

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université Ibn Khaldoun Tiaret**



Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie civil

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

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par :

KHOUDI ZOHRA

MECHEGUEG CHAIMAA

:

*Sujet du mémoire*

**Analyse d'effet de la distribution non linéaire de NTC-FG sur les propriétés mécaniques d'une poutre nano composite en FGM**

*Soutenu publiquement le 13/06/2023 devant le jury composé de :*

MCA.BELMAHI SAMIR

Président

Pr. CHEIKH ABDELBAKI

Encadreur

Pr. BOUAKKAZ KHALED

Examineur

MCB.KHILOUN MOKHTAR

Examineur

*Année universitaire*

2022-2023

# *Remerciement*

*Nous tenons à remercier en premier lieu Allah qui nous avons donné*

*La force et la patience à chever ce mémoire.*

*Nous voudrions saisir cette occasion pour remercier notre encadreur*

*Mr : Cheikh Abdelbaki pour l'aide et la précision conseils.*

*Ainsi qu'à tous nos enseignants "Les membres de jury" :*

 *Mr: Bouakkaz Khaled*

 *Mr: Khiloun Mokhtar*

 *Mr: Belmahi Samir*

*Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à tous les enseignants qui ont  
participé à notre formation.*

*Nous remercier également notre chef département :*

 *Mr: Rabahi Abderezak*

*Un grand remerciement à tout*

 *KHOUDI ZOHA*

 *MECHEGUEG CHAIMAA*

# Dédicace

*Avec une profonde gratitude et sincère mots, que je dédie ce modeste travail de fin d'étude à mes chère parents ; qui ont leur vie pour ma réussite et m'ont éclairé le chemin par leur conseils judicieux.*

*J e dédie aussi ce travail à mes frères (BEL KASSEM, RABEH, SEDEDIK) et ma sœur (FOUZIA) et la femme de mon frère (FATIHA) et les enfants de mon frère et de ma sœur , ainsi toute la famille (KHOUDI),*

*Tous mes professeurs qui m'ont enseigné et à tous mes amis et tous ceux qui me sont chers.*



*Zohra*

# Dédicace

*Avec une profonde gratitude et sincère mots, que je dédie ce modeste travail de fin d'étude à mes chère parents ; qui ont leur vie pour ma réussite et m'ont éclairé le chemin par leur conseils judicieux,*

*A la mémoire de ma grande mère (HORRE SAIDA) qu'ALLAH l'accueil dans son vaste paradis*

*J e dédie aussi ce travail à mes frères (AMINE , YASSINE , YOUSSEF) et ma sœur (SARA) et son mari et ses enfants , ainsi toute la famille (MECHEGUEG),*

*Tous mes professeurs qui m'ont enseigné et à tous mes amis et tous ceux qui me sont chers.*



*CHAIMAA*



# ***Résumé***



### Résumé :

Ce travail porte sur le développement d'un nouvel outil numérique pour étudier les réponses en flexion de poutres composites renforcées par des nanotubes de carbone (CNTRC). La théorie de déformation en cisaillement d'ordre supérieur (HSDT) est utilisée pour déterminer les relations de déformation et de déplacement. Une nouvelle fonction exponentielle est introduite dans l'équation de fraction volumique des nanotubes de carbone (CNT) pour montrer l'effet de la distribution des CNT sur les poutres CNTRC en termes de déplacements et de contraintes. Pour déterminer les propriétés mécaniques des CNTRC, la règle de la mixture est utilisée en supposant que les nanotubes de carbone à paroi unique (SWCNTs) sont alignés et répartis dans la matrice. Les équations principales sont dérivées à partir du principe du travaux virtuelle et les modèles mathématiques présentés dans ce travail sont fournis numériquement pour vérifier l'exactitude de la théorie proposée. Les effets du rapport d'aspect ( $l/d$ ), de la fraction volumique des CNT ( $V_{cnt}$ ) et de l'ordre de l'exposant ( $n$ ) sur les déplacements et les contraintes sont présentés et discutés en détail. Il s'avère que l'augmentation de l'exposant ( $n$ ) rend la poutre plus rigide, et la distribution exponentielle des CNT joue un rôle indispensable pour améliorer les propriétés mécaniques des poutres CNTRC.

**Mots clés :** nanotube, flexion, déformation en cisaillement, fraction volumique, poutre.

### **Abstract:**

This Work focused on the novel numerical tool for the bending responses of carbon nanotube reinforced composites (CNTRC) beams. The higher order shear deformation beam theory (HSDT) is Used to determine strain displacement relationships A new exponential function introduced into the carbon nanotube (CNT) volume fraction equation to show the effect of the CNT distribution on the CNTRC beams through displacements and stresses. To determine the mechanical properties of CNTRCs, the rule of the mixture was employed by assuming that the single- walled carbon nanotubes (SWCNTs) are aligned and distributed in the matrix. The governing equations were derived by Hamilton's principle, and the mathematical models presented in this work are numerically provided to verify the accuracy of the present theory. The effects of aspect ratio ( $l/d$ ), CNT volume fraction ( $V_{cnt}$ ), and the order of exponent ( $n$ ) on the displacement and stresses are presented and discussed in detail. Based on the It turns out that the increase of the exponent degree( $n$ ) makes the X -beam stiffer and the exponential CNTs distribution plays an indispensable role to improve the mechanical properties of the CNTRC beams.

**Keywords:** nanotube; bending; shear deformation; volume fraction; beam

## ملخص

هذا العمل يركز على أداة عددية جديدة لاستجابة الانحناء للروافد المقواة بأنابيب الكربون النانوية (CNTRC). نظرية انحناء التشوه عالي الدرجة (HSDT) تُستخدم لتحديد العلاقات بين التوتر والتشوه. تم إدخال وظيفة أسية جديدة في معادلة كسر حجم أنابيب الكربون النانوية (CNT) لإظهار تأثير توزيع أنابيب الكربون النانوية على الروافد المقواة بأنابيب الكربون النانوية من خلال التشوهات والتوترات. لتحديد الخواص الميكانيكية للروافد المقواة بأنابيب الكربون النانوية، تم استخدام قاعدة الخليط عن طريق افتراض أن أنابيب الكربون النانوية ذات الجدران الفردية (SWCNTs) مستقيمة وموزعة في المصفوفة. تم اشتقاق المعادلات الحاكمة باستخدام مبدأ العمل الافتراضي، وتم تقديم النماذج الرياضية في هذا العمل بشكل عددي للتحقق من دقة النظرية الحالية. يتم تقديم ومناقشة تأثيرات نسبة الطول إلى القطر ( $l/d$ )، نسبة حجم أنابيب الكربون النانوية ( $V_{cnt}$ )، ودرجة الأس ( $n$ ) على التشوهات والتوترات بالتفصيل. يتبين أن زيادة درجة الأس ( $n$ ) يجعل الرافدة أكثر صلابة وأن توزيع أنابيب الكربون النانوية الأسّي يلعب دورًا لا غنى عنه في تحسين الخواص الميكانيكية للروافد المقواة بأنابيب الكربون النانوية (CNTRC).

الكلمات الرئيسية: أنبوب نانوي، الانحناء، تشوه القص، نسبة الحجم، رافده.

## Sommaire :

Introduction générale: .....	1
------------------------------	---

### CHAPITRE I : Généralité sur les nanotubes de carbone

I.1 Introduction : .....	3
I.2 Carbone: .....	4
I.3 Les formes allotropiques du carbone : .....	4
I.3.1 Les formes naturelles : .....	5
I.3.1.1 Le Diamant : .....	6
I.3.1.2 Le graphite : .....	7
I.3.1.3 Les fullerènes : .....	8
I-3-2 Les autres types de carbone dans la nature : .....	9
I.4 Structure des nanotubes de carbone : .....	10
I.5 Méthode de Synthèse de nanotubes : .....	12
I.5.1 -Méthode de l'arc électrique: .....	12
I. 5.2- Méthode d'ablation laser:.....	14
I. 5.3: Méthode de Synthèse par dépôt chimique en phase vapeur(CVD): .....	15
I. 5.4 Méthode décomposition catalytique HiPCO : .....	16
I.5.5 Méthode de croissance en lit fluidisé (Fluidized Bed Growth).....	18
I.5.6Méthode de croissance par décharge électrique (Electrical Discharge Growth) : .....	18
I.5.7 Méthode de croissance par plasma (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition ou PECVD) : .....	18
I.5.8 Méthode de croissance par flamme (Flame Synthesis) : .....	18
I.5.9Méthode de croissance par réduction catalytique (Catalytic Reduction Growth) : .....	19
I.6 propriétés des nanotubes de carbone : .....	19
I.6.1-Propriétés mécaniques : .....	19
I.6.2 Les propriétés électroniques : .....	20
I.6.3 Propriétés optiques : .....	21
I.6.4 propriétés thermiques : .....	21
I.6.5 Stabilité chimique élevée : .....	22

I.6.6 Grande surface spécifique :	22
I.6.7 Propriétés magnétiques :	22
I.6.8 Capacité de stockage :	22
I.6.9 Potentiel pour les applications biomédicales :	22
I.7 Applications des nanotubes de carbone:	22
I.8 les défauts des nanotubes :	25
I.9 Les raisons de l'intérêt croissant pour les nanotubes de carbone dans la recherche et l'industrie :	25
I.9.1 Les propriétés uniques des nanotubes de carbone :	25
I.9.2 Les avancées dans la synthèse et la purification des nanotubes de carbone :	26
I.9.3 La diversité des applications possibles :	26
I.9.4 Le potentiel commercial des nanotubes de carbone :	26
I.9.5 Les préoccupations environnementales croissantes :	26
I.10 Les inconvénients des nanotubes de carbone :	26
I.11 Conclusion :	27

## **Chapitre II: Généralités sur les nano composites :**

II.1 introduction :	28
II.2 Définition d'un nano composite :	28
II.3 Les différents nanorenforts :	28
II.3.1 Les nanoparticules inorganiques :	28
II.3.2 Les nanoparticules organiques :	29
II.3.3 Les nano composites hybrides :	29
II.3.4 Nanoparticules à trois dimensions nanométriques:	30
II.3.5 Nanoparticules à deux dimensions nanométriques : nanofibres	30
II.3.6 Nanoparticules à une dimension nanométrique : feuillets	30
II-4) Dispersion des renforts:	31
II-4-1) Utilisation des ultrasons:	31
II-4-2) Dispersion mécanique par tri cylindre:	32
II-5) Les inconvénients de l'utilisation des ultrasons sont:	33
II. 6) Classification des nano composites :	33
II.6.1 Classification selon la matrice	33
I.6.1.1 Les composites à matrice métallique :	34

II.6.1.2 Les composites à matrice céramique:.....	34
II.6.1.3 nano composite à matrice organique : .....	34
II.7) Procédés d'élaboration des nano composites (NTC/polymère) : .....	35
II.7-1) Polymérisation in situ : .....	36
II.7-2) Mélange en solution : .....	36
II.7-3) Mélange à l'état fondu : .....	36
II.8 Propriétés des nano composites : .....	37
II. 8.1) Propriétés mécaniques des nano composites (NTC/polymère) : .....	37
II.8.2 Propriétés thermique des nano composites (NTC/polymère) : .....	38
II.8.3 Propriétés électriques des nano composites (NTC/polymère) : .....	38
II. 9) Application des Nano composites dans le domaine de Génie civil: .....	39
II. 10) Les défis de la production de nano composites : .....	40
II.10.1 La dispersion des renforts : .....	40
II.10.2 Le coût : .....	40
II.10.3 La compatibilité : .....	40
II.10.4 La stabilité : .....	41
II.10.5 La toxicité : .....	41
II .11) Les technologies avancées dans le domaine des nanocomposites : .....	41
II-12 Conclusion:.....	43

### **Chapitre III: Les matériaux fonctionnellement gradués**

III .1 Introduction : .....	44
III.2 Concept des matériaux fonctionnellement gradués : .....	46
III.3 Historique des matériaux fonctionnellement gradués : .....	48
III.4 Définition de FGM (fonctionally graded matériel) : .....	49
III.5. Les méthodes d'élaboration des FGM : .....	50
III.5.1. Coulage en bande (Tape Casting ou Doctor-Blade) : .....	50
III.5.2. Coulage séquentiel en barbotine (Slip Casting) : .....	51
III-5-3 Dépôt par électrophorèse : .....	52
III.5.4. Compaction Sèche des Poudres : .....	52
III.5.5. Projection plasma : .....	52

III. 5.6 C. V. D. et P. V. D : .....	53
III.5.7. Frittage et Infiltration : .....	53
III. 5.8. Frittage Laser Différentiel : .....	54
III.5.9. Implantation ionique (Sputtering) : .....	54
III.6 Propriétés physiques et mécaniques des FGM : .....	54
III.6.1 Propriétés physiques de l'aluminium : .....	54
III.6.2 Propriétés physiques de la céramique : .....	56
III.7 Classifications : .....	56
III.8 Domaines d'application des matériaux à gradients FGM : .....	58
III.9 Propriétés matérielles effectives d'un matériau FGM : .....	59
III.10 Différence entre FGM et les matériaux composites traditionnels : .....	59
III.11. Avantages et inconvénients des FGM : .....	59
III.11.1 Avantages de la FGM : .....	59
III.11.2 Inconvénient de la FGM: .....	60
III.12 Conclusion : .....	61

## **CHAPITRE IV: Théories des poutres et développement mathématique du présent modèle**

IV.1 introduction : .....	63
IV.2 Historique des théories des poutres : .....	63
IV.3 Conditions aux limites d'une poutre : .....	64
IV.4) Les différentes théories des poutres: .....	65
IV.4.1 Théorie d'Euler Bernoulli ou bien théorie classique des poutres: .....	65
IV.4.2 Théorie de Timoshenko(FSDT): .....	66
IV.4.3 Théorie d'Ordre Elevé : .....	68
IV. 5 Développement Mathématique du présent modèle : .....	69
IV.6 Propriétés matérielles des poutres FGM : .....	70
IV.7 Géométrie et propriétés des poutres en composite renforcé de nanotubes de carbone (CNTRC) : .....	71
IV.8 Équations de mouvement : .....	73
IV. 9 Solution analytique : .....	74
IV. 10 Conclusion : .....	74

**CHAPITRE V : Résultats et discussions**

IV.1 introduction : ..... 78

V.2 Résultats et discussion pour l'analyse de flexion : ..... 78

V.3 Conclusion : ..... 90

Conclusion générale et perspectives: ..... 91

Les références : ..... 92

**LISTE DES FIGURES :**

**Chapitre I : Généralités sur les nanotubes de carbone**

**Figure I-1 :** Les différentes formes allotropiques du carbone [Garrido,2010].....4

**Figure I-2 :** Structure du diamant.....6

**Figure I-3 :** Structure du graphite.....7

**Figure I-4 :** Du C60 au C80 : les atomes ajoutés au C60 pour obtenir le C70 et le C80 sont représentés en rouge. [Marcoux 2002].....9

**Figure I-5 :** Représentation de la structure tubulaire creuse de : a) nanotube mono-paroi ; b) nanotube bi-parois et c) nanotube multi-parois.....11

**Figure I-6 :** Représentation de la structure de nanotubes de carbone.....12

**Figure I- 7:** schéma de la synthèse des CNTs par décharge arc électrique.....13

**Figure I-8:** Schéma de principe du procédé de synthèse par ablation laser.....15

**Figure I-9:** Schéma d'un réacteur CVD pour la croissance des(NTC)[Gohier 2007].....16

**Figure I-10:** à gauche : Schéma du Production de nanotubes par méthode HiPCO [Marcoux2002]. A droite: Image TEM de nanotubes (HiPCO). [Nikolaev 1999].....18

**Chapitre II : Généralités sur les nano composites**

**Figure II-1 :** Représentation schématique des différents renforts. (a) nanoparticule ; (b) nanofibre ; (c) feuillet.....30

**Figure II.2:** 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].....31

**Figure II.3:** a)Tri cylindre Exakt 80E (Source : Exakt Vertriebs GmbH, Allemagne). b) Schéma du circuit d'un fluide dispersé par tricylindre (Source: IPAT ;TUBraunschweig,Allemagne). [Bozlar 2009].....32

**Figure II.4 :** Quelques applications des CMC.....34

**Figure II.5:** Méthodes d'élaborations des nanocomposites polymères : a) mise en œuvre dans le fondu, b) mise en solution et c) polymérisation in situ.....37

**Figure II .6:** Evolution de la conductivité thermique dans un nano composite à matrice polyuréthane, avec des MWCNTs modifiés par deux voies chimiques différentes. [Cai 2008].....38

### Chapitre III : Les matériaux fonctionnellement gradués

**Figure III.1 :** Concept des matériaux à gradient de propriétés.....47

**Figure. III.2:** Protection thermique.....48

**Figure III. 3:** Caractéristiques des matériaux composites FGM en comparaison avec les matériaux composites conventionnels (Koizumi 1996).....49

**Figure III.4:**Une vue de la microstructure des FGM.....50

**Figure.III.5 :** Principe de la méthode coulage en bande [Lostec1997].....51

**Figure III.6 :** Vue schématique de l'installation d'EPD pour la production des matériau.....52

**Figure. III.7:**P projection par plasma pour former un matériau thermoélectrique gradué (La composition est graduée dans la direction plane).....53

**Figure III. 8 :** Disposition du procédé frittage laser différentiel.....54

**Figure III.9:** Matériaux fonctionnellement gradués avec différentes formes de gradient .  
a) FGM discrètes/discontinues avec interface. b) FGM continues sans interface. c), f) Gradient de composition. d), g) Gradient d'orientation. e), h) Gradient de fraction.....58

**Figure III. 10:** Les principaux domaines d'application des FGM.....59

**Figure III.11:** La distribution composante des matériaux.....60

### Chapitre IV : Théories des Poutres et Développement

#### Mathématique du présent Modèle

**Figure IV-1 :** La cinématique de la théorie classique des poutres ..... 65

**Figure IV.2:** Cinématique de Timoshenko.....67

**Figure IV.3 :** Cinématique de la Théorie d'Ordre Elevé..... 68

**Figure IV.4:** Géométrie du faisceau CNTRC en composite renforcé de nanotubes de carbone.....70

**Figure IV.5 :** (a) Géométrie de la poutre (b) les différents modèles des dispositions des renforts.....70

## Chapitre V : Résultats numériques et discussion

**Figure. V.1 :** Effet du degré de l'exposant  $n$  et du rapport d'aspect  $L/h$  sur les charges de flexion (X-beam,  $V_{cnt} = 0.12$ )..... 84

**Figure. V.2.1:** Effet du degré de l'exposant  $n$  et du rapport d'aspect  $L/h$  sur les charges de flexion (V-beam,  $V_{cnt} = 0.17$ ).....84

**Figure. V.2.2 :** Effet du degré de l'exposant  $n$  et du rapport d'aspect  $L/h$  sur les charges de contrainte (V-beam,  $V_{cnt} = 0.17$ ).....85

**Figure. V.2.3:** Effet du degré de l'exposant  $n$  et du rapport d'aspect  $L/h$  sur les charges de cisaillement (V-beam,  $V_{cnt} = 0.17$ ).....86

**Figure V.3 :** Effet du degré de l'exposant  $n$  et de la fraction volumique  $V_{CNT}$  sur les charges de flexion (X-beam,  $L/h=10$ )..... 86

**Figure V. 4 :** Effet du degré de l'exposant  $n$  et du type de répartition sur les Efforts de flexion ( $L/h=10, V_{cnt} = 0.12$ )..... 87

**Figure V.5.1:** Effet du degré de l'exposant  $n$  et du type de répartition sur les efforts de Flexion ( $L/h=10, V_{cnt} = 0.12$  ).....88

**Figure V. 5.2 :** Effet du degré de l'exposant  $n$  et du type de répartition sur les efforts de contrainte ( $L/h=10, V_{cnt} = 0.12$  ).....88

**Figure V.5.3 :** Effet du degré de l'exposant  $n$  et du type de répartition sur les efforts de cisaillement ( $L/h=10, V_{cnt} = 0.12$  ).....89

---

**LISTE DES TABLEAUX :**
**Chapitre III : Les matériaux fonctionnellement gradués**
**Tableau III.1 :** comparaison entre les propriétés de la céramique et du métal..... 47

**Chapitre IV : Théories des Poutres et Développement Mathématique**
**Du présent Modèle**
**Tableau IV.1 :** Principales conditions aux limites pour les poutres.....64

**Tableau IV.2 :** The CNT efficience paramètres ( $\eta$ ).....71

**Chapitre V : Résultats numériques et discussion**
**Tableau V.1:** La flèche et les contraintes sans dimension.....78

**Tableau V.2:** Déplacements et contraintes sans dimension des poutres UD sous charges uniformes et sinusoïdales.....79

**Tableau V.3 :**Déplacements et contraintes adimensionnels sous charges Sinusoïdales en distribution linéaire et exponentielle.....80

**Le tableau V.4:** montre la variation des déformations et des contraintes sans dimension avec la variation de l'exposant  $n$ .....80

**Tableau V.5 :** montre la variation des déformations et des contraintes sans dimension avec la variation de l'exposant  $n$  pour les deux poutres O et V..... 82

**Le tableau V.6:** Déplacements et contraintes adimensionnels sans fondation élastique sous charges uniformes et sinusoïdales avec distribution parabolique ( $n=2$ )..... 83

## ***LISTE DES ABRÉVIATIONS :***

**CNT, NTC** : Nanotube de carbone.

**CNTRCs** : Poutre de composite renforcée par des nanotubes de carbone.

**SWCNT** : Nanotube de carbone simple paroi :(single-Wall carbon nanotube).

**MWCNT** : Nanotube de carbones multi-parois (Muti- Wall carbon nanotube).

**DWCNT** : (double-Wall carbon nanotube) : Nanotube de carbone double feuillet.

**NC** : Nano-composite.

**FG** : Fonctionnellement gradué.

**FGM** : (functionally graded material) Les matériaux à gradient de propriétés.

**CVD** :Chemical Vapor Deposition.

**PVD** :Le dépôt physique en phase vapeur.

**TP** :matrices Thermoplastique.

**TD** :matrices Thermodurcissables.

**CMO** :les composites a matrices organiques.

**CMC** :les composites a matrices céramiques.

**CMM** :les composites a matrices métalliques.

**CBT**: la théorie classique

**FSDT** : La théorie de déformation en cisaillement du premier ordre.

**HSDT** :La théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé.

**TBT**: la théorie de poutre de Timoshenko (the beam theory of Timoshenko).

**SSDT** :La théorie de déformation en cisaillement sinusoïdale.

**Hi PCo** : (High pressure dismutation of CO) décomposition a haute pression de CO.

**PAI:** Polyamide-imide .

**PBT:** Butylénique.

**PC :** Polycarbonate.

**PPS :** Polysulfure de phénylène.

**POM :** les poly acétals ou polyxyméthylène.

**PP :** Polypropylène.

**PEI :** Polyéther-imide.

**PES :** Polyéther-sulfone

**PEEK :** Polyéther-éther-cétone

**MMCs :** Composites à matrice métallique

---

## **LISTE DES NOTATIONS :**

**2D, 3D** : Bidimensionnelle et tridimensionnelle respectivement.

**E** : Le module de Young.

**E (z)** : Module de Young en fonction de « z ».

**E<sub>c</sub>** : Module de Young de la céramique.

**E<sub>m</sub>** : Module de Young du métal.

**G** : Le module de cisaillement.

**G(z)** : Module de cisaillement en fonction de « z ».

**ν** : Le coefficient de Poisson.

**ν(z)** : Coefficient de Poisson en fonction de « z ».

**V** : La fraction volumique.

**ρ** : La masse volumique.

**α** : Le coefficient de dilatation thermique.

**P<sub>c</sub>** et **P<sub>m</sub>** sont les propriétés correspondantes de la céramique et du métal, respectivement.

**p** : Paramètre du matériau (l'exposant de la fraction volumique qui prend des valeurs supérieures ou égales à zéro).

**a** : Longueur de la plaque suivant la direction de *x*.

**b** : Largeur de la plaque suivant la direction de *y*.

**h** : l'épaisseur de la plaque suivant la direction de *z*.

**a/h** : L'élancement.

**u, v, w** Les composantes du champ de déplacement sur le plan moyen de la plaque.

**u<sub>α</sub><sup>0</sup>** : Le déplacement de membrane dans la direction *α*.

**w** : La flèche de la plaque.

**w<sub>,α</sub>** : La rotation due a la flexion (sans cisaillement).

**φ<sub>α</sub>** : La rotation de la normale au plan moyen autour des axes *x<sub>α</sub>*.

$\gamma_{\alpha}^0$  : La déformation de cisaillement transverse mesurée sur le plan moyen.

$\psi(z)$  : La fonction de gauchissement suivant l'épaisseur de la plaque.

$\partial$  : Dérivée partielle.

$i$  et  $j$  : Sont des nombres naturels.

$\phi_x, \phi_y$ , Les rotations autour des axes  $x, y$

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$  : Déformation dans la direction  $x, y$

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  : Les contraintes normales.

$\gamma_{xz}, \gamma_{yz}$  : Les déformation de cisaillement.

$\tau_{xz}, \tau_{yz}$  : les contraintes de cisaillement.

$T(z)$  : Un champ de température (Chargement thermique).

$Q_{ij}$  : Les coefficients de rigidité.

$N, M$ , et  $S$  : Les résultantes des contraintes.

$A_{ij}, B_{ij}$ , etc : les termes de la matrice de rigidité de la plaque.

$[L]$  : La matrice symétrique.

$\{ \}$  : Vecteur colonne.

$[ ]$  : Matrice.

## **Introduction générale:**

Le développement technologique en cours dans divers domaines a entraîné des changements de mode de vie. Ainsi, trouvant de nombreuses solutions à de nombreux problèmes techniques, et l'événement le plus important de l'histoire de la technologie est la découverte du nanotube de carbone par Iijima (1991), ce CNT combine de nombreuses propriétés importantes de rigidité, de résistance mécanique et de légèreté (Rodney et Donald 1995, Yu et al. 2000), par rapport à d'autres matériaux, qui manquent généralement d'une ou plusieurs de ces propriétés. Il se caractérise également par une conductivité thermique et électrique élevée (Hone et al. 2000, Moisala et al. 2006). De nombreux types de recherches et d'études sur le comportement non local des nanostructures. En raison de l'importance des NTC dans les nano composites plusieurs approches théoriques et numériques ont été développées pour étudier leur comportement mécanique. Les principales approches théoriques incluses dans le comportement mécanique contiennent des simulations de dynamique moléculaire (MD) (Troter et al 2005), atomistic-continuum theory (Weinan and Huang 2001) Méthodes de mécanique continue (Akbas 2018, Yaksel et Akbaş 2019, Akbas 2016, Akbas 2017), mécanique continue non locale (Wang 2005, Lu et al. 2007, Mehar et al 2018c) L'incorporation de nanotubes de carbone dans une matrice polymère devient une nouvelle classe de matériaux de renforcement en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques, électriques et thermiques (Thostenson et al 2001, Esawi et Farag 2007) Mehar et al (2019a) ont étudié l'effet du renforcement des nanotubes de carbone à parois multiples (MWCNT) sur la rigidité d'un panneau incurvé en sandwich, et l'ont examiné théoriquement via une analyse de déflexion et comparé à des données expérimentales. La nouvelle génération de matériaux composites introduits dans les nanotechnologies, appelés "Functionally Graded Matériaux (FGM)", a apporté des solutions à de nombreux problèmes techniques, en produisant de nouveaux matériaux avec des propriétés qui ne peuvent être obtenues dans les matériaux conventionnels. Il a d'abord été introduit en 1984 par un groupe japonais (Yamanouchi et al. 1990) Le développement théorique et la simulation numérique pour l'analyse des FG-CNT ont attiré l'attention de nombreux chercheurs, pour la flexion (Kadoli et al. (2008) ont étudié la réponse en flexion des poutres FG en utilisant une déformation de cisaillement d'ordre supérieur. (2019) utilisant une cinématique de déformation de cisaillement polynomiale d'ordre supérieur (Patel et Suresh 2017) ont étudié le comportement en flexion d'une plaque composite à matrice métallique renforcée CNT simplement supportée. Il a été conclu que la flexion était liée à la distribution du nanotube de carbone et à la fraction volumique de CNT. Mehar et Panda (2018b) ont étudié pour développer un modèle mathématique général pour l'évaluation de l'analyse théorique de flexion thermoélastique du FG Panneau de coque à double courbure CNTRC utilisant la théorie de la déformation par cisaillement d'ordre supérieur (HSDT) (Sayyad et Ghugal

2020) ont présenté une unification théorique de vingt et une théories de poutres non locales pour la flexion, analyse du flambement et des vibrations des nanopoudres FG. Dans la présente étude, l'analyse de la flexion et des contraintes des poutres nano composites renforcées de nanotubes de carbone (CNTRC) est examinée à l'aide d'une théorie de déformation par cisaillement d'ordre supérieur (HSDT), et le défi le plus important a été d'obtenir la distribution CNIS optimale dans la matrice. Pour cela, nous avons introduit une nouvelle équation d'exposant pour la fraction volumique de CNT. Nous avons étudié les influences de divers paramètres sur l'analyse de flexion tels que les rapports d'aspect, la fraction volumique et l'ordre de l'exposant dans l'équation de fraction volumique.

**CHAPITRE I :**  
**GÉNÉRALITÉS SUR LES**  
**NANOTUBES DE CARBONE**



## I.1 Introduction :

Les nanotubes de carbone sont des structures en forme de feuille de graphite composées d'atomes de carbone disposés en un réseau hexagonal et enroulées sur elles-mêmes. Le diamètre de ces nanotubes est de l'ordre du nanomètre, mais leur longueur peut atteindre plusieurs micromètres, et ils ont une demi-molécule de fullerène à chaque extrémité. Avant 1985, il n'y avait que deux formes connues de carbone: le graphite et le diamant. Le graphite est la forme la plus courante, avec une structure de couches hexagonales non compactes appelées graphène. En 1985, Harold Kroto, Richard Smaley et Robert Curl ont découvert un nouvel allotrope, le fullerène (C<sub>60</sub>), pour lequel ils ont reçu le prix Nobel de chimie en 1997. En 1991, Iijima a découvert la formation de nanotubes de carbone lors de la production de fullerènes par un arc électrique et a été le premier à identifier les nanotubes de carbone multi parois (MWNTs) par microscopie électronique. En 1993, il a également découvert les nanotubes de carbone à paroi unique (SWNTs) par observation en microscopie électronique.

## I.2 Carbone:

Le carbone est un élément chimique qui se trouve sous différentes formes dans la nature, notamment sous forme de graphite, de diamant, de charbon, de fullerènes et de nanotubes de carbone. Il est l'un des éléments les plus abondants dans l'univers et il est essentiel pour la vie telle que nous la connaissons. Le carbone est un élément clé dans les molécules organiques, qui constituent la base de la chimie organique. Le carbone a également de nombreuses applications industrielles, notamment dans la production d'acier, de plastiques, de carburants fossiles et de produits électroniques. Les propriétés uniques du carbone, notamment sa capacité à former des liaisons covalentes avec d'autres atomes de carbone, lui confèrent une grande importance en science et en technologie

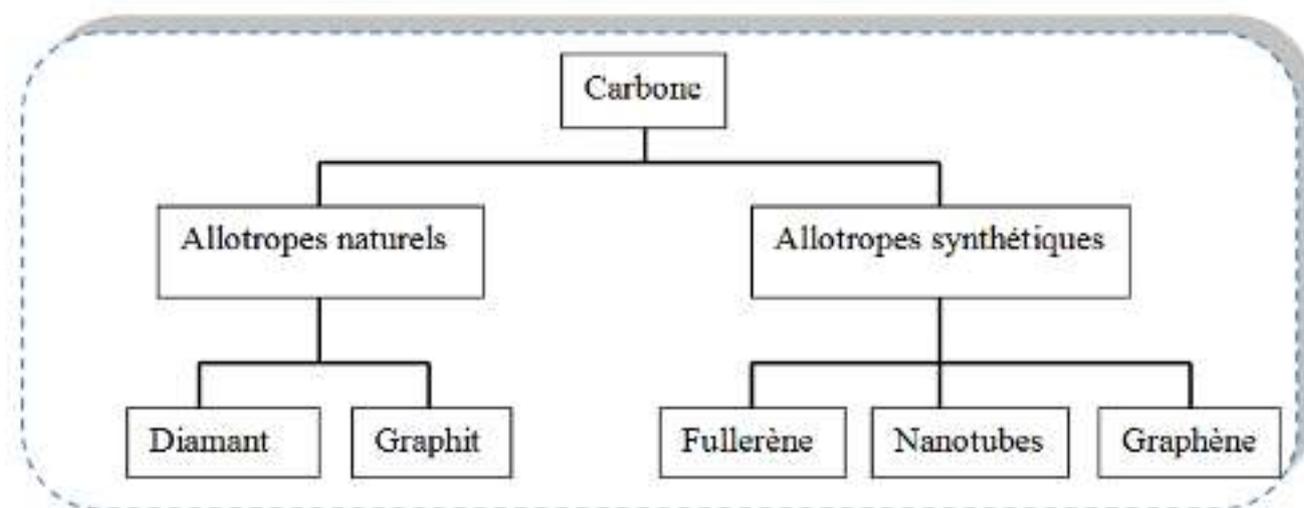
Le carbone est un élément chimique qui tire son nom du latin "carbo", qui signifie charbon, sous forme de suie ou de charbon de bois. Il est le sixième élément de la classification périodique de Mendeleïev et appartient à la famille des Cristallogènes. Dans son état fondamental, sa configuration électronique est  $1s^2 2s^2 2p^2$ , et il possède 4 électrons sur sa couche de valence. Le carbone est capable de former des liaisons simples (de type  $\sigma$ ) ainsi que des liaisons doubles ou triples (de type  $\pi$ ), ce qui lui permet de former de nombreuses molécules organiques.

