

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

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

Spécialité : Génie Civil

Option : Structure

Présenté par :

CHETOUANE ISLAM

BOUSSEKINE HALIM SOUFIANE

Sujet du mémoire

**Analyse en Flexion d'une Poutre en nano-composite
(FG-CNT) Reposant sur une Fondation élastique**

Soutenu ledevant le jury composé de :

Dr. BENSATALLAH	Président
Pr. M. ZIDOUR	Rapporteur
Pr. T.H. DAOUADJ	Examineur
Dr. A. SAOULA	Examineur

PROMOTION : 2019/2020

Remerciements

Au terme de ce travail nous tenons à remercier en premier lieu Allah qui nous a donné la force et la patience d'achever ce mémoire.

Nous tenons remercier à monsieur **ZIDOUR MOHAMMED** pour avoir bien voulu proposé un sujet fort intéressant et de nous diriger tout au long de cette recherche.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos recherche.

Enfin, on remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

MERCI.

Dédicace

A nos chers parents, pour tous leurs sacrifices, leurs amours,
leurs tendresses, leurs soutiens et leurs prières tout au long
de nos études, A nos chères sœurs Pour leurs
Encouragements permanents, et leurs soutiens morales.

A mes chers amis, Amine,
Nadjmeddine, Yassine, Kadi, Hamouda, Oussama, Ismail,
Mouafak.

Pour leur appui et leur encouragement, A toute nos familles
Pour leur soutiens tous aux longs de notre parcours
universitaire, Que ce travail soit
l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de
votre soutien infaillible, Merci
d'être toujours là pour nous.

Sofiane et Islam.
Sofiane et Islam.

RÉSUMÉ

Dans ce travail de recherche on a basé sur une théorie raffinée d'ordre élevée qui prend en considération l'effet de cisaillement transversal. Le modèle des poutres considérées sont supposées être posées sur une fondation élastique de type Kerr. Deux types de distributions de matériaux de renforcement alignés de manière uniaxiale sont utilisés: Poutre à distribution uniforme (UD-CNT) et fonctionnellement graduées (FG-CNT). Les équations analytiques du modèle sont dérivées et les solutions exactes pour les déplacements et les contraintes sont obtenues. Les effets des différents paramètres tels que, les fractions volumiques, les rapports géométriques de la poutre, les paramètres de rigidité de la fondation et le type de renforcement sur le comportement statique sont analysés et discutés.

Mots clés : Poutres, flexion, fondation élastique, Kerr.

ABSTRACT

In this research work it is based on a refined theory of high order, which takes into account the transverse shear effect. The model of the beams considered are supposed to be placed on an elastic foundation of the Type Kerr. Two types of uniaxially aligned reinforcement material distributions are used: Uniform Distribution Beam (UD-CNT) and Functionally Graduated (FG-CNT). The analytical equations of the model are derived and the exact solutions for movements and constraints are obtained. The effects of different parameters such as, volume fractions, geometric ratios of the beam, the rigidity parameters of the foundation and the type of reinforcement on static behavior are analyzed and discussed.

Keywords: Beams, bending, elastic foundation, Kerr.

ملخص

في هذا العمل البحثي الذي يستند إلى نظرية الترتيب العالي ريفيني والتي تأخذ في الاعتبار تأثير القص العرضي. و من المفترض أن يتم وضع نموذج الرافدة الذي يتم النظر فيه على أساس مرن من نوع كبير. ويستخدم نوعان من توزيع مواد التعزيز التي تتماشى بطريقة محورية واحدة: رافدة توزيع موحد وتخرج وظيفيا . يتم اشتقاق المعادلات التحليلية للنموذج ويتم الحصول على الحلول الدقيقة للحركات والقيود. يتم تحليل آثار إعدادات مختلفة مثل كسور الحجم ، والنسب الهندسية للشعاع ، وإعدادات صلابة الأساس ونوع التعزيز على السلوك الثابت الذي تم تحليلها ومناقشتها.

الكلمات الرئيسية: رافدة ، الانحناء، الأساس مرن ، كبير

Sommaire

Remerciements	i
Dédicace	ii
Résumé	iii
Abstract.....	iv
ملخص	v
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	vii
Liste des abréviations	viii
Liste des notation.....	ix
Introduction générale	02

Chapitre I: Généralités sur les nanotubes de carbone

I.1	Introduction.....	05
I.2	Les formes allotropiques du carbone.....	05
I.2.1	Les formes naturelles.....	05
I.3	Structure des nanotubes de carbone.....	07
I.4	Techniques de synthèses de nanotubes de carbone.....	08
I.4.1	L'arc électrique.....	08
I.4.2	Ablation laser.....	09
I.4.3	Synthèse par CCVD.....	10
I.5	propriétés des nanotubes de carbone.....	11
I.5.1	Propriétés électriques.....	11
I.5.2	propriétés thermiques	12
I.5.3	Propriétés mécaniques.....	12
I.5.4	Autres propriétés physiques des nanotubes de carbone.....	13
I.6	Exposition aux nanotubes de carbone.....	14
I.6.1	Risques des nanotubes de carbone pour l'organisme.....	14
I.7	Le marché des nanotubes de carbone.....	14
I.8	Applications des nanotubes de carbone.....	14

I.9	Les défauts des nanotubes.....	15
I.10	Conclusion.....	16
Chapitre II: Généralités sur les nanocomposites		
II.1	Introduction.....	18
II.2	Définition d'un nanocomposite.....	18
II.3	Les différents nanorenforts.....	18
II.3.1	Nanoparticules à trois dimensions nanométriques : nanoparticule.....	19
II.3.2	Nanoparticules à deux dimensions nanométriques : nanofibres.....	20
II.3.3	Nanoparticules à une dimension nanométrique : feuillets.....	20
II.4	Classification des nanocomposites selon la nature de la matrice.....	20
II.4.1	Les composites à matrice organique.....	21
II.4.2	Les composites à matrice métallique.....	24
II.4.3	Les composites à matrice céramique.....	25
II.5	Les nano-composites à matrice polymère et renfort (CNT)	25
II.6	Dispersion des renforts.....	26
II.6.1	Utilisation des ultrasons.....	26
II.6.2	Dispersion mécanique par tricylindre.....	26
II.7	Procédés d'élaboration des nanocomposites (NTC/polymère).....	27
II.7.1	Polymérisation in situ.....	27
II.7.2	Mélange en solution.....	27
II.7.2	Mélange à l'état fondu.....	28
II.8	Propriétés des nanocomposites (NTC/polymère).....	28
II.8.1	Propriétés mécaniques des nanocomposites (NTC/polymère).....	28
II.8.2	Propriétés électriques des nanocomposites (NTC/polymère).....	29
II.8.3	Propriétés thermiques des nanocomposites (NTC/polymère).....	29
II.9	Interface matrice-renfort dans les nanocomposites à matrice polymère.....	30
II.10	Applications des nanocomposites.....	30
II.11	Application des nanocomposites dans le domaine de Génie civil.....	30
II.12	Conclusion.....	31

***CHAPITRE III : Théories des poutres et développement Mathématique du
présent modèle***

III.1	Introduction.....	34
III.2	Les différentes théories des poutre.....	34
III.2.1	Théorie d'Euler Bernoulli ou bien théorie classique des poutres.....	34
III.2.2	Théorie de Timoshenko.....	35
III.2.3	Théorie d'ordre élevé (raffinée)	37
III.2.4	Les fondations élastiques (winkler et pasternak).....	40
III.2.5	Les fondations élastiques (kerr).....	40
III.3	Les propriétés matérielles des poutres composites renforcées par de nanotube de carbone.....	41
III.3.1	Cinématique et équations constitutives.....	44
III.3.2	Les équations du mouvement.....	45
III.3.3	Les solutions analytiques pour la poutre CNTRC.....	47
	Conclusion.....	49

CHAPITRE IV : Résultats et Discussions

IV.1	Introduction.....	51
IV.2	Analyse statique des poutres CNTRC.....	51
IV.3	Conclusion.....	57

Liste des figures

Chapitre I: Généralités sur les nanotubes de carbone

I.1 : Structure cubique à faces centrées du diamant.....	06
I.2 : Structure du graphite.....	06
I.3 : Représentation des structures d'un nanotube monofeuillet (SWNT) et d'un nanotube multifeuillet (MWNT).....	07
I.4 : Représentation de la structure de nanotubes de carbone	08
I.5: Schéma de principe du procédé de synthèse par arc électrique.....	09
I.6: Schéma de principe du procédé de synthèse par ablation laser.....	10

Chapitre II : Généralités sur les nanocomposites

II.1 : Représentation schématique des différents renforts. (a)nanoparticule ; (b)nanofibre ; (c) feuillet.....	19
II.2: Types de matrice.....	21
II.3 : Quelques applications des CMO "haute performance" : (a) un catamaran, (b) le support de la charge utile d'Ariane 5, (c) des skis de compétition).....	21
II. 4 :Exemples de tissus de renforts utilisés pour les CMO haute performance	22
II. 5 : Exemples de charges utilisées dans les CMO	23
II. 6 : Pièces en CMM.....	24
II.7 : Quelques applications des CMC.....	25
II.8 : a)Tricylindre Exact 80E b) Schéma du circuit	27
II.9 - Méthodes d'élaborations des nanocomposites polymères : a) mise en œuvre dans le fondu, b) mise en solution et c) polymérisation in situ.....	28

Chapitre III : Théories des poutres et développement Mathématique du présent modèle

III.1- Cinématique d'Euler Bernoulli	34
III.2 - Cinématique de Timoshenko	37
III.3 - Cinématique de la Théorie d'Ordre Elevé.....	38
III. 4- (a) Géométrie de la poutre CNTRC sur une fondation élastique (b)les différents modèles des dispositions des renforts	41

Chapitre IV : Résultats et Discussions

IV.1- Effet du Paramètre du module de Winkler sur les déplacements Transversaux adimensionnels des poutres CNTRC sous des charges uniformément répartie($L / h = 10$; $\beta_s = 0$; $\beta_c = 0.8$; $V_{cnt}^* = 0.12$).....55

IV.2- *Effet du paramètre du module de cisaillement Pasternak sur les déplacements transversaux adimensionnels des poutres CNTRC sous des charges uniformément réparties($L / h = 10$; $\beta_w = 0.1$; $\beta_c = 0.8$; $V_{cnt}^* = 0.12$).....55*

IV.3 -*Effet du paramètre du module de Kerr sur les déplacements transversaux adimensionnels des poutres CNTRC sous des charges uniformément réparties($L / h = 10$; $\beta_w = 0.8$; $\beta_s = 0$; $V_{cnt}^* = 0.12$).....56*

IV.4 - *Déplacements transversaux adimensionnels de la poutre X sur une fondation élastique avec différents rapports d'épaisseur57*

Liste des tableaux

Chapitre I: Généralités sur les nanotubes de carbone

I.1 Quelques propriétés mécaniques des nanotubes de carbone13

Chapitre IV : Résultats et discussion.

IV.1 - Déplacements et contraintes adimensionnels de la poutre UD avec et sans
fondation élastique sous des charges uniformément réparties.....52

IV.1 - Déplacements et contraintes adimensionnels de la poutre UD avec et sans
fondation élastique sous des charges uniformément réparties.....53

IV.3 - Déplacement de différentes poutres pour différentes valeurs des fondations
élastique sous des charges uniformément réparties.....54

IV.4 - Déplacement de différentes poutres pour différentes valeurs des fondations
élastique sous des charges sinusoïdales.....54

Liste des abréviations

CNTs	Nanotube de carbone
CNTRCs	Poutre de composite renforcée par des nanotubes de carbone
SWCNT	Nanotube de carbone simple paroi
MWCNT	Nanotube de carbone double paroi
FG	Fonctionnellement gradué
NC	Nanocomposite
PE	Polyéthylène
PP	Polypropylène
PS	Polystyrène PA Polyamide
PC	Polycarbonate
TP	Thermoplastique
MMCs	Composites à matrice métallique
MWNT	Nanotube de carbone à simple paroi
CVD	Chemical Vapor Deposition

Liste des Notations

Θ	Angle chiral
\vec{a}_1, \vec{a}_2	Les vecteurs de base du graphène
d_{002}	Distance entre deux plans de graphite
\vec{C}_h	Vecteur chiral
(m, n)	Un couple de nombres entiers qui définit la structure du nanotube
C60	Fullerène C60
C70	Fullerène C70
C80	Fullerène C80
L	Longueur de la poutre
h	Epaisseur de la poutre
$E_{11}^{cnt}, E_{22}^{cnt}$	Modules de Young des nanotubes de carbone
G_{12}^{cnt}	Module de cisaillement des nanotubes de carbone
V_{cnt}	Fraction volumique des nanotubes de carbone et de la matrice
V_p	Fraction volumique de la matrice polymère
$\eta_i (i = 1, 2, 3)$	Les paramètres d'efficacité
ν^{cnt}	Coefficient du poisson du nanotube de carbone
ν^p	Coefficient du poisson de la matrice polymère
ρ^{cnt}	Masse volumique du nanotube de carbone

ρ^p	Masse volumique de la matrice polymère
V_{cnt}^*	Fraction volumique du nanotube de carbone
W_{cnt}	Fraction massique du nanotube de carbone
u_0	Déplacement axial
w_b	Composante de la flexion du déplacement transversal long du plan médian de la poutre
w_s	Composante du cisaillement du déplacement transversal long du plan médian de la poutre
$f(z)$	Fonction de forme
$\varepsilon_x, \gamma_{xz}$	Composantes de déformation
Q_{ij}	Coefficients de rigidité
τ_{xz}	Contrainte tangentielle
δU	La variation virtuelle de l'énergie de déformation
δV	La variation virtuelle de l'énergie potentielle
N, M_b, M_s	Les efforts résultants
q	La charge transversale
f_e	La force de réaction de la fondation
K_w	Constante de rigidité de Winkler
K_s	Constante de rigidité de cisaillement Pasternack
K_c	Constante de rigidité de cisaillement Kerr
β_w, β_s et β_c	Facteurs constants de la fondation élastique
A_{110}	Rigidité d'extension ou la valeur de A_{11} d'une poutre homogène
A_{11}	Rigidité de membrane

B_{11}	Rigidité de couplage (membrane-flexion)
D_{11}	Rigidité de flexion
A_{11}	Rigidité de cisaillement
C_{11}, H_{11}, E_{11}	Les éléments de rigidité d'ordre élevé
Q_m	L'amplitude de la charge
U_m, W_{bm} et W_{sm}	Des paramètres arbitraires
q	La charge transversale
σ_{xx}	Contrainte normale dans la direction x
σ_{xz}	Contrainte normale dans la direction xz
S_i, m_i	Eléments de la matrice
Q_n	Amplitude de charge
$\delta u_0, \delta w_b, \delta w_s$	Champ virtuel de déplacement

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Un monde nouveau est en train de naître, un monde qui nous promet des produits plus petits, plus légers, un monde qui nous propose des ordinateurs plus performants, des moyens de communication plus rapides, des traitements médicaux plus efficaces, un environnement plus propre, un cadre de vie plus agréable. Ce monde, c'est le nanomonde, c'est-à-dire le monde des nanosciences et des nanotechnologies. Ce monde, qui est apparu il y a un vingtaine d'années grâce au développement des techniques de manipulation et de caractérisation, permet d'apporter de nouvelles solutions aux problèmes rencontrés.

Découverts en 1991 par Sumio Iijima, les nanotubes de carbone (CNTs) sont devenus rapidement les fanions de la nanotechnologie avec les nanoparticules, les nanofils, les fullerènes et les couches moléculaires. Les nanotubes existent en plusieurs variétés et peuvent être classifiés par leur hélicité (chiralité), nombre de feuillets, la présence des pentagones-heptagones dans leur structure, etc. La forme la plus simple est le nanotube de carbone monofeuillet, qui peut être visualisé comme une feuille de graphène, ressemblant à un nid d'abeilles, roulée dans un cylindre.

Les nanotubes de carbone sont plus durs que le diamant. Ils peuvent aussi supporter des déformations de quelques pourcents tout en restant élastiques. La liste de leurs avantages ne doit pas s'arrêter ici, puisque les nanotubes de carbone possèdent des propriétés optiques, thermiques, électromécaniques et magnétiques également intéressantes.

Bien que de mieux en mieux contrôlée, la synthèse des nanotubes de carbone implique des mécanismes qui ne sont pas parfaitement compris à l'heure actuelle. Cette chaîne manquante est directement responsable de l'incapacité de synthétiser des nanotubes avec des propriétés contrôlées, et est probablement la raison principale pour laquelle les nanotubes de carbone ne sont pas employés sur une plus grande échelle.

