

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ibn Khaldoun Tiaret



Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie civil

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

Spécialité: Génie Civil

Option: Structures

Présentée par:

Boukhors Khaldia

&

Meridja naima

Sujet de mémoire :

**L'effet de la porosité sur la vibration libre d'une poutre (FG-CNT)
reposant sur une fondation élastique**

Soutenu le 03/06/2023 devant le jury composé de :

Pr. T.H. DAOUADJI

Président

Pr. M. ZIDOUR

Encadreur

Dr.T. BENSATTALAH

Examineur

Dr. A. SAOULA

Examineur

PROMOTION : 2022/2023

Remerciement :

Tout d'abord nous remercions avant tous, dieu le tout puissant qui nous a donné la santé, le courage, la volonté et la patience pour mener à bien ce travail.

Nous voudrions remercier chaleureusement notre promoteur Dr : Zidour Mohamed de nous avoir pris en charge, et pour sa disponibilité, son aide et ses précieux conseils.

Nous remercions les membres de jury qui nous feront l'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à tous les enseignants de département génie civil qui ont contribué à notre formation d'ingénieur.

Enfin, à tous ceux ou celles qui nous ont apporté leur soutien de loin ou de près, qu'ils trouvent ici, l'expression de notre vive et sincère reconnaissance

DEDICACE

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

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

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

A toutes nos frères et nos sœurs.

A toutes nos familles.

A toutes nos amis (es).

A toute notre promotion.

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

Enfin à tous ceux qui nous sont très chers

Meridja Naima

DEDICACE

*j'ai l'honneur de dédier ce modeste travail à mon père, à ma très belle mère qui
m'ont continuellement soutenu avec un dévouement sans bornes et qui*

m'ont recoulé aucun sacrifice tout le long de mes études.

*A mon cher frère, ma sœur et toute ma famille A tous mes amis de l'université de
ma promotion*

BOUKHORS KHALDIA

Résumé

Résumé :

Dans cette analyse, la théorie des poutres de déformation par cisaillement d'ordre élevé (TSDT) est utilisée pour étudier le comportement vibratoire d'une poutre poreuses en nano-composite reposant sur une fondation élastique type Kerr. des nanotubes de carbone sont utilisés comme renfort selon Quatre types de distributions: distribution uniforme (UD-CNT) et fonctionnellement graduées de type (X-CNT, O-CNT, V-CNT).

La nouveauté dans le présent travail, c'est l'étude analytique de l'effet de la porosité et la fondation élastique type Kerr sur la vibration libre d'une poutre (FG-CNT). Les équations mathématiques du présent modèle sont dérivées et les solutions obtenues sont validées numériquement par comparaison avec certaines solutions disponibles dans la littérature. L'influence de divers paramètres sur la vibration des poutres poreuses à base de polymère renforcer par FG-NTCs, tels que les rapports géométriques, la rigidité de la fondation élastique, la fraction volumique, les types de renforcement et le degré de la porosité sont étudiés.

Mots-clés: Nano-composites ; Nanotubes; Vibration; Kerr; Porosité.

Abstract:

In this analysis, the High Order Shear Deformation Beam Theory (HOSDT) is used to study the vibration behavior of a porous nano-composite beam resting on a Kerr-type elastic foundation. Carbon nanotubes are used as reinforcement according to four types of distributions: uniform distribution (UD-CNT) as well as functionally graded type (X-CNT, O-CNT, V-CNT).

The novelty in the present work is the analytical study of the effect of porosity and Kerr-type elastic foundation on the free vibration of a beam (FG-CNT). The mathematical equations of the present model are derived and the obtained solutions are validated numerically by comparison with some solutions available in the literature. The influence of various parameters on the vibration of porous polymer-based beams reinforced by FG-CNTs, such as geometric ratios, elastic foundation stiffness, volume fraction, types of reinforcement and degree of porosity are studied.

Keywords: Nano-composites; Nanotubes; Vibration; Kerr; Porosity.

ملخص

في هذا التحليل نظرية الروافد تشوه القص عالي الدرجة لدراسة سلوك الاهتزاز لشعاع مركب نانو مسامي يرتكز على أساس مرن من نوع KEER . تُستخدم الأنابيب النانوية الكربونية كتعزيز وفقاً لأربعة أنواع من التوزيعات: التوزيع المنتظم (UD-CNT) ، والنوع المتدرج وظيفياً (V-CNT, O-CNT, X-CNT).

الجديد في هذا العمل هي الدراسة التحليلية لتأثير المسامية و الأساس المرن على الاهتزاز الحر للرافدة (FG-CNT) يتم اشتقاق المعادلات الرياضية لهذا النموذج ويتم التحقق من صحة الحلول التي تم الحصول عليها عددياً بالمقارنة مع حلول معينة متوفرة في الأدبيات. تمت دراسة تأثير المعاملات المختلفة على اهتزاز الروافد المسامية المصنوعة من البوليمر المعززة بواسطة (FG-NTCs) مثل النسب الهندسية وصلابة الأساس المرنة والنسبة الحجمية وأنواع التعزيز ودرجة المسامية.

الكلمات المفتاحية: مركبات النانو، الأنابيب النانوية، اهتزاز، كبير، المسامية

Sommaire

Remerciements	
Dédicace	
Dédicace	
Résumé.....	i
Abstract.....	ii
المخلص.....	iii
Liste des figures.....	x
Liste des tableaux.....	xii
Liste des notations	xiv
Liste des abréviations.....	xvii
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les nanotubes de carbone	
I.2 Introduction.....	
I.2 Le carbone.....	4
I.3 Les différentes formes de carbone.....	5
I.3.1 Le diamante.....	6
I.3.2 Le graphite.....	6
I.3.3 Les carbone mal organisés.....	8
I.4 Les nouvelles formes du carbone.....	8
I.4.1 Les Fullerènes.....	8
I.4.2 Le graphène.....	9
I.5 Les nanotubes de carbone.....	10
I.5.1 Différentes familles de nanotubes.....	11
I.5.2 Méthode de synthèse de nanotubes.....	12
I.5.2.1 L'arc électrique.....	12
I.5.2.2 L'ablation laser.....	13
I.6 Purification des nanotubes.....	14
I.7 Propriétés des nanotubes.....	15
I.7.1 Propriétés mécanique.....	16
I.7.2 Propriétés électriques	16
I.7.3 Propriétés thermiques.....	17
I.7.4 Propriétés chimique.....	17
I.8 Dispersion des nanotubes	18

I.9 Marché des nanotubes	19
I.10 Domaine d'application des nanotubes.....	20
I.11 Conclusion.....	21

Chapitre II : généralités sur les nanocomposites

II.1 Introduction	23
II.2 Généralités sur la structure des polymères.....	23
II.3 Classification des polymères	24
II.3.1 Selon l'origine.....	24
II.3.1.1 Les polymères naturels.....	24
II.3.1.2 Les polymères artificiels	24
II.3.1.3 Des polymères synthétiques.....	25
II.3.2 selon l'architecture	25
II.3.3 selon la structure chimique	25
II.3.3.1 Les homopolymères.....	26
II.3.3.2 Les copolymère.....	26
II.3.3 Selon leur structure :.....	26
II.3.3.1 Les polymères linéaires ou monodimensionnels :.....	27
II.3.3.2 Les polymères bidimensionnels	27
II.3.3.3 Les polymères tridimensionnels	28
II.3.4.1 Les thermoplastiques.....	28
II.3.4 Selon leur comportement thermique	28
II.3.4.2 Les élastomère.....	28
II.3.4.3 Les thermodurcissables.....	29
II.4 Classification suivant les propriétés	29
II.5 Propriétés des polymère	30
II.5.1.2 Résistance en traction OM	30
II.5.1.1 Contrainte au seuil d'écoulement σ_y	30
II.5.1 Propriétés mécaniques	30
II.5.1.3 Contrainte à x% d'allongement.....	30
II.5.1.4 La résistance en flexion.....	30
II.5.1.5 La résistance en compression σ_m	30
II.5.1.6 La résistance en cisaillement	30

II.5.2 Propriétés optiques	30
II.5.3 Propriétés électriques.....	31
II.6 Différences entre composite et nanocomposite	32
II.7 Les matériaux composites	32
II.8 Définition d'un nanocomposite	33
II.9 Propriétés des nanocomposites	34
II.9.1 Propriétés mécaniques	34
II.9.2 Propriétés thermiques.....	35
II.10 Classification des nanocomposites	35
II.10.1 Les Composites à Matrice Polymère	35
II.10.2 Les Composites à Matrice Métallique	36
II.10.3 Les Composites à Matrice Céramique	36
II.11 Application des nanocomposites	36
II.12 Procédés d'élaborations des nanocomposites	37
II.12 .1 Mélange direct en solution	37
II.12 .2Mélange dans le polymère fondu :.....	38
II.12.3 Polymérisation in situ	40
II.13 Conclusion	41
 Chapitre III : porosité des poutres et modèles des fondations élastique :	
III.1 Introduction	43
III.2 La porosité	43
III.2.1 Définition d'une porosité :.....	43
III.2.2 La porosité dans les matériaux :	45
III.2.3 Etude des causes possibles d'apparition de la porosité	45
III.2.3.2 Les causes thermodynamiques	46
III.2.31 Les causes mécaniques.....	47
III.2.4 La grande diversité des milieux poreux.....	47
III.3 les fondations élastiques	48
III.3.1 Modèle winkler :.....	48
III.3.2 Modèle de Pasternak	50
III.3.3 Modèle de Kerr	51
III.4 Conclusion	52

Chapitre IV : théories des poutres et développement mathématique

IV.1 Introduction	54
IV.2 Les différentes théories des poutres.....	54
IV 2.1 La théorie classique des poutres (Euler-Bernoulli)	54
IV.2.2 la théorie de premier ordre des poutres Timoshenko)	56
IV2.3 Théorie d'ordre élevé.....	57
IV.3 Les poutres composites renforcées par des nanotubes de carbone à gradation fonctionnelle.....	59
IV.4 Théorie et formulations	60
IV .4.1 Cinématique et équations constitutives	60
IV.4.2 Les solutions analytiques	64
IV.5 Conclusion.....	65

Chapitre V: résultats et discussion

V.1 introduction	67
V.2 Analyse de la vibration des poutres CNTRC.....	67
V.3 conclusion	72
Conclusion générale.....	75
Références.....	78

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les nanotubes de carbone

Figure I.1 : Les différentes formes allotropiques du carbone.....	05
Figure I.2 : Dimant purifier.....	06
Figure I.3 : Diamant pure.....	06
Figure I.4 : Graphite et une de ces formes.....	07
Figure I.5 : La forme de la molécule de fullurène.....	09
Figure I.6 : Diagramme schématique montrant des composés entre les feuillets de graphène; (b) image imaginaire de l'enroulement d'un feuillet de graphène.....	10
Figure I.7 : Nanotube mono-paroi.....	10
Figure I.8 : Les nanotubes de carbone sous un microscope.....	11
Figure I.9 : Paramétrage schématique de la synthèse par arc électrique.....	13
Figure I.10 : Paramétrage schématique de la synthèse par ablation laser.....	14
Figure I.11 : Prévisions d'évolution du marché des nanotubes de carbone de 2012 à 2016.....	19

Chapitre II : généralités sur les nanocomposites

Figure II.1 : Les liaisons entre les atomes dans les polymères	24
Figure II.2 : Représentation d'une chaîne d'un polymère linéaire.....	26
Figure II.3 : Représentation schématique d'un polymère bidimensionnels.....	27
Figure II.4 : Representation shématique d'un polymère tridimensionnel.....	33
Figure II.5 : Définition morphologique de nanocomposites.....	33
Figure II.6 : Elaboration de nanocomposites par voie direct en solution.....	38
Figure II.7 : Modes les plus utilisés pour la réalisation des nanocomposites.....	39
Figure II.8 : Représentation du concept de dispersion et distribution dans les nanocomposites	39

Chapitre III : porosité des poutres et modèles des fondations élastique

FigureIII.1 : Formation des macros et micros porosités en fonction de la vitesse de déplacement du fluide lors de l'imprégnation d'un renfort	46
FigureIII.2 : Différents milieux poreux à base de Titane.....	48
Figure III.3 Modèle de Winkler	49
Figure III.4 Modèle de Winkler (déplacement sous chargement répartie).....	50

III-5 : Modèle de Pasternak (1954) : (a) modèle de base, (b) état de contrainte d'un élément infini ésimal de la couche de cisaillement.....	50
Figure III.6 Modèle de Kerr.....	51
Chapitre IV : Théories des poutres et développement mathématique	
Figure IV.1 La cinématique de la théorie classique des poutres.....	55
Figure IV.2 La cinématique de la théorie de premier ordre des poutres(Timoshenko)...	56
Figure IV.3 Cinématique de la Théorie d'Ordre Elevé.....	57
Figure IV.4 des sections transversales de différents modèles de renforcement.....	60
ChapitreV: résultats et discussion	
Figure V.1 L'effet du paramètre Keer sur la fréquence adimensionnel des poutres en fonction du paramètre Pasternak.....	
Figure V.2: Effet du paramètre β_1 sur les fréquences adimensionnels des poutres CNTRC	69
Figure V.3: Effet du paramètre β_s sur les fréquences adimensionnels des poutres CNTRC	69
Figure V.4: Effet du paramètre β_u sur les fréquences adimensionnels des poutres CNTRC	70
FiguresV.5 la fréquence adimensionnelle d'une poutre O-CNT en fonction d'augmentation de la porosité avec 3 différentes géométries.....	70
FiguresV.6 la fréquence adimensionnelle d'une poutre O-CNT en fonction du rapport L/h pour différent types de fondations avec $V_{cnt}^*=0.12$	71

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre II : généralités sur les nanocomposites

Tableau II.1 : types d'homopolymère..... 25

Tableau II.2 : modes de copolymère..... 26

Chapitre III : porosité des poutres et modèles des fondations élastique

Tableau III.1 Nomenclatures relatives à la tailles des pores..... 44

Tableau III.2: Classification de la porosité selon l'IUPAC..... 45

Chapitre V: résultats et discussion

Tableau V.3 : La liste des valeurs de fréquence adimensionnelle de la poutre pour les différents types de distributions et valeurs du rapport L/h avec et sans fondation..... 67

Tableau V.2 : l'effet de l'augmentation de la porosité sur les fréquences des différentes poutres..... 68

Tableau V.1 : comparaison des différentes fréquences pour différents types des poutres CNTRC..... 68

Liste des notations

LISTE DES NOTATIONS

β : Le coefficient de correction.

A_{11} :Rigidité de membrane.

B_{11} : Rigidité de couplage (membrane-flexion).

β_s et β_c : Facteurs constants de la fondation élastique

D_{11} :Rigidité de flexion.

E_{11} : Module de Young équivalente l'axe longitudinale.

E_{22} : Module de Young équivalente l'axe transversale.

E_{11}^{cnt} : Module de Young de nanotube de carbone suivant l'axe horizontale.

E_{22}^{cnt} :Module de Young de nanotube de carbone suivant l'axe verticale.

f_e : La réaction de la force de fondation.

$f(z)$: Fonction de forme.

G_{12} : Module de cisaillement équivalent.

G_{12}^{cnt} : Module de cisaillement de nanotube de carbone.

h :Epaisseur de la poutre.

K_l :Constante de rigidité winkler.

K_s : Constante de rigidité pasternak.

K_u : Constante de rigidité keer.

L : Longueur de la poutre.

N, M_b, N_s : Les efforts résultants.

t :Le temps.

ϖ : La fréquence adimensionnelle.

ω : La fréquence.

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

$U(x)$:Déplacement axiale de la fibre moyenne.

U_m, W_{bm} et W_{sm} : Des paramètres arbitraires.

δV : La variation virtuelle de l'énergie potentielle.

δK : La variation virtuelle l'énergie cinétique

V_p : Fraction volumique de la matrice polymère.

V_{cnt}^* : Fraction volumique des nanotubes de carbone.

φ_x : La rotation due au cisaillement.

W_b : Composante de la flexion du déplacement transversal long du plan médian de la poutre.

$\gamma_{xz}, \varepsilon_x$: Composantes de déformation.

σ_x : Contrainte normale.

W_s : Composante du cisaillement du déplacement transversal long du plan médian de la poutre.

Q_{ij} : Coefficients de rigidité.

τ_{xz} : Contrainte tangentielle.

G_{12}^{cnt} : Module de cisaillement des nanotubes de carbone.

$\eta_i(1,2,3)$: Les paramètres d'efficacité.

ν : Coefficient de Poisson.

ρ^{cnt} : Masse volumique du nanotube de carbone.

ρ^p : Masse volumique de la matrice polymère.

ν^{cnt} : Coefficient du poisson du nanotube de carbone.

ν^p : Coefficient du poisson de la matrice polymère.

V_{cnt} : Fraction volumique des nanotubes de carbone et de la matrice.

Q_{11}, Q_{55} : Constantes de rigidité.

β : Coefficient de correction.

S_i, M_i : des éléments de la matrice.

Liste des abréviations

Liste des abréviations

Liste des abréviations :

12C, 13C, 14C : les formes de carbone dans la nature.

C60, C70, C80 : Fullirène

C-C: Liaison carbone-carbone.

CNTRC : Poutre de composite renforcée par des nanotubes de carbone.

CCVD : Catalytic Chemical Vapor Deposition

CO: Monoxyde de carbone.

DFT: Density Functional Theory

DP: Degré de polymérisation

DWCNT : Nanotube de carbone bi-paroi.

FSDT: Théorie de premier ordre de déformation de cisaillement (Timoshenko).

HiPCo: High Pressure dismutation of CO.

HRTEM: High-resolution transmission electron microscopy

HSDT : Théorie d'ordre élevé.

MC : Matrice céramique

MD: La dynamique moléculaire.

MET : Microscope électronique à transmission et microscopie à effet tunnel

MFA : Microscopie à force atomique

MM : Mécanique moléculaire.

MWCNT: Nanotube de carbone multi-paroi.

MO : Matrice organique.

NTC: Carbone Nanotube.

PA : le polyamide.

PC : le polycarbonate

PE : Polyéthylène.

PEHD : Polyéthylène A Haute Densité

PET: Poly téréphtalate éthylénique.

PMMA: Poly méthacrylate de méthyle

PLA : poly lactique.

PP : le polypropylène.

PS : le polystyrène

PVA : polyvinylique

PVC: Le polychlorure de vinyle.

CBT: Classical Beam Theory

Sp1, sp2, sp3 : trois formes allotropiques

FSDBT: First Shear déformation Beam Theory

STM: Microscopie à effet tunnel.

SWCNT : Nanotube de carbone mono-paroi

TD : Thermodurcissables

TEM : Microscopie électronique de transmission.

TP : Thermoplastique.

TPa : Terra pascale.

TSDT: Les théories d'ordre élevé et du troisième ordre

Introduction

générale

Introduction générale :

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

Depuis la découverte en 1991 par Sumio Iijima des surprenantes propriétés électriques, mécaniques et thermiques des nanotubes de carbone, le monde scientifique et industriel s'est beaucoup penché sur les différents domaines d'application des nanotubes de carbone. En effet, ce matériau est d'ores et déjà utilisé pour l'élaboration d'alliages et de composites de plus en plus solides (par exemple : les cadres de vélos Peugeot ou les pneus Michelin). Toutefois, ces applications n'exploitent qu'un faible pourcentage du potentiel de ces nanotubes et sont centrées sur leurs caractéristiques mécaniques alors que les propriétés électriques sont tout aussi exceptionnelles.

L'utilisation des NTC dans les matériaux permet d'obtenir des nouveaux composites (nano composites), dans lesquels les charges (NTC) sont organisées à l'échelle du nanomètre. Ces composites présentent un grand intérêt dans différents domaines: renfort mécanique, matériau conducteur, Néanmoins, l'utilisation de NTC dans les composites se heurte à un problème majeur à savoir l'agglomération spontanée des NTC entre eux, ce qui limite leurs propriétés potentielles au sein du matériau.

Ces dernières années, les matériaux à gradients de propriétés ont véritablement envahi le champ de la recherche académique dans le domaine le plus diversifié de la science des matériaux. Les chercheurs touchent à plusieurs axes, se concentrant principalement sur le développement de la théorie et l'élaboration de méthodes analytiques pour analyser la structure

Des pores peuvent apparaître dans les matériaux fonctionnellement gradués (FGM) lors de la fabrication en raison des problèmes techniques qui entraînent des micro-vides dans ces matériaux. Les structures poreuses FG présentent des nombreuses combinaisons intéressantes de propriétés mécaniques.

Les fondations sont modélisées par des ressorts verticaux discrets. Certains chercheurs ont modélisé la fondation à deux paramètres différents ; un de ces modèles est le modèle type Pasternak. Ce deuxième paramètre prend en compte l'effet de l'interaction entre les points de cisaillement dans les fondations.

L'analyse des vibrations est une thématique actuelle importante, tant d'un point de vue académique qu'industrielle et qui touche de nombreux domaines, tels que l'aéronautique, le génie civil, les transports, l'acoustique musicale ou encore le génie nucléaire.

Notre travail est composé de cinq chapitres. Dans le premier chapitre, on donne une vue générale sur les nanotubes de carbone en détaillant leurs propriétés mécaniques, électroniques, chimiques et les différentes techniques de synthèse des nanotubes de carbone. Le second chapitre présentera des généralités sur les nano-composites en détaillant leurs propriétés, leur utilisation et les différentes techniques de mélange (nanotubes de carbone/polymère).

Le chapitre trois a parlé sur la porosité des milieux poreux en général et les causes de l'apparition de la porosité, et les milieux élastiques et trois types de fondation élastique.

Dans le quatrième chapitre on donne les différentes théories et les modèles élastiques des poutres renforcées en se basant sur la théorie raffinée d'ordre élevé et nous utilisons le développement mathématique de la théorie d'ordre élevé pour étudier la vibration libre dans notre poutre poreuse.

Dans le dernier chapitre on a détaillé les résultats obtenus pour l'étude de vibrations libres des poutres poreuses en FG-CNT reposées sur une fondation élastique type Keer.

Ce travail s'achèvera par une conclusion générale qui résume l'ensemble des travaux et permet aussi de revenir sur les résultats importants mis en avant ainsi que des perspectives.

Chapitre I :

GENERALITES SUR LES NANOTUBES DE CARBONE

I.1 INTRODUCTION :

La découverte des nanotubes de carbone (NTCs) par S.Iijima en 1991 a permis d'explorer un nouveau monde à l'échelle nanométrique. Les études sur la synthèse des NTCs durant le début de cette décennie ont apporté une reproductibilité de ces formes allotropiques du carbone. Les propriétés mécaniques et électriques exceptionnelles des NTCs ont éveillé l'esprit des scientifiques afin de concevoir des systèmes touchant le domaine de la nanotechnologie. L'application la plus immédiate des NTCs consiste à les utiliser comme additifs dans des polymères, thermoplastiques, thermodurcissables ou élastomères, afin d'en modifier les propriétés. Ces composites à base de NTCs peuvent être utilisés par l'industrie de la micro-électronique (Infineon, Samsung, Maxwell Technologies..) afin d'améliorer les performances des mémoires par exemple.

Ces améliorations physiques sont : une meilleure dissipation thermique, une rigidité des circuits renforcés et aucune absorption de l'humidité. De la même manière, nous nous attacherons à définir l'apport de NTCs dans des matrices spécifiques à des applications micro-ondes. Une autre possibilité d'utilisation est d'exploiter les propriétés physiques ainsi que la dimension nanométrique des NTCs pour concevoir les futurs dispositifs électroniques infiniment petits.

