

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES



FACULTE DES SCIENCES EXACTES

DEPARTEMENT MATERIAUX ET DEVELOPPEMENT DURABLE

THESE DE DOCTORAT

Filière : Physiques

Spécialité : Physique Energétique et sciences des Matériaux

Sujet de thèse

*Analyse du comportement mécanique des
nano-composites à base de nanotubes de carbone.*

Présenté par : M^r SI TAYEB Tayeb

Soutenu le 09/03/2021 devant le jury composé de :

Président	: BENZAIER Abdelnour	Professeur	UDL SIDI BEL ABBES
Directeur de thèse	: ZIDOUR Mohamed	Professeur	UIK TIARET
CO- Directeur de thèse	: HEIRECHE Houari	Professeur	UDL SIDI BEL ABBES
Examineur	: SEMMAH Abdelwahed	MCA	UAZ RELIZANE

Année universitaire 2020-2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

Je dédie ce travail à : Mes parents.

Surtout mon Père Qui m'ont été d'un grand soutien autant matériel que moral et qui n'ont ménagé aucun effort pour me venir en aide.

À tous mes frères : Mohamed et islam et ma Sœurs.

Qui eux aussi du plus petit au plus grand m'ont soutenu tout au long du temps réservé à la conception de mon présent Travail et qui m'ont souhaité bonne chance et bonne réussite.

À toute la famille SI TAYEB et SAADI.

À tous mes enseignants durant mon cycle d'étude universitaire.

À Tout mes chers amis

À Tous mes collègues pendant la période d'étude sans exception,

À tous ceux qui me sont chers...

SI TAYEB TAYEB

Remerciements

Tout d'abord, je remercie le bon Dieu qui m'a doté de la volonté, du courage et surtout de la patience pour produire ce modeste travail et qui m'a aidé à faire face à toutes les difficultés rencontrées lors de son élaboration.

*Je remercie profondément mon encadreur, **Mr M.ZIDOUR** Professeur auprès de l'université Ibn Khaldoune de TIARET, pour m'avoir fait confiance et avoir bien voulu se lancer avec moi dans la nanotechnologie.*

Merci pour ta disponibilité et tes conseils avisés, sans lesquels ce travail ne serait pas arrivé là ou il en est aujourd'hui.

*Je tiens à remercier particulièrement **Mr A.BENZAIR** Professeur auprès de l'université de Djilali liabes de Sidi-Bel-Abbès, qui a accepté de présider le jury.*

*Je remercie vivement **Mr H.HEIRECHE** Professeur auprès de l'université de Djilali liabes de Sidi-Bel-Abbès, pour son aide et son soutien jusqu'à l'aboutissement de ce travail et m'honorer de faire partie du jury.*

*De sincères remerciements également à **Mr A.SEMMAH** Maître de conférences de l'université de Ahmed Zabana de Relizene, d'avoir accepté de faire partie du jury.*

Je tiens en particulier et avant tout à remercier mes parents, sans lesquels je n'aurai pu terminer ce travail et qui m'ont toujours apporté tout leur soutien et leur appui. Ainsi ne saurons oublier de remercier

*Mon collègue **Mr. BENAHMED Abdelillah** de nous avoir leurs conseils judicieux.*

Enfin je tiens aussi à remercier à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour réaliser ce travail.

Résumé

Ce présent travail porte sur l'analyse de flambement des plaques polymères renforcées par des nanotubes de carbone soumis à des forces uni-axiales et bi-axiales dans le plan en utilisant une théorie d'ordre élevé. Cette théorie tient en compte les effets de cisaillement transversaux et la distribution parabolique des contraintes de cisaillement transversal à travers l'épaisseur de la plaque, de même elle satisfait les conditions aux limites des contraintes nulles sur les surfaces supérieure et inférieure de la plaque. Les équations du mouvement associées à la présente théorie sont obtenues en utilisant le principe des déplacements virtuels. (Principe de Hamilton) pour analyser la charge critique de flambement d'une plaque en polymère renforcée par des nanotubes de carbone. Les équations du modèle sont dérivées et les charges critiques de flambement en compression axiale sont obtenues avec différentes dispositions des nanotubes de carbone dans la matrice polymère, La validité de la présente théorie est vérifiée en comparant les résultats déterminés par cette théorie à d'autres résultats disponibles dans la littérature. Les effets des différents paramètres tels que, les fractions volumiques, les rapports géométriques de la plaque, le nombre de mode et le type de renforcement par des nanotubes de carbone ont été analysés et discutés.

A travers les résultats trouvés, on peut conclure que la distribution parabolique de type (X-CNT-NL) rend la plaque plus rigide que les autres types et qui nous donne une charge critique de flambement très importante.

Mots clés : Nanotube ; cisaillement ; nanocomposite; Hamilton; distribution parabolique ; flambement

Abstract

This present work focuses on the analysis of buckling of polymeric plates reinforced by nanotubes of carbon subjected to uni-axial and bi-axial forces in the plane using a high order theory. This theory takes into account the transverse shear effects and the parabolic distribution of transverse shear stresses through the thickness of the plate, as well as it satisfies the boundary conditions of zero stresses on the upper and lower surfaces of the plate. The equations of motion associated with the present theory are obtained by using the principle of virtual displacements (Hamilton's principle) to analyze the critical buckling load of a polymer plate reinforced with carbon nanotubes. The model equations are derived and the critical axial compressive buckling loads are obtained with different arrangements of carbon nanotubes in the polymer matrix. The validity of this theory is verified by comparing the results determined by this theory with other results available in the literature, the effects of different parameters such as, volume fractions, geometric ratios of the plate, number of modes and the type of reinforcement has been analyzed and discussed.

Through the results found, we can conclude that the parabolic type distribution (X-CNT-NL) makes the plate more rigid than the other type and that we give a very important critical buckling load.

Keywords: Nanotube; shear; Nano composite; Hamilton; parabolic distribution; buckling

يركز هذا العمل على تحليل الانبعاج لألواح البوليمر المعززة بواسطة الأنابيب النانوية الكربونية المعرضة لقوى أحادية المحور، وثنائية المحور باستخدام نظرية عالية الترتيب. تأخذ هذه النظرية في الاعتبار تأثيرات القص المستعرض والتوزيع المكافئ لضغوط القص المستعرض من خلال سمك اللوحة، وكذلك تلبية الشروط الحدودية للضغوط الصفرية على الأسطح العلوية والسفلية للوحة. يتم الحصول على معادلات الحركة المرتبطة بهذه النظرية باستخدام مبدأ الإزاحة الافتراضية (مبدأ ها ميلتون). لتحليل حمل الانبعاج الحرج للوحة البوليمر المعززة بالأنابيب النانوية الكربونية يتم اشتقاق معادلات النموذج الانبعاج ويتم الحصول على أحمال الانبعاج المحوري الانضغاطي بترتيبات مختلفة من الأنابيب النانوية الكربونية في مصفوفة البوليمر. يتم التحقق من صحة النظرية الحالية من خلال مقارنة النتائج التي تحدها هذه النظرية بالنتائج الأخرى المتوفرة في الأدبيات، وتأثيرات الخصائص المختلفة مثل، الكسور الحجمية، والنسب الهندسية للوحة، وعدد الأنماط و نوع التعزيز بالأنابيب الكربون النانوية قد تم تحليلها ومناقشتها.

من خلال النتائج التي تم الحصول عليها، يمكننا أن نستنتج أن توزيع نوع القطع المكافئ (X-CNT-NL) يجعل اللوحة أكثر صلابة من الأنواع الأخرى وأنه يحتاج حملاً أكبر لحدوث الانبعاج.

كلمات مفتاحية: أنبوب نانوي، قص؛ مركب نانوي، هاملتون، توزيع قطع مكافئ، الانبعاج

Dédicace	i
Remerciement	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
الملخص	v
Table des matières	vi
Liste des figures et des tableaux	vii
Liste des abréviations	viii
Nomenclature	ix
Introduction générale	1

Chapitre I : Généralités sur les composites et les nano-composite

I.1 Introduction	4
I.2 Différents types de composites.....	4
I.3 Classification des matériaux composites	5
I.4 Constituants des matériaux composites	6
I.4.1 La matrice	6
I.4.2 Le renfort	7
I.4. 2.1 Charges et additifs	8
I.5 Architecture des matériaux composites	9
I.5.1 Monocouche	9
I.5.2 Stratifiée	9
I.5.3 Sandwichs	9
I.6 Domaines d'application des composites	10
I.7 Avantages et inconvénients des composites	12
I.8 Les polymères	13
I.8.1 Classification des polymères	13
I.8.1.1 Les polymères thermoplastiques	13

I.8.1.2 Les polymères thermodurcissables	15
I.8.1.3 Elastomères	16
I.8.2 Utilisation des polymères	16
I.9 Nano composites (Nanotube de carbone/matrice Polymère)	16
I.10 Propriétés des nano composites (polymères /NTC)	16
I.10.1 Propriétés thermiques nanocomposites (NTC/polymère)	17
I.10.2 Propriétés mécaniques des nanocomposites (NTC/polymère)	18
I.10.3 Propriétés électriques des nanocomposites (NTC/polymère)	18
I.11 Procédés d'élaboration des nanocomposites (NTC/polymère).....	19
I.11.1 Techniques de la mise œuvre	19
I.11.1.1 Mélange en solution	20
I.11.1.2 Mélange à l'état fondu	20
I.11.1.3 Polymérisation in situ.....	21
I.11.4 Dispersion des renforts.....	23
I.11.4.1 Utilisation des ultrasons.....	23
I.11.4.2 Dispersion mécanique par tri cylindre.....	24
I.12 Conclusion	25
Chapitre II : Généralité sur les nanotubes de carbone	
II.1 Introduction	27
II.2 Carbone	27
II.2.1 Les formes traditionnelles du carbone	28
II.2.1.1 Le graphite	28
II.2.1.2 Le diamant	28
II.2.2 Les nouvelles formes de carbone	29
II.2.2.1 Fullerènes	29
II.2.2.2 Les nanotubes mono-feuillets (ou mono-parois)	30

II.2.2.3 Les nanotubes multi-feuillets(ou multi-parois) : MultiWalled Carbone Nanotubes MWCNT):.....	32
II.3 Synthèses des nanotubes	33
II.3.1 Méthode arc électrique	33
II.3.2 Méthode d’ablation laser	34
II.3.3 Méthode de dépôt chimique en phase vapeur	35
II.3.4 Décomposition catalytique (Hip Co)	36
II.4 Propriétés des nanotubes de carbone II.6.2 Approche en contraintes	37
II.4.1 Propriétés mécaniques	37
II.4.2 Propriétés thermiques	37
II.4.3 Propriétés électriques	38
II.5 Défaut des nanotubes de carbones	39
II.5.1 Défauts structurels	39
II.6 Purification des nanotubes	42
II.6.1 Les méthodes chimiques	42
II.6.2 Les méthodes physiques	43
II.7 Ouverture des nanotubes.....	44
II.8 Applications des nanotubes de carbone.....	45
II.8.1 Application mécanique.....	45
II.8.2 Application électroniques.....	46
II.8.3 Applications thermiques.....	47
II.8.4 Applications optiques.....	47
II.9 Conclusion	48

Chapitre III : Théorie des plaques et développement mathématique du présent modèle

III.1 Introduction	49
III.2 Définition d'une plaque	49
III.3 Les différentes théories des plaques	49
III.3.1 Théorie classique des plaques minces de Love-Kirchhoff	49
III.3.2 La théorie de déformation en cisaillement du premier ordre.....	50
III.3.3 La théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé.....	51
III.3.3.1 Revue sur les différents modèles de la théorie d'ordre élevé.....	52
III.4 Validité des théories de la plaque.....	53
III.5 Hypothèses de calcul.....	53
III.6 Les différents Types des matériaux.....	54
III.6.1 Matériaux orthotropes.....	54
III.6.1.1 Cas des Plaques Orthotropes.....	54
III.6.2 Matériaux isotropes.....	55
III.6.3 Matériaux transversalement isotropes.....	55
III.7 Les contraintes.....	55
III.8 Les Équations d'équilibre.....	56
III.9 Conclusion	60

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1 Introduction	61
IV.2 Géométrie de la plaque	62
IV.3 Discussion et interprétation des résultats	64
IV.4 Conclusion.....	70
Conclusion générale	71
Références bibliographiques	73

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les composites et les nano-composite

Figure I-1 Matériaux composites	6
Figure I-2 Différentes familles de matrices	7
Figure I-3 Les différents types de renfort de base.....	8
Figure I-4 Couche de composite.....	9
Figure I-5 Constitution d'un stratifié.....	9
Figure I-6 Matériaux sandwiches à âmes pleines.....	10
Figure I-7 Schéma de la structure semi-cristalline d'un polymère.....	14
Figure I-8 Méthodes d'élaborations des nano composites polymères :	
a) mise en œuvre dans le fondu, b) mise en solution et c) polymérisation in situ	21
Figure I-9 L'influence de la dispersion des (CNTs) par ultrasons.	23
Figure I-10 Schéma du circuit d'un fluide disperse par tricylindre.....	24

Chapitre II : Généralité sur les nanotubes de carbone

Figure II-1 Structure du graphite hexagonal.....	28
Figure II-2 Structure de diamant.....	29
Figure II-3 fullerène C60.....	30
Figure II-4 nanotube de carbone (SWCNT).....	30
Figure II-5 structure d'un plan de graphène en deux dimensions.....	31
Figure II-6 Les différents types de nanotubes mono parois : armchair, zigzag, chiral.....	31
Figure II-7: Image de microscope électronique a transmission de plusieurs	31
Figure II-8 (a) Cliché (microscopique électronique en transmission) de fagots de nanotubes mono parois en coupe transversale	
(b) Cliché (microscopique électronique en transmission) de fagots de nanotubes mono parois en coupe longitudinale. Le diamètre de chaque nanotube est ici environ 1nm.....	32
Figure II-9: image de microscope Électronique à transmission de plusieurs MWNT	32
Figure II-10 type poupée ruse à gauche : type rouleau de parchemin à droite.....	33
Figure II-11 Schéma de la synthèse des CNTs par décharge arc électrique.....	34
Figure II-12 Schémas simplifié la réaction de synthèse laser continu (CO ₂) de L'ONERA.....	35
Figure II-13 Schéma d'un réacteur CVD pour la croissance des (NTC).....	36
Figure II-14 à gauche schéma de la production de nanotubes par méthode (Hip Co)	
à droite image de nanotubes (Hip Co).....	37
Figure II-15 propriétés électroniques des nanotubes de carbones monocouches en fonction de leurs indices de chiralité (n,m).....	38

Liste des figures

Figure II-16 image de microscopies à effet tunnel et à force atomique.....	39
Figure II-17 Influence du type de cycle sur la courbure de la surface.....	40
Figure II-18 Image MET des extrémités de deux nanotubes multicouches.....	40
Figure II-19 Introduction d'une paire pentagone-heptagone provoquant une variation de diamètre et de chiralité : a- de (11,0) à (12,0) ; b- de (9,0) à (12,0).....	41
Figure II-21 Image (MET) d'un échantillon d'un nanotube collerette brut produite par arc électrique	41
Figure II-20 Défauts pentagonaux et heptagonaux se traduisant par des jonctions.....	42
Figure II-22 Essai de traction sur un nanotube individuel à l'aide d'un AFM.....	46

Chapitre III : Théorie des plaques et développement mathématique du présent modèle

Figure III-1 Illustration de la plaque de Love-Kirchhoff.....	50
Figure III-2 Illustration de la plaque de Reissner-Mindlin.....	51
Figure III-3 Illustration de la plaque de théorie d'ordre élevé.....	52
Figure III-4 Matériau orthotrope.....	54
Figure III-5 Matériau transversalement isotrope.....	55

Chapitre IV : Résultats et discussions

Figure IV-1 (a) Géométrie de la plaque renforcés pars NTC (b) les différents modèles des dispositions des renforts.....	63
Figure IV-2 La charge critique de flambement d'une plaque carrée en fonction de rapport (a/h) pour différent valeur de la fraction volumique, sous un chargement bi axiale. Uniformément distribué de type de renfort UD CNT.....	67
Figure IV-3 la charge critique de flambement en fonction de rapport (a/b) pour différent valeur de la fraction volumique pour le type de distribution (UD-CNT) avec (a/h)=10 sous un chargement bi axiale.....	68
Figure IV-4 la charge critique de flambement d'une plaque carrée en fonction du rapport (a/h) pour différent forme de distribution du renfort avec $V^{*cnt} = 0.17$	68
Figure IV-5 la charge critique de flambement d'une plaque carrée en fonction du rapport (a/h) pour différent forme de distribution du renfort avec $V^{*cnt} = 0.17$	69

Liste des Tableaux

Tableau I.1 Propriétés physiques et mécaniques des matrices thermoplastiques (TP).....	15
Tableau I.2 Les propriétés des matrices thermodurcissables(TD)	15
Tableau I.3 Comparaison des différentes méthodes d'élaboration des composites polymères.NTC	23
Tableau IV.1: répartitions du renforcement des NTC à travers l'épaisseur.....	63
Tableau IV.2 La variation des résultats de la charge critique de flambement adimensionnelle d'une plaque carre sous diffèrent type de chargement (uniaxiale, biaxiale).....	64
Tableau IV.3 La liste des valeurs de la charge critique de flambement pour les différents types de plaque CNTRC et leurs distributions (linéaire et non linéaire), en varient-le rapport a/h et sous chargement uniaxiale et biaxiale.....	65
Tableau IV.4 L'effet de différentes valeurs de la fraction volumique sur la charge critique de flambement pour les deux types de renforcement linéaire et non linéaire plaque CNTRC.....	66
Tableau IV.5 Effet de nombre de mode et le type de chargement sur la variation de la charge critique de flambements pour les différents types de plaque CNTRC.....	66

Liste des abréviations

- AFM:** Microscopie à force atomique.
- C-C:** La liaison carbone-carbone.
- C.M.C :** les composites à matrice céramique.
- CNTRC:** Matériau composite à gradient fonctionnel renforcée par nanotube de carbone.
- CNTs:** Nanotube de carbone.
- CPT:** la théorie classique de plaque.
- CVD:** Chemical Vapor Deposition.
- C60:** Fullerène C60.
- C70:** Fullerène C70.
- C80:** Fullerène C80.
- FSDT:** Théorie de premier ordre de déformation de cisaillement.
- HSDT:** La théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé.
- SSDT:** la théorie de plaque de déformation de cisaillement sinusoïdale.
- TSDT:** Les théories d'ordre élevé et du troisième ordre.
- HCl:** Acide.
- HiPCo:** Décomposition de CO à haute pression.
- HNO3:**Acide nitrique.
- MD:** La dynamique moléculaire.
- SWCNT :** Nanotube de carbone mono feuillet.
- MWCNT:**Nanotube de carbone double paroi.
- NTC:** Nanotube de carbone.
- PC :** le polycarbonate.
- PE :** le polyéthylène.
- PMMA:** Poly méthacrylate de méthyle.
- PP :** le polypropylène.
- PS :** le polystyrène.
- PET :** le polyester et le polyéthylène terestrialité
- POM:** le polypétales ou polyoxy méthylène
- PVC:** Le polychlorure de vinyle.
- sp1, sp2 , sp3:** Hybridations.
- STM :** Microscopie à effet tunnel.
- TD:** Thermodurcissable.
- TEM :** Microscopie électronique de transmission.
- TP:** Thermoplastique.

Liste des abréviations

PmPV : Poly {(m-phénylènevinylène) -co - [(2,5-dioctoxy-p-phe-nylène) vinylène]}.

ECOREP, 3S, POLYOR: Les entreprises étatiques et privées spécialisées dans la construction des bateaux de pêche et de plaisance.

HP : haute Pression.

PNC: Un nano composite de polymère.

Ni : Le nickel est l'élément chimique de numéro atomique 28, de symbole Ni.

Fe : Le fer est l'élément chimique de numéro atomique 26, de symbole Fe

Co : Le cobalt est l'élément chimique de numéro atomique 27, de symbole Co.

Pt : Le platine est l'élément chimique de numéro atomique 78, de symbole Pt.

Pd : Le palladium est l'élément chimique de numéro atomique 46, de symbole Pd.

Rh : Le rhodium est l'élément chimique de numéro atomique 45 et de symbole Rh.

Y : L'yttrium est l'élément chimique de numéro atomique 39, de symbole Y.

La : Le lanthane est un élément chimique, de symbole La et de numéro atomique 57.

Lu : Le lutécium (ou lutétium) est un élément chimique de symbole Lu et de numéro atomique 71.

- A ; La surface de la section d'un nanotube.
- A_{ij} ; Termes de rigidité en membrane de la plaque.
- B_{ij} ; Termes de rigidité de couplage de la plaque.
- a ; Longueur de la plaque.
- $a_1 \vec{a}_2$; Les vecteurs de base du graphène.
- b ; largeur de la plaque.
- D_{ij}, E_{ij}, F_{ij} ; Termes de rigidité de flexion de la plaque.
- E ; Module de Young.
- E_{11} ; Module de Young longitudinal.
- E_{22} ; Module de Young transversal.
- E_{cnt11}, E_{cnt22} ; Modules de Young des nanotubes de carbone.
- G_{cnt11} ; Module de cisaillement transverse.
- G_{12}, G_{13}, G_{23} ; module de cisaillement.
- G_{cnt12} ; Module de cisaillement des nanotubes de carbone.
- h ; l'épaisseur de la plaque.
- L ; longueur de nanotube de carbone.
- m, n ; Un couple de nombres entiers qui définit la structure du nanotube.
- M_{ij}, N_{ij}, P_{ij} ; Les efforts résultants.
- M_{xx}, M_{yy}, M_{xy} ; Moments de flexion.
- N_{xx}, N_{yy}, N_{xy} ; Efforts normaux de membrane.
- P_{xz}, P_{yz} ; Effort de cisaillement pur.
- Q_{ij} ; Les coefficients de rigidité.
- S_{ij} ; Valeurs propres.
- U ; Déplacement axial.
- u, v, w ; Les déplacements suivant les directions x, y et z .
- u_0, v_0, w_0 ; Les composantes du champ de déplacement sur le plan moyen de la plaque.
- V_{cnt} ; Fraction volumique des nanotubes de carbone et de la matrice.
- V_{*cnt} ; Fraction volumique du nanotube de carbone.
- V_p ; Fraction volumique de la matrice polymère.
- $\eta (i = 1, 2, 3)$; Les paramètres d'efficacité.
- ν_{cnt} ; Coefficient du poisson du nanotube de carbone.
- ν_p ; Coefficient du poisson de la matrice polymère.
- ν ; Coefficient de Poisson.

ρ_{cnt} ; Masse volumique du nanotube de carbone.

ρ_p ; Masse volumique de la matrice polymère.

$\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}$; Déformations dans les directions x et y .

$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$; Déformations de distorsion.

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$; Contraintes normales suivant les directions x, y et z .

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

δV ; La variation virtuelle de l'énergie potentielle.

$\delta v_0, \delta u_0, \delta w_0$; Champ virtuel de déplacement.

φ_x, φ_y ; les rotations autour des axes x et y .

Θ ; Angle chiral.

ψ ; L'angle de rotation de la section d'une plaque.

Introduction Générale

|

Introduction Générale

Les nanotubes de carbone notés (NTC) font l'objet de nombreux travaux de recherches au niveau international depuis leur récente découverte en 1991 par [Iijima.1991]. Les premières études ont rapidement laissé entrevoir des propriétés mécaniques et électriques exceptionnelles pour cette nouvelle forme du carbone, et des applications pratiques ont été envisagées. A ce niveau, la synthèse en quantités importantes de NTC toujours plus purs constitue un verrou technologique à l'échelle mondiale. Si des fibres de carbone creuses étaient déjà étudiées depuis de nombreuses années, c'est en 1991 qu'Iijima rapportait le premier l'observation de tubes de carbone d'un diamètre de l'ordre du nanomètre et les mettait en relation avec les fullerènes récemment découvert. Depuis lors, de nombreux travaux tant expérimentaux que théoriquement ont permis d'améliorer les méthodes de synthèses des NTC, de déterminer leur structure, de calculer et de mesurer leurs propriétés.

Afin de résoudre les problèmes des plaques analytiquement, deux étapes principales doivent être prises en considération, la première étape dépend du choix de la théorie des plaques à utiliser et la deuxième résulte du choix de la méthode de la solution à appliquer.

Le plus souvent les théories des plaques utilisées pour définir n'importe quel problème peuvent être classées en trois grandes catégories en fonction de la prise en compte des effets de déformation de cisaillement transversal, à savoir la théorie classique des plaques (CPT), la théorie de déformation de cisaillement du premier ordre (FSDT) et la théorie de déformation de cisaillement d'ordre élevé (HSDT). Les équations régissant dérivées de ces théories mentionnées ci-dessus peuvent être résolues en utilisant soit la méthode numérique (par exemple, la méthode des éléments finis, la méthode de différence finis, la méthode de Ritz, la méthode de Galerkin), ou d'une méthode analytique (par exemple, la méthode de Navier).

Les nanotubes de carbone ont été étudiés par de nombreux chercheurs partout dans le monde, dans différents types de nanostructures (nano FGM structures, nanotube..) comme le statique [Zemri et al. 2015], [Aissani et al 2015], le flambement [Larbi Chaht et al. 2015], [Ait Amar Meziane et al 2014], [Semmah et al 2014], vibration libre [Belkorissat et al. 2015], la propagation des ondes [Heireche et al 2008], [Benzair et al 2008] [Ait Atmane et al 2010] et l'analyse thermomécanique des NTC [Tounsi et al. 2013]. L'étude le comportement des nanotubes de carbone (NTC) [Bouazza et al 2015], [Zidour et al 2014]. Récemment, l'approche de la mécanique des milieux continus a été largement utilisée pour étudier les

réponses du micro et nanostructures, telles que la statique et dynamique [Belabed et al 2014] [Hebali et al 2014], l'analyse thermomécanique de (CNTs) [14].

Ils se présentent comme un ou plusieurs tubes creux concentriques séparés de 0,34 nanomètre avec un diamètre interne de l'ordre du nanomètre et une longueur de l'ordre de quelques micromètres [Iijima 1993]. Par conséquent, ces matériaux devraient posséder d'autres propriétés électroniques, mécaniques et moléculaires intéressantes. Surtout au début, toutes les études théoriques sur les nanotubes de carbone ont porté sur l'influence de la structure presque unidimensionnelle sur les propriétés moléculaires et électroniques.

Les caractérisations des nanotubes de carbone ont révélé des propriétés extraordinaires qui dépassent souvent largement les propriétés des autres matériaux connus jusque-là.

Ils possèdent une faible densité 1.3 à 1.4 g.cm⁻³ et sont stables sous air jusqu'à 650°C et jusqu'à 2800°C sous atmosphère inerte [Saito et al 1998]. Les matrices renforcées par des NTC sont classiquement utilisées dans les outils de coupe, l'usinage de matériaux résistant à l'usure, les mines et le forage géothermique en raison de leur combinaison unique de dureté, de ténacité et de résistance à la chaleur. Les matériaux composites renforcés par des NTC ont la capacité de générer de nouvelles fonctionnalités et d'exécuter de nouvelles fonctions plus efficaces que les plus grandes structures et machines. En raison de la variation fonctionnelle de leurs compositions et de leurs propriétés physiques / chimiques (par exemple, stabilité, dureté, conductivité, réactivité, sensibilité optique, point de fusion, etc.), ils peuvent être manipulés pour améliorer les propriétés globales des matériaux classiques. Le flambage des plaques polymère renforcée par NTC a été un sujet d'étude très important en mécanique des solides pour plusieurs des années.

Le but recherché à travers ce travail, c'est l'étude de la charge critique de flambement des plaque polymère renforcée par des nanotubes de carbone sous chargement uniaxiale et biaxiale en utilisant la théorie d'ordre élevée pour plusieurs aspects des rapports d'épaisseur, et des fractions volumiques CNT. L'étude nous permettra d'apprendre à modéliser ces matériaux pour pouvoir analyser leurs comportements en flambage (sous des charges axiales de compression). Pour cela, nous utiliserons la théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevée pour décrire le champ des déplacements. Nous analyserons également l'influence du type de distribution des nanotubes à travers l'épaisseur de la plaque sur l'évolution des propriétés mécaniques de celle-ci. Nous résoudrons le système d'équations différentielles couplées par une méthode analytique. Une comparaison des résultats obtenus avec ceux publiés est demandée pour démontrer la validité du code de calcul élaboré. Les résultats représentant les charges critiques de flambage, seront commentés et des graphes appropriés

seront tracés. Un recueil paramétrique de flexion pour montrer l'influence de fraction volumique, de l'effet de la géométrie de la plaque et le type de renforcement sera fait. Des interprétations des résultats seront données au fur et à mesure.

Ce manuscrit est divisé en quatre chapitres :

- ✓ Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les matériaux composites et les nano composites il présentera les différents types de matrices existants ainsi leur Classification et propriétés, une description usuelle sur les nano composites on s'intéressera aux nano composites à matrice polymère.
- ✓ Le deuxième chapitre portera une synthèse bibliographique sur les nanotubes de carbone, nous décrirons les différents types de nanotubes de carbone en détaillant leurs propriétés et les différentes techniques de synthèse tel que la méthode d'ablation laser, l'arc électrique, dépôt chimique en phase vapeur et la méthode dite (HiPCo), de nombreuses applications seront ensuite présentées.
- ✓ Le troisième chapitre regroupera les différentes théories des plaques. Suivi par des formulations mathématiques, un développement des différents modèles sera présenté et qui permettra d'étudier analytiquement le comportement en flambement des plaques en nano composites renforcées par des nanotubes de carbone.
- ✓ Le dernier chapitre présentera les résultats numériques obtenus. Ils seront comparés avec d'autres résultats déjà obtenus par d'autres auteurs.