Dans ce travail, nous avons également abordé les nanocomposites en particulier la nanocomposite (NTC/polymère) et leurs Procédés d'élaboration, paramètres et les applications dans le domaine de génie civile . Ensuite, nous avons présenté les fondations élastique et ses trois types (Winkler , Pasternak et Kerr) Et la différence entre eux.

Les nanotube de carbone étudiées dans ce travail sont reposent sur la fondation élastique Kerr . des solutions mathématiques et l'influence des quelques paramètres sont calculer est discutées en détail.

Ce travail est composé de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous décrivons des généralités sur les nanotube de carbone , ces différents types et leurs propriétés , différentes techniques de synthèse et ces applications.

Le second chapitre présentera les différents types de nanocomposites existants ainsi leur classification et propriétés, une description générale sur les nanocomposite sa base (NTC / polymère) en particulier la dispersion des renforts dans la matrice polymère et la production mondiale des nanocomposites à base (polymère / NTC) .

Le troisième chapitre englobe les différentes théories des poutres, et consacré aux formulations mathématiques. Ensuite nous utilisons la théorie d'ordre élevé (raffinée) pour étudier la flexion et nous avons parlé aussi sur les différentes types des fondations élastiques .

Le dernier chapitre sera consacré aux résultats et discussions et présenté les propriétés matérielles des poutres étudiées et qui sont faites d'une matrice polymère renforcées par des nanotubes de carbone.

CHAPITRE I
GÉNÉRALITÉS SUR LES
NANOTUBES DE CARBONE

I.1 Introduction

Les nanotubes de carbone ont été décrits comme la troisième forme cristalline du carbone (fullerène), défini comme une nouvelle structure du carbone. Ils furent mis en évidence par l'équipe de Kroto, Smalley et Curl [1] qui synthétisèrent une molécule de C_{60} dans les laboratoires de l'université de Rie. A la lumière de cette découverte, de nombreux chercheurs se sont intéressés à l'étude de la structure de certains sous-produits de synthèses carbonées.

LiJima observa au microscope électronique à transmission (TEM) une structure de carbone sp^2 , de type fullerène de forme cylindrique creuse de molécule de carbone appelée nanotube de carbone mono-paroi (en anglais : Single Walled Carbon Nano Tube SWCNT).

Ces nanotubes sont séparés de $\sim 0.34\text{nm}$ et ils ont un diamètre de l'ordre du nanomètre et une longueur de quelques micromètres. Depuis, différentes méthodes de synthèse spécifiques ont été mises au point et ont permis l'étude en laboratoire de ces structures et de leurs propriétés physiques, ce qui laisse entrevoir de nombreuses applications, notamment dans les domaines de la microélectronique et nanoélectronique.

Finalement les nanotubes de carbone (NTC) s'imposent comme étant un matériau d'avenir.

I.2. Les formes allotropiques du carbone

Ici nous allons développer les différentes formes allotropiques du carbone, qu'elles soient naturelles ou bien synthétiques.

I.2.1. Les formes naturelles

Le diamant

Le diamant est l'une des formes allotropiques compacte de carbone. Les atomes de carbone sont en état d'hybridation sp^3 . Leur disposition spatiale se fait selon une géométrie tétraédrique (tridimensionnelle de structure cubique) et la distance entre 2 atomes de carbone est de $0,154\text{ nm}$.

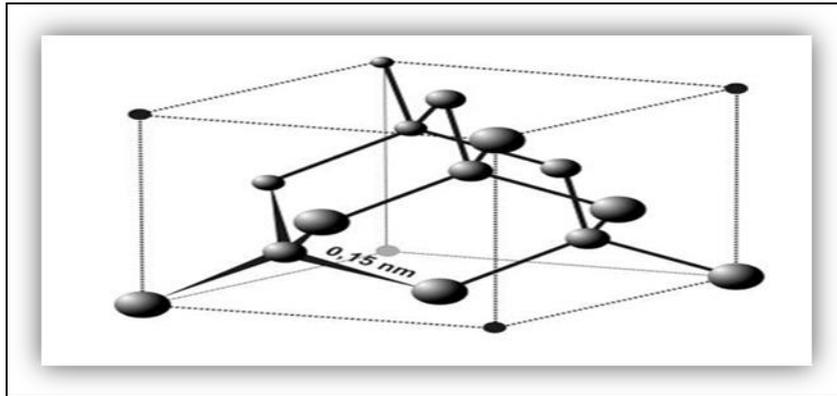


Figure I.1 : Structure cubique à faces centrées du diamant.

Le diamant est le matériau le plus dur existant. Il est également un bon isolant électrique et possède la plus haute conductivité thermique. Le diamant est une forme métastable du carbone dans les conditions normales de température et de pression contrairement au graphite [2].

Le graphite

A température ambiante et pression atmosphérique, le graphite est l'élément le plus stable thermodynamiquement, est donc la forme la plus courante de carbone. Il est généralement constitué d'un empilement de feuillets de graphène liés par des liaisons de type Van der Waals, constitué d'un réseau hexagonal d'atomes de carbone qui sont espacés de 0,334 nm. Ce type de

liaisons étant faible, c'est pourquoi le graphite est facile à feuiller [3]. Tous les carbones sont hybridés sp^2 , ce qui autorise une délocalisation des électrons π et la conduction électrique au sein du plan [4].

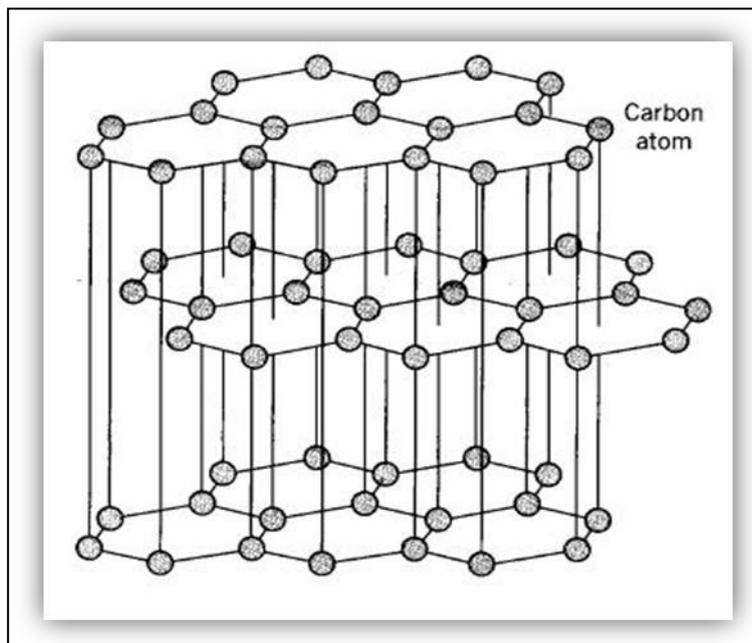


Figure I.2 : Structure du graphite.

I.3 Structure des nanotubes de carbone

Si le NTC est constitué d'un seul feuillet de graphène, on parle de nanotube mono-feuillet (SWNT, pour Single Wall NanoTube ou nanotube mono paroi), et s'il est constitué de plusieurs couches, on parle de nanotubes multi-parois (MWNT, pour Multi Wall NanoTubes ou nanotubes multi- feuillets).

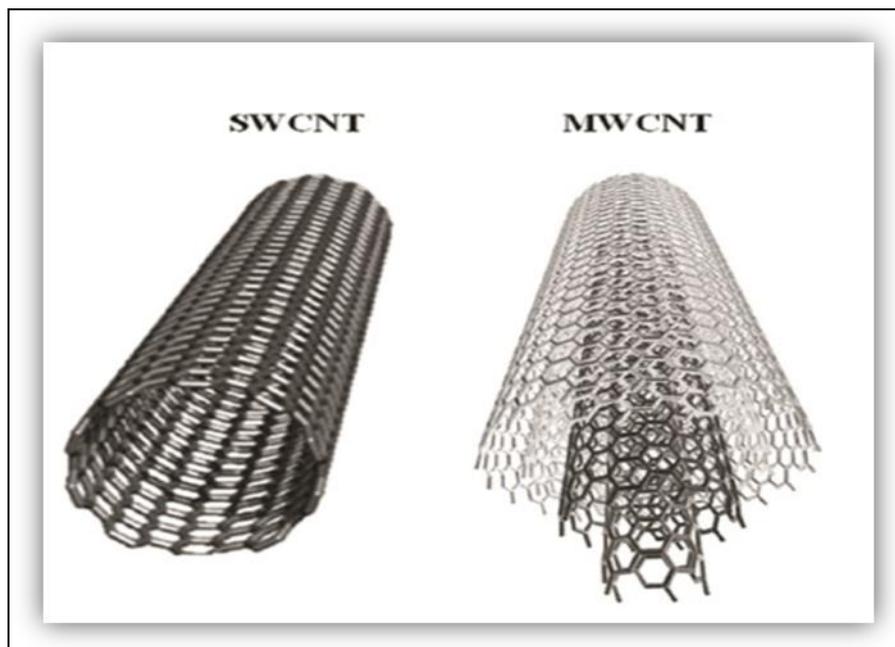


Figure I.3 : Représentation des structures d'un nanotube monofeuillet (SWNT) et d'un nanotube multifeuillet (MWNT).

Le nanotube monofeuillet peut être modélisé par l'enroulement d'une feuille de graphène sur elle-même. Cette feuille de graphène présente une structure de type nid d'abeille, dont on peut donner deux vecteurs directeurs, a_1 et a_2 . On définit ensuite le vecteur de chiralité, C_h , axe selon lequel le graphène s'enroule pour former le nanotube. Ce vecteur peut donc être décomposé en deux composantes, selon les vecteurs a_1 et a_2 . Soient m et n les scalaires tels que $C_h = n a_1 + m a_2$.

Selon la valeur de ces deux scalaires, trois types d'enroulements, donc trois types de nanotubes peuvent être décrits :

- si $m = 0$, le nanotube a une structure de type « zig-zag » ;
- si $m = n$, le nanotube a une structure de type « chaise » ;

- dans tous les autres cas, le nanotube est « chiral ».

Ces différences de chiralité donneront aux nanotubes de carbone des propriétés différentes. Notamment, en ce qui concerne les propriétés électriques. Un nanotube de carbone de type

« chaise » possède un comportement électrique métallique par exemple. D'autres chiralités ont des comportements semi-conducteurs[5].

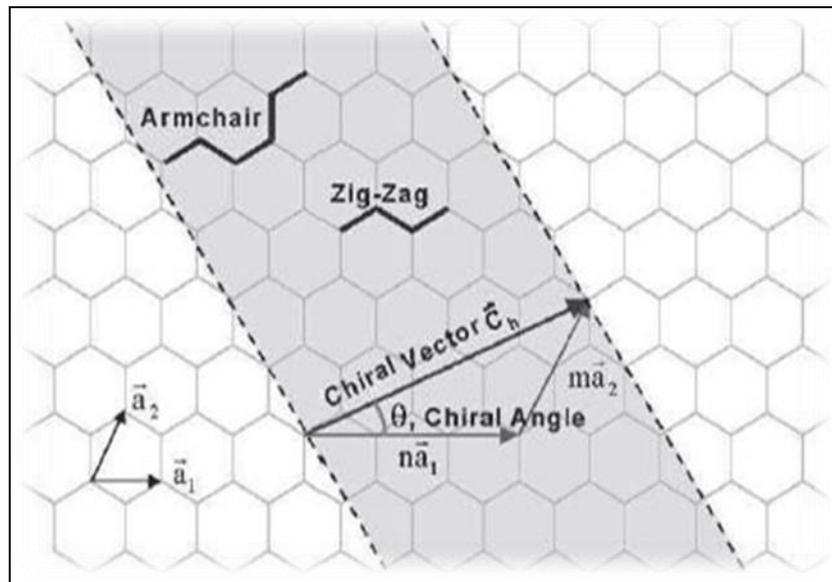


Figure I.4 : Représentation de la structure de nanotubes de carbone.

I.4 Techniques de synthèses de nanotubes de carbone

Les principaux procédés qui ont été développés pour la synthèse de nanotubes de carbone sont au nombre de trois : l'arc électrique, l'ablation laser et les méthodes CCVD.

I.4.1 L'arc électrique

On dispose de deux électrodes de graphite Figure (I.5) distant l'une de l'autre de quelques millimètres dans une atmosphère de gaz inerte avec une pression contrôlée. L'anode peut être creusée par un trou que l'on remplit de poudres métalliques catalytiques et de carbone. L'augmentation de la température à la surface de l'anode est due à une décharge électrique créée entre l'anode et la cathode par des courants de l'ordre de 100 A. Les nanotubes croissent ainsi à des températures comprises entre 1000 et 1400°C. On peut aussi

utiliser d'autres types d'électrodes comme par exemple une électrode graphite-métal [6] à la place de creuser un trou sur l'anode. La structure, le nombre et la taille des nanotubes

dépendent de paramètres tels que la nature et la concentration des catalyseurs, le courant, le type de gaz inerte, sa pression, la nature des électrodes...[7].

Même si les rendements ont été améliorés, les problèmes liés aux impuretés des tubes demeurent toujours problématique pour cette méthode.

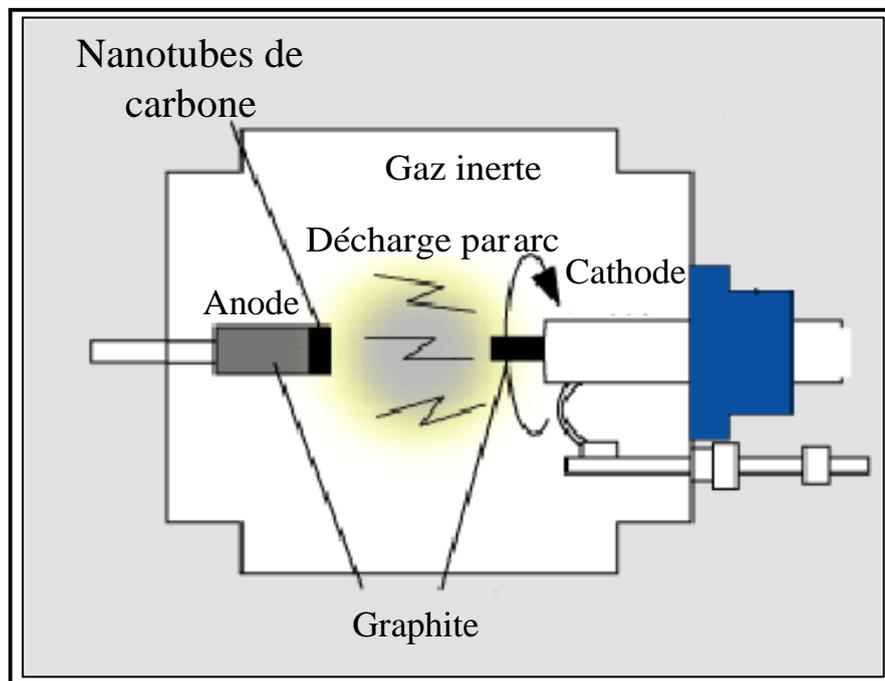


Figure I.5: Schéma de principe du procédé de synthèse par arc électrique.

I.4.2 Ablation laser

Dans ce procédé Figure(I.6), la cible, constituée d'un disque de graphite et de un ou plusieurs catalyseurs, est mise en rotation et placée au centre d'un four. Cette cible tourne sur elle-même dans le but d'avoir une érosion homogène. Un laser pulsé (ou continu) est focalisé et permet de sublimer des vapeurs de carbone qui sont entraînées jusqu'au substrat par un flux de gaz inerte. Les températures utilisées sont autour de 1200°C [8]. La température, la pression, le type de cible, le type de laser restent les paramètres variables de cette technique.

Ces méthodes permettent de produire des nanotubes SWNT de bonne qualité structural (peu de défauts) et de dimensions (longueurs, diamètres) homogènes avec de bons rendements (entre 70 et 90%). Cependant son coût reste élevé.