Depuis quelques années, plusieurs démonstrateurs ont été fabriqués et étudiés tels que les commutateurs nano-mécaniques d'autres nano-électriques et nano-dispositifs pour le stockage de données. Pour des applications micro-ondes, peu de démonstrateurs ont été fabriqués de nos jours, mais ils présentent de fort intérêt pour élaborer les nouveaux MEMS-RF de demain à l'échelle nanométrique (NEMS-RF). Pour la fabrication de tous ces démonstrateurs, deux méthodes sont utilisées pour la manipulation des NTCs. Une méthode consiste à déposer les NTCs sur une surface fonctionnalisée ou d'utiliser un auto-assemblage par électrophorèse. La seconde méthode consiste à synthétiser les NTCs localement dans une orientation verticale ou horizontale. Dans ces deux méthodes, nous verrons qu'elles imposent certaines conceptions pour l'élaboration de NEMS-RF. Avant de développer ces deux thématiques de recherche, nous allons étudier les différentes formes allotropiques du carbone pour arriver au nanotube de carbone et ses propriétés physiques. Puis enfin, nous énumérerons quelques méthodes de fabrication pour synthétiser des NTCs.[S. pacchini 2008]

I.2 Le carbone :

Le carbone est le sixième élément chimique dans l'ordre du tableau périodique et le quatrième élément le plus abondant dans l'univers et dans notre système solaire . Contrairement aux trois premiers éléments :hydrogène ,hélium et lithium ,le carbone ne s'est pas formé durant le big-bang mais dans les étoiles .Au cours de leur vie, les «étoiles produisent de l'hélium à partir de l'hydrogène cet hélium vient s'accumuler en leur cœur et des quantités gigantesques d'hélium sans ainsi produites .lorsque toute la quantité d'hydrogène est épuisé le cœur de l'étoile s'effondre et la température atteint alors 100 millions de degrés. A cette température les atomes d'hélium fusionnent pour donner du béryllium Be_8 en émettant un rayon gamma. Le béryllium 8 n'est pas stable et se décompose en 2 atomes d'hélium.

En Chapitre I Généralités sur les nanotubes de carbone 6 revanche si le béryllium 8 a le temps de réagir avec un troisième atome d'hélium alors il forme un atome de carbone C_{12} stable en émettant un nouveau rayon gamma. Dans la nature le carbone peut également se trouver sous forme de cristaux purs en carbone appelés aussi formes allotropiques. Parmi ces différentes formes, le graphite et le diamant sont les formes cristallines les plus connues. Mais d'autres variétés allotropiques plus rares existent, souvent méconnues. Enfin plus récemment de nouvelles formes allotropiques de carbone ont été synthétisées par l'homme [Viory 2010]

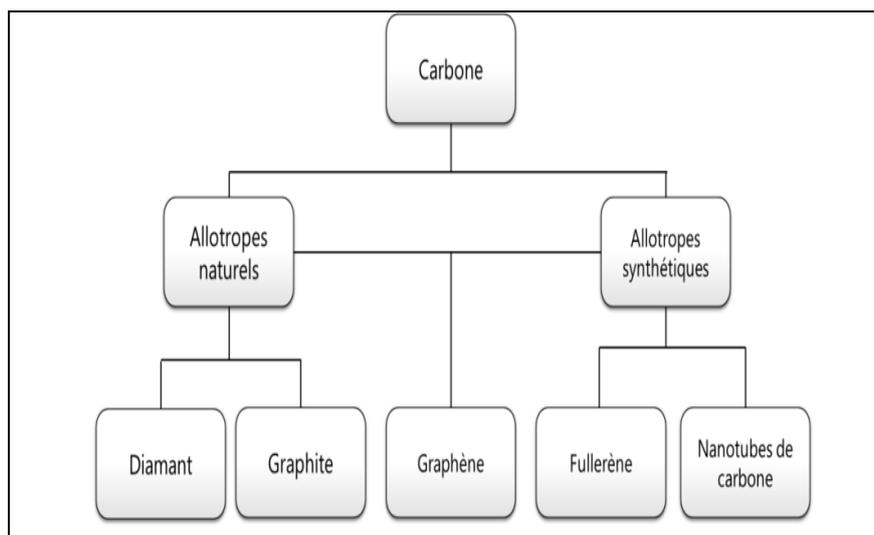


Figure I.1 : Les différentes formes allotropiques du carbone

I.3. Les différentes formes de carbone :**I.3.1 Le diamant :**

Le diamant est la forme la plus compacte du carbone. De manière naturelle, il ne se forme qu'à haute température et haute pression ($> 1000\text{ °C}$ et plusieurs GPa) et n'est, en théorie, stable qu'à haute pression. Cependant, c'est une forme métastable du carbone, ce qui lui permet donc d'exister aux conditions ambiantes. Le diamant possède une structure cubique à faces centrées avec la moitié des sites tétraédriques occupés. Chaque atome est lié à quatre autres atomes de carbone par des liaisons hybridées sp^3 formant ainsi des tétraèdres réguliers. Ainsi, contrairement au cas du graphite, tous les électrons de valence sont impliqués dans les liaisons covalentes. C'est cette structure rigide qui fait du diamant le minéral naturel le plus dur qui soit. [Ben younes, 2016]

**Figure I.2 : diamant purifier****Figure I.3 : diamant pure****I.3.2 Le graphite :**

Le graphite est la forme du carbone thermo dynamiquement stable à température et pression ambiante. Sous sa forme cristallisée, sa structure est lamellaire Elle est constituée d'un empilement de plans dénommés graphènes. Chaque plan est constitué d'un réseau

hexagonal bidimensionnel d'atomes de carbone. Le paramètre de maille est de 0,246 nm pour une distance carbone-carbone de 0,142nm. Dans un plan de graphène les orbitales des atomes de carbones ont hybridées sp^2 et forme nt des liaisons chimiques covalentes. Ces plans sont faiblement liés les uns aux autres, ce qui explique la texture friable et les propriétés de lubrification. No tons que l'énergie des liaisons est élevée, de l'ordre de 310kJ/mol (0,32eV/atome). Le graphite très bien cristallisé n'existe pas dans la nature. A l'état nature les constitué d'un assemblage de micro cristaux dont les plans de graphènes ont plus ou moins aléatoirement orientés. On en trouve sous forme de paillettes dispersées dans des calcaires ou des schistes ou alors en veines et en poches. Si les plans de graphènes ont incurvés et forment des microparticules sphériques on parle alors de noir de carbone. Cette variété de carbone est connue depuis plusieurs millénaires.

Le graphite est étudié pour ses propriétés sribologiques depuis1950. En 1960 Spread borough étudie les propriétés lubrifiantes d'échantillons de graphite.

Il montre que le graphite lubrifie mieux en atmosphère humide .Ce phénomène est dû à l'adsorption d'eau entre les feuillets de graphène réduisant les forces de liaisons inter-feuillets. Le graphite est utilisé comme lubrifiant solide depuis de longues années.[Chauveau 2010].



Figure I.4 :graphite et une de ces formes

I.3.3 Les carbones mal organisé:

Le carbone ne présente pas toujours une organisation cristalline. Des formes de carbone mal organisées peuvent exister. C'est notamment le cas du carbone amorphe. Il s'agit d'un réseau désordonné d'atomes de carbone, présentant des états d'hybridation sp^2 et sp^3 . A l'état désordonné, naturel, le carbone amorphe est rare. Il faut aller le chercher dans les particules présentes dans les couches extérieures de l'atmosphère des étoiles froides, appelées poussières d'étoiles. Et encore, le carbone amorphe n'est présent que dans les poussières d'étoiles carbonées, étoiles particulières à la composition chimique anormale, où le carbone est en quantité supérieure à l'oxygène. Plus proche de nous, le carbone amorphe est synthétisé sous forme de couches minces, obtenues généralement par dépôt plasma.

Il sert de revêtement apportant une tenue mécanique supplémentaire à des pièces industrielles. Dans ce cas, le carbone amorphe n'est jamais pur, mais légèrement hydrogéné. Notons qu'il est facile de synthétiser du carbone amorphe en laboratoire, en paralysant du sucre purifié à 900 °C, en l'absence d'air. Le graphite peut également se rencontrer sous une forme partiellement organisée. Le désordre structural est créé par des défauts d'empilement des plans de graphène, ce qui éloigne la structure de ce graphite des formes ordonnées vues précédemment, en perdant l'ordre orientation et en augmentant la distance inter-feuillets. Pour le différencier des graphites hexagonal et rhomboédrique, on parle de graphite turbostratique. Le noir de carbone, utilisé notamment dans l'encre de chine, ou dans les suspensions de noir de carbone (Carbone Black Suspensions : CBS) est une autre forme de carbone mal organisée. Il est constitué de nanoparticules sphériques carbonées. Ces particules sont constituées de cristallites, de deux à trois plans réticulaires d'épaisseur, d'une structure similaire à celle du graphite. Les cristallites sont liées entre eux par des atomes de carbone non engagés dans les plans cristallins et formant une phase amorphe. Notons que le carbone amorphe est souvent majoritaire. [Izard , 2004]

I.4 Les nouvelles formes du carbone

I.4.1 Fullerène :

Un fullerène est une molécule composée de carbone pouvant prendre une forme rappelant celle d'une sphère, d'un ellipsoïde, d'un tube (appelé nanotube) ou d'un anneau. Les fullerènes sont similaires au graphite, composé de feuilles d'anneaux hexagonaux liés, mais contenant des anneaux pentagonaux et parfois heptagonaux, ce qui empêche la feuille d'être plate. Les

fullerènes ont été découverts en 1985 par Harold Kroto, Robert Curl et Richard Smalley, ce qui leur valut le prix Nobel de chimie en 1996. Premier fullerène découvert, le C₆₀ est composé de 12 pentagones et de 20 hexagones, chaque sommet correspondant à un atome de carbone et chaque côté à une liaison covalente. Il a une structure identique au dôme géodésique ou à un ballon de football. Pour cette raison, il est appelé « buckminster fullerène », en l'honneur de Buckminster Fuller qui a conçu le dôme géodésique, ou « footballène » [Abraham 2006]

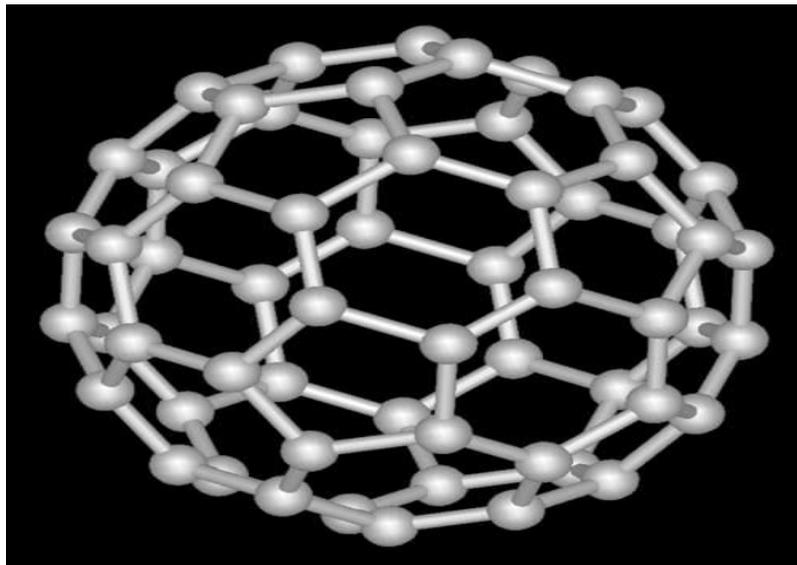


Figure I.5 : la forme de la molécule de fullurène

I.4.2 Graphène :

Le graphène Déjà connu de la communauté scientifique, le graphène est le plan monoatomique de carbone sp² que compose le graphite. Pendant longtemps, le plan de graphène bidimensionnel (2D) isolé est resté un objet théorique, utilisé notamment pour décrire les propriétés des différents matériaux graphitiques. De nombreux scientifiques ont consacré leurs recherches dans l'extraction de feuillets de graphène à partir de graphite. Les premières tentatives ont débuté avec des travaux d'intercalation du graphite, c'est-à-dire d'intercalation de molécules assez grosses pour pouvoir séparer les feuillets de graphène. Les résultats permirent d'établir que les feuillets isolés ne sont pas stables et s'enroulement sur eux même.

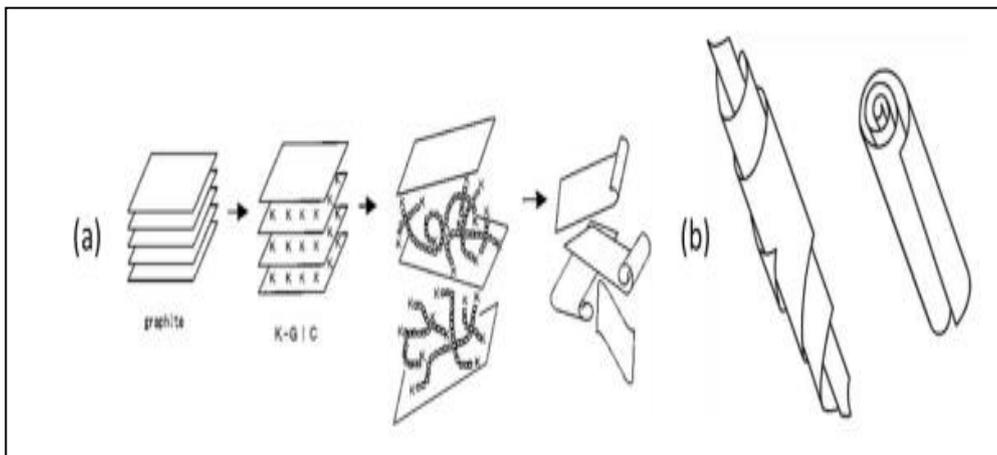


Figure I.6 : diagramme schématisant des composés entre les feuillets de graphène;
(b) image imaginaire de l'enroulement d'un feuillet de graphène

I.5 Les nanotubes de carbone :

Les nanotubes de carbone sont un des allotropes du carbone découverts ces dernières décennies, au côté des fullerènes et du graphène, en complément des structures bien connues du graphite et du diamant. Les nanotubes mono-paroi consistent en une monocouche atomique enroulée sous forme d'un tube de diamètre variant entre 0,4 et 10 nm, de longueur allant de quelques dizaines de nanomètres jusqu'au millimètre, Ce fort rapport d'aspect fait de ces objets un système modèle unidimensionnel. L'intérêt croissant de la communauté scientifique pour ces nano-objets prend son origine dans les premières observations de Iijima en 1991 . Les nanotubes apparaissent alors sous la forme de fagots, avec de multiples parois [Viaila 2014]

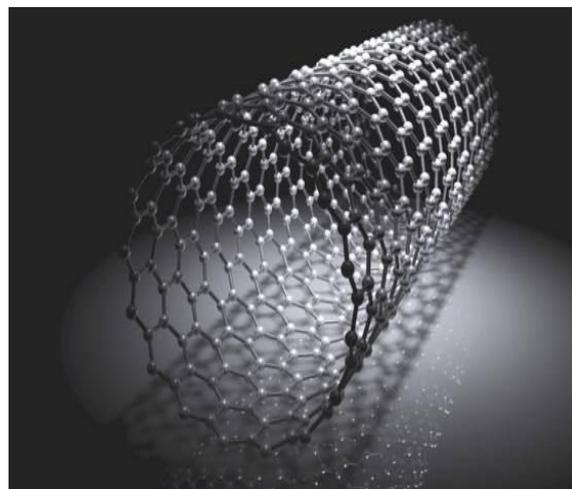


Figure I.7 : nanotube mono-paroi

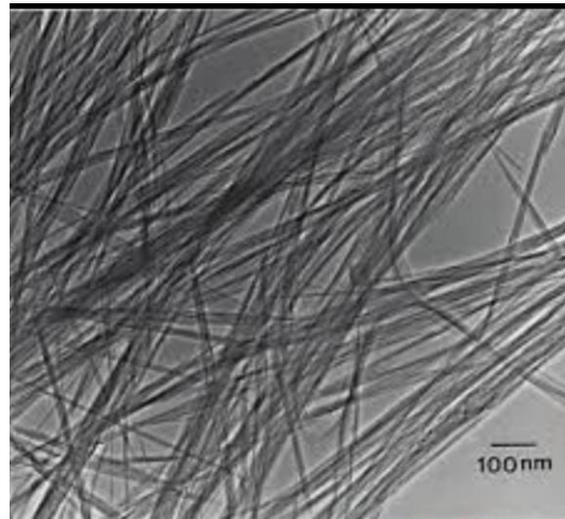


Figure I.8 : les nanotubes de carbone sous un microscope

I.5.1 Différentes familles de nanotubes :

Un nanotube de carbone est simplement un cylindre creux constitué d'un plan unique de graphène enroulé sur lui-même autour d'un axe. Dans cette structure, les atomes de carbone présentent une hybridation sp^2 avec une courbure locale due à l'enroulement, si bien qu'il est généralement admis d'attribuer une hybridation $sp^{2+\epsilon}$ au carbone composant un nanotube de façon à tenir compte de la courbure locale. Chaque atome de carbone est ainsi lié de façon covalente avec trois atomes voisins laissant ainsi un électron dans chaque orbitale p_z perpendiculaire au plan des atomes. Structurellement, les nanotubes sont à la fois des molécules unidimensionnels (1D) et des cristaux.

Ces molécules géantes ont un diamètre de l'ordre du nanomètre et une longueur, pouvant atteindre plusieurs micromètres. Idéalement, un nanotube est fermé à ses deux extrémités par deux demi fullerènes qui apportent chacun six pentagones et une courbure positive nécessaire à la fermeture en accord avec le théorème d'Euler. Une autre manière de concevoir un nanotube est de le considérer comme un fullerène que l'on allonge en y insérant toujours des couches successives d'hexagones, on parle alors de fullerène géant. ces nanotubes peuvent s'organiser en trois grandes familles : (i) Les nanotubes mono-parois ou mono-feuillets isolés (en anglais Single Wall Carbon Nanotubes, SWNT). (ii) Les nanotubes mono-parois organisés en fagots. (iii) les nanotubes multi-parois ou multi-feuillets (en anglais Multi Wall Carbon Nanotubes, MWNT) [Bounour 2016]

I.5.2 Méthodes de synthèse des nanotubes de carbone :

Depuis la découverte des nanotubes de carbone, plusieurs méthodes de synthèse ont été élaborées afin de les préparer. Les trois principales méthodes utilisées sont : l'arc électrique, l'ablation laser et le dépôt chimique en phase vapeur CVD (« Chemical Vapor Deposition »). Les deux premières méthodes sont basées sur l'évaporation du graphite par un arc électrique ou par irradiation laser, respectivement. Les températures impliquées dans ces méthodes sont proches de la température de la sublimation du graphite 3000-4000°C. Ces techniques ont conduit principalement à la formation de MWCNT.

Avec le temps, elles ont permis de produire de SWCNT grâce à l'utilisation de catalyseurs souvent à base des métaux de transition (Co, Fe, Ni). L'avantage de ces méthodes est la possibilité de produire des nanotubes de bonne qualité. Cependant, la synthèse contrôlée sur des substrats ayant des structures de nanotubes ordonnées n'est pas possible par ces méthodes. De plus, plusieurs étapes de purification sont nécessaires afin d'éliminer les catalyseurs et le carbone amorphe. Suite à ces limitations, la synthèse de nanotubes a été réalisée par voie chimique en phase vapeur. La méthode CVD consiste à décomposer un flux gazeux de petites molécules organiques sur des nanoparticules métalliques (Fe, Ni, Co, Mo) dans un four porté à une température comprise entre 600 et 1200°C. Comparée aux méthodes physiques (arc électrique et ablation laser), la CVD permet d'obtenir des nanotubes alignés ou localisés à un endroit précis du substrat, de même que des poudres. La majorité des nanotubes commerciaux comme par exemple les MWCNT Nano cyl, les SWCNT HiPcO, CoMoCat et les nanotubes de carbones verticalement alignés (VACNT) développés par la start-up Nawa Technologies issue du CEA, sont synthétisés *via* cette méthode [Hanin 2021]

I.5.2.1 L'arc électrique :

La méthode de l'arc électrique, initialement utilisée pour la synthèse des fullerènes, consiste à générer une décharge électrique entre deux électrodes cylindriques de graphite placées dans une enceinte sous atmosphère inerte (argon ou hélium). Un plasma contenant les espèces carbonées d'une température avoisinant les 6000°C se forme et vient se condenser au niveau de la cathode (**Figure I.9**). En 1991, Ijima étudie ces espèces et démontre la présence de nanotubes de carbone [ijima 1991].

Ces derniers sont composés de multi-parois de grand diamètre. Plusieurs facteurs (distance entre les deux électrodes, pression au sein de l'enceinte, l'uniformité du plasma ainsi que sa

température) peuvent influencer sur la qualité et le rendement des nanotubes obtenus. Cette méthode peut également se faire avec un catalyseur métallique [Zhang 2008]

Journet et al démontrent ainsi que l'addition de catalyseurs à base de nickel cobalt ou nickel-Yttrium à l'anode, permet la production de nanotubes mono-paroi avec un rendement estimé entre 70 et 90 % [Journet 1997]. Ces études mettent en lumière l'importance de l'ajout de catalyseur lors de la croissance sélective des nanotubes mono-paroi par rapport aux multiparois. En revanche, l'ajout de catalyseur est aussi un inconvénient. En effet, les nanotubes produits contiennent des particules de catalyseur métallique et ne sont pas désirées pour certaines applications. Des traitements acides peuvent éliminer ces particules mais entraînent alors l'apparition de défauts à la surface de nanotubes [Chiang 2001]

Le groupe d'Ishigami développe un procédé de synthèse par arc électrique sous flux d'azote liquide, permettant la synthèse de nanotubes multi-parois sans défauts [Ishigami 2000]

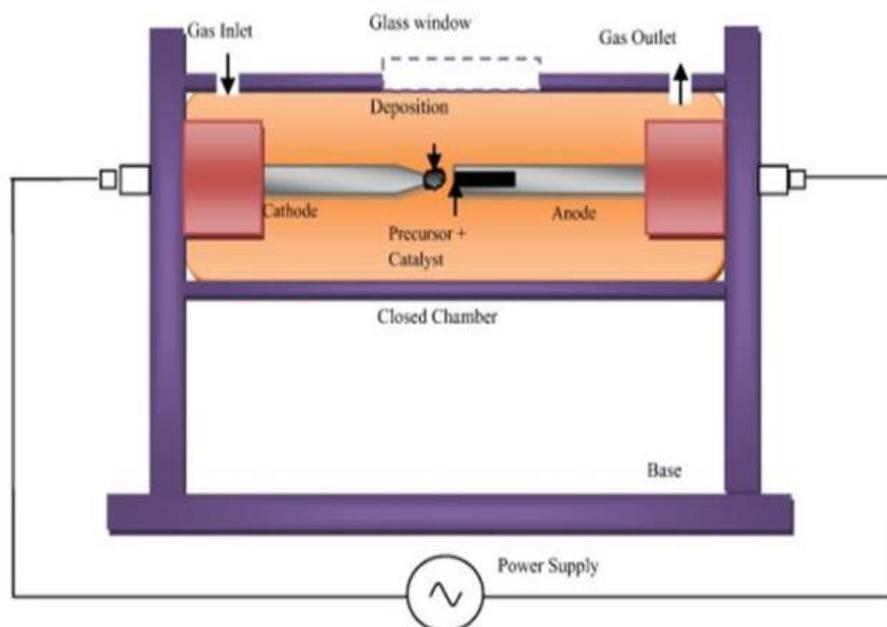


Figure I.9 : Paramétrage schématique de la synthèse par arc électrique [Arora 2014]

I.5.2.2 L'ablation laser :

L'ablation laser est la deuxième méthode à haute température. Initialement décrite par le groupe de Smalley, elle consiste en la vaporisation de la source carbonée par irradiation avec

un laser de haute puissance dans une atmosphère inerte. Le graphite est placé dans un tube en quartz sous température contrôlée dans un four tubulaire. Une fois le tube mis sous vide, la température augmente jusqu'à 1200°C puis est rempli d'un gaz inerte (hélium ou argon). Le laser balaye la surface du graphite tout en le vaporisant, ce qui forme les nanotubes de carbone [figure I.10]. Durant ce procédé, il est possible de former des nanotubes multi-paroi sans catalyseurs avec des rendements significatifs. Pour les mono -paroi dopant le graphite utilisé avec des catalyseurs de cobalt ou de nickel. Par ce procédé, les nanotubes mono-paroi sont synthétisés en bonne quantité (1 à 10 g) et présentent moins d'impuretés et de défauts [Beloulou 2020]

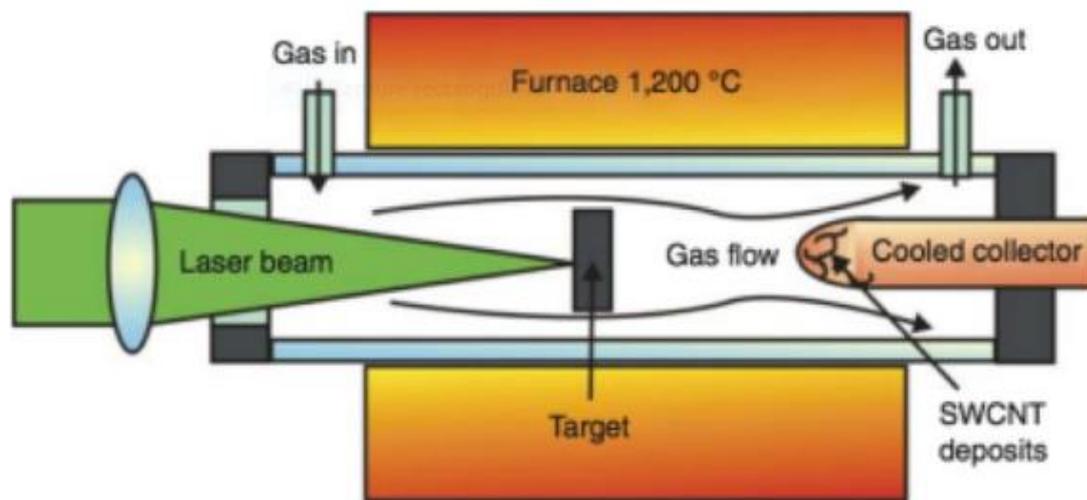


Figure I.10 : Paramétrage schématique de la synthèse par ablation laser

Bien que très utilisées dans les années 1990, ces deux méthodes voient leur popularité décliner au profit de méthodes pour lesquelles les conditions de synthèse sont plus aisées à contrôler.