A la fin de ce manuscrit, la conclusion rappellera les résultats les plus marquants de ce travail et proposera des perspectives envisagées pour des futurs travaux.

**Chapitre I : Généralités sur les composites et
les nano composite**

I.1 Introduction:

Dès le début des années 60, des études et des recherches dans le domaine nanométrique mobilisent toute la communauté scientifique qui ne cesse de confirmer cette formidable intuition qu'a eu Richard Feynman par des découvertes voire par la production de nanomatériaux présentant des propriétés mécaniques et physiques qui étaient inimaginables ces dernières années.

Actuellement, les nanomatériaux suscitent un grand intérêt qui s'explique par plusieurs facteurs notamment les progrès des techniques de microscopie comme le microscope électronique à transmission ou encore le microscope à force atomique. Ces outils ultramodernes ont permis de voir la matière autrement, même jusqu'à la dimension de l'atome, ce qui a rendu l'univers des nanomatériaux et leur réalité plus palpable. Ainsi, les nanomatériaux sont constitués d'un ensemble de particules nanométriques, dont la taille est inférieure à 100 nm alors que les matériaux traditionnels sont habituellement composés de particules de plusieurs milliers de nanomètres. [Barrau 1987]. Les nano composites sont des matériaux dont le renfort possède au moins une des trois dimensions de l'ordre du nanomètre.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons dans un premier temps à la classification des nanomatériaux puis dans un second temps à leur composition, et leurs spécificités. En dernier, nous présentons les différents types des polymères et leur relation avec les nano composites, ainsi que les différentes techniques d'élaboration. Ensuite, nous aborderons leurs principales caractéristiques.

I.2 Différents types de composites:

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 (C.M.P.), les composites à matrice métalliques (C.M.M) et les composites à matrice céramique (C.M.C.), il est alors possible d'associer à ces trois types de matrices soit des renforts discontinus, dont toutes les dimensions sont très inférieures aux dimensions de la pièce, soit des renforts continus, dont au moins une dimension est du même ordre de grandeur qu'une dimension de la pièce. Les matériaux les plus utilisés comme renforts sont des fibres qui présentent de bonnes propriétés mécaniques intrinsèques (carbone, alumine, silice, kevlar, acier...). Selon l'application envisagée, l'assemblage de ces fibres peut être unidimensionnel (plis unidirectionnels), bidimensionnel (plis tissés, mats à fibres coupées de quelques centimètres ou à fibres continues) ou tridimensionnel (tissus multidimensionnels) [Gay 1991].

I.3 Classification des matériaux composites :

La classification des matériaux composites peut être effectuée selon plusieurs façons.

En fonction de la nature de la matrice, les matériaux composites peuvent se classer selon les trois familles suivantes :

Composites à matrice polymérique :

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

Composites à matrice métallique :

Dans ces composites, la matrice est métallique comme l'aluminium ou le titane qui sont renforcés par des renforts généralement non-métalliques, souvent des céramiques. Leurs propriétés mécaniques sont donc meilleures ou plus adaptables au chargement que leurs matrices polymériques. Ils sont largement appliqués dans les fabrications des moteurs d'automobile.

Composites à matrice céramique :

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

1. Composites à renforts de fibres :

Les renforts de ce type de composites sont sous forme de fibres. La longueur des fibres est bien supérieure aux dimensions de sa section transversale. Selon leurs applications, les fibres utilisées prennent la longueur de la pièce (fibres continues) ou soit coupées en petite longueur (fibres courtes).

2. Composites stratifiés :

Le composite est constitué par au moins deux couches minces de matériau. Les couches peuvent être composées de différents matériaux monolithiques comme dans les métaux plaqués ou de même matériau composite différentes orientations comme pour des stratifiés composites à renforts de

fibres longues. Ce dernier devient une classe hybride du composite comportant à la fois composite à renfort de fibres et la technique de stratification.

3. Composites à renforts de particules :

Le renfort est considéré comme une particule si toutes ses dimensions sont approximativement égales et petites devant les autres dimensions du matériau. Les particules dures sont dispersées aléatoirement dans la matrice moins rigide.

4. Composites à renforts de paillettes :

Les paillettes ont une dimension très faible par rapport aux autres dimensions. La dispersion de ces "particules minces" est généralement aléatoire.

I.4. Constituants des matériaux composites :

Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues, appelées renforts réparties dans une phase continue appelée matrice. Dans le cas de plusieurs phases discontinues de natures différentes, le composite est dit hybride (*Figure I-1*)

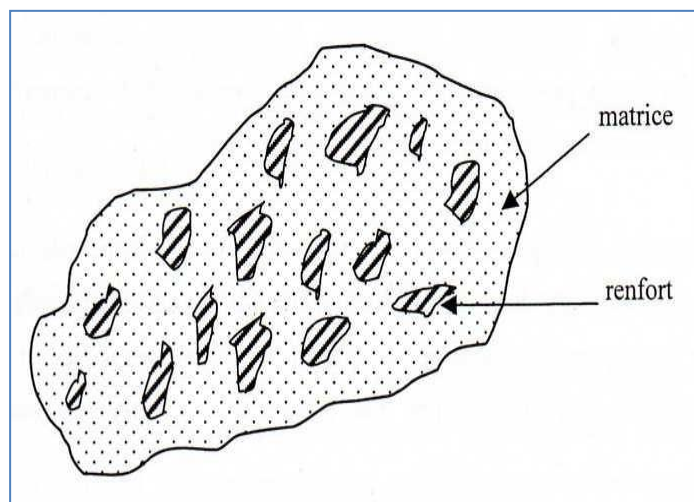


Figure I-1 : matériaux composites [Boudenne 2003]

I.4.1. La matrice :

La matrice permet de lier les fibres du renfort fibreux entre elles, ainsi que de répartir les efforts (résistance à la compression ou à la flexion). La matrice est facilement déformable et assure la protection chimique des fibres. Généralement, c'est un polymère ou une résine organique.

On peut retrouver dans l'organigramme ci-dessous, les différentes familles de matrices :

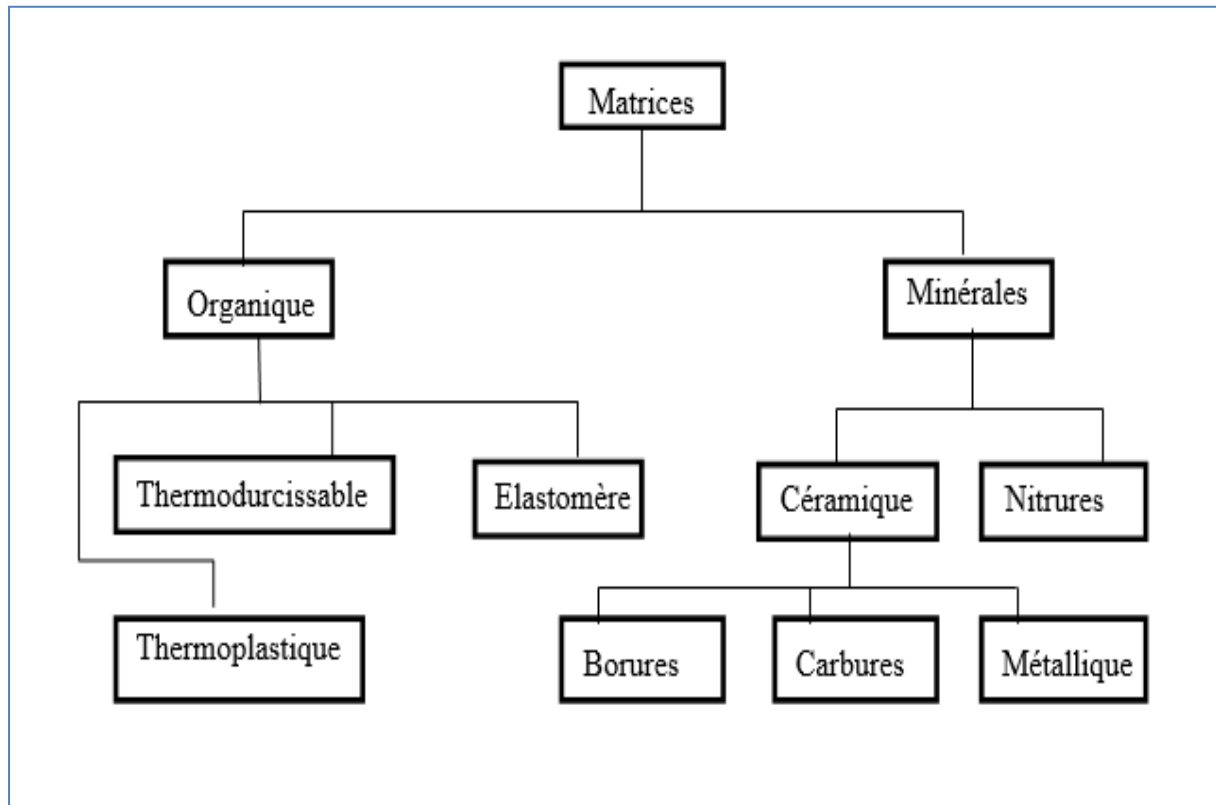


Figure I-2 : Différentes familles de matrices [Jules 2001].

I.4.2 Le renfort :

Le renfort contribue à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites et se présente sous forme filamentaire, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue qui donne au matériau un effet de résistance orientée. [Berreur et al 2002] Souvent sous forme de fibres, le but des renforts dans les matériaux composites essentiellement d'accroître leurs propriétés mécaniques (rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc.) et d'améliorer des propriétés physiques, tels les comportements au feu et à l'abrasion, la tenue en température ou les propriétés électriques. Les caractéristiques recherchées dans les renforts sont une masse volumique faible, une compatibilité avec les matrices et une facilité de mise en œuvre [El Hadji 2008].

Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel). Parmi les fibres les plus utilisées dans l'industrie on a : les Fibres de verre, Fibres de bore, Fibres de carbone, Fibres aramide (kevlar), Fibres de polyéthylène haut ténacité, Fibres naturelles. [Ishii 1997]. Les différents types de renforts sont cités dans l'organigramme ci-dessous.

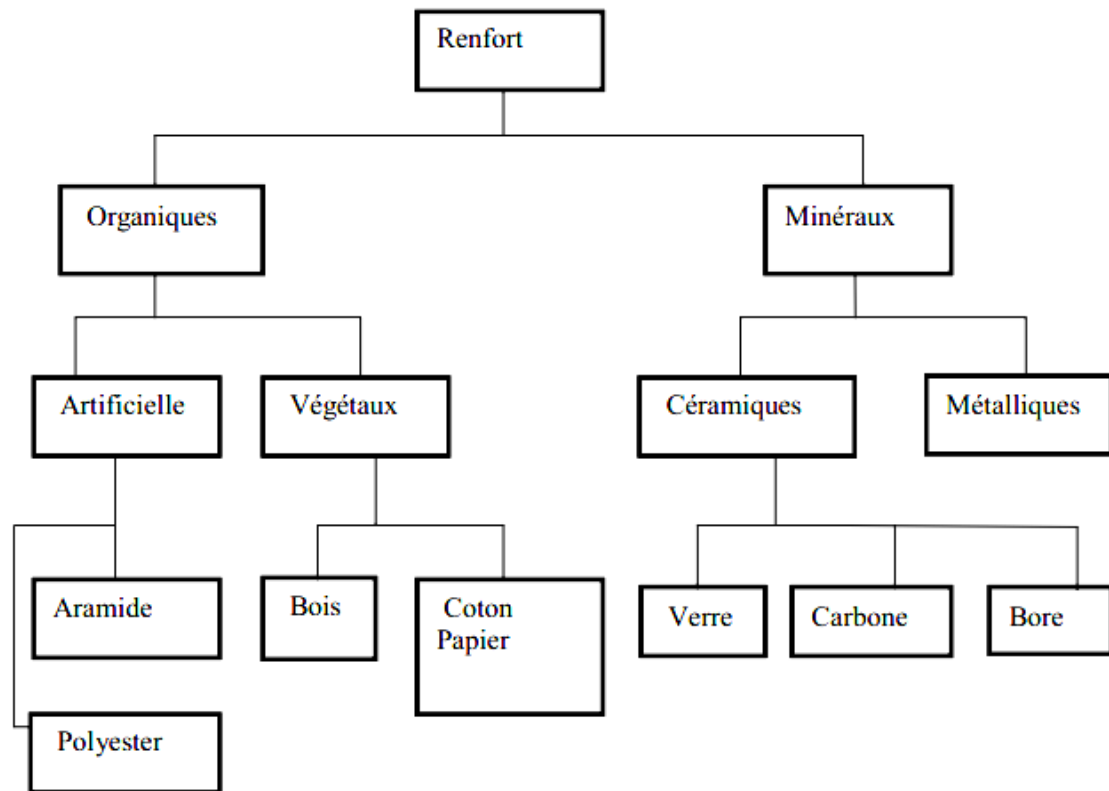


Figure I- 3 : Les différents types de renfort de base [Lachmat 2010]

En plus de ces deux constituants de base, il faut rajouter :

I.4.2.1 Charges et additifs :

On désigne sous le nom général de charge toute substance inerte, minérale ou végétale qui, ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé. On appelle adjuvants les substances mélangées physiquement aux polymères, destinées à modifier ou améliorer leur comportement rhéologique en machine de transformation, ou bien les propriétés d'usage des matériaux finis (propriétés physiques, stabilité à l'environnement). Les adjuvants sont des composés organiques, organométalliques, souvent de faible masse moléculaire par rapport à celle du polymère, utilisés en faible concentration. On réserve le nom de charges à des produits (généralement minéraux) utilisés en forte concentration qui ont pour effet principal de modifier les propriétés physiques du produit fini. Les charges, généralement sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou liquides, sont incorporées à la résine pour renforcer les propriétés mécaniques. Elles peuvent être minérales, organiques (végétales

ou synthétiques) ou métalliques, et s'utilisent en générale de la même façon que dans les plastiques "traditionnels". Des charges non renforçantes peuvent être également utilisées pour diminuer le coût des matrices. Des additifs, de type colorant ou agent de démoulage sont largement utilisés lors de la conception des structures constituées de matériaux composites. [Gornet 2010].

I.5 Architecture des matériaux composites :

I.5.1 Monocouche :

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres continue, à fibres courtes, fibres tissus et mat.

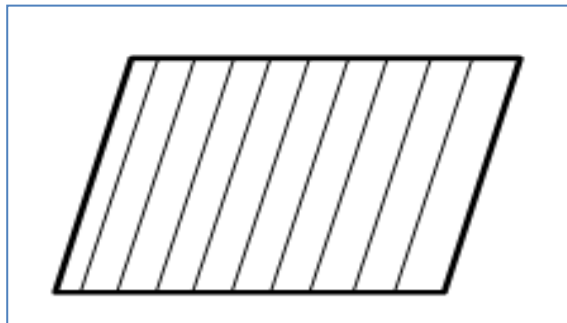


Figure I-4 : Couche de composite.

I.5.2 Stratifié :

Les stratifiés sont constitués de couches successives (appelées parfois plis) de renforts (Fils, stratifiés, mat, tissus, etc.) Imprégnés de résines.

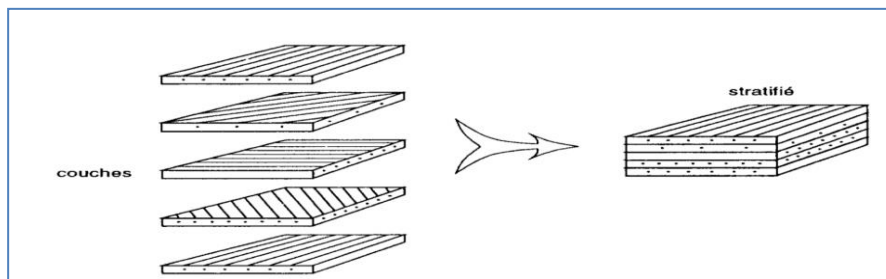


Figure I-5 : Constitution d'un stratifié.

I.5.3 Sandwichs :

Les matériaux composites de types sandwichs sont principalement constitués de deux composants nommés : peau et noyau (Figure I-6). Cette technique consiste à déposer une âme (constituée d'un matériau léger possède de bonnes caractéristiques en compression) entre deux feuilles ou peau. Les âmes peuvent être pleines (bois, mousse, balsa, structure a nid d'abeille ...etc.) ou creuses (alliages métalliques léger, papier...etc.). Les peaux sont des stratifiés ou des feuilles

d'alliages légers. Par ce fait les sandwiches deviennent assez légers et offrent une très grande rigidité en flexion. [Menail 2009]

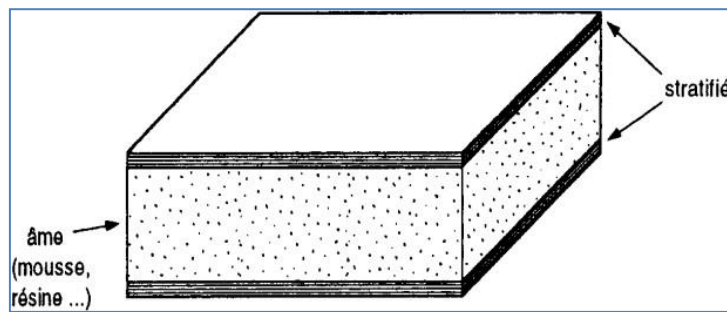


Figure I-6 : Matériaux sandwichs à âmes pleines. [Menail 2009]

I.6 Domaines d'application des composites :

Les composites entrent aujourd'hui dans pratiquement tous les domaines d'applications possibles: Piscines, bassins, bâtiments... Les transports aériens, maritime, routier, ferroviaire... Sports et loisirs, etc...

Les composites dans l'automobile :

Les matériaux organiques composites à matrice thermoplastique ou thermodurcissable renforcées par des fibres, généralement de verre, courtes ou longues ont fait leur apparition dans l'automobile durant les années 60-70. Le secteur de l'automobile utilise pour 95% des composites à matrice polyesters et fibres de verre, mais intègre massivement les composites thermoplastiques depuis 2003. Les composites apportent au secteur de l'automobile une facilité d'entretien et une grande liberté de conception [Ait Atmane 2010]. Dans l'automobile, le développement à long terme des composites est menacé par la difficulté de les intégrer dans les chaînes de fabrication et par les exigences de recyclage. A priori, ces matériaux présentent en effet trois handicaps majeurs :

- Un prix élevé au kilogramme;
- Des caractéristiques mécaniques plus faibles;
- Des procédés de mise en œuvre souvent lents à l'exception du procédé d'injection.
- Pourtant les matériaux composites à matrice organique présentent des avantages importants :
- Une faible densité;
- Des technologies de mise en œuvre par moulage qui limitent la matière engagée dans la filière, offrent la possibilité d'obtenir des pièces de forme complexe et suppriment les usinages de finition.

Les composites et la construction industrielle :

Le développement des composites TD et TP, avec la possibilité de jouer sur leurs caractéristiques, ont fait que ces matériaux, se sont imposés dans le monde industriel. Les fibres de carbone pourront être utilisées en complément aux fibres de verre à la fois comme renfort et comme capteur, et seront associées à des résines polyesters ou époxy. L'utilisation des matériaux composites peut contribuer à améliorer la sécurité de certains sites industriels sensibles et faciliter la conception des bâtiments.

Les composites et la construction électrique :

La consommation massive des composites dans les domaines électrique et électronique, prends de l'ampleur avec l'utilisation importante de l'audiovisuel (TV, microordinateurs, lecteurs de DVD...etc.).En utilisant les propriétés remarquables des matériaux composites, la construction électrique réalise des équipements fiables, aux fonctions multiples et longues durée de vie [El hadji 2008].

Les composites dans la construction civile :

L'utilisation des composites dans la construction civile est un nouveau créneau, qui commence à intéresser nos bâtisseurs. Le nombre de dégâts causés par les séismes à travers le monde a poussé les chercheurs à s'intéresser aux composites. Le handicap majeur de l'utilisation des matériaux composites dans la construction civile, reste leur coût, qui est encore excessif. L'utilisation des composites renforcés de fibres de carbone, en complément des composites à fibre de verre (TD et TP) pourra se développer dans le secteur de la construction civile lorsque leur prix deviendra inférieur [Giocosa 1999].Les composites apportent au bâtiment la souplesse des formes, la résistance aux contraintes climatiques, et les composites renforcés de fibres de carbone la résistance aux séismes.

Les composites dans les équipements de sports et loisirs :

Les performances sportives exigent des matériaux performants. Les matériaux composites répondent bien à ces exigences. Les sports et loisirs utilisent des composites HP avec un taux de renforts de plus de 70%. Les sports concernés par ces matériaux sont surtout, le tennis, le ski, les sports nautiques ...etc.

Les composites et la construction nautique :

Dans la construction nautique de plaisance et de pêche, les composites sont indispensables pour les embarcations de taille inférieure à 40 mètres. D'ailleurs c'est le seul domaine exploité en Algérie. Les entreprises étatiques et privées telles que ECOREP, 3S, POLYOR, se sont spécialisées

dans la construction des bateaux de pêche et de plaisance. Elles utilisent surtout de la résine polyester et la fibre de verre.

Les composites dans l'aéronautique :

L'aéronautique utilise principalement des composites HP constitués d'une matrice époxy associée à un taux élevé de renforts en fibres de carbone. L'aéronautique utilise les composites hautes performances pour la fabrication de pièces de structure primaire des appareils en raison de leur légèreté, de leur souplesse de forme et des économies de frais de maintenance qu'ils engendrent.

Les composites dans le ferroviaire :

Les matériaux composites sont utilisés dans le domaine ferroviaire pour deux principaux atouts : un bon comportement au feu et un moulage facile des pièces utilisées.

Les composites dans le secteur médical :

Au service du secteur médical. Les matériaux composites permettent d'augmenter la fiabilité, la précision et la légèreté des instruments médicaux, des prothèses et des dispositifs d'aide aux personnes handicapées. Leur transparence aux rayons X en font une technologie parfaitement adaptée pour les tables de radiologie.

I.7 Avantages et inconvénients des composites :

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à :

- Leur légèreté ;
- Leur résistance à la corrosion et aussi à la fatigue;
- Leur insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants;
- Leur possibilité de prendre plusieurs formes, d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit.

Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion :

- Les coûts des matières premières et des procédés de fabrication ;
- La gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte;
- L'industrie des matériaux composites doit donc aujourd'hui relever certains défis tels que:
 - ❖ La maîtrise des émanations de produits organiques volatiles, par exemple le styrène ;
 - ❖ La maîtrise des procédés de transformations et des performances des matériaux qui sous-entend d'une très bonne connaissance des constituantes mises en place ;

La mise en place de technologies et des filières pour la gestion des déchets en fin de vie qui est la partie la plus difficile à satisfaire en raison du caractère thermostable de la plupart des composites.

De plus, dans ce dernier point, le recyclage est actuellement très limité parce que le broyage ou les autres procédés sont très coûteux et fournissent une matière de faible qualité [Ambartsumyan 1969].

I.8 Les polymères:

Le terme polymère (du grec plus qui signifie « nombreux, plusieurs » qui signifie « unité, partie ») qui sont typiquement regroupent toute matériau formées par la répétition d'un très grand nombre n de petites molécules de faible masse moléculaire appelées monomères qui liés entre eux par des liaisons primaires (liaisons covalentes) sachent que le monomère est une molécule de base (pouvant être par exemple non saturée ou cyclique ou encore comportant des fonctions réactive à ses extrémités). L'assemblage des monomères pour l'obtention de polymères (ou macromolécules) s'appelle la polymérisation. La réaction de polymérisation est également utilisée par les organismes vivants. Une multitude de produits et d'objets en plastique sont apparus sur le marché au cours du dernier demi-siècle.

Les polymères sont utilisés dans les appareils électroménagers, les matériaux de construction (revêtements, peinture), les emballages, les pneumatiques, les articles de loisirs, le textile, les produits pharmaceutiques, les prothèses, dans l'automobile, l'aéronautique, l'aéronavale, les équipements électriques, les produits cosmétiques, ainsi que dans les petits objets usuels de la maison. Les objets en plastique sont plus légers que les métaux et se prêtent à une grande variété de formes. Les propriétés de ces matériaux reposent sur le choix qui est fait parmi les innombrables architectures moléculaires possibles et les procédés de synthèse, ainsi que sur la mise en œuvre des résines, qui peuvent être mélangées ou chargées avec d'autres matériaux.

I.8.1. Classification des polymères :

Il existe trois grandes familles de polymères suivant les propriétés des matériaux :

I.8.1. 1. Les polymères thermoplastiques :

Ils forment le groupe le plus important parmi les polymères synthétiques et sont constitués de macromolécules de taille limitée, linéaires ramifiées. Le terme thermoplastique traduit le fait que le type de polymère passe de l'état rigide à l'état malléable par une faible élévation de température.

Ce processus théoriquement réversible, peut être répété un nombre infini de fois sans modification de la structure et sans altération des propriétés pour ces raisons, les thermoplastiques sont généralement faciles à mettre en œuvre et à recycler.

Le niveau de déformation des chaînes moléculaires avant rupture sera plus ou moins important, conduisant à des faciès de rupture plus ou moins ductiles. Ce comportement ductile est essentiellement observé dans les thermoplastiques. Sous contrainte normale la rupture se produit la formation de craquelures (crazing) liées à l'étirement des chaînes moléculaires dans le sens de l'effort. Les micro-vides qui apparaissent durant ce processus sont responsables du blanchiment du matériau.

Les thermoplastiques peuvent exister à l'état semi-cristallin ou amorphe.

Polymère amorphe : chaîne stériquement irrégulière pelote (PS, PMMA, PC) transparents.

Polymères semi-cristallins : chaînes linéaires et flexibles : cristallisation partielle translucides, plus grande résistance à la température et aux agents chimiques.

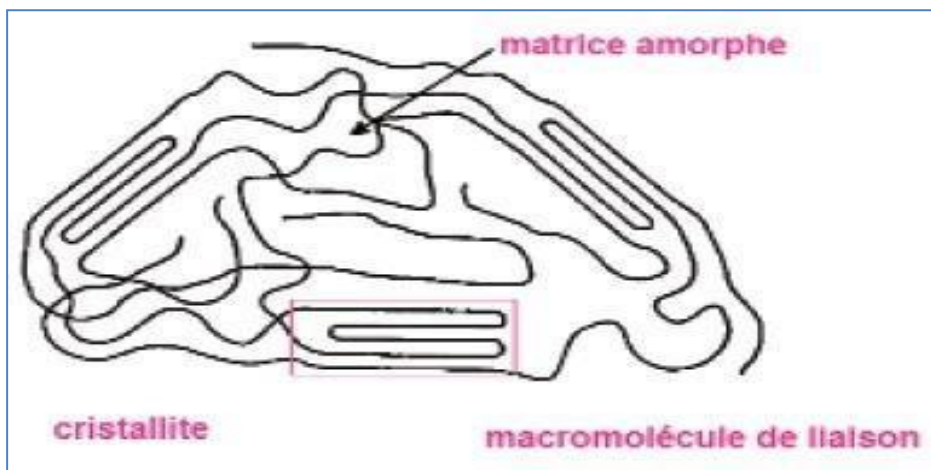


Figure I-7 : Schéma de la structure semi-cristalline d'un polymère

On citera quelques exemples matières thermoplastiques :

Le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le polystyrène (PS), le polycarbonate (PC), le polyester et le polyéthylène téréphtalate (PET), le polyéthylène glycol (PEO) ou polyoxyde de méthylène (POM), le polychlorure de vinyle (PVC).

Ce tableau présente les propriétés physiques et mécaniques des matrices thermoplastiques (TP) [Bonnissel et al 2001].

Tableau I-1 propriétés physiques et mécaniques des matrices thermoplastiques(TP).

[Bonnissel et al 2001].

Matrices (TP)	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Module d'élasticité longitudinal	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction)	Allongement a rupture (%)	Coefficient de dilatation thermique
PP	900	1200	0.4	30	20 a400	/
PPS	1300	4000	/	65	100	/
PA	1100	2000	0.35	70	200	/
PES	1350	3000	/	85	60	/
PEI	1150	3300	/	105	60	/
PEEK	1300	4000	/	90	50	/

I.8.1.2. Les polymères thermodurcissables :

Ce sont des polymères constitués en un réseau tridimensionnel fortement édifice le taux de réticulation est de (10 à 100) fois plus élève que dans le cas des élastomères. Ainsi, les thermodurcissables sont beaucoup plus résistants à la température que les thermoplastiques.

Tableau I.2 : les propriétés des matrices thermodurcissables(TD) [Bonnissel et al 2001].

Matrices (TD)	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Module d'élasticité longitudinale (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de poisson	Contrainte de rupture (traction) (MPa)	Allongement à rupture	de dilatation thermique
Epoxyde	1200	4500	1600	0.4	130	2	10 ⁻⁵
Phénolique	1300	3000	1100	0.4	70	2.5	10 ⁻⁵
Polyester	1200	4000	1400	0.4	80	2.5	8 10 ⁻⁵
Polycarbonate	1200	2400	/	0.35	60	/	6 10 ⁻⁵
Vinylester	1150	3300	/	/	75	4	5 10 ⁻⁵
Silicone	1100	2200	/	0.5	35	/	/
Uréthane	1100	700a7000	/	/	30	100	/
Polyamide	1400	4000a1900	1100	0.35	70	/	8 10 ⁻⁵

I.8.1.3.Elastomères :

Présentent des propriétés caoutchouteuses température ambiante (très faible module de Young). Ils sont constitués de chaînes monodimensionnelles entre lesquelles ont été réalisés des ponts réticulation en faible densité pour éviter les déformations non recouvrables (écoulement), tout en conservant la mobilité moléculaire autorisant le comportement caoutchouteuse.