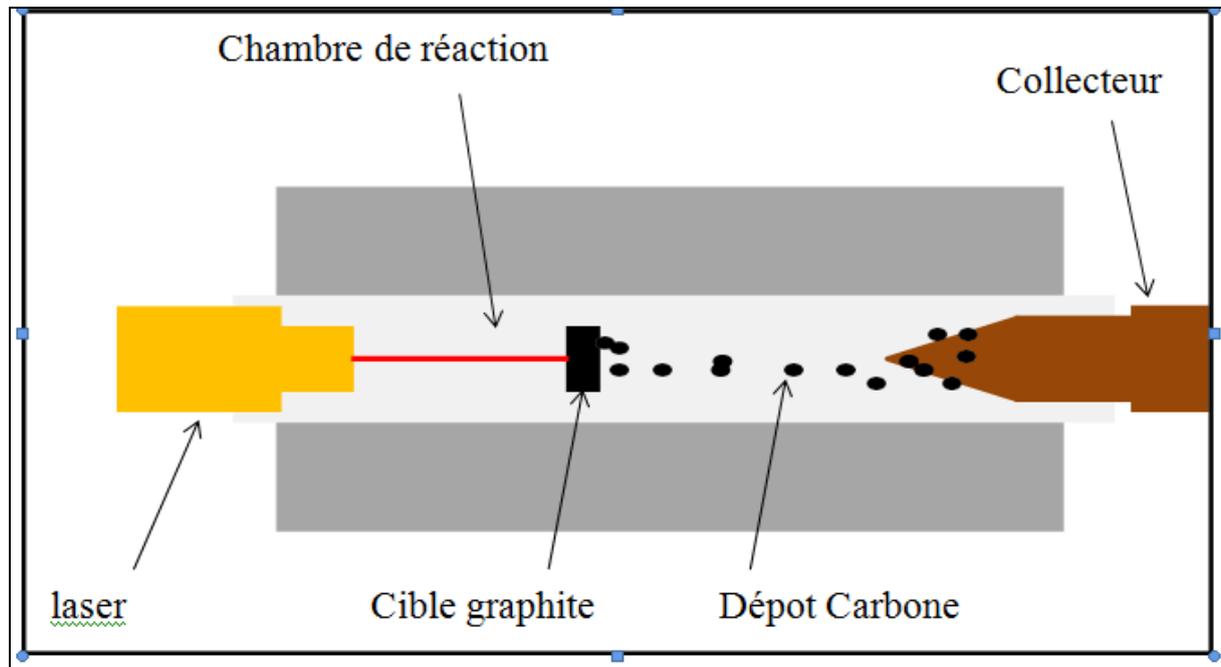


Figure I.6: Schéma de principe du procédé de synthèse par ablation laser.

I.4.3 Synthèse par CCVD

Les méthodes de synthèse par dépôt chimique en phase vapeur catalysé (CCVD ou CVD) sont aujourd'hui les plus utilisées pour la croissance de nanotubes de carbone. Les procédés de synthèse par CVD sont peu coûteux et offrent de nombreuses possibilités selon les applications visées [9]. Ces méthodes nous offrent aujourd'hui la possibilité de faire croître des nanotubes sur toutes formes de support. En effet la réaction se passe à la surface des particules catalytiques [10]. Le principe consiste en une décomposition d'un gaz carboné à la surface d'une particule de catalyseur générant ainsi des nanotubes de carbone [11]. Nous pouvons séparer ainsi les techniques CVD en deux grandes familles : CVD thermique et CVD assistée par plasma [12].

Les procédés de synthèse par CVD thermique attirent particulièrement notre attention. Le fait qu'elle nous offre la possibilité de faire croître des nanotubes de carbone sur des supports complexes comme les diatomées rend cette méthode de croissance particulièrement

intéressante dans notre cas. La synthèse de nanotubes de carbone par cette technique nécessite une préparation de particules (et ou films) afin d'assurer la catalyse de la croissance de nanotubes

I.5 propriétés des nanotubes de carbone

I.5.1 Propriétés électriques

Les propriétés électriques des CNT dépendent principalement de leur chiralité, de nombreuses études théoriques ont démontré que ces derniers possèdent une conductivité électrique élevée [13].

En effet les modélisations des bandes d'énergies confirment une des caractéristiques surprenantes des CNTs : leur comportement métallique ou semi-conducteur, en fonction de leur diamètre et de leur hélicité. La structure particulière des nanotubes permet de penser que leur conductivité doit également être importante le long de l'axe du nanotube [14]

La conductivité électrique d'un CNT métallique peut atteindre 10^5 S.cm^{-1} et celle d'un CNT semi-conducteur est comprise entre 0,1 et 100 S.cm^{-1} . Le cuivre est généralement utilisé dans les applications où une conductivité élevée est nécessaire, cependant il ne conserve pas sa conductivité apparente à l'échelle de dimensions nanométriques. La mobilité électronique mesurée sur un nanotube est jusqu'à 3 ordres de grandeur plus importantes que celle du cuivre ($100\,000 \text{ cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$) à 300 K [15].

A basse température, les nanotubes mono-feuillets métalliques, individuels ou regroupés en petits fagots, se comportent comme des fils quantiques, c'est-à-dire que la conduction a lieu au travers de niveaux électroniques discrets bien séparés quantiquement et cohérents sur plusieurs centaines de nanomètres. Les nanotubes de carbone peuvent également transporter des densités de courant remarquables, voisines de 10^{10} A/cm^2 soit au moins deux ordres de grandeur de plus que les métaux. Enfin, les nanotubes multi-feuillets peuvent être supraconducteurs à très basse température [16].

La résistivité électrique des nanotubes de carbone est de :

- ✓ 10^{-3} à $10^{-4} \Omega.\text{cm}$ pour les nanotubes de carbone mono-feuillets métalliques.
- ✓ $10 \Omega.\text{cm}$ pour les nanotubes de carbone mono-feuillets semi-conducteurs.
- ✓ $10^4 \Omega.\text{cm}$ pour les nanotubes de carbones multi-feuillets.

Les nanotubes de carbone mono-feuillets possèdent de meilleures caractéristiques électriques que les multi-feuillets en raison notamment des interactions électriques, de type Van der Waals, qui surviennent entre les différents feuillets de graphène [17].

I.5.2 propriétés thermiques :

Le plan de graphène possède une conductivité comparable à celle du diamant (au voisinage de $10^3 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$ à 300°K). La structure particulière des nanotubes permet de penser que leur conductivité doit également être importante le long de l'axe du nanotube. La mesure de la conductivité thermique des nanotubes est délicate, cependant, quelques études expérimentales ont permis de mesurer la conductivité thermique de nanotubes multifeuillets. Leur conductivité est grande (de 600 à $2000 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$) mais significativement plus faible que celle du graphite [18].

I.5.3 Propriétés mécaniques

La liaison covalente C-C assure au NTC des propriétés mécaniques exceptionnelles. Les calculs montrent qu'un SWNT bénéficie du module d'Young très élevé du graphène ($\sim 1 \text{ TPa}$) et pourrait même l'amplifier. Les travaux de Yakobson et al. conduisent en effet à un module d'Young de l'ordre du TPa [19]. Une valeur expérimentale de $1,8 \text{ TPa}$ a été obtenue pour la première fois par Treacy et al. En mesurant in situ dans un microscope électronique à transmission l'amplitude des oscillations thermiques de nanotubes multifeuillets (Treacy, 1996). Yakobson et al. (1997) ont montré que les nanotubes peuvent être soumis à d'importantes contraintes (longitudinales ou transverses) sans montrer de signe de déformation plastique, de fracture fragile ou de réarrangement atomique. Ils montrent également que les théories classiques utilisant un modèle continu peuvent être utilisées pour les grandes déformations des nanotubes (pour lesquelles l'élasticité linéaire n'est plus valable). 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. obtiennent par cette méthode une valeur de $1.25 \pm 0.5 \text{ TPa}$ pour des nanotubes mono-parois. Par AFM, Yu et al. ont estimé le module d'Young de cordes de nanotubes monoparois à $1.04 \pm 0.17 \text{ TPa}$. Ils montrent aussi qu'il faut exercer une contrainte de l'ordre de 0.40 TPa pour briser la corde. Par la mesure de 3 points en AFM, la même contrainte a été estimée à $0.45 \pm 0.07 \text{ TPa}$. Ces valeurs sont environ 20 fois supérieures à celles des aciers les plus rigides. Enfin, la nano-manipulation par AFM a permis de montrer que les nanotubes peuvent encaisser de larges déformations réversibles.

Tableau I.1 Quelques propriétés mécaniques des nanotubes de carbone [20].

Nanotube de carbone Propriétés	Mono-Feuillet	Multi-Feuillet
Limite d'élasticité	45 GPa	150 GPa
Module d'Young	1 à 1,4 TPa	1,4 à 1,6 TPa
Module de cisaillement	0,27 TPa	0,44 à 0,47 TPa
Module de flexion	0,2 à 1,2 TPa	3 à 30 GPa

I.5.4 Autres propriétés physiques des nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone présentent aussi des propriétés électromécaniques intéressantes puisqu'ils ont la capacité de se déformer et de générer une contrainte en réponse à une injection de charge. Les applications visées sont les dispositifs actionneurs [21], notamment en robotique. Les dispositifs actuellement employés sont à base de céramiques piézo-électriques ou de polymères conducteurs.

D'autres caractéristiques telles que les propriétés d'émission de champ ou le transport thermique dans les nanotubes sont très étudiées [22]. Des écrans à émission de champ (FED Field Emission Display) dont les dalles sont constituées de nanotubes de carbone ont par exemple déjà été développés par le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA-LETI) [23] et par Samsung [24]. La forte densité de courant que peuvent supporter les nanotubes, ainsi que les faibles tensions auxquelles ils pourraient opérer intéressent vivement les chercheurs universitaires et industriels. Par ailleurs, l'intérêt pour les nanotubes de carbone ne réside pas uniquement dans des applications liées à la physique, mais aussi dans la chimie ou dans des applications à l'interface avec la biologie. Ils peuvent par exemple servir à la cristallisation de protéines [25]. La forte courbure d'un feuillet de graphène dans un nanotube induit de plus une réactivité plus forte que dans le cas du graphite et autorise de nombreuses molécules à être greffées. Ces molécules peuvent avoir des fonctions de reconnaissance moléculaire et fournir ainsi aux nanotubes un intérêt pour des applications de types micro ou nano-capteurs, pour la détection de molécules d'origine biologique par exemple.

I.6 Exposition aux nanotubes de carbone

Malgré leurs propriétés et leurs caractéristiques très prometteuses, les nanotubes de carbone suscitent, cependant, certaines inquiétudes vis-à-vis de leur biocompatibilité (Smart et al, 2006) et de leur potentielle toxicité pour l'être humain et son environnement. De plus leur dimension nanométrique favorise leur potentielle absorption par différents organismes ou milieux.

Si cette toxicité en question n'est toujours pas avérée, il n'en demeure pas moins que le principe de précaution doit être appliqué et que les fournisseurs de nanotubes de carbone doivent se préparer à de futures normes et autres législations sur ces produits.[26]

I.6.1 Risques des nanotubes de carbone pour l'organisme

Peu d'études ont été menées sur les nanotubes de carbone au niveau toxicologique, la plupart de ces études ont été réalisé sur des animaux in vivo ou in vitro. Les risques sont liés aux trois voies d'exposition : l'ingestion, le contact cutané et l'inhalation.

I.7 Le marché des nanotubes de carbone

Le dernier rapport de recherche sur le marché des nanotubes de carbone prévision 2020 - 2026 présente une brève évaluation du marché mondial des nanotubes de carbone en analysant l'infrastructure industrielle internationale ainsi que certains acteurs cruciaux, différents défis, moteurs de croissance et d'autres aspects influents du rapport sur le marché des nanotubes de carbone. De plus, le rapport de recherche sur le marché des nanotubes de carbone découvre la demande de production, la croissance de l'offre, les récents progrès technologiques, le potentiel de croissance attendu ainsi que les attributs influents de l'industrie mondial.

I.8 Applications des nanotubes de carbone

- dans les vêtements : possibilité de faire des vêtements (normaux) plus résistants et imperméables ou dans la confection de gilets pare-balles. Il serait également possible de créer des vêtements autonettoyants ;

- dans le polyéthylène : des chercheurs ont découvert qu'en mettant des nanotubes dans du polyéthylène, celui-ci devenait jusqu'à 30 % plus élastique ;
 - dans certains équipements sportifs pour remplacer la fibre de carbone (raquettes de tennis, vélos, kayaks, etc.) ;
 - dans le stockage de l'hydrogène (par absorption), notamment dans le cadre des piles à combustible ; mais cette propriété est controversée[27] .
 - dans le domaine militaire, particulièrement pour la construction de canon électrique ;
 - ou encore dans un domaine qui relève actuellement de la science-fiction, la construction d'un ascenseur spatial.
-
- réservoirs à hydrogène (contenant ce dernier à l'état gazeux ou sous forme d'hydrure métallique), de façon à stocker celui-ci de façon plus efficace qu'actuellement (en bouteille) ;
 - dans les disques durs : ils serviraient de réservoirs de lubrifiant, celui-ci fondant par l'utilisation d'une nouvelle technique de chauffage par laser (modifiant les propriétés magnétiques) avant écriture[28] .
 - le 19 mai 2006, des chercheurs de l'université de Berkeley et de Livermore, en Californie, ont trouvé une nouvelle application pour les nanotubes : ils pourraient servir à séparer différents gaz ou liquides. En effet, ces chercheurs ont démontré que les molécules passaient bien plus facilement à travers ces tubes que dans d'autres pores de taille équivalente.

I.9 les défauts des nanotubes

Comme dans de nombreux matériaux, les nanotubes de carbone ont des défauts qui peuvent affecter leurs propriétés :

- la synthèse n'étant pas totalement maîtrisée, en fonction de leur enroulement, ils peuvent être conducteur ou semi conducteur.
- les nanotubes peuvent avoir des vides anatomiques : il manque des atomes dans la structure du graphène. Cela affecte la résistance physique des nanotubes en pouvant la faire chuter jusqu'à 15%.
- au lieu de former des hexagones, il arrive que des nanotubes forment des pentagones ou des heptagones. C'est le défaut de Stone Wales qui permet également de fermer les nanotubes.
- les nanotubes ont une structure en une dimension or la résistance dépend, comme pour une chaîne du maillon faible: si il y a un défaut dans la feuille de graphène, le nanotube se cassera à ce niveau[29].

I.10 Conclusion

Les nanotubes de carbone sont donc un peu un matériau «miracle» , il compile à lui tout seul une multitude d'atouts.

En effet ils présentent des propriétés conductrices , mécanique , chimique et électronique dépassant les matériaux existant et donc pouvant révolutionner garce à leur applications de nombreux domaines existant . Tout cela est possible grâce à des méthodes de fabrications qui s'améliore au fil du temps et permettent une synthétisation à prix bas tout en améliorant la quantité produite.

Malgré cela ,les soupçons de risques qui s'avère être préoccupants ; la taille des ces particules en font un réel danger et entraîne vraisemblablement l'agitation de la communauté scientifique.

En vue des incertitudes; la fabrication des nanotubes de carbone ne devrait pas être mis en suspens en vue de plus vaste étude et en prenant en compte la sécurité de la société avant la profit?.

CHAPITRE II
GÉNÉRALITÉS SUR LES
NANOCOMPOSITES

II.1 Introduction

Les matériaux nanocomposites à base de silicate ont suscité un grand intérêt dans le milieu académique et industriel car ils présentent une amélioration remarquable dans les propriétés des matières par rapport aux polymères purs ou les micros et macro-composites conventionnels. Ces améliorations peuvent comprendre, des modules élevés, une augmentation de la résistance à la chaleur, une diminution de la perméabilité aux gaz, une inflammabilité, et augmentation de la biodégradabilité des polymères biodégradables. L'amélioration de ces propriétés dépend d'un certain nombre de paramètres tels que la répartition de l'argile (dimensions, facteur de forme, exfoliation, ...), l'interaction renforts-polymère[30].

Bien que la chimie d'intercalation des polymères lorsqu'ils sont mélangés avec des couches silicate appropriés a été connus depuis longtemps, le domaine des nanocomposites à base de polymère a pris de l'ampleur récemment. L'intérêt pour ces matériaux est stimulé grâce à deux choses: premièrement, les travaux du groupe de recherche de Toyota sur les nanocomposite à base de Nylon-6 (N6) / montmorillonite, pour lesquels de très petites quantités de couches silicates ont abouti à des améliorations prononcées des propriétés thermiques et mécaniques. Deuxièmement, la possibilité de mélanger les polymères avec les phyllosilicates à l'état fondu, sans l'utilisation de solvants organiques. Aujourd'hui, des efforts sont en cours dans le monde, avec presque tous les types de matrices polymères[30].

II.2 Définition d'un nanocomposite

Un composite est un matériau constitué de plusieurs composants et qui possède des propriétés qu'aucun des constituants ne posséderait seul. Plus particulièrement, on appelle nanocomposite, un système hétérophasé composé d'une phase dont l'une des dimensions au moins est nanométrique. Idéalement, dans ce type de système, la composition et la structure du matériau varient à l'échelle du nanomètre. Toutefois, le terme nanocomposite couvre un ensemble plus vaste de matériaux[31].