A ce jour, l'entreprise Carbone Solutions, Inc produit des nanotubes de carbone par l'intermédiaire de l'arc électrique mais aucune source commerciale n'utilise l'ablation laser. [Beloulou 2020]

I.6 Purification des nanotubes :

Les méthodes de synthèse des NTC mentionnées ci-dessus rencontrent certaines impuretés, telles que des fullerènes plus petits, des feuilles de graphite enveloppées, des particules de catalyseur métallique et des contaminations de carbone amorphe. On observe que le

pourcentage de ces impuretés augmente généralement à mesure que le diamètre des NTC s'accroît. Il est donc important de se débarrasser de ces impuretés pour obtenir des NTC distribués de manière homogène dans les polymères ou les milieux de dispersion en raison de leur effet substantiel sur les propriétés électromécaniques des NTC, interférant avec les applications attendues. Il est donc inévitable d'appliquer certaines techniques de purification pour obtenir des NTC purs présentant de meilleures caractéristiques électriques et mécaniques. En raison de la nature insoluble des NTC, il est très difficile d'utiliser la chromatographie liquide pour se débarrasser de ces impuretés.

En outre, un certain nombre de groupes à travers le monde se contentent de caractériser les nanotubes de carbone synthétisés commercialement et ne disposent pas d'installations pour les cultiver. Grâce à l'application de différentes techniques analytiques telles que le Raman, la microscopie électronique à balayage (MEB) et la microscopie électronique à transmission (MET), même les SWCNT ont montré des parois doubles, triples et multiples dans un seul échantillon, ainsi que la présence des impuretés susmentionnées. On ne peut donc pas se fier aux spécifications fournies par les différentes entreprises. Soumis à ces diverses caractérisations analytiques et impuretés, les chercheurs ont appliqué diverses techniques de purification, ce qui a entraîné une perte significative de NTC. Il a également été observé que l'utilisation d'un traitement acide ou d'agents tensioactifs pouvait entraîner l'activation de la surface des NTC, ce qui modifiait considérablement leurs propriétés souhaitées.

En fonction de la nature de la structure (monoparoie ou multiparoie), du processus de croissance et des catalyseurs métalliques, diverses techniques de purification telles que les voies mécaniques, chimiques et physiques permettent d'obtenir des nanotubes de carbone dispersés en excluant le plus possible les impuretés. Les méthodes chimiques permettent de faire varier l'énergie de surface en introduisant une fonctionnalisation des nanotubes de carbone. Cela améliore la mouillabilité et l'adhésion des nanotubes de carbone au milieu cible du polymère et, par conséquent, la tendance à l'agglomération diminue. Mais l'utilisation d'acides peut détériorer la qualité structurelle des NTC et leur conférer des propriétés physiques indésirables.

La voie chimique de purification produit des NTC très purs mais fragiles aux défauts structurels et aux pertes de produits. Toutefois, il est possible d'obtenir des NTC d'une plus grande pureté en éliminant les particules métalliques du catalyseur dans le cadre d'une réaction contrôlée. Les méthodes physiques sont intéressantes en raison de la possibilité

d'adsorption d'une variété de groupes fonctionnels, laissant derrière eux une structure de graphène pi (π) similaire, et sont mises en œuvre lorsqu'une fraction pondérale plus élevée de NTC est souhaitée. La méthode physique sépare les produits de rendement en fonction de la taille des NTC Méthodes physiques. Ces méthodes causent peu de dommages et sont plus complexes et moins efficaces que les méthodes chimiques. [Syed Awais 2021]

I.7 Propriétés des nanotubes de carbone :

Les NTC présentent une structure et des propriétés uniques. L'estimation de leurs propriétés mécaniques, électriques et thermiques nécessite des observations et analyses à l'échelle nanométrique.

I.7 .1 Propriétés mécanique :

La liaison C-C du graphite est une liaison chimique forte. L'énergie de dissociation de cette liaison est en et de 348 kJ.mol^{-1} . C'est la raison pour laquelle les bres (et notamment les nanotubes) ont des propriétés mécaniques uniques. Depuis leur découverte, de nombreux travaux théoriques ont prévu un module d'Young¹ très élevé pour les nanotubes. Lu, en utilisant un modèle empirique prévoit un module d'Young [Charlotte BERNARD2007]

I.7 .2 Propriétés électrique:

Le graphène, tout comme les NTC, présente une conduction balistique : les électrons sont transportés sans diffusion à travers le matériau. Associée à une très haute conductivité thermique, cette caractéristique leur permet de supporter de très hautes densités de courant, jusqu'à $10^{13} \text{ A. m}^{-2}$ soit 1000 fois plus que le cuivre, sans dissipation excessive de chaleur [Wei 2001].

Dans les cas les plus favorables, la conductivité électrique des NTC est similaire à celle du cuivre, quel que soit le nombre de tubes ou l'enroulement .Ainsi les NTC sont des candidats sérieusement étudiés pour entrer dans la composition d'émetteurs à effet de champ ou de dissipateurs de charges électrostatiques [Yang 2004]. D'où, par exemple, l'intérêt particulier porté aux NTC par les professionnels de l'industrie électronique. Les SWNT présentent une conductivité électrique qui peut atteindre $10^8 \Omega^{-1} .\text{m}^{-1}$

Cependant, les calculs théoriques montrent que les propriétés électroniques des NTC sont très dépendantes de leur géométrie [Dresselhaus 2005]. Les SWNT peuvent avoir les

propriétés électriques de semi-conducteurs ou de métaux, selon la chiralité du tube. Celle-ci peut être définie suivant la relation : $n - m = 3i$, qui prédit que le SWNT sera conducteur si i est un entier. Dans tous les autres cas, le SWNT présentera un comportement semi-conducteur

I.7 .3 Propriétés thermiques :

Les prédictions théoriques indiquent que les NTC ont une excellente conductivité thermique, de $3000 \text{ W.m}^{-1} .\text{K}^{-1}$, supérieure à celle du diamant et du graphite. De plus, ils présentent une excellente stabilité thermique et une expansion thermique négligeable. Ainsi, les NTC pourraient entrer dans la fabrication des circuits intégrés pour jouer le rôle de dissipateurs thermiques.[Versa Vaud 2012]

I.7 .4 Propriétés chimiques :

Les NTC possèdent des propriétés chimiques très intéressantes en vue d'applications pratiques [Houdy,2001].

- Comme les NTC ont tendance à exister en faisceaux ou fagots plutôt qu'en tubes individuels, en raison des fortes interactions de van der Waals, ils sont insolubles dans la plupart des milieux organiques et dans l'eau, ce qui limite leur gamme d'applications [Neelgund 2011].

Pour rendre les NTC plus facilement dispersibles (solubles) dans divers milieux, il est nécessaire d'attacher physiquement ou chimiquement certaines molécules, ou groupes fonctionnels, à leurs parois latérales sans modifier de manière significative leurs propriétés. Ce processus est appelé fonctionnalisation. Il existe diverses méthodes pour créer à la surface des NTC des sites actifs où pourront se greffer des molécules (par exemple). Comme méthode de création de ces sites, on peut citer l'irradiation par un faisceau électronique de la surface.

- On peut aussi intercaler des atomes (ou des molécules) entre les nanotubes mono-feuillets d'un faisceau (intercalation inter-tubulaire) ou entre les différentes parois d'un nanotube multi feuillets (intercalation inter-planaire) afin de contrôler, par exemple, les propriétés électroniques des NTC semi- conducteurs .

- Le NTC peut être considéré comme un «nano fil» creux qu'il est possible de remplir par capillarité. On peut ainsi encapsuler à l'intérieur du nanotube des métaux.

Ou bien des macromolécules comme des fullerènes. Ces structures à base de fullerène appelées «peapods» ont été observées la première fois par Smith et al. Des métallofullerènes³ peuvent être aussi encapsulés dans les SWNT. De nombreux métaux (le plus souvent des terres rares) peuvent être ainsi isolés à l'état atomique et arrangés sous la forme d'une chaîne [Suenaga 2000]

Des calculs ont montré que la surface spécifique des NTC est relativement élevée et peut varier entre 50 et 1315 pour les MWCNT, dépendant du nombre de parois [Peigney2001].

La valeur maximale calculée dans l'étude est relative à un SWCNT fermé aux deux extrémités. D'autres études théoriques comme celle de Yin et al. [Yin (1999)] prévoient une surface spécifique de l'ordre de 3200 pour un ensemble de quatre SWCNT (de diamètre 3 nm) disposés aux sommets d'un carré de côté 0,4 nm et tous ouverts aux deux extrémités.

I.8 Dispersion des nanotubes :

Afin d'élaborer des matériaux ou des dispositifs, il est nécessaire de mettre en forme les NTC, soit en les introduisant dans des matrices de nature différente, soit en les disposant sur des dispositifs variés (électrodes, substrats particuliers, ...). Pour cela, et afin de les individualiser pour obtenir une distribution la plus homogène possible dans le matériau ou le dispositif final, il est nécessaire de s'affranchir de leur organisation initiale (enchevêtrée ou alignée). Ainsi, une étape préalablement nécessaire à la mise en forme de ces nano-objets est la dispersion, qui est très fréquemment utilisée et qui consiste à individualiser les NTC dans un milieu liquide afin d'obtenir une suspension homogène et stable dans le temps. De par leur structure graphitique, les NTC présentent une caractéristique hydrophobe les rendant non miscibles avec la plupart des solvants polaires tels que l'eau. L'obtention de suspensions stables et homogènes passe par deux étapes étroitement liées : l'application d'énergies mécaniques au système pour individualiser et vaincre les interactions de Van der Waals existant entre NTC, ainsi que la modification de leur surface pour les rendre miscibles dans le milieu liquide et les maintenir individuels dans le temps. La plupart des études menées dans ce domaine traitent de la dispersion de NTC initialement sous forme enchevêtrés et donc non alignés.[Debski 2014]

I.9 Le marché de nanotubes :

Les nanotubes de carbone dans le marché: Plus de 100 entreprises produisaient, en 2012, des nanotubes de carbone. On en attend 100 de plus d'ici 2017. Si l'on considère les capacités de production, le pôle Asie-Pacifique représente le premier pôle (44,2 %) suivi par l'Amérique du nord (29,2 %) et L'Union Européenne (24 %) [Maxime, 2013]. De la même façon, on recense plus de 1000 entreprises, laboratoires ou autres institutions directement impliqués dans la recherche et le développement liés aux nanotubes de carbone. De ce fait, le marché des nanotubes de carbone est oligopolistique avec de gros producteurs qui fournissent de nombreux secteurs d'activité (industries des polymères et des composites ainsi que les marchés de l'électronique et de l'énergie notamment) [Maxime ,2013].

Ces nanoparticules représentent 28 % du marché des nanomatériaux avec un chiffre d'affaire proche des 700 millions de dollars pour l'année 2010(630 pour les MWNT et 40 pour les SWNT). Un milliard de dollars devrait en théorie être atteint en 2015-2016

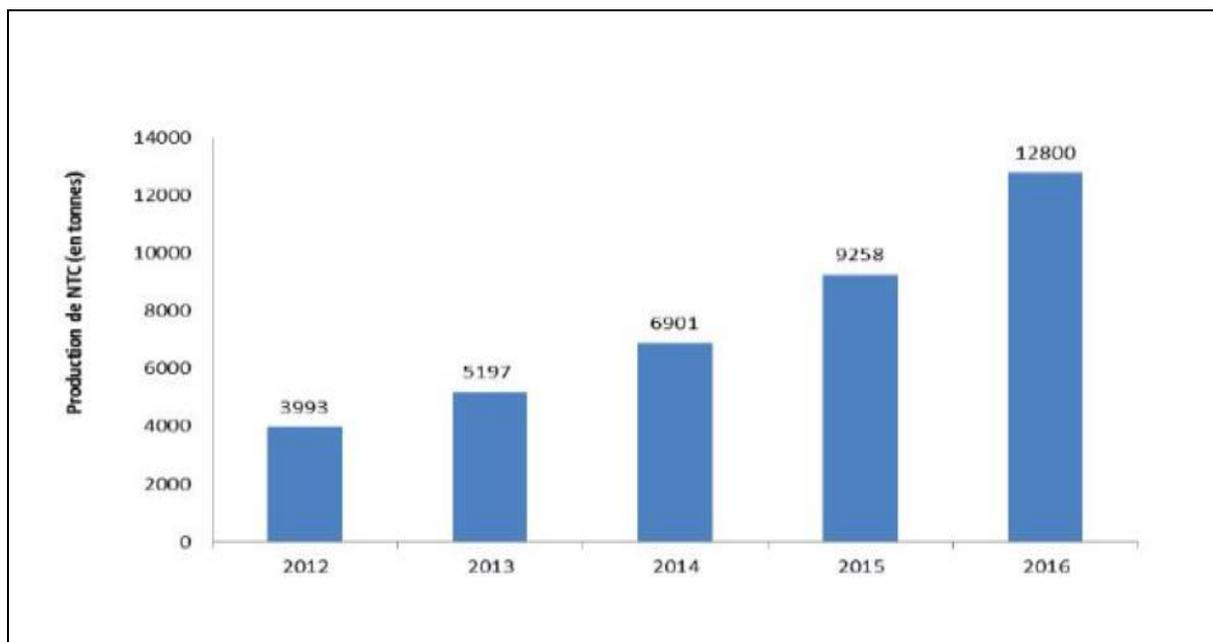


Figure I .11 :Prévisions d'évolution du marché des nanotubes de carbone de 2012 à 2016

Le prix des nanotubes devrait chuter de 15 % d'ici quatre à cinq ans car les plus importants sites de production commencent à produire ces nanotubes à l'échelle industrielle et même pour certains à augmenter leur capacité de production (Maxime, 2013). Les principales applications actuelles et à venir des nanotubes de carbone concernent donc les applications

mécaniques en tant que renfort dans les matériaux composites, les applications électroniques (grâce à leur conductivité électrique), le domaine de l'énergie (grâce à leur grande surface spécifiques notamment). [Tagrara 2017]

I.10 Domaines d'application de nanotubes de carbones :

Du fait de leur dimension nanométrique et leurs propriétés spécifiques et exceptionnelles font des nanotubes de carbone des matériaux très intéressants du point de vue des applications et ouvrent de nombreuses perspectives.

L'application la plus directe envisagée consiste à les utiliser comme additif pour les polymères (thermo plastiques, thermodurcissables et élastomères) à condition d'assurer leur bonne dispersion dans le composite, Il est peut être utile pour améliorer certains propriétés thermique, électrique, mécanique ou multifonctionnelle [Myriam, 2008].

Il est utilisé dans les fabrications suivantes : [Régis, 2006 ; Bernard, 2007 ; Myriam, 2008]

- Des nano-composants ou nano-composite électroniques (diodes, des transistors à un électron, etc.), excellents émetteurs d'électrons sous faible champ.

Les articles de sport (vélos, raquettes de tennis...etc.).

- La médecine : employée comme muscles artificiels.

- dans l'automobile (peintures conductrices évitant l'emploi de solvants polaires), et L'industrie des Batteries à cause du stockage important de quantité d'hydrogène.

- L'aéronautique et la défense et marines (ailes d'avions, trains d'atterrissage des hélicoptères, etc.).

- Améliorations des propriétés mécaniques de pièces diverses (élasticités, résistance à la traction, à la fracture et à l'indentation).

- Dans les ouvrages de génie civil : des piles et colonnes de pont, des câbles pour ponts, remplacement des parties de pont détériorés (tablier et piles), dans les nouvelles structures de pont et tuyauteries anti corrosion.

Comme déjà montré ci-dessus et vu son échelle nanométrique, le nanotube de carbone est utilisé comme un renfort associé généralement à une matrice de type polymère pour donner un matériau d'une grande échelle, résistant et rentable. La matrice de notre nano composite considéré dans ce travail sera un polymère. Elle représente le milieu élastique, pour cela, Il

nous a apparu donc important de faire par la suite un aperçu générale sur les matrices en particulier de type polymère.[Belmahi,2019]

I.11 Conclusion :

Dans ce chapitre ,nous avons donné une généralité sur les nanotubes de carbone et détaillé quelques exemples de méthodes de synthèses des nanotubes de carbone en nous attachant à faire ressortir les avantages et les inconvénients de chacune d'entre elles .nous avons aussi étudié la structure géométrique des nanotubes de carbone mono-paroi et multicouches ,ensuite ,nous avons donné leur propriété très intéressantes .Tel que les propriétés mécanique électrique, électronique et thermique qui dépassant les matériaux existant et donc pouvant révolutionner grâce à leur applications de nombreux domaines existant.

Chapitre II :

Généralités sur Les
nano-composites

II.1 Introduction :

Depuis leur découverte, les nanotubes de carbone (NTC) sont considérés comme une fascinante réalisation de l'homme. Ces matériaux légers présentent un grand rapport d'aspect et sont dotés d'incroyables propriétés mécaniques, ainsi que d'une grande flexibilité et d'une conductivité électrique élevée, ce qui leur a valu d'être activement étudiés au cours de la dernière décennie dans le cadre d'applications dans notre domaine. Pour exploiter leurs attributs endogènes, il devient crucial de composer les NTC avec des polymères techniques (par exemple, thermoplastiques, élastomères, polymères conjugués) ou des polymères naturels pour obtenir des nanocomposites présentant des avantages accrus.

Dans ce chapitre, nous donnons un aperçu générale sur la structure polymère on verra la transition du composite au nanocomposite et en parle sur les Nanocomposites et leurs classification Plus particulièrement on s'intéressera aux nanocomposite à matrice polymère et a renforts de (NTC).

II.2 Généralités sur la structure des polymères :

Les matériaux polymères sont utilisés pour leurs propriétés mécaniques et leurs Aptitudes à être facilement mis en forme. Ces qualités sont liées à la structure qui se décline à différents niveaux : de l'agencement des différents atomes et groupes d'atomes qui constituent la molécule de polymère (macromolécule) jusqu'à celui du matériau constituant l'objet final. Le terme générique de matière plastique ne désigne pas un matériau unique.

La structure de la macromolécule est définie par la composition chimique du monomère, la disposition des atomes et des liaisons, l'ordre d'enchaînement et les aspects topologiques (l'architecture). En général, les polymères sont formés à partir des 9 éléments chimiques suivant:

le carbone, l'hydrogène, l'azote, l'oxygène, le fluor, le silicium, le phosphore, le soufre et le chlore. L'unité de base de ces chaînes est Les monomères, ces macromolécules, et donc par extension les matières plastiques, sont également appelés polymères (poly = plusieurs). La définition d'un polymère est : Produit constitué de molécules caractérisées par un grand nombre de répétitions d'une ou de plusieurs espèces d'atomes ou de groupes d'atomes (motifs constitutionnels) reliés entre eux en quantité suffisante pour conduire à un ensemble de propriétés qui ne varient pratiquement pas avec l'addition ou l'élimination d'un seul ou d'un petit nombre de motifs constitutionnels.[REACH 2011]

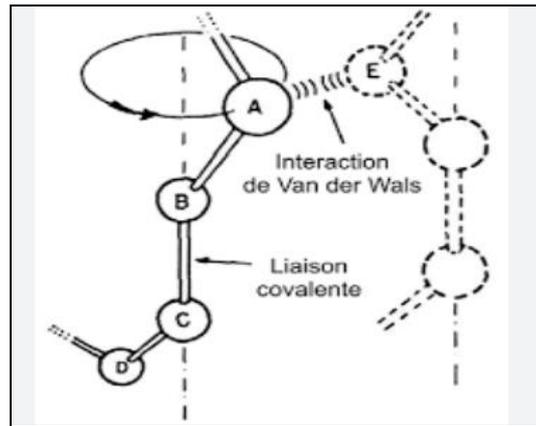


figure II.1 : les liaisons entre les atomes dans les polymères

II.3 Classification des polymères : Il existe plusieurs modes de classification des polymères que peuvent être classés selon divers critères :

II.3.1 Selon l'origine : Les polymères classés selon l'origine peuvent être:

II.3.1.1 Les polymères naturels :

À côté des polymères synthétiques, la nature offre une vaste gamme de polymères aussi bien dans le règne animal que végétal. Outre le caoutchouc naturel, nous avons les polysaccharides qui sont des composés de la classe des holosides et qu'on retrouve chez tous les êtres vivants. Ils peuvent être linéaires (cellulose) au ramifiés (gomme arabique).

De par leur structure macromoléculaire, nous classons aussi comme polymères naturels, les protéines fibreuses de la soie, l'insuline, l'hémoglobine, les kératines (cheveux, poils), la laine. Certains de ces polymères comme l'insuline sont déjà obtenus par synthèse: Protéines , Acides nucléiques , Enzymes , Celluloses et Caoutchouc naturel

II.3.1.2 Les polymères artificiels :

Les polymères artificiels Sont obtenue par modification chimique de polymères naturels de façon à transformer certaines de leurs propriétés.

II.3.1.3 Des polymères synthétiques:

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

de celles des polymères naturels. : [Tomalia 2001].Plastiques, Caoutchoucs et élastomères, Fibres ,Peintures et Adhésifs

II.3.2 selon l'architecture :

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

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

II.3.3 selon la structure chimique :

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

II.3.3.1 Les homopolymères :

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

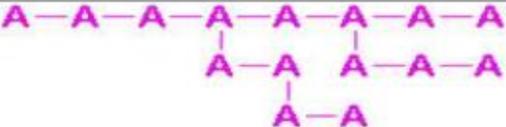
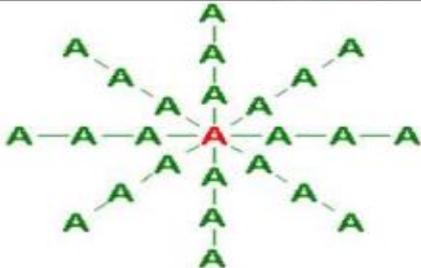
Types	Formes
les homopolymères linéaires.	
les homopolymères branchés.	
Les homopolymères étoilés	

Tableau II.1 : types d'homopolymère

II.3.3.2 Les copolymères:

Les copolymères sont des polymères qui possèdent plusieurs unités. Comme pour les homopolymères,

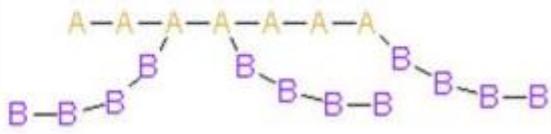
Mode	Forme
le mode statistique.	A-A-B-A-B-B-B-B-A-A-B-A
le mode alterné.	A-B-A-B-A-B-A-B-A-B-A
le mode séquencé.	A-A-A-A-A-A-B-B-B-B-B-B-B
le mode greffé	

Tableau II.2 : modes de copolymère

II.3.3 Selon leur structure :

II.3.3.1 Les polymères linéaires ou monodimensionnels :

Pour lesquels chaque chaîne macromoléculaire est constituée d'un nombre éventuellement élevé mais fini d'unités monomères; de tels systèmes correspondent à la polymérisation de monomères bivalents et une macromolécule linéaire peut être très schématiquement représentée par un trait continu divisé en intervalles figurant chacun une unité monomère (figure II.4).