On citera quelques exemples de matière élastomère ;

Le poly isoprène (caoutchoucNatural), le polybutadiène(caoutchouc artificiel), et le poly chloroprène (néoprène).

I.8.2.Utilisation des polymères :

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

I.9. Nano composites (Nanotube de carbone/matrice Polymère) :

Un nano composite de polymère (ou PNC, polymère nanocomposite en anglais) est constitué par un ou plusieurs polymères avec des nanoparticules ou nano charges dispersées dans la matrice polymère. Les nanoparticules existent sous différentes formes, par exemple feuillets, fibres, ou sphères, mais possèdent au moins une dimension comprise entre 1 et 50 nanomètres. Ce sont des systèmes multi phases qui représentent actuellement environ 95 % de la production de plastiques. Les nanoparticules jouent le rôle d'un renfort ou d'un comptabilisant qui donnent de meilleures propriétés aux composites obtenus. Les nanoparticules, telles les nanotubes de carbone et les argiles, sont de plus en plus utilisées ces dernières années. [Xiao 2007]. La particularité des nano composites polymère-CNT réside dans la finalité multifonctionnelle du matériau obtenu, du fait des propriétés intrinsèques des CNTs. En effet, l'ajout de CNTs dans une matrice polymère lui confère en plus de la rigidité mécanique, des augmentations significatives de conductivités électrique et thermique. [Bozlar 2009]

I.10. Propriétés des nano composites (polymères /NTC): L'ajout de NTC dans une matrice polymère permet, dans la majorité des cas, d'améliorer les propriétés des polymères vierges qu'ils soient sous forme de plaques, de joncs, de fils, etc. [Aurélien 2010].

I.10.1 Propriétés thermiques des nano composites (NTC/polymère) :

La plupart des polymères présentent une conductivité thermique très faible (entre 0,1 et 0,4 $W.m^{-1}.K^{-1}$). [Han et al 2011] Les conceptions thermiques aux interfaces NTC/polymère et NTC/NTC ont été évaluées. S'il apparaît que l'interface entre les nanotubes et le polymère n'est pas bonne (le transfert de phonons entre ces deux phases n'est pas assuré [Huxtable et al 2003], D'autres études ont confirmé expérimentalement que l'alignement des nanotubes est bénéfique au transfert de chaleur dans le nanocomposite. Le chevauchement des nanotubes est alors accentué et le nombre de contacts NTC/NTC est réduit par rapport à une orientation aléatoire en 3 dimensions [Gonnet et al 2006]. Grâce à leur conductivité thermique intrinsèque exceptionnelle et à leur grand facteur de forme qui leur permet de former un réseau à de faibles fractions volumiques, les nanotubes de carbones apparaissent comme des candidats tout à fait pertinents [Choi et al 2001], [Hong et al 2008]. L'élaboration d'un matériau composite avec un niveau de conductivité thermique élevé est un défi important à relever du fait des applications prometteuses, en particulier dans la réalisation de composants électroniques. Diverses études ont récemment montré une augmentation de (40%) de la conductivité thermique d'une résine époxy ou du polyuréthane chargée à (0,5%) en masse de (CNT). [Wang 2009].

Les principales améliorations recherchées par l'incorporation de l'argile à des polymères sont la stabilité thermique et la tenue au feu. En effet, l'ajout de ces charges améliore et stabilise les Polymères thermiquement. Cette stabilité thermique est généralement évaluée par analyse thermogravimétrie sous atmosphère inerte ou oxydante. L'existence d'une argile ou silicates lamellaires exfoliés dans une matrice polymérique augmente sa température de dégradation [Zhu 1999] [Yang 1999], ce qui valorise le polymère et permet son utilisation à de plus hautes températures. Un autre objectif souvent désiré est l'augmentation de la résistance à la chaleur ou au feu. Les polymères organiques supportent mal les températures élevées et se décomposent rapidement. Pour améliorer ce comportement, les charges doivent augmenter la tortuosité dans la matrice, diminuant ainsi la diffusion, ou bien réagir lors de la montée en température en subissant des transformations endothermiques. C'est le cas par exemple du polyamide 6 dont la tenue thermique a été améliorée de 87 °C par l'ajout de 4 % de montmorillonite organophile. [Kojima 1993] D'autres propriétés ont également été mises en évidence avec l'ajout de nano charges, telle que l'augmentation de la biodégradabilité, la stabilité dimensionnelle, les caractéristiques optiques, la conductivité ionique ou encore des propriétés électriques dans les polymères conducteurs [Stejskal al 2012].

I.10.2 Propriétés mécaniques des nano composites (NTC/polymère) :

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

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

La résistance à la rupture de ces composites est améliorée lorsque la matrice et les charges possèdent une énergie interfaciale suffisante pour permettre le transfert des efforts de la matrice au renfort. La dispersion des nanotubes dans une matrice polyéthylène téréphtalate permet d'augmenter le module d'Young du polymère de (1,5 GPa à 1,9 GPa) ainsi que la contrainte à la rupture de (60 MPa à 68 MPa) avec (2%) de (NTC) [Kim 2007]. Avec ce même taux de charge une augmentation du module d'élasticité est observée dans une matrice polyamide [Liu 2004]. Dans une matrice polyéthylène une amélioration de (89% et 56%) respectivement du module d'Young et de la contrainte à la rupture peut être observée à (10%) de charges. [Xiao 2007].

I.10.3 Propriétés électriques des nano composites (NTC/polymère) :

La littérature cite énormément de travaux de recherche visant à mettre au point un matériau composite à base de CNT avec des performances électriques satisfaisantes. Les différentes approches s'intéressent notamment à favoriser l'apparition du phénomène de percolation qui met en évidence le passage du caractère isolant à celui de conducteur du composite. Hart et al ont fabriqué un composite à base de CNTs et une matrice polymère en polystyrène ayant une conductivité électrique de 10 S/cm en CNT. [Chemi 2018]. Les polymères sont caractérisés par leurs effets isolants notamment les thermoplastiques, dans le but de diminuer leurs résistivités afin d'assurer des

propriétés conductrices et antistatiques, ils sont renforcés par des amochages de noir de carbone ou des particules métalliques qui ont de bonnes propriétés électriques, permettant la réduction de l'accumulation de charges statiques de surface, et la diminution des effets des radiations électromagnétiques sur les équipements électroniques. Un autre exemple est l'ajout des charges est dans les peintures pour colorer, mais également pour améliorer la conduction électrique et permettre les dépôts par cataphorèse. [Amarelis 2005] Les matrices polymères sont généralement des matériaux diélectriques (leur conductivité moyenne est proche de 10^{-7}S.m^{-1}). L'ajout de charges électriquement conductrices donne la possibilité d'obtenir un matériau alliant les propriétés structurales du polymère et de bénéficier partiellement de la conductivité électrique des particules. Ainsi, il est possible d'obtenir des composites et nano composites permettant la dissipation de charges électrostatiques. Ce comportement est très prisé dans les domaines de l'aéronautique et de l'électronique entre autres. Des matrices électriquement isolantes peuvent par exemple atteindre des valeurs de conductivités électriques dépassant 1 S.m^{-1} grâce à l'incorporation de très faibles fractions massiques de nanotubes de carbone. [Sandler et al 2003]

I.11 Procédés d'élaboration des nano composites (NTC/polymère)

La mise en forme de matériaux composites à matrice polymère nécessite la mise en place de procédés très précis afin d'obtenir un matériau de qualité. L'un des problèmes rencontrés lors de la fabrication est la dispersion uniforme des renforts (NTC) dans la matrice polymère. [Bozlar 2009] La liaison entre la matrice et les renforts est un phénomène physico-chimique fondamental qui est créé lors de la phase d'élaboration du matériau composite. C'est l'interface (matrice/renfort) qui sera déterminante au niveau des propriétés finales du composite, et notamment du point de vue mécanique. [Ajayan 2007] Il est à rappeler que pour la plupart des matrices polymères, la compatibilité avec les (CNT) est faible du fait de leurs structures chimiques très différentes. En effet, l'adhésion entre un CNT et un polymère est mauvaise du fait des tensions superficielles trop élevées [Gao 2005]. Ce désagrément empêche par ailleurs une dispersion efficace et homogène des (CNT) à l'intérieur de la matrice. De nombreuses études sont menées afin de comprendre et d'améliorer les phénomènes à l'interface [Wei 2006], [Ajayan 2000].

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

I.11.1 Techniques de la mise œuvre :

Les méthodes d'élaboration des nano composites polymères sont toutes basées sur une première étape de dispersion des nanoparticules dans un liquide, elles diffèrent toutefois par le type de

phase organique et par le traitement à effectuer ensuite : traitement thermique, élimination du solvant éventuel. [Althues 2007] Afin d'obtenir des matériaux performants, avec d'excellentes propriétés électriques et mécaniques la méthode d'élaboration est cruciale. Différentes stratégies d'élaboration ont été développées. Actuellement les techniques les plus utilisées sont la dispersion en solution [Wang et al 2009], [Bin et al 2003], [Wang et al 2003], la dispersion à l'état fondu [Grossiord et al 2008], [Jin et al 2001] et la polymérisation in situ en présence des NTC [Putz et al 2004].

I.11.1.1 Mélange en solution :

Cette méthode est notamment utilisée pour l'élaboration d'élastomère [Sui 2008]. Mais aussi pour certain type de (TP) [Liu 2008]. Encore utilisée dans le cas du poly oxyde d'éthylène [Aranda 1992], [Wu 1993], [Choi 2001] en utilisant différents solvants plus ou moins polaires, mais aussi avec de nombreux autres polymères.

Le principal désavantage de cette méthode est la forte quantité de solvant qui doit être utilisée, et qui est en totale opposition avec les défis environnementaux d'aujourd'hui et des applications industrielles. [Anthony 2006]. Etant particulièrement adaptée pour la synthèse de NC en faibles quantités, cette technique fut pendant longtemps privilégiée du fait de la faible disponibilité et du fort coût de fabrication des NTC. Cette méthode consiste à mélanger les NTC et le polymère dissous dans une solution. La dispersion des NTC dans la solution se fait généralement à l'aide des ultrasons ou via l'ajout d'un surfactant. Un des principaux inconvénients de cette méthode est l'utilisation et l'élimination du solvant. [Chemi 2018] Un autre inconvénient provient de l'utilisation des ultrasons, qui bien que très efficaces pour disperser les (NTC), peuvent également détruire les chaînes macromoléculaires. [Aubry 2009].

I.11.1.2 Mélange à l'état fondu :

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

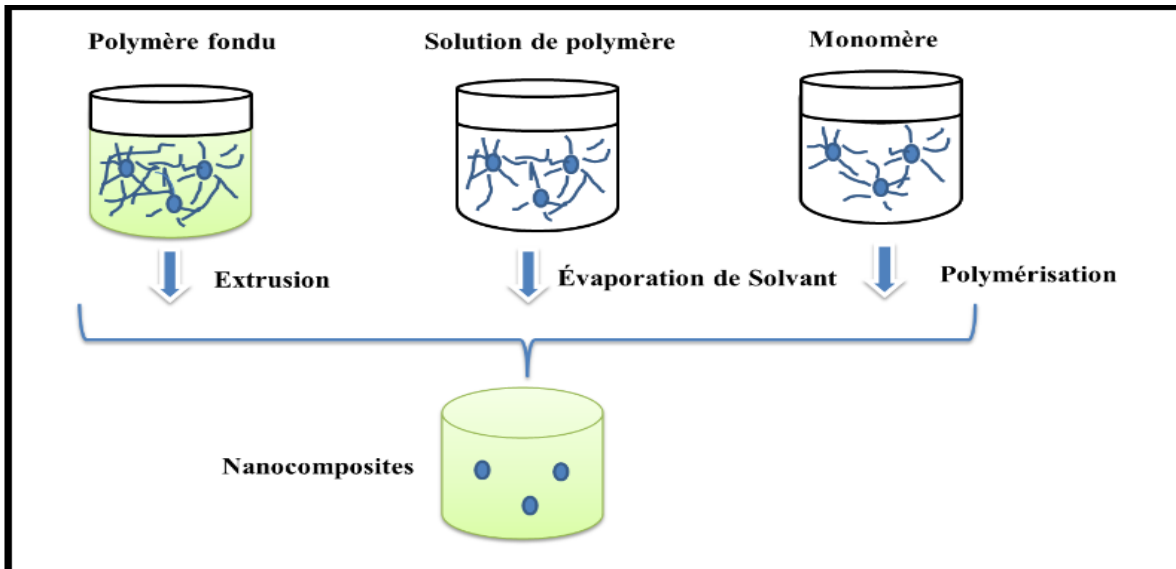


Figure I.8 - Méthodes d'élaborations des nano composites polymères : a) mise en œuvre dans le fondu, b) mise en solution et c) polymérisation in situ [Althues et al 2007]

I.11.1.3 Polymérisation in situ:

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

Le premier avantage de cette méthode est qu'elle ne nécessite pas l'utilisation de solvants qui sont coûteux et difficiles à éliminer. Le deuxième avantage est qu'elle permet d'obtenir un bon état de dispersion notamment grâce au fait que les charges sont introduites dans le monomère fondu qui a une faible viscosité. [Zidour 2012]

Tableau I.3 : Comparaison des différentes méthodes d'élaboration des composites polymères/NTC [Chemi 2018]

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

I.11.4 Dispersion des renforts :

I.11.4.1 Utilisation des ultrasons :

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

- dans un premier temps, la masse appropriée de (CNT) est introduite dans un volume d'éthanol et placée aux ultrasons pendant (~ 1 heure), jusqu'à l'évaporation du solvant.
- ensuite la poudre de (CNT) est ajoutée à la base et à nouveau soumise aux ultrasons durant (1 heure).

La dernière étape d'élaboration du composite consiste à rajouter le catalyseur à la solution précédente pour procéder à la réticulation du polymère. Les images ci-dessous montrent que l'usage des ultrasons peut fournir des résultats assez satisfaisants. En effet, un tel procédé permet de briser les gros agrégats de (CNT). Cependant, des observations au microscope optique sur une gouttelette de la solution constituée de base + (CNT) (après 2 heures de passages aux ultrasons) montrent que des agglomérats de tailles micrométriques persistent (fig I.9). [Bozlar 2009]

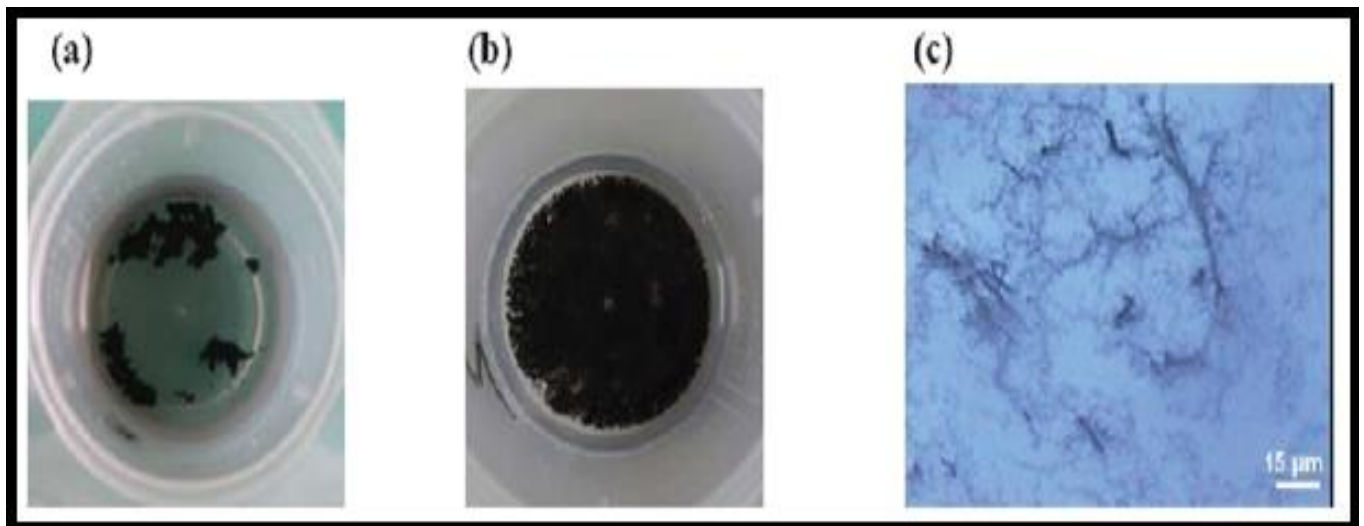


Figure I.9: L'influence de la dispersion des (CNTs) par ultrasons. (a) (CNTs) dans l'éthanol avant passage aux ultrasons. (b) Après 1 heure aux ultrasons. (c) Image microscope optique d'une gouttelette de base + (CNTs) après 2 heures de dispersion. Des agrégats sont encore présents.

[Bozlar 2009]

Les inconvénients de l'utilisation des ultrasons sont:

- ✓ Volume de matière limité.
- ✓ Nécessite des liquides de basse viscosité pour qu'elle soit efficace.
- ✓ Des recherches [Lu 1996], [Gu 2008] ont montré que l'énergie fournie par les vibrations aux fréquences ultrasonores induit des défauts, voire même la coupure des (NTC).

Malgré ces points négatifs, l'utilisation d'ultrasons reste bien souvent nécessaire pour disperser les (NTC) lorsque ceux-ci sont en suspension dans un solvant (avant de mélanger ce dernier à la matrice polymère). Les ultrasons permettent en effet de séparer les amas de tubes, allant même jusqu'à les individualiser. L'étude réalisée par [Liao 2004] montre l'importance de l'utilisation des ultrasons pour améliorer la dispersion des (NTC).

I.11.4.2 Dispersion mécanique par tri cylindre:

A l'origine, cet appareil a été conçu pour broyer des produits dans l'industrie pharmaceutique ou alimentaire (figure I.10 a). Son utilisation pour disperser les (CNTs) est récente. [Thostenson et al 2006], ont montré que le tricylindre est un outil assez performant pour disperser de manière homogène les (CNTs) dans une résine époxy. Ils ont pu ainsi obtenir des niveaux de conductivités électriques et thermiques supérieurs à d'autres travaux (utilisant notamment les ultrasons).

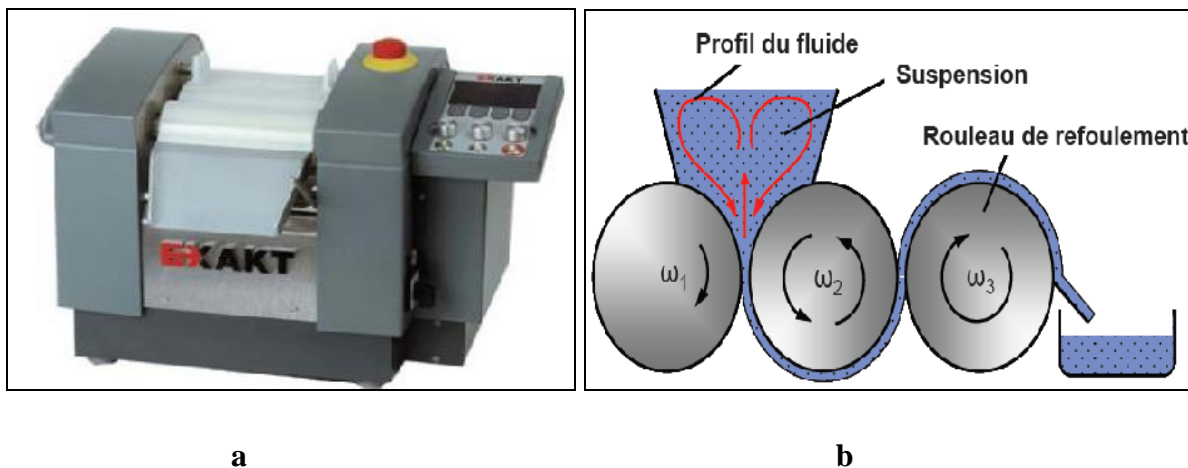


Figure I.10 a) Tricylindre Exakt 80E (Source : Exakt Vertriebs GmbH, Allemagne).

b) Schéma du circuit d'un fluide dispersé par tricylindre (Source: IPAT, TUBraunschweig, Allemagne). [Bozlar 2009]

Le principe général de ce système mécanique consiste à appliquer une combinaison de forces de cisaillements et de pressions sur un fluide en régime laminaire. La solution à disperser est introduite au niveau des rouleaux 1 et 2. (fig I.10 b) Le cylindre du milieu (numéro 2) tourne dans un sens opposé aux deux autres. On peut modifier la vitesse de rotation du rouleau de refoulement ω_3 (tr/min), qui peut varier entre (30 et 600 tr/min). Ensuite, les deux autres cylindres tournent à des vitesses de rotation différentes avec un rapport de démultiplication tel que: [Bozlar 2009]

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

Le second paramètre que l'on peut modifier avec cet appareil est la distance entre chaque rouleau. Elle peut être comprise entre (5 et 130 μm). La combinaison de ces deux paramètres permettant aussi bien de régler la vitesse de rotation des rouleaux (forces de cisaillement) et la distance (pression exercée sur le fluide). L'avantage que nous voyons à ce procédé est qu'il permet une grande cadence de fabrication. Ce procédé a été récemment utilisé par les membres de l'équipe de K. Schulte à Hambourg [Goj 2004] et celle de Thostenson à Virginia Tech. (USA) [Thostenson 2005] pour disperser des (NTC) dans des polymères époxyde.

I.12 Conclusion :

Les nano composites, à l'image des nanotechnologies plus généralement, suscitent de nombreux espoirs du fait de leur potentiel et d'un certain engouement médiatique. Les premières applications industrielles récentes sont des étapes nécessaires pour le développement et l'épanouissement d'une telle technologie qui a besoin d'un premier succès pour amorcer son passage du laboratoire à la commercialisation. En général, le composite est formulé pour satisfaire à des critères de résistance, de rigidité ou bien de tenue à l'action de l'environnement. Les polymères présentent des propriétés variées et abondantes qui font d'eux des candidats idéals pour la fabrication des nano composites, en particulier ceux renforcés avec des NTC.

Le terme de nano composite décrit un matériau biphasé dont la phase de renfort présente une dispersion de taille nanométrique. La matrice peut être métallique, céramique ou polymère. Nous avons savoir les trois principales techniques de traitement, nommément, polymérisation de solution, fondu et in situ ont leurs avantages uniques : fabrication nano composites NTC /polymère, Bien que les solutions mélange composite de haute qualité de produit mais le compound âge de fondu est beaucoup plus simple et option pour la production à grande échelle.

L'amélioration maximale des propriétés mécaniques de la matrice de polymère est observée dans le cas de polymérisation in situ qui produit la liaison covalente entre le NTC et polymère de matrice, Cependant il négativement influence les propriétés électroniques du composite.

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

Chapitre II : Généralité sur les Nanotubes de carbone

II.1 Introduction:

Les nanotubes de carbone (NTC) constituent l'une des classes de nanomatériaux les plus intensivement étudiées en raison de leur utilisation potentielle dans un certain nombre d'applications. Les nanotubes de carbone ont une forme allotropique du carbone appartenant à la famille des fullerènes. Ils sont composés d'un ou plusieurs feuillets d'atomes de carbone enroulés sur eux-mêmes formant un tube. Ce dernier peut être fermé ou non à ses extrémités par une demi-sphère. On distingue les nanotubes de carbone simple-feuillet et multi-feuillets. La conductivité électrique, la conductivité thermique et la résistance mécanique des nanotubes de carbone sont remarquablement élevées dans leur sens longitudinal. Ils font partie des produits issus des nanotechnologies actuellement utilisés et commercialisés dans différents domaines. Les nanotubes de carbone sont cent mille (100000) fois plus fin qu'un cheveu, cent (100) fois plus résistant et six (6) fois plus léger que l'acier en plus de leurs flexibilités qui permettent à ce matériau d'être utilisé dans divers applications notamment dans la conception de nouveaux matériaux.

Dans ce chapitre nous allons présenter les nanotubes de carbone (formes, géométrie et caractéristiques) après avoir présenté et décrit les formes traditionnelles du carbone tel que le graphite et le diamant. Par la suite nous allons présenter les procédés de synthèses les plus répandus ainsi que leur application.

II .2 Carbone:

Le carbone est l'élément chimique de numéro atomique 6, de symbole C. Il possède trois isotopes naturels ^{12}C , ^{13}C et ^{14}C ; les deux premiers sont stables tandis que le troisième est radioactif. Le carbone est la tête de file du groupe des cristallogènes. Le corps simple carbone présente plusieurs formes allotropiques dont principalement le graphite et le diamant. L'élément carbone forme divers composés inorganiques comme le dioxyde de carbone (CO_2), et une grande variété de composés organiques et de polymères. C'est l'élément de base de toutes les formes de vie connues. Le carbone est le 4ème élément le plus abondant dans l'univers et le 15ème le plus abondant dans la croûte terrestre. Il est présent sur Terre à l'état de corps simple (charbon et diamants), de composés inorganiques (CO_2 et CH_4) et de composés organiques (biomasse, pétrole et gaz naturel).

De nombreuses structures basées sur le carbone ont également été synthétisées : charbon actif, noir de carbone, fibres, nanotubes, fullerènes et graphène. La combustion du carbone sous toutes ses formes a été le fondement du développement technologique dès la préhistoire. Les matériaux à base de carbone ont des applications dans de nombreux autres domaines : matériaux composites, batteries lithium-ion, dépollution de l'air et de l'eau, électrodes pour les fours à arc ou la synthèse de l'aluminium. [Wang et al 2003].

II.2.1 Les formes traditionnelles du carbone :

Les formes de carbone les plus connus sont le graphite et le diamant.

II.2.1.1 Le graphite :

Le graphite est un minéral noir friable utilisé depuis des siècles pour l'écriture (encre de Chine, crayon à mine). La structure du graphite est constituée d'un empilement de plans, chacun étant constitué d'un pavage régulier d'hexagones en nid d'abeilles des liaisons faisant entre elles des angles de (120°). Ces liaisons planes sont fortes et caractérisées par une distance entre atomes de ($0,142 \text{ nm}$). Les atomes sont au contraire faiblement reliés aux atomes des plans voisins comme sur la (Figure II-1), et la distance entre plans d'hexagones est de ($0,335 \text{ nm}$). Cette structure a une densité d'un tiers plus faible que celle du diamant et définit le graphite comme un solide très anisotrope, quasi-bidimensionnel car les plans faiblement reliés glissent facilement les uns par rapport aux autres. Le graphite possède des propriétés thermiques et électriques très anisotropes.

Les liaisons covalentes entre les atomes de carbone dans le graphène confèrent une grande vitesse de propagation aux phonons dans la direction parallèle du plan, Il possède ainsi une conductivité thermique d'environ $400 \text{ W m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, cette dernière chute à $5 \text{ W m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ dans la direction perpendiculaire [Brochard et al 1986]. Quant à sa conductivité électrique, elle est assurée par la délocalisation des électrons sur l'ensemble du plan et atteint $1,7 \times 10^5 \text{ S m}^{-1}$ dans la direction du plan et chute pareillement dans la direction perpendiculaire à $7 \times 10^4 \text{ S m}^{-1}$ [Bethune et al 1993]. Le graphite a un large domaine d'utilisation qui passe de la vie quotidienne, comme mine des crayons à papier aux applications industrielles, comme les lubrifiants, joints d'étanchéité, balise pour moteurs électriques, modérateur de réacteur nucléaire, etc.....

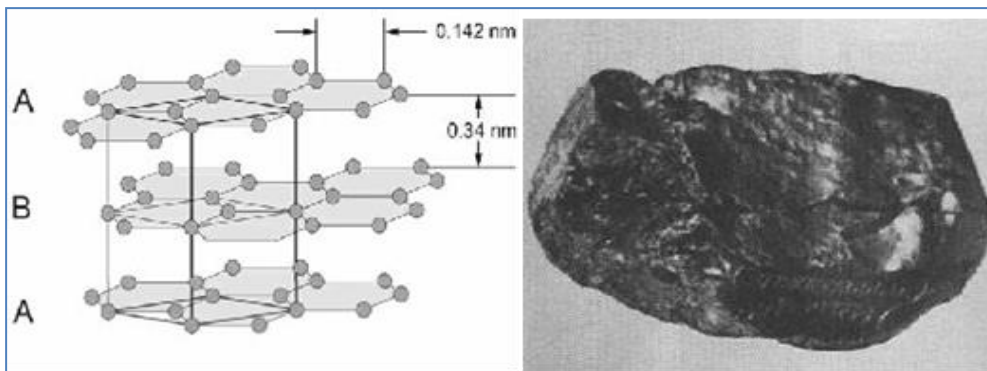


Figure II-1 : Structure du graphite hexagonal.

II.2.1.2 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 ($> 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ et plusieurs giga qu'à haute pression.

Cependant, c'est une forme métastable du carbone, ce qui lui permet donc d'exister aux conditions ambiantes. Le diamant c'est un cristal 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. La maille de cette structure est de type cubique faces centrées, avec un paramètre de maille de 0,356 nm.

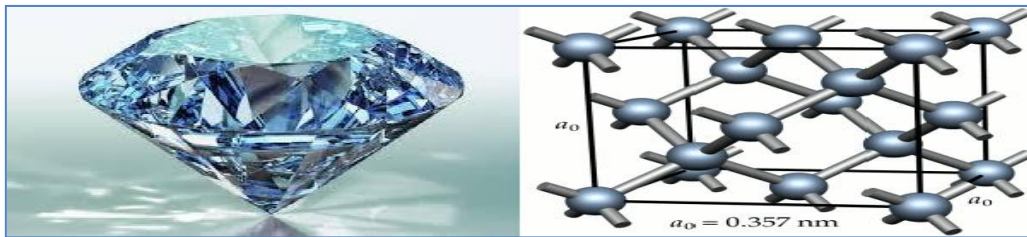


Figure II-2 : structure de diamant.