II.3 Les différents nanorenforts

En général, il est couramment admis que le classement des nanocomposites se fait selon le facteur de forme de la charge incorporée (rapport entre la longueur et

l'épaisseur ou le diamètre). Dans la définition admise des nanocomposites les renforts doivent avoir au moins une de leurs dimensions morphologiques inférieure à 100 nm et peuvent être classés en fonction de leur géométrie figure (II.2). On trouve alors trois classifications qui sont possibles [32].

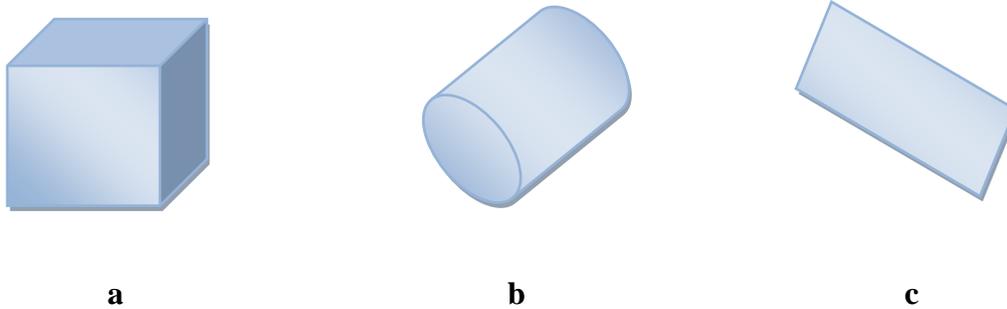


Figure II-1 : Représentation schématique des différents renforts. (a) nanoparticule ; (b) nanofibre ; (c) feuillet.

II.3.1 Nanoparticules à trois dimensions nanométriques : nanoparticule

Les trois dimensions de la particule sont de l'ordre du nanomètre. Il s'agit le plus souvent de particules de forme sphérique dont le diamètre est compris entre 30 et 150 nm. Dans cette catégorie on compte, par exemple, les agrégats d'atomes, les nanoparticules métalliques (or, fer, cobalt, argent, platine...) et les fullerènes

Le gain des propriétés physiques particulières (optiques, électriques, magnétiques...) est recherché lors de l'ajout de ce type de particule [33].

En plus de sa nature, la capacité d'une particule à s'organiser au sein d'une matrice polymère dépend de sa taille et surtout de sa géométrie. Celle-ci caractérise le facteur de forme qui est défini comme le rapport de la plus grande et la plus petite dimension de la charge.

II.3.2 Nanoparticules à deux dimensions nanométriques : nanofibres

Sont des particules ayant deux dimensions de l'ordre du nanomètre. La troisième est beaucoup plus grande. Il existe des fibres creuses, les plus connues étant les nanotubes de carbone qui possèdent en particulier des propriétés mécaniques et électriques exceptionnelles.

Ils peuvent être introduits dans une grande variété de matrices polymères (polyamide PA, polyester PE, polycarbonate PC....).

La dispersion des nanotubes dans le polymère est essentielle pour obtenir les propriétés désirées. L'ajout de ces derniers dans la matrice peut augmenter la viscosité du polymère mais l'effet est moins prononcé que celui observé avec des fibres conventionnelles[33].

II.3.3 Nanoparticules à une dimension nanométrique : feuillets

Possèdent deux directions privilégiées. La particule possède une dimension de l'ordre du nanomètre et les deux autres de l'ordre du micromètre. Parmi ce type de matériaux, les argiles sont probablement les plus connues car elles sont naturelles donc faciles à extraire. [34].

II.4 Classification des nanocomposites selon la nature de la matrice

Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux constituants non miscibles (mais ayant une forte capacité d'adhésion). Le nouveau matériau ainsi constitué possède des propriétés que les éléments seuls ne possèdent pas. Ce phénomène, qui permet de perfectionner la qualité de la matière face à une certaine utilisation (légèreté, rigidité, etc.) explique le recours croissant aux matériaux composites dans différents secteurs industriels. Néanmoins, une description fine de ce composite reste complexe du point de vue mécanique. Un matériau composite est constitué d'une ossature nommée renfort qui assure la tenue mécanique et d'une protection nommée matrice qui est le plus souvent constituée de polymère et qui assure la cohésion de la structure et la retransmission des efforts vers le renfort. On classe le plus souvent ces matériaux en trois familles selon la nature de la matrice .

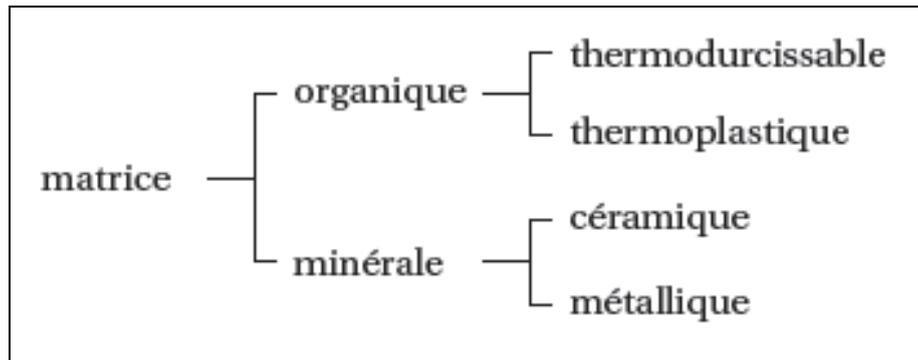


Figure II-2: Types de matrice.

II.4.1 Les composites à matrice organique

Il s'agit, de loin, des composites les plus répandus : ce sont en effet les seuls composites ayant, pour beaucoup d'entre eux, des coûts unitaires suffisamment réduits pour pouvoir être produits en grandes séries. Plus précisément, on distingue généralement deux types de CMO :

- Les composites à grande diffusion, peu coûteux et représentant près de 95% des CMO fabriqués, utilisés pour toutes sortes de pièces faiblement sollicitées .
- Les composites à haute performance, plus onéreux mais présentant des qualités mécaniques supérieures, notamment employés dans l'aéronautique, le nautisme, les sports et loisirs ou encore la construction industrielle .

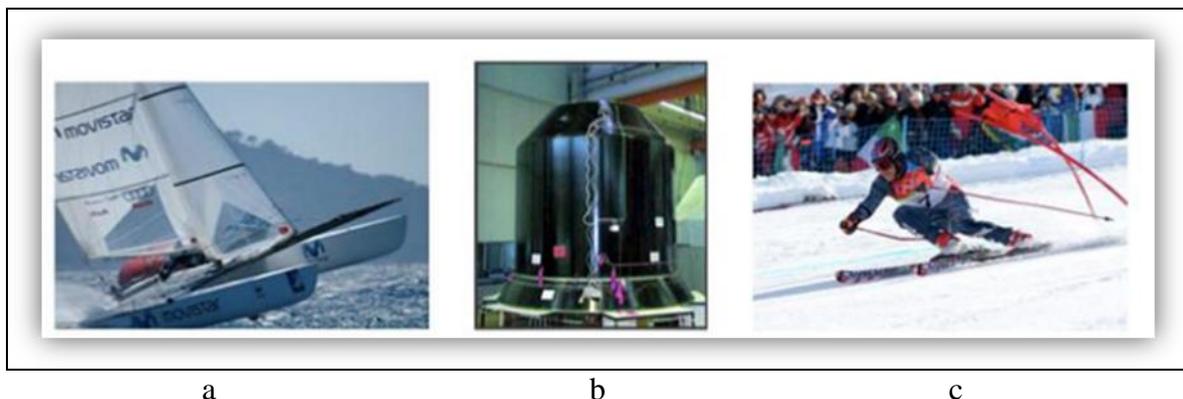


Figure II.3 : Quelques applications des CMO "haute performance" : (a) un catamaran, (b) le support de la charge utile d'Ariane 5, (c) des skis de compétition).

Les matrices des matériaux COM sont des résines polymères dont :

- les thermoplastiques, ils sont présentés sous forme solide (granulés, plaques...) constitués de longues molécules linéaires reliées par des liaisons physiques de faible énergie (liaisons hydrogène ou forces de Van der Waals) qui se cassent quand on les chauffe et se rétablissent quand on les refroidit, de manière réversible ;

- les thermodurcissables, ils sont présentés sous forme liquide visqueux ayant une structure moléculaire tridimensionnelle, maintenue par des liaisons chimiques de forte énergie (liaisons covalentes).

Cette différence fondamentale est à l'origine de propriétés bien distinctes. Par exemple

- Les premiers sont moins rigides, moins résistants et plus ductiles que les seconds. Les matrices thermodurcissables sont plus souvent employées car ils sont plus simples à mettre en forme.
- Les thermoplastiques sont moins rigides et moins résistants que les thermodurcissables (mais cela importe peu sur les composites à fibres longues, car la rigidité et la résistance proviennent essentiellement des fibres)
- Les thermoplastiques sont plus ductiles que les thermodurcissables, donc résistent mieux à la fissuration, Les déchets thermoplastiques sont recyclables, les déchets thermodurcissables ne le sont pas .
- Les granulés thermoplastiques peuvent être stockés indéfiniment et à température ambiante, les thermodurcissables doivent être stockés au froid et pendant une durée limitée si la résine et le durcisseur sont déjà mélangés.
- Les thermoplastiques doivent toujours être portés à haute température pour être mis en forme, les thermodurcissables ne ce sont pas forcément...

De manière générale, les matrices thermodurcissables sont plus fréquemment employées que les thermoplastiques, en raison de leur plus grande facilité de mise en forme (il est plus facile d'imprégner des fibres avec un liquide qu'avec des granulés ramollis, et les températures à utiliser sont souvent plus raisonnables). Parmi les plus courantes, on peut citer les résines polyester, peu coûteuses et souvent utilisées dans les applications « grande diffusion », et les résines époxy (ou époxydes), très employées dans les applications « hautes performances ». Les renforts des composites à matrice organique peuvent être la fibre de verre - la plus répandue -, la fibre de carbone - très performante -, la fibre d'aramide ou de polypropylène - plus résistante - ou des fibres végétales - renouvelables.

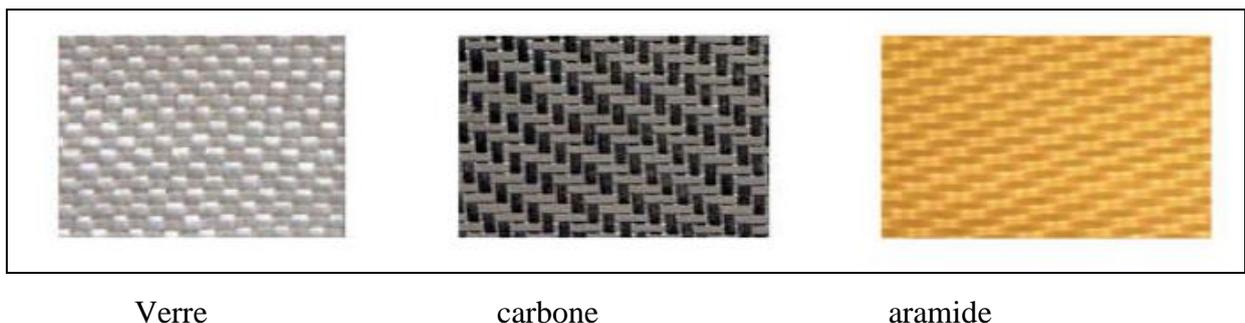


Figure II. 4 :Exemples de tissus de renforts utilisés pour les CMO haute performance .

Enfin, des charges et additifs sont ajoutés au composite afin de lui conférer de nouvelles propriétés et, ainsi, de lui permettre de remplir d'avantage de fonctions techniques. De manière générale, les charges et additifs jouent un rôle essentiel dans l'obtention des propriétés des polymères, qu'ils soient utilisés seuls ou comme matrices de composites ; il en existe de très nombreux types.

Les charges sont des particules solides que l'on disperse au sein de la matrice. Elles peuvent être minérales, organiques (végétales ou synthétiques) ou métalliques, et s'utilisent grosso modo de la même façon que dans les plastiques « traditionnels ». On peut par exemple rencontrer :

- Des microbilles de verre creuses, ajoutées en plus des renforts principaux, qui améliorent la tenue en compression tout en allégeant la matrice ;
- Du noir de carbone utilisé à la fois comme pigment noir, comme barrière anti UV et comme antioxydant ;
- Des particules de silice pour rendre la matrice plus isolante (thermiquement, électriquement et acoustiquement), diminuer son retrait au moulage... ;
- Des poudres ou paillettes métalliques pour rendre la matrice conductrice de l'électricité et de la chaleur, pour améliorer son usinabilité, sa résistance aux chocs ou à l'abrasion...
- Des billes thermoplastiques ajoutées dans les matrices thermodurcissables, pour améliorer leur ductilité et donc leur résistance à la fissuration....



Microbilles de verre

noir de carbone

silice

Figure II. 5 : Exemples de charges utilisées dans les CMO .

Les additifs possibles sont encore plus nombreux. Une classe d'additifs que l'on rencontre systématiquement est celle des agents d'interface, que l'on dépose sur les fibres pour les faire adhérer à la matrice. On rencontre également :

- Des stabilisants, qui retardent les dégradations dues à l'oxygène, aux UV ou encore à l'ozone

- Des ignifugeants ou retardateurs de flamme (la plupart des polymères sont inflammables !)
- Des agents de démoulage
- Des colorants...

Il est ainsi possible de conférer de nombreuses fonctions techniques au composite, et d'adapter finement ses propriétés aux besoins du concepteur[36].

II.4.2 Les composites à matrice métallique

Ils ont été imaginés afin de combiner les qualités d'un métal (ductilité, tenue face au feu, etc.), la légèreté et les caractéristiques mécaniques des structures composites. Une telle combinaison fait que ces matériaux composites sont performants.. Malheureusement, ils pâtissent encore de leur coût plutôt élevé.



Figure I. 6 : Pièces en CMM.

La matrice d'un CMM est généralement constituée d'un métal léger (aluminium, magnésium, titane, etc.). Le renfort se compose : soit de particules ou de fibres courtes céramiques qui améliorent légèrement les propriétés mécaniques de la matrice tout en permettant de conserver les procédés traditionnels de mise en forme des métaux ; soit de fibres longues céramiques ou métalliques qui procurent des propriétés mécaniques bien supérieures à celle de la matrice mais nécessitent des procédés de mise en forme coûteux.

Les matrices métalliques ayant déjà intrinsèquement de bonnes caractéristiques mécaniques, le renforcement du composite ne peut se faire que sur certaines zones ou dans une seule direction. Cela n'est en général pas possible pour les matrices organiques (faible résistance) ou pour les matrices céramiques (fragilité).

En revanche, les matrices métalliques présentent l'inconvénient d'une grande réactivité chimique[35].

II.4.3 Les composites à matrice céramique

Beaucoup moins répandus que leurs homologues à matrice organique en raison d'un coût élevé, les CMC s'adressent aux applications à très haute température. Ils sont principalement utilisés dans l'industrie spatiale et l'aéronautique militaire, ainsi que pour la conception d'organes de haute gamme comme des disques ou plaquettes de freins[35].

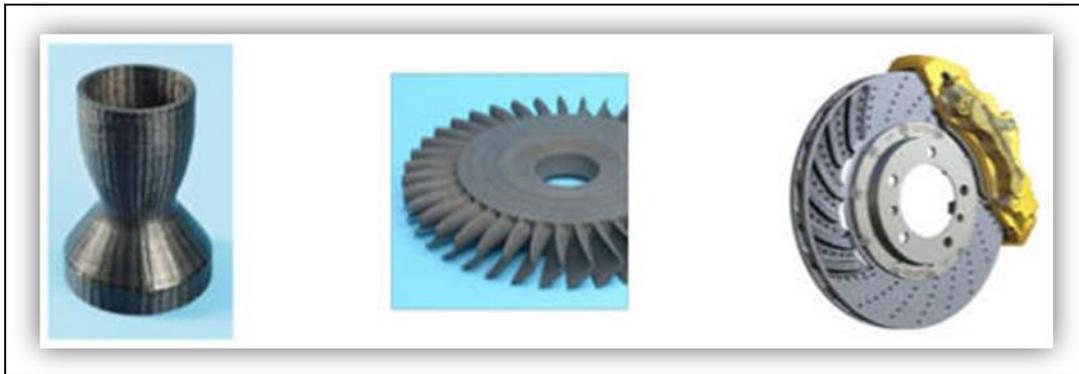


Figure II.7 : Quelques applications des CMC.