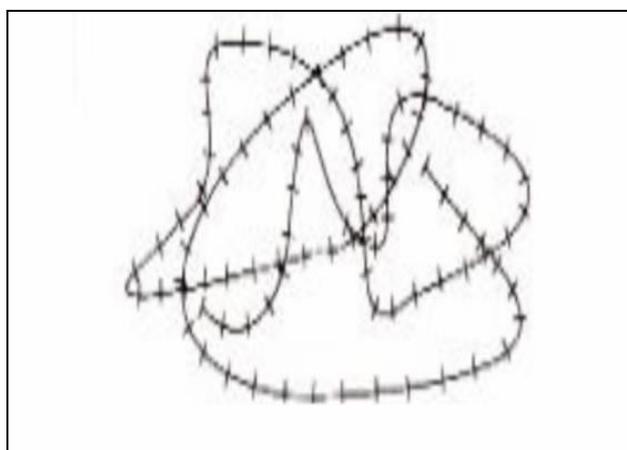


Figure II.2 : représentation d'une chaîne d'un polymère linéaire

II.3.3.2 Les polymères bidimensionnels :

Dont certains peuvent être produits par la nature (carbone graphite, kératine...); dans le domaine des polymères synthétiques ce sont encore des curiosités de laboratoire. Ils se présentent sous la forme de feuillets bidimensionnels, d'épaisseur comparable à celle des molécules simples (figure II.3)

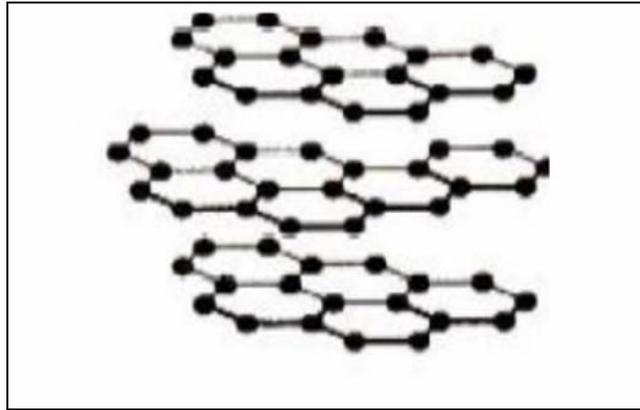


Figure II.3 : Représentation schématique d'un polymère bidimensionnels

II.3.3.3 Les polymères tridimensionnels :

Qui résultent de la polymérisation de monomères dont la valence moyenne est supérieure à deux ou encore de la réticulation (formation d'un réseau tridimensionnel), par voie physique ou chimique, de polymères linéaires. Leur dimension moléculaire peut être considérée comme infinie puisque toutes les unités monomères constitutives d'un objet sont liées de façon covalente pour former une seule macromolécule. Les liaisons se développent dans les trois dimensions et un élément de volume d'un tel système peut être représenté sur la figure II.4 [hachani 2017]

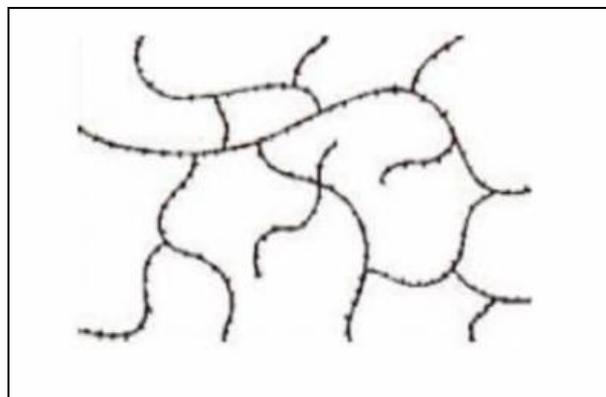


Figure II.4 : représentation schématique d'un polymère tridimensionnel

II.3.4 Selon leur comportement thermique :

II.3.4.1 Les thermoplastiques

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

L'intérêt des thermoplastiques réside dans leur faible coût, résultant à la fois de matières premières disponibles et des procédés de fabrication. Toutefois, ce faible coût est lié à des propriétés mécaniques et thermomécaniques faibles. Cependant, ils possèdent la propriété de pouvoir être mis en forme plusieurs fois par chauffage et refroidissement successifs. Ils peuvent donc être récupérés et facilement recyclés [Tagrara 2016]

II.3.4.2 Les élastomères :

Un élastomère est un polymère constitué de chaînes longues et flexibles qui possède l'impressionnante faculté de pouvoir supporter de très grandes déformations. Il se caractérise aussi par le quasi recouvrement de ses propriétés initiales quand la sollicitation cesse. La recouvrement est rendue possible par la vulcanisation qui est un processus de création de liaisons chimiques entre les chaînes macromoléculaires, celles-ci formant alors un réseau tridimensionnel stable.[kal 2014]

II.3.4.3 Les thermodurcissables

Les résines thermodurcissables sont des matières plastiques qui, au cours de leur mise en œuvre, subissent une transformation irréversible : d'un état généralement liquide ou pâteux, elles passent, par un traitement approprié (action de chaleur, ou d'un agent chimique durcisseur) à un état solide permanent. Ce traitement s'appelle polymérisation ou réticulation (durcissement). Exemple : résines phénol/formol ; bakélite, galalithe...

II.4 Classification suivant les propriétés :

Il existe trois grandes familles de polymères suivant leurs propriétés des matériaux

- 1-Les polymères métalliques
- 2-les polymères céramiques
- 3-les polymères organiques

Les matrices jouent un rôle très important au sein des matériaux composites. Elles assurent définitivement la qualité de la cohésion du composite. Une matrice organique est formée par un ou plusieurs polymères. Ces derniers se subdivisent en deux grandes familles, à savoir les thermoplastiques (polypropylène PP, polyéthylène PE, polychlorure de vinyle PVC) et les thermodurcissables (époxy, polyuréthane PU, colles phénoliques). Ces familles se différencient entre elles, outre leurs propriétés chimiques, thermiques et mécaniques, par les méthodes de mise en œuvre ainsi que les propriétés obtenues dans les composites. [Vézeau 2010] Après leur mise en œuvre, les thermodurcissables et les thermoplastiques forment un réseau tridimensionnel. Cependant, ils possèdent bel et bien des comportements différents à l'échelle moléculaire. En effet, à l'intérieur de ce réseau, les molécules sont associées entre elles par des réticulations chez les thermodurcissables, tandis que chez les thermoplastiques, elles ne sont pas réticulées; elles sont donc soit linéaires, ou alors linéaires ramifiées.

Ces différences de structure moléculaire font en sorte que les thermodurcissables acquièrent généralement une très haute résistance thermique, cependant, ils se retrouvent nettement moins résistants à l'impact. Les thermodurcissables enveloppent une très grande partie des composites à matrice organique, et ce, grâce à leur faible viscosité (avant réticulation) qui rend plus efficace le recouvrement des fibres. Par contre, une bonne maîtrise de l'étape de réticulation est requise afin de faciliter la mise en œuvre, sachant que cette dernière a lieu lors de la mise en œuvre. Les thermoplastiques quant à eux, possèdent la capacité d'être remis en forme une fois que la température requise est atteinte. [Vézeau 2010]

II.5 Propriétés des polymères :**II.5.1 Propriétés mécaniques :**

Les propriétés mécaniques des polymères décrivent leur comportement vis-à-vis des sollicitations mécaniques telles que pressions, étirements, torsion, frottement, chocs et effet de pesanteur.

II.5.1.1 Contrainte au seuil d'écoulement :

Elle est définie comme la contrainte en traction pour laquelle la pente de la courbe (σ - ϵ) s'annule pour la première fois.

II.5.1.2 Résistance en traction:

Elle caractérise, comme son nom l'indique la contrainte maximale supportée par l'éprouvette pendant l'essai de traction

II.5.1.3 Contrainte à x% d'allongement σ_x :

Définie comme la contrainte en traction pour laquelle la courbe (σ - ϵ) est décalée, par rapport à la courbe initialement linéaire, d'une distance correspondante à un allongement $\Delta\epsilon_x$ % . Elle est déterminée à la rupture de l'éprouvette (quand il n'y a pas de seuil d'écoulement et donc de contrainte correspondante ou qu'il n'est pas possible de déterminer la contrainte à x % d'allongement)

II.5.1.4 La résistance en flexion:

Elle est calculée selon des normes et pour les thermoplastiques ductiles

II.5.1.5 La résistance en compression

Elle est mesurée sur des petites éprouvettes d'essai, pour limiter le risque de flambage, il est important de noter que la présence d'entailles et de petites fissures est moins importante dans ce type d'essai que dans l'essai de traction, puisque ces défauts morphologiques peuvent se fermer sous l'effet de pression. Pour cette raison, la résistance en compression des matériaux polymères est généralement plus élevée que la résistance en traction.

La résistance en cisaillement peut être déterminée à partir des éprouvettes cylindriques, soumises à une sollicitation de torsion. Les déformations non homogènes des éprouvettes sont à éviter pendant l'essai.

II.5.1.6 La résistance en cisaillement :

La résistance en cisaillement est généralement mieux définie à partir de la résistance en traction, en utilisant le critère de déformation de "Haber Von Mises Henky" $T = 0,58 \sigma$ On peut en général appliquer le classement suivant :

Résistance en cisaillement < Résistance en traction Résistance en compression << Résistance en flexion.

II.5.2 Propriétés optiques :

Les plastiques diffèrent par leur capacité à transmettre la lumière. Certains plastiques sont transparents, proposant des propriétés optiques similaires à celles du verre. D'autres sont opaques et ne laissent passer aucune lumière. Les plastiques translucides laissent passer un

peu de lumière, mais les images sont floues. Enfin, certains plastiques sont semi-opaques, c'est-à-dire qu'il laisse passer une quantité de lumière suffisante pour pouvoir voir des ombres et des formes. Comme les valeurs de transmission de lumière correspondant à ces différentes catégories ne sont pas clairement définies, quelques règles ont été établies. Si un journal est placé de l'autre côté du plastique et est facilement lisible, le plastique est transparent. Si l'image est floue et qu'on ne peut rien lire, mais que les formes générales peuvent être distinguées, le plastique est translucide. Si seulement de vagues ombres peuvent être discernées, le plastique est semi-opaque. Si aucune lumière n'est transmise, le plastique est opaque. Certains plastiques sont utilisés pour leur transparence : le polycarbonate, le polystyrène. Ils sont utilisés pour fabriquer des lentilles pour les yeux, des vitres pare-balle, des éclairages de voiture. Contrairement au verre, une exposition prolongée aux U.V. dégrade les polymères qui deviennent jaunes et perdent de leur transparence.[Seyni 2008]

II.5.3 Propriétés électriques :

Il est tout à fait naturel que les polymères non polaires tels que le polyéthylène et le polypropylène, ayant d'excellentes propriétés isolantes, aient très peu de porteurs de charges mobiles et de dipôles polarisables. Par conséquent, leurs propriétés diélectriques telles que la permittivité, le facteur de perte et l'accumulation de charges spatiales, le potentiel de surface ou le piégeage des charges électriques. [Ben Ammar 2017,]

seraient affectées de manière significative par tout traitement comme celui de dispersion de nanocharges qui porteraient des fragments chimiques polaires au sein de la matrice polymère. La résistivité surfacique de nombreux échantillons a été mesurée par Veluri et al. [Veluri 2018]

Afin d'analyser l'effet du renfort dans une matrice polymère. Ils ont caractérisé des échantillons de nanocomposite à base d'un mélange appelée SAL et constitué de 60% de poly(butylène succinate), de 30% de PLA et 10% de compatibilisant poly(butylène succinate-co-acide lactique), ainsi que de différents taux de charges de nanotubes de carbone et de 1% de Cloisite C15A. Les résultats ont montré une diminution significative de la résistivité en augmentant le taux des nanotubes de carbone, indiquant ainsi la présence d'un réseau semi-conducteur au sein de la matrice alors que la résistivité du nanocomposite à base de Cloisite 15A a légèrement diminué ($4,46 \cdot 10^{14} \Omega/\text{carré}$) mais reste proche de la valeur du SAL pur ($5,0510^{14} \Omega/\text{carré}$), sans pour autant détériorer les autres propriétés mécaniques du matériau élaboré:

II.6 Différences entre composite et nanocomposite :

Un composite est un matériau en phase solide constitué d'au moins deux constituants dont les qualités respectives se complètent pour former un matériau aux performances globales améliorées. Par exemple, si on place un plastique naturellement isolant avec un métal conducteur suivant des couches stratifiées, on aboutit à un matériau anisotrope conducteur dans le sens parallèle aux couches et des propriétés isolantes dans le sens perpendiculaire aux couches. Les matériaux composites contiennent des inhomogénéités mais qui sont suffisamment petites pour que les matériaux restent homogènes à l'échelle macroscopique. Des matériaux composites existent naturellement, comme le bois, constitué de lignine dans lequel sont placés des fibres de cellulose.

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

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

II.7 Les matériaux composites :

D'une manière générale, les propriétés d'un polymère seul sont insuffisantes pour conférer à l'objet que l'on veut fabriquer toutes les propriétés souhaitées en terme de rigidité, résistance mécanique, légèreté ou autre propriété physico-chimique, électrique, optique... C'est pourquoi on s'oriente de plus en plus vers les matériaux composites.

Un matériau composite peut être défini comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante matériaux composites des arrangements de renforts (appelés aussi charges) qui sont noyés dans une matrice. La matrice assure la cohésion et l'orientation de la charge. Elle permet également de transmettre à la charge les sollicitations auxquelles est soumis le composite. Les matériaux ainsi obtenus sont très hétérogènes et souvent anisotropes. La nature de la matrice et de la charge, la forme et la

proportion de charge, la qualité de l'interface et le procédé de production utilisé sont autant de paramètres qui peuvent influencer les propriétés du matériau composite. La matrice et le renfort peuvent être métalliques, céramiques ou plastiques, ce qui permet d'envisager une multitude de combinaisons. Nous ne présenterons pas ici une revue exhaustive sur les matériaux composites mais nous nous concentrerons sur ceux dont la matrice est constituée d'un polymère [Seyni 2008].

II.8 Définition d'un nanocomposite :

Le nanocomposite à base polymérique est un mélange de nanoparticules appelées nano-charges et d'une résine polymérique. Le produit qui en découle possède de meilleures propriétés mécaniques. Un nanocomposite, également appelé «matériau hybride », est défini par Sanchez comme étant un « système organon minéral ou biominéral dans lequel l'une au moins des composantes, organique ou inorganique, se situe dans le domaine de taille compris entre le dixième de nanomètre et la dizaine de nanomètres ». Les matériaux hybrides peuvent être classés selon la composition chimique relative des composantes organiques et minérales ou par la nature des interactions mises en jeu entre les deux entités.

Les nanocomposites sont également composé d'une matrice contenant des charges. La différence par rapport aux matériaux composites classiques provient du fait que les charges possèdent au moins une dimension de l'ordre du nanomètre .Ces nanocharges peuvent être monodimensionnelles (NTC), bidimensionnelles (argiles en feuillets) ou encore tridimensionnelles (nanosphères). [Penu 2008]

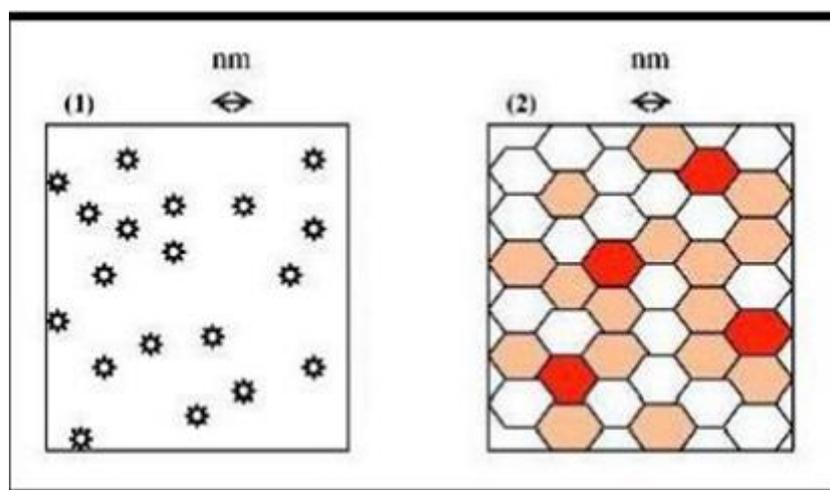


Figure II.5 définition morphologique de nanocomposites

II.9 Propriétés des nanocomposites :

La dispersion homogène des charges au sein du nanocomposite conduit à de nombreuses modifications des propriétés caractéristiques de la matrice. Ceci a été bien mis en évidence par de nombreuses publications de l'équipe de Toyota Central Research Laboratories [Kawasumi 1997]

II.9.1-Propriétés mécaniques :

Les propriétés mécaniques sont influencées de manières différentes par l'ajout de NTC par rapport aux propriétés électriques. En effet, même si l'addition d'une faible quantité semble être bénéfique, l'ajout d'un taux élève de nanotubes n'entraîne pas forcément une amélioration des propriétés mécaniques. Il crée souvent une modification conséquente du comportement mécanique, avec notamment l'apparition de nombreux défauts (dus aux agglomérats) ainsi qu'une perte de cohésion entre le polymère et les NTC. De ce fait, de plus en plus de chercheurs visent à fonctionnaliser les NTC afin d'améliorer l'interface charge/polymère. Ils modifient chimiquement les NTC afin de les comptabiliser avec du polyuréthane. Ils arrivent ainsi à améliorer les propriétés mécaniques en augmentant la force de rupture de 370 %. On trouve dans la littérature une grande diversité de résultats concernant les propriétés mécaniques des nanocomposites polymère/NTC en fonction des différentes affinités matrice/charge. [Aurélien2010]

L'amélioration des propriétés mécaniques des polymères ne tient pas uniquement aux excellentes propriétés des nanotubes. En effet, la liaison inter faciale entre les charges et la matrice ainsi que la dispersion des charges sont également à prendre en compte. Ainsi la contrainte à la rupture peut être diminuée par la présence de défauts associés aux agglomérats de nanotubes. La résistance à la rupture de ces composites est améliorée lorsque la matrice et les charges possèdent une énergie inter faciale suffisante pour permettre le transfert des efforts de la matrice au renfort. La dispersion des nanotubes dans une matrice polyéthylène téréphtalate permet d'augmenter le module d'Young du polymère de (1,5 GPa à 1,9 GPa) ainsi que la contrainte à la rupture de (60 MPa à 68 MPa) avec (2%) de (NTC) [Kim2007]. 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. [Xiao 2007]

II.9.2 Propriétés thermiques :

L'analyse thermogravimétrique (ATG) permet de caractériser la stabilité thermique des matériaux, tout en évaluant leur température de dégradation pour laquelle la perte de masse devient significative. Généralement, les nanocomposites sont également connus pour avoir des caractéristiques thermiques beaucoup plus intéressantes que celles du polymère seul ont étudié la stabilité du système PP/PBS/C20A à différentes quantités d'argile. Le tableau I.4 regroupe l'analyse comparative des nanocomposites dans deux milieux : azote et air.

L'amélioration du comportement thermique des nanocomposites est fortement visible par rapport à celui de la matrice toute seule. Ce comportement est lié à la forte adhésion entre les 2 phases de polymère, qui est due à la bonne insertion des chaînes polymères au sein de l'espace interfoliaire de l'argile, et également à la dispersion homogène des nanoparticules dans la matrice. Les auteurs ont remarqué que, dans un milieu atmosphérique normal, la perte de 50% de masse est atteinte à 372°C alors qu'en mélange avec 3% de C20A la température monte à 385°C. Sous azote, la perte de 50% de masse est atteinte à 428°C alors qu'en mélange la température monte à 431°C.

II.10 Classification des nanocomposites :

La nature du matériau constituant la matrice permet de répertorier trois grandes classes de composites. Elles sont considérées ici par ordre croissant de tenue en température : les composites à matrice polymère (CMP), les composites à matrice métalliques (CMM) et les composites à matrice céramique (CMC)

II.10.1 Les Composites à Matrice Polymère :

(CMP) La fabrication des CMP emploie deux types de matrices : les résines thermodurcissables qui représentent 3/4 des CMP actuels (époxyde, polyester, vinyles ter, polyuréthane...) et les résines thermoplastiques (polypropylène, polyamide...) qui sont moins utilisées mais en pleine progression du fait notamment d'une plus grande recyclabilité (réutilisation après broyage). Les matrices polymères renforcées par des fibres de verre, employées notamment dans les produits de grande diffusion, sont d'une grande importance industrielle. Les fibres de carbone et de Kevlar sont utilisées dans une moindre mesure pour des applications hautes performances dans l'aéronautique et l'aérospatiale. D'autres types de renforts sont employés tels que des billes (verre, élastomère...) et des charges (fibres broyées,

poudres...). Les pièces en composite à matrice polymère prennent des formes variées (coques, plaques, pièces de révolution...) grâce aux nombreux procédés de formage mis au point (moulage, pultrusion, estampage, enroulement filamentaire). Ces composites permettent un allègement des pièces de structure habituellement fabriquées en alliages métalliques. L'utilisation des CMP reste limitée au domaine de températures inférieures à 200°C

II.10.2 Les Composites à Matrice Métallique :

(CMM) Pour des applications à haute température (jusqu'à 600°C), on fait appel aux composites à matrice métallique (CMM). Les métaux ou alliages métalliques utilisés dans la fabrication des CMM sont généralement choisis en fonction de leurs propriétés spécifiques dans l'état non renforcé. Ainsi, l'aluminium, le titane et le magnésium sont les métaux les plus couramment utilisés. Les procédés de fabrication des CMM diffèrent selon que la matrice se trouve, lors de l'introduction des renforts, à l'état liquide (forgeage liquide, fonderie moyenne pression), dans un état semi-solide ou dans l'état solide (métallurgie des poudres). Les CMM présentent de bonnes caractéristiques mécaniques spécifiques, une bonne résistance en température et aux chocs thermiques ainsi qu'une bonne résistance à l'usure et à l'abrasion.

II.10.3 Les Composites à Matrice Céramique :

(CMC) Enfin, lorsque les températures d'utilisation sont supérieures à 1000 °C, on a recours aux composites à matrice céramique (céramiques industrielles). Leur renfort est généralement constitué de fibres longues en carbone, en silice ou en carbure de silicium, assemblées par tissage multidimensionnel. Ces matériaux sont développés dans le domaine aérospatial. D'autres par contre sont utilisés pour l'ingénierie du bâtiment. Aujourd'hui les recherches sont actives sur les possibilités de combinaison des fibres naturelles comme renfort dans les matériaux composites à matrice céramique.

II.11 Application des nanocomposites :

Les nanocomposites peuvent offrir de nombreux avantages tels que les applications prometteuses comprennent à la fois la génération de nouveaux matériaux et l'amélioration des performances de dispositifs connus tels que les piles à combustible, les capteurs et les revêtements, l'amélioration du module, la résistance à la flexion, la déformation à la chaleur et les propriétés de barrière et de température. Autres applications industrielles des nanocomposites hybride organique/inorganique telles que l'opto-électronique, le

développement de systèmes catalytiques, la pharmacie, le biomédical pour la vectorisation de médicaments et le médical pour l'élaboration de revêtements antimicrobiens [Chikwendu 2013]

II.12 Procédés d'élaborations des nanocomposites :

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

Les principales sont : le mélange direct du polymère et des nanoparticules en solution (aqueuse ou solvant) le mélange dans le polymère fondu. la polymérisation in situ en présence de nanoparticules.