II.2.2. Les nouvelles formes de carbone :

II.2.2.1. Fullerènes :

L'élément principal du graphite, et également point de départ pour la construction de nouvelles nanostructures carbonées, est le plan de graphène, que l'on peut se représenter comme une feuille plane pavée d'hexagones. Il est possible de briser virtuellement la planéité de la feuille de graphène en insérant des défauts dans la structure, de type pentagone ou heptagone [Bogdan 2014]. L'ajout d'un pentagone dans un plan d'hexagones crée une courbure positive. L'ajout d'un heptagone créera, dans le même plan, une courbure négative. La courbure créée par chaque type de défaut s'annule, et une feuille de graphène dans laquelle on aurait inséré un pentagone et un heptagone resterait globalement plan.

En 1985, Curl, Kroto et Smalley ont réussi à isoler une forme majoritaire constituée de 60 atomes de carbone. Cette molécule, refermée sur elle-même comme une cage, a la forme d'un icosaèdre tronqué dont tous les sommets sont occupés par des atomes de carbone. Sa structure est alors constituée de 12 pentagones et de 20 hexagones (Figure II-3). Cette nouvelle molécule de 60 atomes de carbone, ou C_{60} , a été appelée Buckminster fullerène, par analogie avec les dômes géodésiques de l'architecte R. Buckminster Fuller.

Depuis, le nom a évolué, et nous nous référons maintenant à cette molécule en tant que fullerène, ou plus simplement C_{60} . Le fullerène C_{60} est le représentant le plus connu de famille des fullerènes, molécules « cage » de plus de 60 atomes de carbone [Saito et al 1998]. Les fullerènes doivent obéir à de fortes conditions de stabilité chimique, toutes les structures géométriquement possibles

n'existent pas. Les fullerènes les plus connus sont les C_{60} et C_{70} , mais il existe également les C_{76} , C_{78} , C_{82} , C_{84} . Depuis leur synthèse initiale par ablation laser, les moyens de production de fullerènes ont progressé. En 1990, Krätschmer réussit la première synthèse à grande échelle de fullerènes par la sublimation d'une électrode en graphite par arc électrique [Marcoux 2002].

Aujourd'hui, des méthodes de synthèse du C_{60} par voie organique existent, ouvrant la voie à une production de masse des fullerènes [Saito et al 1992].

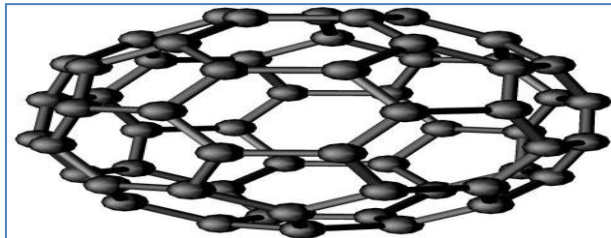


Figure II-3 : fullerène C_{60} . [Saito et al 1992]

II.2.2.2. Les nanotubes mono-feuillets (ou mono-parois) :

Les nanotubes de carbones mono-parois (Single Wall NanoTubes, SWCNT) sont constitués d'une seule paroi. Ces nanotubes mono-parois sont classés en trois catégories : zigzag, chiral ou chaise. Les nanotubes monofeuillet ont été découverts en parallèle par Béthune et Iijima en 1991, [Krätschmer 1990]. C'est une feuille de graphène enroulée sur elle-même de manière à former un cylindre unique, Le nano-objet obtenu est alors unidimensionnel. Les atomes de carbone restent dans un état d'hybridation (sp^2). Le diamètre d'un nanotube mono paroi peut varier entre 1 et 2 nm, la longueur est encore plus variable (100 nm à quelques millimètres) [Iijima 1991].

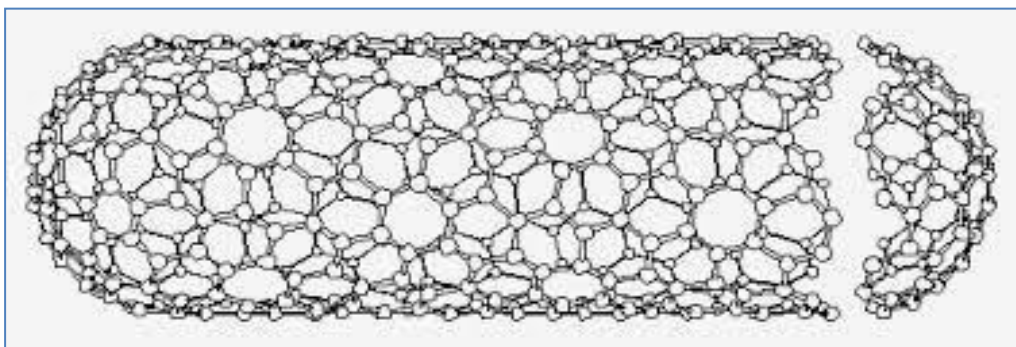


Figure II-4 nanotube de carbone (SWCNT). [Marcoux 2002].

La géométrie d'un NTC peut donner 2 vecteurs directeurs, a_1 et a_2 . On définit ensuite le vecteur de chiralité, C_h , axe selon lequel le graphène s'enroule pour former le nanotube. Ce vecteur peut donc être décomposé en deux composantes, selon les vecteurs a_1 et a_2 . Soient m et n les scalaires tels que: $C_h = n a_1 + m a_2$. (II.1)

L'angle de chiralité a l'angle entre le vecteur chiral et la direction zigzag (Figure II-5) :

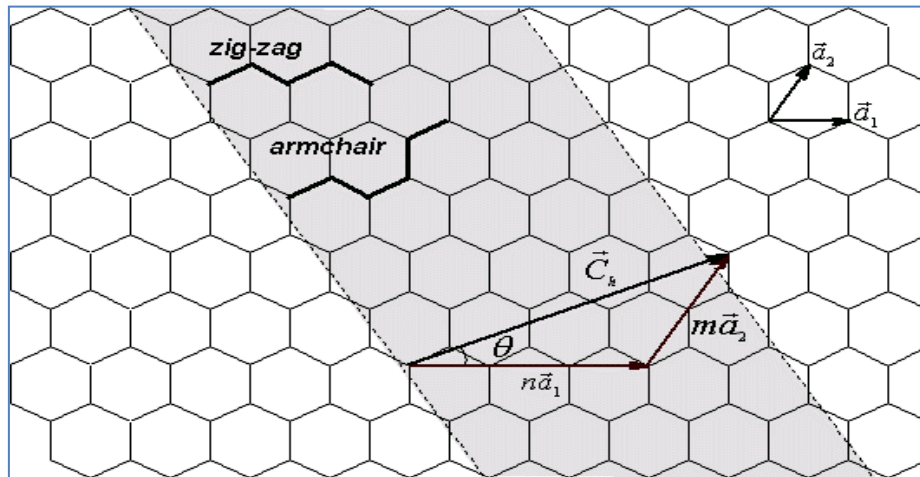


Figure II-5 structure d'un plan de graphène en deux dimensions. [Thostenson et al 2001]

Le réseau hexagonal est décrit à partir des deux vecteurs de base a_1 et a_2 . Selon la valeur de ces 2 scalaires, 3 types d'enroulements, donc trois types de nanotubes peuvent être décrits :

(figure II-6). Si ($m = 0$ ou $n=0$) : on dira que le nanotube a une structure de type « zigzag » ;

Si ($m = n$) on dira que le nanotube a une structure de type « chaise » ou « Armchair »

Dans tous les autres cas, on dira que le nanotube est « chiral ».

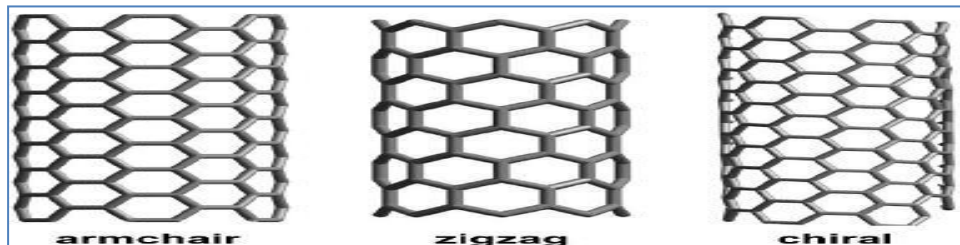


Figure II-6 : les différents types de nanotubes mono parois : armchair, zigzag, chiral. [Dresselhans, 1995]

L'enroulement de la feuille de graphène définit la structure (zigzag, armchair et chiral) et les propriétés physico-chimique du nanotube et tout particulièrement les propriétés électriques. C'est ainsi qu'on peut classer par chiralité des nanotubes conducteurs et d'autres semi-conducteurs.

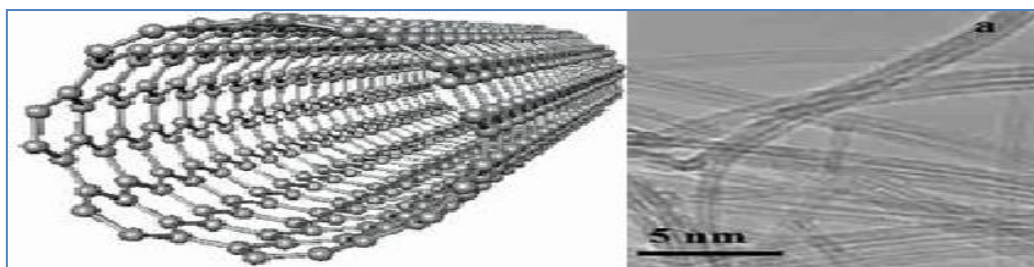


Figure II-7 : A gauche : représentation graphique d'un SWCNT. A droite : Image de microscope électronique a transmission de plusieurs SWCNT [Izard2004]

Les nanotubes mono-parois ne possédant qu'un seul feuillet enroulé sur lui-même sont dits mono-paroi (SWCNT). Leur diamètre peut varier de 0.4 à 10nm [Journet et al 1998]. Bien que la plupart des SWCNT observés aient un diamètre inférieur à 2 nm. Leur longueur, quant à elle, est en règle générale de l'ordre du micron, mais peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres selon les conditions de synthèse. Si l'on se focalise sur leur très grand rapport d'anisotropie, c'est-à-dire le rapport entre leur longueur et leur diamètre qui peut être aussi grand que 10^3 à 10^5 nm, ces nanotubes peuvent être considérés comme des structures unidimensionnelles. Toutefois, quoiqu'ils soient rarement isolés, ils préfèrent plutôt s'associer au sein de faisceaux (ou fagots) de nanotubes, c'est-à-dire des agrégats constitués d'une dizaine à une centaine de nanotubes parallèles répartis au sein d'un réseau hexagonal (Figure II-8).

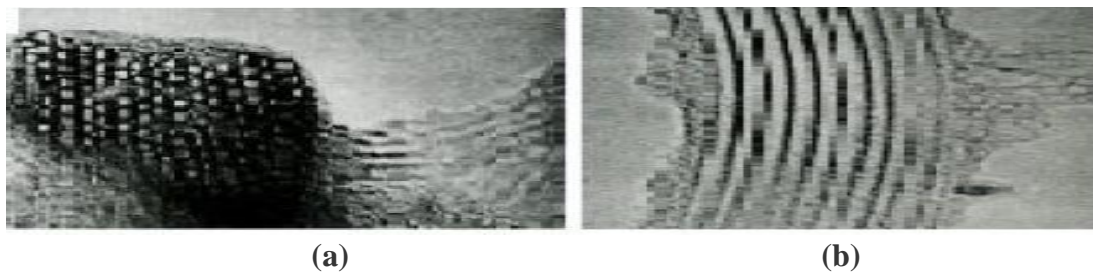


Figure II-8 (a) Cliché (microscopique électronique en transmission) de fagots de nanotubes mono parois en coupe transversale.

(b) Cliché (microscopique électronique en transmission) de fagots de nanotubes mono parois en coupe longitudinale.

Le diamètre de chaque nanotube est ici environ 1nm. [Marcoux 2002].

II.2.2.3 Les nanotubes multi-feuillets(ou multi-parois) : Multiwalled carbone nanotubes MWCNT):

Ils sont constitués de plusieurs feuillets de graphène de 0.340nm enroulés les uns autour des autres. Ils se présentent comme des tubes creux concentriques avec un diamètre interne de l'ordre du nanomètre et une longueur de l'ordre de quelques micromètres (figure II-9). Il existe deux modèles pour décrire la structure des nanotubes multi-feuillets.

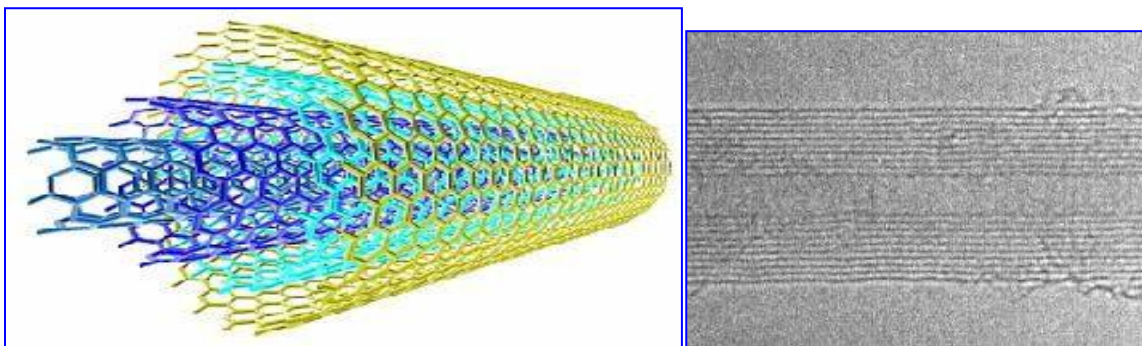


Figure II-9 à gauche présentation graphique d'un MWNT et à droite : image de microscope Électronique à transmission de plusieurs MWNT [Saint-aubin2010].

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

Le modèle « poupée ruse » : les plans de graphène sont arrangés en cylindres concentriques par emboîtement (Figure II-10).

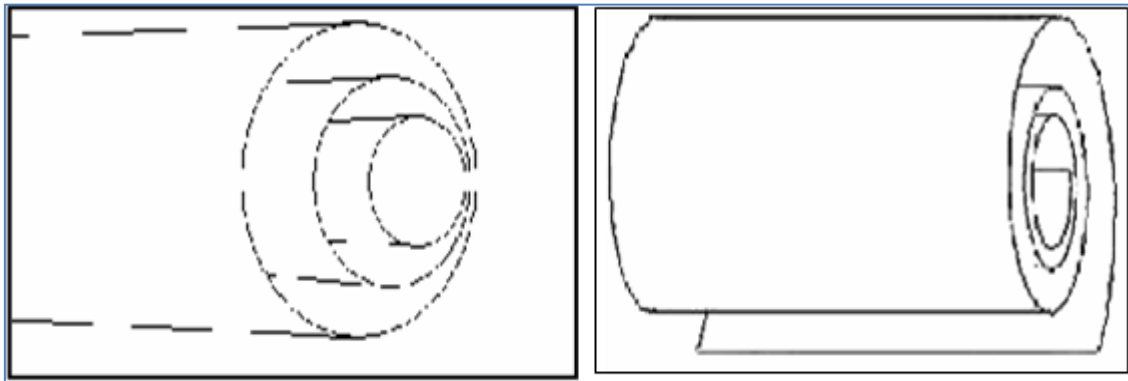


Figure II-10 type poupée ruse à gauche : type rouleau de parchemin à droite. [Saint-aubin2010].

II.3 Synthèses des nanotubes:

Dans ce paragraphe sont succinctement décrits les principaux procédés utilisés pour la synthèse des nanotubes de carbone. On peut les répartir en quatre grandes familles :

II.3.1 Méthode arc électrique :

La technique de l'arc électrique est un procédé de synthèse haute température. Cette technique a permis de synthétiser les fullerènes en grande quantité [Krätshmer 1990], et de produire les premiers nanotubes multi-feuillets identifiés par S. Iijima [Iijima 1991].

Cette technique est basée sur l'évaporation du graphite par un arc électrique, amorcé entre deux électrodes en graphite (Figure II-11). Un plasma chaud (environ 6000 K) est formé et maintenu entre ces deux électrodes, l'anode étant progressivement sublimée. Les espèces carbonées sublimées dans le plasma vont se recombiner à l'extérieur, et les produits formés vont se déposer sur les parois du réacteur. Les conditions de température à l'intérieur de l'enceinte sont très importantes pour la qualité et la quantité des nanotubes formés.

La température est contrôlée en utilisant un gaz inerte (He, Ar...) à une certaine pression. Un collecteur refroidi par eau peut également être utilisé, suivant la géométrie du réacteur employé.

La synthèse de nanotubes de carbone mono-feuillet nécessite l'emploi d'une anode en graphite. Contenant également des catalyseurs métalliques.

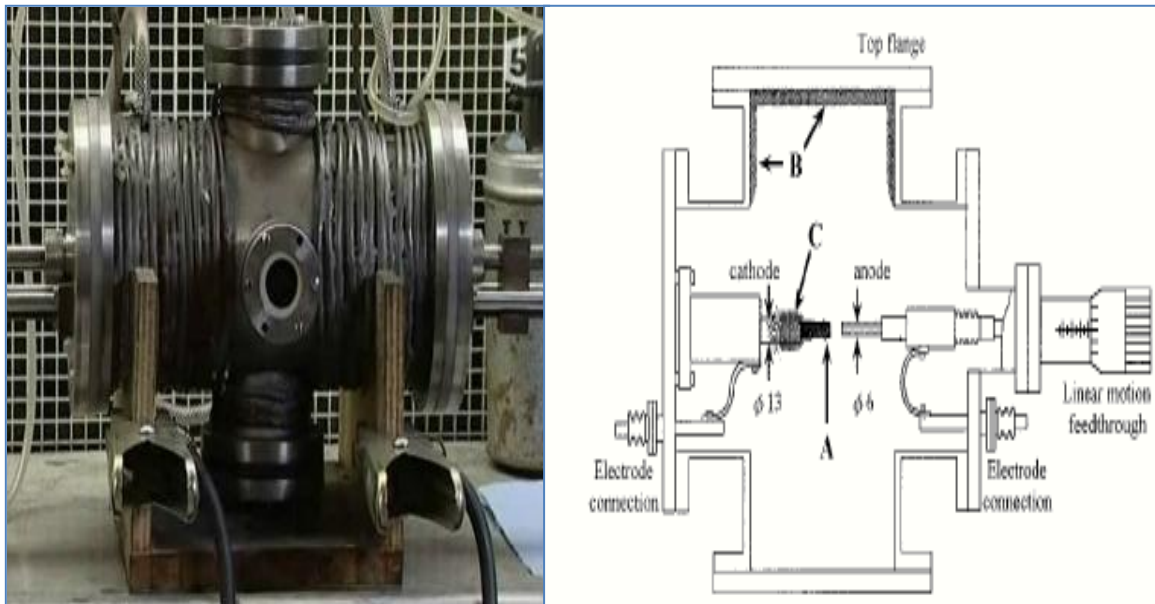


Figure II-11 Schéma de la synthèse des CNTs par décharge arc électrique. [Marcoux 2002].

Ces catalyseurs vont être sublimés avec le graphite lors de la création du plasma, et vont permettre aux fagots de nanotubes de croître [Bethune et al 1993]. Les catalyseurs les plus employés sont Ni, Fe, Co, Pt, Pd, Rh, Y, La, Lu... À l'issue de la synthèse, la proportion la plus importante de nanotubes mono-feuillets se retrouve dans une zone appelée collerette, autour de la cathode, qui présente un aspect spongieux. Notons qu'en 1997, C. Journet et al. ont amélioré la technique de l'arc électrique en employant un mélange de catalyseur Ni/Y [Journet 1998]. Ce mélange a permis d'obtenir des rendements de synthèse élevés, ce qui ouvert la voie à la production de masse des nanotubes mono-feuillets. Aujourd'hui, un certain nombre de sociétés et Mer Inc. entre autres) commercialisent des nanotubes produits par cette technique [Bernard, 2007].

II.3.2 Méthode d'ablation laser :

La synthèse de nanotubes de carbone par la méthode d'ablation laser a été décrite pour la première fois en 1996. Les nanotubes de carbone sont produits lors de la vaporisation d'une cible, composée de graphite et de catalyseurs métalliques, sous l'effet d'une forte irradiation laser. La cible de graphite dopée est placée dans un four (autour de 1200C).

Sous l'effet du laser (un laser Nd-YAP à 1,08 μm avec une fréquence de répétition de 15 Hz, des impulsions de 20 ns et une énergie par impulsion de 300 mJ, la cible de graphite est vaporisée et les nanotubes se forment. À l'aide d'un flux de gaz inerte (flux d'argon à 1,6 Lh⁻¹ par exemple [Thess, 1996], la suie produite est transportée jusqu'à un collecteur en cuivre sur lequel elle se condense. C'est ce condensat qui constitue le produit de la synthèse. Les catalyseurs additionnés à la cible de graphite sont le plus souvent le nickel et le cobalt. Le travail "titanesque" qu'effectuent

les producteurs de nanotubes de carbone est de faire varier de façon systématique les différents paramètres de synthèse pour améliorer le rendement, le contrôle de la chiralité, la puretéetc. Ils font notamment varier la nature des catalyseurs, leur proportion, la puissance du laser, son taux de répétition, la température du four, le flux de gaz inerte, sa nature... etc. [Thess, 1996], Cette méthode produit des nanotubes de carbone mono- paroi qui ils sont organisés en corde comme sur la (Figure II-12).

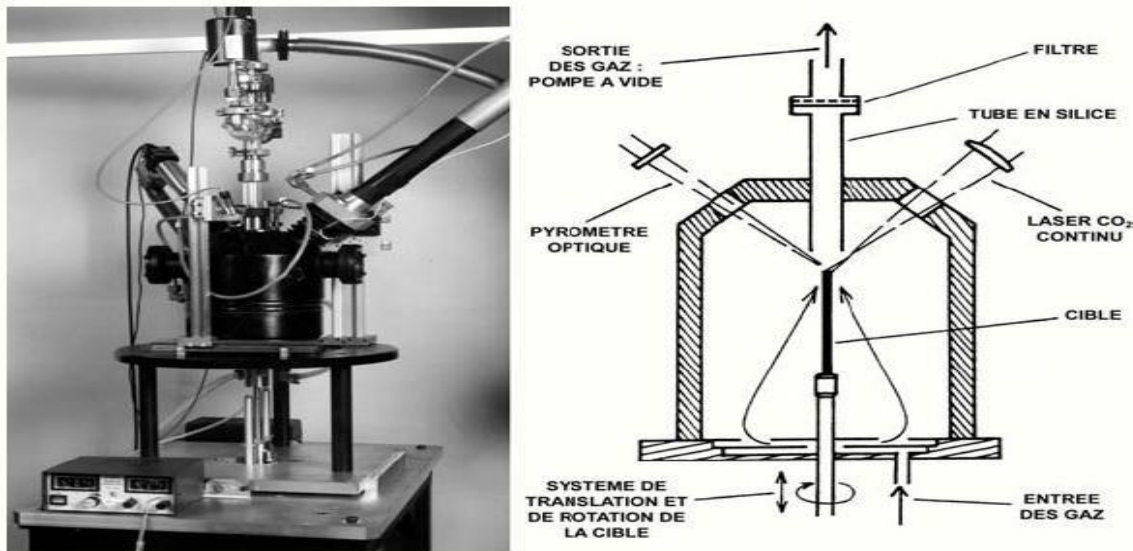


Figure II-12 Schémas simplifiés la réaction de synthèse laser continu (CO₂) de L'ONERA [Treacy et al 1996].

Au sein d'une corde, les nanotubes sont liés les uns aux autres par des liaisons de Van-der-Waals de l'ordre de 500 eV par micron de contact inter-tubes et la distance entre nanotubes est de l'ordre de 0,315 nm [Saito et al 1998]. Un des avantages de la méthode de synthèse par ablation laser est qu'elle permet de produire d'assez grandes quantités de nanotubes mono-paroi (g/Jour). Les rendements sont très élevés, 70% à 90% de la masse de graphite de départ.

II.3.3 Méthode de dépôt chimique en phase vapeur :

La synthèse de nanotubes de carbone par la méthode de dépôt chimique en phase vapeur (abrégée en CVD pour Chemical Vapor Déposition) a été effectuée pour la première fois. [Endo 1995]. Dans cette méthode, des hydrocarbures (CH₄, C₆H₆...) et de l'hydrogène sont mis en présence de catalyseurs métalliques (Fe, Co, Ni...), le tout dans un four porté à haute température ($T > 700\text{C}$). Les nanotubes se forment alors sur les plots de catalyseurs (Figure II-13). L'un des avantages de cette méthode est que les nanotubes se forment de façon continue (contrairement à la méthode d'ablation laser par exemple). Nous pouvons espérer trouver des conditions expérimentales permettant de fabriquer des nanotubes purs avec un contrôle parfait du diamètre et de la chiralité. Cependant, cela est encore loin d'être la réalité. Un autre avantage de cette méthode est que l'on peut

faire croître les nanotubes à des endroits prédéterminés. Cela peut s'avérer très intéressant pour toutes les applications en nanoélectronique, par exemple, pour fabriquer des matrices de transistors à base de nanotubes de carbone.

Il existe également une technique de synthèse de forêts de SWCNT par CVD assistée avec de l'eau qui supprime le carbone amorphe et permet ainsi une croissance non limitée : les SWCNT ainsi créés peuvent atteindre une hauteur de plus de 2 cm. De plus, il est possible d'aligner les nanotubes entre eux, perpendiculairement à la surface. Nous obtenons alors des « pelouses » de nanotubes. Cette propriété est très intéressante pour toutes les utilisations des propriétés d'émission de champ des nanotubes. En revanche, un inconvénient de cette méthode est qu'elle ne permet pas, pour le moment, de fabriquer de grandes quantités de nanotubes mono-parois., si la production de nanotubes de carbones multi-parois est relativement facile, celle de nanotubes de carbones mono-parois est difficile.

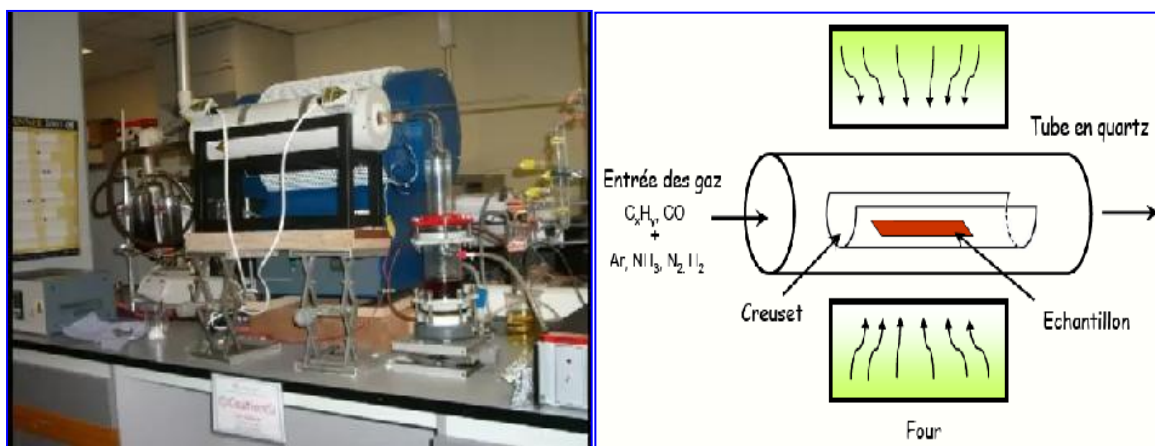


Figure II-13 Schéma d'un réacteur CVD pour la croissance des (NTC). [Endo 1995].

II.3.4 Décomposition catalytique (Hip Co) :

Le procédé (Hip CO) (High Pressure dismutation of CO : décomposition sous haute pression de CO) a été développé par le groupe de R. Smalley [Nikolaïev 1999]. Ce procédé fait partie de la famille des procédés de décomposition catalytique à moyenne température. Un flux continu de penta carbonyle de fer ($Fe(CO)_5$) et de monoxyde de carbone (CO) est introduit sous une pression de 10 atm dans une enceinte chauffée à $1200^\circ C$. L'originalité du procédé tient au fait que le catalyseur, nécessaire à la croissance des tubes mono-feuillets, est formé in situ par la décomposition du gaz précurseur. De surcroît, le monoxyde de carbone utilisé comme source de carbone pour la croissance des tubes ne se pyrolyse pas à $1200^\circ C$, ce qui permet d'obtenir des nanotubes de carbone mono-feuillets exempts de toute impureté graphitique. Les nanotubes formés par cette technique sont assez originaux. Ils présentent une large distribution de longueurs (dont des nanotubes très petits), mais contiennent beaucoup de catalyseur résiduel.