Le carbone est l'élément de base de la chimie organique, qui englobe les molécules constitutives de la vie. Industriellement, il peut être obtenu sous forme pure à partir d'hydrocarbures fossiles, de biomasse ou encore de sources synthétiques, par carbonisation lente ou craquage thermique. Il existe trois

formes allotropiques du carbone, en fonction de son degré d'hybridation : le graphite (pur), qui est la forme stable dans les conditions ambiantes, le diamant (pur), qui se forme pour des conditions de température et de pression très élevées, et les carbynes (pur), qui constituent des chaînes linéaires dont l'existence a été longtemps controversée.

Le graphite est constitué de feuillets de graphène, qui est un réseau plan constitué d'atomes de carbone agencés en pavage hexagonal. Cette structure est à la base de nombreuses nano formes carbonées découvertes au cours des dernières décennies, telles que les fullerènes, les nanotubes et les graphènes isolés. Chacune de ces formes possède des propriétés uniques et est souvent qualifiée à tort de nouvelle forme allotropique du carbone.

Le carbone se trouve également sous diverses formes gazeuses, telles que le CO, le CO<sub>2</sub> et le méthane, ainsi que sous forme d'isotopes tels que le carbone 12 (98,89%), le carbone 13 (1,11%) et des traces de carbone 14. En résumé, le carbone est un élément chimique polyvalent et fondamental, présent dans une grande variété de formes et de composés.



**Figure I.1** : Les différentes formes allotropiques du carbone [Garrido,2010]

### I.3 Les formes allotropiques du carbone :

Le carbone est un élément chimique qui peut exister sous différentes formes allotropiques en fonction de son degré d'hybridation. Le graphite est la forme la plus courante de carbone, stable dans les conditions ambiantes, constitué de feuillets de graphène agencés en pavage hexagonal. Le diamant est une autre forme allotropique de carbone, qui se forme pour des conditions de température et de

pression très élevées. Les carbynes, chaînes linéaires constituées de carbone, ont longtemps été controversés quant à leur existence.

Ces formes allotropiques du carbone peuvent également être à la base de nombreuses nano formes carbonées découvertes depuis une trentaine d'années, telles que les fullerènes, les nanotubes et les graphènes isolés. Les fullerènes sont des molécules sphériques creuses composées d'atomes de carbone liés par des liaisons simples et doubles. Les nanotubes de carbone sont des feuilles de graphite enroulées sur elles-mêmes avec des diamètres de l'ordre du nanomètre et des longueurs de plusieurs micromètres. Les graphènes sont des feuilles de graphite à une seule couche d'atomes de carbone.

Le carbone peut être obtenu industriellement à partir d'hydrocarbures fossiles, de biomasse ou de précurseurs synthétiques, par carbonisation lente ou par craquage thermique. Enfin, le carbone se trouve sous différentes formes gazeuses telles que le CO, le CO<sub>2</sub>, le CH<sub>4</sub>, ainsi que sous forme isotopique, avec notamment le carbone 12, le carbone 13 et le carbone 14.

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

### **1.3.1 Les formes naturelles :**

Le carbone se trouve naturellement sous deux formes allotropiques : le graphite et le diamant.

Le graphite est la forme la plus commune du carbone, que l'on trouve par exemple dans les mines de crayon. Il est constitué d'un empilement de feuillets de graphène, chaque feuillet étant constitué d'un réseau hexagonal d'atomes de carbone. Le graphite est un matériau mou, noir et brillant, qui peut être utilisé comme lubrifiant solide ou comme matériau conducteur de chaleur et d'électricité.

Le diamant, quant à lui, est une forme cristalline très pure du carbone, constituée d'un réseau tridimensionnel d'atomes de carbone liés entre eux par des liaisons covalentes très fortes. Le diamant est le matériau le plus dur et le plus résistant connu à ce jour. Il est utilisé notamment en joaillerie, en industrie de coupe et de polissage, ainsi que pour des applications électroniques et optiques.

Il existe également des formes naturelles plus rares de carbone, telles que la lonsdaléite, une forme hexagonale de diamant, et la chaoite, une forme polymorphe du graphite. Cependant, ces formes sont très peu abondantes dans la nature.

### I.3.1.1 Le Diamant :

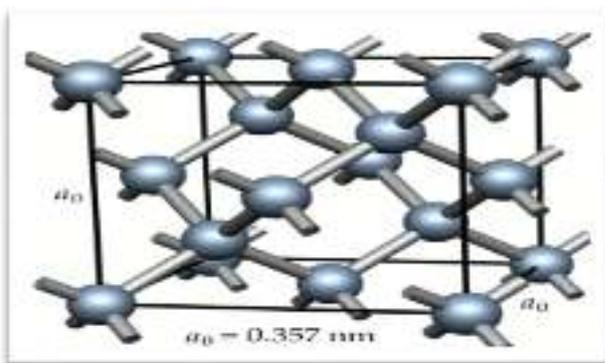
Le diamant est l'une des formes allotropiques du carbone. Il se forme dans des conditions de température et de pression très élevées, comme dans les profondeurs de la Terre. Le diamant est une substance cristalline transparente et très dure, qui est utilisée dans la joaillerie pour la fabrication de bijoux. Il est également utilisé dans l'industrie pour sa dureté et sa résistance à la chaleur et à l'usure.

Le diamant est constitué d'un réseau tridimensionnel d'atomes de carbone liés les uns aux autres par des liaisons covalentes très fortes. Chaque atome de carbone est lié à quatre autres atomes de carbone voisins, formant ainsi une structure en forme de tétraèdre. Cette structure en forme de tétraèdre confère au diamant une grande stabilité et une dureté exceptionnelle.

Le diamant se forme naturellement dans les profondeurs de la Terre, à des pressions et des températures très élevées, où les atomes de carbone peuvent se lier les uns aux autres pour former des cristaux de diamant. Ces cristaux remontent ensuite à la surface de la Terre à travers des cheminées volcaniques appelées kimberlites.

En plus des diamants naturels, il est possible de synthétiser des diamants artificiels en utilisant des techniques de haute pression et haute température, ou des méthodes de dépôt chimique en phase vapeur. Ces diamants artificiels ont des propriétés similaires aux diamants naturels et sont utilisés dans l'industrie pour leurs propriétés mécaniques exceptionnelles.

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



**Figure I-2** : Structure du diamant.

### I.3.1.2 Le graphite :

Le graphite est une forme allotropique du carbone qui se présente sous la forme d'un matériau cristallin gris-noir opaque. Il est composé d'une structure en couches de graphène (réseau plan constitué d'atomes de carbone agencés en pavage hexagonal). Les liaisons covalentes entre les atomes de carbone dans chaque couche sont fortes, mais les liaisons entre les couches sont faibles, permettant au graphite de se fissurer facilement. Le graphite est un excellent conducteur électrique et thermique en raison de sa structure en couches.

Le graphite est souvent utilisé comme matériau de lubrification en raison de sa faible friction, de sa résistance à l'usure et de sa capacité à résister à des températures élevées. Il est également utilisé dans les piles à combustible, les électrodes et les composants électroniques en raison de ses propriétés conductrices. Le graphite est également utilisé pour produire du carbone de haute pureté utilisé dans les industries de l'électronique et de l'aérospatiale.

En plus des applications industrielles, le graphite a également des utilisations artistiques. Il est souvent utilisé pour dessiner ou écrire avec des crayons à graphite et est également utilisé comme pigment dans les peintures et les encres.

A la pression atmosphérique et à température ambiante, le graphite représente la forme la plus courante de carbone et est thermodynamiquement la plus stable. Il est composé d'un empilement de feuillets de graphène reliés par des liaisons de type Van der Waals, formant un réseau hexagonal d'atomes de carbone espacés de 0,334 nm. La faiblesse de ces liaisons permet une facilité de feuilletage du graphite [Sandra Rizk 2009]. Tous les atomes de carbone sont hybridés  $sp^2$ , permettant une délocalisation des électrons  $\pi$  et favorisant la conduction électrique au sein du plan [Web 1].

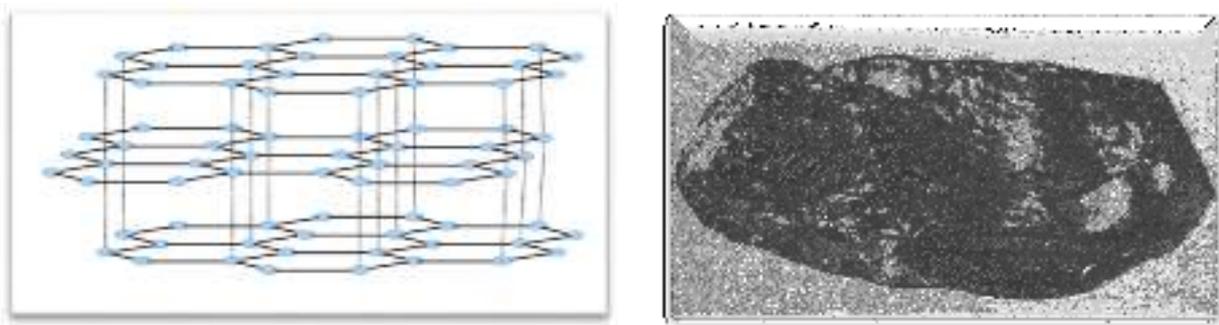


Figure I-3 : Structure du graphite.

### 1.3.1.3 Les fullerènes :

Les fullerènes sont des molécules de carbone découvertes en 1985 par les chercheurs Harold Kroto, Robert Curl et Richard Smalley. Ils ont reçu le prix Nobel de chimie en 1996 pour cette découverte. Les fullerènes sont des structures creuses en forme de sphère, de tube ou de cage, composées d'atomes de carbone reliés par des liaisons covalentes. Le plus simple des fullerènes est la molécule C<sub>60</sub>, qui ressemble à un ballon de football.

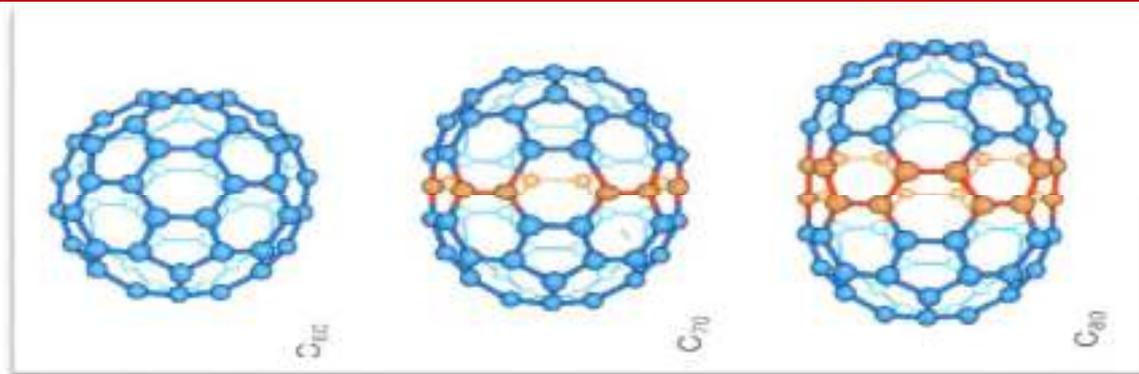
Les fullerènes ont des propriétés uniques qui les rendent très intéressants pour la recherche scientifique et les applications technologiques. Par exemple, ils peuvent être utilisés comme des nano cages pour piéger d'autres molécules, ce qui est utile pour la purification de l'eau ou la livraison de médicaments. Ils sont également des conducteurs électriques et thermiques efficaces, et peuvent être utilisés dans des dispositifs électroniques et des matériaux composites.

Les fullerènes peuvent être produits par des méthodes telles que l'arc électrique, l'évaporation laser et la pyrolyse laser. Ils peuvent également être trouvés naturellement dans des sources telles que la suie et les météorites. Depuis leur découverte, de nombreux autres types de fullerènes ont été synthétisés, tels que les nanotubes de carbone et les fullerènes endohédraux, qui contiennent des atomes encapsulés à l'intérieur de leur structure creuse.

Le graphite est composé de plans de graphène, qui sont des feuilles planes de carbone pavées d'hexagones et liées par des liaisons Van der Waals. Lorsque le nombre d'atomes de carbone est réduit, le nombre de liaisons pendantes sur les bords des plans de graphène devient important et la structure doit se refermer sur elle-même. Si le nombre d'atomes de carbone est inférieur à quelques centaines, des structures stables fermées appelées fullerènes peuvent être formées.

En 1985, les chercheurs H. Kroto et al ont réussi à isoler une forme majoritaire de fullerène constituée de 60 atomes de carbone, refermée sur elle-même comme une cage. Cette molécule a la forme et la symétrie d'un ballon de football, chaque atome de carbone étant situé à l'un des 60 sommets d'un polyèdre inscrit dans une sphère. Synthétisée par la méthode de l'arc électrique dans une cloche remplie d'hélium, cette molécule a ouvert de nombreuses perspectives de recherche et d'applications.

Le fullerène (C<sub>60</sub>) est composé de 12 pentagones et 20 hexagones, avec deux types de liaisons (C-C) : les liaisons 6-6 communes à deux hexagones et les liaisons 5-6 communes à un hexagone et un pentagone. En découpant le (C<sub>60</sub>) en deux parties égales et en ajoutant des atomes de carbone avant de refermer la structure, il est possible de construire le (C<sub>70</sub>) avec 25 hexagones et 12 pentagones, ainsi que le (C<sub>80</sub>) avec 30 hexagones et 12 pentagones.



**Figure I.4 :** Du C60 au C80 : les atomes ajoutés au C60 pour obtenir le C70 et le C80 sont représentés en rouge. [Marcoux 2002]

### I-3-2 Les autres types de carbone dans la nature :

Outre le diamant, le graphite et les fullerènes, il existe d'autres types de carbone dans la nature. Parmi ceux-ci, on peut citer les nanotubes de carbone, qui sont des structures cylindriques creuses constituées de feuillets de graphène enroulés. Les nanotubes de carbone ont des propriétés mécaniques et électroniques exceptionnelles, ce qui les rend très utiles dans de nombreuses applications telles que l'électronique, la médecine et les matériaux composites.

Il y a également le carbone amorphe, qui est une forme de carbone qui n'a pas de structure cristalline définie. Le carbone amorphe est présent dans des matériaux tels que le charbon, le noir de carbone et le carbone activé, et est utilisé dans des applications telles que la purification de l'eau, la production d'électrodes pour les batteries et la catalyse.

Enfin, il existe des formes de carbone créées artificiellement telles que les nanodiamants, les carbynes et les carbonates. Les nanodiamants sont des particules de diamant de taille nanométrique qui ont des propriétés uniques telles que la fluorescence et la biocompatibilité. Les carbynes sont des chaînes de carbone linéaires ou cycliques qui ont des propriétés électroniques et mécaniques intéressantes. Les carbonates, quant à eux, sont des composés formés de carbone, d'oxygène et d'autres éléments tels que le calcium et le magnésium, et sont présents dans des matériaux tels que les coquilles et les squelettes d'animaux marins.

Il existe d'autres types de carbone mal structurés, tels que le carbone amorphe. Il s'agit d'un réseau désordonné d'atomes de carbone présentant des états d'hybridation  $sp^2$  et  $sp^3$ . À l'état naturel, le carbone amorphe est rare. On le trouve dans les particules des couches extérieures de l'atmosphère des

étoiles froides, appelées poussières d'étoiles. De plus, il peut être synthétisé sous forme de couches minces par dépôt de plasma. Le carbone amorphe est souvent utilisé comme revêtement, offrant une résistance mécanique supplémentaire aux pièces industrielles. De plus, son caractère hydrophobe en fait un choix populaire pour les revêtements de protection.

On peut également rencontrer le carbone sous une forme partiellement organisée. Le désordre structural est créé par des défauts d'empilement des plans de graphène, ce qui éloigne la structure du graphite ordonné que nous avons vu précédemment. Cette structure désordonnée est appelée graphite turbostratique. Elle perd l'ordre orientationnel et augmente la distance entre les feuillets. Cependant, malgré son désordre, le graphite turbostratique conserve des propriétés intéressantes, telles que sa capacité à être utilisé comme matériau de friction et ses propriétés de lubrification.

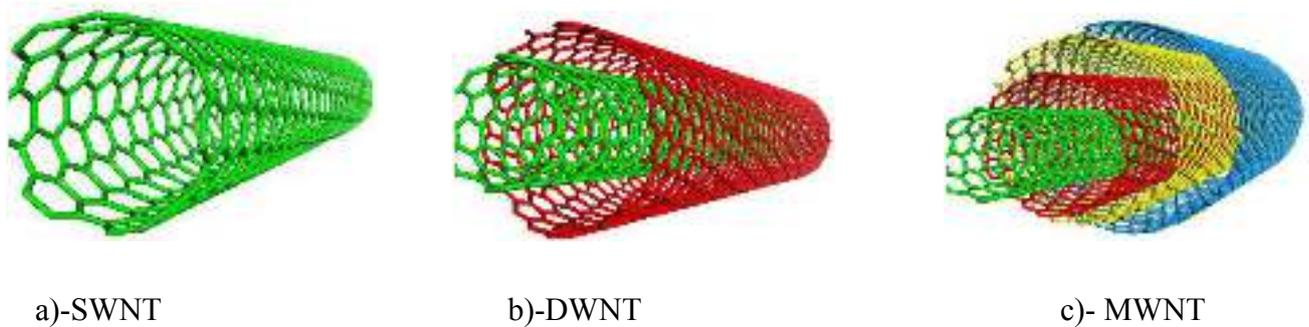
#### **I.4 Structure des nanotubes de carbone :**

Les nanotubes de carbone sont des structures tubulaires formées de feuillets de graphène enroulés en spirale. Ces feuillets de graphène sont constitués d'atomes de carbone disposés en hexagones réguliers, liés entre eux par des liaisons covalentes de type  $sp^2$ . Les nanotubes de carbone sont généralement classés en deux types: les nanotubes de carbone à simple paroi et les nanotubes de carbone à parois multiples.

Les nanotubes de carbone à simple paroi (SWCNTs) sont constitués d'un seul feuillet de graphène enroulé en spirale pour former un tube. Le diamètre de ces tubes est très petit, de l'ordre du nanomètre, tandis que leur longueur peut atteindre plusieurs microns. Les nanotubes de carbone à parois multiples (MWCNTs) sont des structures tubulaires formées par l'enroulement de plusieurs feuillets de graphène en spirale, formant ainsi plusieurs couches concentriques. Ces nanotubes ont un diamètre plus grand que les SWCNTs, allant de quelques nanomètres à plusieurs dizaines de nanomètres, mais ils sont également plus résistants et plus rigides.

La structure des nanotubes de carbone est très intéressante d'un point de vue physique et chimique. En effet, leur petite taille, leur forme tubulaire et leur grande surface spécifique leur confèrent des propriétés remarquables, telles que leur résistance mécanique, leur conductivité électrique et thermique élevées, ainsi que leur capacité à interagir avec des molécules ou des ions. Ces propriétés en font des matériaux très prometteurs pour de nombreuses applications, allant de l'électronique à la médecine en passant par la catalyse et les matériaux composites.

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



**Figure I-5 :** Représentation de la structure tubulaire creuse de :a) nanotube mono-paroi ; b) nanotube bi-parois et c) nanotube multi-parois.

On peut représenter le nanotube mono-feuillet comme une feuille de graphène enroulée sur elle-même. La structure de cette feuille de graphène est en forme de nid d'abeille, avec deux vecteurs directeurs  $a_1$  et  $a_2$ . Le vecteur de chiralité,  $Ch$ , correspond à l'axe selon lequel le graphène s'enroule pour former le nanotube. On peut décomposer ce vecteur en deux composantes selon les vecteurs  $a_1$  et  $a_2$ . En utilisant les scalaires  $m$  et  $n$ , trois types d'enroulements peuvent être décrits : si  $m = 0$ , le nanotube a une structure de type « zig-zag » ; si  $m = n$ , le nanotube a une structure de type « chaise » ; dans tous les autres cas, le nanotube est « chiral ». Les différentes chiralités des nanotubes de carbone présentent des propriétés différentes, notamment en termes de propriétés électriques. Par exemple, un nanotube de carbone de type « chaise » a un comportement électrique métallique, tandis que d'autres chiralités ont des comportements semi-conducteurs [Electronic, novembre 2004].

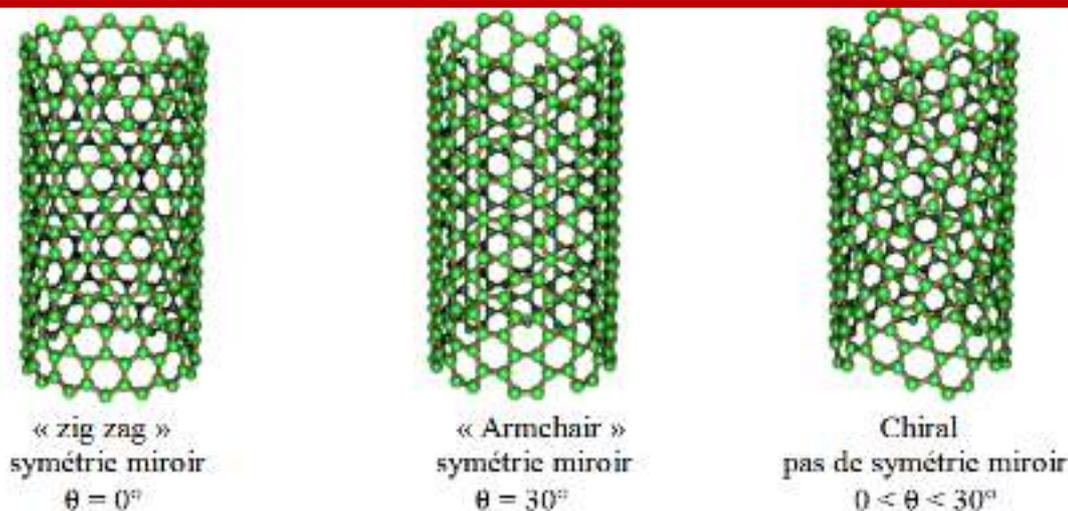


Figure I-6 : Représentation de la structure de nanotubes de carbone.

## I.5 Méthode de Synthèse de nanotubes :

Les nanotubes de carbone peuvent être synthétisés par plusieurs méthodes, parmi lesquelles on peut citer :

### I.5.1 -Méthode de l'arc électrique:

La méthode de l'arc électrique est une méthode de synthèse de nanotubes de carbone qui utilise un arc électrique entre deux électrodes de graphite dans une atmosphère contrôlée. Cette méthode a été développée par [Sumio Iijima en 1991]. Qui a découvert les nanotubes de carbone.

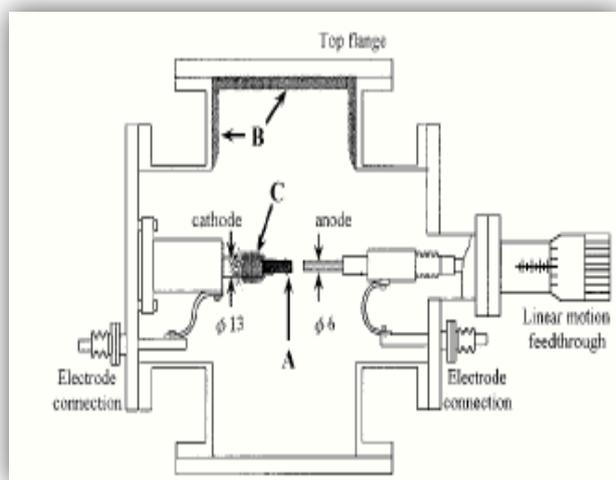
Dans cette méthode, une source de courant continu est utilisée pour générer un arc électrique entre deux électrodes de graphite. Lorsque l'arc est créé, une température très élevée est produite, ce qui

vaporise le graphite. Les atomes de carbone vaporisés se condensent ensuite pour former des nanotubes de carbone dans une atmosphère contrôlée, généralement de l'argon ou de l'hélium.

La méthode de l'arc électrique est considérée comme une méthode de synthèse simple et facile à mettre en œuvre. Cependant, elle présente quelques inconvénients, tels que la production de nanotubes de carbone contenant des impuretés, la faible pureté et le faible rendement de la production.

C'est pourquoi cette méthode est principalement utilisée pour la production de petits lots de nanotubes de carbone de haute qualité à des fins de recherche. Elle est également utilisée dans certaines applications industrielles où des nanotubes de carbone de haute qualité sont nécessaires, comme les applications en électronique et en optique.

La méthode de l'arc électrique a été la première méthode historique qui a permis la synthèse des nanotubes de carbone. Le principe de cette méthode est de créer une différence de potentiel d'environ 20 volts entre deux électrodes de graphite, séparées d'environ 1mm. L'arc électrique qui se produit entre les deux électrodes (d'une intensité de 1 à 100 ampères) permet d'élever localement la température à des milliers de degrés Celsius ( $>3000^{\circ}\text{C}$ ), ce qui vaporise le graphite au niveau de l'anode. Le graphite vaporisé se condense ensuite sur la cathode et sur les parois du réacteur. Cette synthèse peut être effectuée en atmosphère inerte (Argon, Hélium) ou réactive (Hydrogène, Azote) sous vide primaire (quelques centaines de millitorrs).



**Figure I- 7:** schéma de la synthèse des CNTs par décharge arc électrique

En utilisant des électrodes en graphite pur, seuls des nanotubes de carbone multi-parois (MWNT) peuvent être obtenus, comme cela a été démontré par Iijima en 1991. Cependant, pour la synthèse de nanotubes de carbone mono-parois (SWNT), il est nécessaire d'utiliser des électrodes contenant quelques pour-cent d'un métal catalytique. Ces métaux peuvent être des métaux de transition tels que le fer, le cobalt ou le nickel, des terres rares comme le gadolinium, le lanthane ou le cérium, ou encore des éléments appartenant au groupe du platine, comme le rhodium ou le platine. Cependant, les meilleurs rendements, supérieurs à 70% et compatibles avec une production de masse, ont été obtenus en utilisant des alliages de nickel et d'yttrium, ainsi que de platine et de ruthénium. [Boumia, 2017].

### **I. 5.2- Méthode d'ablation laser:**

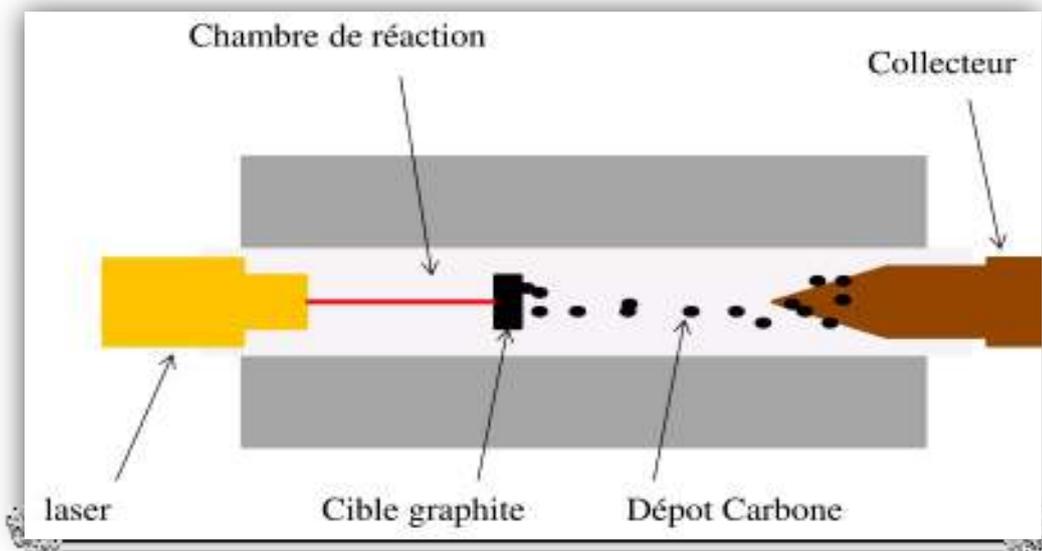
La méthode d'ablation laser est une technique de synthèse des nanotubes de carbone qui consiste à vaporiser un matériau à l'aide d'un faisceau laser pulsé. Le matériau cible est placé dans une enceinte à haute pression et sous une atmosphère contrôlée, généralement de l'hélium ou de l'argon. Le faisceau laser est concentré sur la surface de la cible, ce qui produit une ablation (éjection) de matière à haute température et haute pression. Cette ablation génère un plasma qui se refroidit rapidement en formant des particules de carbone, y compris des nanotubes.

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de contrôler précisément la taille et la composition des nanotubes en modifiant les paramètres du laser et de l'atmosphère. En outre, elle offre une grande flexibilité pour la synthèse de nanotubes de différents types, tels que les nanotubes à paroi simple ou multiple, les nanotubes chiraux ou non-chiraux, et les nanotubes dopés ou non dopés.

Cependant, cette méthode présente également des inconvénients tels que la faible efficacité de production et le coût élevé des équipements laser nécessaires. En outre, elle peut également générer des impuretés dans les nanotubes en raison de la réaction du matériau cible avec l'atmosphère réactive utilisée.

Cette méthode est particulièrement adaptée pour la production de nanotubes de carbone de haute qualité, notamment des nanotubes de carbone monofeuillet et à paroi multiple. Les avantages de cette méthode sont sa rapidité, sa simplicité et sa reproductibilité. Elle permet également une bonne maîtrise de la taille et de la forme des nanotubes de carbone produits. Cependant, cette méthode est relativement coûteuse et nécessite une grande quantité d'énergie pour fonctionner. L'ablation par laser est un procédé de synthèse utilisant des lasers ayant une Puissance variant entre 4.2 kW et 1 MW. On utilise les lasers du type IR, CO<sub>2</sub>, UV ou encore ArF pouvant fonctionner de manière pulsée ou continue. Ils peuvent être couplés et ainsi élever la température effectuant la pyrolyse. En effet, le substrat et le mélange gazeux d'hydro carbone sont chauffés simultanément par le laser et

réagissent pour former la déposition sur le substrat. Les gaz utilisés sont le plus souvent le méthane ( $\text{CH}_4$ ) et l'acétylène ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ). La température du substrat (par ex. Si, Inox ou Al) avoisine les  $500^\circ\text{C}$ . Cette méthode permet de produire des couches de diamant mais aussi de CNT à une seule couche. Ce procédé permet de découvrir et d'observer pour la première fois les fullerènes en, or, depuis, cette technique s'est révélée très généreuse dans la synthèse de nanotubes fortement graphitisés et à une seule paroi. [C. Emmenger, 2002]



**Figure I-8:** Schéma de principe du procédé de synthèse par ablation laser.

### I. 5.3: Méthode de Synthèse par dépôt chimique en phase vapeur(CVD):

La méthode de synthèse par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) est largement utilisée pour produire des nanotubes de carbone de haute qualité. Cette méthode consiste à faire réagir des gaz précurseurs contenant du carbone, tels que le méthane, l'éthane ou l'acétylène, avec un catalyseur métallique, tel que le fer, le cobalt ou le nickel, à des températures élevées ( $600\text{-}1000^\circ\text{C}$ ) dans une chambre de réaction sous vide ou sous une atmosphère contrôlée.

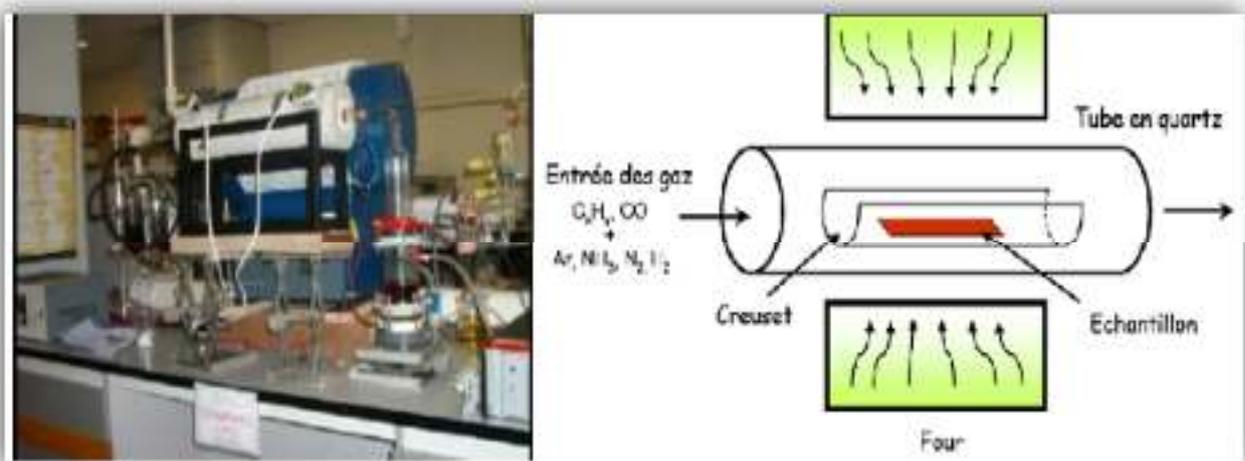
Le catalyseur métallique est déposé sur un substrat, généralement en silicium, en utilisant une technique de dépôt physique, telle que l'évaporation ou la pulvérisation cathodique. Le gaz précurseur est ensuite introduit dans la chambre de réaction, où il se décompose et se dissocie en carbone atomique. Ces atomes de carbone se condensent ensuite sur le catalyseur métallique pour former des nanotubes de carbone.