On trouve essentiellement ces matériaux composites dans les secteurs de l'industrie spatiale et de l'aéronautique militaire. Les céramiques qui apparaissent dans les CMC sont résistantes à la température, plus légère que de nombreux métaux et chimiquement très stable. Cependant, elles sont très fragiles et, pour les rendre moins cassantes, il est intéressant de les intégrer à des structures composites, c'est-à-dire en les façonnant sous forme de renforts et d'une matrice, dans le but de diminuer un peu plus les risques de rupture du matériau.

Les matrices céramiques sont habituellement constituées en multicouches afin de ralentir le plus possible la rupture, la matrice est faite de plusieurs couches superposées, ce qui permet de multiplier les interfaces et donc les déviations des fissures, Tout ceci fait que les CMC sont beaucoup moins fragiles et beaucoup plus tenaces que les céramiques massives, et peuvent donc être utilisées dans des pièces mécaniques.[35].

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

Pour la fabrication de nano-composites, les nanotubes des carbones sont principalement associés à des polymères thermodurcissables. C'est ainsi qu'en 1994, Ajayan fut le pionnier de la fabrication de nano-composites à matrice polymère renforcée par des CNTS afin d'améliorer les propriétés, notamment mécaniques du nano-composite [36]. Il utilisa une résine epoxy dans laquelle les CNTS été dispersés par ultrasons. Depuis, de nombreuses avancées ont été faites, et

notamment du point de vue de la dispersion des CNTS, ou bien au niveau de l'interface matrice/renfort [37].

L'utilisation de matrice de type polymère thermoplastique fait également l'objet de travaux de recherches [38]. Cependant, ces études demeurent limitées par rapport aux thermodurcissables, notamment du fait de leurs champs d'applications moins vastes.

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.

II.6 Dispersion des renforts:

II.6.1 Utilisation des ultrasons:

L'usage des ultrasons, est une technique très connue et utilisée en abondance dans le domaine. Ce procédé consiste à utiliser les vibrations de la solution dans un bain US pour casser les enchevêtrements de (CNT) en deux étapes: - dans un premier temps, la masse appropriée de (CNT) est introduite dans un volume d'éthanol et placée aux ultrasons pendant (~ 1 heure), jusqu'à l'évaporation du solvant. - ensuite la poudre de (CNT) 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 (CNT). Cependant, des observations au microscope optique sur une gouttelette de la solution constituée de base +(CNT) (après 2 heures de passages aux ultrasons) montrent que des agglomérats de tailles micrométriques persistent[39]

II.6.2 Dispersion mécanique par tricylindre:

À l'origine, cet appareil a été conçu pour broyer dans l'industrie pharmaceutique ou alimentaire. Son utilisation pour disperser les CNT est récente. On a montré que le tricylindre est un outil assez performant pour disperser de manière homogène les CNT dans une résine époxy [Bozlar 2009]. Ils ont pu ainsi obtenir des niveaux de conductivité électrique et thermique supérieurs à d'autres travaux (utilisant notamment l'ultrason) cités dans la littérature[39].

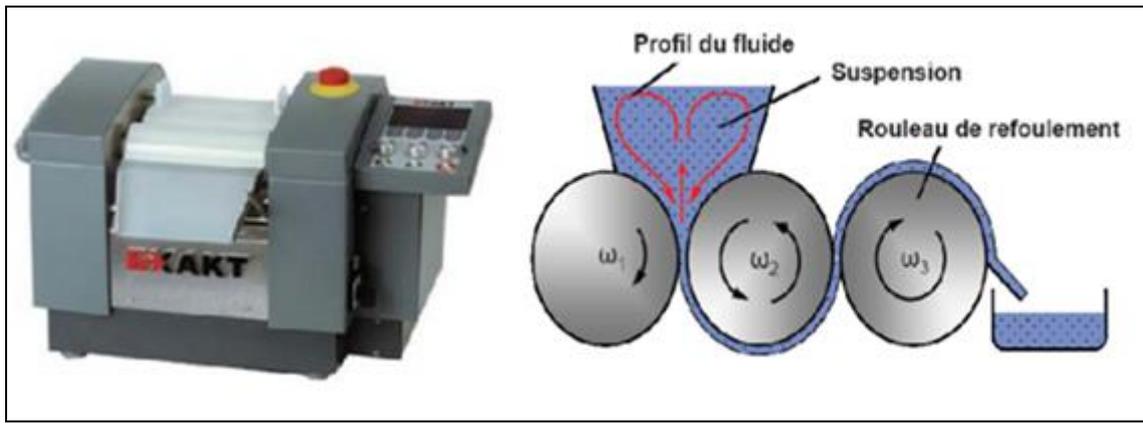


Figure II.8 : a)-Tri cylindre Exact 80E b)- Schéma du circuit [39].

II.7 Procédés d'élaboration des nanocomposites (NTC/polymère)

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 [40].

II.7 .1 Polymérisation in situ

Historiquement, cette méthode fut la première ayant permis d'obtenir des nanocomposites à charge lamellaire au sein du centre de recherche de Toyota, par la polymérisation d' ϵ -caprolactame (monomère du nylon-6) en présence de montmorillonite.

Les phases organiques et inorganiques sont mélangées sous forme de monomère polymérisable. La synthèse des deux phases se fait alors simultanément. Et provoquent une réaction de polymérisation in situ. La réaction de polymérisation peut aussi être déclenchée par chauffage ou par rayonnement [41].

II.7 .2 Mélange en solution

Le principe d'élaboration repose sur la possibilité de disperser la silice dans un solvant dans lequel le polymère est soluble, le solvant est ensuite évaporé lentement afin d'éviter la formation de bulles d'air, on obtient le nanocomposite. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet d'abaisser la viscosité et la température de mise en œuvre. En revanche, l'étape

d'extraction du solvant est cruciale car il faut empêcher les nanocharges de s'agréger à nouveau [42].

II.7.2 Mélange à l'état fondu

Le procédé d'obtention par mélange à l'état fondu est reporté pour la première fois par Vaia et col, en 1993. Le principe repose sur le mélange de la matrice polymère à l'état fondu avec les nanocharges modifiées ou non. Dans ces conditions, la mobilité des chaînes de polymère est suffisante, si l'interaction entre la matrice polymère et les nanocharges est bonne pour former un nanocomposites intercalé ou exfolié

Le grand intérêt de cette méthode est de s'affranchir de l'utilisation d'un solvant et de permettre l'utilisation des techniques de mise en œuvre classiques des polymères. De par sa simplicité et sa rentabilité, cette méthode est préférée dans le milieu industriel.

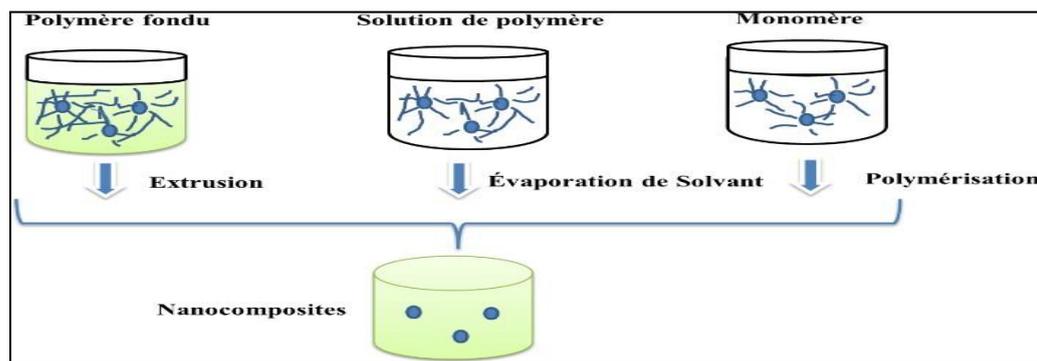


Figure II.9 - Méthodes d'élaborations des nanocomposites polymères : a) mise en œuvre dans le fondu, b) mise en solution et c) polymérisation in situ.

II.8 Propriétés des nanocomposites (NTC/polymère)

II.8.1 Propriétés mécaniques des nanocomposites (NTC/polymère)

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. La résistance à la rupture de ces composites est améliorée

lorsque la matrice et les charges possèdent une énergie interfaciale suffisante pour permettre le transfert des efforts de la matrice au renfort. La dispersion des nanotubes dans une matrice polyéthylène téréphtalate permet d'augmenter le module d'Young du polymère de (1,5 GPa à 1,9 GPa) ainsi que la contrainte à la rupture de (60 MPa à 68 MPa) avec (2%) de (NTC) . Avec ce même taux de charge une augmentation de (214%) du module d'élasticité est observée dans une matrice polyamide .Dans une matrice polyéthylène une amélioration de (89% et 56%) respectivement du module d'Young et de la contrainte à la rupture peut être observée à (10%) de charges [43] .

II.8.2 Propriétés électriques des nanocomposites (NTC/polymère)

Le noir de carbone était, la charge conductrice la plus communément employée pour améliorer les propriétés électriques des polymères. Cependant, pour atteindre une conductivité électrique notable, un taux de noir de carbone proche de (15%) en masse doit être introduit. Cette quantité importante de charges affecte fortement les propriétés mécaniques du polymère par la création des défauts. L'utilisation de plus en plus abondante des (NTC) s'explique par la faible quantité de charge à introduire pour l'amélioration significative des propriétés électriques. Un taux de charges inférieur à (5%) en masse suffit à l'obtention d'un polymère conducteur. Zhang et al , ont de cette manière amélioré la conductivité électrique de films de polyéthylène en incorporant (5%) en masse de (NTC). La conductivité électrique passe alors de (10-14 S/cm) pour le polymère vierge à (10-3 S/cm) pour le polymère chargé, soit (1011) fois plus conducteur. Pötschke et al . Observent également une conductivité électrique de (10-3 S/cm) pour le polycarbonate chargé à seulement (2%) en masse de (NTC). Une faible quantité de nanotubes, parfois proche de (0,5%), suffit à apporter des propriétés antistatiques voire conductrices aux polymères[43].

II.8.3 Propriétés thermiques des nanocomposites (NTC/polymère)

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 epoxy ou du polyuréthane chargée à (0,5%) en masse de (CNTs) [43] .

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

La liaison entre la matrice et les renforts est un phénomène physico-chimique fondamental qui est créée lors de la phase d'élaboration du matériau composite. C'est l'interface (matrice/renfort) qui sera déterminante au niveau des propriétés finales du composite, et notamment du point de vue mécanique [44].

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 [45]. 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 [46],[47]. Il s'agit principalement de travailler au niveau de la cohésion entre les deux éléments constitutifs du composite.

Ceci peut être réalisé grâce à une modification de surface des (CNTs) avant leur insertion dans la matrice.

II.10 Applications des nanocomposites

De ce qui précède, il devient évident que les nanocomposites peuvent offrir de nombreux avantages tels que des propriétés améliorées et une capacité de fabrication améliorée, en particulier pour les applications d'emballage. Il existe de nombreuses applications prometteuses pour les systèmes nanométriques complexes, notamment la production de nouveaux matériaux et l'amélioration des performances de dispositifs bien connus tels que les piles à combustible, les capteurs et les revêtements. Bien que l'utilisation des nanocomposites dans l'industrie ne soit pas encore importante, sa transition massive de la recherche à l'industrie a déjà commencé et devrait être importante dans les années à venir.

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

Même si les nanocomposites sont très présents au niveau de la recherche, peu sont déjà viables commercialement.

Les enjeux de l'industrie portent essentiellement sur le développement de nanocomposites à matrice polymère, l'élargissement des domaines d'application des

polymères et l'amélioration de certaines propriétés (allègement et renforcement des structures, amélioration des propriétés optiques, augmentation de la durabilité, mais également résistance au feu, aux températures élevées et aux chocs thermiques).

Il s'agit notamment d'obtenir des céramiques, pigments, poudres et catalyseurs multifonctionnels et plus efficaces, des technologies de collage sans colle, de nouvelles technologies de soudage, des couches fonctionnelles (anti-adhésif, antistatique, etc.), des peintures, vitres, etc.

L'industrie des produits céramiques cherche à renforcer les céramiques en introduisant des nanopoudres comme les nanoparticules de nitrure de silicium qui permettent de renforcer l'alumine. L'industrie du bâtiment développe des capteurs miniaturisés qui seront intégrés dans l'habitat afin d'améliorer le confort et la sécurité. Des recherches sont en cours pour réaliser des revêtements plus résistants ou présentant des propriétés anti-salissures ou antidérapantes.

D'autre part, dans le domaine du génie civil et des grands ouvrages, l'amélioration de la sûreté passe par le renforcement des matériaux de construction. Une des réalisations exceptionnelles touche le secteur des matériaux cimentaires. Un nouveau procédé basé sur les nanotechnologies permet en effet le remplacement de la fumée de silice, une ressource peu accessible employée dans les bétons haute performance.

« La nanopoudre de verre ou nanosilice provenant des déchets recyclés est transformée en fine poudre, explique le professeur Arezki Tagnit-Hamou de l'Université de Sherbrooke. « Les nanosphères contenues dans la poudre de verre densifient le béton, le rendant encore plus résistant et moins perméable. » Une avenue qui laisse présager un bel avenir pour cette ressource, quand on sait que la production de béton dans le monde dépasse les quatre milliards de mètres cube par année et constitue la matière la plus utilisée sur la terre après l'eau[26].

II.12 Conclusion

Les nanocomposites, à l'image des nanotechnologies plus généralement, suscitent de nombreux espoirs du fait de leur potentiel et d'un certain engouement médiatique. Quelques écueils peuvent ralentir le développement de ces derniers:

- Les espoirs déçus d'une technologie présentée comme trop prometteuse.

- L'éclatement d'une éventuelle bulle spéculative similaire à celle d'Internet qui a eu pour conséquence de tarir de nombreuses sources de financement.
- Les préoccupations environnementales liées à la taille des particules nanométriques qui pourraient se révéler dangereuses en pénétrant dans le corps humain (circulation sanguine, poumon) à l'image de l'amiante.

Actuellement, les nanocomposites se cantonnent à des marchés de niches où l'amélioration des propriétés justifie leur utilisation en dépit de leur surcoût. Les premières applications industrielles récentes sont des étapes nécessaires pour le développement et l'épanouissement d'une telle technologie qui a besoin d'un premier succès pour amorcer son passage du laboratoire à la commercialisation.

CHAPITRE III
Théories des Poutres et Développement
Mathématique du présent Modèle

III.1 Introduction

Les théories des poutres sont des modèles mathématiques utilisés dans le calcul des structures. Parmi les modèles les plus utilisées on a :

- la théorie d'Euler-Bernoulli, qui néglige l'influence du cisaillement .
- la théorie de Timoshenko qui prend en compte l'effet du cisaillement.
- Théorie d'ordre élevé.

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 flexion, des poutres CNTRC. Les équations du mouvement sont obtenues à partir du principe d'Hamilton.

III.2 Les différentes théories des poutre

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

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 [26]

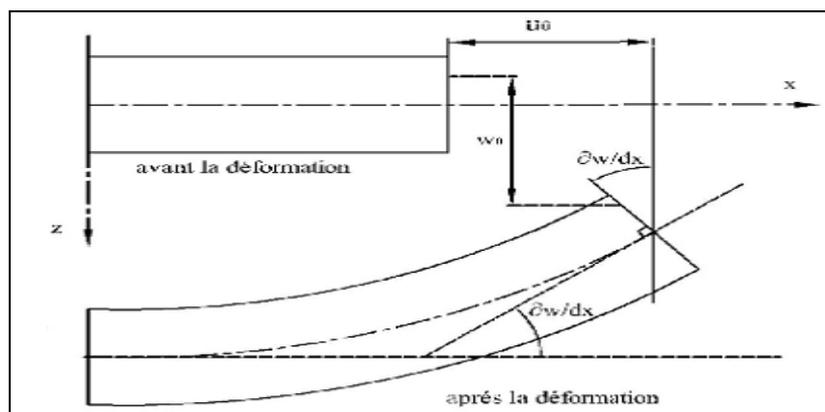


Figure III.1- Cinématique d'Euler Bernoulli .

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

$$\phi(z) = \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (3.1)$$

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:

$$U(M) = \begin{cases} u(x, z) = u^0(x) - z\omega'_x(x) \\ \omega(x, z) = \omega^0(x) \end{cases} \quad (3.2)$$

$u(x, z)$: Le déplacement axial

$w(x, z)$: Le déplacement transversal

$zw^0(x)$: Le déplacement axial dû à la flexion

$u^0(x)$: le déplacement axial de la fibre moyenne

$w^0(x)$: le déplacement transversal de la fibre moyenne

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

$$\omega'_x(x) = \frac{\partial \omega^0}{\partial x} = \frac{\partial \omega}{\partial x} = 0 \quad (3.3)$$

$u^0(x)$ 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 transversale.