Cette technique permet la synthèse à grande échelle de nanotubes mono- feuillets. Le procédé de fabrication est Fux continu, ce qui est très positif pour une industrialisation. Une société commerciale (Carbone Nano Tech Inc.) propose des nanotubes synthétisés par cette technique. En outre, le fait de pouvoir obtenir des nanotubes avec un diamètre moyen très petit (de l'ordre de 0,7 nm) est un avantage en ce qui concerne les propriétés optiques puisque cela ramène la bande interdite des nanotubes semi-conducteurs vers des régions spectrales où les détecteurs sont les plus sensibles. Figure II-14

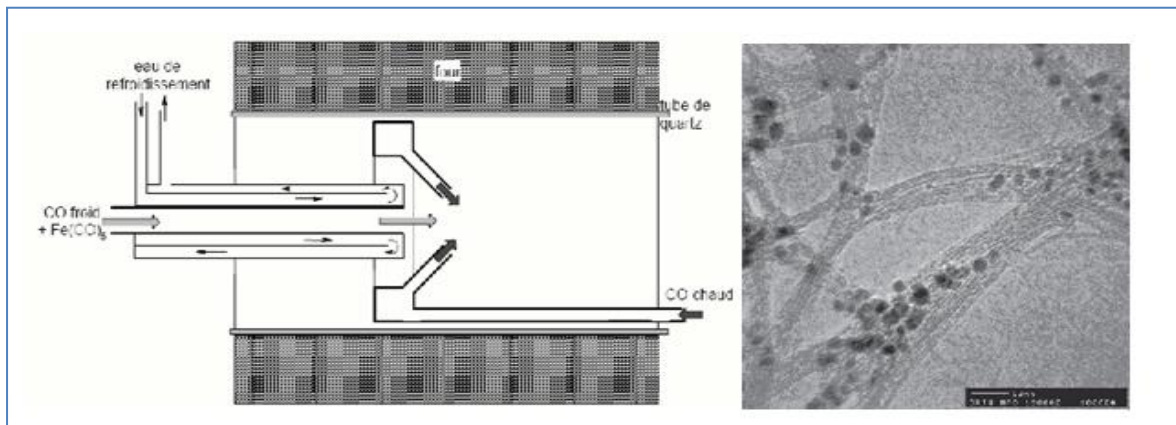


Figure II-14 : à gauche schéma de la production de nanotubes par méthode (Hip Co) à droite image de nanotubes (Hip Co). [Marcoux 2002].

II.4 Propriétés des nanotubes de carbone:

Bien qu'étant proches du graphite de par leur structure, les nanotubes présentent des propriétés intrinsèques bien différentes et parfois beaucoup plus intéressantes que celles de ce matériau.

II.4.1 Propriétés mécaniques :

Etant donné la force de la liaison C=C, les nanotubes sont souvent considérés comme des matériaux au potentiel exceptionnel, notamment en regard de leurs propriétés axiales. Depuis leur découverte, de nombreux travaux théoriques ont prévu un module d'Young très élevé pour les nanotubes. Lu, en utilisant un modèle empirique, prévoit un module de Young de (1.06 TPa) pour les nanotubes mono parois. Il montre aussi que le module de Young, ainsi que d'autres modules élastiques (cisaillement) sont dépendants des caractéristiques géométriques des tubes (chiralité, diamètre...) [Wu 2006].

II.4.2 Propriétés thermiques :

Comme pour la conductivité électrique, la conductivité thermique a d'abord été mesurée sur un film dense d'agrégat de nanotubes. Dans ce cas, la valeur mesurée de $35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ est bien inférieure à la valeur théorique de $6000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Mais les mesures sur des nanotubes multi parois individuels montrent des valeurs de $3000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, proches de la théorie.

II.4.3. Propriétés électriques :

L'une des caractéristiques importantes des nanotubes de carbone est le lien étroit existant entre leur structure spatiale (la nature du repliement) et leurs propriétés électroniques. Ainsi, en fonction de leur chiralité, les nanotubes de carbone peuvent être métalliques ou semi-conducteurs. Un nanotube est métallique si $2n + m$ est un multiple de 3, ou de manière équivalente, si $n.m$ est un multiple de 3. Les nanotubes de type chaise, définis par le couple (n, n) , sont donc métalliques; les autres tubes sont semi-conducteurs en raison des effets de courbure.

D'un point de vue technologique, les nanotubes de carbone présentent des propriétés très attrayantes. Métalliques, les nanotubes peuvent porter des densités de courant très grandes, 10^9 A.cm^{-2} , valeur extrêmement élevée quand nous la comparons à celle d'un métal usuel, 10^6 A.cm^{-2} . Semi-conducteurs, une application centrale vise à les intégrer dans des dispositifs tels que les transistors de champ constituant ainsi des portes logiques laissant, ou non, passer le courant. Pour ce qui nous concerne, le cadre de ce travail cherche plus à exploiter les propriétés mécaniques et les caractéristiques géométriques des nanotubes. Cependant, que cela soit pour exploiter ces propriétés électroniques ou ces propriétés mécaniques, il n'existe pas de méthode fiable permettant de produire des nanotubes aux propriétés ciblées. Cette absence de contrôle des propriétés du matériau au niveau de la production est perçue comme un blocage fondamental pour l'exploitation des nanotubes de carbone pour la nanoélectronique. Comme nous le verrons, cela constitue également une difficulté majeure pour leur exploitation comme nano sondes [Saito et al 1998].

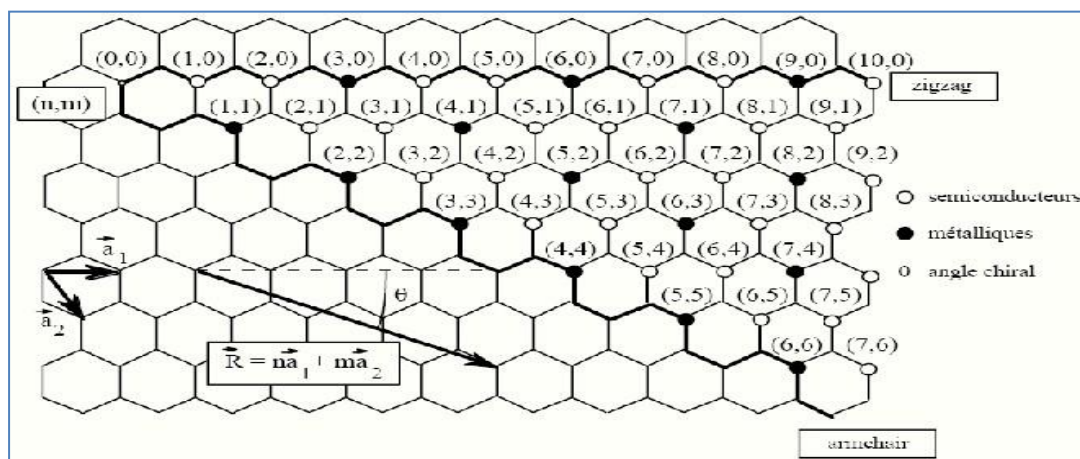


Figure II-15 propriétés électroniques des nanotubes de carbones monocouches en fonction de leurs indices de chiralité (n,m) . [Saito et al 1998].

Au-delà des différentes méthodes de synthèse et de manipulation, une façon d'aborder ce problème est d'intervenir après synthèse en développant des méthodes aptes à modifier les nanotubes de carbone. Si cette dernière approche n'est peut-être pas la plus satisfaisante à terme pour ce qui concerne une éventuelle production industrielle, tant du point de vue des coûts que de la

mise en œuvre, elle présente l'énorme avantage de proposer des solutions dans le cadre de la production à l'unité, qui est-elle tout à fait adaptée pour des travaux de recherche. En outre, cette capacité à modifier les nanotubes de carbone, les cordes ou faisceaux pour les mono-parois ou la capacité à éplucher des multi-parois, peut s'avérer une source d'information utile pour modéliser les propriétés des nanotubes de carbone.

II.5 Défaut des nanotubes de carbone:

II.5.1 Défauts structurels :

Les nanotubes de carbone sont constitués uniquement d'atomes de carbone hybridés sp^2 et formant des réseaux d'hexagones. L'outil principal pour caractériser les nanotubes est la microscopie électronique, qui projette une image en deux dimensions. Pour accéder à la troisième dimension, il faut utiliser les microscopies à effet tunnel et à force atomique. La troisième dimension est en théorie accessible par TEM à l'aide d'une reconstruction numérique à partir d'images (Figure. II-16) En arrêtant la contrainte sur chaque application de courant, un nanotube multi-parois peut être caractérisé après la perte de chaque feuillet le constituant. La Figure II-16 représente l'image de microscopie à effet tunnel et à force atomique. La partie (A) ; La conductance $G(V_g)$ change entre les comportements semi-conducteur et métallique, en raison de la modification de la nature du feuillet externe à chaque étape de l'amincissement. La partie (B) ; Lorsque le dernier feuillet métallique (marqué n-9) a été enlevé, les feuillets semi-conducteurs restants :

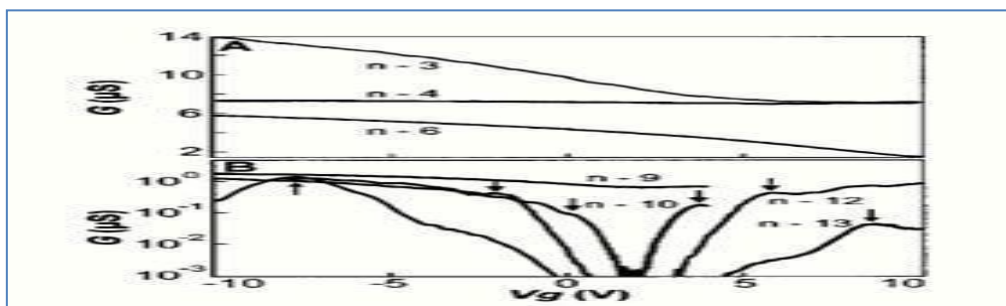


Figure II-16 image de microscopie à effet tunnel et à force atomique. [Marcoux 2002].

En considérant que les pics indiqués par des èches dans la courbe de $G(V_g)$ correspondent aux bords des bandes de conduction et de valence, les auteurs évaluent les gaps des bandes électroniques des différents feuillets par une constante de proportionnalité.

Deux dimensions inclinées à différents angles. En pratique, cette opération est trop lourde pour être exploitable. Parmi les défauts présents dans les nanotubes pouvant avoir une influence notable sur les propriétés mécaniques, nous distinguons les dislocations, les agglomérats, et les défauts topologiques. Les atomes de carbone peuvent former par exemple des pentagones ou des heptagones plutôt que des hexagones. Les dislocations entraînent une diminution de la résistance à

la rupture, alors que les défauts topologiques, lorsqu'ils induisent une courbure locale de la couche de graphite, peuvent diminuer le module élastique effectif d'un nanotube. Les pentagones, supposés à l'origine des courbures observées par TEM, ont été détectés par microscopie à effet tunnel car ils induisent une modification de la densité électronique locale. Le nanotube multi-parois est formé de plusieurs couches concentriques et, comme dans le cas du graphite, chaque couche interagit avec ses voisines par l'action des forces de Van der Waals. Ces forces étant faibles, nous pouvons nous interroger sur la qualité du couplage mécanique entre les couches. La morphologie et la qualité structurale du nanotube multi-parois vont dépendre étroitement de la méthode de synthèse utilisée.

Les nanotubes produits par arc électrique contiennent peu de défauts structuraux du fait de la température élevée des atomes de carbone lors du processus de synthèse, et sont en majorité rectilignes. Les courbures observées sur certains nanotubes sont dues à des contraintes mécaniques plutôt qu'à des défauts de structure. Les nanotubes synthétisés par décomposition catalytique d'un hydrocarbure sont souvent très longs et sont parfois regroupés en fibres continues de nanotubes. Du fait d'interactions van der Waals attractives entre parois, les nanotubes monocouches ont la plupart du temps tendance à s'agglomérer en faisceaux de nanotubes appelés fagots. Du fait de la présence de cycles non hexagonaux, il existe des défauts dans le réseau graphène constitutif d'une paroi, qu'il s'agisse d'un (MWCNT) ou d'un (SWCNT). Un pentagone introduit une courbure positive tandis qu'un heptagone conduira à une courbure négative [Marcoux 2002].



Figure II-17 Influence du type de cycle sur la courbure de la surface. [Marcoux 2002].

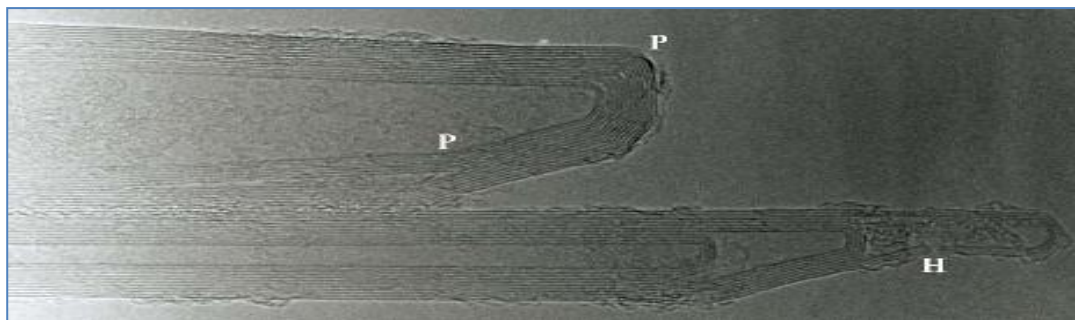


Figure II-18 Image MET des extrémités de deux nanotubes multicouches. [Marcoux 2002].

On a indiqué quelques-uns des cycles non hexagonaux :

(P) indique un pentagone et (H) un heptagone. (Image : Annick Loiseau, Jean Michel Benoît).

La combinaison de plusieurs de ces défauts sur un tube peut induire un grand nombre de géométries particulières. Ainsi, du fait de l'annulation de leurs courbures respectives à un niveau Global mais non à un niveau local, une paire heptagone-pentagone, Peut provoquer une variation de diamètre et de chiralité le long du tube (Figure II-19).

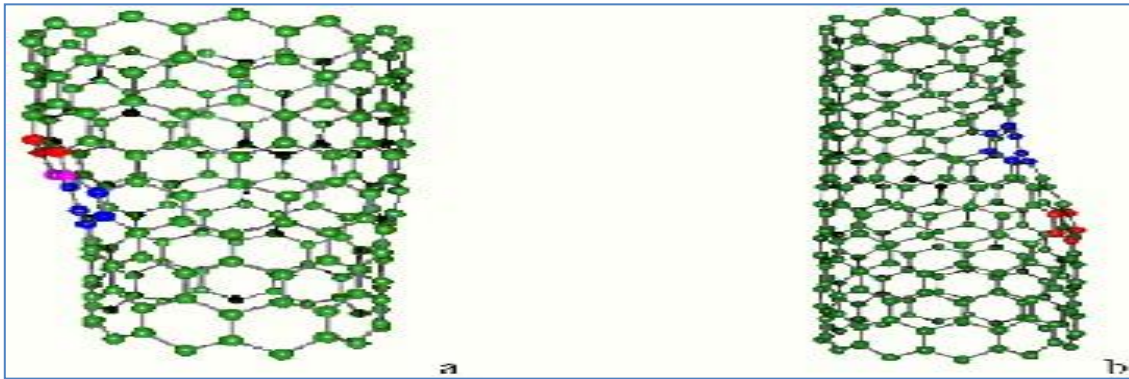


Figure II-19 Introduction d'une paire pentagone-heptagone provoquant une variation de diamètre et de chiralité : a- de (11,0) à (12,0) ; b- de (9,0) à (12,0). [Marcoux 2002].

De telles combinaisons peuvent expliquer la forme torsadée de certains nanotubes multicouches produits par décomposition catalytique d'hydrocarbures. En introduisant ces défauts en plus grand nombre dans le réseau graphitique, il est possible d'imaginer une grande quantité de structures variées (jonctions en Y, en T, etc.) (Figure II-20).

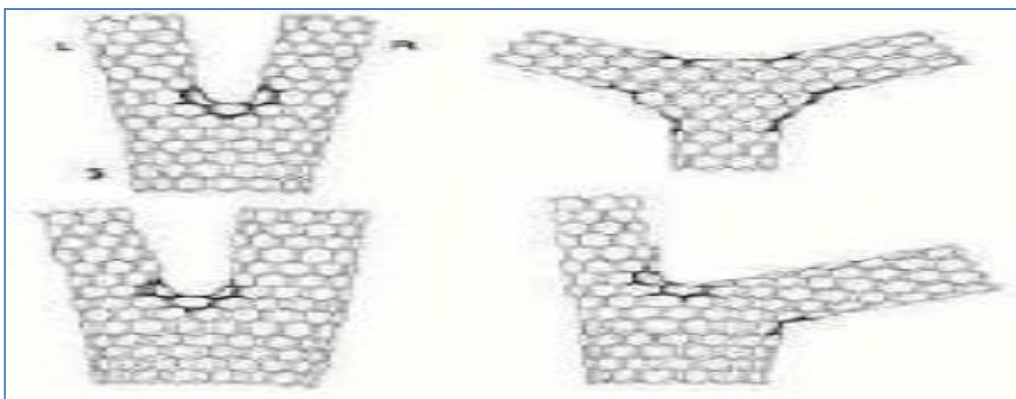


Figure II-20 Défauts pentagonaux et heptagonaux se traduisant par des jonctions. [Marcoux 2002].

En plus de ces défauts qu'on pourrait qualifier d'intrinsèques, il faut tenir compte d'impuretés carbonées ou non, s'ajoutant aux nanotubes. la nature de ces impuretés dépend naturellement du

mode de synthèse des nanotubes [Marcoux, 2002]. Lorsqu'un catalyseur métallique est employé dans la synthèse on le retrouve dans l'échantillon brut. Il est d'autant plus difficile de s'en séparer qu'il est le plus souvent sous forme de particules nanométriques (rendant difficile une séparation par filtration ou centrifugation) et recouvert de plusieurs feuillets graphitiques (rendant peu efficace une élimination par oxydation). Tout le carbone présent dans un échantillon brut n'est malheureusement pas sous forme de nanotubes. On trouve des particules de graphite et du carbone amorphe plus ou moins structuré (Figure II-21). Des molécules carbonées de faible masse peuvent également être présentes, comme du (C60) ou des hydrocarbures poly aromatiques. [Bonard et al 1997].

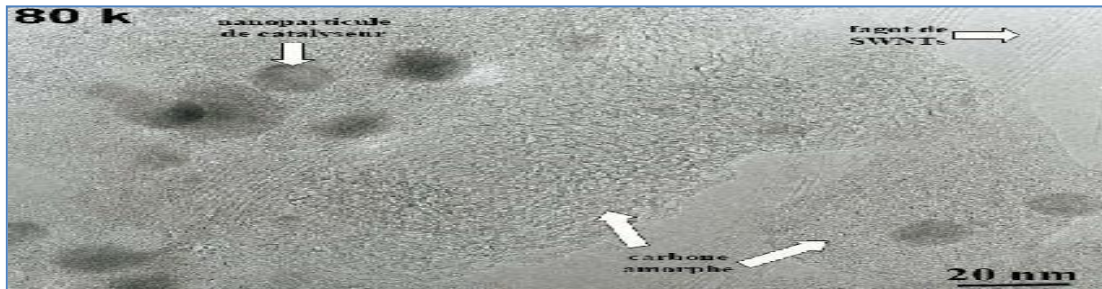


Figure II-21 : Image (MET) d'un échantillon d'un nanotube collerette brut produite par arc électrique on peut distinguer en plus (SWCNT) des particules de catalyseur et deux formes de carbone amorphe. [Bonard et al 1997].

II.6 Purification des nanotubes:

Dans la plupart des cas, un mélange de nanotubes, de carbone amorphe et de résidus catalytiques est récupéré à l'issue de la synthèse. L'utilisation des nanotubes implique, quel que soit leur type et la méthode de synthèse, la mise en œuvre d'un processus de purification préalable pour éliminer les impuretés. On peut distinguer :

- Les impuretés solubles : des fullerènes (C60, C70), des hydrocarbures aromatiques Polycycliques.
- Les impuretés insolubles : du carbone amorphe, des particules de graphite, des oignons de Carbone, des particules métalliques de catalyseur (recouvertes de feuillets graphitiques).

Une grande variété de méthodes de purification a été décrite, qu'on peut classer comme suit ;

II.6.1 Les méthodes chimiques :

Elles reposent sur la différente réactivité entre les nanotubes et les impuretés, le carbone Amorphe et les espèces mal graphitisées étant plus réactives. Les réactions mises en jeu sont des réactions d'oxydation, avec un oxydant liquide [Vaccarini et al 1999], (la plupart du temps) ou

gazeux [Zimmerman 2000]. Elles doivent dégrader les impuretés en produits solubles ou gazeux. Elles permettent de se séparer du carbone amorphe et des particules métalliques, bien que les feuillets graphitiques entourant le métal constituent souvent un obstacle à son oxydation.

II.6.2. Les méthodes physiques :

Elles reposent sur la différence de forme entre les nanotubes, très longs et très anisotropes, et les nanoparticules d'impuretés, bien souvent de forme approximativement sphérique. Les techniques utilisées sont principalement la microfiltration, tangentielle [Duesberg et al 1999] ou directe, [Shelimov 1998] ou la chromatographie, d'exclusion stérique [Vaccarini et al 1999]. Des séparations reposant sur la différence de densité existent également, il s'agit alors de purification par centrifugation [Bonard et al 1997]. Ces méthodes physiques permettent de se séparer des nanoparticules (catalyseur, graphite, oignons), le carbone amorphe étant trop divisé pour pouvoir être éliminé par ces méthodes [Marcoux 2002]. Quasiment tous les protocoles de purification sont une combinaison de plusieurs types de méthodes. Par exemple, la purification des nanotubes commerciaux Tubes Rice [Rinzler, 1998]. Consiste un traitement à l'acide pour oxyder le carbone amorphe (méthode chimique), suivi d'une microfiltration tangentielle pour séparer les nanoparticules des (SWCNT) (méthode physique).

Un autre exemple de purification de (SWCNT) [Shi 1999] décrit l'oxydation du carbone amorphe sous flux d'air (350°C), suivie de l'oxydation du catalyseur dans une solution de (HCl) concentrée. Deux microfiltrations directes (une à 1 µm, l'autre à 0,2 µm), en phase aqueuse avec tensioactif, permettent enfin d'éliminer les nanoparticules. [Marcoux 2002]. Aucune de ces méthodes n'est sélective à (100%) et la purification reste aujourd'hui un problème tout aussi crucial que la synthèse. Les réactions d'oxydation n'attaquent pas entièrement le catalyseur et le carbone amorphe, alors même qu'elles oxydent partiellement les parois des nanotubes. Les processus de filtrations ont souvent rendues difficiles par le Colmatage des membranes et enfin l'efficacité des centrifugations est diminuée par l'agrégation entre les nanoparticules et les nanotubes. Nous allons dans la suite de ce paragraphe décrire brièvement quelques méthodes de purification de nanotubes monocouches [Marcoux 2002]. La littérature permet de classer les méthodes de purification en deux grandes catégories : filtration et traitements acides. Ces méthodes peuvent être associées entre elles. D'un point de vue pratique, les (MWNT) produits analytiquement sont plus faciles à purifier car ils ne contiennent comme impureté que le catalyseur et son support, alors que les (SWCNT) produits par arc électrique ou ablation laser contiennent énormément de carbones amorphes de petites tailles. Les (SWCNT) sont souvent purifiés à l'aide de techniques de filtration car la technique d'attaque acide peut entraîner leur destruction [Dujardin 1998]. On distingue deux types de filtration:

- Filtration directe : Le flux de liquide à filtrer est perpendiculaire à la membrane, dans la même direction que le filtrat. C'est la méthode classique de filtration.
- Filtration tangentielle : Le flux de liquide à filtrer est tangentiel à la membrane. C'est le cas lorsque la solution filtrée est remise en circulation [Marcoux 2002].

[Li et al 2000] ont mis au point une procédure de purification des (SWCNT) associant une ultrasonication et une filtration, avec un rendement de (40%) et une pureté de (95%). Toujours en associant ultrasons et filtration. [Bonard 1997]. Ont employé un surfactant pour agréger les particules et obtenu un rendement de purification de (90%). Bandow et al. [Bandow et al 1997], ont utilisé plusieurs filtrations avec des solvants différents, permettant d'éliminer successivement les carbones de type fullerènes et les nanoparticules catalytiques. Avec une méthode assez proche (la filtration a lieu dans ce cas en présence d'ultrasons) ont obtenu le même rendement de (90%) mais cette variante permet de purifier une plus grande quantité de nanotubes en une seule fois. L'équipe de Bernier [Vaccarini et al 1999] purifiées (SWCNT) produits par arc électrique par reflux dans (HNO_3), le résidu étant ensuite dispersé dans une solution contenant un surfactant puis filtré à partir d'un système de filtration tangentielle. Après lavage, les (SWCNT) sont recuits à (1600C) pour éliminer les traces de surfactant et de catalyseurs résiduels. Plus récemment, [Zhou et al 2000], ont purifié des (SWCNT) par une méthode en deux étapes, comprenant un reflux dans une solution (H_2O_2 20%) suivie de plusieurs filtrations avec des solvants différents.

La purification des (MWNT) produits par voie catalytique est souvent effectuée à partir d'un traitement à l'acide fluorhydrique [Leroux 1999], destiné à éliminer le support, suivi d'un traitement à reflux avec (HNO_3) [Rinzler 1998], afin d'éliminer le catalyseur. Une étape supplémentaire de retraitement thermique à haute température ($T > 2000$ °C) peut être ajoutée afin d'évaporer les particules résiduelles de catalyseur et d'éliminer les éventuels défauts [Hamwi et al 1997], Dillon et al. [Dillon et al 1997], ont décrit un processus conduisant à (98%) de (MWCNT) purs. Ce dernier combine un reflux avec (HNO_3) à un traitement sous air à (550°C). Chiang [Chiang et al 2001], utilise un processus proche de celui de Dillon, les nanotubes étant traités avec (H- Cl) après oxydation sous air.

II.7 Overture des nanotubes:

Dans la plupart des cas, les nanotubes sont fermés par des hémisphères de type (C60) ou, dans le cas de la synthèse par voie catalytique, par une particule de catalyseur. On distingue deux méthodes principales d'ouverture :

- Oxydation chimique.
- Oxydation Thermique.

[Tsang 1994], Tsang et al ont développé une méthode chimique d'ouverture des nanotubes. Ceux-ci sont placés à reflux dans une solution d'acide nitrique pendant 24 heures, à (140°). Environ (90%) des tubes sont ouverts. L'attaque acide se fait préférentiellement au niveau des points de courbure en bout de tube. De telles courbures sont engendrées par la présence de cycles à 5 atomes de carbone (à la place de cycles a 6 atomes) dont la tension inhérente fragilise l'extrémité du tube. L'utilisation de (HCl) permet également d'ouvrir les (MWNT) en employant un léger reflux [Sloan 1998]. [Hwang 1995], a testé divers oxydants, conduisant à des résultats assez différents. L'ouverture par reflux dans l'acide nitrique (qui est la plus utilisée), comme l'utilisation d'autres oxydants présente l'inconvénient de conduire à la fonctionnalisation des atomes de carbone en bout de tube (formation de liaison (C=O) et rupture de liaison (C-C) ainsi qu'à celle des parois du tube [Ago 1999].

Une deuxième façon d'ouvrir les tubes consiste en une oxydation sous air. Selon Ajayan et al. [Ajayan 1993] les conditions optimales impliquent un chauffage a (700°C) pendant 15 minutes. Les rendements d'ouverture est alors d'environ (20%). L'ouverture se fait par écaillage feuillet par feuillet des extrémités des tubes. Il arrive que les débris carbonés provenant de l'ouverture forment un bouchon. Afin de remédier à ce problème, un recuit à haute température peut être effectué [Ugarte et al 1998].

II.8 Applications des nanotubes de carbone:

Les nanotubes de carbone, du fait de leurs nombreuses propriétés, offrent un immense potentiel d'applications. Ces applications pourraient considérablement améliorer la vie quotidienne mais permettraient également de développer divers domaines scientifiques, on peut résumer leurs applications potentielles :

II.8.1. Application mécanique :

Les nanotubes de carbone devraient constituer des fibres de renfort idéales pour les matériaux composites. Ils présentent en effet une forte résistance à la traction. En outre, ils ont un rapport longueur/diamètre très élevé, tout en étant suffisamment courts pour être coulés à travers les équipements classiques de mie en formes complexes. La grande élasticité et la forme effilée des nanotubes en ont fait de bonnes pointes pour la microscopie à champ proche. Idéalement, une pointe devrait conserver son intégrité malgré un usage répété, que ce soit sous vide, dans l'eau ou l'air. L'utilisation de nanotube en tant que pointe de microscope à force atomique permet (d'accroître la résolution latérale) d'augmenter la durée de vie de la pointe (elle résistera mieux aux incidents tels qu'un crash sur la surface sondé). Est consacrée à un exemple d'utilisation d'un nanotube multicouche comme pointe AFM. [Marcoux 2002].

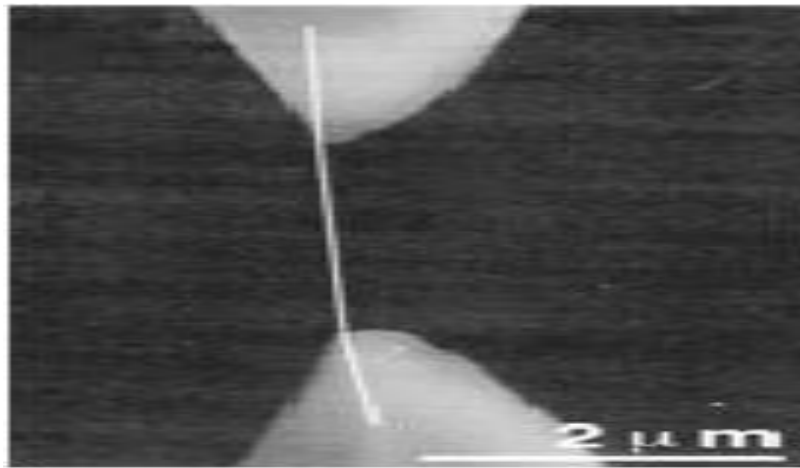


Figure II-22 Essai de traction sur un nanotube individuel à l'aide d'un AFM. D'après [Yu et al 2000].