II.12 .1 Mélange direct en solution :

La voie directe, qui consiste à mélanger la matrice polymère avec les phyllosilicates sans aucun changement dans le procédé existant, semble la méthode la plus simple pour obtenir un polymère nanocomposite. Cette méthode, dont le procédé est schématisé sur la Figure III.1, consiste à préparer d'une part le polymère en milieu solvant selon son procédé habituel, et d'autre part une dispersion d'argile dans ce même solvant. Ensuite, on mélange le tout pour obtenir le nanocomposite. Cette méthode d'élaboration est surtout utilisée pour les films. L'intérêt d'une telle méthode est de disperser l'argile dans un solvant adapté, ce qui, grâce à son pouvoir de gonflement, facilite la dispersion des feuillets.

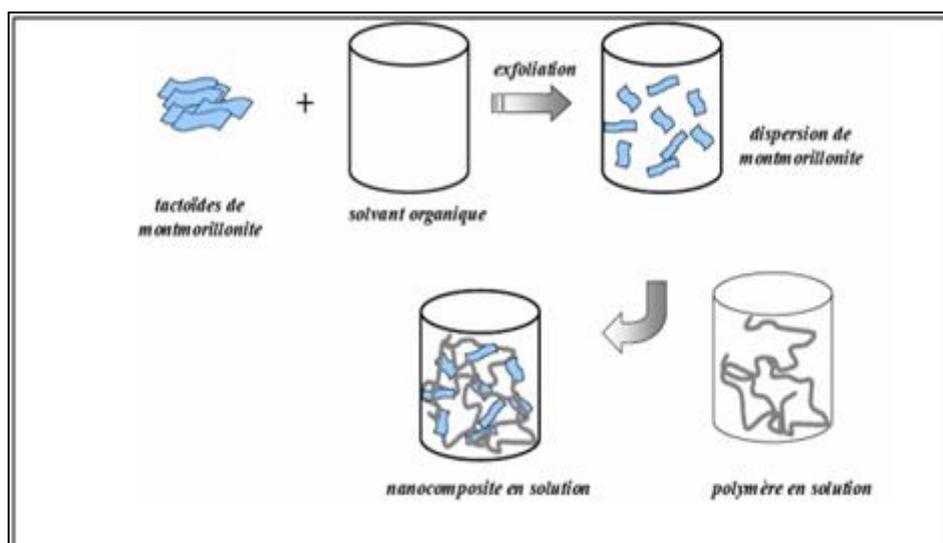


Figure II.6: Elaboration de nanocomposites par voie direct en solution

Le grand avantage de cette méthode est qu'elle permet de synthétiser des nanocomposites intercalés à base de polymères faiblement ou non polaires. Cette méthode a été très largement utilisée dans le cas des polymères hydrosolubles comme le poly(alcool vinylique),

L'intérêt, dans les cas cités, est que la dispersion de l'argile (une montmorillonite-Na) est directement possible sans avoir recours à la modification de l'argile. En effet, cette charge se disperse totalement dans l'eau distillée. En revanche, la forte interaction qui existe entre les macromolécules et les feuillets d'argile aboutit, dans de nombreux cas, à la réagrégation des feuillets d'argile. C'est le cas pour le poly(oxyde d'éthylène) (PEO) polyacrylique; en revanche, dans le cas du poly(alcool vinylique) [Brown 1989], la distribution colloïdale reste préservée. Malheureusement, cette technique est inappropriée en milieu industriel, car l'emploi de grandes quantités de solvant est source de nombreux problèmes

II.12 .2Mélange dans le polymère fondu :

Le procédé d'obtention par mélange à l'état fondu est reporté pour la première fois par [Vaia 1993]. Le principe repose sur le mélange de la matrice polymère à l'état fondu avec les nano charges 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.

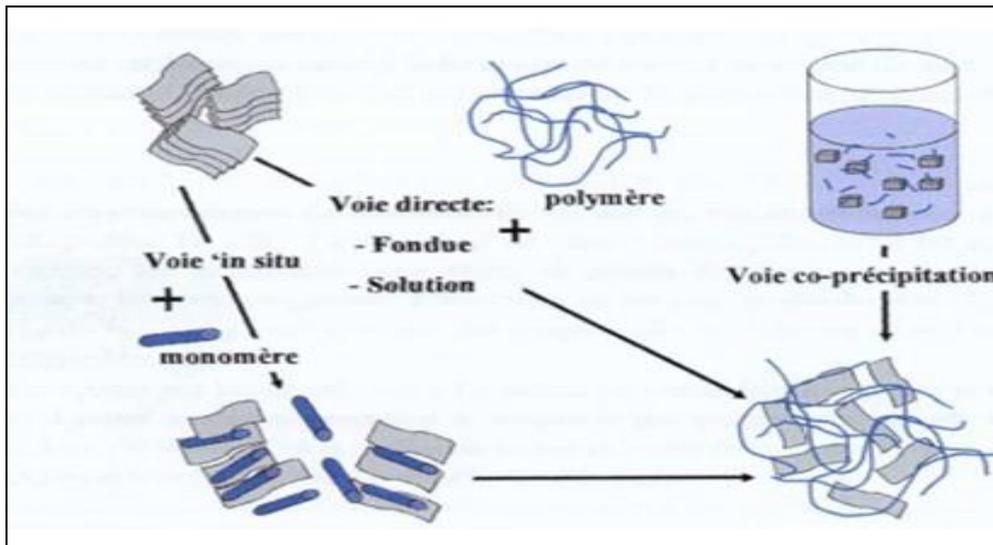


Figure II.7: modes les plus utilisés pour la réalisation des nanocomposites

L'exemple des nanocomposites polymère/argile soulève l'un des principaux problèmes pour la production de nanocomposites, sans une bonne dispersion et distribution des nano renforts au sein de la matrice polymère, on perd non seulement l'avantage de l'importance surface de contact due à l'échelle nanométrique, mais on augmente aussi le risque d'agréats créant des défauts et limitant ainsi les propriétés des matériaux.

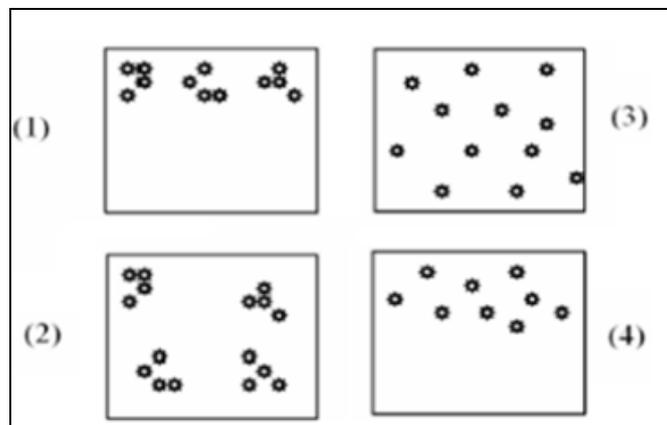


Figure II.8 Représentation du concept de dispersion et distribution dans les nanocomposites :
 1) Mauvaise dispersion et distribution , 2) Mauvaise dispersion et bonne distribution, 3)
 Bonne dispersion et distribution ,4) Bonne dispersion et mauvaise distribution.

La dispersion (figure II.12) traduit le niveau d'agglomération des renforts tandis que la distribution reflète leur homogénéité dans l'échantillon. Une des limitations au développement des nanocomposites est liée à la capacité de développer des procédés de fabrication permettant une répartition homogène des nano-renforts. [A. Illaïk 2013] Chacune de ces méthodes a ses propres avantages et limitations. La direction synthétique est

probablement préférable s'il est nécessaire de produire les nanocomposites peu coûteux. Quoique, les méthodes de mélangeage semblent parfois être souhaitables pour des raisons technologiques de production., les méthodes les plus employées sont:

1-La voie fondue (mélange à l'état fondu) : Les charges sont mélangées au polymère à l'état fondu dans une extrudeuse ou dans un malaxeur. La dispersion est assurée par le cisaillement mécanique qui brise les agrégats, et par la diffusion des macromolécules à l'état fondu. Toutefois, le recours à cette méthode nécessite une bonne affinité polymère/charge ou un traitement préalable de la surface de la nanoparticule de façon à éviter que de gros agrégats subsistent dans le matériau.

2-La voie de solvatation (mélange en solution) : L'utilisation d'un solvant permet d'améliorer la compatibilité polymère/ charge et de briser les agrégats. Pour cela, il est nécessaire que le solvant utilisé soit un solvant du polymère et qu'il développe des interactions favorables avec les nanocharges. 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 déterminante car il faut empêcher les nanocharges de s'agglomérer à nouveau [Dahmani 2022]

II.12.3 Polymérisation in situ :

la polymérisation in situ consiste à faire polymériser les monomères en présence de l'argile ou de nanoparticules. Les premiers travaux datant de 1965 [Blumstein.A.1965] démontrent la faisabilité d'élaboration d'un Poly-Méthacrylate de méthyle/argile (PMMA/argile) intercalé. Pour cela, le monomère polaire est préalablement inséré entre les feuillets d'un montmorillonite Na⁺ puis la polymérisation est réalisée par un amorceur radicalaire ou un rayonnement γ . Cette méthode a été reprise par des chercheurs de Toyota en 1993 dans le cas du Polyamide 6 (PA6). Plus récemment, ce procédé a été utilisé dans le cas des Polyoléfines, de Polyesters ou du Polystyrène.

La polymérisation in situ ne se limite pas qu'aux thermoplastiques mais elle a déjà été employée dans le cas de matrice époxy. L'argile est alors gonflée par un mélange du prépolymère et de l'agent de réticulation. Ce procédé d'élaboration de nanocomposite comprend trois étapes principales: - La première étape concerne la dispersion de l'argile dans le monomère en utilisant des outils dispersants. Le monomère doit alors pénétrer entre les feuillets. - La deuxième étape implique la polymérisation du mélange monomère + nanocharge (argile).

II.14 Conclusion :

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

Dans ce chapitre on a parlé sur le polymère et détaillé ces classifications et ces propriétés on verra la transition du composite au nano composite. passant aux propriétés et classifications des nano-composites et quelques applications finies par des procédés d'élaboration des nanocomposites. Enfin, nous pouvons conclure que NTC est idéal pour la production de polymères synthétiques, mais certaines questions doivent être abordées avant de réaliser pleinement les propriétés particulièrement sérieuses des nanocomposites.

Chapitre III :

Porosité des poutres et
modèles des fondations
élastiques

III.1 Introduction :

Lors du processus de fabrication des matériaux composite , quel que soit le procédé utilisé, des défauts peuvent apparaître dans le matériau. Le défaut de porosité est défini par la présence de petites cavités qui contiennent de la matière gazeuse appelées pores et qui sont classés selon leur taille (micro, méso et macro-pores). Il existe différentes approches de caractérisation de la porosité et du fait que les pores sont des défauts géométriques. La présence de pores à l'intérieur d'un composite dégrade significativement les propriétés mécaniques en statique et en fatigue où les pores peuvent agir comme un point d'initiation de fissures .

C'est pour cela que l'identification et la caractérisation du matériau sont importantes pour déterminer la qualité d'une structure en composite. Une fondation élastique peut être appliquée à une barre. Ainsi, l'influence du sol est généralement incluse dans la modélisation. Les fondations élastiques de barre peuvent uniquement être définies pour le type de barre « Poutre ».

Les ressorts de cisaillement peuvent être utilisés pour représenter la capacité de cisaillement du sol. Les valeurs caractéristiques des ressorts de cisaillement sont définies séparément dans la direction des axes locaux de la barre x, y et z et doivent être considérées comme des valeurs de calcul.

III.2 La porosité :

III.2.1 Définition d'une porosité :

Selon le glossaire international d'hydrologie, la porosité peut être définie comme étant la propriété d'un milieu, d'un sol ou d'une roche de comporter des pores, c'est à dire des vides interstitiels interconnectés ou non. Elle peut être exprimée comme étant le rapport du volume de ces vides au volume total du milieu. La porosité est donc définie à la fois comme une propriété caractéristique d'un milieu poreux et comme un paramètre qui l'exprime quantitativement (rapport de volumes, sans dimension). D'après cette définition, il est possible de se représenter le défaut de porosité dans un matériau composite comme étant de très petites cavités emprisonnant à priori de la matière gazeuse [Schoeller, 1955], distingue deux catégories de pores:

Chapitre III porosité des poutres et modèles des fondations élastique

– les porosités ouvertes composées de vides inter-communicants connectés à la partie extérieure du matériau .

– les porosités fermées, isolées à l'intérieur du matériau et ne permettant aucune perméabilité. Les pores pénétrants sont des pores ouverts qui ont la particularité de relier au moins deux faces du matériau poreux.

Les nombreuses applications des matériaux poreux font appel à des tailles de pores qui peuvent varier de l'échelle atomique à l'échelle millimétrique. L'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) a recommandé la nomenclature relative à la taille des pores présentée à Tableau III.1 [Schaefer, 1994]. En se référant à la gamme des tailles moyennes des interstices d'un milieu poreux et aux états physiques de l'eau contenue en leur sein, une seconde classification des porosités avait préalablement été proposée [Schoeller, 1955].

Celle-ci définit un micropore (ou pore matricielle) comme une cavité de diamètre inférieur à 0,1 μm et une macropore (ou porosité structurale) comme une cavité de diamètre supérieur à 2,5 mm. Les mésoporosités (ou porosité texturale ou capillaire) sont donc les interstices de diamètre intermédiaire compris entre 0,1 μm et 2,5 mm [tableau III.1] La porosité est donc un concept indépendant de la forme et des connexions entre les pores. Seuls les volumes sont considérés. Néanmoins, il est important de signaler que pour les matériaux composites, le concept de porosité correspond à des interstices de petites tailles (ordre millimétrique et inférieur) par rapport aux fissures, diaclases ou délaminages.[ledru 2009]

Tableau III.1 : Nomenclatures relatives à la tailles des pores

Rayon des pores	Classe	Etat de l'eau
< 0,1 μm	Microporosité	Eau de rétention exclusivement
0,1 à 2500 μm	Mésoporosité	Eau capillaire et eau gravitaire
> 2500 μm	Macroporosité	Eau gravitaire dominante

III.2 La porosité dans les matériaux :

Tout matériau présentant des cavités, des canaux ou des interstices peut être défini comme un matériau poreux. La porosité joue un rôle essentiel dans les propriétés physicochimiques et mécaniques des matériaux. Son évaluation est donc cruciale pour un certain nombre d'applications (pétrochimie, bâtiment, environnement, agroalimentaire). La taille des pores et leur organisation dans le matériau est, pour beaucoup d'applications, d'une importance déterminante. C'est pourquoi la maîtrise des méthodes d'introduction ou de contrôle de la porosité a toujours requis un intérêt particulier car elle permet, à la fin, de mieux contrôler les propriétés physico-chimiques des matériaux. Les pores dans les matériaux sont de plusieurs types Tableau III.2. On distingue les pores ouverts accessibles aux fluides et les pores fermés qui n'ont aucune ouverture sur le milieu extérieur. Les pores peuvent être classés aussi suivant un critère de taille. La classification IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry), basée sur la taille est, en effet, très communément utilisée. Elle distingue trois types de pores : les micropores, les mésopores et les macropores [Balima 2014]

Tableau III.2: Classification de la porosité selon l'IUPAC

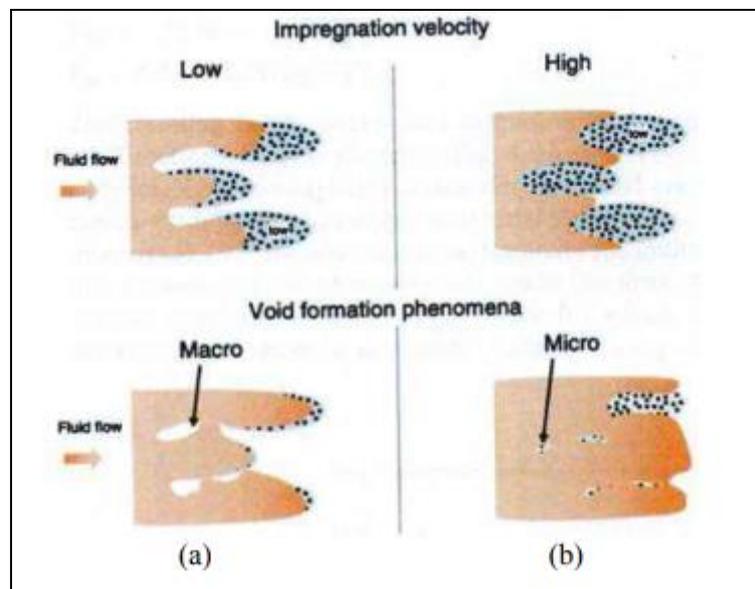
Taille des pores	classe
Inférieure à 2 nm	Micropores
Entre 2 et 50 nm	Mésopores
Supérieure à 50 nm	Macropores

III.2.3 Etude des causes possibles d'apparition de la porosité :

En observant la création d'une bulle de gaz dans un verre de champagne, dans une casserole d'eau bouillante ou entre une tapisserie et le mur, il est évident que les phénomènes mis en jeu sont différents. Dans le premier cas, la nucléation liée aux phénomènes de diffusion sont majoritaires, tandis que dans le deuxième, ceux sont plutôt les phénomènes thermiques et dans le troisième, un effet mécanique. Ces trois aspects très différents peuvent néanmoins intervenir séparément ou simultanément lors du processus de mise en œuvre des matériaux composites pour induire la formation de porosité.

III.2.3.1 Les causes mécaniques :

La création de porosité par emprisonnement mécanique d'air lors de la conception de la pièce est la cause la plus facile à comprendre intuitivement. Les deux exemples suivants illustrent ce type de création : Le premier concerne l'emprisonnement de poches d'air dans la résine durant sa phase de fabrication (malaxage, etc...) ou durant l'imprégnation du renfort. Ce deuxième point est très largement développé par de nombreux auteurs travaillant sur la mise en œuvre des composites par RTM ou par infusion (RLI, RFI...). L'intégralité de ces travaux concorde pour expliquer la formation lors du moulage par LCM de deux types de porosités : les macros porosités observées entre les mèches et les micros porosités, observées au sein même des mèches (figureIII.1)



FigureIII.1: Formation des macros et micros porosités en fonction de la vitesse de déplacement du fluide lors de l'imprégnation d'un renfort [Trochu et al., 2006] : (a) force de capillarité prédominante, (b) force de viscosité prédominante

Les macros porosités sont principalement présentes dans la pièce lorsque l'écoulement de la résine, lors de l'imprégnation du renfort, est gouverné par la pression visqueuse (viscosité faible) contrairement aux micros porosités qui sont majoritaires lorsque l'écoulement est gouverné par la capillarité (viscosité importante). La vitesse d'écoulement de la résine étant régie par la loi de Darcy [Trochu et al., 2006], il est important d'ajuster la différence de pression imposée au système en fonction de la perméabilité du renfort et de la viscosité de la résine afin d'obtenir une vitesse d'écoulement intra-mèche et inter-mèche la plus uniforme possible.

III.2.3.2 Les causes thermodynamiques

Au sein de la résine, les molécules de gaz diffusent au hasard et finissent par se rencontrer d'autant plus facilement que leur concentration est élevée. Les molécules diffusantes, à l'état de monomère s'additionnent donc successivement pour former des agglomérats qui ont une taille suffisante pour être qualifiés de germes (entre 50 et 100 molécules pour une espèce chimique à faible masse molaire comme l'eau). Le processus de formation de tels germes met en jeu l'enthalpie libre, ΔG , de Gibbs. La création d'un germe nécessite la création d'un volume et d'une surface, qui met en jeu deux énergies antagonistes : l'énergie de volume, apportée par la sursaturation de la solution, et l'énergie de surface résistant à la croissance du germe. Une fois le germe formé sous des conditions thermodynamiques favorables, ou une fois la microcavité créée au sein du matériau par voie mécanique, leur stabilité, leur croissance ou leur dissolution va dépendre de plusieurs facteurs et notamment des paramètres imposés lors de la polymérisation [ledru 2009]

III.2.4 La grande diversité des milieux poreux :

Les milieux poreux, sont omniprésents autour de nous et sont de nature très variée: formations géologiques, tissus biologiques, matériaux manufacturés tels que les bétons, les plâtres, les mousses métalliques, ou encore les matériaux composites pour ne citer que ceux-là. Qu'ils soient naturels ou manufacturés, les milieux poreux sont composés d'une matrice solide, et de vides pouvant être connectés ou isolés appelés les pores. Une bonne caractérisation de la structure poreuse d'un milieu est primordiale dans différentes applications industrielles (traitement des eaux, industrie pétrolière, stockage de CO₂, etc.). La structure interne des matériaux poreux est d'une très grande complexité. Cette complexité varie d'un matériau à l'autre, et même au sein d'un même matériau, la complexité n'est pas la même en fonction de l'échelle de porosité considérée. En effet plusieurs milieux poreux naturels ou manufacturés ont des tailles de pores variant sur plusieurs échelles (Gao 2019). Figure III.2 illustre la diversité de structures internes des pores observables au sein d'un même matériau, en l'occurrence du titane qui est très utilisé dans diverses industries pour former des alliages légers ultra résistants. [MACKAYA 2019]

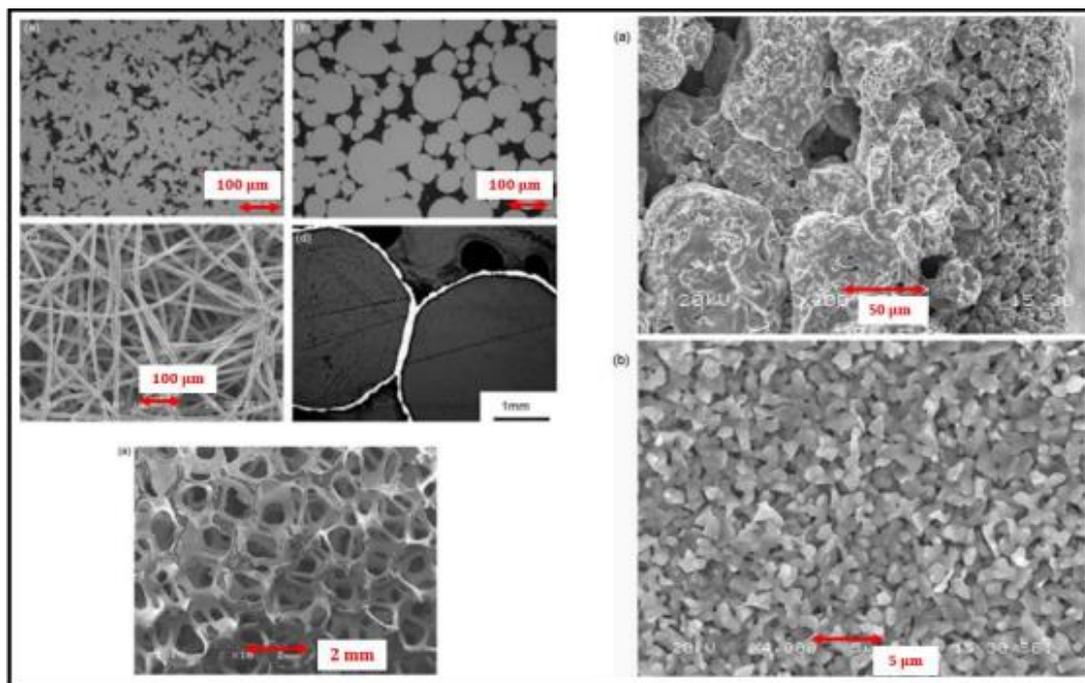


Figure III.2: Différents milieux poreux à base de Titane [Tang et al. 2015]

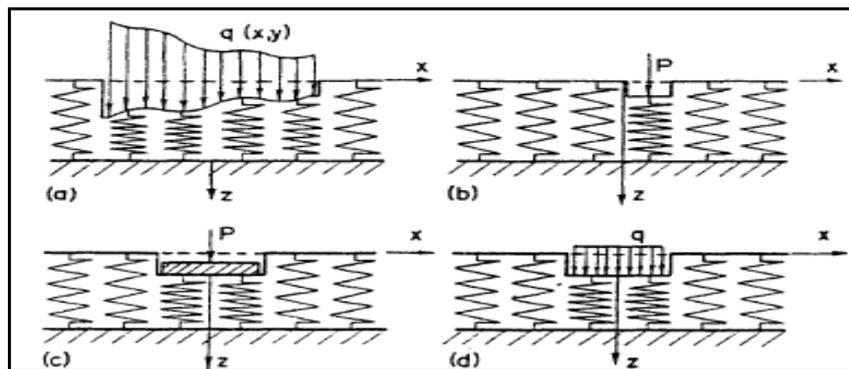
III.3- Les fondation élastique :

Il existe de nombreuses études sur la modélisation de fondation élastique Winkler dans la littérature. Zhou et Eisenberger ont étudié une solution générale aux vibrations des poutres sur différent fondation élastique Winkler. Eisenberger et Clastornik ont étudié la vibration et le flambement d'une poutre sur différent fondation élastique Winkler. Une réponse dynamique d'une poutre de Timoshenko avec une masse en mouvement concentré a été résolue par Lee [Lee 1998]. En outre, certains chercheurs [Ma 2009] ont étudié l'analyse des fondations élastiques avec les modèles Winkler-Pasternak. [Zidour 2012]

III.3.1 Modèle winkler:

Historiquement on peut dire que ce modèle développé à l'origine pour l'analyse des voies de chemin de fer a prouvé son efficacité, en commençant par [Boussinesq 1885] qui a étudié le problème d'un milieu semi-infini homogène isotrope linéaire élastique soumis à une charge verticale concentrée (P). Winkler suppose dans sa modélisation une poutre posée sur un support (fondation) élastique, modélisé par une série de ressorts verticaux indépendants, identiques, infiniment rapprochés, sans effet d'accouplement, linéairement élastiques et d'une raideur constante. Ce modèle ne prend pas en compte les déformations de cisaillement transversal pour simplifier l'obtention des solutions analytiques

Winkler suppose dans sa modélisation une poutre posée sur un support (fondation) élastique, modelé par une série de ressorts verticaux indépendants, identiques, infiniment rapprochés, sans effet d'accouplement, linéairement élastiques et d'une raideur constante $k_w(x)$. Ce modèle ne prend pas en compte les déformations de cisaillement transversal pour simplifier l'obtention des solutions analytiques [HetVenyi, 1961]. La discontinuité du Gibson est validé pour ce modèle (figure III.3 a et b) et d'autre part, les tassements de la zone chargée dans le cas d'une fondation rigide restent les mêmes dans le cas d'une fondation flexible (figure III.3c,d). Cette approche présente une relation linéaire entre le déplacement algébrique normal de la structure et de la pression de contact entre la poutre et la fondation élastique. Selon cette idéalisation, la déformation de la fondation due à la charge appliquée est limitée seulement aux régions chargées et en dehors de cette zone les déformations sont nulles, alors les ressorts ne seront pas affectés au-delà de la zone chargée.