Les paramètres de synthèse, tels que la température, la pression, le temps de réaction, la composition du gaz précurseur et la taille des particules de catalyseur, sont cruciaux pour contrôler la croissance et

la qualité des nanotubes de carbone obtenus. La méthode CVD est très efficace pour produire des nanotubes de carbone de haute qualité en grande quantité, et elle est souvent utilisée pour la production industrielle de nanotubes de carbone.

Actuellement, les méthodes de synthèse les plus couramment utilisées pour produire des nanotubes de carbone sont les procédés de dépôt chimique en phase vapeur catalysé (C-CVD ou CVD). Ces méthodes sont économiques et offrent une grande variété d'applications [M. Perezcabero, 2003]. De plus, elles permettent de faire pousser des nanotubes de carbone sur des supports de toutes formes, car la réaction se produit à la surface des particules catalytiques [R. Brukh and S. Mitra. 2006]. Le principe de ces méthodes consiste en la décomposition d'un gaz carboné à la surface d'une particule de catalyseur, produisant ainsi des nanotubes de carbone [N. Zhao, 2006]. On peut distinguer deux grandes familles de techniques CVD : la CVD thermique et la CVD assistée par plasma [M. R. Maschmann, 2006].

La CVD thermique est particulièrement intéressante dans notre cas, car elle permet de faire croître des nanotubes de carbone sur des supports complexes tels que les diatomées. Cependant, cette méthode nécessite une préparation préalable des particules (ou des films) pour assurer la catalyse de la croissance des nanotubes.



**Figure I-9:** Schéma d'un réacteur CVD pour la croissance des(NTC)[Gohier 2007]

#### I. 5.4 Méthode décomposition catalytique HiPCO :

La méthode HiPCO (High-Pressure Carbon Monoxide) est une méthode de synthèse de nanotubes de carbone qui utilise une décomposition catalytique de gaz carbonique à haute pression. Cette méthode a été développée dans les années 1990 par Smalley et ses collègues à la Rice University.

Dans cette méthode, un gaz carbonique hautement purifié est introduit dans un réacteur à haute pression contenant une source de catalyseur, généralement du fer ou du cobalt, à une température de 1000 à 1200°C. La décomposition du gaz carbonique génère des nanoparticules de fer ou de cobalt qui agissent comme des centres de croissance pour les nanotubes de carbone. Les nanotubes croissent ensuite à partir de ces centres de croissance en présence de vapeur de carbone qui est introduite dans le réacteur .

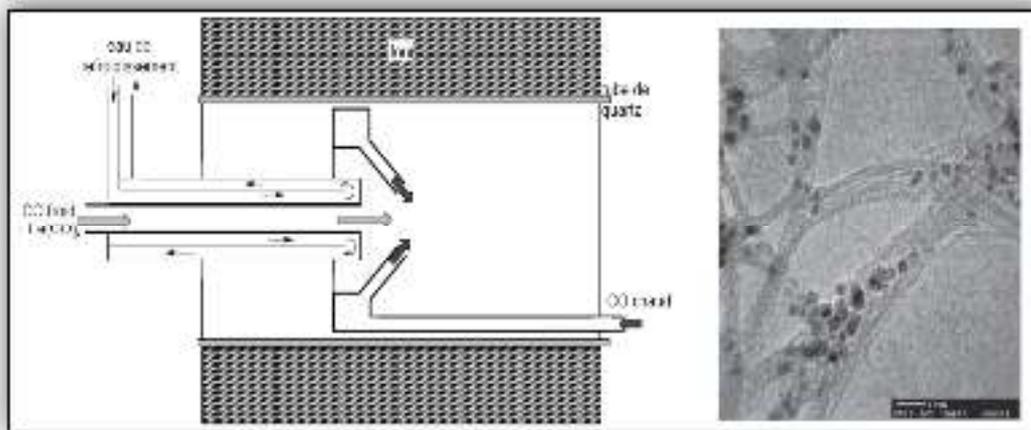
La méthode HiPCO est connue pour produire des nanotubes de carbone de haute qualité avec un diamètre étroit, une longueur élevée et un faible taux de défauts structurels. Les nanotubes produits ont également une grande pureté, avec peu de contaminants tels que les fullerènes ou les nanotubes de carbone amorphes [S. Kumar and S. Goyal, 2017].

Cependant, la méthode HiPCO est également connue pour être coûteuse et difficile à mettre en œuvre à grande échelle, ce qui limite son utilisation industrielle.

Le procédé HiPCO (High-Pressure CO Decomposition) a été développé par le groupe de R. Smalley et appartient à la famille des procédés de décomposition catalytique à moyenne température. Il consiste à introduire en continu un mélange de penta carbonyle de fer ( $\text{Fe}(\text{CO})_5$ ) et de monoxyde de carbone (CO) sous une pression de 10 atm dans une enceinte chauffée à 1200°C. Ce qui rend ce procédé original est que le catalyseur nécessaire à la croissance des nanotubes mono-feuillets est formé in situ par la décomposition du gaz précurseur. De plus, le monoxyde de carbone utilisé comme source de carbone ne se pyrolyse pas à cette température, permettant d'obtenir des nanotubes de carbone mono-feuillets exempts d'impureté graphitique.

Bien que les nanotubes obtenus par cette technique présentent une large distribution de longueurs, ils sont assez originaux et permettent la synthèse à grande échelle de nanotubes mono-feuillets. Cette technique est à flux continu, ce qui facilite leur industrialisation, et une société commerciale propose des nanotubes synthétisés par cette méthode. Toutefois, les nanotubes obtenus contiennent beaucoup de catalyseur résiduel.

Un avantage de cette méthode est la possibilité d'obtenir des nanotubes de petit diamètre moyen (environ 0,7 nm), ce qui est bénéfique pour leurs propriétés optiques, car cela ramène la bande interdite des nanotubes semi-conducteurs vers des régions spectrales où les détecteurs sont les plus sensibles [Bessegghire, 2011].



**Figure I-10:** à gauche : Schéma du Production de nanotubes par méthode HiPCO [Marcoux2002]. A droite: Image TEM de nanotubes (HiPCO). [Nikolaev 1999]

Il existe d'autres méthodes de synthèse de nanotubes de carbone tel que:

#### **1.5.5 Méthode de croissance en lit fluidisé (Fluidized Bed Growth) :**

Cette méthode utilise une réaction de décomposition thermique d'un gaz carboné à haute température en présence d'un catalyseur métallique supporté sur un support solide. Les nanotubes de carbone se forment directement sur le support et peuvent être récupérés facilement.

#### **1.5.6 Méthode de croissance par décharge électrique (Electrical Discharge Growth) :**

Cette méthode utilise une décharge électrique à haute tension pour vaporiser des électrodes de graphite dans une atmosphère de gaz inerte. Les nanotubes de carbone se forment par la suite sur les électrodes vaporisées.

#### **1.5.7 Méthode de croissance par plasma (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition ou PECVD) :**

Cette méthode utilise un plasma à basse pression pour décomposer un gaz carboné et former des nanotubes de carbone sur un substrat métallique. Cette méthode est similaire à la CVD assistée par plasma, mais utilise un substrat métallique au lieu d'une électrode.

#### **1.5.8 Méthode de croissance par flamme (Flame Synthesis) :**

Cette méthode utilise une flamme pour décomposer un gaz carboné et former des nanotubes de carbone. La température élevée de la flamme permet une croissance rapide des nanotubes de carbone, mais la qualité et la pureté des nanotubes obtenus peut être affectée par les conditions de la flamme.

### **I.5.9 Méthode de croissance par réduction catalytique (Catalytic Reduction Growth)**

: Cette méthode utilise une réaction de réduction catalytique pour former des nanotubes de carbone à partir d'un précurseur organique et d'un catalyseur métallique. Cette méthode est souvent utilisée pour la synthèse de nanotubes de carbone à parois multiples.

## **I.6 propriétés des nanotubes de carbone :**

### **I.6.1-Propriétés mécaniques :**

Les nanotubes de carbone présentent des propriétés mécaniques exceptionnelles en raison de leur structure cristalline et de leur fort rapport surface/volume. Ils ont une résistance à la traction extrêmement élevée, plusieurs fois supérieure à celle de l'acier, tout en étant très légers. De plus, ils sont très rigides et ont une résilience importante, c'est-à-dire qu'ils peuvent subir des déformations importantes sans se briser.

Les nanotubes de carbone ont également une grande ductilité, ce qui signifie qu'ils peuvent être étirés sans se rompre, ainsi qu'une grande élasticité, qui leur permet de reprendre leur forme initiale après une déformation.

Ces propriétés mécaniques exceptionnelles font des nanotubes de carbone un matériau prometteur pour des applications telles que la fabrication de matériaux composites à haute résistance, de matériaux anti-balles, de nanocâbles, de membranes de filtration, de capteurs de pression, de dispositifs de stockage d'énergie et de dispositifs de conversion d'énergie.

Cependant, l'utilisation des nanotubes de carbone en tant que matériau structural doit encore faire face à certains défis, tels que la difficulté de produire des nanotubes de carbone de longueurs homogènes, la dispersion des nanotubes dans les matériaux composites et la résistance à l'interface nanotube/matrice.

Les nanotubes de carbone présentent des propriétés mécaniques exceptionnelles en raison de la force des liaisons C—C dans le graphite. L'énergie nécessaire pour dissocier cette liaison est très élevée, estimée à 348 KJ/mol. Les liaisons entre les atomes dans les nanotubes de carbone sont donc très fortes, ce qui a conduit à de nombreux calculs théoriques donnant une valeur pour le module d'Young proche de celui du diamant. Les premières valeurs expérimentales du module d'Young ont été estimées sur des nanotubes multicouches isolés en mesurant leurs vibrations intrinsèques thermiques par microscopie électronique. Les travaux théoriques ont également montré que la

valeur du module d'Young pour une feuille de graphène était très élevée, atteignant environ 1 TPa selon les recherches menées par Jakobson et son équipe. En outre, les nanotubes de carbone ont montré une grande flexibilité, pouvant être soumis à des contraintes importantes sans subir de déformation plastique. Par conséquent, ils peuvent facilement se courber ou se tordre selon leur axe. [Rizk, 2009].

### I.6.2 Les propriétés électroniques :

Les propriétés électroniques des nanotubes de carbone sont également remarquables. En effet, ces structures possèdent des propriétés semi-conductrices ou conductrices, qui dépendent de leur structure et de leur chiralité. Les nanotubes de carbone peuvent ainsi être classés en deux catégories : les nanotubes métalliques, qui ont une conductivité électrique élevée et sont donc de bons conducteurs, et les nanotubes semi-conducteurs, qui ont une bande interdite plus importante et peuvent donc être utilisés comme des semi-conducteurs.

La chiralité des nanotubes de carbone influe également sur leurs propriétés électroniques. En effet, les nanotubes chiraux présentent une structure hélicoïdale, avec des atomes de carbone disposés en un motif en spirale. Cette structure peut donner lieu à une bande interdite de taille variable en fonction de la chiralité du nanotube. Ainsi, des nanotubes chiraux spécifiques peuvent être sélectionnés pour leurs propriétés électroniques, en fonction de leur utilisation potentielle.

Enfin, les nanotubes de carbone présentent également des propriétés optiques intéressantes, en raison de leur structure tubulaire. Les nanotubes de carbone ont un comportement d'absorption de la lumière qui dépend de leur diamètre et de leur chiralité, ce qui peut avoir des applications en optique et en photonique.

Les nanotubes de carbone possèdent des propriétés électroniques qui varient en fonction de leur angle de chiralité et de leur diamètre. Cette variation confère aux nanotubes un caractère semi-conducteur ou métallique. Les nanotubes de configuration "armchair" sont tous métalliques, tandis que les nanotubes de types "zigzag" ou "chiraux" peuvent être soit semi-conducteurs soit métalliques. De plus, chaque feuillet des nanotubes multi-feuillets peut présenter des propriétés électriques différentes, soit semi-conductrices soit métalliques. Les nanotubes de carbone présentent un grand potentiel dans le domaine de la microélectronique car ils peuvent transporter des densités de courant très élevées, pouvant atteindre  $10^9$  A/cm<sup>2</sup>, soit 100 fois supérieures à celles transportées par les métaux couramment utilisés comme le cuivre ou l'argent [Bortolamiol 2015].

### I.6.3 Propriétés optiques :

Les nanotubes de carbone ont des propriétés optiques remarquables, qui dépendent à nouveau de leur chiralité et de leur diamètre. Ils peuvent absorber et émettre de la lumière dans un large spectre allant de l'infrarouge jusqu'à l'ultraviolet. Les nanotubes de petit diamètre ont une bande interdite plus large et donc une fluorescence à plus haute énergie, tandis que les nanotubes de grand diamètre ont une bande interdite plus étroite et une fluorescence à plus basse énergie. Cette propriété est importante pour les applications en nanophotonique, tels que les diodes électroluminescentes organiques et les cellules solaires, où les nanotubes de petit diamètre sont préférables en raison de leur bande interdite plus large et donc d'une plus grande efficacité de conversion d'énergie [Rao et al. 2018].

Les nanotubes de carbone présentent des propriétés optiques remarquables, telles que la limitation optique dans une large gamme de longueurs d'onde allant du visible au proche infrarouge, des seuils faibles de non-linéarité et de grandes densités optiques obtenues lors de l'étude de dispersions aqueuses de nanotubes monocouches. De plus, la photo-physique montre que les nanotubes ont le potentiel de devenir une nouvelle famille de détecteurs infrarouges, car ils se comportent comme un semi-conducteur à gap direct, avec une valeur typique comprise entre 0,1 eV et 1 eV, qui varie en fonction de leur diamètre, de leur géométrie spatiale ou de leur composition. Par conséquent, les nanotubes présentent des propriétés d'absorption remarquables dans le spectre infrarouge. [Rizk, 2009].

### I.6.4 propriétés thermiques :

Les nanotubes de carbone présentent également des propriétés thermiques exceptionnelles. En effet, en raison de leur structure en feuillet de graphène, qui offre une grande surface, les nanotubes de carbone ont une conductivité thermique très élevée, pouvant atteindre jusqu'à 3500 W/mK, soit environ deux fois supérieure à celle du diamant. De plus, ils ont une capacité de dissipation de chaleur très élevée, qui en fait des candidats potentiels pour le refroidissement électronique dans les dispositifs à haute puissance. Enfin, les nanotubes de carbone ont une température de fusion très élevée, qui peut atteindre 4800 K, soit plus de trois fois la température de fusion du fer. Ces propriétés thermiques exceptionnelles font des nanotubes de carbone des matériaux prometteurs pour une large gamme d'applications dans les domaines de l'électronique, de l'aérospatiale, de l'énergie et de la médecine.

La conductivité thermique du plan de graphène est comparable à celle du diamant (environ 103 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> à 300°K). Grâce à leur structure particulière, les nanotubes de carbone devraient

également avoir une conductivité thermique élevée le long de leur axe. Cependant, la mesure de cette conductivité est complexe et peu d'études expérimentales ont été menées. Certaines de ces études ont permis de mesurer la conductivité thermique de nanotubes multifeuilletés, qui est élevée (entre 600 et 2000 W.m-1.K-1), mais significativement inférieure à celle du graphite [B. Lakhdar, 2017].

Il existe d'autres propriétés des nanotubes de carbone incluent :

**1.6.5 Stabilité chimique élevée :** Les nanotubes de carbone ont une grande résistance à la corrosion et à l'oxydation, ce qui les rend utiles dans diverses applications, telles que les catalyseurs et les matériaux composites.

**1.6.6 Grande surface spécifique :** Les nanotubes de carbone ont une surface spécifique très élevée, ce qui les rend utiles dans des applications telles que la catalyse et l'adsorption de gaz.

**1.6.7 Propriétés magnétiques :** Les nanotubes de carbone peuvent présenter des propriétés magnétiques, soit intrinsèques, soit par dopage avec des ions magnétiques tels que le fer.

**1.6.8 Capacité de stockage :** Les nanotubes de carbone ont une capacité de stockage d'hydrogène et d'autres gaz supérieure à celle des autres matériaux, ce qui les rend utiles dans les piles à combustible et les réservoirs de gaz.

**1.6.9 Potentiel pour les applications biomédicales :** Les nanotubes de carbone présentent des propriétés intéressantes pour les applications biomédicales, telles que la délivrance de médicaments, la bio-imagerie et la régénération tissulaire.

## **1.7 Applications des nanotubes de carbone:**

Les nanotubes de carbone ont de nombreuses applications potentielles dans divers domaines tels que la microélectronique, la mécanique, la médecine, l'énergie et les matériaux composites. Voici quelques exemples d'applications :

**Microélectronique :** les nanotubes de carbone peuvent être utilisés comme des composants électroniques tels que des transistors, des diodes et des capteurs en raison de leurs propriétés électriques exceptionnelles, telles que leur haute conductivité et leur grande densité de courant. Ils pourraient également être utilisés comme des fils de connexion dans les dispositifs microélectroniques.

**Mécanique** : les propriétés mécaniques des nanotubes de carbone, telles que leur résistance et leur légèreté, en font des candidats idéaux pour les matériaux composites renforcés. Ils pourraient également être utilisés dans les roulements à haute performance et les ressorts.

**Médecine** : les nanotubes de carbone présentent des propriétés uniques en raison de leur petite taille, de leur grande surface spécifique et de leur biocompatibilité potentielle. Ils pourraient être utilisés comme vecteurs de médicaments pour une libération ciblée, des agents d'imagerie pour le diagnostic et des électrodes pour la stimulation nerveuse.

**Énergie** : les nanotubes de carbone pourraient être utilisés dans des dispositifs de stockage d'énergie tels que les batteries et les super condensateurs en raison de leur grande surface spécifique et de leur haute conductivité électrique. Ils pourraient également être utilisés comme des catalyseurs pour des réactions d'oxydation et de réduction dans les piles à combustible.

**Matériaux composites** : les nanotubes de carbone peuvent être incorporés dans des matériaux composites pour renforcer leurs propriétés mécaniques. Ils peuvent également être utilisés comme des additifs pour améliorer les propriétés thermiques et électriques des composites. Les composites à base de nanotubes de carbone sont largement étudiés pour des applications dans l'aérospatiale, les sports et l'industrie automobile.

Cependant, malgré leurs nombreuses propriétés et applications potentielles, les nanotubes de carbone présentent également des défis tels que leur coût de production élevé, leur dispersion difficile dans les solvants et leur toxicité potentielle pour la santé.

-Dans le domaine du génie civil et des grands ouvrages, l'amélioration de la sûreté passe par le renforcement des matériaux de construction. Une des réalisations exceptionnelles touche le secteur des matériaux cimentaires. Un nouveau procédé basé sur les nanotechnologies permet le remplacement de la fumée de silice, une ressource peu accessible employée dans les bétons haute performance. [Tegrara 2017].

Les nanotubes de carbone ont des applications prometteuses dans le domaine du génie civil et des grands ouvrages, en particulier en raison de leur résistance mécanique exceptionnelle. Ils peuvent être utilisés pour renforcer les matériaux de construction, améliorant ainsi leur résistance et leur durabilité. Par exemple, les nanotubes de carbone peuvent être ajoutés au béton pour renforcer sa résistance mécanique, réduire les fissures et améliorer sa durabilité.

Les nanotubes de carbone peuvent également être utilisés dans la fabrication de matériaux composites avancés pour les structures de ponts, les avions et les satellites. Ces matériaux composites offrent une résistance et une légèreté supérieures par rapport aux matériaux traditionnels, ce qui peut améliorer les performances et l'efficacité énergétique des structures.

En outre, les nanotubes de carbone peuvent être utilisés dans les capteurs de contrainte et les capteurs de pression pour mesurer les charges dans les ponts et les structures de génie civil. Les nanotubes de carbone présentent également des propriétés de détection de gaz, ce qui les rend utiles pour la détection de gaz toxiques dans les bâtiments ou les sites industriels.

Les nanotubes de carbone sont idéaux pour être utilisés comme fibres de renfort dans les matériaux composites en raison de leur forte résistance à la traction et leur rapport longueur/diamètre élevé. De plus, ils peuvent être coulés à travers les équipements classiques de mise en forme de matériaux complexes.

Les nanotubes de carbone peuvent être utilisés pour améliorer considérablement les propriétés électriques des polymères. Un taux de charges inférieur à 5% en masse suffit à rendre un polymère conducteur. Des études ont montré que l'incorporation de 5% de nanotubes de carbone dans des films de polyéthylène améliore significativement leur conductivité électrique.

Les nanotubes de carbone peuvent être utilisés pour augmenter la conductivité thermique de composites à fibres discontinues, tout en bénéficiant de leurs propriétés mécaniques.

Dans le domaine militaire, les nanotubes de carbone peuvent être utilisés dans la construction de canons électriques.

Dans un domaine futuriste, les nanotubes de carbone pourraient être utilisés pour la construction d'un ascenseur spatial.

Dans le domaine environnemental, les nanotubes de carbone peuvent être utilisés dans la filtration de l'eau, l'absorption de polluants pour la bioremédiation, ainsi que dans la conception de capteurs chimiques.

Les nanotubes de carbone peuvent également être utilisés pour améliorer les propriétés élastiques du polyéthylène, avec une augmentation allant jusqu'à 30%.

Enfin, les nanotubes de carbone peuvent être utilisés dans la production d'isolants thermiques avancés pour les grandes structures, comme les gratte-ciel ou les ponts, pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les pertes de chaleur.

## I.8 les défauts des nanotubes :

Les nanotubes de carbone, comme tout matériau, peuvent présenter des défauts. Les défauts des nanotubes peuvent être de deux types : structurels et chimiques.

Les défauts structurels incluent des imperfections dans la structure cristalline du nanotube, telles que des distorsions ou des déformations de l'axe du tube, des défauts de liaison (tels que des défauts Stone-Wales), des sites de lacunes, des défauts d'empilement (tels que les défauts de Van der Waals) et des hélices torsadées.

Les défauts chimiques incluent des sites de fonctionnalisation, où des groupes chimiques sont attachés à la surface des nanotubes, ainsi que des impuretés dans le matériau. Les impuretés peuvent être introduites pendant la synthèse des nanotubes ou pendant le traitement post-synthèse, et peuvent inclure des métaux, des oxydes et d'autres substances.

Ces défauts peuvent avoir un impact sur les propriétés des nanotubes. Par exemple, les défauts structurels peuvent affecter la conductivité électronique et thermique, ainsi que la résistance mécanique. Les défauts chimiques peuvent avoir un effet sur la réactivité des nanotubes et leur capacité à se lier à d'autres molécules.

Cependant, il convient de noter que les défauts des nanotubes peuvent également offrir des opportunités pour de nouvelles applications. Par exemple, les sites de fonctionnalisation peuvent être utilisés pour attacher des molécules à la surface des nanotubes, ou pour modifier leurs propriétés de surface. Les défauts structurels peuvent également offrir des propriétés intéressantes, telles qu'une conductivité électronique réduite qui peut être utilisée pour la création de dispositifs électroniques à faible consommation d'énergie.

## I.9 Les raisons de l'intérêt croissant pour les nanotubes de carbone dans la recherche et l'industrie :

L'intérêt croissant pour les nanotubes de carbone dans la recherche et l'industrie peut s'expliquer par plusieurs raisons :

**I.9.1 Les propriétés uniques des nanotubes de carbone :** Les nanotubes de carbone présentent des propriétés uniques qui les rendent intéressants pour de nombreuses applications, telles que leur grande résistance mécanique, leur conductivité électrique élevée, leur conductivité thermique élevée, leur légèreté et leur résistance à la corrosion.

---

### I.9.2 Les avancées dans la synthèse et la purification des nanotubes de carbone :

Les avancées dans la synthèse et la purification des nanotubes de carbone ont permis de produire des nanotubes de carbone de haute qualité à grande échelle, ce qui a stimulé leur utilisation dans de nombreuses applications industrielles.

**I.9.3 La diversité des applications possibles :** Les nanotubes de carbone peuvent être utilisés dans de nombreuses applications, allant de l'électronique à la médecine en passant par l'aérospatiale et le génie civil, ce qui en fait un matériau très polyvalent.

**I.9.4 Le potentiel commercial des nanotubes de carbone :** Les nanotubes de carbone ont un potentiel commercial élevé en raison de leur large gamme d'applications et de leurs propriétés uniques, ce qui en fait un matériau attrayant pour les investisseurs et les fabricants.

**I.9.5 Les préoccupations environnementales croissantes :** Les nanotubes de carbone sont considérés comme un matériau plus écologique que les matériaux traditionnels en raison de leur durabilité et de leur recyclabilité potentielle, ce qui en fait un choix attrayant pour les entreprises soucieuses de l'environnement.

### I.10 Les inconvénients des nanotubes de carbone :

Les inconvénients des nanotubes de carbone comprennent notamment :

**Toxicité :** Des études ont montré que les nanotubes de carbone peuvent causer des problèmes de santé, tels que des lésions pulmonaires, lorsqu'ils sont inhalés. Il est donc important de prendre des précautions lors de leur manipulation.

**Coût élevé :** Les nanotubes de carbone sont actuellement plus coûteux à produire que les matériaux traditionnels, en raison des coûts élevés de fabrication et de purification.

**Difficulté de production à grande échelle :** La production de nanotubes de carbone à grande échelle est encore difficile et coûteuse. Les méthodes actuelles de production ne sont pas suffisamment efficaces pour répondre à la demande industrielle.

**Problèmes de dispersion :** Les nanotubes de carbone ont tendance à s'agréger, ce qui peut réduire leur efficacité dans certaines applications.

**Défauts structurels :** Les nanotubes de carbone peuvent présenter des défauts structurels qui peuvent affecter leurs propriétés mécaniques et électroniques. Il est important de les caractériser et de les contrôler lors de leur production.

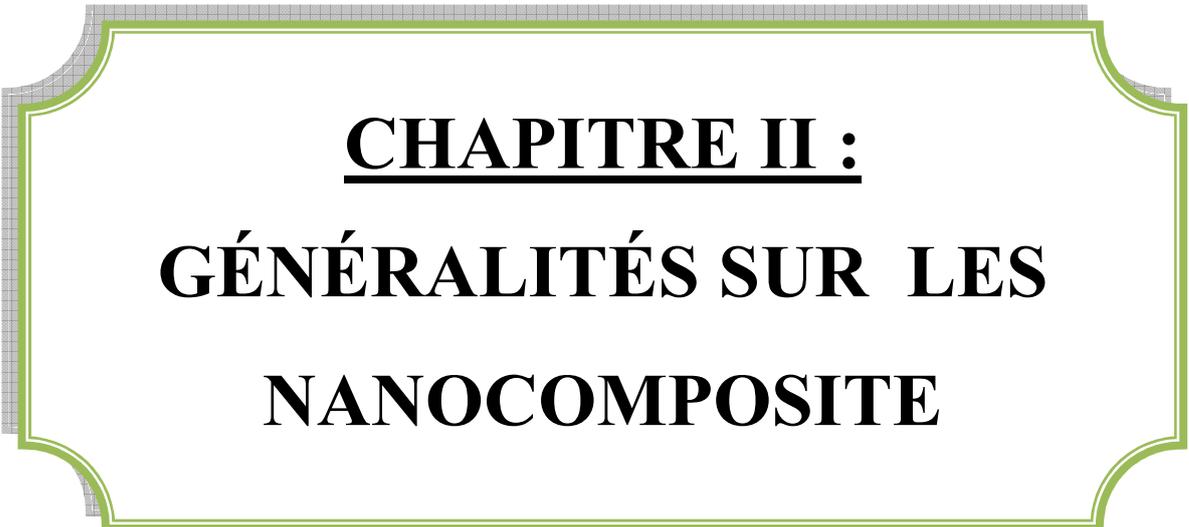
### I.11 Conclusion :

Ce chapitre, nous a permis de constituer une recherche bibliographique sur les nanotubes de carbone et de montrer leur importance. Les nanotubes de carbone sont des matériaux fascinants avec des propriétés exceptionnelles qui ont suscité un intérêt considérable dans la recherche et l'industrie. Bien qu'il reste des défis à relever, les avancées récentes dans la synthèse, la fonctionnalisation et la caractérisation des nanotubes ouvrent la voie à de nombreuses applications prometteuses dans des domaines tels que les matériaux composites, l'électronique, la médecine et l'énergie. De plus, la capacité des nanotubes à être fonctionnalisés avec une grande précision offre de nouvelles perspectives pour la conception de matériaux sur mesure avec des propriétés spécifiques. Il est clair que les nanotubes de carbone ont le potentiel de révolutionner de nombreux secteurs de l'industrie et de la technologie dans un avenir proche. Cependant, pour réaliser pleinement leur potentiel, il est nécessaire de poursuivre les recherches pour améliorer les méthodes de production, réduire les coûts et assurer une manipulation sûre des nanotubes de carbone à grande échelle.

En conclusion, les nanotubes de carbone présentent des avantages significatifs en tant que matériau d'ingénierie, notamment leur résistance mécanique exceptionnelle, leur conductivité électrique et thermique élevée et leur légèreté. Ils sont également très polyvalents et peuvent être utilisés dans une large gamme d'applications, notamment dans l'aérospatiale, l'industrie automobile, la médecine et la filtration de l'eau.

Cependant, malgré leur potentiel, il y a encore des défis importants à surmonter dans leur production à grande échelle, leur manipulation et leur caractérisation. En outre, les préoccupations environnementales liées à leur fabrication et à leur élimination doivent également être prises en compte.

Malgré ces défis, l'intérêt croissant pour les nanotubes de carbone dans la recherche et l'industrie montre qu'ils ont le potentiel de révolutionner de nombreux domaines et de conduire à des avancées significatives dans les années à venir.



**CHAPITRE II :**  
**GÉNÉRALITÉS SUR LES**  
**NANOCOMPOSITE**

## II.1 introduction :

Les nano composites sont des matériaux composites qui contiennent des nanoparticules dans une matrice de base. Les nanoparticules peuvent être des matériaux inorganiques tels que des oxydes, des métaux ou des matériaux organiques tels que des polymères. L'ajout de nanoparticules à la matrice de base peut améliorer considérablement les propriétés mécaniques, électriques, thermiques et optiques du matériau composite. Les nano composites présentent de nombreux avantages par rapport aux matériaux composites traditionnels, tels que leur résistance accrue, leur faible poids, leur résistance à la corrosion et leur stabilité thermique. Les nano composites sont largement utilisés dans de nombreux domaines, tels que l'aérospatiale, l'automobile, l'électronique, la médecine et l'industrie des matériaux.

## II.2 Définition d'un nano composite :

Un nanocomposite est un matériau composite constitué d'une matrice de base (par exemple, un polymère) et de nanoparticules incorporées dans la matrice. Les nanoparticules peuvent être des matériaux inorganiques tels que des oxydes, des métaux, des céramiques, des nanotubes de carbone, des graphènes ou des matériaux organiques tels que des polymères conducteurs. Les dimensions des nanoparticules sont généralement inférieures à 100 nanomètres (nm) dans au moins une dimension.

Les nano composites présentent souvent des propriétés améliorées par rapport à leur matrice de base. Par exemple, l'ajout de nanoparticules peut améliorer la résistance mécanique, la résistance à la corrosion, la stabilité thermique, la conductivité électrique ou thermique, la transparence optique, ou encore la barrière aux gaz. Les nano composites sont largement utilisés dans de nombreux domaines, tels que l'aérospatiale, l'automobile, l'électronique, la médecine et l'industrie des matériaux.

## II.3 Les différents nanorenforts :

Il existe plusieurs types de nano renforts qui peuvent être utilisés pour renforcer les matériaux nano composites :

**II.3.1 Les nanoparticules inorganiques :** ces nanoparticules peuvent être des oxydes (par exemple, l'oxyde de zinc, l'oxyde de titane, l'oxyde d'aluminium), des métaux (par

exemple, l'argent, le cuivre, l'or), des nanotubes de carbone, des graphènes ou encore des argiles lamellaires. Les nanoparticules inorganiques peuvent améliorer les propriétés mécaniques, thermiques, électriques ou optiques des nano composites.

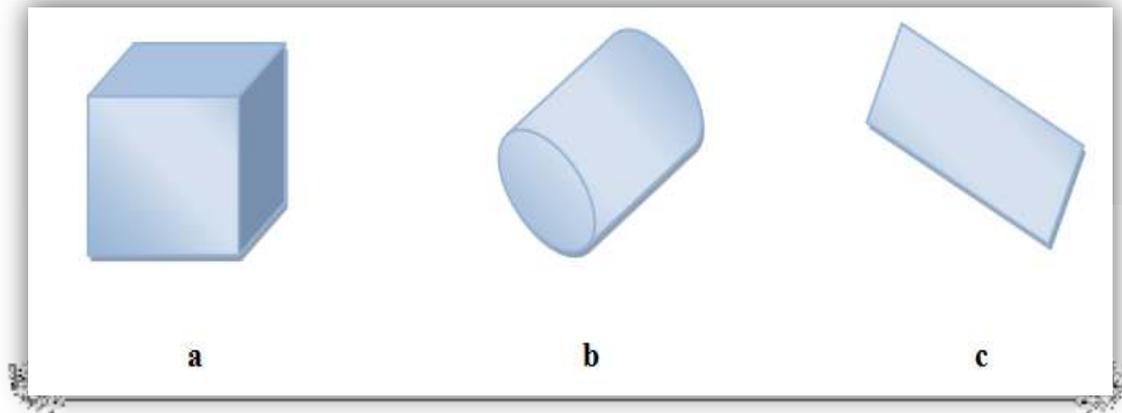
**II.3.2 Les nanoparticules organiques :** ces nanoparticules peuvent être des polymères conducteurs tels que le poly aniline, le poly pyrrole ou encore le poly thiophène. Les nanoparticules organiques peuvent améliorer les propriétés électriques des nano composites.