II.8.2. Application électroniques :

Au vu de leurs propriétés électroniques, la première idée fut de les utiliser dans des composants électroniques, la recherche de la miniaturisation étant dans ce domaine un souci primo. Ainsi les nanotubes mono feuillets paraissent aujourd'hui de bons candidats en tant que conducteurs unidimensionnels intégrés à de futurs composants électroniques de taille nanométrique. Comme en outre les propriétés des SWCNT suivants la chiralité, on peut envisager, en assemblant des tubes d'indices (nm) différents, réaliser des composants électroniques à base de nanotubes. Il a été montré que l'introduction d'une paire pentagone- heptagone dans le réseau graphène pouvait changer l'hélicité du tube et avoir ainsi une forte influence sur la structure électronique. Ainsi, l'introduction de tels défauts peut induire une jonction métal-métal, semi-conducteur-métal ou semi-conducteur-semi-conducteur de taille nanométrique. Récemment. [Yao et al 1999], ont effectué des mesures de transport électrique sur e type de jonctions intramoléculaires ils ont montré qu'une jonction métal-semi- conducteur avait des caractéristiques fortement asymétriques et se comparait ainsi comme une diode rectificatrice. Une telle diode fut aussi créé peu de temps après par superposition de deux SWCNT se croisant perpendiculairement. Assemblés en réseau bi ou tridimensionnel, les nanotubes monocouches pourraient être utilisés à la fois comme connexions et comme composants. Les nanotubes utilisés comme émetteurs d'électrons semblent être les candidats idéaux pour la nouvelle génération d'écrans plats à effet de champ. En effet les nanotubes peuvent avoir des qualités émissives exceptionnelles (jusqu'à 1 A.cm^{-2}) à bas champ d'extraction ($3- 5 \mu\text{V.cm}^{-2}$). Des détecteurs chimiques basés sur des nanotubes monocouches individuels sont à l'étude. En effet, il a été montré que la résistance de SWCNT semi-conducteurs variait fortement après exposition à des gaz, tels que NO_2 ou NH_3 .

Ces nanotubes « détecteurs » font preuve à température ambiante d'une rapidité de réponse et d'une sensibilité plus élevée que les détecteurs actuels existants. Dans cette même optique, Collins et coll. [Collins 2000]. Ont décrit les variations de la résistance électrique de SWCNT exposés à O₂. Les nanotubes font preuve de propriétés intéressantes dans la conversion directe de l'énergie électrique en énergie mécanique

II.8.3. Applications thermiques :

Les nanotubes pourraient accroître fortement la conductivité thermique de composites à fibres discontinues. Ces derniers pourraient bénéficier en outre, des propriétés mécaniques des tubes [Marcoux 2002]. Les nanotubes de carbone sont aussi de très bons candidats pour le stockage d'énergie. Utilisables sous la forme de super-condensateurs capables de stocker et délivrer de l'énergie rapidement, ils peuvent également servir au sein des piles à combustible en tant que support du catalyseur platine en raison de leur stabilité chimique, mécanique ainsi que de leur grande surface spécifique [Li et al, 2000]. Ce sont également d'excellents candidats pour la formation d'hétérojonctions en volume pour les cellules photovoltaïques organiques. Leur grand facteur de forme conduisant à une importante interface avec le polymère conjugué, ainsi que leur prédisposition au transport d'électrons en font d'excellents candidats pour favoriser la séparation de charge dans le film composite s'ils sont bien dispersés au sein de ce polymère. En optimisant la jonction nanotube/polymère, ces nano composites pourraient être capables d'atteindre un taux de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, proche de 20 % dans les prochaines années (pour un coût relativement raisonnable). Une application cependant, semblant très prometteuse il y a quelques années et aujourd'hui compromise, est celle liée à la faculté des nanotubes à stocker de l'hydrogène [Liu et al, 1986] (dans le cadre de réservoir de pile à combustible). En effet, la température requise afin que le dihydrogène s'adsorbe sur les nanotubes de carbone sous pression atmosphérique est de -196°C et de la même façon à température ambiante de fortes pressions sont requises, nécessitant des dispositifs complexes.

II.8.4. Applications optiques :

Le développement des sources laser intenses a entraîné la nécessité de concevoir des systèmes de protection pour l'œil et les détecteurs optiques. Une application est également basée sur la photoluminescence des SWCNT semi-conducteurs (recombinaison d'une paire électron/trou dans la bande interdite) après excitation [Lefebvre et al, 2003]. Des applications biomédicales d'imagerie sont par exemple envisagées. Les nanotubes de carbone sont aussi souvent utilisés pour leurs propriétés d'émission de champ. De nombreuses applications en découlent. On peut citer par exemple leur utilisation en tant que composants d'écrans plats [Nakayama et al, 2001].

II.9 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté un historique sur les nanotubes de carbone depuis leurs découvertes. Leur description, propriétés et leurs domaines d'application ont été bien détaillés et qui nous a permis de montrer leurs avantages. Ainsi, les nanotubes de carbone sont d'excellents matériaux pour le renforcement des matrices polymère, ils seraient susceptibles d'être employés comme un renfort dans un matériau composite.

Chapitre III : Théorie des plaques et développement mathématique du présent modèle

III.1 Introduction :

Les problèmes de stabilité des plaques sont modélisée essentiellement par deux théories ; celle des plaque minces et celle des plaques épaisses. La théorie de plaques minces énoncée par Love sur les hypothèses de Kirchhoff s'inspire de celle des poutres minces de Euler- Bernoulli. Lorsque l'épaisseur de la plaque ne permet plus de vérifier les hypothèses de Kirchhoff ; une théorie plus complète basée sur celle des poutres de Timoshenko est nécessaire. Rayleigh en 1877 puis Timoshenko en 1921 montrent que la prise en compte des effets d'inertie de rotation et de cisaillement affecte les fréquences propres de flexion des poutres. Ces deux effets tendent à diminuer les fréquences de résonances calculées à cause de la croissance de l'inertie et de la flexibilité du système. Une extension à la théorie des plaques quant à l'effet de cisaillement est proposée par Reissner en 1945 et Mindlin 1951.

III.2 Définition d'une plaque :

On appelle une plaque tout corps cylindrique ou prismatique de hauteur (épaisseur) plus petit en comparaison avec le reste des autres dimensions. En fonction de la configuration du plan, les plaques se distinguent en rectangulaire, circulaire, annulaire, triangulaire etc. Si le matériau constituant la plaque ayant les mêmes propriétés mécaniques dans toutes les directions, alors la plaque est dite isotrope, par contre si les caractéristiques mécaniques des matériaux constituant les plaques sont différentes dans l'une des directions, alors la plaque est dite anisotrope (orthotrope).

III.3 Les différentes théories des plaques :

III.3.1 Théorie classique des plaques minces de Love-Kirchhoff :

On parle d'une plaque mince, lorsque la flèche générée par les déformations de cisaillement reste négligeable devant la flèche générée par la courbure de la plaque. Dans le cas d'une plaque homogène isotrope, la part de cisaillement dans la flèche est directement reliée à l'élanement (L/h). La théorie CPT se présente comme la plus simple des approches. Cette théorie se base sur les hypothèses de Love Kirchhoff [Kirchhoff 1950], selon lesquelles une droite normale au plan moyen de la plaque reste perpendiculaire après déformation Figure III.1, ce qui revient à négliger les effets de déformation en cisaillement transverse [Reddy et al 1997].

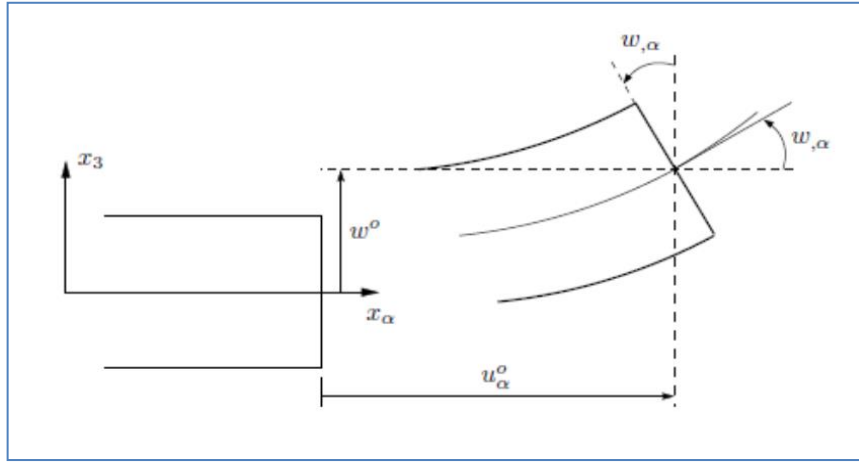


Figure III-1 : Illustration de la plaque de Love-Kirchhoff. [Afaq.2003]

En se basant sur les hypothèses ci-dessus, le champ de déplacement d'un point de coordonnées (x, y, z) à l'instant t s'écrit :

$$\begin{cases} u_1(x, y, z) = u(x, y) - z \frac{\partial w}{\partial x} \\ u_2(x, y, z) = v(x, y) - z \frac{\partial w}{\partial y} \\ u_3(x, y, z) = w \end{cases} \quad (\text{III-1})$$

Où (u_1, u_2, u_3) sont les déplacements le long des coordonnées x, y et z d'un point du plan moyen (plan $z = 0$).

III.3.2 La théorie de déformation en cisaillement du premier ordre :

Cette théorie proposée par Mindlin, en 1951, prend en compte les déformations dues à l'effort tranchant et l'effet dû à l'inertie de rotation. La théorie de déformation en cisaillement du premier ordre a prolongé la théorie classique des plaques en tenant compte l'effet de cisaillement transverse, dans ce cas les contraintes et les déformations sont constantes à travers l'épaisseur de la plaque, ce qui oblige l'introduction d'un facteur de correction. Les études sur la théorie de déformation en cisaillement du premier ordre (FSDPT) peuvent être référées dans [Reddy 1999]., qui a mené au modèle de plaque de Reissner-Mindlin. [Timoshenko et al 1959]. L'hypothèse cinématique de Mindlin est la suivante :

- ✓ La normale reste droite mais non perpendiculaire à la surface moyenne (À cause de l'effet du cisaillement transverse) dans la configuration déformée (Figure III-2).

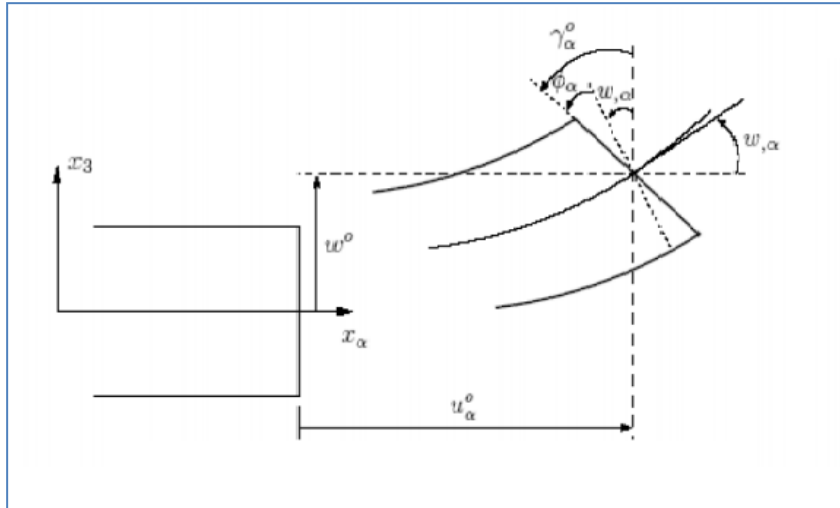


Figure III-2 : Illustration de la plaque de Reissner-Mindlin. [Afaq.2003]

➤ Le champ de déplacements de Reissner-Mindlin s'écrit :

$$\begin{cases} u_1(x, y, z) = u(x, y) - z \frac{\partial w}{\partial x} + z \Phi x \\ u_2(x, y, z) = v(x, y) - z \frac{\partial w}{\partial y} + z \Phi y \\ u_3(x, y, z) = w \end{cases} \quad (\text{III-2})$$

Le déplacement dû au cisaillement $z\Phi x$ où $z\Phi y$ est la rotation due au cisaillement.

$$\Phi x = -\frac{\partial w_0}{\partial x} \text{ et } \Phi y = -\frac{\partial w_0}{\partial y} \quad (\text{III-3})$$

III.3.3 La théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé :

Cette classe de théories plus fines a pour base un développement du déplacement dans l'épaisseur à l'ordre deux ou plus. Ces théories sont particulièrement bien adaptées à la modélisation du comportement des plaques épaisses ou poutres courtes, où la déformation transverse joue un rôle prédominant. La plupart de ces modèles utilisent un développement en série de Taylor [Kant et al 2002], la théorie d'ordre élevé est basée sur une distribution non linéaire des champs dans l'épaisseur. Par conséquent, on tient compte des effets de la déformation transversale de cisaillement et / ou de la déformation normale transversale. Ces modèles n'exigent pas des facteurs de correction.

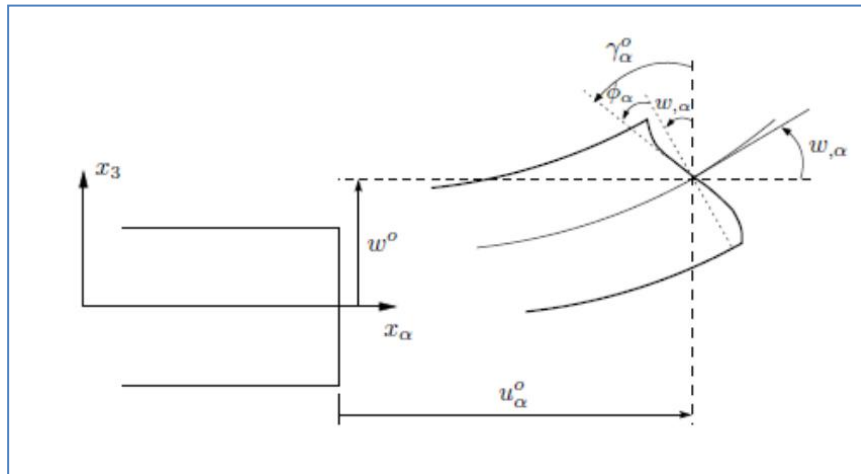


Figure III-3 : Illustration de la plaque de théorie d'ordre élevé. [Afaq.2003]

➤ Le champ de déplacement est généralement écrit comme suit :

$$\begin{cases} u_1(x, y, z) = u(x, y) - f(z) \frac{\partial w}{\partial x} \\ u_2(x, y, z) = v(x, y) - f(z) \frac{\partial w}{\partial y} \\ u_3(x, y, z) = w \end{cases} \quad \text{(III-4)}$$

III.3.3.1. Revue sur les différents modèles de la théorie d'ordre élevé :

Pour franchir les limites des théories du premier ordre, plusieurs auteurs proposent quelques contributions importantes de développement de modèles d'ordres élevés qui se sont distingués dans la littérature par l'expression de la fonction de cisaillement $f(z)$. Avec ; $f(z)$: est une fonction de cisaillement transverse qui peut prendre plusieurs formes selon la théorie utilisée. Ces modèles sont basés sur une distribution non linéaire des champs de déplacement dans l'épaisseur, et qui permettent de représenter le gauchissement de la section transversale dans la configuration déformée.

➤ Théorie classique (CPT)

$$f(z) = 0$$

➤ Théorie du premier ordre (FSDPT)

$$f(z) = z \quad \text{III-5)}$$

➤ Théorie d'ordre élevé (HSDPT) [Reddy 1999]

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

III.4 Validité des théories de la plaque :

La validité de la théorie des plaques isotropes dépend des caractéristiques géométriques. Les hypothèses de Mindlin seront appliquées Si $4 < L/h < 20$ et celles de Kirchhoff Si $L/h > 20$ où L est une dimension caractéristique dans le plan x, y . Le rôle des déformations de cisaillement transversal dans les plaques orthotropes dépend non seulement des caractéristiques géométrique (L/h), mais également des caractéristique mécaniques représentées par le rapport E/KG (ou E est un module caractéristique intervenant dans la flexion, G un module de cisaillement transversal et K un facteur de correction de cisaillement transversal).

III.5 Hypothèses de calcul :

Les hypothèses de calcul sont celles d'un solide qui possède un plan moyen et dont l'épaisseur h est faible vis-à-vis des deux autres dimensions. Celles qui sont vérifiées dans cette étude sont les suivantes :

- La première hypothèse, la plaque a un comportement élastique linéaire.
- La plaque est d'épaisseur petite devant les autres dimensions latérales.
- Elle possède un plan de symétrie aussi appelé plan moyen.

Cette hypothèse permet de supposer que le mouvement de tous les point se trouvant sur la normale au feuillet moyen est le même, c'est-à-dire que :

$$w(x, y, z) = w(x, y). \quad (\text{III-6})$$

Ceci revient à négliger la déformation suivant l'axe Z

On a dans ce cas :

$$\gamma_{xz} = \gamma_{zy} = 0 \quad (\text{III-7})$$

- ✓ Les termes non linéaires du déplacement sont négligés, en particulier, l'inertie de rotation est négligée. Seul le déplacement transversal w est considéré.
- ✓ Les contraintes σ_{zz} normales dans la direction transversale sont négligeables par rapport aux composantes de contraintes.

$$\sigma_{zz} = 0. \quad (\text{III-8})$$

- ✓ la plaque est symétrique par rapport à son feuillet moyen lors de sa fabrication.

II.6 Les différents Types des matériaux :

III.6.1. Matériaux orthotropes :

Sont des matériaux qui possèdent 3 plans de symétrie orthogonaux, ces derniers ont les mêmes propriétés ou caractéristiques mécanique. Ce qui réduit le nombre des coefficients indépendants à 9.

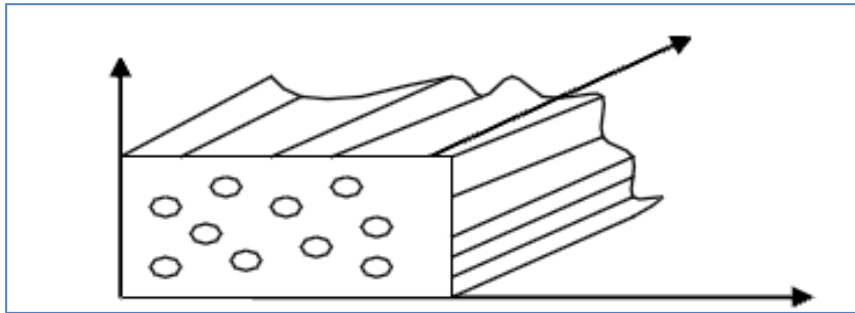


Figure III-4 : Matériau orthotrope

III.6.1.1.Cas des Plaques Orthotropes :

Une plaque orthotrope possède des paramètres de rigidité différents selon deux axes perpendiculaires, ces axes étant parallèles aux bords de la plaque.

Il existe plusieurs types d'orthotropie: une orthotropie de géométrie où la géométrie de la plaque entraîne, l'orthotropie à module d'Young constant, une orthotropie de matériau où la plaque possède deux modules d'Young différents selon les deux directions. Les plaques orthotropes en flexion présentent une coïncidence entre les axes d'orthotropie et les directions principales x, y. Pour un état de contrainte plane :

$$\sigma_{zz} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = 0 \quad (\text{III-9})$$

La relation entre le tenseur de déformation et le tenseur de contrainte sous forme matricielle est la suivante :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ & \text{sym} & & & C_{55} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \delta_{xy} \\ \delta_{xz} \\ \delta_{yz} \end{Bmatrix} \quad (\text{III-10})$$

III.6.2 Matériaux isotropes :

Matériaux dont les propriétés physiques ou mécaniques sont identiques dans toutes les directions.

III.6.3 Matériaux transversalement isotropes :

Un matériau isotrope transverse est un matériau orthotrope qui comporte un axe ou un plan d'isotropie. Les propriétés suivant les axes 2 et 3 sont identiques. Le nombre de coefficients indépendants se réduit à 5 coefficients.

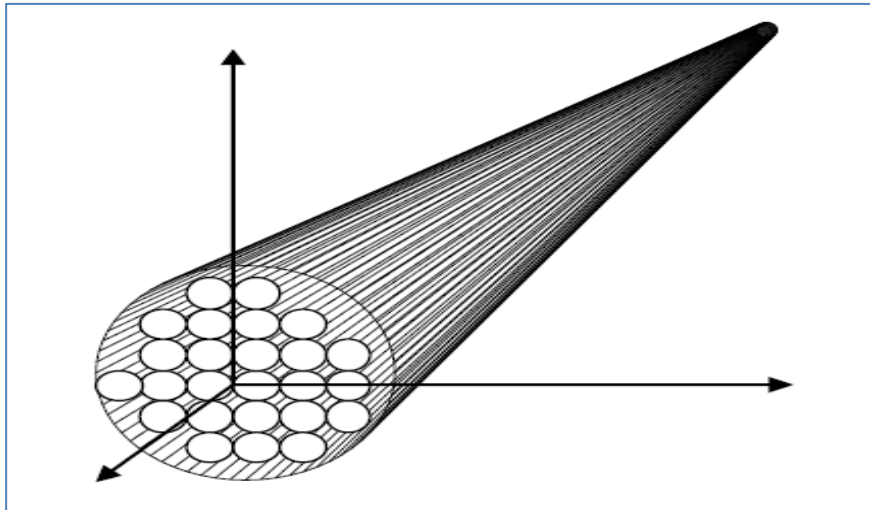


Figure III-5 : Matériau transversalement isotrope

III.7 Les contraintes :

En se limitant à un comportement élastique linéaire, l'expression des contraintes pour une plaque isotrope peut être déterminée en écrivant la relation qui existe entre les déplacements et les déformations, le champ des contraintes s'écrit donc :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ & sym & & & C_{55} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \delta_{xy} \\ \delta_{xz} \\ \delta_{yz} \end{Bmatrix} \quad (III-11)$$

Dans cette partie on va présenter une étude analytique sur la stabilité au flambement mécanique des plaques renforcées, et nous allons déduire les expressions mathématiques pour retenir la charge critique de flambement. Dans cette partie on a utilisé la théorie d'ordre élevée qui est basée sur le champ de déplacement non linéaire dans l'épaisseur. Par conséquent, on tient compte les effets de la déformation transversale de cisaillement.

Ce modèle n'exige pas des facteurs de correction pour l'analyse la charge critique.

III.8. Les Équations d'équilibre

Les équations de mouvement de la plaque soumise à des forces uni axiales et bi-axiales de flambement. Pour décrire le comportement du flambement des plaques renforcées par les nanotubes de carbone, on utilise le champ de déplacement de la théorie de la déformation par cisaillement d'ordre élevée.

Le champ de déplacement de Reddy [Reddy2004] :

$$\begin{Bmatrix} u(x, y, z, t) \\ v(x, y, z, t) \\ w(x, y, t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_0(x, y, t) \\ v_0(x, y, t) \\ w_0(x, y, t) \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} zw_{,x} \\ zw_{,y} \\ 0 \end{Bmatrix} + \psi(z) \begin{Bmatrix} \phi_x \\ \phi_y \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \text{(III-12)}$$

Les déformations sont calculées en dérivants l'équation (III-12) :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{Bmatrix} - z \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} + \psi(z) \begin{Bmatrix} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_y}{\partial y} \\ \left(\frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \right) \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \phi_x + \frac{\partial \psi(z)}{\partial z} \\ \phi_y + \frac{\partial \psi(z)}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad \text{(III-13)}$$

(u_0, v_0, w_0) et (ϕ_x, ϕ_y) sont les déplacements en membranes et les rotations autour des axes

x et y, (respectivement, $\phi_x = -\frac{\partial w_0}{\partial x}$ ou $\phi_y = -\frac{\partial w_0}{\partial y}$) (III-14)

$\psi(z)$: une fonction de cisaillement transverse caractérisant les théories correspondantes.

En effet, les déplacements de la théorie classique de la plaque est obtenue par :

➤ (CPT) $\psi(z) = 0$,

Lors que la théorie de premier ordre peut être obtenue par :

➤ (FSDT) $\psi(z) = z$

Les déplacements de théorie de déformation de cisaillement de la troisième de Reddy sont obtenus par :

➤ (TSDT) $\psi(z) = z (1 - 4z^2 / 3h^2)$

Dans le modèle de Reddy, le champ de déplacement membranaire est cubique, donne une bonne approximation pour les contraintes de cisaillement transverse par rapport à la solution d'élasticité tridimensionnelle. Touratier propose le modèle sinus (SSDT) qui est différent des autres modèles d'ordre supérieurs puisqu'il n'utilise pas de fonction polynomiale. [Touratier 1991]

La fonction de cisaillement transverse s'écrit comme ci-dessous :

$$\text{SSDT} \quad \psi(z) = h/\pi \sin(\pi z/h)$$

Les contraintes de cisaillement transverses déterminées par les modèles (sinus) prennent une forme sinusoïdale dans l'épaisseur de la plaque. La précision de ce modèle par rapport à la solution exacte est meilleure que la théorie de Reddy. (TSDT).

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

$$\delta V + \delta U = 0 \tag{III-15}$$

Avec :

- δU : La variation virtuelle de l'énergie de déformation.
- δV : La variation virtuelle de l'énergie potentielle.

Où, l'énergie de déformation de la plaque est donnée par :

$$\delta U = \int_{-h/2}^{h/2} \int_A (\sigma_{xx} \delta \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} \delta \varepsilon_{yy} + \sigma_{xy} \delta \gamma_{xy} + \sigma_{yz} \delta \gamma_{yz} + \sigma_{xz} \delta \gamma_{xz}) dA dz \tag{III -16}$$

On remplace l'équation (III-13) dans l'équation (III-16) devient :

$$\delta U = \int_A \{ N_{xx} \delta u_{0,x} - M_{xx} \delta w_{0,xx} + P_{xx} \delta \phi_{xx} + N_{yy} \delta v_{0,y} - M_{yy} \delta w_{0,yy} + P_{yy} \delta \phi_{yy} + N_{xy} (\delta u_{0,y} + \delta v_{0,x}) - 2M_{xy} \delta w_{0,xy} + P_{xy} (\delta \phi_{x,y} + \delta \phi_{y,x}) + R_{yz} \delta \phi_y + R_{xz} \delta \phi_x \} dx dy \tag{III -17}$$

D'où les efforts normaux N et les moments résultants M, P, R sont définies par :

$$(N_{xx}, N_{yy}, N_{xy}) = \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}) dz \tag{III -18.a}$$

$$(M_{xx}, M_{yy}, M_{xy}) = \int_{-h/2}^{h/2} z (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}) dz \tag{III-18.b}$$

$$(P_{xx}, P_{yy}, P_{xy}) = \int_{-h/2}^{h/2} \psi(z) (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}) dz \tag{III 18.c}$$

$$R_{yz} = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\partial \Psi(z)}{\partial z} \sigma_{yz} dz; \quad R_{xz} = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\partial \Psi(z)}{\partial z} \sigma_{xz} dz. \tag{III 18.d}$$

Les équations constitutives pour une couche peuvent être écrites comme suit :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}; \begin{Bmatrix} \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{44} & 0 \\ 0 & Q_{55} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} \quad (III-19)$$

Où Q_{ij} sont les rigidités de la couche considérée :

$$Q_{11} = \frac{E_{11}}{1-\nu_{12}\nu_{21}}, Q_{22} = \frac{E_{22}}{1-\nu_{12}\nu_{21}}, Q_{12} = \frac{\nu_{21}E_{11}}{1-\nu_{12}\nu_{21}}, Q_{66} = G_{12}, Q_{55} = G_{13}, Q_{44} = G_{23} \quad (III-20)$$

Substituant l'équation (III-20) et (III-19) dans l'équation

(III-18) et en intégrant suivant l'épaisseur de la plaque on obtient les résultats suivants :

$$\begin{Bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^{(0)}_{xx} \\ \varepsilon^{(0)}_{yy} \\ \gamma^{(0)}_{xy} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & 0 \\ B_{21} & B_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^{(1)}_{xx} \\ \varepsilon^{(1)}_{yy} \\ \gamma^{(1)}_{xy} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{21} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^{(\psi)}_{xx} \\ \varepsilon^{(\psi)}_{yy} \\ \gamma^{(\psi)}_{xy} \end{Bmatrix} \quad (21a)$$

$$\begin{Bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & 0 \\ B_{21} & B_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^{(0)}_{xx} \\ \varepsilon^{(0)}_{yy} \\ \gamma^{(0)}_{xy} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{21} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^{(1)}_{xx} \\ \varepsilon^{(1)}_{yy} \\ \gamma^{(1)}_{xy} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & 0 \\ E_{21} & E_{22} & 0 \\ 0 & 0 & E_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^{(\psi)}_{xx} \\ \varepsilon^{(\psi)}_{yy} \\ \gamma^{(\psi)}_{xy} \end{Bmatrix} \quad (21b)$$

$$\begin{Bmatrix} P_{xx} \\ P_{yy} \\ P_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{21} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^{(0)}_{xx} \\ \varepsilon^{(0)}_{yy} \\ \gamma^{(0)}_{xy} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & 0 \\ E_{21} & E_{22} & 0 \\ 0 & 0 & E_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^{(1)}_{xx} \\ \varepsilon^{(1)}_{yy} \\ \gamma^{(1)}_{xy} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & 0 \\ F_{21} & F_{22} & 0 \\ 0 & 0 & F_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^{(\psi)}_{xx} \\ \varepsilon^{(\psi)}_{yy} \\ \gamma^{(\psi)}_{xy} \end{Bmatrix} \quad (21c)$$

Où Les composantes de rigidité $A_{ij}, B_{ij}, C_{ij}, D_{ij}, E_{ij}, F_{ij}$ sont définis comme :

$$[A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}] = \sum_{n=1}^3 \int_{h_n}^{h_{n+1}} Q_{ij} [1, z, z^2] dz; \quad i, j = 1, 2, 6 \quad (III-22.a)$$

$$[C_{ij}, E_{ij}, F_{ij}] = \sum_{n=1}^3 \int_{-h_2}^{+h_2} \psi(z) Q_{ij} [1, z, \psi(z)] dz; \quad i, j = 1, 2, 6 \quad (III-22.b)$$

L'énergie due aux charges extérieures peut s'écrire comme :

$$\delta V = \int_A \left(N_x^0 \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial \delta w_0}{\partial x} + N_y^0 \frac{\partial w_0}{\partial y} \frac{\partial \delta w_0}{\partial y} \right) dx dy \quad (III-23)$$

Où N_x^0, N_y^0 sont les charges de flambement.

$$N_x^0 = \gamma_x N_{cr}, N_y^0 = \gamma_y N_{cr} \quad (III-24)$$

Substituant les équations (III-23) et (III-17) dans l'équation (III15) et intégrant par partie, mettant les coefficients (δu_0 , δv_0 , δw_0 , $\delta \phi_x$ et $\delta \phi_y$) on obtient les équations d'équilibres suivants :

$$\delta u_0: \frac{\partial N_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} = 0 \quad \text{(III-25a)}$$

$$\delta v_0: \frac{\partial N_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} = 0 \quad \text{(III-25b)}$$

$$\delta w_0: \frac{\partial^2 M_{xx}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_{yy}}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + N_x^0 \frac{v^2 w_0}{v^2 x} + N_y^0 \frac{v^2 w_0}{v^2 y} = 0 \quad \text{(III-25c)}$$

$$\delta \phi_x: \frac{\partial P_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial P_{xy}}{\partial y} - R_{yz} = 0 \quad \text{(III-25d)}$$

$$\delta \phi_y: \frac{\partial P_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial P_{xy}}{\partial x} - R_{yz} = 0 \quad \text{(III-25e)}$$

Les conditions aux limites sont satisfaites par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned} u_0(x, y, t) &= \sum_{M=1}^{\infty} \sum_{N=1}^{\infty} U_{MN} e^{i\omega t} \cos(\alpha x) \sin(\zeta y) \\ v_0(x, y, t) &= \sum_{M=1}^{\infty} \sum_{N=1}^{\infty} V_{MN} e^{i\omega t} \sin(\alpha x) \cos(\zeta y) \\ w_0(x, y, t) &= \sum_{M=1}^{\infty} \sum_{N=1}^{\infty} W_{MN} e^{i\omega t} \sin(\alpha x) \sin(\zeta y) \\ \phi_x(x, y, t) &= \sum_{M=1}^{\infty} \sum_{N=1}^{\infty} \theta_{xMN} e^{i\omega t} \cos(\alpha x) \sin(\zeta y) \\ \phi_y(x, y, t) &= \sum_{M=1}^{\infty} \sum_{N=1}^{\infty} \theta_{yMN} e^{i\omega t} \sin(\alpha x) \cos(\zeta y) \end{aligned} \quad \text{(III-26)}$$

Où : U_{mn} , V_{mn} et W_{mn} ;sont des paramètres arbitraires à déterminer, avec (m, n) nombre de mode,

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

En application des équations qui décrivent les conditions aux limites (III-26) après on substituant les équations (III-21) dans (III-25) on obtient la charge critique de flambement.