III.2.2. Théorie de Timoshenko

La théorie de Timoshenko est plus riche et plus générale que la théorie élémentaire des poutres au prix d'une fonction supplémentaire. Cette solution permet d'affiner les solutions analytiques issues de la théorie classique. Toutefois ces solutions

sont entachées d'erreurs au voisinage des appuis et de la zone indentation où nous pouvons avoir des concentrations de contrainte et des champs de déplacement non homogènes.

Elle s'applique sur des poutres courtes, elle est basée sur le principe qu'après déformation, la section plane reste plane mais elle perd 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 est analogue à la théorie de "Reissner-Mindlin" dans le cas des plaques épaisses. (Timoshenko et al, 1972). 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) **[26]**.

$$U(M) = \begin{cases} u(x, z) = u^0(x) - z \frac{\partial \omega_b}{\omega_x}(x) - z \frac{\partial \omega_s}{\omega_x} \\ \omega(x, z) = \omega_b(x, t) + \omega_s(x, t) \end{cases} \quad (3.4a)$$

$$\text{pour } f(z) = z - \frac{h}{\pi} \sin \frac{\pi}{h} z \quad (3.4b)$$

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

Tel que :

$$\gamma_{xz}^0(x) = \omega_x^0(x) - \varphi^0(x) \quad (3.5)$$

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

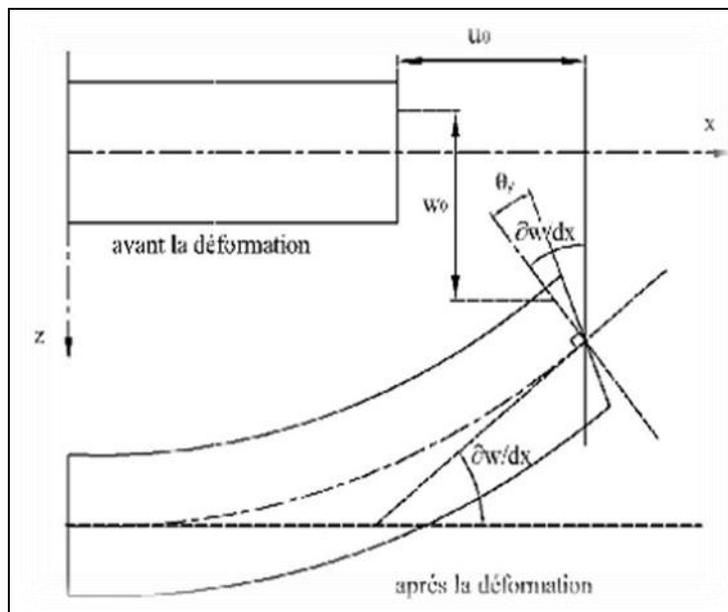


Figure III.2 - Cinématique de Timoshenko

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

$$\gamma_{xz}(x) = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial x} = -\omega^0_x(x) + \gamma_{xz}^0(x) + \omega^0_x(x) \tag{3.6}$$

$$\gamma_{xz}(x) = \gamma_{xz}^0(x) \tag{3.7}$$

Sachant que la contrainte de cisaillement est égale:

$$\tau_{xz} = G_{xz}\gamma_{xz} = G_{xz}\gamma_{xz}^0 \tag{3.8}$$

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

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

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 [26].

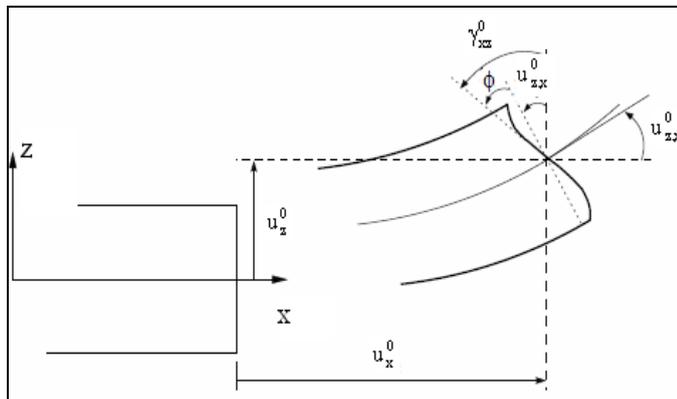


Figure III.3 - Cinématique de la Théorie d'Ordre Elevé.

ce cas, le champ de déplacement devient:

$$U(M) = \begin{cases} u(x, z) = u^0(x) - z \frac{\partial \omega_b}{\partial x}(x) - f(z) \frac{\partial \omega_s}{\partial x} \\ \omega(x, z) = \omega_b(x, t) + \omega_s(x, t) \end{cases} \tag{3.9}$$

$$\gamma_{xz}(x) = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial x} = -\omega^0{}_{,x}(x) + \phi'(z)\gamma_{xz}^0(x) + \omega^0{}_{,x}(x) \quad (3.10)$$

$$\gamma_{xz} = \phi'(z)\gamma_{xz}^0(x) \quad (3.11)$$

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

$$\phi'(z)|_z = \pm \frac{h}{2} \quad (3.12)$$

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 **(3.11)**.

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):

$$\phi(z) = 0 \quad (3.13)$$

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

$$\phi(z) = z \quad (3.14)$$

3-) Reddy avait proposé une théorie de déformation de cisaillement du troisième ordre (TSDT) [5] qui peut être obtenus par :

$$\phi(z) = z \left(1 - \frac{4z^2}{3h^2} \right) \quad (3.15)$$

4-) Le modèle exponentiel proposé par [48] :

$$\Phi(z) = ze^{-2\left(\frac{z}{h}\right)^2} \quad (3.16)$$

5-) Le modèle d'Aydogdu [49] :

$$\Phi(z) = z \alpha^{\frac{-2\left(\frac{z}{h}\right)^2}{\ln \alpha}} \quad (3.17)$$

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.

III.2.4 Les fondations élastiques (winkler et pasternak)

Pour calculer les contraintes s'exerçant sous une fondation reposante sur un milieu élastique, [50] 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.

Ceci a été amélioré plus tard par [51] 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).

III.2.5 Les fondations élastiques (kerr)

Le modèle de fondation de Kerr est une suite plus sophistiquée du modèle de Pasternak. Le massif de sol est un assemblage de ressorts avec une couche de cisaillement, dans lequel est introduit un assemblage de ressorts entre la couche de chaussée et la couche de cisaillement. En comparant les déflexions, les pressions et moments obtenus pour les trois types de chargements (charge uniformément répartie, forces concentrées aux bords d'une bande infinie, moments sur ces bords) au moyen de plusieurs modèles de fondation (Winkler, Kerr, Pasternak et fondation Boussinesq), [52] a montré que le modèle de Kerr permet d'obtenir des résultats proches de ceux déterminés par le massif de Boussinesq [53]. Il reste l'inconvénient majeur que ce modèle ne peut pas présenter un complexe de type multicouche de chaussée doté de discontinuités verticales ou horizontales.

III.3 Les propriétés matérielles des poutres composites renforcées par de nanotube de carbone

Une couche de cisaillement est introduite dans la fondation Winkler et les constantes de ressort au-dessus et au-dessous de cette couche sont supposées être différentes selon cette formulation [54]. La Figure (3.4a) montre la représentation physique de ce modèle mécanique.

. Quatre modèles différents de la distribution des renforts à travers l'épaisseur sont pris en considération dans cette étude comme indiqué dans la Figure (3.4b).

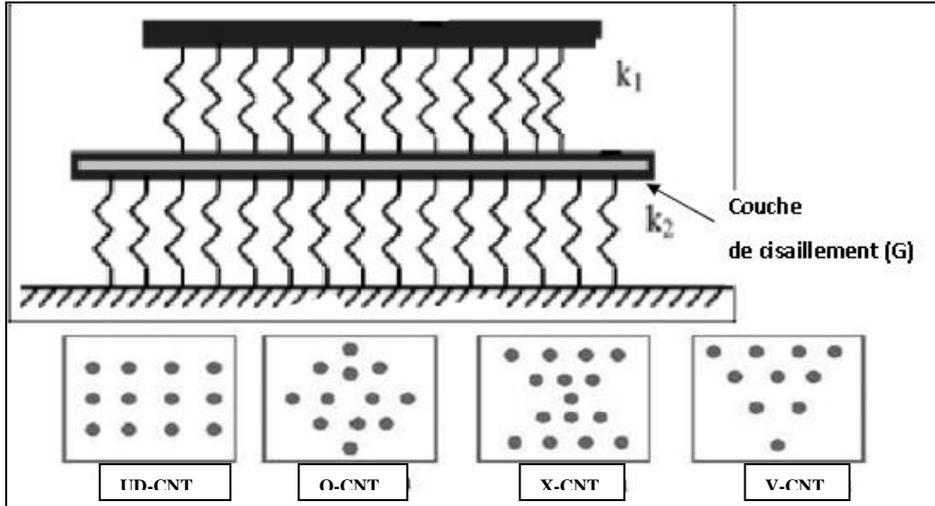


Figure III . 4- (a) Modèle de Kerr[55]
(b) les différents modèles des dispositions des renforts

Où \$K_1\$ est la constante de rigidité de ressort de la première couche; \$K_2\$ est la constante de rigidité de ressort de la deuxième couche ; \$w(x)\$ est la déflexion de la première couche

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 cisailment des poutres CNTRC [56,57].

$$E_{11} = \eta_1 V_{cnt} E_{11}^{cnt} + V_p E_p \tag{3.18a}$$

$$\frac{\eta_2}{E_{22}} = \frac{V_{cnt}}{E_{22}^{cnt}} + \frac{V_p}{E_p} \tag{3.18b}$$

$$\frac{\eta_3}{G_{12}} = \frac{V_{cnt}}{G_{12}^{cnt}} + \frac{V_p}{G_p} \tag{3.18c}$$

Avec :

\$E_{11}^{cnt}\$; \$E_{22}^{cnt}\$ et \$G_{12}^{cnt}\$: sont respectivement les modules de Young et le module de cisailment 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 :

$$V_{cnt} + V_p = 1 \quad (3.19a)$$

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 [58].

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

$$\nu = V_{cnt} \nu^{cnt} + V_p \nu^p, \rho = V_{cnt} \rho^{cnt} + V_p \rho^p \quad (3.19b)$$

Où : 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 (3.1b), les fonctions mathématiques employées pour montrer les distributions de constituants matériels sont exprimés ci-dessous:

• Poutre UD :

$$V_{cnt} = V_{cnt}^* \quad (3.20a)$$

• Poutre O:

$$V_{cnt} = 2\left(1 - 2\frac{|z|}{h}\right) V_{cnt}^* \quad (3.20b)$$

• Poutre X:

$$V_{cnt} = 4\frac{|z|}{h} V_{cnt}^* \quad (3.20c)$$

• Poutre V :

$$V_{cnt} = \left(1 + \frac{2z}{h}\right) V_{cnt}^* \quad (3.20d)$$

Ou V

w_{cnt} : est la fraction volumique considérée du CNTs, elle est déterminée à partir de la

relation suivante :

$$V_{cnt}^* = \frac{W_{cnt}}{W_{cnt} + \left(\frac{\rho_{cnt}}{\rho_m}\right)(1-W_{cnt})} \quad (3.21)$$

partir des équations (20), 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 :

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

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

$$\eta_1 = 1.3238 \text{ et } \eta_2 = \eta_3 = 1.7380 \text{ pour } V_{cnt}^* = 0.28 \text{ [59].}$$

III.3.1 Cinématique et équations constitutive

Le champ de déplacement de cette présente théorie est exprimé en se basant sur la théorie des poutres de [60] :

$$\begin{aligned} u(x, z) &= u^0(x) - z \frac{\partial \omega_b}{\omega_x}(x) - f(z) \frac{\partial \omega_s}{\omega_x} \\ \omega(x, z) &= \omega_b(x, t) \omega_s(x, t) \end{aligned} \quad (3.22b)$$

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 [61] :

$$f(z) = \frac{h}{\pi} \sin\left(\frac{z}{h}\right) \quad (3.23)$$

Le champ de déformation associé au champ de déplacement est :

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x^0 + zk_x^b + f(z)k_x^s \quad (3.24a)$$

$$\gamma_{xz} = g(z)\gamma_{xz}^s \quad (3.24b)$$

Où :

$$\varepsilon_x^0 = \frac{\partial u_0}{\partial x}, \quad k_x^b = -\frac{\partial^2 w_b}{\partial x^2}, \quad k_x^s = -\frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2}, \quad \gamma_{xz}^s = \frac{\partial w_s}{\partial x} \quad (3.24c)$$

$$g(z) = 1 - f'(z) \quad \text{et} \quad f'(z) = \frac{df(z)}{dz} \quad (3.24d)$$

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

$$\sigma_x = Q_{11}(z)\varepsilon_x \quad \text{et} \quad \tau_{xz} = Q_{11}(z)\gamma_{xz} \quad (3.25a)$$

Avec :

$$Q_{11}(z) = \frac{E_{11}(z)}{1-\nu^2} \quad \text{et} \quad Q_{11}(z) = G_{12}(z) \quad (3.25b)$$

III.3.2 Les équations du mouvement

Le principe de "Hamilton" est utilisé pour dériver les équations du mouvement. Ce principe peut être énoncé sous une forme analytique [62]

$$\int (\delta U + \delta V) dt = 0 \quad (3.26)$$

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 :

$$\delta U = \int_0^L \int_{-h/2}^{h/2} (\epsilon \delta \epsilon_x + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz}) dz dx = \int_0^L (N \frac{d\delta u_0}{dx} - M_b \frac{d^2 \delta w_s}{dx^2} - M_s \frac{d^2 \delta w_s}{dx^2} - Q \frac{d\delta w_s}{dx}) dx \quad (3.27)$$

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

$$(N, M_b, M_s) = \int_{-h/2}^{h/2} (1, z, f) \sigma_x dz \quad \text{et} \quad Q = \int_{-h/2}^{h/2} g \tau_{xz} dz \quad (3.28)$$

La variation de l'énergie potentielle par les charges appliquées peut être écrite comme :

$$\delta V = - \int_0^L [(q + f_s)(\delta w_b + \delta w_s)] \quad (3.29)$$

$$f_s = \frac{1}{1 + \frac{K_w}{K_c}} [K_w w_0 K_s \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} - \frac{K_s D_0}{K_c} \frac{\partial^6 w_0}{\partial x^6}] \quad (3.30a)$$

$$D_0 = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E_p}{1 - (v^p)^2} \quad (3.30b)$$

où : K_w et K_s sont les constantes de la rigidité de Winkler et du cisaillement qui sont données par :

$$K_w = \beta_w A_{110} / L^2, \quad K_s = \beta_s A_{110} \quad \text{et} \quad K_c = \beta_c A_{110} / L^2 \quad \text{avec} \quad \beta_w, \beta_s \quad \text{et} \quad \beta_c \quad \text{sont des facteurs}$$

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.