Les nanofibres : ces renforts peuvent être des fibres de carbone, de verre ou de polymères, dont le diamètre est de l'ordre du nanomètre. Les nanofibres peuvent améliorer les propriétés mécaniques des nano composites.

**II.3.3 Les nano composites hybrides :** ces nano renforts sont constitués d'une combinaison de nanoparticules inorganiques et organiques. Les nano composites hybrides peuvent améliorer les propriétés mécaniques, thermiques et électriques des nano composites.

Le choix du type de nano renfort dépend des propriétés recherchées pour le nano composite final et des conditions d'utilisation de celui-ci.

Il est couramment admis que le classement des nano composites se fait selon le facteur de forme de la charge incorporée (rapport entre la longueur et l'épaisseur ou le diamètre). Dans la définition admise des nano composites les renforts doivent avoir au moins une de leurs dimensions morphologiques inférieure à 100 nm et peuvent être classés en fonction de leur géométrie. On trouve alors trois classifications qui sont possibles .



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

### II.3.4 Nanoparticules à trois dimensions nanométriques:

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

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

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

### II.3.5 Nanoparticules à deux dimensions nanométriques : nanofibres

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

### II.3.6 Nanoparticules à une dimension nanométrique : feuillets

Possèdent deux directions privilégiées. La particule possède une dimension de l'ordre du nanomètre et les deux autres de l'ordre du micromètre. Parmi ce type de matériaux, les argiles sont probablement les plus connues car elles sont naturelles donc faciles à extraire. [N. Andres Perez. 2008].

## II-4) Dispersion des renforts:

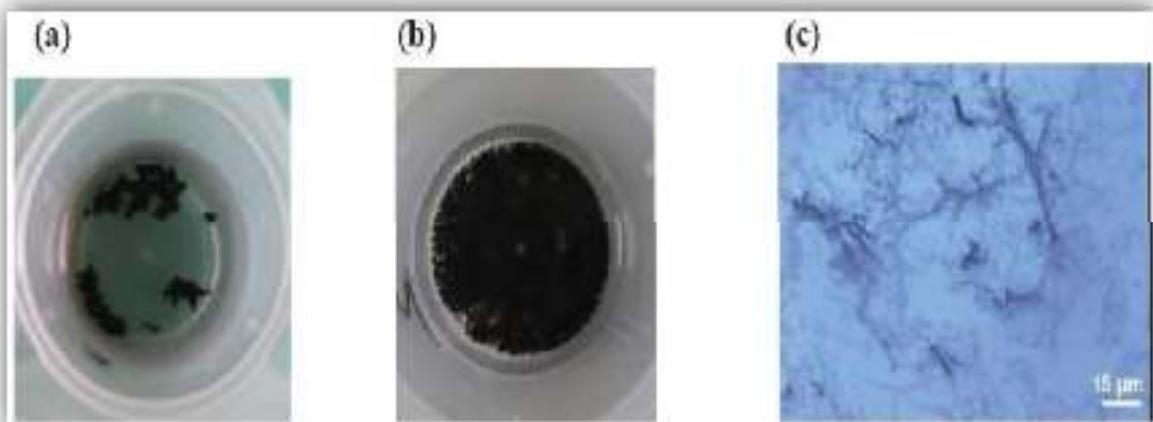
### II-4-1) Utilisation des ultrasons:

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

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

\*ensuite la poudre de (CNTs) est ajoutée à la base et à nouveau soumis aux ultrasons (1 heure). La dernière étape d'élaboration du composite consiste à rajouter le catalyseur à la solution précédente pour procéder à la réticulation du polymère.

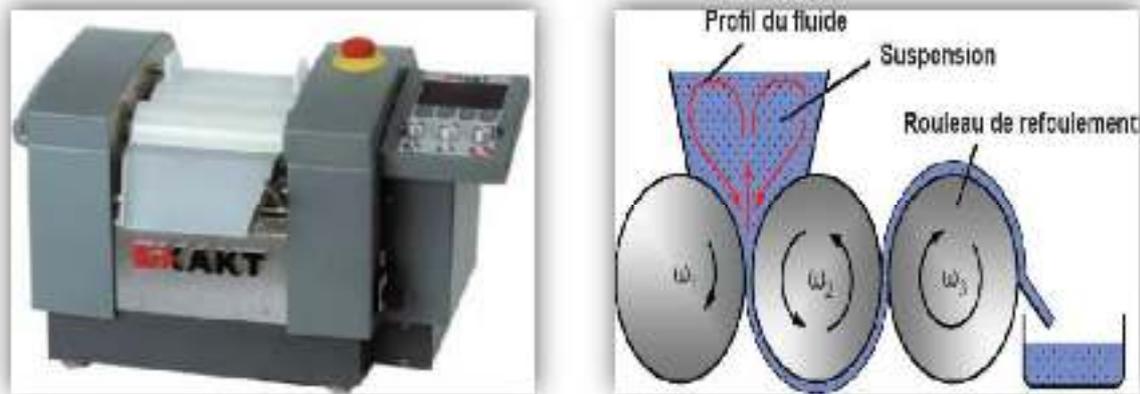
Les images ci-dessous montrent que l'usage des ultrasons peut fournir des résultats assez Satisfaisants. En effet, un tel procédé permet de briser les gros agrégats de (CNTs). Cependant, des observations au microscope optique sur une gouttelette de la solution constituée de base + (CNTs) (après 2 heures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



**Figure II.2:** 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]

### II-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 II.3. a). Son utilisation pour disperser les (CNTs) est récente. Thostenson et al [Thostenson 2006], ont montré que le tricylindre est un outil assez performant pour disperser de manière homogène les (CNTs) dans une résine epoxy. Ils ont pu ainsi obtenir des niveaux de conductivités électriques et thermiques supérieurs à d'autres travaux (utilisant notamment les ultrasons).



**Figure II.3. a)** Tri cylindre 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. (Figure II. 3.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  $\omega_3$  (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]

$$\begin{cases} \omega_2 = \frac{1}{3} \omega_3 \\ \omega_1 = \frac{1}{3} \omega_3 \end{cases}$$

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  $\mu\text{m}$ ). La combinaison de ces deux

paramètres Permettant aussi bien de régler la vitesse de rotation des rouleaux (forces de cisaillement) et la Distance (pression exercée sur le fluide).

L'avantage que nous voyons à ce procédé est qu'il permet une grande cadence de fabrication. Ce procédé a été récemment utilisé par les membres de l'équipe de K. Schulte à Hambourg [Goj, 2004] et celle de Thostenson à Virginia Tech. (USA) [Tho, 2005] pour disperser des (NTC) dans des polymères époxyde.

## **II-5) Les inconvénients de l'utilisation des ultrasons sont:**

-Volume de matière limité.

-Nécessite des liquides de basse viscosité pour qu'elle soit efficace.

-l'US n'engendre pas suffisamment de force de cisaillement pour «désagglomérer» les (NTC).

-Des recherches [Lu 1996], [Gu 2008] ont montré que l'énergie fournie par les vibrations les fréquences ultrasonores induites des défauts, voire même la coupure des (NTC). Malgré ces points négatifs, l'utilisation d'ultrasons reste bien souvent nécessaire pour disperser les (NTC) lorsque ceux-ci sont en suspension dans un solvant (avant de mélanger ce dernier à la matrice polymère). Les ultrasons permettent en effet de séparer les amas de tubes, allant même jusqu'à les individualiser. L'étude réalisée par [Liao, 2004] montre l'importance de l'utilisation des ultrasons pour améliorer la dispersion des (NTC).

## **II. 6) Classification des nano composites :**

On peut appliquer la classification classique des composites suivant la nature de la matrice, dans l'ordre croissant de la température d'utilisation. Les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés que dans un domaine de températures ne dépassant pas 200 à 300°C, alors que les autres types de composites sont utilisés au-delà : jusqu'à 60 degrés pour une matrice métallique et jusqu'à 1000 degrés pour une matrice [Zidour, 2012].

### **II.6.1 Classification selon la matrice**

1) Nano composites à matrice organique ou polymère : les températures de fabrication varient entre 200 0C et 300 0C, matériaux sont très développés du fait de maîtrise de fabrication.

2) Nano composites à matrice métallique : les températures de fabrication atteignent les 600 0C, les processus de fabrication sont inspirés de la métallurgie

3) Nano composites à matrice céramique : les températures dépassent les 1000 0C. Pour Les premiers composites à matrice polymère sont sûrement les plus développés du fait de leur importance commerciale et de la maîtrise de nombreux processus de fabrication (coût et savoir-faire) intervenant dans les polymères nano et plus particulièrement ceux utilisant des charges de type argile.

#### I.6.1.1 Les composites à matrice métallique :

Dont certains procédés de fabrication s'inspirent de la métallurgie des poudres. Les particules de seconde phase peuvent être des oxydes, borures, carbures, nitrures. Les composites matrice métallique encore appelés MMCs pour métal-matrix composites se sont développés grâce à la facilité et à la maîtrise des procédés de fabrication ainsi qu'à leur faible coût, [Hassani, 2017]

#### II.6.1.2 Les composites à matrice céramique:

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

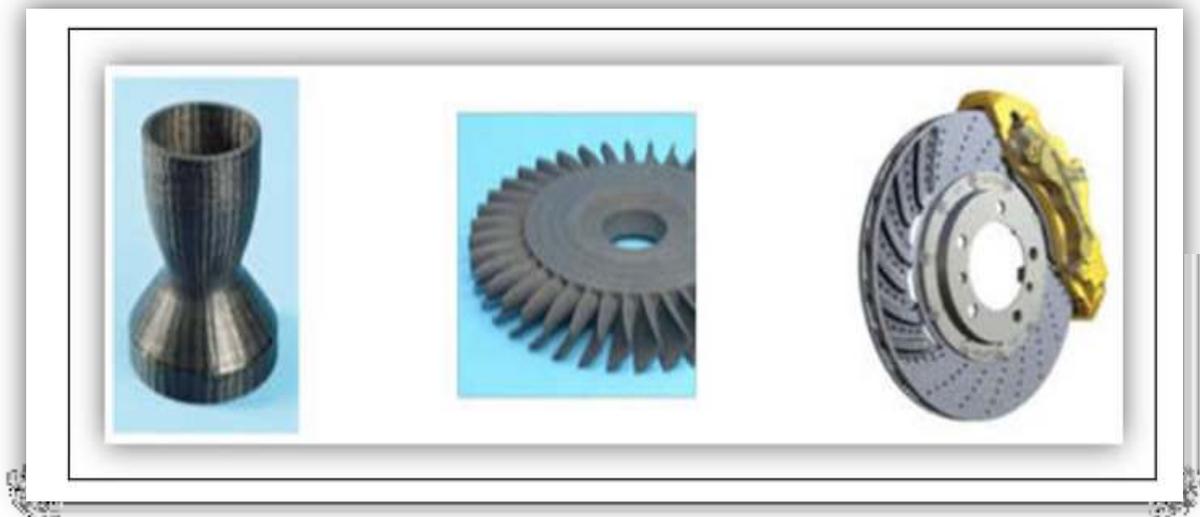


Figure II.4 : Quelques applications des CMC.

#### II.6.1.3 nano composite à matrice organique :

Généralement, les polymères organiques sont utilisés comme matrices dans les matériaux composites, elles assurent le transfert des charges entre les renforts du composite, de les

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

### **II.7) Procédés d'élaboration des nano composites (NTC/polymère) :**

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 .

### II.7-1) Polymérisation in situ :

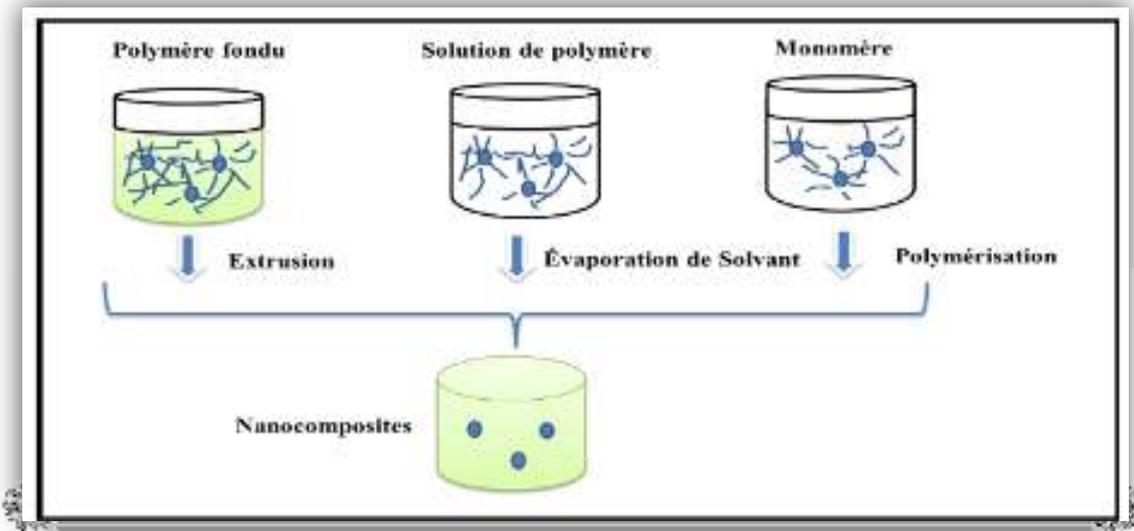
Cette méthode consiste à disperser des nanoparticules dans des solutions adaptées de monomères puis à effectuer une polymérisation classique afin d'obtenir des nano composites. La fabrication de (NC) par un procédé de polymérisation in situ est divisée en plusieurs étapes. Dans un premier temps, les charges sont ajoutées au monomère liquide. Etant donné la faible viscosité de ce dernier, la dispersion des charges peut s'effectuer grâce à l'utilisation d'ultrasons ou encore via agitation mécanique en régimes turbulents. Une fois les charges bien dispersées dans la matrice, on débute la polymérisation. Lorsque la polymérisation est achevée, il ne reste plus qu'à extraire le monomère résiduel (ex : par dégazage sous vide). Le premier avantage de cette méthode est qu'elle ne nécessite pas l'utilisation de solvants qui sont coûteux et difficiles à éliminer. Le deuxième avantage est qu'elle permet d'obtenir un bon état de dispersion notamment grâce au fait que les charges sont introduites dans le monomère fondu qui à une faible viscosité [Penu, 2008]. [Tagrara, 2017].

### II.7-2) Mélange en solution :

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

### II.7-3) Mélange à l'état fondu :

Cette méthode est la plus simple. Dans ce cas, le polymère et les nanotubes sont incorporés, dans une extrudeuse chauffée. Le cisaillement apporté par la rotation des vis est l'élément déterminant dans la qualité de la dispersion des charges. Les (NTC) peuvent ainsi circuler au sein du polymère fondu. Des nano composites à base de polyéthylène, polypropylène, polyamide, polycarbonate, polyéthylène téréphtalate, polylactide, poly méthacrylate 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 2008].



**Figure II.5** Méthodes d'élaborations des nano composites polymères : a) mise en œuvre dans le fondu, b) mise en solution et, c) polymérisation in situ

## II.8 Propriétés des nano composites :

Les propriétés macroscopiques des composites sont :

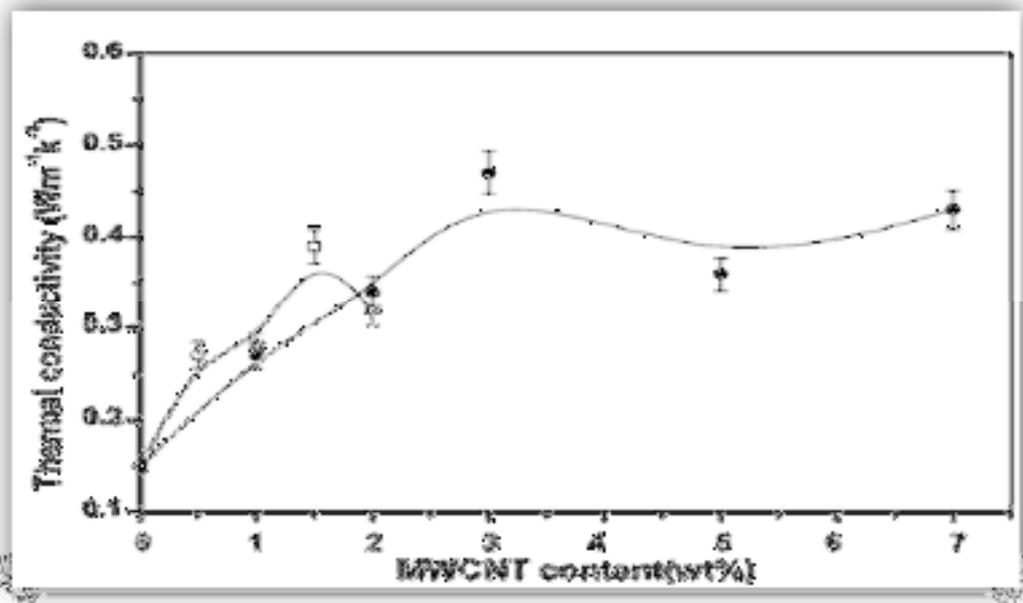
La qualité des composants, leur disposition spatiale et la liaison entre eux. Des changements de comportement supplémentaires peuvent également se produire lorsque l'on considère les particules de renforcement de taille nanométrique. Cette section répertorie les mécaniques, thermiques et électriques des nano composites.

### II. 8.1) Propriétés mécaniques des nano composites (NTC/polymère) :

L'amélioration des propriétés mécaniques des polymères ne tient pas uniquement aux excellentes propriétés des nanotubes. En effet, la liaison interfaciale entre les charges et la Matrice ainsi que la dispersion des charges sont également à prendre en compte. Ainsi la contrainte à la rupture peut être diminuée par la présence de défauts associés aux agglomérats de nanotubes. La résistance à la rupture de ces composites est améliorée lorsque la matrice et les charges possèdent une énergie interfaciale suffisante pour permettre le transfert des efforts de la matrice au renfort. La dispersion des nanotubes dans une matrice polyéthylène téréphtalate permet d'augmenter le module d'Young du polymère de (1,5 GPa à 1,9 GPa) ainsi que la contrainte à la rupture de (60 MPa à 68 MPa) avec (2%) de (NTC) . Avec ce même taux de charge une augmentation de (214%) du module d'élasticité est observée dans une matrice polyamide .Dans une matrice polyéthylène une amélioration de (89% et 56%) respectivement du module d'Young et de la contrainte à la rupture peut être observée à (10%) de charges [B.Tayeb, 2017].

### II.8.2 Propriétés thermique des nano composites (NTC/polymère) : (Conductivité thermiques)

L'élaboration d'un matériau nano 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 des nanotubes de carbone [Cai 2008], comme représenté sur la figure II .6



**Figure II .6:** Evolution de la conductivité thermique dans un nano composite à matrice polyuréthane, avec des MWCNTs modifiés par deux voies chimiques différentes. [Cai 2008]

### II.8.3 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 CNTs avec des performances électriques satisfaisantes. Les différentes approches s'intéressent notamment à favoriser l'apparition du phénomène de percolation qui met en évidence le passage du caractère isolant à celui de conducteur du composite. Hart et al ont fabriqué un composite à base de CNTs et une matrice polymère en polystyrène ayant une conductivité électrique de 10 S/cm à 2 wt% en CNTs. [Chemi 2018].

Les polymères sont caractérisés par leurs effets isolants notamment les thermoplastiques, dans le but de diminuer leurs résistivités afin d'assurer des propriétés conductrices et antistatiques, ils sont renforcés par des amochages de noir de carbone ou des particules

métalliques qui ont de bonnes propriétés électriques, permettant la réduction de l'accumulation de charges statiques de surface, et la diminution des effets des radiations électromagnétiques sur les équipements électroniques. Un autre exemple est l'ajout des charges est dans les peintures pour colorer, mais également pour améliorer la conduction électrique et permettre les dépôts par cataphorèse. [Amarelis, 2005].

Les matrices polymères sont généralement des matériaux diélectriques (leur conductivité moyenne est proche de  $10^{-7} \text{S.m}^{-1}$ ). 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  $1 \text{ S.m}^{-1}$  grâce à l'incorporation de très faibles fractions massiques de nanotubes de carbone. [Sandler et al, 2003].

## II. 9) Application des Nano composites dans le domaine de Génie civil:

Les nano composites offrent plusieurs avantages pour le domaine de génie civil, en particulier pour la conception et la construction de structures à haute performance. Voici quelques exemples d'applications des nano composites dans ce domaine :

**Renforcement des structures :** les nano composites peuvent être utilisés pour renforcer les structures existantes en ajoutant des couches de nano composites sur les surfaces en béton, en acier ou en polymère. Les nanotubes de carbone, par exemple, peuvent être utilisés pour renforcer les matériaux composites renforcés de fibres pour augmenter leur résistance et leur durabilité.

**Protection contre la corrosion :** les nano composites peuvent également être utilisés pour protéger les structures contre la corrosion. Les nanoparticules d'oxyde de zinc, par exemple, peuvent être ajoutées aux revêtements pour protéger les surfaces en acier contre la corrosion et l'oxydation.

**Amélioration des propriétés mécaniques :** les nano composites peuvent améliorer les propriétés mécaniques des matériaux de construction tels que la résistance à la flexion, la

résistance à la traction et la ténacité. Les nanoparticules d'argile peuvent être ajoutées aux composites en polymère pour améliorer leur résistance et leur rigidité.

**Amélioration des propriétés thermiques :** les nano composites peuvent également améliorer les propriétés thermiques des matériaux de construction en augmentant leur conductivité thermique. Les nanoparticules de cuivre, par exemple, peuvent être ajoutées aux bétons pour augmenter leur conductivité thermique et améliorer leur résistance au gel et au dégel.

**Réduction des coûts :** les nano composites peuvent également aider à réduire les coûts de construction en réduisant le besoin de matériaux de construction et en prolongeant la durée de vie des structures existantes. Par exemple, les nanotubes de carbone peuvent être utilisés pour renforcer les structures en béton existantes plutôt que de les remplacer complètement.

Les nano composites offrent de nombreuses possibilités pour améliorer les performances des matériaux de construction dans le domaine de génie civil. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour développer des nano composites adaptés à chaque type de structure et pour évaluer leur durabilité à long terme dans les environnements réels.

## II. 10) Les défis de la production de nano composites :

La production de nano composites présente plusieurs défis techniques et scientifiques qui doivent être surmontés pour assurer leur fabrication efficace et leur utilisation à grande échelle. Voici quelques-uns de ces défis :

**II.10.1 La dispersion des renforts :** l'un des principaux défis dans la production de nano composites est la dispersion uniforme des renforts dans la matrice. Les renforts doivent être suffisamment dispersés pour éviter les agrégats, qui peuvent affecter négativement les propriétés des matériaux composites.

**II.10.2 Le coût :** la production de nano composites peut être coûteuse en raison de la nécessité d'utiliser des équipements spécialisés et des matériaux de haute pureté. Les coûts de fabrication peuvent être réduits en optimisant les processus de production, en utilisant des matériaux moins chers et en améliorant la rentabilité de la production à grande échelle.

**II.10.3 La compatibilité :** il est important de choisir des renforts compatibles avec la matrice pour assurer une adhésion et une interaction adéquates entre les deux phases. Si les

renforts et la matrice sont incompatibles, cela peut entraîner une ségrégation des phases et une réduction des propriétés mécaniques du matériau composite.

**II.10.4 La stabilité :** les propriétés des nano composites peuvent être influencées par l'environnement dans lequel ils sont stockés ou utilisés. Les nano composites peuvent être sensibles aux variations de température, d'humidité, de pH, etc. Il est donc important de comprendre comment ces facteurs peuvent affecter les propriétés des nano composites et de développer des matériaux qui restent stables dans différents environnements.

**II.10.5 La toxicité :** certaines nanoparticules utilisées comme renforts peuvent être toxiques pour les êtres humains et l'environnement. Il est important de comprendre les risques liés à l'utilisation de ces nanoparticules et de développer des protocoles pour minimiser les risques pour la santé et l'environnement.

La production de nano composites nécessite une approche multidisciplinaire impliquant des chercheurs en science des matériaux, en génie chimique et en physique pour relever les défis liés à la fabrication, la conception et l'utilisation de ces matériaux.

## **II .11) Les technologies avancées dans le domaine des nanocomposites :**

Les technologies avancées dans le domaine des nanocomposites sont en constante évolution et visent à améliorer les propriétés et les performances des matériaux. Voici quelques-unes des technologies les plus avancées dans ce domaine :

**Fabrication additive :** la fabrication additive, également connue sous le nom d'impression 3D, est une technologie qui permet de créer des structures tridimensionnelles à partir de matériaux de base tels que des polymères ou des métaux. Cette technologie peut également être utilisée pour créer des composites renforcés de nanoparticules, qui offrent une résistance et une durabilité accrues.

**Revêtements intelligents :** les revêtements intelligents sont des matériaux qui peuvent détecter et réagir à des stimuli externes tels que la chaleur, la lumière ou la pression.

Les nanocomposites peuvent être utilisés pour créer des revêtements intelligents qui offrent une protection accrue contre la corrosion, les rayures ou l'usure.

**Nanotubes de carbone fonctionnalisés :** les nanotubes de carbone fonctionnalisés sont des nanotubes de carbone qui ont été modifiés chimiquement pour ajouter des propriétés spécifiques telles que la conductivité électrique ou thermique. Les nanotubes de carbone fonctionnalisés peuvent être utilisés pour renforcer les matériaux composites ou pour créer des capteurs ou des transistors ultra-sensibles.

**Nanocomposites auto-cicatrisants :** les nanocomposites auto-cicatrisants sont des matériaux qui peuvent se réparer eux-mêmes en cas de fissures ou de dommages mineurs. Cette technologie est basée sur l'ajout de microcapsules contenant des agents de guérison dans les matériaux composites renforcés de nanoparticules.

**Nanocellulose :** la nanocellulose est un matériau qui est dérivé de la cellulose, la principale substance structurale dans les plantes. La nanocellulose a des propriétés uniques telles que la légèreté, la rigidité et la résistance à la traction. Elle peut être utilisée pour créer des matériaux composites légers et résistants pour l'industrie automobile ou aérospatiale.

Les technologies avancées dans le domaine des nanocomposites offrent des possibilités passionnantes pour développer des matériaux de pointe avec des propriétés et des performances améliorées. Ces avancées peuvent conduire à des applications innovantes dans de nombreux secteurs, tels que l'aérospatiale, l'industrie automobile, la construction, la médecine et l'énergie.

**II-12 Conclusion:**

Ce chapitre est consacré à l'acquisition des connaissances théoriques nécessaires à l'étude du problème, les nano composites représentent une classe de matériaux de plus en plus importante et prometteuse dans de nombreux domaines, notamment dans le génie civil. Grâce à leurs propriétés améliorées, telles que la résistance, la durabilité, la légèreté et la conductivité, les nano composites offrent des possibilités innovantes pour développer de nouveaux produits et applications. Les avancées technologiques dans le domaine des nano composites, telles que la fabrication additive, les revêtements intelligents, les nanotubes de carbone fonctionnalisés, les nano composites auto-cicatrisant et la nano cellulose, ouvrent des perspectives de recherche et de développement prometteuses pour l'avenir. Cependant, la production à grande échelle et les coûts associés à la fabrication de ces matériaux demeurent des défis à relever pour rendre leur utilisation plus accessible et plus répandue.

## **CHAPITRE III**

### **Les matériaux fonctionnellement gradués**



**III .1 Introduction :**

Les matériaux à gradient de propriétés (Functionally Graded Materials : FGM) ou les matériaux fonctionnellement gradués sont une nouvelle classe de matériaux composites dont la microstructure et la composition varient graduellement et continûment avec la position de manière à optimiser les performances mécaniques et thermiques de la structure qu'ils constituent. Ils sont considérés comme des matériaux intelligents dont les fonctions désirées sont intégrées, dès la conception, au cœur même de la matière.

A chaque interface, le matériau est choisi selon les applications spécifiques et les charges environnementales. Ces matériaux possèdent de multiples avantages qui peuvent les rendre attractifs du point de vue de leur potentiel d'application. Il peut s'agir de l'amélioration de la rigidité, de la tenue à la fatigue, de la résistance à la corrosion ou de la conductivité thermique en plus d'avoir une gradation des propriétés permettant ainsi d'augmenter ou de moduler des performances telles que la réduction des contraintes locales [ Suresh et Mortensen 1998] ou encore l'amélioration du transfert de chaleur [ (Öchsner et al. 2008)]. Ce nouveau concept marque le commencement d'une révolution dans les domaines de la science et de la mécanique des matériaux. L'intérêt particulier et grandissant envers les matériaux à gradient fonctionnel, pensés et conçus pour la première fois au Japon, est mis en évidence par les innombrables conférences et publications de qualité dédiées à l'analyse, la conception et la fabrication de ces matériaux.

Une question s'impose : Comment ce concept a-t-il germé, et comment l'étude des FGM a-t-elle été lancée ? Au environ de 1984-1985, dans une université Japonaise, deux chercheurs l'un dans le domaine de l'aéronautique et l'autre dans le domaine des sciences des matériaux rêvent de concevoir un engin spatial dont le revêtement pourrait résister à un environnement thermique très sévère. Il n'existe alors pas de matériau métallique ni de matériau composite capable de répondre à la fois aux exigences environnementales telles que décrites tout en gardant d'excellentes propriétés mécaniques. Ils échangent alors l'idée du concept FGM, autrement dit d'un matériau avec une gradation continue dans la direction de l'épaisseur, passant d'une face totalement métallique vers une face totalement céramique. En 1987, le programme national de recherche et de développement sur les FGM a vu le jour au Japon. Beaucoup de chercheurs des institutions publiques et de l'industrie ont uni leurs efforts pour créer un nouveau type de matériau, principalement pour permettre de construire l'enveloppe extérieure d'une navette intercontinentale commerciale.

Le problème principal à résoudre étant le flux de chaleur énorme frappant la majorité des surfaces qui sont exposées à la friction par l'air lors de la période de rentrée de la navette dans l'atmosphère terrestre et en même temps, de protéger l'intérieur contre un surchauffement. Certes, un revêtement céramique aurait pu protéger le fuselage contre les températures qui se développent à la surface, mais on a dû craindre l'action des très grandes contraintes thermo élastiques aux interfaces entre fuselage métallique et sa protection céramique, se rendant compte des différences entre les modules de Young et les conductivités thermiques des deux matériaux. L'idée fût alors de produire une transition douce, donc graduelle entre métal pur et céramique pure appelée matériaux à gradient fonctionnel (FGM). En 1990 a eu lieu la première conférence internationale sur les FGM à Sendai-city au Japon. En 1992, les matériaux à gradient fonctionnel ont été sélectionnés parmi les dix premières technologies de pointe au Japon et actuellement dans le monde entier.

La réussite dans le domaine des matériaux intelligents ne sera possible que par une forte synergie entre les différents secteurs industriels et scientifiques. Certes, le concept FGM a été proposé à l'origine pour répondre aux exigences du domaine de l'aéronautique et de l'aérospatial mais ces matériaux sont utilisés dans la fabrication des outils industriels qui exigent une grande rigidité, une grande dureté et une résistance thermique importante. Ils ont également des applications en optoélectronique, particulièrement dans la fabrication des fibres optiques capables de transmettre l'information à de très grandes vitesses. Leur application dans les systèmes de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique sera probablement effective dans un futur proche dans notre pays qui a un potentiel énorme dans ce domaine. Les FGM sont également les biomatériaux idéaux pour réparer ou combler les déficiences osseuses éventuelles de notre squelette. Cette technologie est aussi applicable dans les centrales nucléaires où la température peut atteindre des valeurs considérables. Actuellement, des lanceurs en FGM sont testés et les résultats sont prometteurs.

Outre les applications citées précédemment, les FGM trouvent aussi leurs applications dans les semi-conducteurs et en génie civil [Baron et Naili 2008]. Les poutres et les plaques constituent des éléments de base dans les structures aérospatiales, marines et terrestres, c'est pourquoi un intérêt particulier leur est porté, et bien comprendre leur comportement sous diverse sollicitations est une étape cruciale dans l'analyse structurale. Etant donné que les matériaux à gradient fonctionnel ont été pensés et conçus pour résister à des conditions thermiques sévères.

### III.2 Concept des matériaux fonctionnellement gradués :

Les matériaux constituant les parois des engins spatiaux (navettes spatiales ou des avions hypersonique) sont soumis à des températures élevées. Les pièces les plus exposées sont le cône d'entrée, les bords d'attaque des ailes ainsi que certaines surfaces inférieures. Pour cette raison les matériaux des parois, soumis sur une face à environ 1800°C en atmosphère, doivent supporter dans leur épaisseur d'une dizaine de millimètres, un gradient thermique d'environ 1300°C. Il n'y a aucun matériaux monolithiques capables de résister à une telle contrainte thermique [Koizumi 1992].