A partir le calcul du déterminant de la matrice qui s'écrit sous la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} \\ s_{12} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{25} \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} & s_{34} & s_{35} \\ s_{14} & s_{24} & s_{34} & s_{44} & s_{45} \\ s_{15} & s_{25} & s_{35} & s_{45} & s_{55} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{MN} \\ V_{MN} \\ W_{MN} \\ \theta_{xMN} \\ \theta_{yMN} \end{pmatrix} = 0 \quad (\text{III-27})$$

Avec:

$$\begin{aligned} s_{11} &= -A_{11}\alpha^2 + A_{66}\zeta^2; s_{12} = -\alpha\zeta(A_{12} + A_{66}); s_{13} = 0; s_{14} = -B_{11}\alpha^3 - B_{66}\zeta^2; \\ s_{15} &= -B_{12}\alpha\zeta - B_{66}\alpha\zeta; s_{21} = s_{12}; s_{22} = -A_{66}\alpha^2 - A_{22}\zeta^2; s_{23} = 0 \\ s_{24} &= -B_{12}\alpha\zeta - B_{66}\alpha\zeta; s_{25} = -B_{66}\alpha^2 - B_{22}\zeta^2; s_{31} = s_{13}; s_{32} = s_{23} \\ s_{33} &= -D_{55}\alpha^2 - D_{44}\zeta^2 - Nx\alpha^2 - Ny\zeta^2; s_{34} = -D_{55}\alpha; s_{35} = -D_{44}\zeta; s_{41} = s_{14}; \\ s_{42} &= s_{24}; s_{43} = s_{34}; s_{44} = -C_{11}\alpha^2 - C_{66}\zeta^2 - D_{55}; s_{45} = -\alpha\zeta(C_{12} + C_{66}) \\ s_{51} &= s_{15}; s_{52} = s_{25}; s_{53} = s_{35}; s_{54} = s_{45}; s_{55} = -D_{44} - C_{66}\alpha^2 - C_{22}\zeta^2 \end{aligned} \quad (\text{III-28})$$

Le paramètre sans dimension suivant est utilisé pour présenter les résultats numériques des analyses de flambement des plaques CNTRC.

$$\bar{N}_{cr} = \frac{N_{cr} a^2}{\pi^2 D_0}$$

Où

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

III.9 Conclusion :

Dans ce chapitre on a développé l'équation générale qui donne la charge critique de flambement des plaques renforcées par (CNTs) par l'utilisation de modèle d'ordre élevée (HSDT).

Cette théorie est particulièrement bien adaptée à la modélisation du comportement des plaques épaisses, où la déformation transverse joue un rôle prédominant. La plupart de ces modèles utilisent un développement en série de Taylor. La théorie d'ordre élevé est appuyée sur une distribution non linéaire des champs de déplacement à travers l'épaisseur. Ce modèle n'exige pas un facteur de correction. Il est noté aussi, que la théorie d'ordre élevée affecte des résultats plus précises et acceptables dans la plus part des cas.

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1 Introduction:

Dans ce chapitre, les résultats numériques du comportement de flambement des plaques renforcé par des nanotubes des carbones (CNT) sont présentés et discutés. Dans cette section, plusieurs exemples numériques sont présentés pour étudier le flambage des plaques CNTRC.

(PmPV) : Poly (mphénylène-vinylène-co-2,5-dioctyloxy-pphénylène vinylène) est considéré comme une matrice on polymère du composite et les propriétés du matériau sont supposées être comme suit :

$$\nu^p = 0.34, \rho^p = 1150 \text{ kg} / \text{m}^3 \text{ et } E^p = 2.1 \text{ GPa}$$

Pour le matériau utilisé comme renfort dans la matrice polymère, les nanotubes de carbone type armchair (10,10) sont choisi avec les propriétés suivantes : [Zhu et al 2012].

$$\nu_{12}^{cnt} = 0.175; \rho^{cnt} = 1400 \text{ kg} / \text{m}^3; E_{11}^{cnt} = 5.6466 \text{ TPa}; E_{22}^{cnt} = 7.0800 \text{ TPa};$$

$$G_{12}^{cnt} = G_{13}^{cnt} = G_{23}^{cnt} = 1.9445 \text{ TPa}$$

En utilisant la loi du mélange, les propriétés matérielles efficaces des plaques CNTRC peuvent être calculées, qui donne les modules effectifs de Young et de cisaillement des plaques CNTRC . [Bakhti et al, 2013]; [Kaci et al, 2012]; [Wattanasakulpong et Ungbhakorn, 2013]. Les propriétés des matériaux des plaques CNTRC peuvent être exprimées comme suit [Shen 2009]:

Cette règle inclut les paramètres d'efficacité CNT, $\eta_1 \eta_2 \eta_3$ afin de tenir compte du matériau dépendant l'échelle de propretés [Han 2007]. Ainsi,

$$E_{11} = \eta_1 V_{cnt} E_{11}^{cnt} + V_p E^p \quad (\text{IV} .1\text{a})$$

$$\frac{\eta_2}{E_{22}} = \frac{V_{cnt}}{E_{22}^{cnt}} + \frac{V_p}{E^p} \quad (\text{IV} .1\text{b})$$

$$\frac{\eta_3}{G_{12}} = \frac{V_{cnt}}{G_{12}^{cnt}} + \frac{V_p}{G^p} \quad (\text{IV} .1\text{c})$$

Il est défini que, $E_{11} ; E_{22} ; G_{12}$ sont les module d'Young et le module de cisaillement du matériau composites NTC. et $E^p ; G^p$ correspond aux propriétés matérielles de la matrice polymérique.

$(V_{cnt}) (V_p)$; Sont les fractions volumiques des nanotubes de carbone et de la matrice et qui sont donnés par la relation suivante : $V_{cnt} + V_p = 1$.

$$(\text{IV} .2\text{a})$$

Pour introduire les propriétés matérielles des nanotubes dépendant de l'échelle, on introduit les paramètres d'efficacité du CNT (η_1, η_2, η_3), et qui peuvent être déterminé en faisant correspondre le module d'élasticité de la CNT à partir des résultats de simulation de la dynamique moléculaire (MD) avec les résultats numériques obtenus à partir de la loi de mélange [Han et Elliott 2007]. En utilisant la même loi, le coefficient de Poisson (ν) et la densité de masse (ρ) des plaques CNT, sont définis par:

$$\nu_{12} = V_{cnt} \nu_{12}^{cnt} + V_p \nu^p \quad \rho = V_{cnt} \rho^{cnt} + V_p \rho^p \quad (IV.2b)$$

$V_{cnt}, \nu^p, \rho^{cnt}, \rho^p$; Sont respectivement les coefficients de poisson et les masses volumiques du CNT et de la matrice polymère.

Où V_{cnt}^* est la fraction volumique des NTC qui est calculée à partir de [Draoui et al 2019]:

$$V_{cnt}^* = \frac{W_{cnt}}{W_{cnt} + \left(\frac{\rho^{cnt}}{\rho^m}\right)(1 - W_{cnt})} \quad (IV.3)$$

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

Dans ce travail, les paramètres d'efficacité (η_1, η_2, η_3) du CNT associés aux fraction volumiques (V^*_{cnt}) sont données comme suit : [Zhu et al 2012]

$$\eta_1 = 0.149 \text{ et } \eta_2 = \eta_3 = 0.934 \text{ pour le cas de } V_{cnt}^* = 0.11$$

$$\eta_1 = 0.150 \text{ et } \eta_2 = \eta_3 = 0.941 \text{ pour le cas de } V_{cnt}^* = 0.14$$

$$\eta_1 = 0.149 \text{ et } \eta_2 = \eta_3 = 1.381 \text{ pour le cas de } V_{cnt}^* = 0.17$$

IV.2 Géométrie de la plaque:

Comme le montrent les Figures. IV-1a et IV-1b, considérons le cas d'une plaque de polymère renforcée par les nanotubes de carbone à distribution linéaire et parabolique se référant aux coordonnées (x, y, z) de longueur a, largeur b et épaisseur h.

Trois modèles différents de la distribution des renforts à travers l'épaisseur sont pris en considération dans cette étude tels que uniformément distribué (appelé UD-CNT), linéaire (appelé CNT-L) et non linéaire (appelé - CNT-N L) dans le sens de l'épaisseur (Figure IV-1).

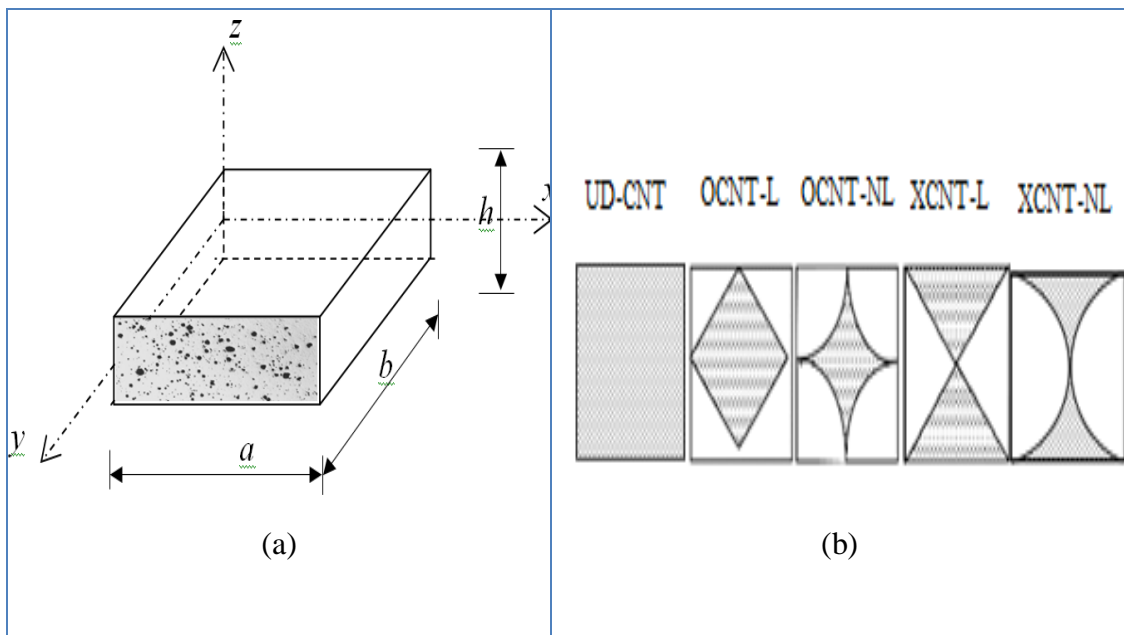


Figure IV-1 : (a) Géométrie de la plaque renforcés par NTC
(b) les différents modèles des dispositions des renforts.

Pour les différentes formes de la distribution des nanotubes de carbone à l'intérieur des sections transversales de la matrice polymère comme il est représenté dans la Figure IV-1, les fonctions mathématiques employées pour montrer les distributions de constituants matériels sont exprimés ci-dessous.

Tableau IV1: répartitions du renforcement des NTC à travers l'épaisseur.

Uniformément distribué	UD-CNT	$V_{cnt} = V_{cnt}^*$
Gradation fonctionnelle linéaire	O-CNT-L	$V_{cnt} = 2 \left(1 - \frac{2 z }{h} \right) V_{cnt}^*$
	X- CNT- L	$V_{cnt} = 2 \left(\frac{2 z }{h} \right) V_{cnt}^*$
Gradation fonctionnelle non linéaire	O-CNT-NL	$V_{cnt} = 2 \left(1 - \frac{2 z }{h} \right)^2 V_{cnt}^*$
	X- CNT- NL	$V_{cnt} = 2 \left(\frac{2 z }{h} \right)^2 V_{cnt}^*$

A partir le tableau IV1 au-dessus, on peut constater que les plaques du type de renforcement linéaire et non linéaire de O-CNT et X-CNT sont des plaques fonctionnellement graduées ou leurs propriétés matérielles varient d'une façon continue à travers leurs épaisseurs, alors que la plaque de type de renforcement UD-CNT possède une distribution uniforme des renforts CNT.

IV.3 Discussion et interpretation des résultats:

Dans cette section, les résultats numériques de la charge critique de flambement des plaques renforcées sont discutés.

Le Tableau IV-2 Montre une comparaison entre les résultats obtenus par le Présent modèle et les résultats de [Wattanasakulpong et al 2015] qui sont base sur la théorie de premier ordre Mindlin Reissner. Cette comparaison est faite seulement pour la distribution linéaire, sous chargement uniaxiale et biaxiale, pour différent valeur de la fraction volumique, On considère que le rapport $a/h = 10$. On constate que les résultats trouvés à partir de la présente théorie sont en bon accord avec ceux trouvés en utilisant la théorie de la déformation en cisaillement du premier ordre étudiés respectivement par Wattanasakulpong et al 2015. Selon les résultats trouvés de la charge critique de flambement sous la charge uniaxiale et biaxiale, la distribution X-CNT est la plus rigide et qui prend la plus grande charge du flambement, suivie par la distribution UD-CNT et O-CNT.

Tableaux IV-2: la variation des résultats de la charge critique de flambement adimensionnelle d'une plaque carre sous diffèrent type de chargement (uniaxiale, biaxiale)

Chargement uniaxiale $\gamma_x = -1, \gamma_y = 0$				
le type de renforcement	Source	$V_{cnt}^* = 0.11$	$V_{cnt}^* = 0.14$	$V_{cnt}^* = 0.17$
UD-CNT	TSDT[Wattanasakulpong2015]	20.6814	23.3559	32.3180
	SSDT[Wattanasakulpong2015]	20.7286	23.4229	32.3890
	Présent	20.6788	23.3520	32.3142
X-CNT	TSDT[Wattanasakulpong2015]	24.2864	26.8941	37.6943
	SSDT[Wattanasakulpong2015]	24.3943	27.0177	37.8069
	Présent	24.2791	26.8860	37.6881
O-CNT	TSDT[Wattanasakulpong2015]	14.4990	16.6984	22.6823
	SSDT[Wattanasakulpong2015]	14.4515	16.6451	22.6276
	Présent	14.5040	16.7041	22.6883
Chargement biaxiale $\gamma_x = -1, \gamma_y = -1$				
UD-CNT	TSDT[Wattanasakulpong2015]	10.3407	11.6780	16.1590
	SSDT[Wattanasakulpong2015]	10.3643	11.7115	16.1945
	Présent	10.3394	11.6760	16.1571
X-CNT	TSDT[Wattanasakulpong2015]	12.1432	13.4471	18.8472
	SSDT[Wattanasakulpong2015]	12.1972	13.5089	18.9035
	Présent	12.1396	13.4430	18.8440
O-CNT	TSDT[Wattanasakulpong2015]	7.2495	8.3492	11.3411
	SSDT[Wattanasakulpong2015]	7.2257	8.3225	11.3138
	Présent	7.2520	8.3521	11.3442

Tableau IV-3 : Les valeurs de la charge critique de flambement pour les différents types de plaque CNTRC et leurs distributions (linéaire et non linéaire), sous chargement uniaxiale et biaxiale en variant le rapport a/h

<i>Chargement uniaxiale: $\gamma_x=-1, \gamma_y=0$</i>					
<i>a/h</i>	<i>UD-CNT</i>	<i>X-CNT</i>	<i>O-CNT</i>	<i>X-CNTNL</i>	<i>O-CNTNL</i>
5	13.9179	14.8082	11.5783	15.3194	10.2369
10	32.3142	37.6881	22.6883	40.3459	17.3376
20	51.8827	68.6094	30.9110	77.5797	21.3800
40	61.5705	87.3715	34.0940	102.3821	22.7389
<i>Chargement biaxiale: $\gamma_x=-1, \gamma_y=-1$</i>					
5	6.9590	7.4041	5.7892	7.6597	5.1184
10	16.1571	18.8440	11.3442	20.1730	8.6688
20	25.9414	34.3047	15.4555	38.7898	10.6900
40	30.7852	43.6858	17.0470	51.1910	11.3695

Le tableau **IV-3** : Représente une comparaison entre la distribution du renfort linéaire et non

linéaire à l'intérieure de la matrice polymère pour différente valeur de a/h sous chargement uniaxiale et biaxiale on remarque que la plaque XCNT-NL donne la plus grande valeur de la charge critique de flambement tandis que la plaque en O-CNT-NL donne la plus faible valeur.

La distribution no linéaire (X-CNT-NL) donne des charges critiques plus grandes que les autres formes. Cette variation montrent que la distribution non linéaire du renfort (X-CNT-NL) rendre la plaque plus rigide qui va résiste mieux vis-à-vis la charge critique de flambement.

Et on remarque que la valeur de la charge critique de flambement le plus grands estimée pour la valeur le plus grands de rapport (a/h), donc l'augmentation de l'épaisseur de la plaque entraîne une augmentation de la charge critique de flambement.

Tableaux IV-4: L'effet de différentes valeurs de la fraction volumique sur la charge critique de flambement pour les deux types de renforcement linéaire et non linéaire plaque CNTRC.

	Chargement uniaxiale: $\gamma_x = -1, \gamma_y = 0$			Chargement biaxiale: $\gamma_x = -1, \gamma_y = -1$		
Volume fraction	UD-CNT	X-CNT-NL	O-CNT-NL	UD-CNT	X-CNT-NL	O-CNT-NL
$V_{cnt}^* = 0.11$	20.6788	26.0727	11.1411	10.3394	13.0363	5.5706
$V_{cnt}^* = 0.14$	23.3520	28.6197	12.9088	11.6760	14.3098	6.4544
$V_{cnt}^* = 0.17$	32.3142	40.3459	17.3376	16.1571	20.1730	8.6688

Tableau IV-4: Montre l'effet des fractions volumiques des nanotubes de carbone sur la charge critique de flambement pour différents types de renforcement de la plaque polymère CNTRC. La charge critique de flambement avec une fraction volumique égale ($V_{cnt}^*=0,17$) donne la plus grande charge par rapport aux autres fractions volumique de nanotube de carbone. La diminution des fractions volumiques des CNT conduit à la réduction des charges critique de flambement. Ce décroissement considérable de la charge critique est important sous la charge uniaxiale.

Tableau.IV-5 : Effet de nombre de mode et le type de chargement sur la variation de la charge critique de flambements pour les différents types de plaque CNTRC.

		Chargement uniaxiale: $\gamma_x = -1, \gamma_y = 0$			Chargement biaxiale: $\gamma_x = -1, \gamma_y = -1$		
(n ; m)	fraction volumique	UD-CNT	X-CNT-NL	O-CNT-NL	UD-CNT	X-CNT-NL	O-CNT-NL
(1,1)		32.3142	40.3459	17.3376	16.1571	20.1730	8.6688
(1,2)	$V_{cnt}^*=0.17$	56.5915	60.7802	41.4465	50.9324	54.7022	37.3014
(1,3)		70.6534	77.1926	49.6396	67.9360	74.2237	47.7287
(n ; m)							
(1,1)		23.3520	28.6197	12.9088	11.6760	14.3098	6.4544
(1,2)	$V_{cnt}^*=0.14$	38.9258	42.3454	27.8884	35.0333	38.1109	25.0996
(1,3)		49.7685	55.5404	32.7098	47.8543	53.4043	31.4517
(n ; m)							
(1,1)		20.6788	26.0727	11.1411	10.3394	13.0363	5.5706
(1,2)	$V_{cnt}^*=0.11$	35.9232	39.6244	25.1726	32.3309	35.6619	22.6553
(1,3)		44.9805	50.3565	29.8728	43.2505	48.4197	28.7237

Le tableau **IV-5** : Représente la variation de la charge critique de flambement d'une plaque renforcé par des nanotubes de carbone sous deux types de compressions uniaxiale ($\gamma_x = -1$, $\gamma_y = 0$) ou biaxiale ($\gamma_x = -1$, $\gamma_y = -1$) Pour différent nombre de mode et fraction volumique .

On observe une augmentation la charge critique de flambement lorsque le nombre de mode augmente. Cette augmentation est attribuer à la longueur d'onde ; lorsque nombre de mode augmente, la longueur d'onde diminue et la plaque résiste mieux sous la charge axiale applique.

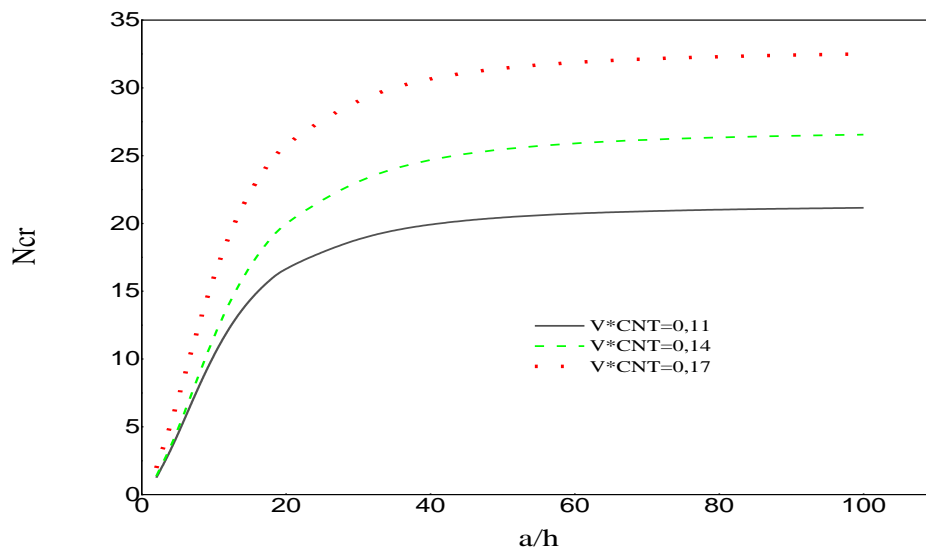


Figure IV-2. La charge critique de flambement d'une plaque carrée UD-CNT en fonction de rapport (a/h) pour différent valeur de la fraction volumique, sous un chargement bi axiale.

La figure **IV-2** : Représente l'effet des fractions volumiques des nanotubes de carbone sur la charge critique de flambement en utilisant la théorie d'ordre élevée. On remarque que la valeur de la charge critique de flambement la plus grande équivalant à la fraction volumique $V_{*CNT} = 0,17$ ensuite diminue avec la diminution de la fraction volumique du nanotube. Il est vu clairement sur cette figure que, pour les différent cas de la fraction volumique, la charge critique de flambement augmente avec l'augmentation du rapport géométrique (a/h). Cette augmentation est importante lorsque $a/h < 20$. On constate que, la charge critique de flambement est affectée d'une côté par l'épaisseur de la plaque. Et d'une autre côté par l'effet de cisaillement qui est important lorsque la plaque devienne épaisse ($a/h < 20$)

La figure IV-3 : Montre l'effet du rapport (a/b) sur la charge critique de flambement d'une plaque UD-CNT pour différent valeur de la fraction volumique. On remarque que l'augmentation du rapport (a/b) conduit à une augmentation de la charge critique de flambement. Car la dimension suivant l'axe (y) de l'application de la charge bi axiale diminue. La charge critique de flambement avec une fraction volumique $V^*_{cnt}=0.17$ rend la plaque plus rigide et supporte plus de charge avant de perdre sa stabilité

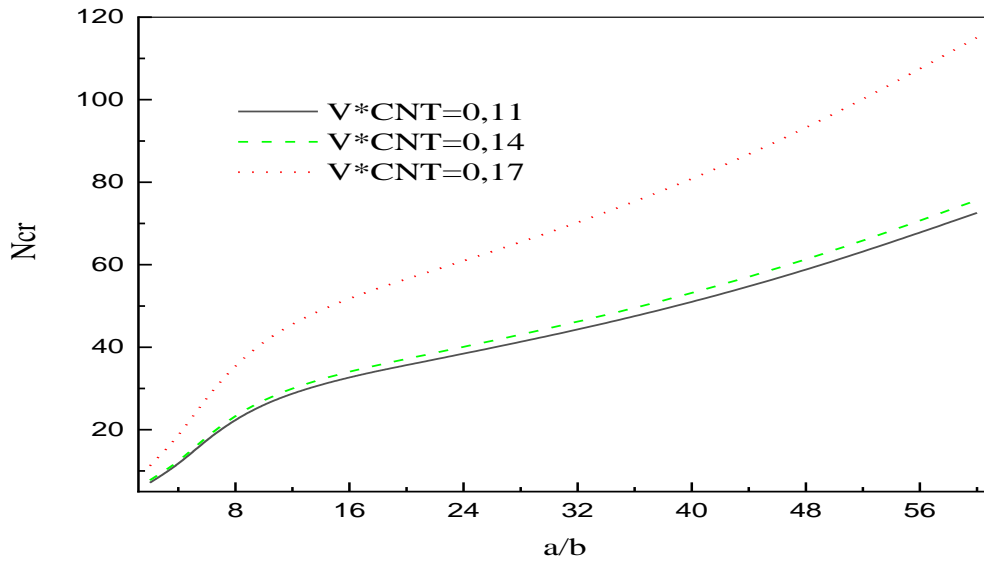


Figure IV-3 : la Charge critique de flambement d'une plaque UD-CNT en fonction de rapport (a/b) pour différent valeur de la fraction volumique avec (a/h)=10 sous un chargement bi axiale.

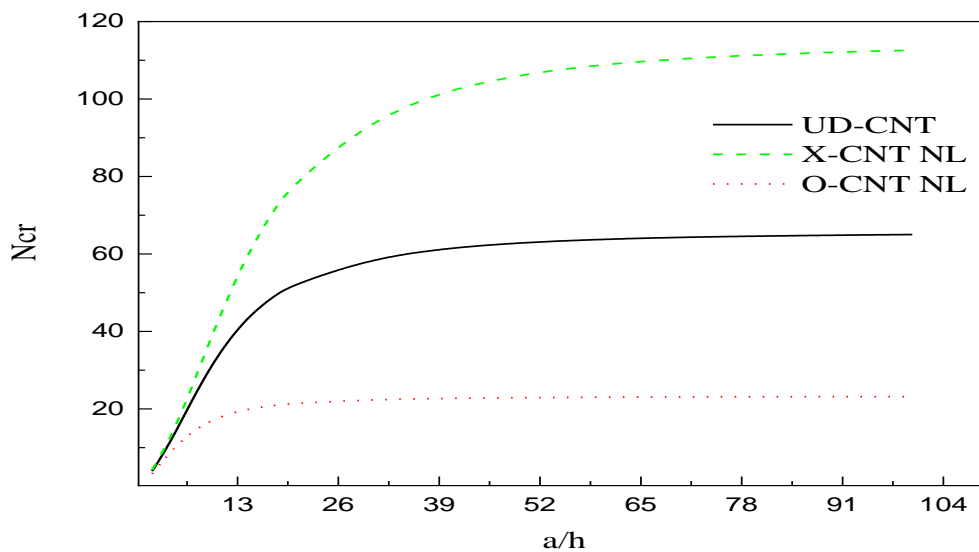


Figure IV-4 : la charge critique de flambement d'une plaque carrée en fonction du rapport (a/h) pour différent forme de distribution du renfort avec $V^*_{cnt} = 0.17$.