(a) charge quelconque ; (b) charge concentrée, (c) fondation rigide, (d) fondation flexible.

Figure III.4 Modèle de Winkler

La raideur $k_w(x)$ indiquée ci-dessus est nommée par la constante de proportionnalité et connue sous le nom de module de réaction de sol support [Chandra, 1987], Dans le cas d'un solide linéaire à rigidité constante [Iancu, 2014], on peut écrire la relation pression-flexion en tout point (figure III.3):

$$f(x) = q(x) = -k_w w(x) \tag{3.1}$$

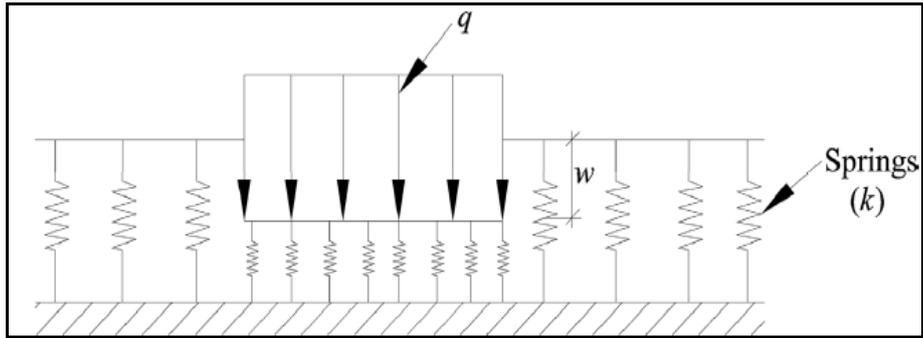


Figure III.4 Modèle de Winkler (déplacement sous chargement répartie).

$k_w(x)$ est la réaction sous-jacente proportionnel au module de Young module du milieu élastique, $w(x)$: de flexion. [Belmahi 2020]

III.3.2 Modèle de Pasternak :

Pour rendre compte de la contrainte de cisaillement dans le sol, (Pasternak, 1954) a connecté la couche de ressorts de Winkler à une couche d'élément verticaux incompressible qui se déforme en cisaillement transversal (Figure III.5.a).

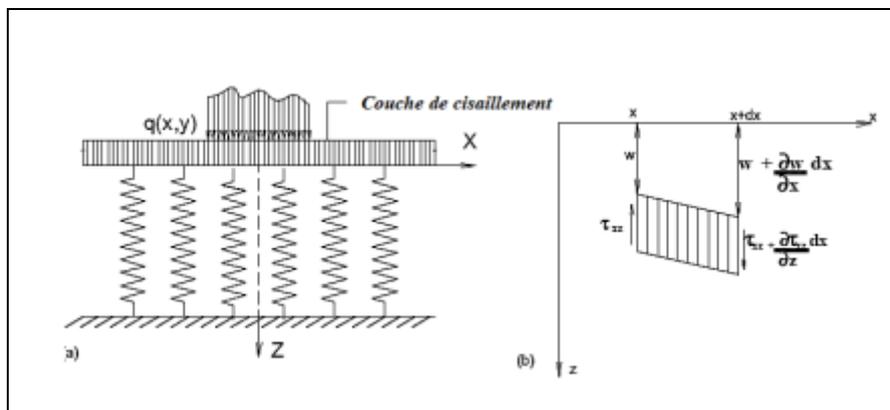


Figure III.5 : Modèle de Pasternak (1954) : (a) modèle de base, (b) état de contrainte d'un élément infinitésimal de la couche de cisaillement.

En se basant sur cette hypothèse, la relation entre la pression p et la déformée w de la fondation en un point arbitraire est définie comme suit :

$$p(x, y) = ks(x, y) - G \nabla^2 w(x) \tag{3.2}$$

Les profils de déviation de la surface pour ce modèle sont très similaires à ceux obtenus pour le modèle de Filonenko-Borodich. La condition de Winkler est retrouvée comme un cas limite pour les modèles à deux paramètres présentés jusqu'à présent, lorsque T , D et G sont

nulles. Le modèle de Pasternak est le modèle à deux paramètres généralisé le plus raisonnable, et il est facilement concevable pour les applications géotechniques, car le sol est compressible et se déforme en cisaillement.

III.3.3 Modèle de Kerr :

Le modèle de la fondation Kerr est un modèle élastique à trois paramètres qui se compose d'une couche de cisaillement indépendante des couches supérieure et inférieure modélisées par des ressorts distribués (figure III.6).

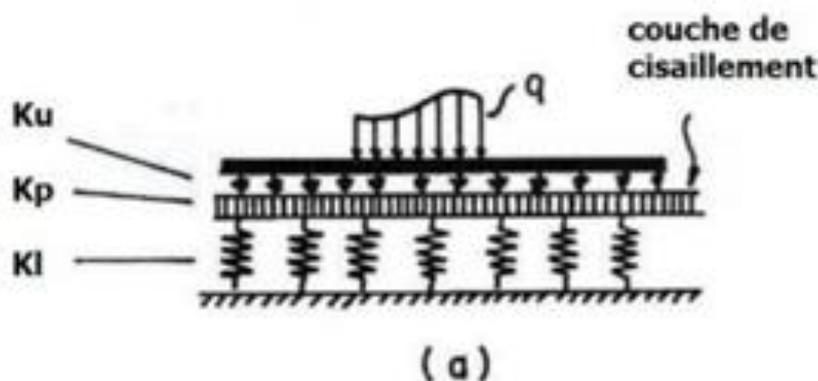


Figure III.6: Modèle de Kerr

Pour la dérivation de la relation entre la déflexion et la réaction de la fondation, Kerr (1964, 1965, 1967) a considéré la déflexion de la plaque w composée de deux parties $W(x,y)=w_1(x,y)+w_2(x,y)$ où : w_1 est la déflexion due à la contraction ou à l'extension de la couche supérieure du ressort et w_2 est la déflexion due au reste de la fondation. Selon la figure III.6 et les équations

$$P(x,y)=k_w w_1 \quad (3.3)$$

Et

$$p(x,y) = k_w w_2 - k_p \nabla^2 w_2 \quad (3.4)$$

Où k_u est la constante de ressort de la couche de ressort supérieure, k_l est la constante de ressort de la couche de ressort inférieure et k_p est la constante de la couche de cisaillement. On note que les paramètres k_u , k_l et k_p sont déterminés à partir des propriétés de sol de

fondation. En introduisant le rapport $\left(\frac{k_l}{k_u} - \frac{k_p}{k_u} \nabla^2\right)$ dans l'équation (3.4) puis en ajoutant le résultat à l'équation (). En considérant l'équation (3.3), on obtient la relation entre la réaction et la déflexion de la fondation comme suit :

$$\left(1 - \frac{k_l}{k_u}\right) p - \frac{k_p}{k_u} \nabla^2 p = k_l w - k_p \nabla^2 w \quad (3.5)$$

Cette équation différentielle a été résolue et interprétée par Kerr (1965, 1967). Dans le cadre de l'étude des plaque FG, Daikh et al. (2018) ont utilisé une formule simple de la réaction de la fondation élastique avec trois paramètres comme suit

$$f_s = \left(\frac{k_l k_u}{k_l + k_u}\right) w - \left(\frac{k_p k_u}{k_l + k_u}\right) \nabla^2 w \quad (3.6)$$

III.4-Conclusion:

Dans ce chapitre on a parlé sur la porosité des poutre en NTC . Il existe deux points de vue divergents sur la porosité en particulier dans les matériaux composites. Ce que certains voient comme un défaut, lors de la synthèse de ces matériaux l'apparition de la porosité est inévitable, la présence de pores à l'intérieur d'un composite dégrade les propriétés mécaniques en statique et en fatigue où les pores peuvent agir comme un point d'initiation de fissures. Et pour des taux plus élevés de la porosité .et d'autre voient la porosité comme une qualité recherché dans les matériaux pour diminuer leur cout et masse.

Nous nous sommes intéressés aussi dans le présent chapitre au concept de fondation élastique, l'introduction d'une fondation élastique de type keer a permis d'étudier son influence sur les fréquences des différentes poutres qui a pour objectif de modéliser la complexe interaction entre sol et structure (en mécanique entre deux structures).

Chapitre IV :

Théories des poutres et
développement
mathématique

IV.1 Introduction :

La poutre est un élément important dans l'ossature d'une construction. Elle constitue un élément du gros œuvre d'un bâtiment. Effectivement, c'est une pièce mécanique qui possède une forme parallélépipédique. Placée généralement en position horizontale, une poutre est destinée à résister à la flexion.

De par sa position, son rôle principal consiste à transmettre sur le côté, aux poteaux, piliers, colonnes ou aux murs porteurs, le poids de la construction et du mobilier. Elle sert alors de support pour les charges au-dessus du vide.

Pour résoudre les problèmes des structures ayant comme éléments structuraux des poutres dans le domaine élastique, il est nécessaire de choisir la bonne théorie écrivant correctement le comportement statique et dynamique de la structure ainsi que la méthode de résolution à appliquer. La théorie des poutres est un modèle utilisé dans le domaine de la résistance des matériaux. On utilise trois modèles :

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

IV.2 Les différentes théories des poutres:

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

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

La théorie classique des poutres (classical beam theory - CBT) se base sur les hypothèses d'Euler- Bernoulli, selon lesquelles une section plane et normale au plan moyen de la poutre reste normale et perpendiculaire après déformation (figure IV.1) .En plus, en supposant que les normales ne changent pas de longueurs et en prenant en compte la petitesse des déformations, cela va nous donner un déplacement transversal similaire pour tous les points de la même section transversale.

En se basant sur les hypothèses ci-dessus, le champ de déplacement peut se donner par :

$$u(x, z) = u_0(x) - z \frac{\partial w(x)}{\partial x} \tag{4.1}$$

$$w(x, z) = w_0(x) \tag{4.2}$$

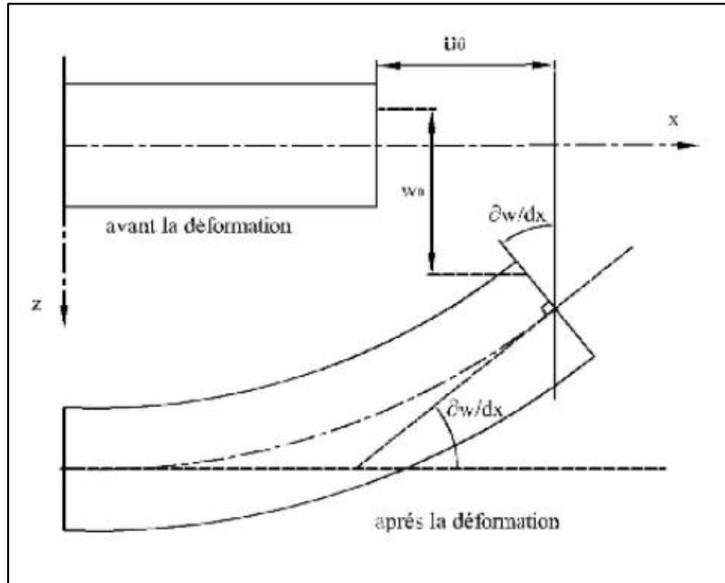


Figure IV.1 La cinématique de la théorie classique des poutres.

Ce champ se décompose en deux parties :

- Le déplacement axial de la membrane $u_0(x)$
- Le déplacement axial dû à la flexion $z \frac{\partial w(x)}{\partial x}$
- Le déplacement transversal $w(x, z)$

Avec :

u_0 : est le déplacement de la fibre moyenne et est la rotation due à la flexion et $w_0(x)$ est le déplacement transversal de la fibre moyenne.

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

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

$$\gamma_{-xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \tag{4.3}$$

Qui en résulte une contrainte nulle de cisaillement :

$$\tau_{xz} = G \cdot \gamma_{xz} = 0 \tag{4.4}$$

Avec G : le module de cisaillement transverse.

Donc on résume que le cisaillement est négligeable par cette théorie. Ce modèle donne des bons résultats pour les poutres élancées, mais il n'est pas valable pour les poutres courtes. [Zemri 2016]

IV.3.1 la théorie de premier ordre des poutres (Timoshenko) :

La poutre de Timoshenko représente une évolution par rapport à la poutre de Bernoulli, en permettant d'obtenir une moyenne des déformations d'effort tranchant dans la section

Cette solution permet d'affiner les solutions de la théorie classique de l'analyse. Cependant, ces solutions présentent des inconvénients près des appuis et dans la zone d'affaissement l'on peut avoir des concentrations des contraintes et champs de cisaillement inhomogènes. 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 » [Timoshenko 1972] (Figure IV.2)

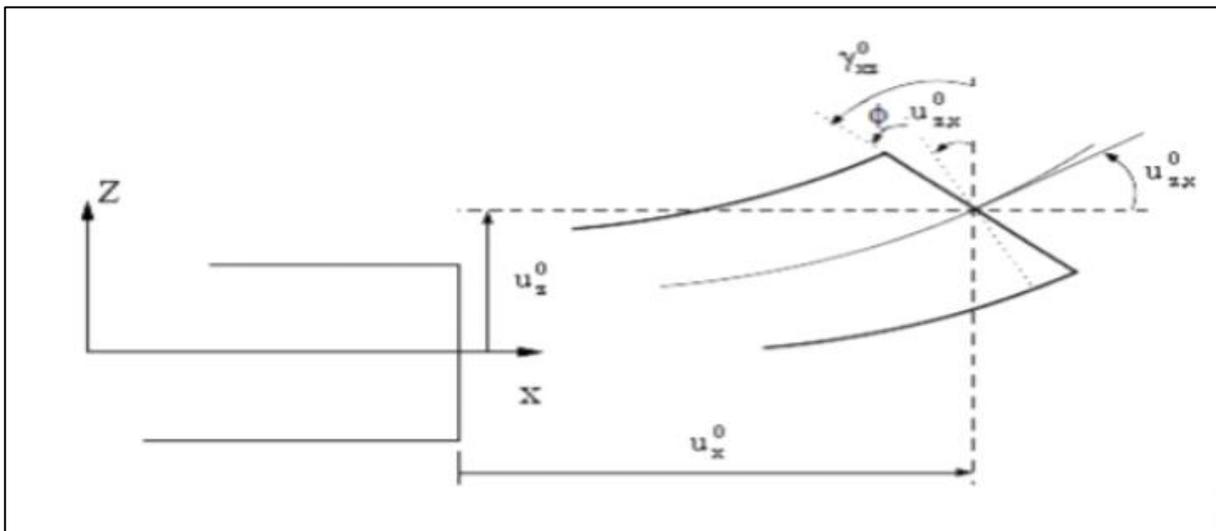


Figure IV.2 La cinématique de la théorie de premier ordre des poutres (Timoshenko)

La théorie du premier ordre est basée sur le champ de déplacement suivant :

$$u(x, z) = u_0(x) - z \frac{\partial w(x)}{\partial x} + \psi(z) \phi_x \tag{4.5}$$

$$w(x, z) = w_0(x) \tag{4.6}$$

Avec:

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

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{\partial w_0}{\partial x} + \frac{\partial w_0}{\partial x} + \phi_x = \phi_x \tag{4.7}$$

$$\tau_{xz} = G \cdot \gamma_{xz} = 0$$

La théorie des déformations du premier ordre nécessite un facteur de correction du cisaillement qui est difficile à déterminer à cause de sa dépendance à la fois, de la géométrie, du coefficient de Poisson à travers l'épaisseur, des charges appliquées et des conditions aux limites.

Timoshenko a été le premier à avoir étudié les effets des déformations de cisaillement et de l'inertie de rotation dans l'analyse des poutres, c'est pourquoi le modèle de la poutre avec une théorie du premier ordre est aussi appelé modèle ou poutre de Timoshenko. [Bellifa 2015]

IV.2.3 Théorie d'ordre élevé :

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 IV.3).

La fonction représente le gauchissement et sa dérivée $\Phi'(z)$ le cisaillement

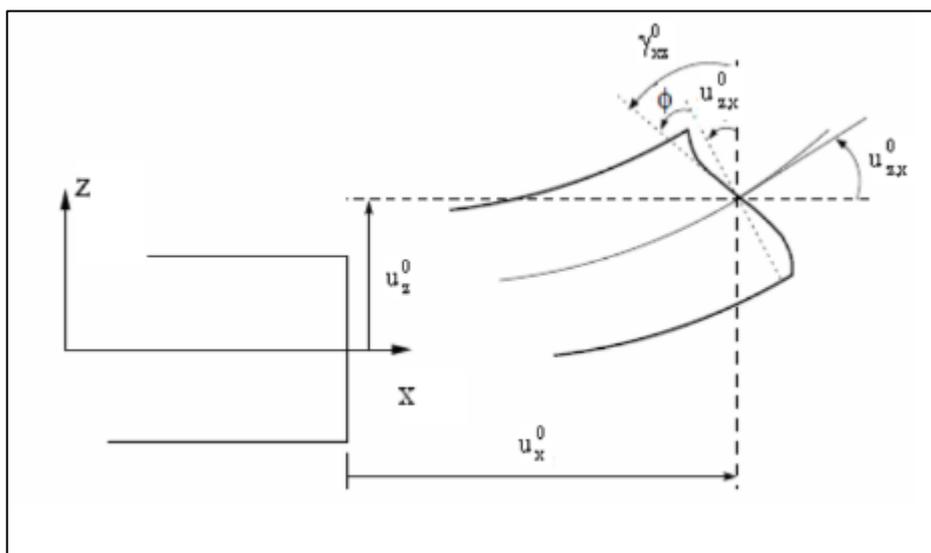


Figure IV.3 - Cinématique de la Théorie d'Ordre Elevé.

Dans ce cas, le champ de déplacement devient :

$$U(m) = \left\{ \begin{array}{l} u(x, z) = u^0(x) - zw'_x(x) + \phi(z)\gamma_{xz}^0(x) \\ w(x, z) = w^0(x) \end{array} \right\} \quad (4.8)$$

$$\gamma(x) = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} = -w''_x + \phi'(z)\gamma_{xz}^0 + w''_x(x) \quad (4.9)$$

$$\gamma(x) = \phi'(z)\gamma_{xz}^0 \quad (4.10)$$

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

$$\Phi'(z)|_{z = \pm h/2} = 0 \quad (4.11)$$

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.

Selon l'expression de la fonction de gauchissement quel que modèles de $\psi(z)$ sont présentes dans la littérature:

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

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

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

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

Le modèle de puissance avec l'approche de (PSDBT) :

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

Le modèle exponentiel propose par (ESDBT) :

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

Le modèle trigonométrique :

$$\psi(z) = \frac{h}{\pi} \sin \frac{\pi z}{h} \quad (4.16)$$

Avec h : épaisseur de la poutre.

IV.3 Les poutres composites renforcées par des nanotubes de carbone à gradation fonctionnelle

Notre étude est constituée d'un mélange de SWCNT et matrice polymère. Soutenu par la fondation élastique kerr.

En utilisant la règle du modèle de mélange, le module d'Young effectif et le module de cisaillement obtenus à partir d'un mélange de SWCNT et d'une matrice polymère isotrope peuvent être exprimés comme suit [Ungbhakorn 2013] :

$$E_{11} = \eta_1 V_{cnt} E_{11}^{cnt} + V_p E^p \quad (4.17)$$

$$E_{22} = \eta_2 \frac{E_{22}^{cnt} E^p}{V_p E_{22}^{cnt} + V_{cnt} E^p} \quad (4.18)$$

$$G_{12} = \eta_3 \frac{G_{12}^{cnt} G^p}{V_{cnt} G^p + V_p G_{12}^{cnt}} \quad (4.19)$$

Où $E_{11}^{cnt}, E_{22}^{cnt}, E^p$ et G_{12}^{cnt}, G^p indiquent le module d'Young et le module de cisaillement des SWCNT et de la matrice polymère, respectivement. Cette règle inclut les paramètres d'efficacité des NTC (η_1, η_2, η_3) afin de tenir compte des propriétés des matériaux qui dépendent de l'échelle. [Yas et Samadi (2012)]

$\eta_1 = 1.2833$ and $\eta_2 = \eta_3 = 1.0566$ for the case of $V_{cnt}^* = 0.12$

$\eta_1 = 1.3414$ and $\eta_2 = \eta_3 = 1.7101$ for the case of $V_{cnt}^* = 0.17$

$\eta_1 = 1.3238$ and $\eta_2 = \eta_3 = 1.7380$ for the case of $V_{cnt}^* = 0.28$

La densité de masse (ρ) et le coefficient de Poisson (ν) des poutres s'écrivent comme suit

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

$$\nu_{12} = V_{cnt} \nu_{12}^{cnt} + V_p \nu^p \quad (4.20.b)$$

$$V_{cnt} + V_p = 1 \quad (4.20.c)$$

Où ν_{12}^{cnt}, ν^p , et ρ^{CNT}, ρ^p sont des coefficients de Poisson et les densités des NTC et des polymères Respectivement.