La solution envisagée est la mise en œuvre c'est-à-dire de matériau composite et notamment l'utilisation des matériaux à gradient de propriétés. On peut imaginer un matériau dont la face exposée à très haute température posséderait des propriétés de résistance aux fortes chaleurs et à l'oxydation, tel que la céramique, et dont la face intérieure serait très bonne conductrice de la chaleur et posséderait une bonne résistance mécanique et une meilleure ténacité, comme le métal.

Cependant, si l'on considère un simple assemblage de ces deux matériaux, ils présentent immédiatement une rupture due aux contraintes thermiques exercées à l'interface entre les deux types de matériaux ayant des propriétés thermiques différentes.

L'idéal serait de supprimer cette interface en créant une transition continue entre les deux faces.

C'est ainsi qu'est né le concept de matériau à gradient de fonction dans les années 1980 par un groupe de recherches au laboratoire national d'aérospatial (National Aerospace Laboratory, STA) au Japon. Le FGM consiste en l'association de deux matériaux aux propriétés structurales et fonctionnelles différentes avec une transition idéalement continue de la composition, de la structure et de la distribution des porosités entre ces matériaux.

Généralement, les FGM sont des matériaux constitués de plusieurs couches contenant des composants différents tel que les céramiques et les métaux. Les vides sont également considérés comme une composante des matériaux FGM. Ils sont donc des composites présentant des caractéristiques macroscopiquement non homogènes la plupart des « FGM » sont constitués des céramiques et des métaux dont les propriétés mécaniques sont comparées dans le tableau III.1

Tableau III.1 : comparaison entre les propriétés de la céramique et du métal

La face à haute température	Céramique	- Bonne résistance thermique. - Bonne résistance à l'oxydation. - Faible conductivité thermique.
Continuité du matériau d'un point à l'autre « Couches intermédiaires »	Céramique-métal	- Elimination des problèmes de l'interface. - Relaxer les contraintes thermiques
La face à basse température	Métal	- bonne résistance mécanique. - conductivité thermique élevée. - Très bonne ténacité

Le changement continu dans la composition et donc dans la microstructure du matériau FGM et illustre dans la **figure III.1**. Il en résulte un gradient qui déterminera les propriétés des FGM. Dans certain cas, on peut avoir un FGM constitué d'un même matériau mais de microstructure différent [Boch 1986]

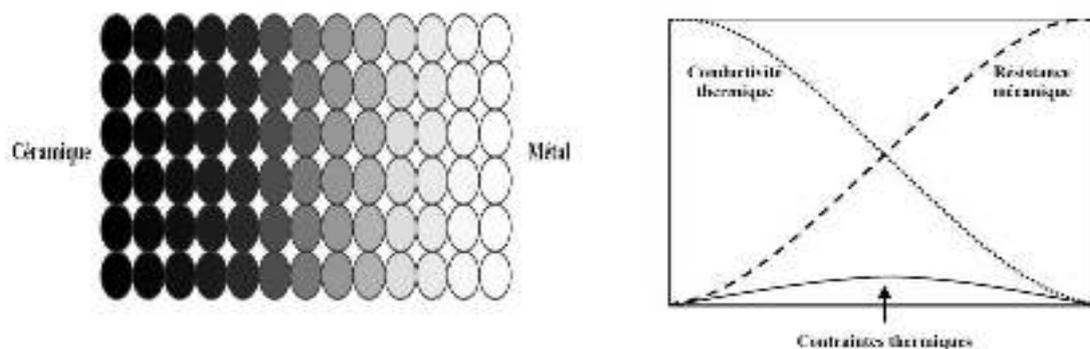


Figure III.1 : Concept des matériaux à gradient de propriétés.

La **figure III.1** montre les concentrations de contraintes dans les panneaux de protection thermiques conventionnels au niveau des interface (changement brutale de composition).

Il montre également comme un FGM peut alléger ces concentrations de contraintes en changeant graduellement les propriétés matérielles et assure toujours la protection thermique trouvée dans les barrières thermiques conventionnelles.

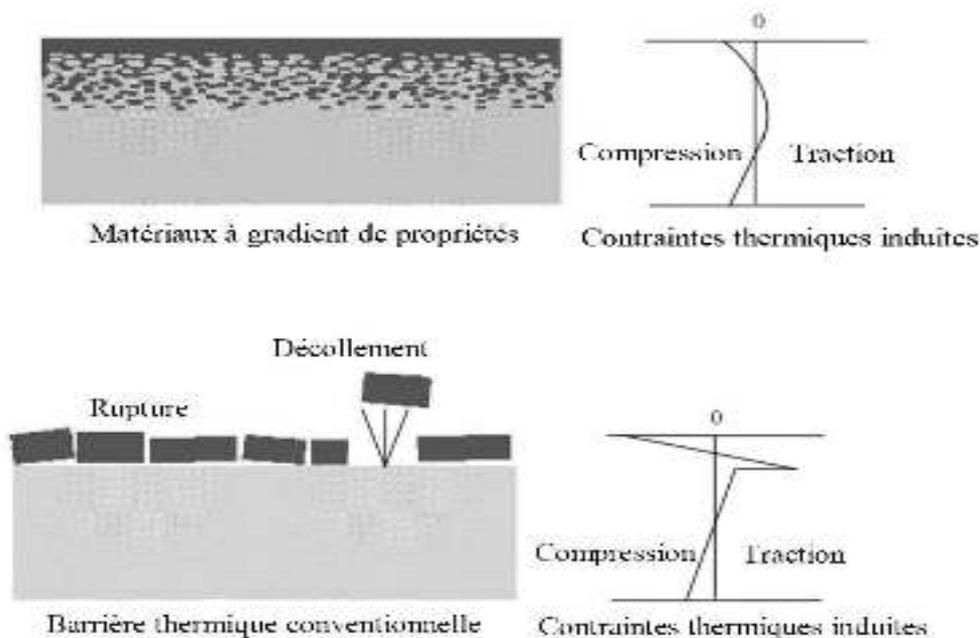


Figure. III.2: Protection thermique

### III.3 Historique des matériaux fonctionnellement gradués :

Généralement, les F.G.M sont des matériaux constitués de plusieurs couches contenant des composants différents tels que les céramiques et les métaux. Ils sont donc des composites présentant des caractéristiques macroscopiquement inhomogènes. Le changement continu dans la composition et donc dans la microstructure du matériau distingue les F.G.M des matériaux composites conventionnels comme c'est illustré dans la (figure III. 3) [Koizumi. M ,1996]

. Il en résulte un gradient qui déterminera les propriétés matérielles des FGM. Dans certains cas, on peut avoir un FGM constitué d'un même matériau mais de microstructure différente [Boch. P Chartier. Huttepain. M ,1986].

Le concept FGM peut être appliqué dans divers domaines pour des usages structuraux et fonctionnels. Au Japon, plusieurs programmes de cinq ans ont été conduits au cours des années 80 et 90 afin de développer l'architecture des FGM, et d'étudier également ces matériaux pour les applications de hautes températures (par exemple, éléments pour navettes spatial hypersonique) ainsi que pour des applications fonctionnelles (par exemple, convertisseurs

thermoélectriques et thermo-ioniques). Ces programmes ont conduit au développement de la conception architecturale du FGM et de ces perspectives.

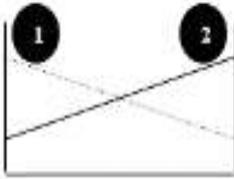
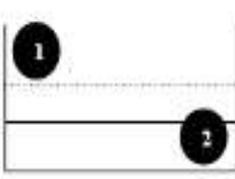
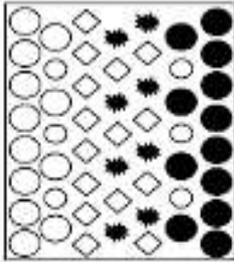
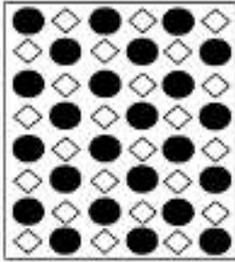
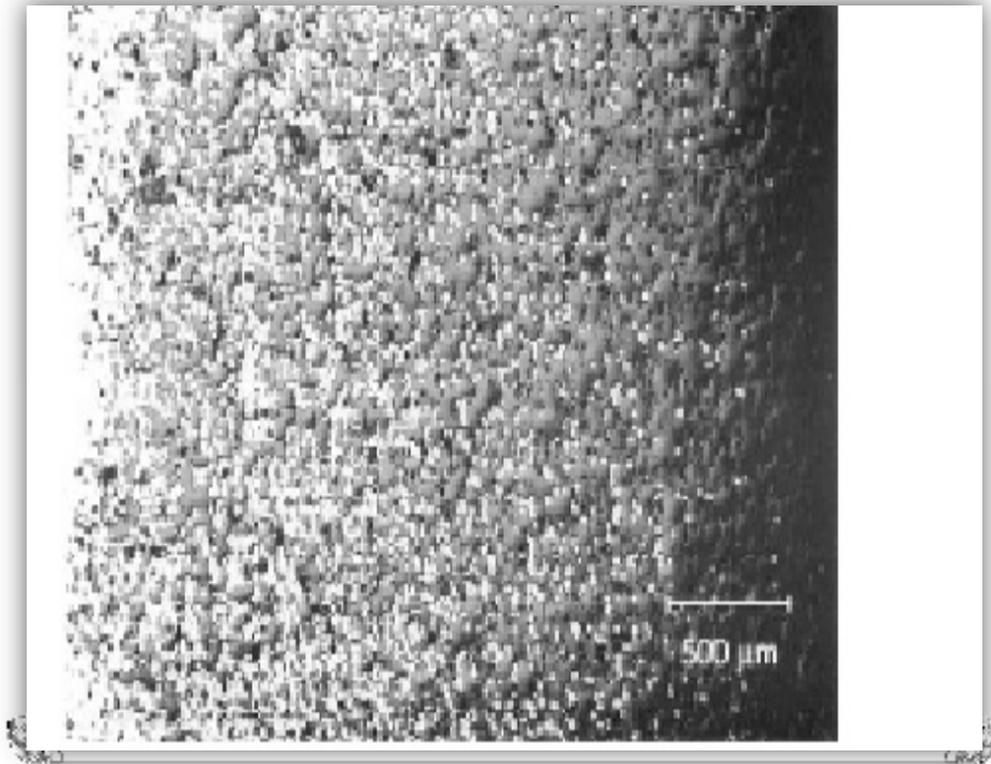
Propriétés	<p>1 Résistance mécanique</p> <p>2 Conductivité thermique</p>		
Structure	<p>Eléments constitutants:</p> <p>céramique ○</p> <p>métal ●</p> <p>microporosité ◊</p> <p>fibre *</p>		
Matériaux	exemple	FGM	NON-FGM

Figure III. 3: Caractéristiques des matériaux composites FGM en comparaison avec les matériaux composites conventionnels [Koizumi 1996].

### III.4 Définition de FGM (fonctionally graded matériel) :

Un matériau FGM est un type de matériaux composites classé par leur microstructure variable dans l'espace ; conçue pour optimiser l'exécution des éléments de structures par la distribution de propriétés correspondantes. Les distributions de propriété sont trouvées dans une variété de produits communs qui doivent avoir des fonctions multiples (c'est-à-dire multifonctionnelles) comme les liaisons entre les particules ; qui doivent être assez dures à l'intérieur pour résister à la rupture ; mais doivent également être assez dures sur l'extérieur pour empêcher l'usure.



**Figure III.4** Une vue de la microstructure des FGM

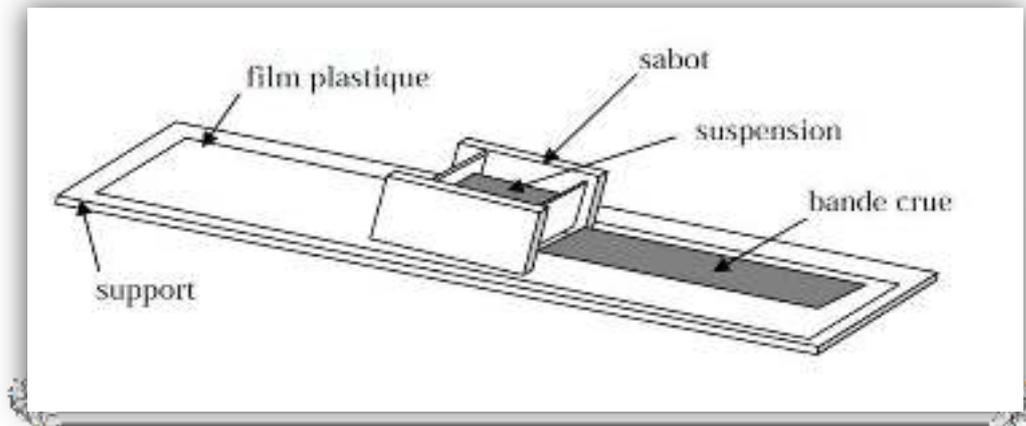
### **III.5. Les méthodes d'élaboration des FGM :**

Le processus de fabrication des matériaux à gradient de propriétés peut être divisé en établissant la structure dans l'espace non homogène « gradation » et la transformation de cette structure en matériau en bloc « consolidation ». Il existe de nombreux procédés d'élaboration des FGM, les paragraphes suivants s'attachent à décrire les principales méthodes d'élaboration des FGM utilisées dans l'industrie.

#### **III.5.1. Coulage en bande (Tape Casting ou Doctor-Blade) :**

Le coulage en bande est une technique de mise en forme par voie liquide qui consiste à étaler une barbotine de poudres fines en suspension sur une surface plane en couche minces et régulières. L'étalement de la bande est obtenu par le mouvement relatif d'un réservoir ou sabot.

La suspension est ainsi laminée par son passage entre la lame du réservoir et le support (figure III.5), ce qui confère à la bande déposée une épaisseur uniforme sur toute sa longueur. La hauteur du couteau du réservoir par rapport au support détermine l'épaisseur de la bande [Lostec1997]. Les produits obtenus sont des feuillets avec des épaisseurs contrôlées (25-1000  $\mu\text{m}$ ). Après un raffermissement de la pâte, les feuillets sont démoulés et en suit découpés.



**Figure.III.5** : Principe de la méthode de coulage en bande [Lostec1997].

Le procédé de coulage en bande est largement utilisé pour réaliser des composites laminaires suivant deux méthodes : soit par réalisation directe de bandes multicouches grâce à un système de lames multiples, c'est le cas des tri-couches élaborés par Mistler [Mistler 1973] ; soit par empilage de couches élaborées séparément, dont la cohésion est en suit assurée par une étape de thermo compression [Boch 1986]

### III.5.2. Coulage séquentiel en barbotine (Slip Casting) :

Le coulage en barbotine (slip casting) consiste à couler une suspension dans un moule poreux qui va drainer le liquide grâce aux forces capillaires, laissant un tesson (couche de poudre compacte) sur la surface du moule. Après séchage, on obtient le corps en cru.

Donc le coulage se décompose en deux étapes essentielles:

- formation du tesson ou "prise"
- consolidation du tesson ou "raffermissement".

La filtration, c'est à dire la formation du tesson lors du coulage, peut être considéré comme un processus d'élimination d'une partie de l'eau de la barbotine; Cette eau migre à travers la couche de tesson déjà formée, sous l'effet:

- du pouvoir de succion du plâtre (coulage classique [Moya, 1992]);
- ou d'une pression appliquée sur la barbotine (coulage sous pression).

Dans le cas de la fabrication de multicouches, après la formation du premier tesson, le

dépôt de la deuxième couche s'effectue de manière telle que la barbotine ne pénètre pas dans le tesson formé. Ce procédé est successivement reproduit pour les autres couches.

### III-5-3 Dépôt par électrophorèse :

Le dépôt par électrophorèse est un procédé dans lequel une suspension colloïdale stable est placée dans une cellule contenant deux électrodes, le dépôt se fait par le mouvement des particules chargées au sein de la solution vers la cathode ou l'anode selon le signe de la charge des particules due à un champ électrique [Sark 1996].

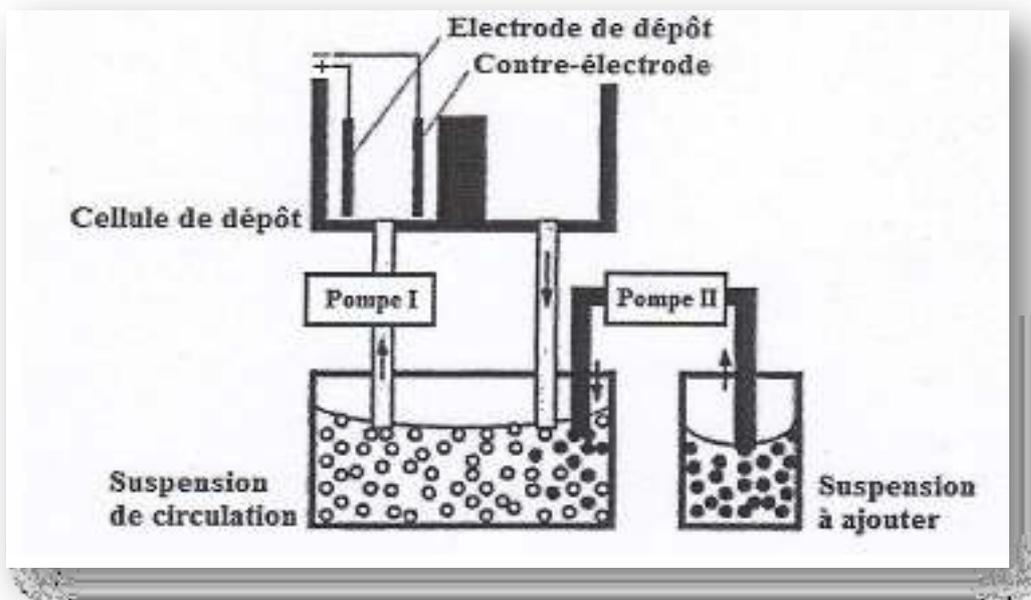


Figure III.6 : Vue schématique de l'installation d'EPD pour la production des matériaux

### III.5.4. Compaction Sèche des Poudres :

Cette technique consiste à verser successivement dans un moule en acier les poudres, et à chaque fois qu'une poudre est versée une faible compression est exercée.

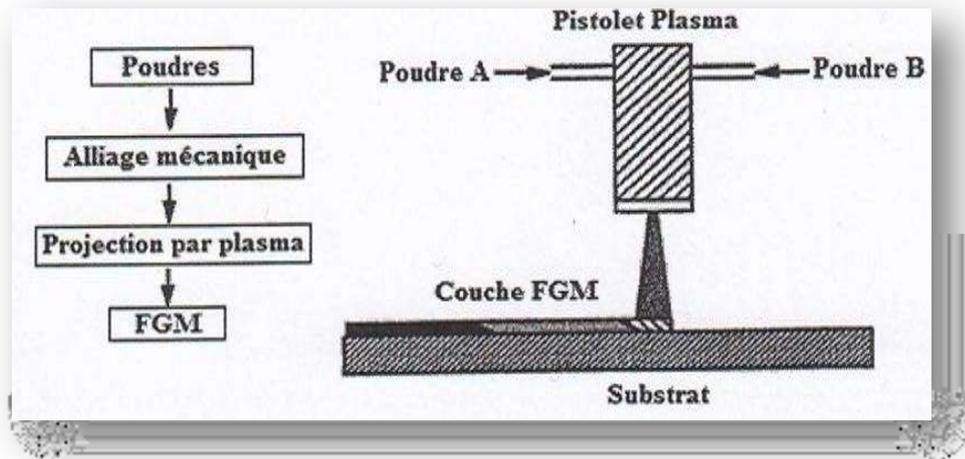
Ensuite la compaction de l'ensemble des couches sera effectuée. Ce procédé est suivi généralement par une pression isostatique et un délainage. La densification sera enfin l'étape finale [Bishop, a et al (1993)] . Ce procédé peut être envisagé pour la fabrication de pièces de formes complexes.

En effet il s'applique aussi avec la technique du pressage isostatique, et de façon industrielle.

### III.5.5. Projection plasma :

Un gaz soumis à une forte température (par exemple celle d'un arc électrique), se transforme en un état ionisé (plasma). Cette transformation est accompagnée d'un dégagement de chaleur important. Si une particule de céramique se trouve dans cet environnement, elle se fond

totalemment ou superficiellement, ce qui permet de la situer sur un substrat. La projection plasma des particules des divers matériaux est devenue une méthode très utilisée pour fabriquer des FGM. L'équipement relativement simple, le rendement élevé du dépôt des particules sur des substrats à géométrie compliquée, les performances des surfaces en fonctionnement et la compatibilité des céramiques avec les métaux sont les avantages essentiels de cette technique [Steffens H.D, 1990]



**Figure. III.7:** Projection par plasma pour former un matériau thermoélectrique gradué  
(La composition est graduée dans la direction plane)

### III. 5.6 C. V. D. et P. V. D :

Le dépôt en phase vapeur physique ou chimique est une technique dans laquelle les atomes du matériau source sont déposés sur la surface du substrat. Les techniques de C.V.D. et P. V. D. peut être utilisé pour élaborer un matériau à gradient de propriétés sur des substrats de formes compliquées.

### III.5.7. Frittage et Infiltration :

Cette technique est constituée de deux étapes et convient à la fabrication d'un composite à gradient de fonction composé de deux matériaux dont les températures de fusion sont très différentes. La première étape est de fabriquer une matrice frittée du matériau à haute température de fusion avec un gradient de porosité. La seconde est de remplir ces porosités avec le deuxième matériau fondu par infiltration. Le résultat est excellent pour la diminution de la contrainte thermique [Takahashi 1990].

Cette technique peut être généralement appliquée pour plusieurs combinaisons de matériaux qui sont chimiquement inertes et qui des points de fusion bien différents les uns par rapport aux autres.

### III. 5.8. Frittage Laser Différentiel :

Le rayonnement thermique du laser permet le contrôle de la température et la focalisation du point à chauffer. La différence de l'intensité de l'irradiation sur différents points du matériau, provoque un frittage différentiel le long de la pièce, ce qui résulte en des microstructures différentes, dépendant de la position du point irradié. Cette technique a été utilisée pour élaborer un F.G.M de PSZ/Mo. La (figure III. 8) montre schématiquement la disposition du procédé utilisé par ces auteurs.

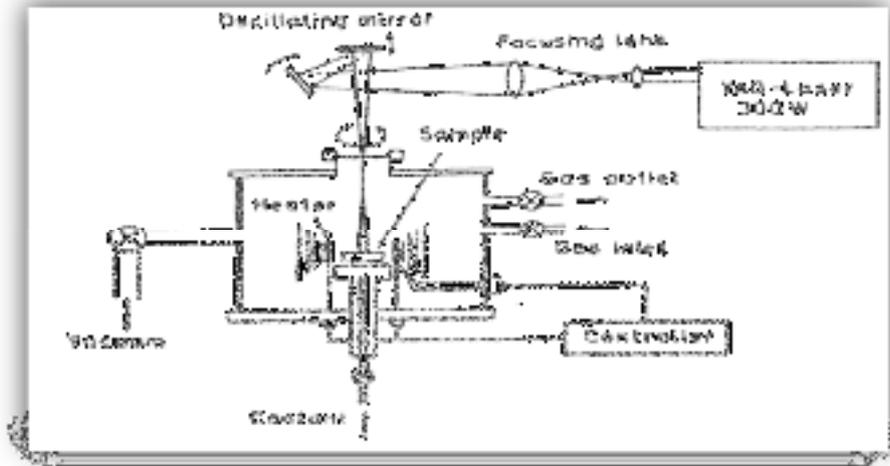


Figure III. 8 : Disposition du procédé frittage laser différentiel.

### III.5.9. Implantation ionique (Sputtering) :

C'est une technique avancée pour la fabrication des FGMs permettant de réaliser seulement des épaisseurs fines ( $<1\mu\text{m}$ ) sur différents substrats (plastique, céramique, et métaux). Le traitement d'effectue par les faisceaux énergétiques d'ions eu via de gaz réactifs. Les couches fabriquées présenteront un gradient de composition qui peut être très finement contrôlé [ABDI 1997].

## III.6 Propriétés physiques et mécaniques des FGM :

### III.6.1 Propriétés physiques de l'aluminium :

L'Aluminium est un métal blanc qui après polissage peut devenir réfléchissant.

→ **Propriétés physiques** : L'Aluminium à une température de fusion relativement basse d'environ  $660^\circ$ . Il en résulte une facilité de fusion qui présente un avantage certain pour les opérations de fonderie. L'Aluminium est très ductile, on peut aisément le mettre en forme. La masse volumique de l'Aluminium est de  $2700 \text{ kg/m}^3$ . L'utilisation de

l'Aluminium s'impose donc dans les domaines aéronautiques et du transport.

→ **Propriétés mécaniques** : Les propriétés mécaniques des métaux présentent un grand intérêt dans la vie quotidienne, elles peuvent être classées en deux groupes :

- Celles qui se rapportent à la résistance mécanique du métal :

-Résistance à la traction

-Résistance à la pénétration (dureté)

Celles qui concernent les modifications de forme que le métal peut subir sans se briser :

-La malléabilité (mises en feuilles).

-La ductilité (mise en fils).

→ **Propriétés des alliages d'aluminium** :

-L'Aluminium a pour propriétés une :

-Température de travail élevée.

-Très bonne résistance à la corrosion.

-Légèreté

-Très bonnes solidités, dureté et rigidité

-Bon rapport force/poids

-Bonnes propriétés de protection contre les interférences électromagnétiques.

-Bonne conductivité thermique.

-Conductivité électrique

-Bonnes caractéristiques de finition.

-Entièrement recyclable.

**-Résistance à la corrosion** : Grâce à la couche d'oxyde qui se forme en surface, les alliages d'Aluminium résistent à la corrosion. On peut rendre cette couche protectrice d'oxyde plus épaisse par galvanisation. L'Aluminium et ses alliages peuvent être utilisés sans protection supplémentaire comme revêtement extérieur de bâtiments. Par contre dans les milieux corrosifs, les alliages d'Aluminium peuvent subir les effets de la

corrosion. Des piqûres, de la corrosion sous contrainte, de la fatigue corrosion, voire de la corrosion généralisée peuvent se développer. Pour des conditions données, la sévérité de l'attaque dépend de l'alliage utilisé et de son état.

### **III.6.2 Propriétés physiques de la céramique :**

La céramique résulte des terres et des roches broyées (matériaux géologiques) ou bien d'une argile qui sera modelée puis cuite sous haute température (transformation irréversible) ce qui fait perdre au matériau sa plasticité donc il ne peut plus se réhydrater.

**Propriétés physiques :** La céramique a une facilité de fusion qui présente un avantage certain pour les opérations de fonderie. La masse volumique de la céramique est de 3800 kg/m<sup>3</sup>. L'utilisation de la céramique s'impose dans les domaines de l'habitat et du design, L'industrie céramique et métallurgique, aéronautique et spatial, médicale et dans les revêtements.

**Propriétés mécaniques :** Les propriétés mécaniques de la céramique dépendent des :

- Matières première employées
- Méthodes de fabrication qui fixent les microstructures finales et déterminent la répartition des différentes phases en présence parmi les propriétés de la céramique :
- Un module de YOUNG élevé (Liaisons, covalente, ioniques).
- Une dureté élevée (Abrasif, outils de coupe, surfaces de frottement qui doivent résister à L'usure, résistance mécanique élevée, bonne tenue à chaud, rigidité élevée).
- Une très bonne résistance à la compression non à la traction (Résistance à la compression = 200 MPa).

### **III.7 Classifications :**

Les FGM ont été classées initialement dans la catégorie des matériaux classiques en fonction des combinaisons des composants utilisées [Almasi et al., 2016]. Il existe plusieurs classifications pour les FGM liées à leurs caractéristiques physiques, structurelles et de fabrication, leurs contraintes résiduelles, leur impact environnemental évalué tout au long du cycle de vie, leur consommation d'énergie spécifique, leurs coûts de fabrication, etc. Le développement de nombreuses applications et de nouvelles technologies pour produire des FGM à différentes échelles ont permis l'apparition de nombreuses classifications. Celles-ci fondamentalement les besoins dans la conception des FGM et leurs fabrications industrielles. Il a été retenu pour le moment six critères de classification. Ils dépendent [Parihar, Setti et Sahu, 2018; Saleh et al., 2020]:

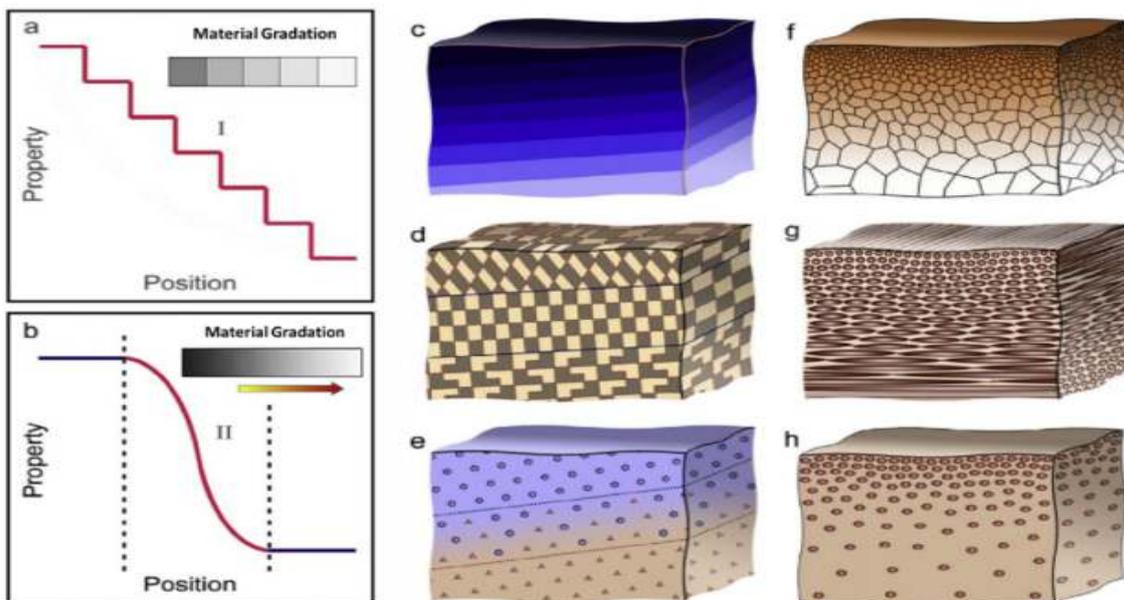
- De la structure des FGM
- Du type de FGM
- Des dimensions principales
- De la nature du gradient
- Du domaine d'application
- De l'état pendant le traitement

Ils peuvent appartenir à deux groupes fondamentales : ceux en continu et ceux en discontinu comme le montre la figure. III.9 [Makwana, Panchal et Gandhi, 2014]. Le premier est caractérisé par l'absence de zone claire ou ligne de coupe de séparation ne pouvant pas être observée à l'intérieur du FGM pour distinguer les propriétés de chaque zone. Le second groupe possède la particularité d'avoir les ingrédients du matériau qui varient en fonction de la gradation discontinue par étapes (FGM en couches ou FGM discrète). Les matières contiguës et discrètes sont réparties en trois types [Zhang et al. 2019]:

- Gradient de composition (Fig. III 9 c, f)
- Gradient d'orientation (Fig. III. 9 d, g)
- Gradient de fraction (Fig. III. 9e, h)

D'autres classifications tiennent compte :

- De la nature des microstructures (homogènes ou hétérogènes)
- De l'état stationnaire (microstructure n'évoluant pas dans le temps) ou non stationnaire (dépendant du temps). (Texier, 2013)



**Figure III.9 :** Matériaux fonctionnellement gradués avec différentes formes de gradient

- a) FGM discrètes/discontinues avec interface. b) FGM continues sans interface. c), f) Gradient de composition. d), g) Gradient d'orientation. e), h) Gradient de fraction.