En substituant les expressions de δU , δV et δK des équations (3.27), (3.29) et en les remplaçant dans l'équation (3.26) 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

$$\delta u_0 = \frac{dN}{dx} = 0 \quad (3.31a)$$

$$\delta w_b: \frac{d^2 M_b}{dx^2} + q - fe \quad (3.31b)$$

$$\delta w_s: \frac{d^2 M_s}{dx^2} + q - fe \quad (3.31c)$$

En substituant l'équation (3.24) dans l'équation (3.25). et en remplaçant les résultats suivants dans l'équation (3.28), les équations du mouvement en fonction des déplacements s'écrivent :

$$N = A_{11} \frac{du_0}{dx} - B_{11} \frac{d^2 w_b}{dx^2} - B_{11}^s \frac{d^2 w_s}{dx^2} \quad (3.32a)$$

$$M_b = B_{11} \frac{du_0}{dx} - D_{11} \frac{d^2 w_b}{dx^2} - D_{11}^s \frac{d^2 w_s}{dx^2} \quad (3.32b)$$

$$M_s = B_{11}^s \frac{du_0}{dx} - D_{11}^s \frac{d^2 w_b}{dx^2} - H_{11}^s \frac{d^2 w_s}{dx^2} \quad (3.32c)$$

$$Q = A_{55}^s \frac{dw_s}{dx} \quad (3.32d)$$

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

$$(A_{11}, B_{11}, D_{11}, B_{11}^s, D_{11}^s, H_{11}^s) = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{11}(1, z, z^2, f(z), f^2(z)) dz \quad (3.33a)$$

et

$$A_{55}^s = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{55} [g(z)]^2 dz \quad (3.33b)$$

Les équations (3.16) peuvent être exprimées en termes de déplacement (u_0 , w_b , w_s) en utilisant les deux équations (3.16) et (3.17), comme suit:

0

$$A_{11} \frac{d^2 u_0}{dx^2} - B_{11} \frac{d^3 w_b}{dx^3} - B_{11}^s \frac{d^3 w_s}{dx^3} = 0 \quad (3.34a)$$

$$B_{11} \frac{d^3 u_0}{dx^3} - D_{11} \frac{d^4 w_b}{dx^4} - D_{11}^s \frac{d^4 w_s}{dx^4} + q - fe = 0 \quad (3.34b)$$

$$B_{11}^s \frac{d^3 u_0}{dx^3} - D_{11}^s \frac{d^4 w_b}{dx^4} - H_{11}^s \frac{d^4 w_s}{dx^4} + q - fe = 0 \quad (3.34c)$$

III.3.3 Les solutions analytiques pour la poutre CNTRC

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

+

$$\begin{Bmatrix} u_0 \\ w_b \\ w_s \end{Bmatrix} = \sum_{m=1}^{\infty} \begin{Bmatrix} u_m \cos(\lambda x) e^{i\omega t} \\ w_{bm} \sin(\lambda x) e^{i\omega t} \\ w_{sm} \sin(\lambda x) e^{i\omega t} \end{Bmatrix} \quad (3.35)$$

$\lambda = m\pi / L$. La charge transversale q est exprimée sous

$$(3.36)$$

$$q(x) = \sum_{m=1}^{\infty} Q_m \sin(\lambda x)$$

où : Q_m : est l'amplitude de la charge calculée à partir de la formule suivante :

$$Q_m = \frac{2}{L} \int_0^L q(x) \sin(\lambda x) dx \quad (3.37)$$

Les coefficients Q_m sont donnés ci-dessous pour quelques types des charges. Dans le cas d'une charge distribuée sinusoidalement :

$$m = 1 \text{ et } Q_1 = q_0 \quad (3.38a)$$

Pour le cas de la charge répartie uniformément :

$$Q_m = \frac{4q_0}{m\pi} \quad (m = 1,3,5 \dots) \quad (3.38b)$$

En substituant les expressions de u_0 , w_b , w_{set} et q des équations (3.20) et (3.21) dans les équations du mouvement (3.19) , les solutions analytiques peuvent être obtenus à partir des équations suivantes :

$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} \\ S_{13} & S_{22} & S_{23} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} U_m \\ W_{bm} \\ W_{sm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ Q_m \\ Q_m \end{pmatrix} \quad (3-39)$$

Avec :

$$\begin{aligned} S_{11} &= A \lambda^2, \quad S_{12} = -B \lambda^3, \quad S_{13} = -B^s \lambda^3, \\ S_{22} &= D_{11} \lambda^4 + (K_w + K_s \lambda^2 + (K_s D_0 \lambda^6) / K_c) / (1 + K_w / K_c) \end{aligned} \quad (3.40)$$

$$\begin{aligned} S_{23} &= D_{11}^s \lambda^4 + (K_w + K_s \lambda^2 + (K_s D_0 \lambda^6) / K_c) / (1 + K_w / K_c) \\ S_{33} &= H_{11}^s \lambda^4 + A_{55}^s \lambda^4 + (K_w + K_s \lambda^2 + (K_s D_0 \lambda^6) / K_c) / (1 + K_w / K_c) \end{aligned}$$

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur les différentes théories des poutres à savoir la théorie classique des poutres (Euler-Bernoulli), la théorie de déformation en cisaillement du premier ordre (Timoshenko) et la théorie de déformation de cisaillement d'ordre élevé.

Les solutions analytiques du comportement statique 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 nanotubes de carbone mono paroi (SWCNTs) sont alignés et répartis dans une matrice polymère avec différents types

de renforcement. Les propriétés matérielles des poutres sont évaluées en utilisant la loi de mélange.

CHAPITRE IV
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1 Introduction

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

Ses propriétés matérielles sont les suivantes :

$$\nu^P = 0.3 ; \rho^P = 1190 \text{ kg/m}^3 ; E^P = 2.5 \text{ GPa} .$$

Pour le matériau de renforcement SWCNTs armchair (10, 10) est choisi avec les propriétés suivantes :

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

Les formules adimensionnelles suivantes sont utilisées:

$$\bar{w} = 100 \frac{E_p h^3}{q_0 L^4} W ; \quad (4.1)$$

$$\bar{\sigma}_x = \frac{h}{q_0 L} \sigma_x \left(\frac{L}{2}, \frac{h}{2} \right) ; \quad (4.2)$$

$$\bar{\tau}_{xz} = \frac{h}{q_0 L} \tau_{xz} (0,0) \quad (4.3)$$

IV.2 Analyse statique des poutres CNTRC

Les résultats obtenus par la présente théorie pour l'analyse de la flexion de la poutre UD avec et sans fondation élastique sont présentés dans les tableaux (IV.1) et (IV.2) . en utilisant la théorie de déformation en cisaillement du troisième ordre. On peut remarquer que les poutres reposant sur les fondations élastiques ont les déplacements et les contraintes inférieures par rapport à ceux des poutres sans fondations élastiques. On observe aussi que l'augmentation de la fraction volumique V_{cnt} rend les poutres CNTRC plus rigides.

On constate à travers les résultats que la charge uniforme conduit à des flèches importantes contrairement à la charge sinusoïdale , On remarque que les valeurs sont presque les mêmes en utilisant les deux théories [26] et présent.

Tableau IV.1 - Déplacements et contraintes adimensionnels de la poutre UD-CNT avec et sans fondation élastique sous des charges uniformément réparties.

V_{cnt}^*	L/h	Theories	$\beta_w = 0, \beta_s = 0, \beta_c = \infty$			$\beta_w = 0.1, \beta_s = 0.02, \beta_c = \infty$		
			\bar{w}	$\bar{\sigma}_x$	$\bar{\tau}_{xz}$	\bar{w}	$\bar{\sigma}_x$	$\bar{\tau}_{xz}$
0.12	10	[26]	0.704	8.399	0.701	0.594	7.053	0.602
		Present	0.703	8.458	0.718	0.593	7.103	0.617
	15	[26]	0.524	11.849	0.716	0.400	9.556	0.568
		Present	0.524	11.889	0.737	0.400	9.019	0.584
	20	[26]	0.461	15.448	0.725	0.311	10.316	0.520
		Present	0.461	15.479	0.746	0.311	10.336	0.536
0.17	10	[26]	0.449	8.268	0.704	0.403	7.374	0.638
		Present	0.448	8.319	0.722	0.401	7.419	0.654
	15	[26]	0.344	11.762	0.719	0.286	9.737	0.614
		Present	0.344	11.796	0.739	0.286	9.764	0.631
	20	[26]	0.307	15.384	0.726	0.232	11.568	0.575
		Present	0.307	15.410	0.748	0.232	11.587	0.592
0.28	10	[26]	0.325	8.562	0.697	0.299	7.869	0.647
		Present	0.324	8.632	0.713	0.299	7.933	0.662
	15	[26]	0.235	11.959	0.714	0.206	10.469	0.638
		Present	0.234	12.005	0.733	0.206	10.511	0.655
	20	[26]	0.203	15.530	0.723	0.167	12.751	0.613
		Present	0.203	15.566	0.743	0.167	12.781	0.631

Tableau IV.2 - Déplacements et contraintes adimensionnels de la poutre UD-CNT avec et sans fondation élastique sous des charges sinusoïdales.

V_{cnt}^*	L/h	Theories	$\beta_w = 0, \beta_s = 0, \beta_c = \infty$			$\beta_w = 0.1, \beta_s = 0.02, \beta_c = \infty$		
			\bar{w}	\bar{O}_x	$\bar{\tau}_{xz}$	\bar{w}	\bar{O}_x	$\bar{\tau}_{xz}$
0.12	10	[26]	0.562	6.970	0.472	0.475	5.890	0.399
		Present	0.561	7.025	0.486	0.474	5.937	0.411
	15	[26]	0.416	9.716	0.475	0.319	7.439	0.364
		Present	0.416	9.754	0.490	0.319	7.469	0.375
	20	[26]	0.365	12.608	0.476	0.247	8.535	0.322
		Present	0.365	12.636	0.491	0.247	8.555	0.333
0.17	10	[26]	0.358	6.842	0.473	0.321	6.126	0.424
		Present	0.357	6.889	0.487	0.320	6.169	0.436
	15	[26]	0.273	9.630	0.476	0.227	8.021	0.396
		Present	0.273	9.662	0.490	0.227	8.048	0.408
	20	[26]	0.243	12.543	0.476	0.184	9.520	0.362
		Present	0.243	12.567	0.491	0.184	9.539	0.373
0.28	10	[26]	0.260	7.130	0.472	0.259	7.194	0.485
		Present	0.259	7.194	0.485	0.239	6.633	0.447
	15	[26]	0.187	9.824	0.475	0.164	8.639	0.418
		Present	0.186	9.868	0.489	0.164	8.679	0.430
	20	[26]	0.161	12.689	0.476	0.133	10.485	0.393
		Present	0.161	12.722	0.491	0.133	10.514	0.406

Tableau IV.3 – Déplacement à mi travée de différentes poutres pour différentes types fondations élastique sous des charges uniformément réparties(L/h=10).

			$V_{cnt}^*=0.12$				$V_{cnt}^*=0.28$			
β_w	β_s	β_c	UD-CNT	O-CNT	X-CNT	V-CNT	UD-CNT	O-CNT	X-CNT	V-CNT
0	0	∞	0.703	1.102	0.575	0.877	0.324	0.480	0.281	0.400
0.1	0	∞	0.661	1.004	0.547	0.814	0.315	0.461	0.274	0.386
0.1	0.02	∞	0.593	0.854	0.499	0.713	0.299	0.427	0.261	0.362
0.1	0.02	0.1	0.423	0.539	0.374	0.479	0.250	0.331	0.224	0.292

Tableau IV.4 - Déplacement à mi travée de différentes poutres pour différentes types fondations élastique sous des charges sinusoïdales (L/h=10).

			$V_{cnt}^*=0.12$				$V_{cnt}^*=0.28$			
β_w	β_s	β_c	UD-CNT	O-CNT	X-CNT	V-CNT	UD-CNT	O-CNT	X-CNT	V-CNT
0	0	∞	0.561	0.876	0.459	0.697	0.259	0.382	0.225	0.319
0.1	0	∞	0.528	0.799	0.437	0.648	0.252	0.367	0.219	0.308
0.1	0.02	∞	0.474	0.681	0.399	0.568	0.239	0.340	0.209	0.289
0.1	0.02	0.1	0.333	0.424	0.294	0.377	0.197	0.261	0.176	0.229

On remarque à travers les tableaux(**IV.3**) et (**IV.4**) que la poutre en X-CNT est la plus rigide, on remarque également que les fondation élastique (Winkler , Pasternak et Kerr) affecte négativement le déplacement des poutres (UD-CNT, O-CNT , X-CNT et V-CNT) et que le déplacement diminue en présence du fondation élastique et vice versa.

Aussi on remarque que l'augmentation la fraction volumétrique (V_{cnt}^*) entraîne une diminution du déplacement des poutres .

Cette diminution est attribuée à l'augmentation de la rigidité de la poutre.

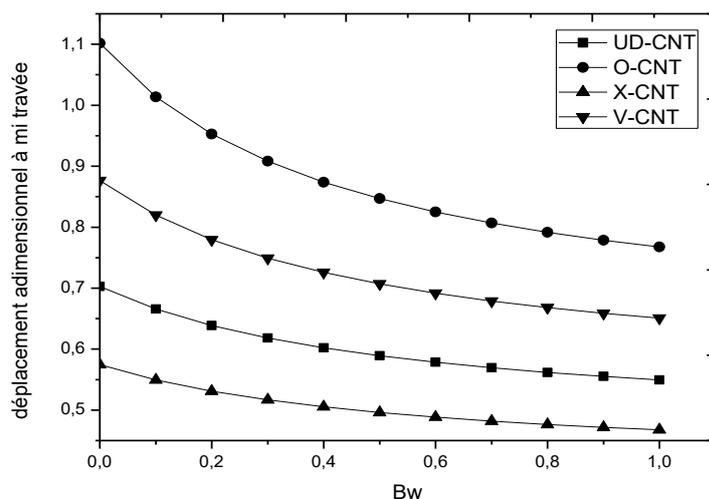


Figure IV.1- Effet du Paramètre Winkler sur les déplacements Transversaux adimensionnels des poutres CNTRC sous des charges uniformément répartie ($L / h = 10 ; \beta_s = 0 ; \beta_c = 0.8 ; V_{cnt}^* = 0.12$).

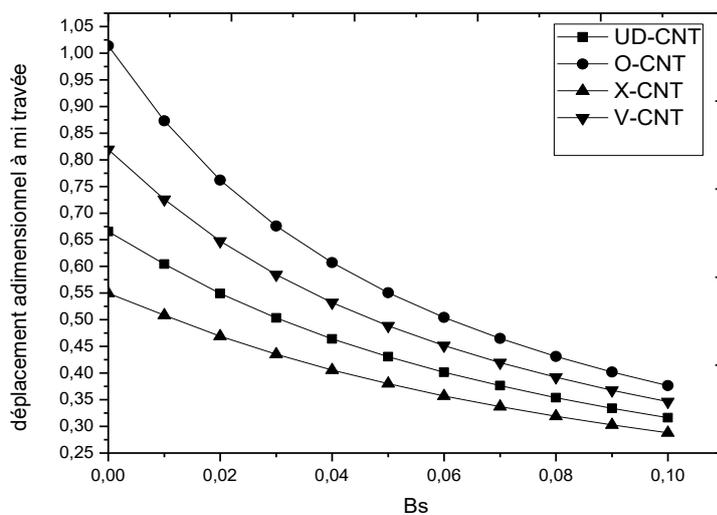


Figure IV.2- Effet du paramètre Pasternak sur les déplacements transversaux adimensionnels des poutres CNTRC sous des charges uniformément réparties ($L / h = 10 ; \beta_w = 0.1 ; \beta_c = 0.8 ; V_{cnt}^* = 0.12$).

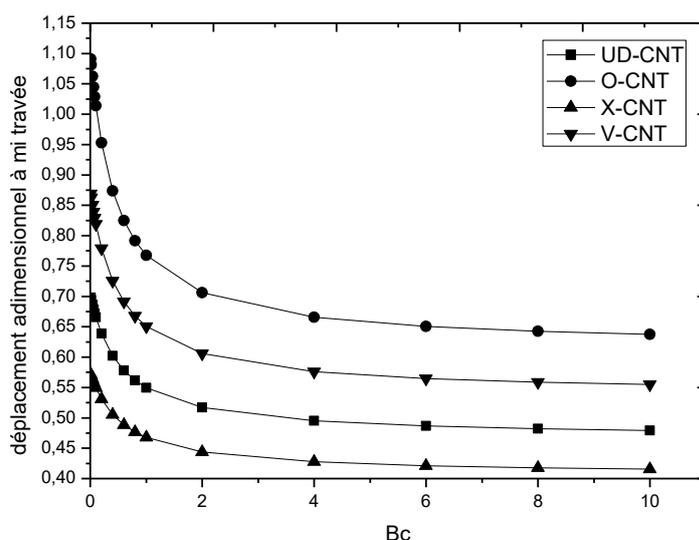


Figure IV.3 -Effet du paramètre Kerr sur les déplacements transversaux adimensionnels des poutres CNTRC sous des charges uniformément réparties($L / h = 10$; $\beta_w = 0.8$; $\beta_s = 0$; $V_{cnt}^* = 0.12$).

On remarque à travers les figures (IV.1) (IV.2) et (IV.3) que le module du fondation élastique affecte le déplacement des poutres (UD-CNT , O-CNT , X-CNT et V-CNT) de sorte que l'augmentation de ce paramètres diminue le déplacement transversal, et cela s'applique aux trois fondations élastiques (Winkler , Pasternak , Kerr) dans l'équation (3.39), nous avons démontré cet effet

Ce qui arrive à cause de la raideur de la fondation élastique.

On remarque aussi que la poutre X-CNT est le plus rigide car sa déplacement qui est le plus petit par rapport les trois autres poutres.