Quatre modèles différents de renforcement sur les sections transversales sont prises en compte dans cette étude, comme l'indique la (figure IV.3) . la fonction de distribution des nanotubes de carbone est comme suit :

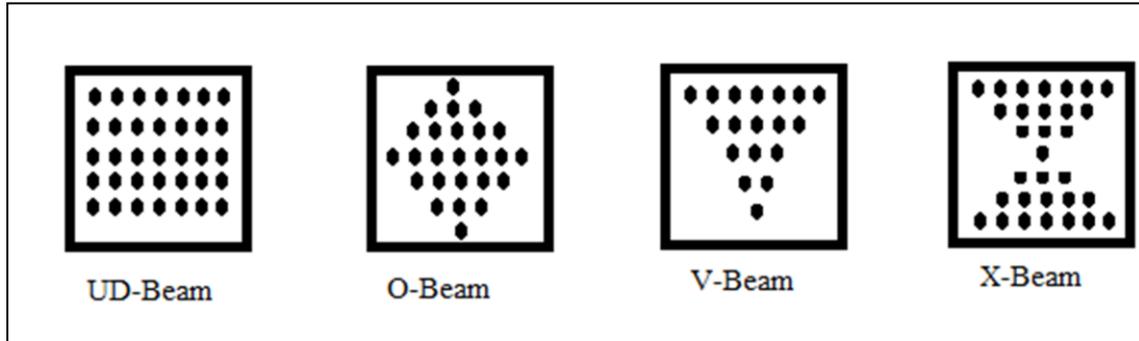


Figure IV.3 Des sections transversales de différents modèles de renforcement

$$V_{cnt} = \begin{cases} V_{cnt}^* & \text{pour la poutre UD-CNT} \\ 2 \left(1 - 2 \frac{|z|}{h} \right) V_{cnt}^* & \text{pour la poutre O-CNT} \\ 4 \frac{|z|}{h} V_{cnt}^* & \text{pour la poutre X-CNT} \\ 2 \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h} \right) V_{cnt}^* & \text{pour la poutre V-CNT} \end{cases}$$

Où V_{cnt}^* est la fraction volumique considérée des NTC, qui peut être déterminée à partir de la équation suivante :

$$V_{cnt}^* = \frac{W_{cnt}}{W_{cnt} + \left(\rho^{cnt} / \rho^p \right) (1 - W_{cnt})} \tag{4.21}$$

Où W_{cnt} est la fraction de masse des NTC. D'après l'équation (IV-5) les poutres O-CNT, X-CNT et V-CNT sont des types de poutres à gradation fonctionnelle dont les constituants matériels sont variés continuellement dans leurs épaisseurs .tandis que l'UD-Beam a uniformément distribué les CNT renforcement. [Yas and Samadi 2012]

IV.4 Théorie et formulations :

IV.4.1 Cinématique et équations constitutives :

Dans ce chapitre on a suivre le model de la théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé (HSDT) ,(la théorie raffinée) .

Cette théorie basée sur le principe ; qu'après déformation, la section plane ne reste ni plane ni perpendiculaire par rapport à la ligne moyenne de la poutre.

Le déplacement transversal de tout point de la poutre est donné comme suit :

$$\begin{cases} u(x, z, t) = u_0 - z \frac{\partial w_b}{\partial x} - f(z) \frac{\partial w_s}{\partial x} \\ w(x, z, t) = w_b(x, t) + w_s(x, t) \end{cases} \quad (4.22)$$

u_0 , $u(x, z, t)$ et $w(x, z, t)$ et sont respectivement le déplacement axial (suivant l'axe X) et transversal (suivant l'axe Z) ou dite encore la flèche.

w_b et w_s sont les composantes des déplacements de flexion et de cisaillement dans le plan médian de la poutre. Dans cet ouvrage, la fonction de forme $f(z)$ est choisie basée sur une fonction trigonométrique comme suit [Tagrara2015]

$$f(z) = z - \frac{5}{4} z \left(1 - \frac{4z^2}{3h^2}\right) \quad (4.23)$$

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

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_b}{\partial x^2} - f(z) \frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2} \\ \gamma_{xz} = g(z) \frac{\partial w_s}{\partial x} \end{cases} \quad (4.24)$$

$$g(z) = 1 - \frac{df(z)}{dz} \quad (4.25)$$

ou $x, z, w, \varepsilon_x, \gamma_{xz}$ sont : La coordonnée longitudinale , La coordonnée mesuré à partir de l'axe neutre du nanotube. Le déplacement transversal. La déformation normale. La déformation transversale de cisaillement, respectivement. Et on a la relation Contrainte-Déformation (Loi de Hooke) :

$$\begin{cases} \sigma_x = Q_{11}(z) \varepsilon_x \\ \tau_{xz} = Q_{55}(z) \gamma_{xz} \end{cases} \quad (4.26.a)$$

$$\begin{cases} Q_{11}(z) = \frac{E_{11}(z)}{1-\nu^2} \\ Q_{55}(z) = G_{12}(z) \end{cases} \quad (4.26.b)$$

Le principe de "Hamilton" est utilisé pour dériver les équations du mouvement. Il sert à trouver l'équation d'équilibre de la vibration du nanotube de carbone. Ce principe peut être énoncé pour une vibration libre sous une forme analytique générale

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta U + \delta V + \delta K) dt = 0 \tag{4.27}$$

δU : la variation virtuelle de l'énergie de déformation. δV : la variation virtuelle de l'énergie potentielle δK : la variation virtuelle de l'énergie cinétique

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

$$\begin{aligned} \delta U &= \int_0^L \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_x \delta \epsilon_x + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz}) dz dx \\ &= \int_0^L (N \frac{d\delta u_0}{dx} - M_b \frac{d^2 \delta w_b}{dx^2} - M_s \frac{d^2 \delta w_s}{dx^2} + Q \frac{d\delta w_s}{dx}) dx \end{aligned} \tag{4.28}$$

Les résultantes des contraintes N, Mb, Ms, Q sont définies comme suit

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

Le travail virtuel effectué (δV), par la charge transversale (q), et la densité de la force de réaction de la fondation f_e peuvent être exprimés comme suit :

$$\delta V = - \int_0^L [(q - f_e)(\delta w_b + \delta w_s)] dx \tag{4.29}$$

Dans cette étude, on suppose que les poutres CNTRC reposent sur la fondation élastique de Kerr composée de deux couches élastiques interconnectées par une couche de cisaillement (Kerr 1965, Vancauwelaert et al. 2002). Ainsi, l'énergie potentielle virtuelle résultant de la fondation élastique doit être prise en compte dans cette étude

Où la force de réaction de la fondation est donnée comme :

$$f_e = \left(\frac{K_l}{\frac{K_l}{K_u} + 1} \right) (w_b + w_s) - \left(\frac{K_s}{\frac{K_l}{K_u} + 1} \right) \frac{\partial^2}{\partial x^2} (w_b + w_s) \tag{4.30}$$

Où Kl, Ku et Ks sont les constantes de rigidité des couches inférieure, supérieure et de cisaillement, respectivement, de la fondation élastique de Kerr, qui peuvent être exprimées en paramètres sans dimension :

$$K_u = \beta_u \frac{D_{00}}{L^2} \quad (4.31.a)$$

$$K_l = \beta_l \frac{D_{00}}{L^2} \quad (4.31.b)$$

$$K_s = \beta_s D_{00} \quad (4.31.c)$$

Où β_u et β_s sont les facteurs correspondants de la constante du ressort. D_{00} est la rigidité en extension d'une poutre homogène constituée d'un matériau matriciel pure

L'énergie cinétique virtuelle du système peut être exprimée comme suit :

$$\begin{aligned} \delta K &= \int_0^L \int_{-h/2}^{h/2} \rho(z) [\dot{u} \delta \dot{u} + \dot{w} \delta \dot{w}] dz dx \\ &= \int_0^L \left[I_0 (\dot{u}_0 \delta \dot{u}_0 + (\dot{w}_b + \dot{w}_s) (\delta \dot{w}_b + \delta \dot{w}_s)) - I_1 \left(\dot{u}_0 \frac{d\delta w_b}{dx} + \frac{d\dot{w}_b}{dx} \delta \dot{u}_0 \right) + I_2 \left(\frac{d\dot{w}_b}{dx} \frac{d\delta w_b}{dx} \right) \right. \\ &\quad \left. - J_1 \left(\dot{u}_0 \frac{d\delta \dot{w}_s}{dx} + \frac{d\dot{w}_s}{dx} \delta \dot{u}_0 \right) + J_2 \left(\frac{d\dot{w}_b}{dx} \frac{d\delta \dot{w}_s}{dx} + \frac{d\dot{w}_s}{dx} \frac{d\delta \dot{w}_b}{dx} \right) + K_1 \left(\frac{d\dot{w}_s}{dx} \frac{d\delta \dot{w}_s}{dx} \right) \right] dx \end{aligned}$$

(4.32)

Où la convention de point (·) indique la dérivation par rapport à la variable temporelle t ; $\rho(z)$ est la masse volumique ; et ($I_0, I_1, J_1, I_2, J_2, K_2$) sont les inerties de masse définies comme :

$$(I_0, I_1, J_1, I_2, J_2, K_2) = \int_0^L (1, z, f, z^2, zf, f^2) \rho(z) dz$$

En substituant les expressions de δU , δV et δK des Eqs. (4.28), Eqs. (4.29) et (4.32), dans l'Eq.(4.27) et en intégrant par parties en fonction des variables d'espace et de temps, et en rassemblant les coefficients de δu_0 , δu_b et δu_s on obtient les équations de mouvement suivantes de la poutre CNTRC

$$\begin{cases} \delta u_0 : \frac{dN}{dx} = I_0 \ddot{u}_0 - I_1 \frac{d\ddot{w}_b}{dx} - J_1 \frac{d\ddot{w}_s}{dx} \\ \delta w_b : \frac{d^2 M_b}{dx^2} + N_{x0} \frac{d^2(w_b + w_s)}{dx^2} + q - f_e = I_0 (\ddot{w}_b + \ddot{w}_s) + I_1 \frac{d\ddot{u}_0}{dx} - I_2 \frac{d^2 \ddot{w}_b}{dx^2} - J_2 \frac{d^2 \ddot{w}_s}{dx^2} \\ \delta w_s : \frac{d^2 M_s}{dx^2} + \frac{dQ}{dx} + N_{x0} \frac{d^2(w_b + w_s)}{dx^2} + q - f_e = I_0 (\ddot{w}_b + \ddot{w}_s) + J_1 \frac{d\ddot{u}_0}{dx} - J_2 \frac{d^2 \ddot{w}_b}{dx^2} - K_1 \frac{d^2 \ddot{w}_s}{dx^2} \end{cases} \quad (4.33)$$

À partir des relations ci-dessus, toutes les résultantes des contraintes peuvent être écrites sous la forme de composantes de rigidité du matériau et de déplacements comme suit :

$$\begin{cases} N = A_{11} \frac{du_0}{dx} - B_{11} \frac{d^2 w_b}{dx^2} - B_{11}^s \frac{d^2 w_s}{dx^2} \\ M_b = B_{11} \frac{du_0}{dx} - D_{11} \frac{d^2 w_b}{dx^2} - D_{11}^s \frac{d^2 w_s}{dx^2} \\ M_s = B_{11}^s \frac{du_0}{dx} - D_{11}^s \frac{d^2 w_b}{dx^2} - H_{11}^s \frac{d^2 w_s}{dx^2} \\ Q = A_{55}^s \frac{dw_s}{dx} \end{cases} \quad (4.34)$$

La rigidité de la poutre peut être définie comme suit :

$$\begin{cases} (A_{11}, B_{11}, D_{11}) = \int_{-h/2}^{h/2} (1, z, z^2) dz \\ (B_{11}^s, D_{11}^s, H_{11}^s) = \int_{-h/2}^{h/2} (f(z), zf(z), f^2(z)) dz \\ A_{55}^s = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{55} [g(z)] dz \end{cases} \quad (4.35)$$

En substituant l'expression de l'Eq. (4.34) des résultantes des contraintes dans l'Eq. (4.33), on obtient

$$\begin{cases} A_{11} \frac{d^2 u_0}{dx^2} - B_{11} \frac{d^3 w_b}{dx^3} - B_{11}^s \frac{d^3 w_s}{dx^3} = I_0 \ddot{u}_0 - I_1 \frac{d\ddot{w}_b}{dx} - J_1 \frac{d\ddot{w}_s}{dx} \\ B_{11} \frac{d^3 u_0}{dx^3} - D_{11} \frac{d^4 w_b}{dx^4} - D_{11}^s \frac{d^4 w_s}{dx^4} + N_{x0} \frac{d^2(w_b + w_s)}{dx^2} + q - f_e = I_0 (\ddot{w}_b + \ddot{w}_s) + I_1 \frac{d\ddot{u}_0}{dx} - I_2 \frac{d^2 \ddot{w}_b}{dx^2} - J_2 \frac{d^2 \ddot{w}_s}{dx^2} \\ B_{11}^s \frac{d^3 u_0}{dx^3} - D_{11}^s \frac{d^4 w_b}{dx^4} - D_{11}^s \frac{d^4 w_s}{dx^4} + \frac{d^2 w_s}{dx^2} + N_{x0} \frac{d^2(w_b + w_s)}{dx^2} + q - f_e = I_0 (\ddot{w}_b + \ddot{w}_s) + J_1 \frac{d\ddot{u}_0}{dx} - J_2 \frac{d^2 \ddot{w}_b}{dx^2} - K_1 \frac{d^2 \ddot{w}_s}{dx^2} \end{cases} \quad (4.36)$$

IV.5 Les solutions analytiques:

La méthode de la solution Navier est utilisée pour obtenir les solutions analytiques d'un a pris en charge la poutre de la CNTRC. La solution est supposée être de la forme :

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

Où U_m , W_{bm} , et W_{sm} sont des paramètres quelconques à déterminer, ω est la fréquence propre associé au même mode propre, et $\lambda = m\pi / L$

En substituant les développements de (u_0, w_b, w_s) et q des Eqs.(24) et (25a) dans les équations du mouvement Eq.(23), les solutions analytiques peuvent être déterminées à partir des équations suivantes :

$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{pmatrix} - \omega^2 \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_m \\ W_{bm} \\ W_{sm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.38)$$

Où

$$S_{11} = A_{11}\lambda^2; \quad S_{12} = -B_{11}\lambda^3; \quad S_{13} = -B_{11}^s\lambda^3 \quad S_{22} = D_{11}\lambda^4 + \left(\frac{K_l}{K_l/K_u + 1}\right) + \left(\frac{K_s}{K_l/K_u + 1}\right)\lambda^2;$$

$$S_{23} = D^s_{11}\lambda^4 + N_{x0}\lambda^2 + \left(\frac{K_l}{K_l/K_u + 1}\right) + \left(\frac{K_s}{K_l/K_u + 1}\right)\lambda^2; \quad S_{33} = H^s_{11}\lambda^4 + A_{35}\lambda^2 + \left(\frac{K_l}{K_l/K_u + 1}\right) + \left(\frac{K_s}{K_l/K_u + 1}\right)\lambda^2;$$

$$m_{11} = I_0; \quad m_{12} = -I_1\lambda, \quad m_{13} = -J_1\lambda, \quad m_{22} = I_0 + I_1\lambda^2, \quad m_{23} = I_0 + J_1\lambda^2, \quad m_{33} = I_0 + K_1\lambda^2.$$

$$\bar{\omega} = \omega h \sqrt{I_{00}/D_{00}},$$

Où

$$D_{00} = \int_{-h/2}^{h/2} E_0^p / (1 - \nu_p^2), \quad I_{00} = \int_{-h/2}^{h/2} \rho_0^p$$

IV.6 Conclusion :

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

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

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

Chapitre V :

Résultats et discussion

V.1 introduction :

Le but de ce chapitre est de présenter et de discuter d’une part les résultats de l’analyse de la vibration libre des poutres FG-CNT avec la pris en compte de l’effet de la porosité, et d’autre part la fondation élastique type keer

V.2 Analyse de la vibration des poutres CNTRC

Dans cette section les résultats numérique des comportements de vibration des poutres CNTRC, sont présentées et discutées. Les caractéristiques matériels effectives des poutres CNTRC a température ambiante employée tout au long de ce travail sont données comme suit, le polymère (PMMA) est utilisé comme matrice est ces propriété matérielles sont : $E^p=2.5GPa, \rho^p = 1190Kg / m^3$

Pour le matériau utilisé pour renforcer le matrice polymère, les nanotubes de carbone type armchair (10,10) est choisi avec les propriétés suivantes

$$E_{11}^{cnt} = 600, E_{22}^{cnt} = 10GP a, \nu^{cnt} = 0.19, \rho^{cnt} = 1400Kg / m^3, G_{12}^{cnt} = 600GPa$$

Tableau V.1 : comparaison des différentes fréquences pour différents types des poutresCNTRC L/h=15, $V_{cnt}^* = 0.12$

Fondation	distributions	[Wattanasakulpong et Ungbhakorn 2013] FSDT	[Wattanasakulpong et Ungbhakorn 2013] TSDT	[Yas et Samadi 2012]	[Tagrara 2015]	Present
$\beta_l=0$ $\beta_s=0$ $\beta_u=\infty$	UD-CNT	0.9976	0.9749	0.9753	0.9749	0.9745
	O-CNT	0.7628	0.7446	0.7527	0.7446	0.7453
	X-CNT	1.1485	1.1163	1.1150	1.1163	1.1152
	V-CNT	0.8592	0.8443	0.9453	0.8442	0.8447
$\beta_l=0.1$ $\beta_s=0.02$ $\beta_u=\infty$	UD-CNT	1.1339	1.1140	1.1144	1.1140	1.1137
	O-CNT	0.9339	0.9192	0.9258	0.9192	0.9198
	X-CNT	1.2688	1.2397	1.2386	1.2397	1.2387
	V-CNT	1.0142	1.0016	1.0883	1.0015	1.0022

Pour valider les résultats du modèle mathématique des fréquences adimensionnelles, une comparaison entre les résultats obtenus avec ceux de la littérature présentés par [Tagrara 2015 ,Yas et Samadi 2012 ,Ungbhakorn et Wattanasakulpong 2013] est présentés dans le tableau V.1 On voit que les résultats obtenues sont excellents accord avec celle obtenues a partir des résultats précédents en constate également que la distribution O-CNT a le plus faible taux de fréquence tandis que X-CNT le plus élevé.

Tableau V.2 : l'effet de la porosité sur les fréquences adimensionnelles des différentes poutres $L/h=15$, $V_{cnt}^*=0.12$

p	$\beta_L=0, \beta_s=0, \beta_u=\infty$				$\beta_L=0.3, \beta_s=0.04, \beta_u=0.6$			
	UD-CNT	O-CNT	V-CNT	X-CNT	UD-CNT	O-CNT	V-CNT	X-CNT
0	0.9745	0.7453	0.8447	1.1152	1.1842	1.0040	1.0800	1.3025
0.1	0.9787	0.7504	0.8498	1.1172	1.1932	1.0143	1.0900	1.3093
0.2	0.9828	0.7558	0.8550	1.1187	1.2027	1.0255	1.1008	1.3162
0.3	0.9867	0.7615	0.8604	1.1195	1.2128	1.0377	1.1126	1.3232
0.4	0.9902	0.7674	0.8660	1.1192	1.2237	1.0513	1.1255	1.3303
0.5	0.9931	0.7735	0.8716	1.1175	1.2353	1.0666	1.399	1.3374
0.6	0.9948	0.7798	0.8769	1.1136	1.2478	1.0143	1.1561	1.3445

le tableaux V.2 présente l'effet de la porosité sur les fréquences adimensionnelles des poutres. Les valeurs de fréquences fondamentales pour la configuration O-CNT est inférieure à celle obtenue avec les autres configurations. donc La fréquence augmente si la poutre est rigide et diminue si elle est souple.

Tableau V.3 : Les valeurs de fréquence adimensionnelle de la poutre pour les différents types de distributions et valeurs du rapport L/h avec et sans fondation

fondations			$L/h=10$					$L/h=40$			
β_1	β_s	β_u	V-CNT	UD-CNT	O-CNT	V-CNT	X-CNT	UD-CNT	O-CNT	V-CNT	X-CNT
0	0	∞	0.12	1.2563	1.0104	1.3829	1.1287	0.4251	0.3083	0.5107	0.3545
			0.17	1.5671	1.2499	1.7290	1.3951	0.5138	0.3709	0.6181	0.4263
			0.28	1.8162	1.5042	1.9464	1.6434	0.6374	0.4616	0.7616	0.5289
0.3	0	∞	0.12	1.3711	1.1498	1.4880	1.2552	0.6949	0.6302	0.7503	0.6541
			0.17	1.6596	1.3639	1.8133	1.4983	0.7503	0.6607	0.8253	0.6934
			0.28	1.8949	1.5981	2.0200	1.7300	0.8358	0.7109	0.9340	0.7564
0.3	0.04	∞	0.12	1.5089	1.3109	1.6160	1.4045	0.9383	0.8915	0.9801	0.9086
			0.17	1.7740	1.5007	1.9186	1.6241	0.9780	0.9110	1.0366	0.9350
			0.28	1.9936	1.7139	2.1130	1.8376	1.0408	0.9434	1.1212	0.9782
0.3	0.04	0.6	0.12	1.4296	1.2190	1.5422	1.3190	0.8045	0.7494	0.8528	0.7696
			0.17	1.7078	1.4220	1.8576	1.5515	0.8518	0.7741	0.9185	0.8021
			0.28	1.9363	1.6469	2.0590	1.7753	0.9261	0.8151	1.0155	0.8550

Le tableau V.3 montre l'influence des différentes fondation élastique , le rapport géométrique et la distribution du renfort. l'augmentation du rapport géométrique entraine une diminution des fréquences adimensionnelles et on observe que les poutres supportés par les fondations élastiques ont des fréquences plus élevé que celle sans fondation.

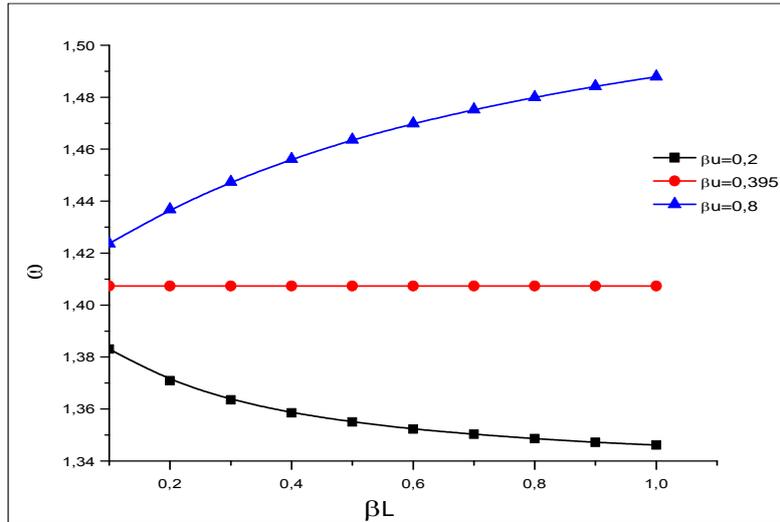


Figure V.1 : L'effet du paramètre Keer sur la fréquence adimensionnelle des poutres en fonction du paramètre Winkler ($P=0.2, \beta_s=0.04, L/h=10, V_{cnt}^* = 0.12$)

la figure V.1 présente L'influence du paramètre Keer sur la fréquence adimensionnelle des poutres en fonction du paramètre Winkler on observe que pour des valeurs inférieure à 0.395 de βu on remarque que La fréquence adimensionnelle diminue avec l'augmentation de paramètre βl . Pour une valeur proche de 0.395 on remarque que la variation du paramètre Winkler n'a pas une influence sur les fréquences adimensionnelles. Pour les valeurs élevés de βu , la fréquence augmente à mesure que la valeur du paramètre βl augmente.

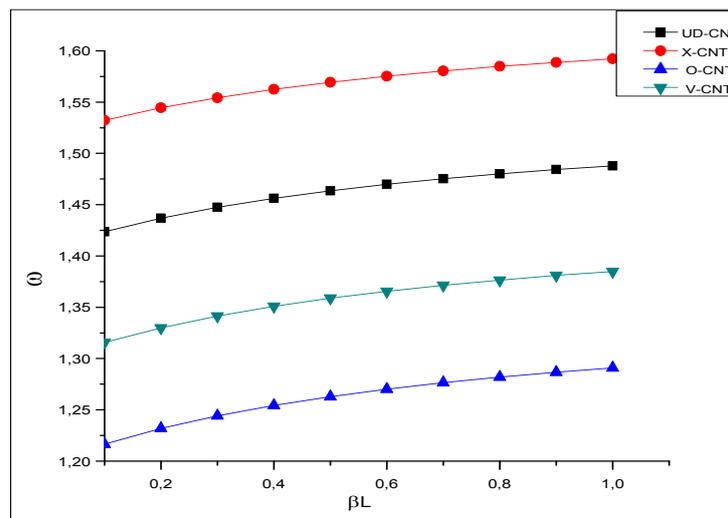


Figure V.2: Effet du paramètre de la fondation Winkler sur les fréquences adimensionnelles des poutres CNTRC ($V_{cnt}^*=0.12, \beta_s = 0.04, \beta u = 0.8, L/h = 10, p = 0.12$).