### III.8 Domaines d'application des matériaux à gradients FGM :

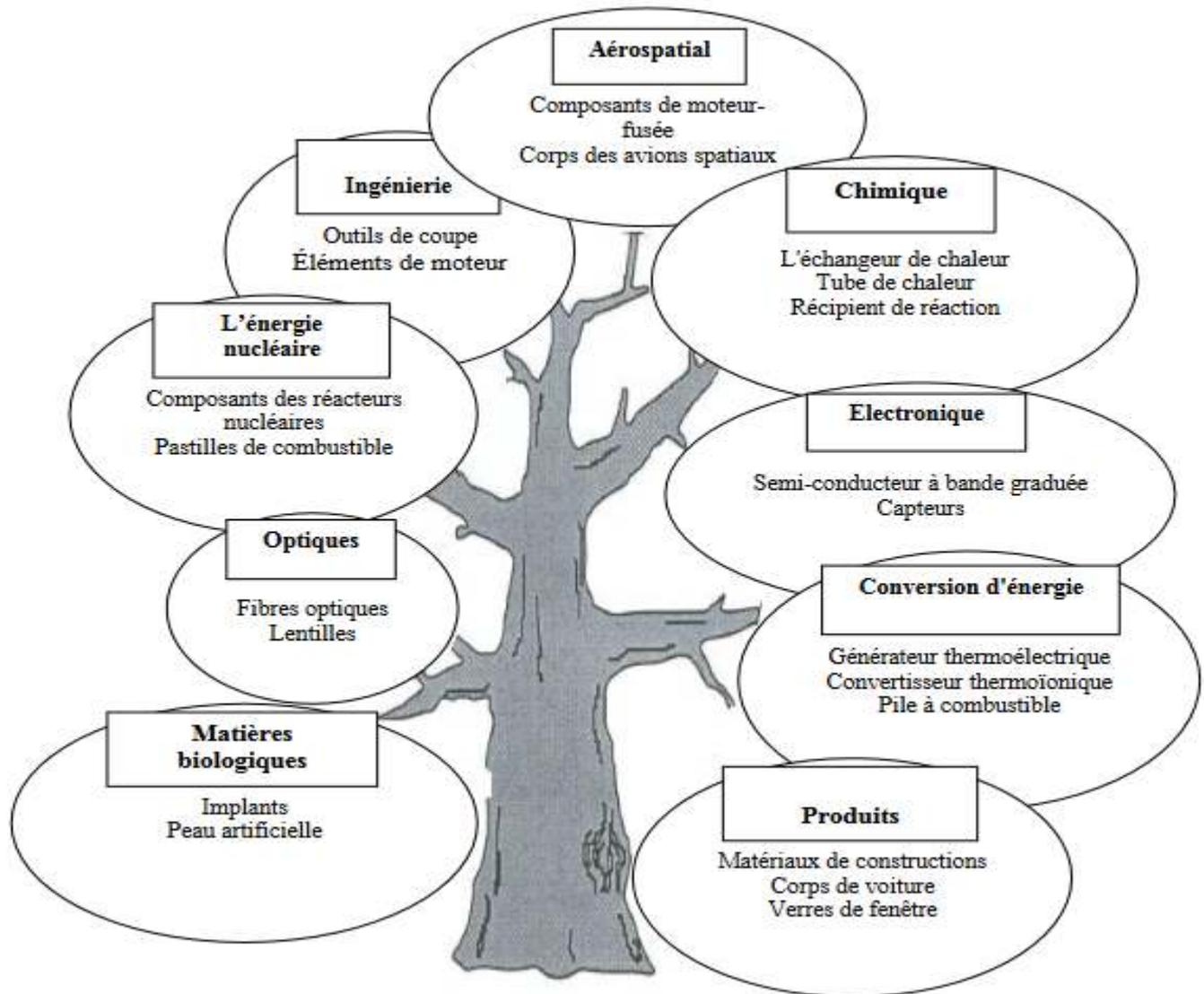


Figure III. 10: Les principaux domaines d'application des FGM

Le concept des matériaux à gradient évalués FGM est applicable dans des nombreux et larges intervalles de domaines tels que les matériaux de construction, matériaux de conversion d'énergie, aéronautique, aérospatiale, nucléaire et semi-conducteurs. Ainsi, ces matériaux ont deux propriétés contradictoires : la conductivité thermique et l'isolation thermique. Actuellement, ils permettent la production des matériaux légers, résistants et durables.

**Les principaux domaines d'application des FGM sont :**

**Génie civil :** ponts à poutre en caisson, les cheminées, les fondations élastiques (ces structures de plaques peuvent être trouvées dans différents types d'applications industrielles telles que radiers), réservoirs de stockage, les piscines, les tunnels, Les grands vitrages dans les zones chaudes.

### III.9 Propriétés matérielles effectives d'un matériau FGM :

Les matériaux à gradient de propriétés sont généralement fabriqués par deux phases matérielles avec des propriétés différentes. Une description détaillée des microstructures graduées réelles n'est pas disponible, excepté peut-être pour l'information sur la distribution de fraction volumique. Puisque la fraction de volume de chaque phase varie graduellement dans la direction de la graduation, les propriétés effectives des FGM changent le long de cette direction.

### III.10 Différence entre FGM et les matériaux composites traditionnels :

Les matériaux à gradient de propriétés sont donc des matériaux composites avec un caractère au microscope non homogène. Les changements continus de leur microstructure distinguent le FGM des matériaux composites conventionnels. Le changement continu de la composition a comme conséquence les gradients dans les propriétés de FGM. Les différences dans la microstructure et les propriétés entre FGM et matériaux composites conventionnels sont illustrées schématiquement sur la figure I.4 ; Il en résulte un gradient qui déterminera les propriétés des FGM. Dans certains cas, on peut avoir un FGM constitué d'un même matériau mais de microstructure différente.

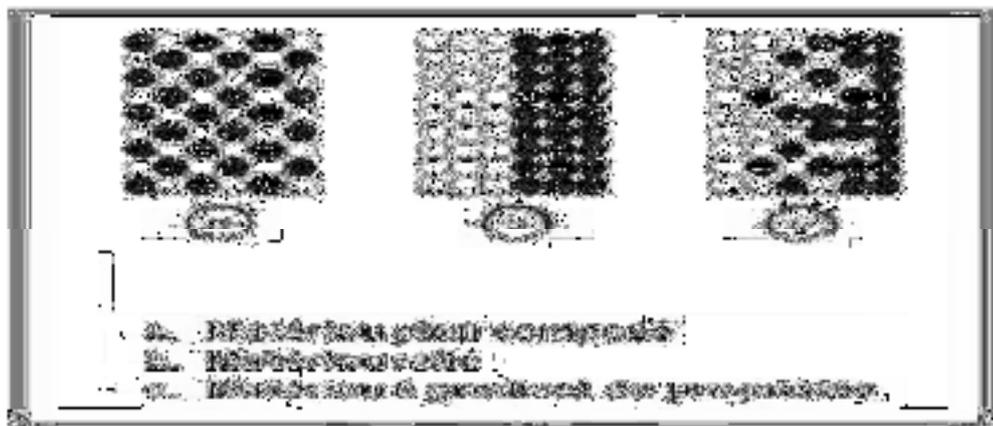


Figure III.11: La distribution composante des matériaux.

### III.11. Avantages et inconvénients des FGM :

#### III.11.1 Avantages de la FGM :

Outre l'accomplissement de son objectif principal, c'est à dire de fournir les différents requis des propriétés en divers points et des surfaces du futur produit qui, pourrait être réalisé

par un simple revêtement et beaucoup d'autres soulignent divers avantages supplémentaires de la FGM. Ils énumèrent certains avantages qui en résultent principalement de la non-existence d'une interface forte FGM, tels que:

- Diminuer les contraintes thermiques causées par les différences de coefficients de dilatation thermique des matériaux utilisés.
- Absence d'une interface nette devrait conduire à un contrôle d'ensemble mieux des contraintes
- Meilleure cohésion entre différents matériaux, par exemple un métal et une céramique.
- Extension de la région fonctionnelle avant d'atteindre la valeur limite de la déformation plastique.
- Suppression de délaminage.
- Augmentation de la ténacité à la rupture.
- Elimination des singularités des contraintes à divers endroits, tels que les surfaces libres, des coins, des racines de fissures, etc.

### **III.11.2 Inconvénient de la FGM:**

Le principal obstacle à une application plus large de la FGM est leur fabrication compliquée en raison de l'inadéquation des propriétés différentes, par exemple, la température de fusion, des affinités différentes pour divers autres éléments, la taille des particules, la morphologie, etc. Un exemple type est un mélange d'un métal avec la température de fusion ( $T_1$ ) et une céramique avec une température de fusion ( $T_2$ ).

Dans la plupart des cas, un tel couple est habitué élément ( $T_1 \ll T_2$ ). Puis, si la température de fabrication est d'environ ( $T_1$ ), la céramique est encore non fondue et la structure finale contient des particules de céramique non fondue dans une matrice métallique.

Dans de nombreux cas, une telle structure présente une grande porosité et une petite adhérence entre les différents composants et son application générale est limitée. Cependant pour des applications spéciales, la présence de particule est résidues (carbures) dans une matrice solide peut être souhaitable.

**III.12 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons défini les matériaux fonctionnellement gradués (FGM), leurs propriétés, leurs domaines d'application, est technique de fabrication de matériaux (FGM) (procédé de poudre sèche, coulage Séquentiel.....projection thermique).

La variation spatiale et progressive des propriétés de ces matériaux permet de créer des structures innovantes qui peuvent être utilisées dans de nombreux domaines d'application.

# **CHAPITRE IV**

**Théories des Poutres et  
Développement Mathématique  
Du présent Modèle**

## IV.1 introduction :

La théorie des poutres est un modèle mathématique utilisé pour les calculs Structure Les modèles les plus couramment utilisés sont :

- Théorie d'Euler-Bernoulli ignorant les effets de cisaillement.
- Théorie de Timochenko considérant l'effet de cisaillement.
- Théorie d'ordre supérieur.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les propriétés matérielles des poutres étudiées et leurs propriétés matérielles. Constitué d'une matrice polymère renforcée de nanotubes de carbone

Disposé en quatre formes différentes en fonction de l'épaisseur de la poutre.

Fonctions trigonométriques sophistiquées pour l'analyse de la flexion des poutres CNTRC. Le

L'équation du mouvement est dérivée du principe de Hamilton.

Dans cette théorie, le modèle est basé sur une distribution linéaire des déplacements.

On a utilisé une fonction raffinée trigonométrique pour analyser la flexion, des CNTRC. Les équations du mouvement sont obtenues à partir du principe d'Hamilton.

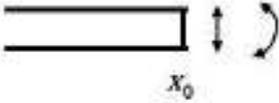
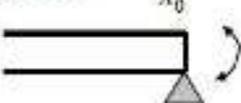
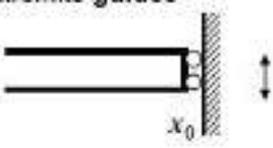
## IV.2 Historique des théories des poutres :

La paternité de la théorie des rayons est attribuée à Galilée, mais des recherches suggèrent que Léonard de Vinci l'a précédé. Da Vinci a supposé que la déformation linéairement partir du plan neutre, mais il n'a pas pu terminer les calculs car il ne connaissait pas la loi Hooke. Galileo a fait une hypothèse erronée (il a supposé que les contraintes de flexion étaient uniformément réparties) et c'est Antoine Parent qui a obtenu la bonne répartition. Leonard Euler et Jack Bernoulli ont d'abord proposé une théorie utile vers les années 1750 lorsque le neveu de Daniel Bernoulli, Daniel Bernoulli, a écrit des équations différentielles pour l'analyse des vibrations. À cette époque, le génie mécanique n'était pas en cor reconnu comme une science, le travail des académies de mathématiques n'était pas considéré comme pratique et les ponts et les bâtiments continuaient d'être construits de manière empirique. Il faudra attendre le XIXe siècle, avec la tour Eiffel et la grande roue, pour que la théorie soit validée à grande échelle.

### IV.3 Conditions aux limites d'une poutre :

Ils sont définis en considérant les quatre grandeurs qui caractérisent le mouvement de flexion, présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV- 1 : Principales conditions aux limites pour les poutres.

<p>extrémité libre</p>  <p><math>x_0</math></p>	<p>pas de contraintes sur le déplacement et la rotation <math>\Rightarrow</math> le <b>moment de flexion</b> et la <b>force de cisaillement</b> s'annulent en <math>x_0</math></p>	$M(x_0, t) = EI \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} \Big _{x=x_0} = 0$ $Q(x_0, t) = -EI \frac{\partial^3 w(x, t)}{\partial x^3} \Big _{x=x_0} = 0$
<p>extrémité encastree</p>  <p><math>x_0</math></p>	<p>les <b>déplacements</b> transversal et angulaires sont <b>nuls</b> en <math>x_0</math></p>	$w(x_0, t) = 0$ $\theta(x_0, t) = \frac{\partial w(x, t)}{\partial x} \Big _{x=x_0} = 0$
<p>extrémité simplement supportée</p>  <p><math>x_0</math></p>	<p>le <b>déplacement transversal</b> est bloqué mais la rotation est libre <math>\Rightarrow</math> le <b>moment de flexion</b> est donc nul en <math>x_0</math></p>	$w(x_0, t) = 0$ $M(x_0, t) = EI \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} \Big _{x=x_0} = 0$
<p>extrémité guidée</p>  <p><math>x_0</math></p>	<p>le déplacement transversal est libre et la <b>rotation</b> est bloquée <math>\Rightarrow</math> la <b>force de cisaillement</b> est donc nulle en <math>x_0</math></p>	$\theta(x_0, t) = \frac{\partial w(x, t)}{\partial x} \Big _{x=x_0} = 0$ $Q(x_0, t) = -EI \frac{\partial^3 w(x, t)}{\partial x^3} \Big _{x=x_0} = 0$

#### IV.4) Les différentes théories des poutres:

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

##### IV.4.1 Théorie d'Euler Bernoulli ou bien théorie classique des poutres:

Dans cette théorie, les modèles sont basés sur une distribution linéaire des déplacements suivant l'épaisseur de la poutre. L'hypothèse dans cette théorie: - Après déformation, les déformations dues au cisaillement transversal sont négligées (pas de cisaillement sur la hauteur de la poutre), La section reste perpendiculaire à la ligne moyenne de la poutre et la section plane reste plane. La fonction qui décrit la répartition de déplacement suivant l'épaisseur de la poutre égale à zéro [T Samira ,2017].

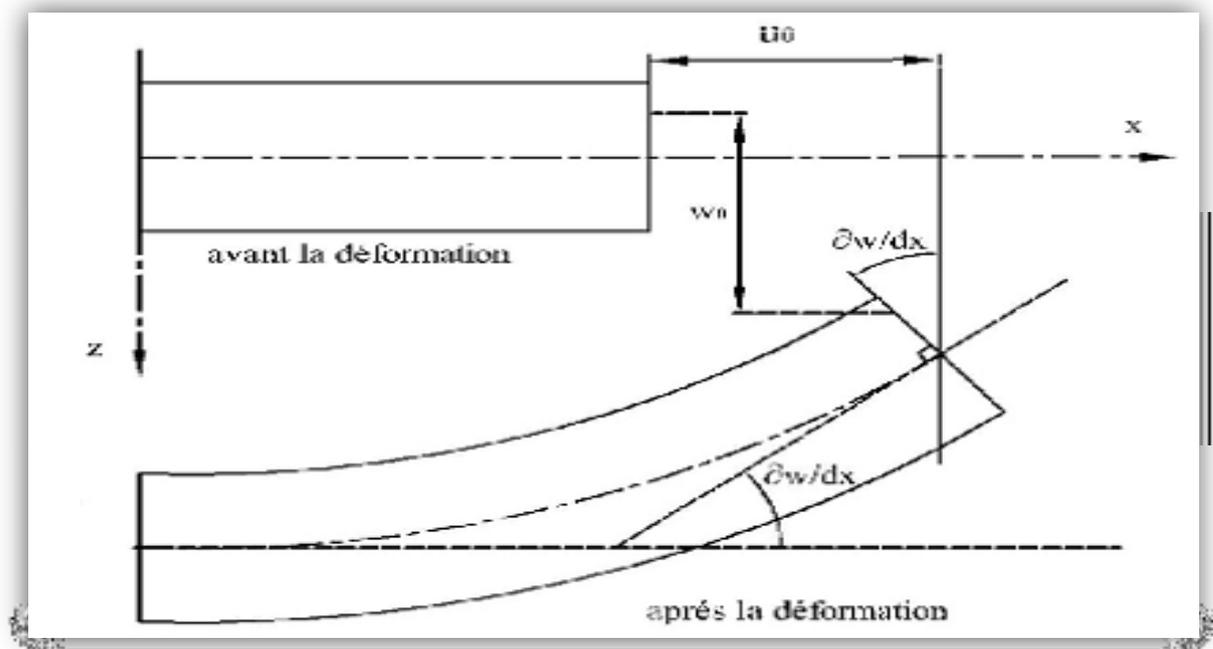


Figure. IV.1 La cinématique de la théorie classique des poutres

La fonction qui décrit la répartition de déplacement suivant l'épaisseur de la poutre est :  $\phi(z) = 0$   
 Pour le cas des poutres élancées et d'après la théorie classique des poutres, le déplacement d'un point M est donné par les deux composantes suivantes:

$$U(M) = \begin{cases} u(x, z) = u^0(x) - z w_x^0(x) \\ w(x, z) = w^0(x) \end{cases}$$

$u(x, z)$ : Le déplacement axial  $w(x, z)$  : Le déplacement transversal  $zw^0(x)$  : Le déplacement axial dû à la flexion  $u^0(x)$  : le déplacement axial de la fibre moyenne  $w^0(x)$  : le déplacement transversal de la fibre moyenne La rotation autour de l'axe Y, provoquée par la flexion est tel que:  $w_{,x}^0(x) = \frac{\partial w^0}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = 0$

$u^0(x)$  et  $w^0(x)$  sont les composantes de déplacement sur le centre de la section et l'axe de la poutre le long des axes X et Z, respectivement.

Lorsque cette théorie est utilisée pour l'analyse des fréquences propres du faisceau, la déviation est sous-estimée. Ceci est le résultat de l'ignorance de la déformation latérale.

#### IV.4.2 Théorie de Timoshenko(FSDT):

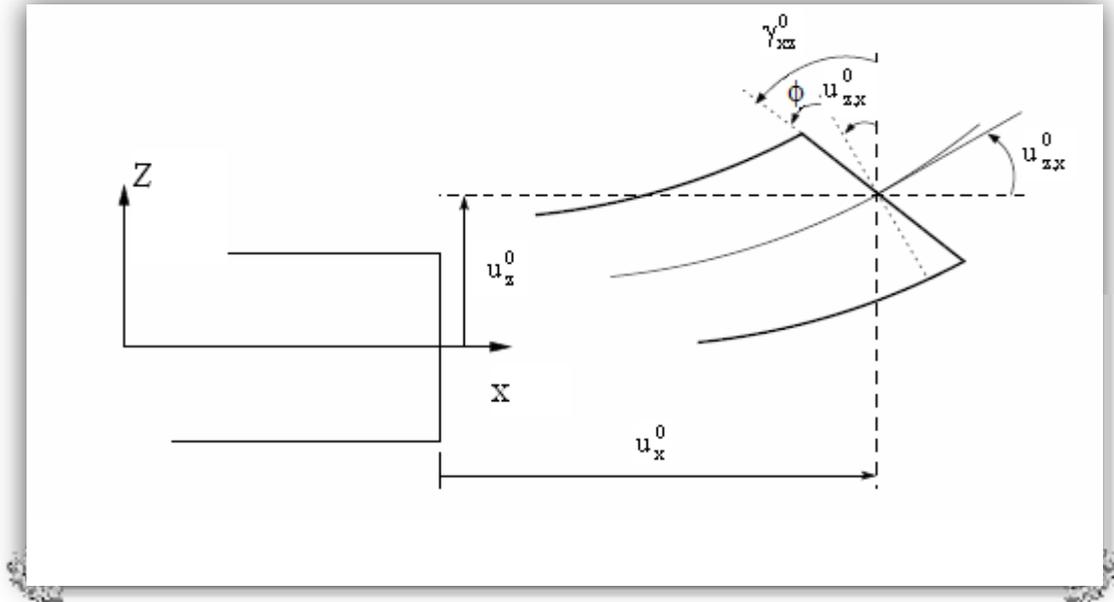
Les études sur la théorie de déformation en cisaillement du premier ordre (FSDT) s'applique pour le cas des poutres courtes, elle est basée sur le principe; qu'après déformation, la section plane reste plane mais elle perd sa perpendicularité par rapport à l'aligne moyenne de la poutre (figure IV.2). Ceci est dû au cisaillement transversal, découvert par Timoshenko, sur l'épaisseur de la poutre. Cette théorie peuvent être référée dans [Reissner 1945], [Mindlin 1951] qui a mené au modèle de plaque de Reissner-Mindlin. Ainsi que [Timoshenko 1959], [Reddy 1997] Dans le cas où nous avons un élancement faible, l'effet du cisaillement devient plus important sur la déformée. Dans ce cas, la fonction  $\Phi(z)$  est égale à Z. Il existe un cisaillement uniforme et les déformations dues au cisaillement transversal ne sont pas négligées. C'est la théorie de premier ordre (FSDBT). Le déplacement d'après Timoshenko s'écrit comme suit :

$$U(M) = \begin{cases} u(x, z) = u^0(x) - zw_{,x}^0(x) + z \gamma_{xz}^0(x) \\ w(x, z) = w^0(x) \end{cases}$$

$\gamma_{xz}^0(x)$ , c'est la déformation angulaire mesurée sur la ligne moyenne de la poutre.

Tel que :  $\gamma_{xz}^0(x) = w_{,x}^0(x) - \phi^0(x)$

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



**Figure IV.2:** Cinématique de Timoshenko.

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

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

Sachant que la contrainte de cisaillement est égale:

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

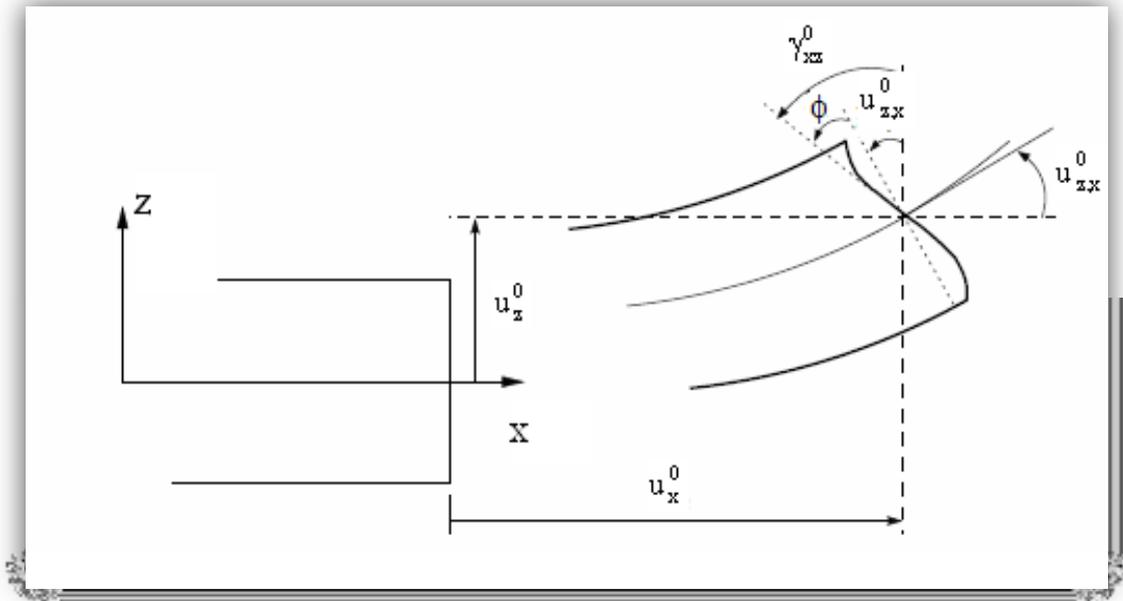
$G_{xz}$ : est le module de cisaillement transversal qui est supposé constant.

Dans cette théorie, la contrainte de cisaillement tangentielle est constante et uniformément sur l'épaisseur de la poutre ; cela signifie qu'ils sont également présents en haut et en bas de la poutre, mais sans les induire de contraintes Cet écart conduit à l'introduction d'un facteur de correction pour mieux tenir compte des efforts de cisaillement latéraux. Ces facteurs de correction, notés 'k', dépendent de la géométrie de la poutre considérée (par exemple  $k=5/6$  pour des poutres de section rectangulaire).

Cependant, bien que dérivées de la théorie classique, ces solutions sont gênées par des erreurs près des supports et des zones de dépression qui peuvent avoir des concentrations de contraintes et des champs de déplacement non uniformes.

### IV.4.3 Théorie d'Ordre Elevé :

Dans cette théorie la distribution des champs de déplacement est non linéaire selon l'épaisseur de la poutre. Elle est plus précise que la théorie du premier ordre puisqu'elle introduit une fonction qui tient compte du phénomène de "gauchissement". Ce phénomène apparaît lorsque la section transversale de la poutre perd sa planéité figure(IV.3). La fonction représente le gauchissement et sa dérivée  $\Phi'(z)$  le cisaillement [T Samira.2017].



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

Dans ce cas, le champ de déplacement devient :

$$U(M) = \begin{cases} u(x, z) = u^0(x) - zw_{,x}^0(x) + \Phi(z) \gamma_{xz}^0(x) \\ w(x, z) = w^0(x) \end{cases}$$

$$\gamma_{xz}(x) = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = -w_{,x}^0(x) + \Phi'(z) \gamma_{xz}^0(x) + w_{,x}^0(x)$$

$$\gamma_{xz}(x) = \Phi'(z) \gamma_{xz}^0(x)$$

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

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

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

Selon l'expression de la fonction de gauchissement  $\psi(z)$ , quelques modèles sont présentés dans la littérature des poutres en FGM :

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

$$\psi(z) = 0$$

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

$$\psi(z) = z$$

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

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

-Le modèle exponentiel proposé par (ESDBT) :

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

-Le modèle trigonométrique :

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

Avec :  $h$ : épaisseur de la poutre.

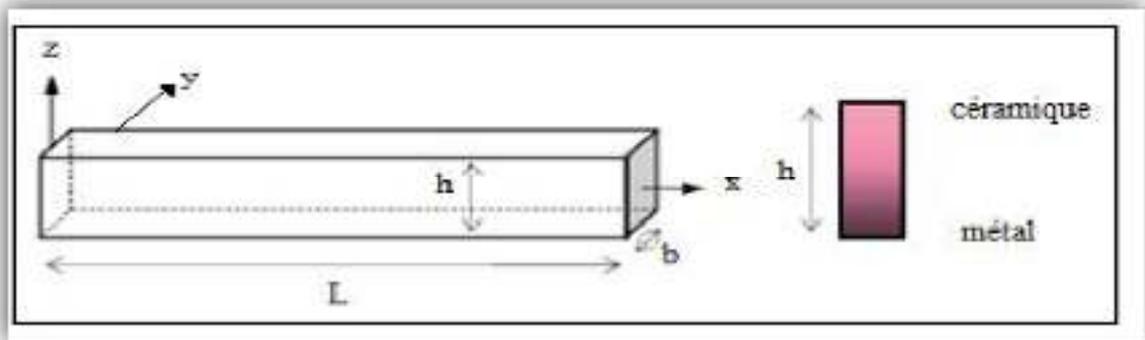
#### IV. 5 Développement Mathématique du présent modèle :

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

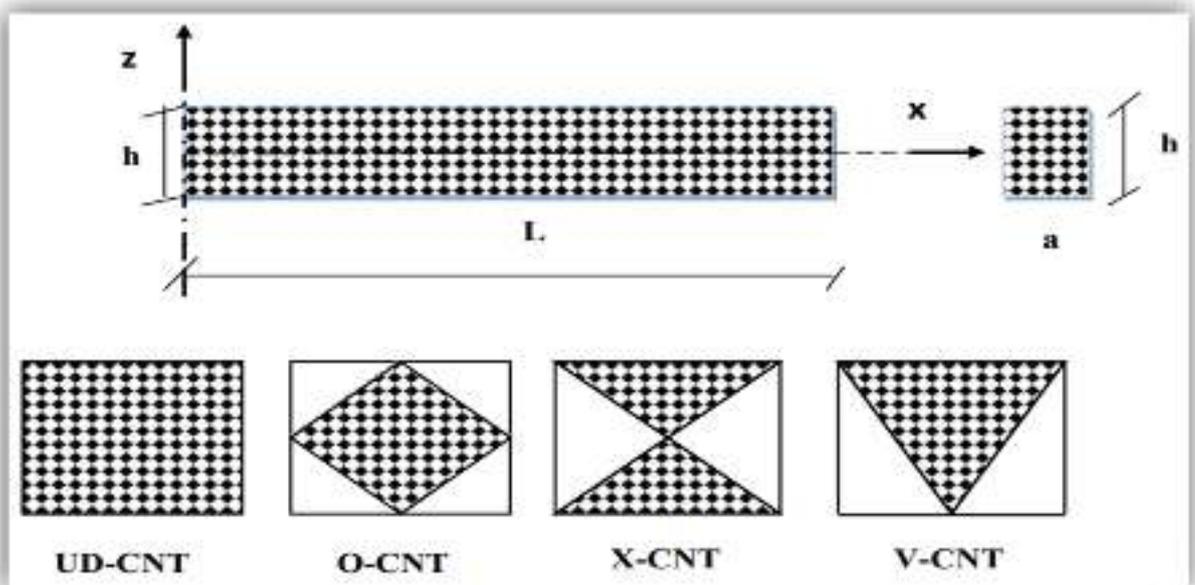
#### . IV.6 Propriétés matérielles des poutres FGM :

Un FGM peut être définie par la variation des fractions de volume. La plupart des chercheurs emploient la fonction de puissance, la fonction exponentielle, ou la fonction sigmoïde pour décrire les fractions de volume.

Les propriétés matérielles, le module de Young, la densité et le coefficient de poisson, sont variés de façon continue dans le sens de l'épaisseur «  $h$  » de la poutre.



**Figure IV.4:** Géométrie d'une poutre CNTRC en composite renforcé de nanotubes de carbone



**Figure IV.5 :** (a) Géométrie de la poutre (b) les différents modèles des dispositions des renforts.

Dans la présente étude, l'analyse de la flexion et des contraintes des poutres nano composites renforcées de nanotubes de carbone (CNTRC) est examinée à l'aide d'une théorie de déformation par cisaillement d'ordre supérieur (HSDT), et le défi le plus important a été d'obtenir la distribution optimale des NTC dans la matrice. Pour cela, nous avons introduit une nouvelle équation d'exposant pour la fraction volumique de CNT. Nous avons étudié les influences de divers paramètres sur l'analyse de flexion tels que les rapports d'aspect, la fraction volumique et l'ordre de l'exposant dans l'équation de la fraction volumique.

### IV.7 Géométrie et propriétés des poutres en composite renforcé de nanotubes de carbone (CNTRC) :

La distribution uniforme (UD) et les distributions fonctionnellement graduées (FG) du nanotube de carbone dans le sens de l'épaisseur des faisceaux nano composites (direction de l'axe  $z$ ) sont illustrées à la Fig. 1. La fraction volumique de CNT varie dans l'épaisseur du faisceau. Le faisceau CNTRC est constitué de SWCNTs noyés dans la matrice isotrope. Où est le degré exposant de nanotube de carbone en fraction volumique. Pour le cas de ( $n=0$ ) la distribution des nanotubes de carbone est uniforme dans la matrice (UD CNTs). Selon le modèle de règle de mélange, le module de Young et le module de cisaillement effectifs des poutres CNTRC peuvent être exprimés comme [Shen 2009]..

**Tableau IV.2 :** The CNT efficience paramètres ( $\eta$ )

Case	$\eta_1$	$\eta_2 = \eta_3$
$V_{cnt}^* = 0.12$	1.2833	1.0566
$V_{cnt}^* = 0.17$	1.3414	1.7101
$V_{cnt}^* = 0.28$	1.3238	1.7380

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

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

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

Où  $E_{11}^{cnt}$ ,  $E_{22}^{cnt}$ ,  $E^p$  et  $G_{12}^{cnt}$ ,  $G^p$  indiquent le module de Young et le module de cisaillement des SWCNT et de la matrice polymère, respectivement. Les paramètres d'efficacité du NTC ( $\eta$ ) liés à la fraction volumique ( $V_{cnt}^*$ ) qui sont présentés dans le tableau 2 sont tirés de Yas et Samadi (2012) : En utilisant la même règle, le coefficient de Poisson ( $\nu$ ) et la masse volumique ( $\rho$ ) du Les faisceaux CNTRC sont écrits comme :

$$\nu_{12} = V_{cnt} \nu_{12}^{cnt} + V_p \nu^p \quad (IV2a)$$

$$\rho = V_{cnt} \rho^{cnt} + V_p \rho^p \quad (I2 b)$$

Où  $V_{cnt}$  et  $V_p$  sont les fractions volumiques du CNT et du polymère, respectivement. La fraction de volume de CNT est supposée obéir à une fonction utilisée pour décrire la distribution graduée fonctionnellement uniforme et symétrique des CNTs alignés le long de la direction de l'épaisseur des plaques représentées dans (tableau 1): de nombreux chercheurs ont introduit une fonction linéaire de nombreuses distributions graduées de nanotubes de carbone [Shen 2009 , Yas et Samadi 2012]. Dans ce travail, nous introduisons un nouvel exposant distribution FG CNT. Dans ce cas, la fraction volumique des nanotubes de carbone le long de la direction de l'épaisseur du faisceau devient exponentielle, les  $V_{CNT}$  et  $V_p$  s'expriment comme suit :

$$V_{cnt} = \begin{cases} V_{cnt}^* & \text{pour UD poutre} \\ (n+1) \left(1 - 2 \frac{|z|}{h}\right)^n V_{cnt}^* & \text{pour O poutre} \\ (n+1) \left(2 \frac{|z|}{h}\right)^n V_{cnt}^* & \text{pour X poutre} \\ (n+1) \left(\frac{1}{2} + \frac{|z|}{h}\right)^n V_{cnt}^* & \text{pour V poutre} \end{cases} \quad (IV 3)$$

Où  $n$  est l'exposant de l'équation du degré de fraction volumique des nanotubes de carbone et  $V_{cnt}^*$  est la fraction volumique de CNTs qui peut être obtenu à partir de l'équation

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

Ici,  $W_{CNT}$  est la fraction massique des faisceaux CNT in CNTRC.