La figure IV-4 : montre l'influence du paramètre du rapport (a/h) et la distribution des NTC à l'intérieur de la plaque sur la charge critique de flambement. On observe que les charges critiques de flambement augmente avec l'augmentation du rapport a/h , cette augmentation est importante sous l'effet de cisaillement transversale ($a/h < 20$) En outre, il peut être vu à partir la figure que la plaque renforcée par la distribution de type (XCNT-NL) donne une charge critique de flambement plus grande. Par conséquent, il est clair que l'effet de concentration des nanotubes aux faces supérieur et inférieur de la plaque joue un rôle très important pour rigidifier la plaque et lui rend plus stable.

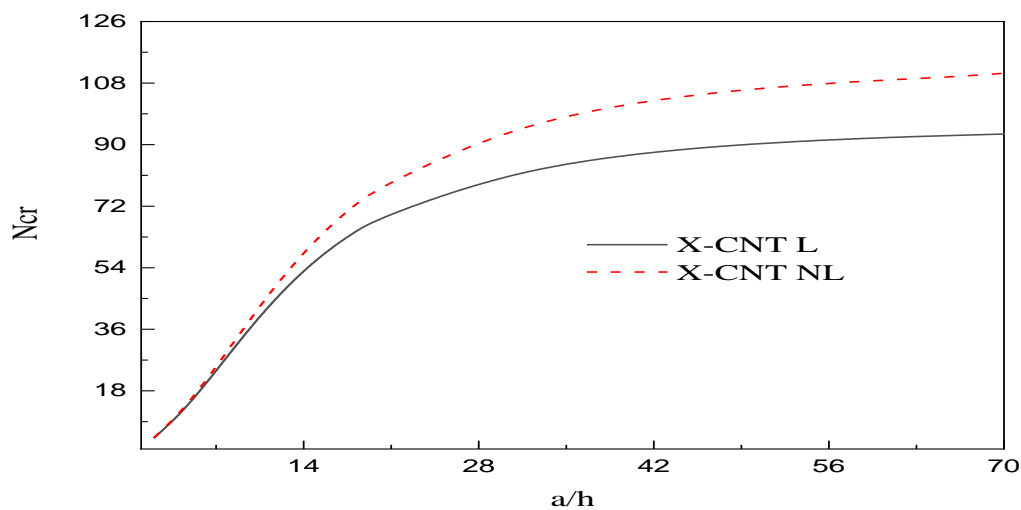


Figure IV-5 : Comparaison entre les distributions du renfort (linéaire et non linéaire) de type X-CNT

La figure IV-5 illustre la charge critique de flambement pour la distribution linéaire X-CNT-L et non linéaire (parabolique) X-CNT-NL. En fonction du rapport géométrique a/h sous un chargement Il peut être vu à partir la figure que la charge critique de flambement augmente lorsque le rapport (a/h) augmente. Il est vu aussi que la charge critique de flambement correspond à la distribution non linéaire (parabolique) est plus grande que pour la distribution linéaire. Cette variation est attribuée à la concentration du renfort (CNT) aux faces supérieur et inférieur pour le type X-CNT-NL ce qui indique que cette distribution rend la plaque plus rigide vis-à-vis le flambement.

IV.4 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'analyse de la charge critique de flambement d'une plaque en polymère renforcées par des nanotubes de carbone. On peut conclure d'après l'étude faite sur les plaques nano composites renforcées par des nanotubes de carbones et la comparaison entre les trois distribution de nanotubes de carbone (UD-CNT ,O-CNT,X-CNT) linéaire et non linéaire, que la disposition des nanotubes de carbone dans la matrice polymère influe sur la rigidité de la plaque.

Au premier lieu, on a montré l'exactitude de la théorie utilisée en comparant les résultats obtenus avec ceux trouvés dans la littérature. En termes de résultats trouvés de la charge critique de flambement d'une plaque renforcée pas différent type de distribution des nanotubes à l'intérieur de la matrice polymère, on montre que : Sous charge uniaxiale et biaxiale, la plaque renforcée par une distribution non linéaire de type (X- CNT-NL) est la plus rigide par rapport aux autres types des plaques .Les plaques contenant des fractions volumiques les plus élevées ont des charges critiques les plus importantes. Par conséquent, l'augmentation de la fraction volumique des nanotubes rend la plaque plus rigide.

Les valeurs de la charge critique de flambement augmentent avec l'augmentation du rapport géométrique (a/h). Cette augmentation est importante lorsque $a/h < 20$. On constate que, la charge critique de flambement est affectée d'une côté par l'épaisseur de la plaque. Et d'une autre côté par l'effet de cisaillement qui est important lorsque la plaque devienne épaisse ($a/h < 20$).

Enfin, les résultats montrent que la charge critique de flambement dépend des différents paramètres et la concentration des renforcements de CNT) sur les faces supérieure et inférieure pour une distribution non linéaire (X-CNT-NL) rend la plaque plus rigide par rapport à la distribution linéaire.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

A la fin de ce travail, on peut conclure que la nécessité actuelle de développer des modèles mathématiques qui étudie les divers comportements des nanostructures, ainsi que l'évolution rapide dans le domaine des nano composites et notamment ces nouveaux matériaux, nous a encourager d'entamer ce sujet en étudiant le comportement mécanique des plaques on polymère renforcées par les nanotubes de carbone. Pour étudier la charge critique de flambement des plaques en polymère renforcée symétriquement par des nanotubes de carbone. On a développé une méthode analytique pour déterminer les valeurs de la charge critique de flambement on polymère renforcées par CNT.

Dans le cadre de ce travail, on a étudié les différents paramètres pouvant influencer sur le comportement des plaques on polymères renforcées par les nanotubes de carbone, tels que la fraction volumique, la longueur et l'épaisseur de la plaque, le rapport géométrique, le nombre de mode, et les types de renforcement CNT. Cette étude est basée sur la théorie d'ordre élevée, les équations du mouvement sont obtenues à partir l'utilisation de principe d'Hamilton, les plaques on polymère sont renforcées par des nanotubes de carbone selon trois formes linéaires et non linéaires;(UD-CNT, O-CNT, X-CNT). A travers des résultats trouvés par la formulation proposée, on peut dire que la disposition des nanotubes de carbone dans la matrice polymère influe sur les charges critiques de flambement, on a trouvé que ;

- ✓ la distribution des renforts en forme X-CNT-NL rend les plaques plus rigides tandis que la distribution en forme UD-CNT et O-CNT-NL les rend plus souples.
- ✓ pour les plaques contenant des fractions volumiques des nanotubes de carbone plus élevées on a trouvé que les charges critiques est plus importantes ce qui rend ces plaques plus rigides
- ✓ .la charge critique de flambement adimensionnelle augmente progressivement avec le rapport Géométriques (a/h) et (a/b) de la plaque.
- ✓ la charge critique de flambement augmente en fonction le nombre de mode (n, m) cette augmentation est attribuer à la longueur d'onde.

D'après les résultats on conclue que la distribution parabolique (non-linière) de type (X-CNT-NL) présente une résistance élevée au phénomène de flambement par rapport aux autres types de renforcement, car la concentration des nanotubes est au niveau des faces supérieure et inférieure de la plaque. En général on peut dire que la présente théorie est simple et surtout efficace pour étudier le phénomène de la stabilité au flambement de la plaque en polymère

renforcée par CNT. En perspective, nous suggérons d'enrichir le présent travail pour tenir mieux de résultats qui montreraient :

- L'influence de l'épaisseur variable de la plaque on polymère renforcés par les nanotubes de carbone sur le flambage.
- Effet des défauts initiaux (porosités, surfaces déformées, etc.) sur la charge critique de flambement.
- Suggère une autre type de distribution CNT et leur importance sur l'études mécanique des plaques on polymères renforcés par les nanotubes de carbone.

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

Références bibliographiques

[Afaq. 2003] Développement d'un nouveau modèle pour les structures composites multicouches et sandwiches avec prise en compte du cisaillement transverse et des effets de bord thèse de doctorat, université Toulouse III-Paul Sabatier, 2003

[Ago 1999] Ago.H., Kugler.T., Cacialli.C., Salanek.W.R., Shaffer.M.S.P., Windle.A.H., Criend.R.H., Phys.J.Chem.B., 103 8116 (1999).

[Ait Atmane et al 2010] Ait Atmane. H, A. Tounsi., I. Mechab., E.A Adda Bedia, —Free vibration analysis of functionally graded plates resting on Winkler-Pasternak elastic foundations using a new shear deformation theory. Int. J. Mech. Mater. Design; 6 (2): 113-121 (2010).

[Ait Atmane 2010] Ait Atman Hassen, Vibration des structures composites en tenant compte de l'effet du cisaillement, thèse de doctorat, L'Université Djilali Liabes de Sidi bel Abbes, (2010).

[Ait Amar Meziane et al 2014] M. Ait Amar Meziane, H.H. Abdelaziz, A. Tounsi, An efficient and simple refined theory for buckling and free vibration of exponentially graded sandwich plates under various boundary conditions”, J. Sandw. Struct. Mater, 2014, 16(3), 293-318.

[Aissani et al 2015] K. Aissani, M. Bachir Bouiadjra, M. Ahouel, A. Tounsi, A new nonlocal hyperbolic shear deformation theory for nanobeams embedded in an elastic medium, Struct. Eng. Mech, 2015, 55(4), 743-762.

[Ajayan 1993] P.M. Ajayan, T.W. Ebbesen, T. Ichihashi, S. Iijima, K. Tanigaki, H. Hiura, Nature, 362 522 (1993)

[Ajayan 2000] Ajayan.P.M, L. S. Schadler, C. Giannaris, A. Rubio. “Single-walled carbon nanotubepolymer composites: Strength and weakness”. Adv. Mater, 12 (10), 750-753. (2000),

[Ajayan 2007] Ajayan.A.M, J. M.Tour, Materials science - Nanotube composites. Nature, 447(7148), 1066-1068, (2007).

[Althues et al 2007] Althues .H, J. Henle, et S. Kaskel, Functional inorganic nanofillers for transparent polymers. Chemical Society Reviews, 36(9):1454–1465, (2007).

[Amarelis 2005] P. Amarelis, Nanocomposites polyméthacrylate de méthyle - silicates lamellaires. Influence de la nature de la charge et de l'interface sur les propriétés mécaniques et sur la transition vitreuse, octobre (2005).

[Ambartsumyan 1969] Ambartsumyan S.A., Theory of Anisotropic Plate. Economic Publishing Co, 1969

[Andrews 2002] R. Andrews, D. Jacques, D. Qian, T. Rantell, Accounts of Chemical Research, 35, 1008-1017 , 2002.

[Anthony 2006] Anthony Loiseau, thèse, Elaboration et caractérisation de Nano composites modèles Laponite/Poly oxyde d'éthylène, Université du Maine UMR CNRS 6120 UFR Sciences et Techniques, (2006).

[Aranda 1992] Aranda P, Ruiz-Hitzky E, Poly (ethylene oxide)-Silicate Intercalation Materials. Chemistry of Materials, 4 (6): p. 1395-1403, (1992).

[Aubry 2009] C. Aubry, Développement et mise en oeuvre de structures textiles multifonctionnelles contenant des nanotubes de carbone – Application aux capteurs chimiques pour la détection de solvants, L'Université des sciences et technologiques de Lille, 2009.

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

B

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

[Bandow et al 1997] Bandow.S., Rao.A.M., Williams.K.A., Thess.A., Smalley.R.E., Eklund P.C., Purification of Single Wallcarbon nanotubes bay microfiltration J.PHYS.Chem.B., 101,8839-8842. (1997),

[Barrau 1987] Barrau j.-j. et larose S. Calcule des structures en materiaux composites Collection résistance des materiaux et structures. Edition masson, paris, 1987.

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

[Berreur 2002] Berreur, L. B. d. Maillard, and S. Nösperger, "L'industrie française des matériaux composites," Ministère de l'économie des finances et de l'industrie, 2002.

[Bernard 2007] Charlotte Bernard Propriétés mécaniques des nanotubes de carbone en tant que nanosondes et leur fonctionnalisation par bio-nanoparticules, l'université Bordeaux, école doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur .30 Octobre 2007.

[Bethune et al 1993] Bethune.D.S. Kiang.C.H., de Vries.M.S., Gorman.G. Vasquez.J et Beyers.R *Nature*, 363:605(1993), Lijima.S et I.chihashi.T.*Nature*, 363:603(1993).

[Belabed et al 2014] Z. Belabed, M.S.A. Houari, A. Tounsi, S.R. Mahmoud, O. Anwar Bég, An efficient and simple higher order shear and normal deformation theory for functionally graded material (FGM) plates, *Compos. Part B*, 2014, 60, 274-283.

[Belkorissat et al 2015] I. Belkorissat, M.S.A. Houari, A. Tounsi, E.A. Adda Bedia, S.R. Mahmoud, On vibration properties of functionally graded nano-plate using a new nonlocal refined four variable model, *Steel Compos. Struct*, 2015, 18(4), 1063-1081

[Benzair et al 2008] A. Benzair, A. Tounsi, A. Besseghier, H. Heireche, , N. Moulay, L. Boumia, , The thermal effect on vibration of single-walled carbon nanotubes using nonlocal Timoshenko beam theory, *J. Phys. D*, 2008, 41, 225-404.

[Bonard et al 1997] Bonard J.M., Stora.T., J.P.Salvetat., Maier.C., Stockli.T., Duschl.C., Corro.L., Heer.W.A., Chatelein, *Advanced Materials*, 9 827(1997).

[Bonnissel 2001] Bonnissel, M. L. Luo et D. Tondeur: Compacted exfoliated natural graphite as heat conduction medium. *Carbon*, 39:2151–2161, 2001.

[Bradley et al 2000] Bradley. K., Ishigami. M., Zettl Extreme oxygen sensitivity of electronic properties of carbon nanotubes, Collins. P. G., A., *Science*, 287, 1807-1804, 2000.

[Brochard 1986] Brochard F., *J. Chem. Phys.*, 84 4664-4672 (1986)

[Bogdan et al 2002] Relationships between crystallinity, oxygen diffusion and electrical conductivity of evaporated C₇₀ thin films Volume 4, Issue 8, August 2002, Pages 1009-1015.

[Bouazza, et al 2015] M. Bouazza, K. Amara, M. Zidour, A. Tounsi, El. A. Adda Bedia, Postbuckling analysis of nanobeams using trigonometric Shear deformation theory, *Appl. Sci. Report*, 2015, 10(2), 112 -121.

[Boudenne 2003] Boudenne, A. "Etude expérimentale et théorique des propriétés thermophysiques de matériaux composites à matrice polymère," Université PARIS XII, 2003.

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

[Buerschaper 1944] Buerschaper R.A.: Thermal and electrical conductivity of graphite and carbon at low temperatures. Journal of Applied Physics, 15:452–454, 1944.

C

[Chemi 2018] 40] A. Chemi, H. Heireche, M. Zidour, K. Rakrak, A. A. Bousahla, Critical buckling load of chiral double-walled carbon nanotube using non-local theory elasticity, Advances in Nano Research 3, 2015, 4,193-206.

[Chiang et al 2001] Chiang.I.W., Brinson.B.E., Smalley.R.E., Margrave.J.L., Hauge.R.H., J.Phys.Chem.B., 105 1157(2001).

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

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

[Collins 2000] Extreme oxygen sensitivity of electronic properties of carbon nanotubes, P. G. Collins, K. Bradley, M. Ishigami, A. Zettl, Science, 2000, 287, 1801-1804.

D

[Draoui et al 2019] Draoui, A., Zidour, M., Tounsi, A., Adim, B., (2019) Static and dynamic behavior of nanotubes-reinforced sandwich plates using (FSDT), Journal of Nano Research, Vol. 57, 117-135

[Dresselhaus 1995]Dresselhaus M. S., et al.(1995), “ Physics of carbon nanotubes”, 33, (7), 883-891.

[Dujardin 1998] E. Dujardin, T.W. Ebbesen, A. Krishnan, M.M.J. Treacy, Adv. Mater, 10 611 (1998).

[Dillon et al 1997] Dillon.A.C., Jones.K.M., Bekkedahl.T.A., Kiang.C.H., Bethune.D.S., Heben.M.J., Nature 386 377(1997).

[Duesberg et al 1999] Duesberg.G.S., Blau.W., Byrne.H.J., Muster.J., Burghard.M., Roth.S Chromatography of carbon nanotubes Synth.Met103,2484-2485. ,(1999)

E

[El hadji 2008] El hadji Boubacar , "Nouveaux matériaux composites thermo formables à base de fibres Master à l'université de Bejaia 2014/2015

[Endo 1995] Endo.M et .al., Carbon 33 :873,1995.

G

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

[Gay 1991] GAY, D., Matériaux composites, 3ème édition. Paris : Hermès,,569p. 1991

[Giocosa 1999] Giocosa A. Les composites dans l'industrie automobile. Techniques de l'ingénieur, traité Plastiques et Composites, AM 5600, 1999.

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

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

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

[Gornet 2010] Gornet L. Généralités sur les matériaux composites. cel-00470296, version 1 - 6 Apr 2010.

[Gu et al 2008] H. Gu and T. M. Swager, Adv. Mater, vol. 20, pp. 4433–4437, 2008.

H

[Hamwi et al 1997] Hamwi.A. Alvergnat.H., Bonnamy.S., Béguin.C.,Carbon, 35 723 (1997).

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

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

[Hebali 2014] H. Hebali, A. Tounsi, , M.S.A. Houari, A. Bessaim, E.A. Adda Bedia, , A new quasi-3D hyperbolic shear deformation theory for the static and free vibration analysis of functionally graded plates, ASCE J. Eng. Mech, 2014, 140, 374-383.

[Heireche et al 2008] H. Heireche, A. Tounsi, A. Benzair, M. Maachou, E.A. Adda Bedia, Sound wave propagation in single-walled carbon nanotubes using nonlocal elasticity, Physica E, 2008, 40, 2791-2799.

[Heireche et al 2008] Heireche, H., Tounsi, A., Benzair, A., Mechab, I. (2008c), “Sound Wave Propagation in Single – Carbon Nanotubes with Initial Axial Stress”, Journal of Applied Physics, 104, 014301.

[Heireche et al 2008] H. Heireche, A. Tounsi and A. Benzair, Scale effect on wave propagation of double-walled carbon nanotubes with initial axial loading Nanotechnology ,Vol. 19 (2008), p. 185703.

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

[Huxtable et al 2003] Huxtable S. T., et al, Interfacial heat flow in carbon nanotube suspensions, Nature Materials, 2, (11), 731-734, (2003).

[Hwang 1995] K.C. Hwang, J. Chem. Soc. Chem. Commun, 173 (1995).

I

[Iijima 1991] Iijima, S., ‘Helical microtubules of graphitic carbon’, *Nature*, vol. 354, pp. 56–58. 1991

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

[Iijima et al 1996] Iijima. S., Brabec. C., Maiti. A., Bernholc. J., Structural flexibility of carbon nanotubes. J. Chem. Phys. 104(5) (1996), 2089 – 2092. doi:10.1063/1.470966 (1996).

[Ishii 1997] Ishii T, O-Acetylated oligosaccharides from pectins of potato tubé cell walls, Plant Physiology, 113, 1265-1272, 1997.

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

J

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

[Journet 1998] Journet.C., Journet Cathrine la production de nanotubes de carbone .Thèse de doctorat Université Montpellier II (1998).

[Jules 2001] JULES, E. J. "Couplages entre propriétés thermiques, réactivité chimique et viscosité des matériaux composites thermodurcissables en relation avec les conditions de leur élaboration fondée sur l'hystérésis diélectrique." Ecole nationale Supérieure d'arts et Métiers, 2001.

K

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

[Kant et al 2002] Kant, K. Swaminathan. Analytical solutions for the static analysis of laminated composite and sandwich plates based on a higher order refined theory Composite Structures, 56(4):329-344, 2002.

[Kirchhoff.1950], Kirchhoff. G. (1950)"Über das gleichgewicht und die bewegung einer elastischen schein." Journal fur reine und angewandte Mathematik, vol. 40, pages 5188,1950.

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

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

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

L

[Lachmat 2010] Lachmat Zohra, Etude des contraintes d'interface d'une poutre FGM renforcée par une plaque en matériaux composites Master à l'université djillali liabes de sidi bel abbes. 2010/2011

[Larbi Chaht et al 2015] F. Larbi Chaht, A. Kaci, M.S.A. Houari, A. Tounsi, O. Anwar Bég, S.R. Mahmoud, Bending and buckling analyses of functionally graded material (FGM) size-dependent nanoscale beams including the thickness stretching effect, *Steel Compos. Struct.*, 2015, 18(2), 425-442.

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

[Lefebvre et al 2003] “Bright band gap photoluminescence from unprocessed singlewalled carbon nanotubes”, *Physical Review Letters*, 90, (21).2003

[Leroux 1999] C. Leroux, K. Metenier, S. Gautier, E. Crackowiak, S. Bonnamy, C, Béguin, *J. Power Sources*, 81-82 317 (1999).

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

[Li et al 2000] Li.C., Cheng.H.M., Xing.Y.T., Tan.P.H., Su.G., *Carbon*, 38 2041 (2000).

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

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

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

[Lourie et al 1998] Lourie O., Wagner H.D., « Evaluation of Young's modulus of carbon nanotubes by microRaman spectroscopy. », *Journal of Materials Research*, 13, 2418; 1998

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

M

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

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

N

[**Nakayama Y, et al. (2001)**], "Field-emission device with carbon nanotubes for a flat panel display", Synthetic Metals, 117, (1.3), 207-210.2001

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

P

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

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

R

[**Reddy et Al 1997**] Reddy. J. N., Wang. C. M., Lee. K. H. Relationships between bending solutions of classical and shear deformation beam theories. International Journal of Solids and Structures 34 (26), 3373-338, 1997.

[Reddy 1999] Reddy, J. N. Theory and Analysis of Elastic plates. Taylor & Francis, Philadelphia, 1999.

[Reddy 2004] Reddy, J.N. Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and Analysis, (2nd edition), Taylor & Francis eBooks, CRC Press. (2004).

[Rinzler 1998] Rinzler.A.G.,Liu.J.,Dai.H.,Nikolaev.P., Huffman.C.B., RodriguezMacias.F.J., Boul.P.J., Lu.A.H., Heymann.D., Colbert.D.T., Lee.R.S., Fischer.J.E., Rao.A.M., Eklund.P.C., Smalley.R.E., Large-scale purification of single-Wall carbon nanotubes : process, product and characterization App Phys A 67,29 -37 (1998).

S

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

[Saito et al 1998] Riichiro Saito, G. Dresselhaus, et M. S. Dresselhaus, Physical properties of carbon nanotubes (Imperial College Press, 1998).

[Saito et al 1992] Saito.R., Fujita.M., Dresselhaus.G., and Dresselhaus.M.S. Appl.Phys.Lett., 60(18),2204 (1992).

[Salvetat et al 1998] Salvétat J-P., Poulin P., Field emission from single-wall carbon nanotube films Appl. Phys. Lett. **73**, 918 (1998).

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

[Serp 2013] Philippe Serp, Thes. P 2013. Réactivité et manipulation de nanotubes de carbones monocouches fonctionnalisation de surface par greffage covalent et en œuvre comme agent structurant, Ecole doctorale d'Angers, juin 2013.

[Semmah et al 2014] A. Semmah, A. Tounsi, M. Zidour, H. Heireche, M. Naceri, Effect of the chirality on critical buckling temperature of zigzag single-walled carbon nanotubes using the nonlocal continuum theory, Full. Nanotub. Carb. Nanostr, 2014, 23, 518-522.

[Shelimov 1998] Shelimov.K.B., Esenaliev.R.O., Rinzler.A.R., Huffman.C.B., Smalley.R.E., purification of single- Wall carbon nanotubes by ultrasonically assisted filtration, Chem.Phys.Lett (1998), 282,429-434.

[Shen 2009] S.H. Shen, Nonlinear bending of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite plates in thermal environment, Compos. Struct. 91 (2009) 9-19

- [**Shi 1999**] Z. Shi, Y. Lian, F. Liao, X. Zhou, Z. Gu, Y. Zhang, S. Iijima, Purification of single-wall carbon nanotubes, *Solid State Communications*, (1999), 112, 35-37.
- [**Sloan 1998**] J. Sloan, J. Hammer, M. Zweifka-Sibley, M.L.H. Green, *Chem. Commun*, 347 (1998).
- [**Sluzarenko 2006**] N.Sluzarenko, B.Heurtefeu, M.Maugey, C.Zakri, P.Poulin, S.Lecommandoux, Diblock copolymer stabilization of multi-wall carbon nanotubes in organic solvents and their use in composites. *Carbon*, 44 (15), 3207-3212. 2006.
- [**Smalley 1997**] R. E. Smalley, D. T. Colbert, T. Guo, A. G. Rinzler, P. Nikolaev, A. Thess, International Patent, international publication number WO 97/09272. 13 March (1997),
- [**Stejskal al 2012**] Stejskal J et al, *Polymer Degradation and Stability*, 97, 1026-1033, (2012).
- [**Sui 2008**] G. Sui, W. H. Zhong, X. P. Yang, Y. H. Yu and Zhao, *Polym. Adv. Technol*, vol.19, pp. 1543- 1549, 2008.

T

- [**Thes 1996**] Thess,A.Lee,R ,Nikolaev P,Dai H,Petit Robert J,Xu C,Hee, Lee,Y,Gon Krim S Rinzler A.G,Colbert D.T,Scuseria G.E,Tomanek D , Fischer J.E.et Smalley R.E.*Science*,273 :483 (1996).
- [**Thostenson et al 2001**] Thostenson, E.T., Ren, Z.F., Chou, T.W. (2001), “Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: A review”, *Compos. Sci. Technol.*, 61, 1899–1912.
- [**Thostenson et al 2006**] Thostenson. E. T., Chou. T. W., Processing-structure-multiunctional property Relationship in carbon nanotube/époxy composites. *carbon*,44(14),3022-3029. 2006.
- [**Thostenson 2005**] E. T. Thostenson, C. Li, T-W. Chou, *Composites Science and Technology*, vol. 65, pp.491–516, 2005.
- [**Timoshenko et al 1959**] Timoshenko. S.P, S. Woinowsky-Krieger, *Theory of Plates and Shells*. McGraw-Hill, New York, 1959 .
- [**Treacy et al 1996**]Treacy M.J., Ebbesen T.W., Gibson J.M., « Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes », *Nature*, 381, 678; 1996
- [**Tounsi et al 2013**] A. Tounsi, S. Benguediab, E.A. Adda Bedia, A. Semmah, M. Zidour, Nonlocal effects on thermal buckling properties of double-walled carbon nanotubes, *Adv. Nano Res.*, 2013, 1(1),11-1.
- [**Tsang 1994**] Tsang.S.C., Chen.Y.K., Harris.P.J.C., Green.M.L.H., *Nature*.372 159 (1994).
- [**Touratier1991**]Touratier.M “An efficient standard plate theory, *Int. J. Eng. Sc*; 29 (8): 901 916, 1991.

U

[Ugrate et Al 1998] Ugrate.D., Stockli.T., Chatelain.A., Heer.W.A., Appl. Phys. A, 67101 (1998).

V

[Vacarini et al 1999] Vacarini.L., Goze.C., Aznar.R., Micholet.V., Journet.C., Bernier.P., Purification procedures of carbon nanotubes Synth.Met 103, 2492-2493, (1999).

W

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

[Wattanasakulpong et al 2015] Wattanasakulpong, N. and Chaikittiratana, A. “Exact solutions for static and dynamic analyses of carbon nanotube-reinforced composite plates with Pasternak elastic foundation”, Applied Mathematical Modelling, 39(18), 5459-5472.2015.

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

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

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

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

[Wu 2006] Y. Wu, X. Zhang, A.Y.T. Leung, W. Zhong, An energy-equivalent model on studying the mechanical properties of single-walled carbon nanotubes, Thin-Walled Structures 44 (2006) 667–676

X

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

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

Y

[Yao et al 1999] Ya. Z., Postma. H. W. C., Balents. L., Dekker. C., Nature 402, 273 (1999).

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

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

Z

[Zemri et al 2015] A. Zemri, M.S.A. Houari, A.A. Bousahla, A. Tounsi, A mechanical response of functionally graded nanoscale beam: an assessment of a refined nonlocal shear deformation theory beam theory, Struct. Eng. Mech., 2015, 54(4), 693-710.

[Zhou et al 2000] Zhou.O., Gao.B., Bower.C., Cleming.L., Shimoda.H., Cryst.Mol. And Cryst.Liq., 340 541 (2000).

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

[Zhu et al 2012] Zhu, P., Lei, Z.X., Liew, K.M. “Static and free vibration analyses of carbon nanotube reinforced composite plates using finite element method with first order shear deformation plate theory”, Compos. Struct. 94, 1450-1460. (2012).

[Zidour et al 2014] M. Zidour, T.H. Daouadji, K.H. Benrahou, A. Tounsi, El.A. Adda Bedia, L. Hadji, Buckling analysis of chiral single-walled carbon nanotubes by using the nonlocal timoshenko beam theory, Mech. Compos. Mater, 2014, 50(1), 95-104.

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

[Zimmerman 2000] Zimmermann.J.L. Bradley.R.K., Huffman.C.B., Hauge.R.H., Margrave.J.L., Gas-phase Purification of single-wall carbon nanotubes, Chem.2000.