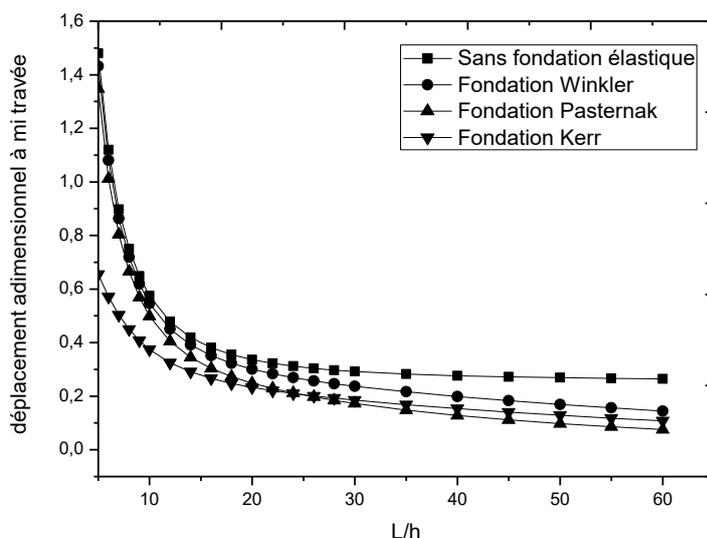


Figure IV.4 - Déplacements transversaux adimensionnels de la poutre X sur différents fondation élastique avec différents rapports d'épaisseur.

La figure (IV.4) montre l'effet de le rapport d'épaisseur (L / h) des nanotubes de carbone sur le déplacement de la poutre X (le plus rigide comme nous l'avons démontré dans les trois figures précédentes) en utilisant la théorie des poutres raffinée trigonométrique de sorte qu'une augmentation de ce rapport d'épaisseur entraîne une diminution du déplacement de la poutre. Fondation de Kerr est le plus rigide les autres fondations

IV.3. Conclusion

Grâce à ces études, nous concluons que la poutre X-CNT est la plus rigide que les autres poutres (UD-CNT , O-CNT et V-CNT) Et c'est à cause de sa forme distinctive .

Nous concluons également que le déplacement de ces poutres est affectée par la valeur des coefficients de rapports d'épaisseur et la fraction volumique . Elle est également affectée par la présence du fondation élastique (Winkler , Pasternak et Kerr), de sorte que le déplacement est réduite par la présence du fondation élastique, et vice versa .

Conclusion générale et Perspectives

Conclusion générale et Perspectives

Nous avons, dans le cadre de ce travail, Analyse Flexion d'une Poutre en nanocomposite (FG-CNT) Reposant sur une Fondation élastique Kerr et les différents paramètres pouvant influencer sur le comportement des poutre renforcées. Cette étude est basée sur la théorie du Théorie d'ordre élevé (raffinée), il est utilisé pour l'analyse de flexion des poutres nanocomposites. Les poutres sont renforcées par des nanotubes de carbone selon quatre formes différentes. (UD-CNT , O-CNT, X-CNT et V-CNT).

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 les charges critiques de flexion , on a trouvé que la distribution des renforts type X-CNT rend les poutres plus rigides.

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 les charges critiques de flexion , on a trouvé que la distribution des renforts type X-CNT rend les poutres plus rigides.

Les poutres contenant des fractions volumiques des nanotubes de carbone plus élevées ont des charges critiques plus importantes ce qui rend ces poutres plus rigides. et qui contenant rapport d'épaisseur plus grand ont des déplacements transversaux plus petit que les autres Et nous avons également découvert que les NTC que reposent sur la fondation élastique de kerr sont les plus faible.

Perspectives

- L'utilisation des différentes théories pour l'analyse de la flexion d'une poutre en polymère renforcée par des nanotubes de carbone sous diverses conditions d'appuis .
- Introduire de l'effet de la température sur la flexion d'une poutre en polymère renforcée par des nanotubes de carbone.
- l'analyse du comportement mécanique de la poutre en polymère renforcée par des nanotubes de carbone en utilisant la méthode des éléments finis.

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.

Références Bibliographique

Références Bibliographique

- [1] R. E. Smalley et al « Single Wall Carbon Nanotube Amplification: En Route to a Type-Specific Growth Mechanism». *Journal of the American Chemical Society*, vol. 128, no. 49, pp. 15824-15829, Dec. 2006.
- [2] mercier guillaume, Purification et fonctionnalisation d'échantillons de nanotubes de carbone mono feuillets : efficacité et sélectivité des traitements chimiques Propriétés et applications, thèse doctorat. Université de Lorraine. 2012
- [3] Sandra RIZK, Elaboration et caractérisation des nanostructures carbonés par procédé CVD assisté par plasma microonde, thèse doctorat. Université Henri Poincaré, Nancy I. 2009.
- [4] <http://w3.umh.ac.be/chimie/docs/studs01-02/fullerenes.html>
- [5] « Electronic, Thermal and Mechanical Properties of Carbon Nanotubes » November 2004 *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences* 362(1823):2065-98
- [6] Z. Shi, Y. Lian, X. Zhou, Z. Gu, Y. Zhang, S. Iijima, L. Zhou, K. T. Yue, and S. Zhang, "Mass- production of single-wall carbon nanotubes by arc discharge method," *Carbon N. Y.*, vol. 37, no. 9, pp. 1449–1453, Jan. 1999.
- [7] C. Journet and P. Bernier, "Production of carbon nanotubes," *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 67, no. 1, pp. 1–9, Jul. 1998.
- [8] a. a. Stramel, M. C. Gupta, H. R. Lee, J. Yu, and W. C. Edwards, "Pulsed laser deposition of carbon nanotube and polystyrene–carbon nanotube composite thin films," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 48, no. 12, pp. 1291–1295, Dec. 2010.
- [9] M. Perezcabero, "Characterization of carbon nanotubes and carbon nanofibers prepared by catalytic decomposition of acetylene in a fluidized bed reactor," *J. Catal.*, vol. 215, no. 2, pp. 305–316, Apr. 2003.
- [10] R. Brukh and S. Mitra, "Mechanism of carbon nanotube growth by CVD," *Chem. Phys. Lett.*, vol. 424, no. 1–3, pp. 126–132, Jun. 2006.
- [11] N. Zhao, C. He, Z. Jiang, J. Li, and Y. Li, "Fabrication and growth mechanism of carbon nanotubes by catalytic chemical vapor deposition," *Mater. Lett.*, vol. 60, no. 2, pp. 159–163, Jan. 2006.
- [12] M. R. Maschmann, P. B. Amama, A. Goyal, Z. Iqbal, R. Gat, and T. S. Fisher, "Parametric study of synthesis conditions in plasma-enhanced CVD of high-quality single-walled carbon nanotubes," *Carbon N. Y.*, vol. 44, no. 1, pp. 10–18, Jan. 2006.
- [13] Jean-Malo Chehab, Guillaume Saint-Pierre, " T.P.E. Les Nanotubes de Carbone dans le Domaine Médical", 1^{ère} S, Lycée d'Hulst - Paris 7^{ème}, 2007-2008.
- [14] Paul L. McEuen, Michael S. Fuhrer and Hongkun Park, "Single-Walled Carbon Nanotube Electronics" *IEEE Transactions on Nanotechnology*, Vol. 1, No. 1, (2002), 78-85
- [15] Noor Mazni Ismail, Azizan Aziz and Mariatti Jaafear, "Thermal stability and electrical conductivity of multiwalled carbone nanotube (MWCNT)/polymethyl Methacrylate (PMMA) Nanocomposite prepared via the Coagulation Method", 2nd ASEAN - APCTP Workshop on Advanced Materials Science and Nanotechnology, AIP Conf. Proc. 1455, (2012), 212-215.
- [16] Emmanuel Flahaut, "synthese par voie catalytique et caracterisation de composites

nanotubes de carbone-metal-oxyde. Poudres et matériaux denses”, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, (1999).

[17] Hermane Mbtsi, “Synthèse de nanotubes de carbone pour l’obtention de vias d’interconnexions électriques et de drains thermiques”, Thèse de Doctorat, Université d’Orléans, (2010).

[18] B. Iakhdar, ‘ ‘ Les Propriétés Physiques Et Mécaniques Des Nanotubes en Carbone » ’ ’, thèse, Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, p 107, 2017

[19] Cyril Tinguely, “Réalisation d’interconnexions de faible résistivité à base de nanotubes de carbone biparois pour la nano-électronique”, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, (2010).

[20] Ricart Thibault, “Etude de nano-systèmes électro-mécaniques (NEMS) à base de nanotubes de carbone pour applications hyperfréquences”, Thèse Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, (2008).

[21] Baughman R.H., Cui C., Zakhidov A.A., Iqbal Z., Barisci J.N., Spinks G.M., Wallace G.G., Mazzoldi A., De Rossi D., Rinzler A.G., Jaschinski O., Roth S., Kertesz M., [Carbon nanotube actuators] Science, 284, 1340; 1999

[22] Sander J.T., Verschueren M., Dekker C., [Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube] Nature, 393, 49; 1998

[23] Dijon J., Bridoux C., Fournier A., Geffraye F., De Monsabert G., Montmayeul B., Levis M., Sarrasin D., Meyer R., [Towards a low-cost high-quality carbon nanotube field emission display], Journal of the Society for Information Display, 12 (4), 373; 2004

[24] Choi W.B., Chung D.S., Kang J.H., Kim H.Y., Jin Y.W., Han I.T., Lee Y.H., Jung J.E., Lee N.S., Park G.S., Kim J.M., [Fully sealed, high-brightness carbon-nanotube field emission display] , Applied Physics Letters , 75 (20), 3129; 1999

[25] Balavoine F., Schultz P., Richard C., Mallouh V., Ebbesen T.W., Miokowski C., [Helical crystallization of proteins on carbon nanotubes: A first step towards the development of new biosensors] , Angewandte Chemie International Edition, 38, 1913; 1999

[26] T Samira , Analyse de la flexion statique, le flambement et la vibration des structures composites renforcées par des nanotubes de carbone, thèse doctorat , p91, 2017

[27] David Langohr, Étude du stockage d’hydrogène par adsorption dans des carbones nanostructurés [archive] (thèse), 2004.

[28] Cristhophe, R. (2006). Seagate veut utiliser des nanotubes dans ses disques durs. Consulté à l’adresse <https://www.generation-nt.com/seagate-disques-durs-hddnanotubes-actualite-15071.html>

[29] <http://nanotubesdec carbone1.emonsite.com/pages/applications/defaults.html>

[30] S. Chaoui, Elaboration et caractérisation de nanocomposite à matrice polymère : Approche expérimentale. thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas- Setif. 2014

[31] A.hanane, Influence du taux de charge sur un nanocomposite Polystyrène/Argile , Mémoire de master, UNIVERSITE M’HAMED BOUGARA BOUMERDES, 2017

[32] D. M. Marquis, E. Guillaume, C. Chivas-Joly. "Properties of nano-fillers in polymer". In: J. Cuppoletti. " Nanocomposites and polymers with analytical methods". Rijeka, Croatia, InTech, 2011, pp261-284.

- [33] M. AMBID. "Evaluation de nanocomposites polypropylène/silicate pour l'isolation électrique : Etude des phénomènes de polarisation, de conduction et des propriétés optiques". [En ligne]. Thèse de doctorat. Toulouse: Université de Toulouse III, 2007, 178 P.
- [34] N. ANDRES PEREZ. "Etude calorimétrique et diélectrique de nanocomposites silicones ". [Enligne]. Thèse de doctorat. Grenoble: INPG. France, 2008, 199 P.
- [35] B. Abdoumotalb, Analyse de l'instabilité par le flambement des plaques nanocomposite, Mémoire de master, Université Djillali Liabès De Sidi Bel Abbés, 2017
- [36] P. M Ajayan, O. Stephan, C. Colliex, D. Trauth, Aligned carbon nanotube arrays formed by cutting a polymer resin-nanotube composite. *Science*, 265 (5176), 1212-1214 (1994)
- [37] C. Bartholome, P. Miaudet, A. Derré, M. Maugey, O. Roubeau, C. Zakri, P. Poulin, Influence of surface functionalization on the thermal and electrical properties of nanotube-PVA composites. *Composites Science and Technology* 2008, 68 (12), 2568-2573.
- [38] R. E. Gorge, K. K. S. Lau, K. K. Gleason, R. E. Cohen, The importance of interfacial design at the carbon nanotube/polymer composite interface. *Journal of Applied Polymer Science* 2006, 102 (2), 1413-1418.
- [39] L. Halima Analyse de la charge critique de flambement d'un nanotube de carbone monocouche type zigzag situé dans un milieu élastique, Mémoire, Université Tiaret 2017
- [40] Althues H., J. Henle, et S. Kaskel, (2007), "Functional inorganic nanofillers for transparent polymers". *Chemical Society Reviews*, 36(9):1454-1465.
- [41] N. ANDRES PEREZ. "Etude calorimétrique et silicones ". [Enligne]. Thèse de doctorat. Grenoble: INPG. France, 2008, 199 P
- [42] S. Senani. "Interaction organosilane/silice de précipitation. Du milieu hydro-alcoolique au milieu aqueux ". [Enligne]. Thèse de doctorat. Paris : Université de Paris VI. 2004
- [43] B. Tayeb, comportement vibratoire d'un nanotube de carbone sous l'effet thermique en milieu élastique, thèse de doctorat, Université Djillali Liabès de Sidi Belabbès, 2017
- [44] Ajayan. A. M., J. M. Tour. (2007), "Materials science - Nanotube composites. *Nature*", 447(7148), 1066-1068.
- [45] Gao J., et al., (2005), "Continuous spinning of a single-walled carbon nanotube-nylon composite fiber", *Journal of the American Chemical Society*, 127, (11), 8.
- [46] Wei, C. Y., Adhesion and reinforcement in carbon nanotube polymer composite. *Applied Physics Letters*, 2006, 88: 093108.
- [47] Ajayan. P. M., L. S. Schadler, C. Giannaris, A. Rubio. (2000), "Single-walled carbon nanotube-polymer composites: Strength and weakness". *Adv. Mater*, 12 (10), 750-753.
- [48] Afaq. K. S. (2003), "Développement d'un Nouveau Modèle pour les Structures Composites Multicouches et Sandwichs avec Prise en compte du Cisaillement Transverse et des Effets de Bord".
- [49] Aydogdu. M., (2005), "Vibration analysis of cross-ply laminated beams with general boundary conditions by Ritz method", *International Journal of Mechanical Sciences* 47, pages: 1740-1755.
- [50] Winkler E. (1867), "Die Lehre Von Elasticität Und Festigkeit". 1st Edition, H. Dominicus, Prague.

- [51] Pasternak P.L. (1954), "On a new method of analysis of an elastic foundation by means of two foundation constants". Cosudarstrennoe Izdatelstvo Literaturi
- [52] M. Kneifati. Analysis of plates on a Kerr foundation model. *Journal of Engineering Mechanics*, 111 (11) : 1325-1342, November 1985.
- [53] S. Salasca. Calcul par éléments finis des états de contraintes dans les chaussées rigides/Evaluation des phénomènes de contact associée aux effets de retrait et de température, application à l'interprétation d'expérimentation sur site. Thèse de doctorat, Université de Nantes-Ecole Centrale de Nantes, 1998.
- [54] Kerr A.D., 1964. "Elastic and viscoelastic foundation models". *J Appl Mech Trans ASME*, Volume 31(4), pp. 491-8.
- [55] Gorbunov-Pasadov M.I. (1949). Beams and slabs on elastic foundations. Mashstroizdat, Moscow.
- [56] Bakhti, K., Kaci, A., Bousahla, A.A., Houari, M.S.A., Tounsi, A., Adda Bedia, E.A. (2013), "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
- [57] Kaci, A., Tounsi, A., Bakhti, K., Adda Bedia, E.A. (2012), "Nonlinear cylindrical bending of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite plates", *Steel and Composite Structures*, 12(6), 491-504.
- [58] Han, Y., Elliot, J., (2007), "Molecular dynamics simulations of the elastic properties of polymer/carbon nanotube composites", *Comp. Mater. Sci.*, 39, 315-323.
- [59] Yas, M.H., Samadi, N. (2012), "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.
- [60] Ould Larbi, L., Kaci, A., Houari, M.S.A., Tounsi, A. (2013), "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
- [61] Boudarba, B., Houari, M.S.A., Tounsi, A. (2013), "Thermomechanical bending response of FGM thick plates resting on Winkler-Pasternak elastic foundations", *Steel and Composite Structures*, 14(1), 85 - 104.
- [62] J.N. Reddy, Nonlocal theories for bending, buckling and vibration of beams. *Int. J. Eng. Sci.* 45(2-8) (2007), 288-307. doi:10.1016/j.ijengsci.2007.04.004