### IV.8 Équations de mouvement :

Pour décrire la flexion basée sur la théorie de la déformation par cisaillement d'ordre supérieur, le déplacement axial  $u$ , et le déplacement transversal de tout point de la poutre,  $w_s$ , ont été donnés par Simsek (2010)

$$\begin{cases} u(x, z, t) = u_0 - z \frac{\partial w_b}{\partial x} - f(z) \frac{\partial w_s}{\partial x} \\ w(x, z, t) = w_b(x, t) + w_s(x, t) \end{cases} \quad (\text{IV } 5)$$

Où  $U_0$  est le déplacement axial, les  $w_b$  et  $w_s$  sont les Composantes de flexion et de cisaillement du déplacement transversal le long du plan médian de la poutre. La fonction de forme  $f(z)$  est choisie sur la base d'une théorie de déformation par cisaillement du troisième ordre comme Reissner (1945)

$$f(z) = z - \frac{5}{4} z \left( 1 - \frac{4z^2}{3h^2} \right) \quad (\text{IV } 6)$$

Les composantes de déformation normale et de cisaillement associées au champ de déplacement dans l'équation. (5) sont les suivants :

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_b}{\partial x^2} - f(z) \frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2} \\ \gamma_{xz} = g(z) \frac{\partial w_s}{\partial x} \end{cases} \quad (\text{IV } 7a)$$

Où

$$g(z) = 1 - \frac{df(z)}{dz} \quad (\text{IV } 7b)$$

Le stress normal  $\sigma_x$  et la contrainte de cisaillement  $\gamma_{xz}$  sont donnés par la loi de comportement élastique linéaire sous la forme :

$$\begin{cases} \sigma_x = Q_{11}(z) \varepsilon_x \\ \tau_{xz} = Q_{55}(z) \gamma_{xz} \end{cases} \quad (\text{IV } 8a)$$

Où

$$\begin{cases} Q_{11}(z) = \frac{E_{11}(z)}{1-\nu^2} \\ Q_{55}(z) = G_{12}(z) \end{cases} \quad (\text{IV } 8b)$$

Basé sur le principe de Hamilton, les équations du mouvement sont obtenues par

$$\int (\delta U + \delta V) = 0 \quad (\text{IV } 9)$$

Où  $\delta$  représente le symbole de Kronecker,  $\nu$  l'énergie potentielle : L'énergie de déformation virtuelle de la poutre est

$$\delta U = \int_0^L \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_x \delta \varepsilon_x + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz}) dz dx = \int_0^L \left( N \frac{d\delta u_0}{dx} - M_b \frac{d^2 \delta w_b}{dx^2} - M_s \frac{d^2 \delta w_s}{dx^2} + Q \frac{d\delta w_s}{dx} \right) dx \quad (\text{IV } 10)$$

Les contraintes résultantes de contrainte N, Mb, Ms, Q sont définies comme

$$(N, M_b, M_s) = \int_0^L (1, z, f) \sigma_x dz, \quad Q = \int_{-h/2}^{h/2} g \tau_{xz} dz \quad (\text{IV } 11)$$

Le travail virtuel effectué ( $\delta V$ ), par la charge transversale ( $q$ ) peut-être exprimé comme

$$\delta V = - \int_0^L q (\delta w_b + \delta w_s) dx \quad (\text{IV } 12)$$

En substituant les expressions de  $\delta U$ ,  $\delta V$  à partir des éqs. (10) et (12), dans l'équation. (9) et en intégrant par parties en fonction des variables d'espace et de temps, et en collectant les coefficients  $\delta u_0$ ,  $\delta w_b$ , et  $\delta w_s$  et les équations de mouvement suivantes du faisceau du CNTRC sont obtenues

$$\begin{cases} \delta u_0: \frac{dN}{dx} = 0 \\ \delta w_b: \frac{d^2 M_b}{dx^2} + q = 0 \\ \delta w_s: \frac{d^2 M_s}{dx^2} + \frac{dQ}{dx} + q = 0 \end{cases} \quad (\text{IV } 13)$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} N = A_{11} \frac{du_0}{dx} - B_{11} \frac{d^2w_b}{dx^2} - B_{11}^S \frac{d^2w_s}{dx^2} \\ M_b = B_{11} \frac{du_0}{dx} - D_{11} \frac{d^2w_b}{dx^2} - D_{11}^S \frac{d^2w_s}{dx^2} \\ M_s = B_{11}^S \frac{du_0}{dx} - D_{11}^S \frac{d^2w_b}{dx^2} - H_{11}^S \frac{d^2w_s}{dx^2} \\ Q = A_{55}^S \frac{dw_s}{dx} \end{array} \right. \quad (\text{IV } 14)$$

Où  $A_{11}$ ,  $D_{11}$ , etc., sont la rigidité de la poutre, définie par

$$\left\{ \begin{array}{l} (A_{11}, B_{11}, D_{11}) = \int_{-h/2}^{h/2} (1, z, z^2) dz \\ (B_{11}^S, D_{11}^S, H_{11}^S) = \int_{-h/2}^{h/2} (f(z), zf(z); f^2(z)) dz \\ A_{55}^S = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{55}[g(z)] dz \end{array} \right. \quad (\text{IV } 15)$$

En remplaçant l'expression de l'Eq. (13) des résultantes de contrainte dans l'Eq. (14), on obtient

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{11} \frac{d^2u_0}{dx^2} - B_{11} \frac{d^3w_b}{dx^3} - B_{11}^S \frac{d^3w_s}{dx^3} = 0 \\ B_{11} \frac{d^3u_0}{dx^3} - D_{11} \frac{d^4w_b}{dx^4} - D_{11}^S \frac{d^4w_s}{dx^4} + q = 0 \\ B_{11}^S \frac{d^3u_0}{dx^3} - D_{11}^S \frac{d^4w_b}{dx^4} - D_{11}^S \frac{d^4w_s}{dx^4} + A_{55}^S \frac{d^2w_s}{dx^2} + q = 0 \end{array} \right. \quad (\text{IV } 16)$$

#### IV. 9 Solution analytique :

Dans ce travail, la méthode de résolution de Navier pour une poutre CNTRC simplement appuyée est adoptée pour déterminer la solution analytique. Ainsi, les développements suivants de les déplacements ( $u_0$ ,  $w_b$ ,  $w_s$ ) sont supposés

$$\left\{ \begin{array}{l} u_0 \\ w_b \\ w_s \end{array} \right\} = \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \begin{array}{l} u_m \cos(\lambda x) e^{i\omega t} \\ W_{bm} \sin(\lambda x) e^{i\omega t} \\ W_{sm} \sin(\lambda x) e^{i\omega t} \end{array} \right\} \quad (\text{IV } 17)$$

Où  $U_m$ ,  $W_{bm}$  et  $W_{sm}$  sont des paramètres arbitraires à déterminer,  $w$  est la fréquence associée au mode  $m$ , et  $\lambda = m\pi/L$ . La charge transversale  $q$  est également étendue dans la série de Fourier comme

$$\begin{cases} q(x) = \sum_{n=1}^{\infty} Q_m \sin(\lambda x) \\ Q_m = \frac{2}{L} \int_0^L q(x) \sin(\lambda x) dx \end{cases} \quad (\text{IV } 18\text{a})$$

Le coefficient  $Q_m$  sont donnés ci dessous pour quelques exemples typiques charge

$$\begin{cases} Q_m = q_0, m = 1 \\ Q_m = \frac{4q_0}{m\pi}, m = 1,3,5 \end{cases} \quad (\text{IV } 18\text{b})$$

Remplacer les expansions de  $(u_0, w_b, w_s)$  et  $q$  des équations. (17) et (18b) dans les équations de mouvement Eq. (16), les solutions analytiques peuvent être déterminées à partir des équations suivantes

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_m \\ W_{bm} \\ W_{sm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Q_m \\ Q_m \end{bmatrix} \quad (\text{IV } 19\text{a})$$

Où

$$S_{11} = A_{11}\lambda^2; S_{12} = -B_{11}\lambda^3; S_{13} = -B_{11}^S\lambda^3;$$

$$S_{22} = D_{11}\lambda^4; S_{23} = -D_{11}\lambda^4; \quad (\text{IV } 19\text{b})$$

$$S_{33} = H_{11}^S\lambda^4 + A_{55}^S\lambda^2$$

## IV. 10 Conclusion :

Dans cette partie de la mémoire. Divers types de théories des poutre ont été introduits, notamment la théorie classique (CBT), la théorie du cisaillement du premier ordre (FSDBT) et la théorie d'ordre supérieur HSDBT.

Nous avons présenté différents modèles de poutres dans une approche monocouche. Les modèles monocouches équivalents sont plus adaptées aux matériaux FGM car ils n'ont pas de changements brusques dans les propriétés mécaniques contrairement aux composites conventionnels où le délaminage est un problème inévitable.

Les solutions analytiques du comportement statique des poutres nanocomposites renforcées par des nanotubes de carbone sont obtenues en utilisant une théorie raffinée trigonométrique et qui n'exige pas de facteur de correction de cisaillement.

-Les nanotubes de carbone mono paroi (SWCNTs) sont alignés et répartis dans une matrice polymère avec différents types de renforcement.

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

**CHAPITRE V :**  
**RESULTATS ET**  
**DISCUSSIONS**

## IV.1 introduction :

Ce chapitre est consacré à l'étude du comportement en flexion des poutres CNTRC (Composite NanoTube Reinforced Composite). Les poutres CNTRC sont des structures composites renforcées par des nanotubes de carbone, qui présentent des propriétés mécaniques exceptionnelles, telles que la résistance à la traction, la rigidité et la légèreté. Dans ce chapitre, les résultats numériques des tests de flexion des poutres CNTRC sont présentés et discutés. Les propriétés matérielles des matériaux utilisés dans l'étude, y compris le matériau de renforcement à base de nanotubes de carbone à armchair (10, 10), sont également présentées. Les résultats de cette étude sont importants pour la compréhension des propriétés mécaniques des poutres CNTRC et pour leur utilisation potentielle dans de nombreuses applications, telles que l'aérospatiale, l'automobile et la construction.

Ses propriétés matérielles sont les suivantes :

$$V^p = 0.3 ; P^p = 1190 \text{ Kg/m}^3 ; E^p = 2.5 \text{ GPa}$$

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

$$V_{cnt} = 0.19 ; \rho^{cnt} = 1400 \text{ Kg/m}^3 ; E_{11}^{cnt} = 600 \text{ GPa} ; E_{22}^{cnt} = 10 \text{ GPa} ; E_{12}^{cnt} = 17.2 \text{ GPa}$$

Les formules adimensionnelles suivantes sont utilisées:

**Tableau V.1:** La flèche et les contraintes sans dimension

$\bar{w}$	$\bar{\sigma}_x$	$\bar{\tau}_{xz}$
$100 \frac{E_p h^3}{q_0 L^4} W$	$\frac{h}{q_0 L} \sigma_x \left( \frac{l}{2}, \frac{h}{2} \right)$	$\frac{h}{q_0 L} \tau_{xz}(0,0)$

## V.2 Résultats et discussion pour l'analyse de flexion :

Le **tableau V.2** nous présente une comparaison entre la déflexion centrale sans dimension et les contraintes. Il est intéressant de constater que la déflexion et les contraintes sont plus importantes pour le composite renforcé UD-CNT lorsque la charge est uniforme plutôt que sinusoïdale. De plus, une augmentation du rapport d'aspect et de la fraction volumique des CNT contribue à rendre les poutres CNTRC plus rigides. Cette comparaison nous permet de constater que les résultats sont en bon accord.

**Tableau V.2:** Déplacements et contraintes sans dimension des poutres UD sous charges uniformes et sinusoïdales.

$V_{cnt}^*$	L/h	Théories	Charges uniformes			Charges sinusoïdales		
			$\bar{w}$	$\bar{\sigma}_x$	$\bar{\tau}_{xz}$	$\bar{w}$	$\bar{\sigma}_x$	$\bar{\tau}_{xz}$
0,12	10	Rachid Zerrouki et al.	0.704	8.400	0.701	0.562	6.970	0.472
		<b>Présente</b>	<b>0.6966</b>	<b>8.1039</b>	<b>0.6150</b>	<b>0.5561</b>	<b>6.6814</b>	<b>0.4043</b>
	15	Rachid Zerrouki et al.	0.524	11.850	0.717	0.416	9.716	0.475
		<b>Présente</b>	<b>0.5203</b>	<b>11.6526</b>	<b>0.6223</b>	<b>0.4133</b>	<b>9.5210</b>	<b>0.4049</b>
	20	Rachid Zerrouki et al.	0.461	15.450	0.725	0.365	12.608	0.476
		<b>Présente</b>	<b>0.4585</b>	<b>15.3020</b>	<b>0.6259</b>	<b>0.3633</b>	<b>12.4603</b>	<b>0.4052</b>
0,17	10	Rachid Zerrouki et al.	0.449	8.270	0.704	0.358	6.842	0.473
		<b>Présente</b>	<b>0.4448</b>	<b>8.0170</b>	<b>0.6166</b>	<b>0.3548</b>	<b>6.5949</b>	<b>0.4045</b>
	15	Rachid Zerrouki et al.	0.344	11.763	0.720	0.273	9.630	0.476
		<b>Présente</b>	<b>0.3417</b>	<b>11.5947</b>	<b>0.6234</b>	<b>0.2712</b>	<b>9.4632</b>	<b>0.4050</b>
	20	Rachid Zerrouki et al.	0.307	15.385	0.727	0.243	12.543	0.476
		<b>Présente</b>	<b>0.3055</b>	<b>15.2585</b>	<b>0.6267</b>	<b>0.2419</b>	<b>12.4169</b>	<b>0.4052</b>
0,28	10	Rachid Zerrouki et al.	0.325	8.564	0.697	0.260	7.130	0.472
		<b>Présente</b>	<b>0.3217</b>	<b>8.2143</b>	<b>0.6130</b>	<b>0.2571</b>	<b>6.7911</b>	<b>0.4041</b>
	15	Rachid Zerrouki et al.	0.235	11.959	0.714	0.187	9.824	0.475
		<b>Présente</b>	<b>0.2329</b>	<b>11.7262</b>	<b>0.6210</b>	<b>0.1852</b>	<b>9.5944</b>	<b>0.4048</b>
	20	Rachid Zerrouki et al.	0.203	15.532	0.723	0.161	12.689	0.476
		<b>Présente</b>	<b>0.2017</b>	<b>15.3572</b>	<b>0.6250</b>	<b>0.1599</b>	<b>12.5154</b>	<b>0.4051</b>

En examinant attentivement le **tableau V.3**, nous pouvons constater que pour une valeur de rapport d'aspect de 10, une fraction volumique de nanotube de carbone de 0,12 et une charge sinusoïdale, les déplacements de la poutre à distribution parabolique ( $n = 2$ ) sont inférieurs à ceux de la distribution linéaire en X-beam. Cependant, en ce qui concerne les poutres O-Poutre et V-Poutre, nous constatons l'inverse, à savoir des déplacements plus importants. Cette information est utile pour mieux comprendre les caractéristiques des différents types de poutres et peut aider à orienter les choix de conception pour des applications spécifiques.

**Tableau V.3** Déplacements et contraintes adimensionnels sous charges sinusoïdales en distribution linéaire et exponentielle

	Théories	$n = 1$			$n = 2$			$n = 3$		
		$\bar{w}$	$\bar{\sigma}_x$	$\bar{\tau}_{xz}$	$\bar{w}$	$\bar{\sigma}_x$	$\bar{\tau}_{xz}$	$\bar{w}$	$\bar{\sigma}_x$	$\bar{\tau}_{xz}$
X-Beam	Rachid Zerrouki et al.	0.461	9.526	0.425	0.424	11.900	0.426	-	-	-
	<b>Présente</b>	<b>0.4585</b>	<b>9.0947</b>	<b>0.3623</b>	<b>0.4245</b>	<b>11.4074</b>	<b>0.3641</b>	<b>0.4069</b>	<b>13.6418</b>	<b>0.3652</b>
O-Poutre	Rachid Zerrouki et al.	0.873	0.351	0.558	1.241	0.550	0.657	-	-	-
	<b>Présente</b>	<b>0.8505</b>	<b>0.3369</b>	<b>0.4668</b>	<b>1.2089</b>	<b>0.5318</b>	<b>0.5446</b>	<b>1.6201</b>	<b>0.7562</b>	<b>0.6494</b>
V-Poutre	Rachid Zerrouki et al.	0.699	13.533	0.472	0.863	21.015	0.444	-	-	-
	<b>Présente</b>	<b>0.6935</b>	<b>12.9656</b>	<b>0.4030</b>	<b>0.8656</b>	<b>20.3809</b>	<b>0.3845</b>	<b>1.0556</b>	<b>28.5512</b>	<b>0.3662</b>

**Tableau V.4** montre la variation des déformations et des contraintes sans dimension avec la variation de l'exposant  $n$

X-Beam		Charges uniformes			Charges sinusoïdales		
$n$	Théories	$\bar{w}$	$\bar{\sigma}_x$	$\bar{\tau}_{xz}$	$\bar{w}$	$\bar{\sigma}_x$	$\bar{\tau}_{xz}$
0.00	Rachid Zerrouki et al.	0,704	8,400	0,701	0,562	6,970	0,472
	<b>Présente</b>	<b>0.6966</b>	<b>8.1039</b>	<b>0.6150</b>	<b>0.5561</b>	<b>6.6814</b>	<b>0.4043</b>
0.50	Rachid Zerrouki et al.	0,621	9,941	0,625	0,496	8,275	0,423
	<b>Présente</b>	<b>0.6147</b>	<b>9.5551</b>	<b>0.5470</b>	<b>0.4915</b>	<b>7.9018</b>	<b>0.3609</b>
1.00	Rachid Zerrouki et al.	0,577	11,426	0,626	0,461	9,526	0,425
	<b>Présente</b>	<b>0.5728</b>	<b>10.9789</b>	<b>0.5480</b>	<b>0.4585</b>	<b>9.0947</b>	<b>0.3623</b>
1.50	Rachid Zerrouki et al.	0,549	12,864	0,627	0,439	10,732	0,426
	<b>Présente</b>	<b>0.5472</b>	<b>12.3771</b>	<b>0.5489</b>	<b>0.4382</b>	<b>10.2622</b>	<b>0.3634</b>
2.00	Rachid Zerrouki et al.	0,530	14,264	0,628	0,424	11,901	0,426
	<b>Présente</b>	<b>0.5299</b>	<b>13.7522</b>	<b>0.5497</b>	<b>0.4245</b>	<b>11.4074</b>	<b>0.3641</b>
2.50	Rachid Zerrouki et al.	0,515	15,633	0,628	0,413	13,040	0,426
	<b>Présente</b>	<b>0.5172</b>	<b>15.1071</b>	<b>0.5504</b>	<b>0.4145</b>	<b>12.5331</b>	<b>0.3647</b>
3.00	Rachid Zerrouki et al.	0,504	16,976	0,628	0,404	14,154	0,425
	<b>Présente</b>	<b>0.5076</b>	<b>16.4443</b>	<b>0.5511</b>	<b>0.4069</b>	<b>13.6418</b>	<b>0.36418</b>
3.50	Rachid Zerrouki et al.	0,495	18,298	0,628	0,397	15,246	0,425
	<b>Présente</b>	<b>0.4999</b>	<b>17.7659</b>	<b>0.5516</b>	<b>0.4008</b>	<b>14.4008</b>	<b>0.4008</b>

Le tableau V.4 présenté ci-dessus expose les résultats de l'analyse de la variation des déformations et des contraintes sans dimension, en fonction de la variation de l'exposant  $n$  de la fraction volumique de CNT, pour le cas où  $V_{cnt}^*$  est égal à 0,12,  $l/h$  est égal à 10, la poutre X est utilisée, et pour deux types de charges différentes, à savoir les charges uniformes et les charges sinusoïdales.

Les résultats obtenus ont permis de constater que l'augmentation de l'exposant  $n$  conduit à une diminution de la flèche, ainsi qu'à une augmentation des contraintes, ce qui a pour effet de rendre les poutres CNTRC plus rigides. Cette découverte est d'une grande importance pour la conception de structures composites renforcées par des nanotubes de carbone, car elle offre une méthode pour améliorer les propriétés mécaniques de ces structures.

De plus, ces résultats peuvent être utilisés pour optimiser la conception de poutres CNTRC pour une application spécifique, en ajustant la fraction volumique de CNT en fonction de l'exposant  $n$  et du type de charge appliquée. Cette méthode peut aider les ingénieurs et les concepteurs à créer des structures composites renforcées par des nanotubes de carbone plus légères, plus résistantes et plus rigides, offrant ainsi une performance mécanique optimale pour une variété d'applications.

Le tableau V.5 illustre les fluctuations des déplacements et des contraintes sans dimension en fonction de l'indice  $n$  de la fraction volumique des nanotubes de carbone (NTC), pour le cas de  $V_{cnt}^* = 0,12$  et  $l/h = 10$ , pour les poutres V et O, sous deux types de charges différentes, à savoir les charges uniformes et les charges sinusoïdales. Il est possible d'observer que l'augmentation de l'indice  $n$  conduit à une augmentation de la flèche, ce qui rend les poutres CNTRC moins rigides.

En ce qui concerne la poutre V, il est notable que l'augmentation de l'indice  $n$  de la fraction volumique des NTC conduit à une augmentation de la contrainte normale  $\bar{\sigma}_x$ , tandis que la contrainte de cisaillement  $\bar{\tau}_x$  diminue. Ces résultats peuvent fournir des informations précieuses pour la conception et la fabrication de structures de CNTRC pour une variété d'applications dans lesquelles la rigidité et la résistance sont des considérations importantes.

Le tableau V.6 expose l'influence de la fraction volumique et du rapport d'aspect des nanotubes de carbone (CNT) sur les déplacements et les contraintes sans dimension dans le CNTRC de poutre en X, avec une distribution parabolique ( $n = 2$ ). Il est évident que la valeur des déplacements verticaux et horizontaux sans dimension, notées respectivement  $\bar{w}$  et  $\bar{u}$ , diminue lorsque les valeurs de la fraction volumique augmentent. Cette même tendance est observée lorsque le rapport d'aspect augmente. Les résultats de cette analyse peuvent fournir des informations précieuses pour la conception et la fabrication de structures de CNTRC pour une variété d'applications.

**Tableau V.5** montre la variation des déformations et des contraintes sans dimension avec la variation de l'exposant  $n$  pour les deux poutres O et V.

O-Poutre/ V-Poutre		Charges uniformes			Charges sinusoïdales		
n	Théories	$\bar{w}$	$\bar{\sigma}_x$	$\bar{\tau}_{xz}$	$\bar{w}$	$\bar{\sigma}_x$	$\bar{\tau}_{xz}$
0.00	Présente V-Poutre	0.6966	8.1039	0.6150	0.5561	6.6814	0.4043
	Présente O-Poutre	0.6966	8.1039	0.6150	0.5561	6.6814	0.4043
0.50	Présente V-Poutre	0.7757	11.7033	0.6212	0.6186	9.6585	0.4078
	Présente O-Poutre	0.8721	0.3072	0.6661	0.6948	0.2527	0.4341
1.00	Présente V-Poutre	0.8708	15.7242	0.6131	0.6935	12.9656	0.4030
	Présente O-Poutre	1.0695	0.4105	0.7205	0.8505	0.3369	0.4668
1.50	Présente V-Poutre	0.9763	20.1053	0.5992	0.7765	16.5549	0.3943
	Présente O-Poutre	1.2873	0.5253	0.7795	1.0223	0.4302	0.5032
2.00	Présente V-Poutre	1.0895	24.7875	0.5838	0.8656	20.3809	0.3845
	Présente O-Poutre	1.5239	0.6505	0.8455	1.2089	0.5318	0.5446
2.50	Présente V-Poutre	1.2083	29.7094	0.5690	0.9591	24.3959	0.3749
	Présente O-Poutre	1.7774	0.7849	0.9213	1.4088	0.6408	0.5926
3.00	Présente V-Poutre	1.3308	34.8090	0.5557	1.0556	28.5512	0.3662
	Présente O-Poutre	2.0455	0.9273	1.0104	1.6201	0.7562	0.6494
3.50	Présente V-Poutre	1.4554	40.0260	0.5442	1.1536	32.7990	0.3586
	Présente O-Poutre	2.3258	1.0764	1.1178	1.8410	0.8771	0.7182

En ce qui concerne la poutre O, il est important de noter que l'augmentation de l'indice  $n$  de la fraction volumique des nanotubes de carbone (NTC) conduit à une diminution de la contrainte normale  $\bar{\sigma}_x$ , tandis que la contrainte de cisaillement  $\bar{\tau}_x$  augmente. Ces résultats peuvent avoir des implications importantes pour la conception et la fabrication de structures de CNTRC pour une variété d'applications dans lesquelles la résistance à la traction et la résistance au cisaillement sont des facteurs critiques. En comprenant comment la fraction volumique et l'indice  $n$  des NTC affectent les contraintes et les déformations dans les structures de CNTRC, les ingénieurs peuvent améliorer la conception et les performances des matériaux composites pour répondre aux besoins de diverses applications industrielles et scientifiques.

**Le tableau V.6** Déplacements et contraintes adimensionnels sans fondation élastique sous charges uniformes et sinusoïdales avec distribution parabolique ( $n=2$ )

$V_{cnt}^*$	L/h	Théories	Charges uniformes			Charges sinusoïdales		
			$\bar{w}$	$\bar{\sigma}_x$	$\bar{\tau}_{xz}$	$\bar{w}$	$\bar{\sigma}_x$	$\bar{\tau}_{xz}$
0.12	10	Rachid Zerrouki et al.	0.5300	14.2640	0,628	0,424	11,901	0,426
		<b>Présente</b>	<b>0.5299</b>	<b>13.7522</b>	<b>0.5497</b>	<b>0.4245</b>	<b>11.4074</b>	<b>0.3641</b>
	15	Rachid Zerrouki et al.	0,356	19,796	0,645	0,284	16,281	0,429
		<b>Présente</b>	<b>0.3552</b>	<b>19.4546</b>	<b>0.5580</b>	<b>0.2831</b>	<b>15.9452</b>	<b>0.3651</b>
	20	Rachid Zerrouki et al.	0,294	25,648	0,653	0,234	20,968	0,430
		<b>Présente</b>	<b>0.2939</b>	<b>25.3917</b>	<b>0.5622</b>	<b>0.2335</b>	<b>20.7143</b>	<b>0.3654</b>
0.17	10	Rachid Zerrouki et al.	0,336	14,029	0,615	0,269	11,672	0,415
		<b>Présente</b>	<b>0.3339</b>	<b>13.5636</b>	<b>0.5299</b>	<b>0.2673</b>	<b>11.2212</b>	<b>0.3502</b>
	15	Rachid Zerrouki et al.	0,232	19,636	0,630	0,184	16,124	0,418
		<b>Présente</b>	<b>0.2301</b>	<b>19.3256</b>	<b>0.5374</b>	<b>0.1833</b>	<b>15.8178</b>	<b>0.3510</b>
	20	Rachid Zerrouki et al.	0,195	25,524	0,637	0,154	20,847	0,419
		<b>Présente</b>	<b>0.1937</b>	<b>25.2915</b>	<b>0.5411</b>	<b>0.1538</b>	<b>20.6158</b>	<b>0.3512</b>
0.28	10	Rachid Zerrouki et al.	-	-	-	-	-	-
		<b>Présente</b>	<b>0.2559</b>	<b>14.0240</b>	<b>0.4691</b>	<b>0.2053</b>	<b>11.6824</b>	<b>0.3119</b>
	15	Rachid Zerrouki et al.	-	-	-	-	-	-
		<b>Présente</b>	<b>0.1650</b>	<b>19.6078</b>	<b>0.4770</b>	<b>0.1317</b>	<b>16.1070</b>	<b>0.3129</b>
	20	Rachid Zerrouki et al.	-	-	-	-	-	-
		<b>Présente</b>	<b>0.1331</b>	<b>25.4773</b>	<b>0.4809</b>	<b>0.1058</b>	<b>20.8122</b>	<b>0.3132</b>

Plusieurs configurations ont été analysées afin d'étudier la flexion centrale en faisant varier l'exposant  $n$ , le rapport d'aspect  $L/h$ , et la fraction volumique  $V_{cnt}$  de NTC. Les résultats obtenus seront présentés ci-dessous sous forme graphique. Les déplacements transversaux  $\bar{w}$ , qui varient en fonction de l'exposant  $n$ , du rapport d'aspect  $L/h$ , de la fraction volumique  $V_{cnt}$  de CNT et de la forme de distribution (poutre X, poutre O et V poutre) sont illustrés à la Fig. V.1, Fig. V.2, Fig. V.3 et Fig. V.4, respectivement.

La Figure V.1 permet d'observer clairement que la flèche adimensionnelle de la poutre diminue lorsque l'exposant  $n$  est augmenté, pour un rapport d'aspect variant de 10 à 20. Ce résultat met en évidence l'impact significatif de l'exposant  $n$  sur la rigidité de la poutre, et suggère que des choix

judicieux de rapport d'aspect et d'exposant  $n$  peuvent être effectués pour optimiser la performance structurelle des poutres.

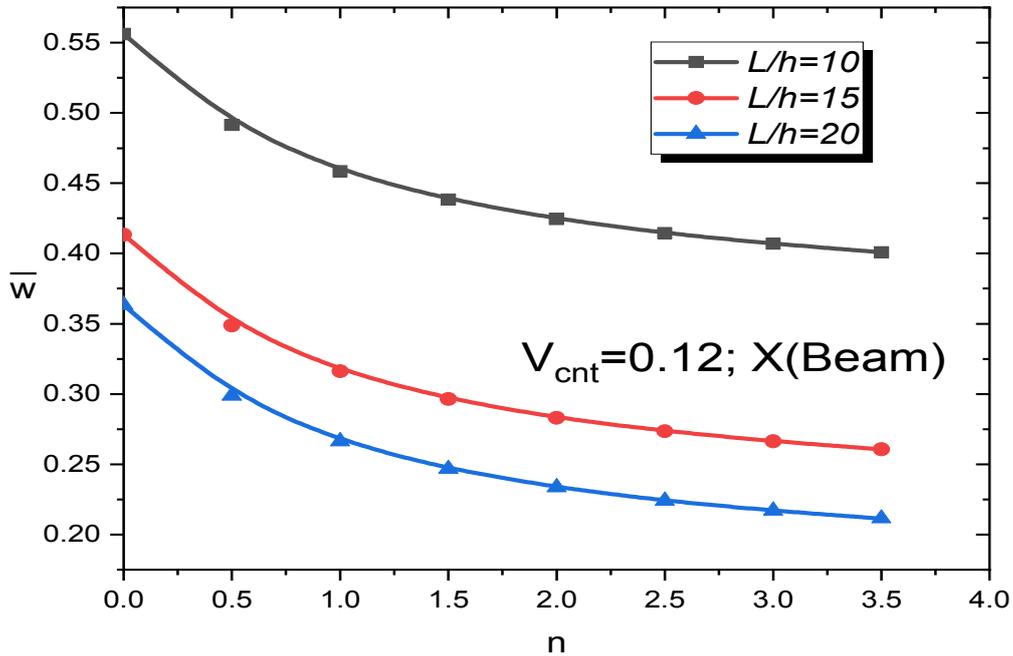


Figure. V.1 : Effet du degré de l'exposant  $n$  et du rapport d'aspect  $L/h$  sur les charges de flexion (X-beam,  $V_{cnt} = 0.12$ )

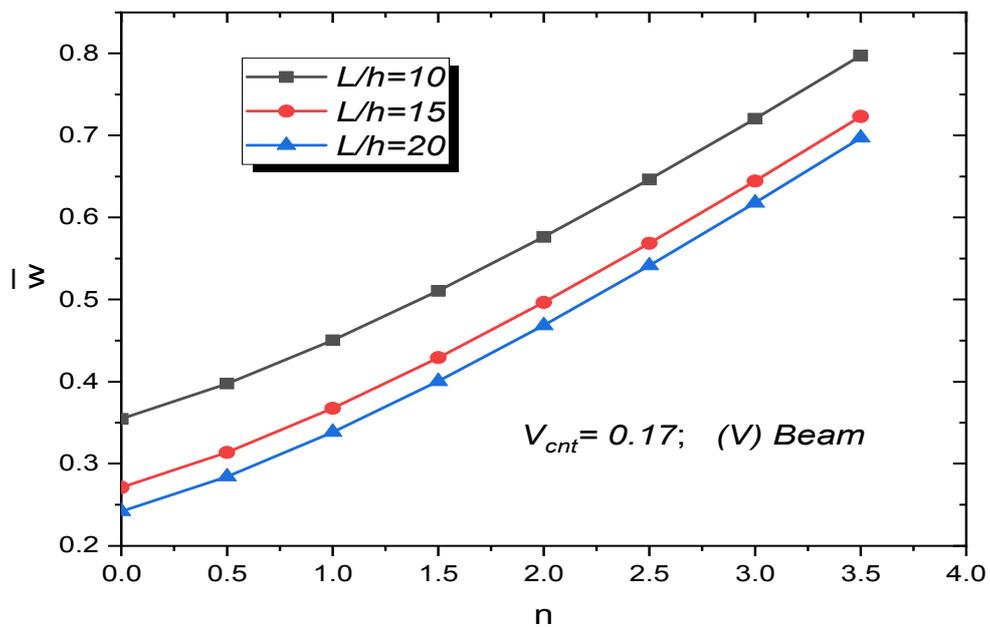
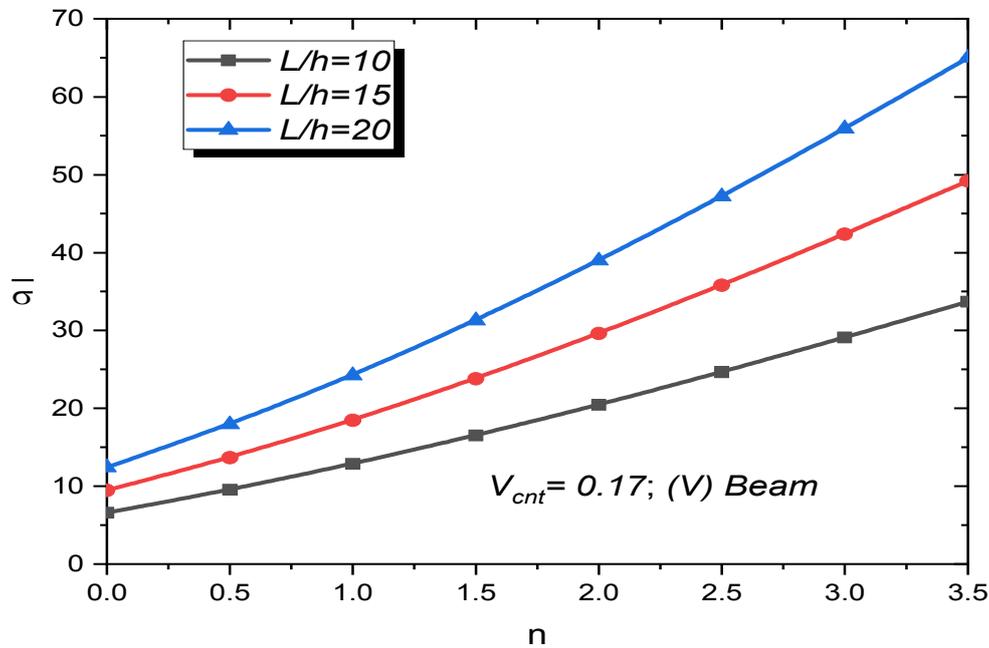


Figure. V.2: Effet du degré de l'exposant  $n$  et du rapport d'aspect  $L/h$  sur les charges de flexion (V-Poutre,  $V_{cnt} = 0.17$ )

La figure V.2 permet d'observer clairement que la flèche adimensionnelle s'accroît en fonction de l'augmentation de l'exposant  $n$  pour une poutre de type V. Les données recueillies mettent en évidence l'impact significatif de la variation de l'exposant  $n$  sur la flexibilité de la poutre en question, soulignant l'importance de cet aspect dans la conception et l'optimisation de structures résistantes.



