshenko et J.M.Gere, “Mechanicsof Materials ”. New York: D.VanNostrand Company, (1972).

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

-V-

[**Verdu 2006**] Verdu.J, Interaction polymères-procédé, Matériaux et techniques, EDP sciences, 94, 323335, (2006).

[**Viory 2010**] Viory Damien, thèse de solubilisation et fonctionnalisation covalente de nanotube de carbone et autre forme de carbone, (2010).

-W-

[**Wang 2009**] S. R.Wang, R.Liang, B.Wang, C.Zhang, Carbon 2009, 47 (1), 53-57.

[**Wang et al 2003**] M. Wong, M. Paramsothy, X.J. Xu, Y. Ren, S. Li, K. Liao. Physical interactions at carbon nanotubepolymer interface. Polymer, 44(25), 7757-64, (2003).

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

[**Wautelet 2003**] Wautelet .M et coll, Les nanotechnologies, Edition Dunod, Paris, (2003).

[**web1**] <http://www.us-nano.com/nanotubes>

[**Wei 2001**] B.Q.We, “ Reliability and current carrying capacity of carbon nanotubes”, Applied Physics Letters, 79, no. 8 (2001) 1172-1174.

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

[Weiss 2010] P. Weiss, Société Francophone de Biomatériaux Dentaires, Date de création du document, (2010).

[Wu 1993] Wu J, Lerner M.M, Structural, Thermal, and Electrical Characterization of Layered Nanocomposites derived from Na-Montmorillonite and Polyethers. Chemistry of Materials, 5 (6): p. 835, (1993).

-X-

[Xabier 2012] xabierer rotabehere, thèse de doctorat, l'université bordeaux 1 école doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur, (2012).

[Xiao 2007] K. Q. Xiao, L. C. Zhang, I. Zarudi, Composites Science and Technology, 2007, 67, 177–182.

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

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

-Y-

[Yaghoobi et al 2014] Yaghoobi, H., Valipour, M.S., Fereidoon, A., Khoshnevisrad, P, “Analytical study on post-buckling and nonlinear free vibration analysis of FG beams resting on nonlinear elastic foundation under thermo-mechanical loading using VIM” Steel and Composite Structures, 17(5), 753–776, (2014).

[Yaghoobi et Fereidoon 2014] Yaghoobi, H., Fereidoon, A, “Mechanical and thermal buckling analysis of functionally graded plates resting on elastic foundations: An assessment of a simple refined nth-order shear deformation theory”, Composites: Part B, 62, 54–64, (2014).

[Yakobson 1996], B.I. Yakobson, Brabec, C.J., Bernholc, J., Physical Review Letters 76, 2511, (1996).

[Yang 1999] Yang.Y, Zhu Z.K, Yin J, Wang X.Y, Qi Z.E, Polymer, 1999, 40, p4407-4414.

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

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

-Z-

[Zemri 2015] Zemri Amine, Etude comparative entre la théorie locale et non locale d'élasticité: Application aux structures homogènes, These de doctorat 3em cycle lmd l'Université de Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes

[Zhang 2006] Q. Zhang, S. Rastogi, D. Chen, D. Lippits, P.J. Lemstra, Carbon, 2006, 44, 778-785.

[Zhu 1999] Zhu.Z.K, Yang Y., Yin J., Wang X.Y., Ke Y.C., Qi Z.N., J. Appl. Polym. Sci, 1999, 73, p2063-2068.

[Zidour 2012] Zidour Mohamed, Etude du comportement mécanique des nanotubes en carbone entourés par une matrice polymère, thèse de doctorat, Université Djilali Liabes De Sidi Bel Abbas, (2012).