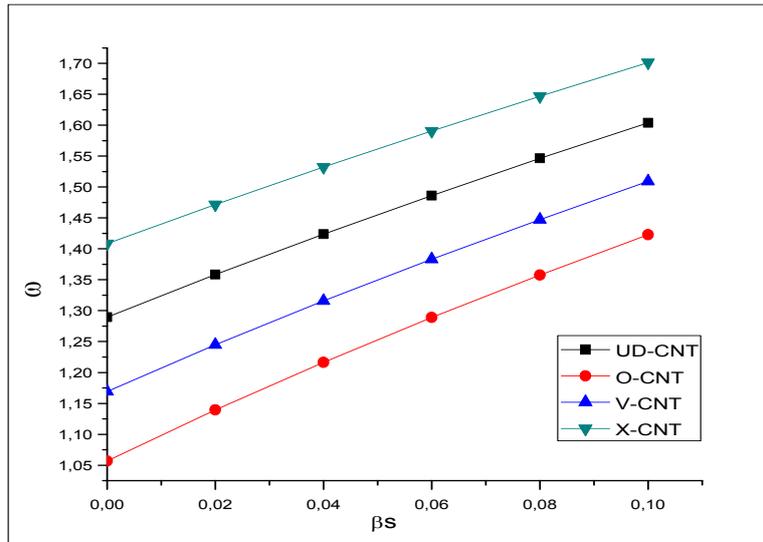


Figure V.3: Effet du paramètre de la fondation Pasternak sur les fréquences adimensionnelles des poutres CNTRC ($V_{cnt}^* = 0.12, \beta_l = 0.1, \beta_u = 0.8, L/h = 10, p = 0.2$).

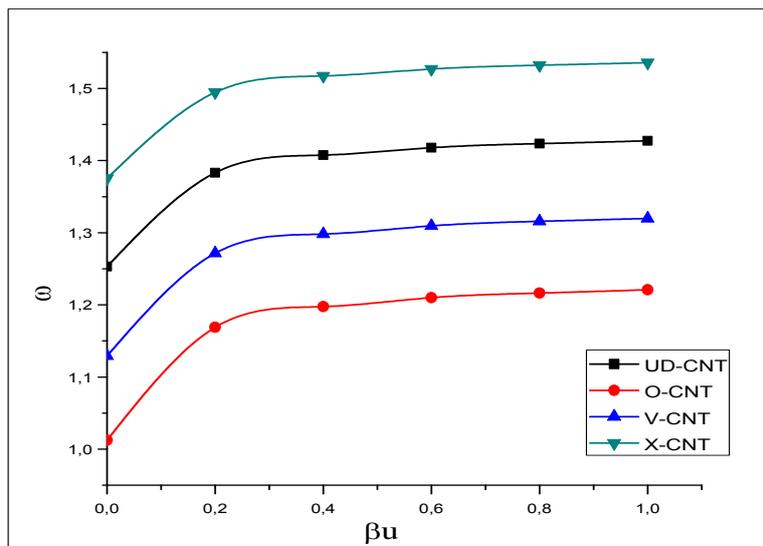
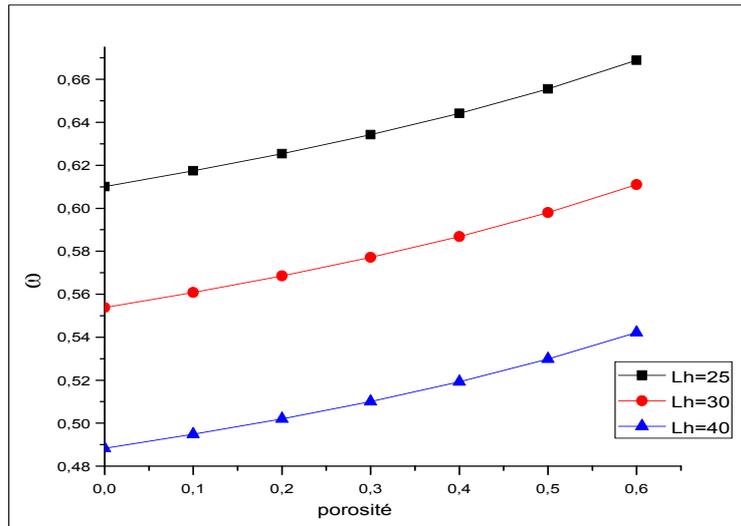


Figure V.4: Effet du paramètre de la fondation Keer sur les fréquences adimensionnelles des poutres CNTRC ($V_{cnt}^* = 0.12, L/h = 10, \beta_l = 0.1, \beta_s = 0.04, p = 0.2$).

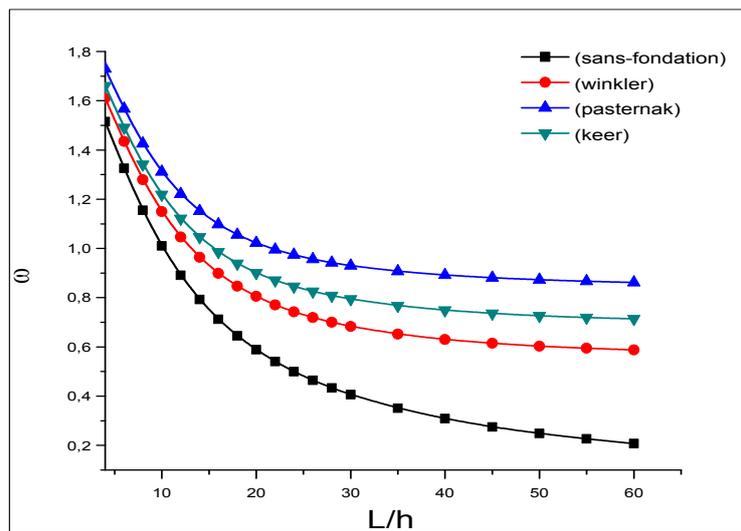
Les figures V.2, V.3 et V.4 montrent respectivement l'influence des trois paramètres le module Winkler, Pasternak et le module de kerr sur la fréquence des différentes types des poutres CNTRC. On observe que les fréquences adimensionnelle augmentent avec l'augmentation des facteurs de la rigidité de la fondation élastique. β_s, β_u et β_l



FiguresV.5 La fréquence adimensionnelle d’une poutre O-CNT en fonction de la porosité avec trois différentes géométries ($V_{cnt}^* = 0.12, \beta_l = 0.1, \beta_s = 0.04, \beta_u = 0.8$)

la figure V.5 montre l’effet de la porosité sur les fréquences adimensionnelles. On voit clairement que les fréquences adimensionnelles augmentent avec l’augmentation de la porosité

La poutre X-CNT donne la plus grande valeur de la fréquence adimensionnelle tandis que la poutre en O-CNT donne la plus petite valeur, les poutres UD-CNT est intermédiaire, on peut dire que la poutre est souple les fréquences adimensionnelles diminuent.



FiguresV.6 La fréquence adimensionnelle d’une poutre O-CNT en fonction du rapport L/h pour différents types de fondations avec ($V_{cnt}^* = 0.12, P = 0.2$)

On observe dans la figure V.6 pour différents modèles de milieu élastique les fréquences adimensionnelles diminuent lorsque le rapport L/h augmente.

De plus, on remarque que la fondation Pasternak et Kerr donnent les plus grandes valeurs de la fréquence adimensionnelles,

Les poutres sans fondation donnent les valeurs les plus petites. En terme de rigidité l'existence de la fondation élastique joue le rôle d'un support et augmente la rigidité de la poutre et par conséquent va augmenter les fréquences adimensionnelles. On peut conclure que la fondation impose sans existence, notamment la fondation de modèle Kerr qui représente une approximation proche de la réalité, par rapport au modèle de Pasternak qui met en contact directe la couche de cisaillement avec la surface de la structure de la poutre, or le modèle de Kerr les sépare avec une couche élastique. En terme de rigidité le modèle de Winkler a un impact faible par rapport aux autres modèles de fondation proposés.

VII.3 conclusion :

Dans ce chapitre on a étudié l'influence de différents paramètres telle que la porosité, la géométrie et les différents paramètres de la fondation élastique sur le comportement vibratoire des poutres poreuses en nanocomposites renforcées par des nanotubes de carbone.

D'après la comparaison des résultats numériques, entre les quatre distributions de nanotubes de carbone (UD-CNT, V-CNT, OCNT, X-CNT) on constate que la X-CNT est la plus rigide parmi les différents types de poutres CNTRC, alors que le O-CNT est le plus souple. Par conséquent cette souplesse va diminuer les fréquences adimensionnelles.

Les valeurs des fréquences adimensionnelles des poutres nanocomposites (ω) diminuent avec l'augmentation du rapport géométrique (L/h).

L'augmentation des paramètres de la fondation élastique nous a donné une augmentation des fréquences. Cette augmentation est attribuée à l'existence de la fondation élastique qui joue le rôle d'un support et augmente la rigidité de la poutre et par conséquent va augmenter les fréquences adimensionnelles.

Cependant, il a été montré que le paramètre de la fondation Pasternak donne des valeurs plus élevées par rapport à celle de Winkler et Kerr.

Pour donner une idée de l'effet de la porosité sur les fréquences adimensionnelles des poutres renforcées, une distribution différente des NTC est considérée. En comparant les résultats, on peut constater que les fréquences adimensionnelles augmentent avec l'augmentation de la porosité. Cette augmentation est attribuée à l'effet de la porosité sur la rigidité de la poutre poreuse.

Enfin, on peut dire que la présente de cette théorie est simple et surtout efficace pour étudier le phénomène de la vibration libre de la poutre poreuse en polymère renforcée par des nanotubes de carbone reposant sur fondation élastique type keel .

Conclusion générale

Conclusion :

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

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

En termes d'analyses de porosité, on constate que les fréquences adimensionnelles de la poutre poreuse renforcée augmente en augmentant la porosité de la poutre en polymère.

On peut dire que la disposition des nanotubes de carbone dans la matrice polymère influe sur la vibration libre, on a trouvé que la distribution des renforts en forme X-CNT rend les poutres plus rigides tandis que la distribution en forme O-CNT les rend plus souples.

Aussi, les valeurs du rapport des fréquences (ω) diminuent avec l'augmentation du rapport (L/h).

Ensuite, la présence du milieu élastique influe sur les fréquences de vibration d'une poutre poreuse. On observe que les poutres supportées par les fondations élastiques ont des fréquences plus élevées que ceux des poutres sans fondation élastique. De plus, les modèles Pasternak et Kerr donnent les plus grandes valeurs de la fréquence par rapport aux autres fondations et ça pour tous les types de renforcement.

Pour les futurs chercheurs, cette étude peut fonctionner comme une base de données. L'objectif est d'élargir et d'améliorer la compréhension de l'utilisation des nanotechnologies. Utilisant des nanotubes de carbone adaptés aux applications civiles.

Après les résultats obtenus et pour mieux cerner le comportement mécanique d'une poutre poreuse en polymère renforcée par des nanotubes de carbone sur une fondation élastique nous envisageons les perspectives suivantes :

- L'utilisation des différentes théories pour l'analyse de la vibration d'une poutre en polymère renforcée par des nanotubes de carbone sous diverses conditions d'appuis.
- L'étude d'autres types de poutres avec des sollicitations différentes
- L'analyse du comportement mécanique de la poutre en polymère renforcée par des nanotubes de carbone sur fondation élastique type keel en utilisant la méthode des éléments finis.

Bibliographie

[A]

[A. Illaik 2013]: Youssef, A. M., Bujdosó, T., Hornok, V., Papp, S., & Dékány, I. (2013). Structural and thermal properties of polystyrene nanocomposites containing hydrophilic and hydrophobic layered double hydroxides. *Applied clay science*, 77, 46-51.

[Abraham 2006] :Abraham, I. (2006). The contradictory spaces of postcolonial techno-science. *Economic and political weekly*, 210-217

[Aurélien2010]: Cayla, A. (2010). Élaboration de détecteurs souples de température: mise en oeuvre et caractérisation de multifilaments à base de polymères immiscibles chargés en nanotubes de carbone (Doctoral dissertation, Lille 1).

[B]

[Balima 2014] :Balima, D. R. (2014). Les Médias publics face aux défis du pluralisme et de la convergence au Burkina Faso. *Les Enjeux de l'Information et de la Communication*, (15/2B), 147

[BELLIFA 2015] :BELLIFA Hichem 2015thèse de doctorat Application de la théorie du gradient de déformation à l'étude de la réponse des structures multi échelles homogènes université Djilali liabes Sidi Bel abbés

[Belmahi 2019]:Etude de la vibration d'un nanotube de carbone situé dans un milieu élastique

[Ben Ammar 2017] : Ben Ammar L., Fakhfakh S., Jbara O., Hadjadj O., Rondot S. Effect of nanoclay

[Ben younes 2016] :Benyounes Anas, Synthèse de nanotubes de carbone dopes a l'azot et leur application catalytique, thèse de doctorat, l'Université Toulouse (2016).

[Bernard, 2007] : Bernard, C. (2007). Propriétés mécaniques des nanotubes de carbone en tant que nanosondes et leur fonctionnalisation par bio-nanoparticules (Doctoral dissertation, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I).

[Blumstein.A 1965] : Blumstein, A. (1965). Polymerization of adsorbed monolayers. II. Thermal degradation of the inserted polymer. *Journal of Polymer Science Part A: General Papers*, 3(7), 2665-2672.

[Bounour 2016] :Bounour-Bouzamouche, W. (2016). Matériaux hybrides nanotubes de carbone/ferromagnétiques: élaboration et propriétés magnétiques statiques (Doctoral dissertation, Sorbonne Paris Cité).

[Brown 1989] : Brown, L. C. (1989). A new examination of classical coarsening theory. *Acta Metallurgica*, 37(1), 71-77.

concentration level on the electrical properties of polypropylene under electron irradiation in a SEM. *J. Micros.* 2017, 265, 322-334.

[C]

[Chandra, 1987] : Chandra S., Madhira R. Madhav , N.G.R.Iyengar, (1987), a new model for nonlinear subgrades. *India MM8-HH*.

[Charlotte BERNARD2007] : Bernard, C. (2007). Propriétés mécaniques des nanotubes de carbone en tant que nanosondes et leur fonctionnalisation par bio-nanoparticules (Doctoral dissertation, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I).

[Chauveau 2010] : Chauveau, V. (2010). Le pouvoir lubrifiant des nanotubes de carbone (Doctoral dissertation, Ecully, Ecole centrale de Lyon).

[Chianget 2001] : Armitage, N. P., Gabriel, J. C., & Grüner, G. (2004). Quasi-Langmuir–Blodgett thin film deposition of carbon nanotubes. *Journal of Applied Physics*, 95(6), 3228-3230.

[Chikwendu 2013]: Chikwendu, M. (2013). Circular consciousness in the lived experience of intersectionality: Queer/LGBT Nigerian diasporic women in the USA. *Journal of International Women's Studies*, 14(4), 34-46.

[D]

[Dahmani.2022]: Faiza, D. A. H. (2022). Etude De L'effets Des Particules Métalliques Sur Les Propriété Electriques Et Thermiques Des Nanocomposites (Doctoral dissertation, faculté des sciences et de la technologie univ bba).

[Dresselhaus 2005] :Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., Saito R., Jorio A. Raman spectroscopy of carbon nanotubes, *Physics Reports*, 409 (2) : 47-99, 2005

[H]

[hachani 2017] :salah eddine hachani 2017 thèse de doctorat Synthèse et caractérisation d'un nouveau materiau composite a base de polystyrene université Mohammed khider -Biskra

[Hanana 2020] :Hanana, M. (2020). Fonctionnalisation de nanotubes de carbone par une approche non covalente pour l'électrocatalyse et l'optoélectronique (Doctoral dissertation, Université Paris-Saclay)

[Hanin2021] :Hanin Kamaledine, H. (2021). Fonctionnalisation de Nanotubes pour la fabrication de batteries Lithium/Soufre et Lithium/Organique (Doctoral dissertation, Université Paris-Saclay).

[HetVenyi, 1961]. HetVenyi M. (1961), Beams on elastic foundations, University of Michigan Press, Ann Arbor

[Houdy2001] : P. Houdy, C. Dupas et M. Lahmani, « Les Nanosciences. Tome 1 : Nanotechnologies et Nanophysique » La collection Echelles, Editions Belin (2001)s

[I]

[Iancu 2014] :Iancu-Bogdan Teodoru (2014),analysis of beams on elastic foundation :the finite deffrences approach,Georghe Asachi Technical University of Lasi1-9.

[Iancu, 2008] :Iancu –Bogdan ,Teodoru ;Vasile Musat (2008),Beam elements on linear variable two-parameter elastic foundation,Bull .Inst .Polit .lasi,t.LIV(LVIII),f.2.

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

[Ishigami 2000] :Ishigami, M., Cumings, J., Zettl, A., & Chen, S. (2000). A simple method for the continuous production of carbon nanotubes. *Chemical physics letters*, 319(5-6), 457-459.

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

[J]

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

[Journet 1997] :Journet, C., Maser, W. K., Bernier, P., Loiseau, A., de La Chapelle, M. L., Lefrant, D. S., ... & Fischer, J. E. (1997). Large-scale production of single-walled carbon nanotubes by the electric-arc technique. *nature*, 388(6644), 756-758.

[K]

[kal 2014] : Kal, N. (2014). Etude expérimentale de comportement mécanique de PMMA à l'état vierge et après vieillissement par UV (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou).

[Kawasumi 1997] : M. Kawasumi, N. Hasegawa, M. Kato, A. Usuki, A. Okada, Preparation and mechanical properties pf polypropylene-clay hybrids, *Macromol.*, 30, p.6333-6338, (1997)

[Kim2007] : K. J. Kim, M. Mojarrad, and M. Shahinpoor, Chapter 4. Ionic Polyacrylonitrile Chemoelectromechanical Artificial Muscles/Nanomuscles, **In** : Artificial Muscles, Applications of Advanced Polymeric Nanocomposites, Taylor & Francis, p. 119–220, 2007.

[L]

[LEDRU 2009] : Yohann LEDRU 2009 thèse de doctorat TUDE DE LA POROSITE DANS LES MATERIAUX COMPOSITES STRATIFIES AERONAUTIQUE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE.

[Lee 1998] : H.P Lee, dynamique response of a Timoshenko beam on a Winkler foundation subjected to amoving mass .applied Acoustics55(1998)

[M]

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

[Maxime ,2013] : Influence de l'état de dispersion des nanotubes de carbone 2013.

[N]

[Neelgund 2011] :G.M. Neelgund, et A. Oki, J. Nanosci. Nanotechnol. 11, 3621(2011)].

[Nicolas debski2014] :Debski, N. (2014). Fibres obtenues à partir de nanotubes de carbone verticalement alignés: élaboration et propriétés (Doctoral dissertation, Paris 11).

[P]

[Peigney 2001] :Peigney, Ch. Laurent, E. Flahaut, R.R. Bacsa, et A. Rousset, Carbon, 507(2001).

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

[R]

[REACH 2011]:[REACH for Polymers, meilleures méthodes d'essai et techniques disponibles©2011,Smithers Rapra, (2011). Saida,(2017).

[S]

[S.pacchini 2008] : Pacchini, S. (2008). Etude des potentialités des nanotubes de carbone dans le domaine hyperfréquence: Application à l'élaboration de matériaux nanocomposites et contribution à la miniaturisation de composants électromécaniques (NEMS) (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III).

[Schaefer 1994] :SCHAEFER, C. Soils and Paleosols from northeastern Roraima, Amazonia: geomorphology, genesis and lanscape evolution. Reading, University of Reading, 1994. 353p (Doctoral dissertation, Tese de Doutorado).

[Schoeller 1955]: Schoeller, H. (1955). Géochimie des eaux souterraines: application aux eaux des gisements de pétrole.

[Semaan 2010] : Chantal SEMAAN thèse de doctorat POLYMÈRES NANOSTRUCTURÉS À BASE DE NANOTUBES DE CARBONE université de BORDEAUX 1.

[Seyni 2008] : Seyni, A. (2008). Propriétés physico-chimiques et d'usage de matériaux composites à charge dégradable produits par co-broyage (Doctoral dissertation).

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

[Sophie Versa Vaud 2012] : Versavaud, S. (2012). Mise en forme des thermoplastiques chargés de nanotubes de carbone: application à la microinjection de Polyamide 12 (Doctoral dissertation, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM).

[Suenaga2000] :K. Suenaga, M. Tencé, C. Mry, C. Colliex, H. Kato, T. Okazaki, H. Shinohara, K. Hirahara, S.Bandow, et S. Iijima, Science 290, 2280(2000)].

[Syed Awais et,al2021] : Rouf, S. A., Usman, Z., Masood, H. T., Majeed, A. M., Sarwar, M., & Abbas, W. (2021). Synthesis and Purification of Carbon Nanotubes. In Carbon nanotubes-redefining the world of electronics. London: IntechOpen.

[T]

[Tagrara 2016]: TAGRARA, S. H. (2016). Etude de la flexion statique, le flambement et la vibration des structures composites renforcées par des nanotubes de carbone (Doctoral dissertation).

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

[Trochu et al., 2006] : F. Trochu, E. Ruiz, V. Achim, S. Soukane, ‘Advanced numerical simulation of liquid composite molding for process analysis and optimization’, Composites: Part A, Vol 37, pp 890-902, 2006

[U]

[unbhakorn 2013]:Wattanasakulpong, N., & Ungbhakorn, V. (2013). Analytical solutions for bending, buckling and vibration responses of carbon nanotube-reinforced composite beams resting on elastic foundation. Computational Materials Science, 71, 201-208.

[V]

[Vaia 1993] : R.A. Vaia, H. Ishii, E.P. Giannelis, Synthesis and properties of two-dimensional nanostructures by direct intercalation of polymer melts in layered silicates, Chem. Mater., 5, p. 1694-1696, (1993)

[Veluri 2018] : Veluri S., Behera K., Chang Y. H., Chui F. C. Selective localization of carbon nanotube and organoclay- in biodegradable poly(butylene succinate)/ polylactide blend-based nanocomposites with enhanced rigidity, toughness and electrical conductivity. Compos. part A : Appl. Sci. Manuf. 2018, 114, 30-39

[Vézeau 2010] : Vézeau B. (2010). Caractérisation mécanique de composites LMDPE/bois en vue d'une application en rotomoulage (Mémoire M.Sc.), Université Laval, Québec, 152 p.

[Vialla 2014] :Vialla, F. (2014). Interaction entre les nanotubes de carbone et leur environnement physico-chimique: vers un contrôle des propriétés optiques (Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI).

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

[Wei 2001]: Wei B.Q., Vajtai R., Ajayan P.M. Reliability and current carrying capacity of carbon nanotubes, App. Phys. Lett., 79 : 1172-1174, 2001

[X]

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

[Y]

[Yang et al, 2004] : J. Yang, Y. Jia, S. Sun, D. Ma, T. Shi, L. An, ‘Mesoscopic simulation of the impregnating process of unidirectional fibrous preform in resin transfer molding’, Materials Science and Engineering, pp 515-520, 2006.

[yas and samadi 2012] :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.

[Yin 1999] :Y. Yin, T. Mays, et B. Mc Enaney, Langmuir 15, 8714(1999)]

[Z]

[ZEMRI 2016] : ZEMRI AMINE 2016 thèse de doctorat Etude comparative entre la théorie locale et non locale d'élasticité: Application aux structures homogènes université Djilali liabes Sidi Bel abbés .

[Zhang 2008] :Zhang Junhao. (2008). Synthèse, caractérisation et propriétés du carbone et des composites contenant du carbone (thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Chine.

[Zidour 2012] :Etude de comportement mécanique des nanotubes en carbone entourés par une matrice polymère thèse de doctorat .