**Figure. V.3 :** Effet du degré de l'exposant  $n$  et du rapport d'aspect  $L/h$  sur la contrainte  $\bar{\sigma}_x$  (V-Poutre,  $V_{cnt} = 0.17$ )

Dans la représentation graphique de la figure V.3, il est évident que la contrainte normale  $\bar{\sigma}_x$  augmente lorsque l'exposant  $n$  et le rapport d'aspect  $L/h$  sont augmentés. Cette relation est clairement visible sur le graphique, où les valeurs de  $\bar{\sigma}_x$  sont représentées en fonction de l'exposant  $n$  et du rapport d'aspect  $L/h$ . Ainsi, pour obtenir une contrainte normale plus élevée, il est recommandé d'augmenter ces deux paramètres simultanément.

La figure V.4 illustre clairement que la contrainte tangentielle  $\bar{\tau}_{xz}$  diminue à mesure que l'exposant  $n$  est augmenté pour une poutre de forme V. En effet, les résultats obtenus montrent que pour une augmentation de l'exposant  $n$ , la contrainte tangentielle diminue, ce qui peut être bénéfique pour assurer la stabilité et la sécurité de la poutre. Ces résultats peuvent être utiles pour les ingénieurs et les concepteurs qui cherchent à optimiser les performances de leur conception de poutre.

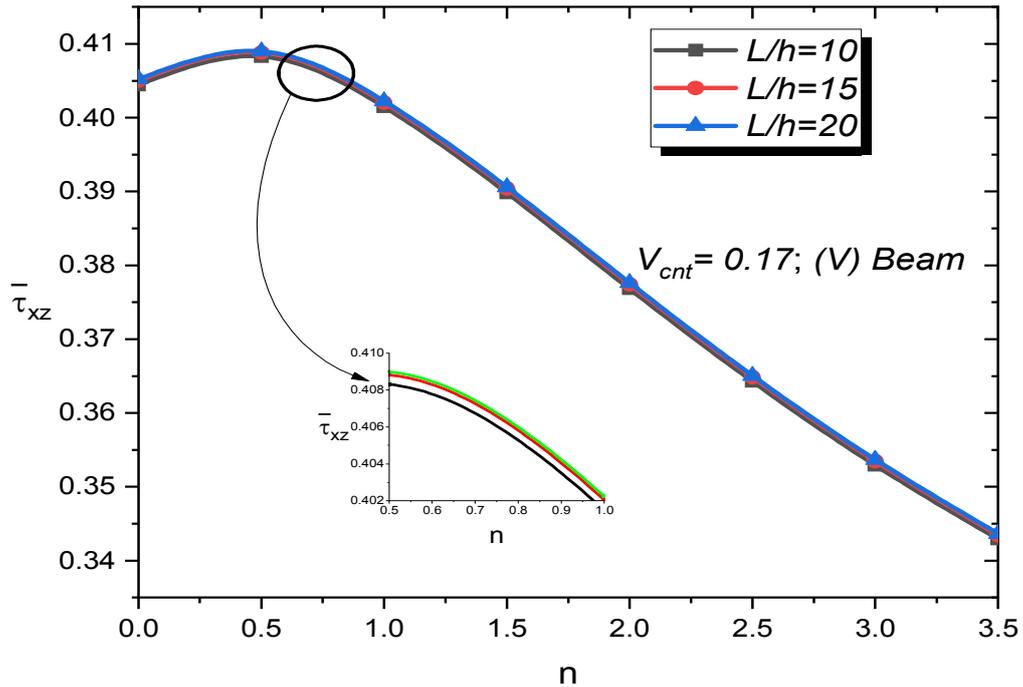


Figure. V.4: Effet du degré de l'exposant  $n$  et du rapport d'aspect  $L/h$  sur les charges de cisaillement (V-Poutre,  $V_{cnt} = 0.17$ )

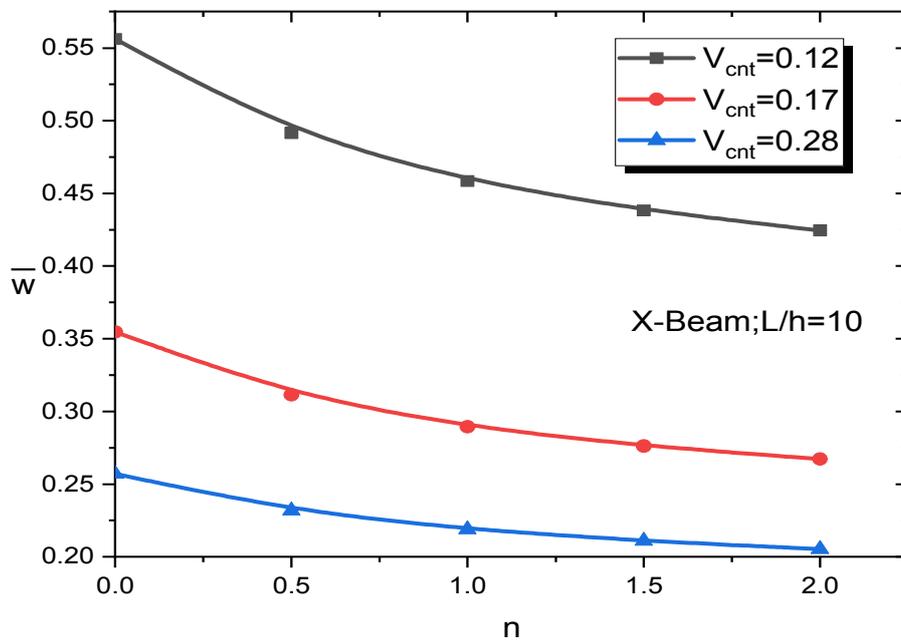
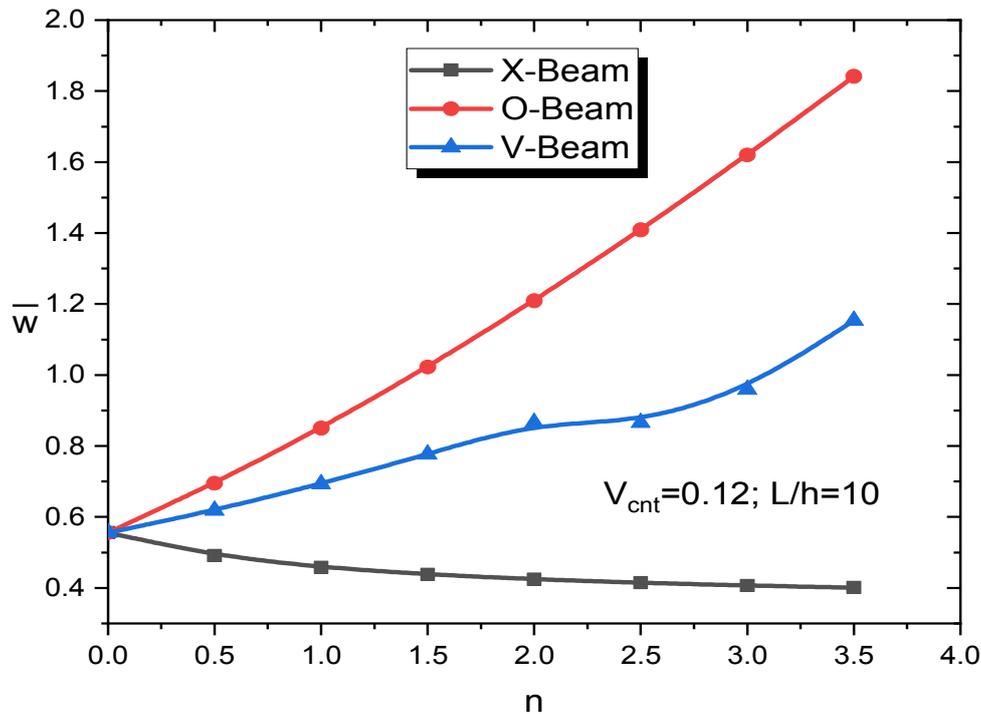


Figure V.5 : Effet du degré de l'exposant  $n$  et de la fraction volumique  $V_{CNT}$  sur les charges de flexion (X-beam,  $L/h=10$ ).

Dans la figure V.5, on peut observer la variation de la flèche adimensionnelle en fonction de l'exposant  $n$ . Nous pouvons constater que la flèche diminue lorsque l'exposant  $n$  est augmenté pour  $x$  poutres, en faisant varier la valeur de la fraction volumique de nanotubes de carbone. Il est notable que la poutre ayant une fraction volumique de  $V_{CNT}$  de 0,28 est plus rigide que celles ayant  $V_{CNT}$  de 0,12 et  $V_{CNT}$  de 0,17.



**Figure V. 6 :** Effet du degré de l'exposant  $n$  et du type de répartition sur les Efforts de flexion  
( $L/h=10$ ,  $V_{cnt} = 0.12$ )

Dans la figure V.6, on observe l'effet de l'exposant  $n$  et du type de répartition sur la flexion des poutres. À partir de cette analyse, on peut conclure que la poutre en X est la plus rigide par rapport à O et V Poutre.

La figure V.7 illustre l'étude des effets de l'exposant et des rapports d'aspect sur les résultats de flexion de la poutre X. Les résultats montrent que lorsque l'exposant  $n$  est égal à 3, les valeurs de déplacement sont plus faibles que lorsque l'exposant  $n$  est égal à 1. Ceci démontre que la loi de répartition des nanotubes de carbone dans le polymère a un impact significatif sur la résistance et la rigidité des poutres CNTRC.

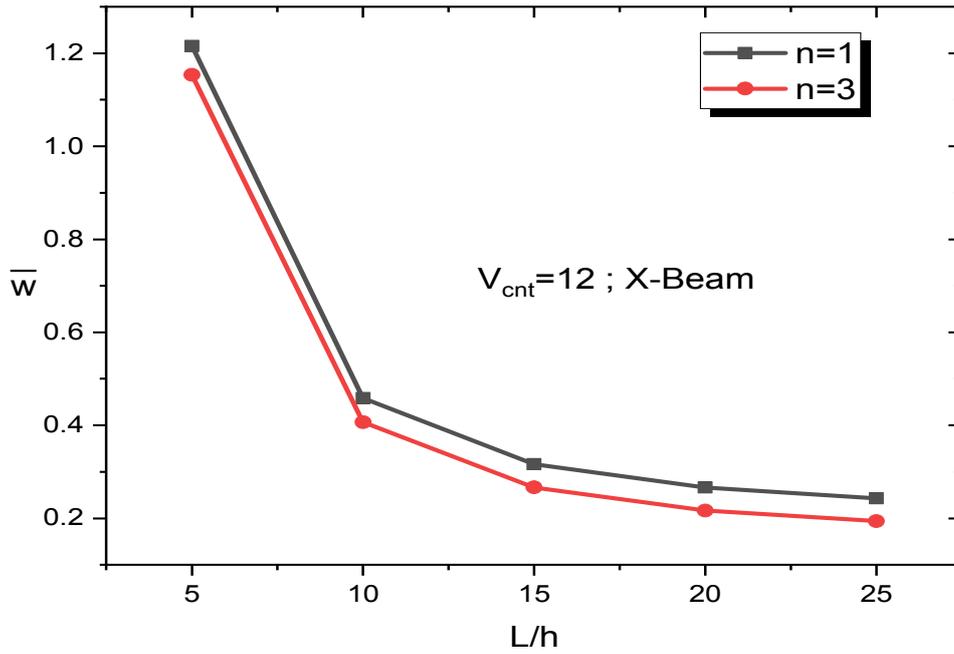


Figure V.7: Effet du degré de l'exposant n et du type de répartition sur les efforts de flexion ( $L/h=10$ ,  $V_{cnt} = 0.12$ )

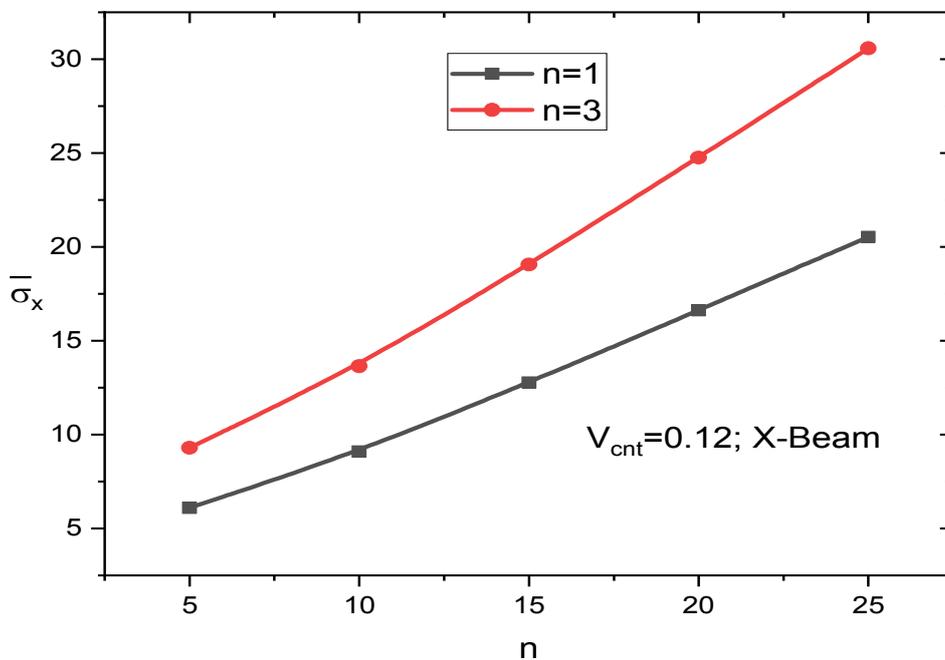
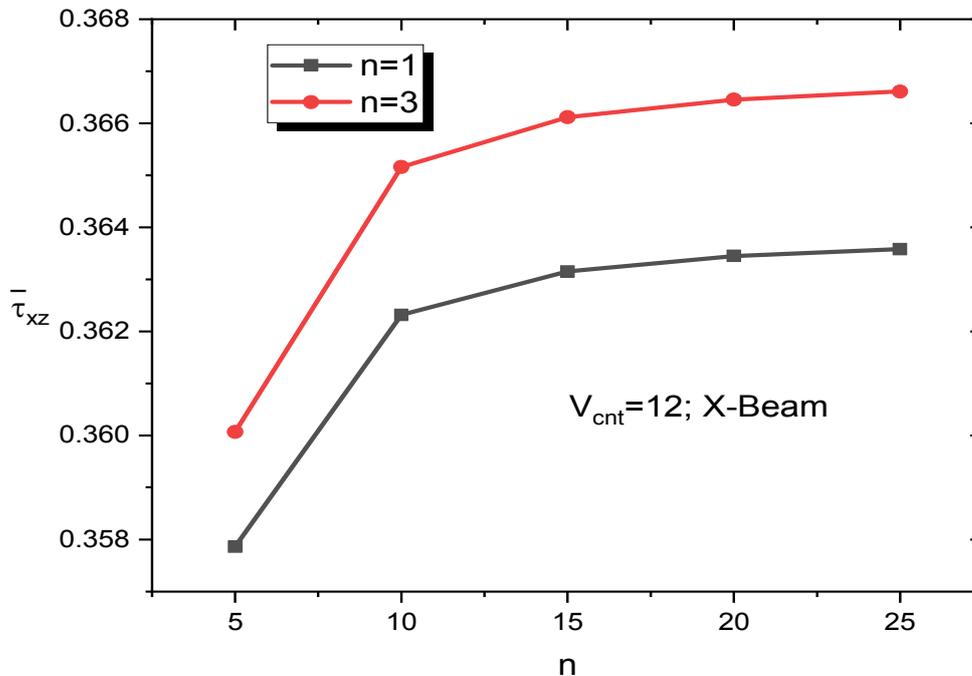


Figure V.8 : Effet du degré de l'exposant n et du type de répartition sur les efforts de contrainte ( $L/h=10, V_{cnt} = 0.12$ )

Les impacts de l'exposant et des proportions sur la contrainte normale  $\bar{\sigma}_x$  de la poutre X ont été analysés dans la Figure 8. Les résultats indiquent que la contrainte normale  $\bar{\sigma}_x$  est plus faible lorsque l'exposant n est égal à 3 par rapport à l'exposant n égal à 1. Ces résultats soulignent l'importance de la loi de répartition des nanotubes de carbone dans le polymère pour le comportement des poutres CNTRC.

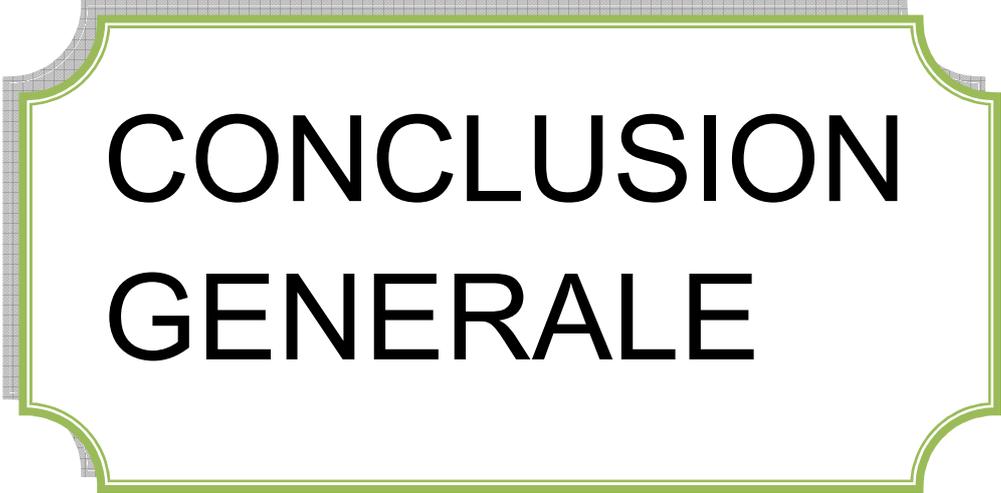


**Figure V.9** : Effet du degré de l'exposant n et du type de répartition sur les efforts de cisaillement ( $L/h=10, V_{cnt} = 0.12$ )

Les effets de l'exposant et des proportions sur la contrainte de cisaillement moyenne  $\bar{\tau}_{xz}$  de la poutre X ont été étudiés dans la Figure 9. Les résultats ont montré que la contrainte de cisaillement moyenne  $\bar{\tau}_{xz}$  est plus faible lorsque l'exposant n est égal à 3 par rapport à l'exposant n égal à 1. Ces résultats soulignent l'importance de la loi de répartition des nanotubes de carbone dans le polymère pour comprendre le comportement des poutres CNTRC. En effet, la répartition homogène des nanotubes de carbone peut améliorer la résistance à la contrainte de cisaillement des poutres CNTRC et donc leur performance globale.

### V.3 Conclusion :

En conclusion, les études présentées dans ce chapitre ont permis de mieux comprendre le comportement en flexion des poutres CNTRC renforcées par des nanotubes de carbone. Les résultats ont montré que la poutre X-CNT est la plus rigide parmi les différentes poutres étudiées en raison de sa forme distinctive. Les résultats ont également souligné que le déplacement de ces poutres est affecté par la valeur des coefficients de rapport d'épaisseur et la fraction volumique des matériaux utilisés. Ces conclusions sont importantes pour l'utilisation potentielle des poutres CNTRC dans diverses applications, notamment dans les domaines de l'aérospatiale, de l'automobile et de la construction. Les propriétés mécaniques exceptionnelles des poutres CNTRC renforcées par des nanotubes de carbone les rendent très attrayantes pour une large gamme d'applications dans lesquelles la résistance, la rigidité et la légèreté sont des facteurs clés. Les résultats de cette étude pourraient également aider les concepteurs et les ingénieurs à optimiser la conception des structures composites renforcées par des nanotubes de carbone pour atteindre des performances mécaniques optimales. Une perspective future intéressante serait d'approfondir la compréhension des propriétés mécaniques des poutres CNTRC renforcées par des nanotubes de carbone, en étudiant les effets de différents facteurs tels que la température, l'humidité et les conditions de chargement dynamique. De plus, il serait utile de développer des modèles mathématiques plus précis pour simuler le comportement mécanique des poutres CNTRC renforcées par des nanotubes de carbone, afin de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents responsables de leur performance améliorée. En outre, il serait intéressant de mener des études expérimentales pour valider les résultats de ces modèles de simulation. Ces avancées pourraient aider à améliorer la conception des structures composites renforcées par des nanotubes de carbone pour des applications pratiques, en offrant des performances mécaniques optimales et une meilleure compréhension des mécanismes sous-jacents responsables de ces propriétés améliorées.



**CONCLUSION  
GENERALE**

### **Conclusion générale et perspectives:**

Ce travail présente un nouvel exposant de fraction volumique basé sur la distribution exponentielle des nanotubes de carbone dans le polymère sous différente forme de distribution telle qu'une distribution uniforme (UD) et des distributions fonctionnellement graduées (FG) dans le sens de l'épaisseur des poutres nano composites.

D'autre part, comprendre l'influence de cette nouvelle équation exponentielle sur les problèmes de flexion. Une théorie de poutre de déformation par cisaillement d'ordre élevé HSDBT a été efficacement développée pour étudier les problèmes de flexion des poutre CNTRC simplement supportés renforcés par différents modèles de distributions SWCNT dans la matrice polymère.

Sur la base des résultats analytiques, on peut noter que l'effet de la distribution non linéaire dans les différents modèles a un impact clair sur les déplacements et les contraintes. Comme il s'avère que l'augmentation du degré de l'exposant de l'équation exponentielle rend la distribution du poutre X plus rigide et plus résistante par rapport à une forme différente de poutres CNTRC en résistance à la flexion, alors qu'il est constaté que la forme poutre O est le plus faible. En résumé, la distribution exponentielle des nanotubes de carbone dans le polymère joue un rôle indispensable pour améliorer les propriétés mécaniques des poutres CNTRC.

Enfin, on peut noter que la présente théorie peut également être appliquée à d'autres structures constituées d'autres types de matériaux (Panjehpour et al. 2018, Othman et Fekry 2018, Ahmed et al. 2019, Timesli 2020).

### **Les références :**

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

**[Sandra Rizk 2009]**. Elaboration et caractérisation des nanostructures carbonés par procédé CVD assisté par plasma microonde, thèse doctorat. Université Henri Poincaré, Nancy I. 2009.

**[Web 1]** <http://w3.umh.ac.be/chimie/docs/studs01-02/fullerenes.html>].

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

**[Electronic, novembre 2004]**. Thermal and Mechanical Properties of Carbon Nanotubes » November 2004 Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences 362(1823):2065-98.

**[Sumio Iijima en 1991]**. Iijima.S, Nature, 354, 56–58, (1991).

**[Boimia,2017]** : Boumia Lakhdar, thèse, les propriétés physiques et mécaniques des nanotubes en carbone, université Abou-bekr Belkaid- Tlemcen,(2017).

**[Emmenegger 2003]** : C. Emmenegger, J.-M. Bonard, P. Mauron, P. Sudan, A. Lepora, B. Grobety, A. Züttel, L. Schlapbach, Synthesis of carbon nanotubes over Fe catalyst on aluminium and suggested growth mechanism, Carbon 41 (2003) 539.

**[M. Perezcabero, 2003]**. M. Perezcabero, “Characterization of carbon nanotubes and carbon nanofibers prepared by catalytic decomposition of acetylene in a fluidized bed reactor,” J. Catal., vol. 215, no. 2, pp. 305–316, Apr. 2003.

**[R. Brukh and S. Mitra. 2006]**. R. Brukh and S. Mitra, “Mechanism of carbon nanotube growth by CVD,” Chem. Phys. Lett., vol. 424, no. 1–3, pp. 126–132, Jun. 2006

**[N. Zhao, 2006]** C. He, Z. Jiang, J. Li, and Y. Li, “Fabrication and growth mechanism of carbon nanotubes by catalytic chemical vapor deposition,” Mater. Lett., vol. 60, no. 2, pp. 159–163, Jan.2006.

[**M. R. Maschmann, 2006**]. M. R. Maschmann, P. B. Amama, A. Goyal, Z. Iqbal, R. Gat, and T. S. Fisher, "Parametric study of synthesis conditions in plasma-enhanced CVD of high-quality single-walled carbon nanotubes," Carbon N. Y., vol. 44, no. 1, pp. 10–18, Jan. 2006.

[**Gohier 2007**] : A. Gohier, Cinétique de Croissance de Nanotube de Carbone Mono-Parois et Multi-Parois Orientés par Procédé Plasma, Thèse de Doctorat, l'Université de Nantes (Sciences des Matériaux), 2007.

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

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

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

[**Rizk,2009**] : Risk Sandra , thèse, Elaboration et caractérisation des nanostructures carbonées par procédé CVD assisté par plasma microonde, Université Henri Poincaré, Nancy I,(2009).

[**Bortolamiol,2015**] :Bortolamiol Tifania, thèse, nanotubes de carbone biparois :fonctionnalisation et detection vitro, université Toulouse, (2015) .

[**B. Lakhdar, 2017**].B. lakhdar, " Les Propriétés Physiques Et Mécaniques Des Nanotubes en Carbone »", thèse, Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen,p 107, 2017.

[**Tagrara,2017**] : Tagrara Samira Hassiba, thèse, Analyse de la flexion statique, le flambement et la vibration des structures composites renforcées par des nanotubes de carbone, université Djilali Abes Sidi Bel Abbes,(2017).

[**N. Andres Perez. 2008**]. N. Andres Perez. "Etude calorimétrique et diélectrique de nanocomposites silicones". [Enligne]. Thèse de doctorat. Grenoble: INPG. France, 2008, 199 P.

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

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

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

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

**[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).

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

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

**[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).

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

**[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.

**[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).

**[Hassani,2017]** :Hassani Dhiba, mémoire de master, Etude de l'effet des nanoparticules sur l'endommagement de l'interface d'un Bio-nanocomposite, université Dr.Tahar Moulay de Saida,(2017).

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

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

[**Penu,2008**] : Penu .C. “Nanocomposites à matrice polyamide 6 ou polystyrène et à renforts de nanotubes du carbon ”,(2008).

[**S. Senani.2004**]. S. Senani. "Interaction organosilane/silice de précipitation. Du milieu hydro- alcoolique au milieu aqueux ". [Enligne]. Thèse de doctorat. Paris : Université de paris VI.2004.

[**Aubry. 2009**] Aubry. C, 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.

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

[**B.Tayeb, 2017**]. B.Tayeb , comportemet vibratoire d’un nanotube de carbone sous l’effet thermique en milieu élastique , thèse de doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi Belabbes,2017.

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

[**Chemi,2018**] : Chemi Awda, thèse, La charge critique de flambementd’un nanotube en carbone,université Djilali Abes de Sidi Bel Abbes, (2018).

[**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).

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

[**Koizumi 1992**] Koizumi M. «The concept of FGM ceramic transaction» functionally graded materials (1992)34, 3-10.

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

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

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

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

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

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

[ **Baron, 2008** ] . C. Baron., S. Naili, Propagation d’ondes élastiques au sein d’un guide d’ondes élastiques anisotrope à gradient unidirectionnel sous chargement fluide, Compte Rendue Mécanique ; 336 (9) :722–730, 2008.

[ **Koizumi. M**], FGM activities in Japan, department of materials chemistry. Ryukoku University, Ohtsu 520-21 Japan, 1996.

[**Boch. P**] Chartier . Huttepain. M Tapa (1986) -casting of AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub> Composites.

[**KaddourI.Djamel Eddine, 2014**], Analyse des effets de l’amplitude et température sur le comportement non linéaire d’une plaque annulaire sectorielle à gradient fonctionnel université belkaied tlemcen. MAGISTER EN GENIE MECANIQUE 2014.

[**Lostec, 1997**]. L. Lostec, Elaboration par coulage en bande et caractérisation microstructurale et mécanique de composite SiC/MAS-L, Thèse de l’université de Limoges, 1997.

[**Mistler, 1973**]. R. E. Mistler, High strength alumina substrates produced by a multiple-layer casting technique, Am. Ceram. Soc. Bull; 52 (11): 850-854, 1973.

[**Moya, 1992**]. J.S. Moya, A.J. Sanchez-Herencia., J. Requena., R. MORENO,Functionally gradient ceramics by sequential slip casting, Materials Letters; 14 (5-6): 333-35, 1992.

[ **SARK 1996**].Sarkar , p. Nicholson (1996) ,,.electrophoretic deposition mechanisms, kinetics, and application to ceramics ,,. ,1996 volume 79N°8.

[**Bishop, a et al (1993)**] Bishop, a, Lin, C.Y. Navaratnam, M. Rawlings.R.D MC. Chane a functionally graded material produced by a powder metallurgical process, journal of materials science letters 1993.

[**Steffens H.D, 1990**] Steffens H.D., Dvorak. M., Wewel. M., Plasma sprayed functionally gradient materials- processing and applications, in Proceeding of The First International Symposium on Functionally Gradient Materials-FGM'90-Sendai-Japan; 139-43, (1990)

[**Öchsner et al. 2008**]. Öchsner, A., Murch, G.E. et de Lemos, M.J.S. (2008), "Cellular and Porous Materials", WILEY-VCH, 398-417.

[**ABDI 1997**].ABDI ZADEH, H.(1997) , ,,“Elaboration Et Caractérisation De Composites Duplex, «Composites Laminaires Tri-Couches A Base D'alumine »” , Thèse Docteur D'état, Institut National Des Sciences Appliquées De Lyon Et L'université Claude Bernard Lyon I-France,1997, 212p.

[**Almasi et al., 2016**].Almasi, D. et al. (2016) « Functionally graded polymeric materials: A brief review of current fabrication methods and introduction of a novel fabrication method », Materials Science and Engineering C, 64. doi: 10.1016/j.msec.2016.03.053.

[**Parihar, Setti et Sahu2018**] Parihar, R. S., Setti, S. G. et Sahu, R. K. (2018) « Recent advances in the manufacturing processes of functionally graded materials: A review », IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 25(2). doi: 10.1515/secm-2015-0395.

[**Saleh, B. et al. (2020)** ] « Review on the Influence of Different Reinforcements on the Microstructure and Wear Behavior of Functionally Graded Aluminum Matrix Composites by Centrifugal Casting », Metals and Materials International. doi: 10.1007/s12540-019-00491-0

[**Makwana, A. B., Panchal, K. C. et Gandhi, A. H. (2014)** ] « Stress analysis of functionally graded material plate with cut-out »

[**Zhang, B. et al. (2018)** ] « Additive Manufacturing of Functionally Graded Material Objects: A Review », Journal of Computing and Information Science in Engineering. doi:10.1115/1.4039683.

[**Takahashi, M. (1990)** ] « Fabrication and Evaluation of W/Cu Gradient Material by Sintering and Infiltration Technique », in Proceeding of The First International Symposium on Functionally Gradient Materials-FGM' 90-Sendai-Japan, p. 129-134.

**[Suresh, 1998].** Suresh, S., and Mortensen, A., Fundamentals of Functionally Graded Materials, IOM Communications, London,1998.

**[Shen, H.S. (2009) ],** “Nonlinear bending of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite plates in thermal environments”, Compos. Struct., 91(1), 9-19.

**[Yas, M.H. and Samadi, N. (2012) ],** “Free vibrations and buckling analysis of carbon nanotube-reinforced composite Timoshenko beams on elastic foundation”, Int. J. Press. Ves. Pip., 98, 119-128.