

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



FACULTÉ DES SCIENCES

APPLIQUÉES

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

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

Spécialité : Génie Civil

Option : Structure

Présenté par :

Boulesnane Nedjm Eddine

Cheddad Zakarya

Sujet du mémoire

***Étude du flambement d'un nanotube de carbone
incorporé dans une matrice élastique en polymère***

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

Mr,	M. Khiloun	Président
Mr,	S. Belmahi	Rapporteur
Mr,	A. Chikh	Examineur
Mm,	K. Ouazir	Examinatrice

PROMOTION : 2019 / 2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي
بَدَأَ خَلْقَ الْإِنسَانِ
مِنْ طِينٍ مِمَّا يَخْتَارُ
ثُمَّ عَلَّمَهُ الْقُرْآنَ
وَكَرَّمَهُ
وَإِنَّ رَبَّهُ لَسَمِيعٌ
عَلِيمٌ

Remerciements

Nous voulons en premier à remercier Dieu qui nous a donné volonté, force, patience, courage et santé pour réaliser ce travail.

Tout d'abord, nous voudrions exprimer notre gratitude a notre encadreur, M. Samir BELMAHI, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.

Nous remercions les membres de jury qui nos font l'honneur de présider et d'examiner Ce modeste travail.

Nous remercions également les professeurs de l'Université Ibn Khaldoun, en particulier les professeurs du département de Génie Civil qui nous ont fourni les outils nécessaires à la réussite de nos études universitaires.

Un grand merci à nos familles, en particulier nos mères et nos pères, pour leur amour, leurs conseils et leur soutien inconditionnel, moral et économique, qui nous ont permis de réaliser les études que nous voulions et par conséquent ce mémoire.

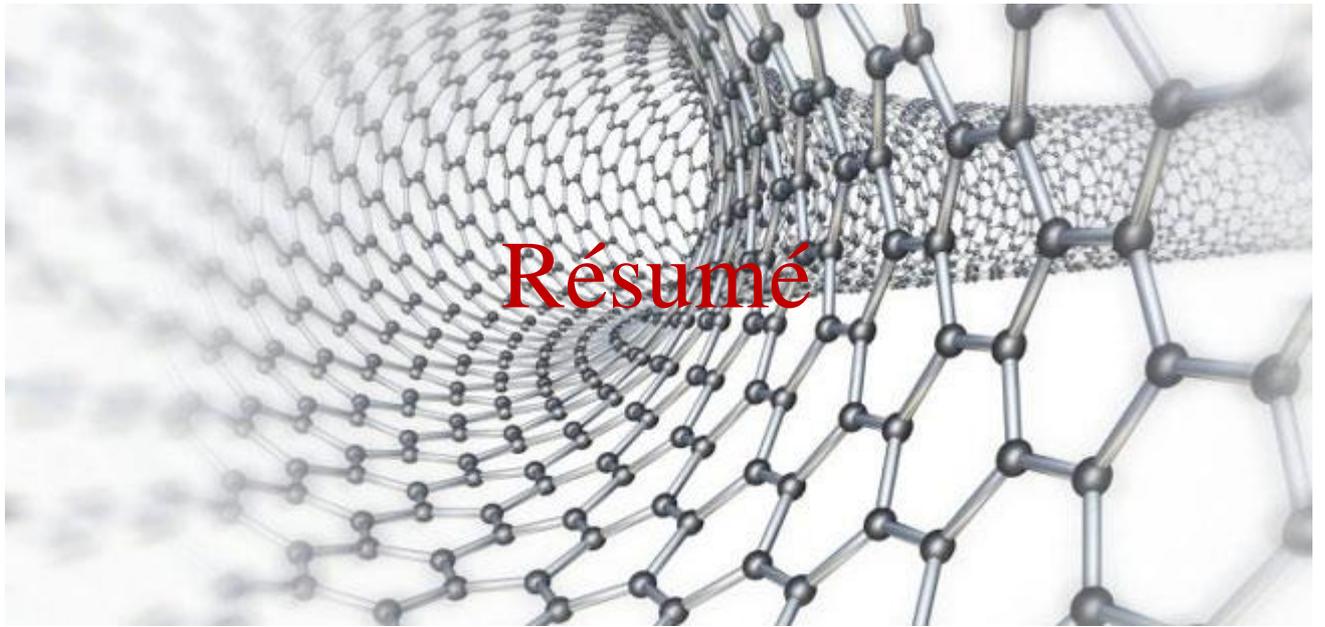
Enfin, nous remercions sincèrement tous ceux qui nous ont aidés et ont contribué à ce travail, qu'il soit matériel ou moral, voire des conseils, sans oublier le rôle de nos frères et sœurs et de tous les étudiants de lapromotion2020.

Dédicaces

Il n'y a rien de plus beau à présenter que le fruit d'un travail acharné consacré du fond du cœur Pour ceux que nous aimons et remercions d'avoir exprimé leur gratitude Tout au long de notre existence.

Nous dédions cet humble travail Pour qui nous aimons:
Nos parents qui étaient toujours là pour nous aider, nous conseiller,
Sacrifier pour nous et nous permettre d'atteindre ce stade de l'éducation.

Nous le dédions également à:
Frères et sœurs, qui nous ont soutenus et ont cru en nous pendant notre voyage et en ce tous nos amis, professeurs, travailleurs et collègues du département de génie civil.



Résumé

L'objectif de ce travail est l'étude du flambement sous l'effet d'un chargement $q(x)$ d'un nanotube de carbone double paroi supposé incorporer dans un milieu élastique de type Winkler. Le modèle de poutre considéré est celui de d'Euler-Bernoulli (cisaillement négligé). Un développement mathématique a donné la charge critique de flambement (P_{cr}) en utilisant la théorie d'élasticité non locale qui prend en compte l'effet de petite échelle e_0a et l'effet des forces élastiques de Van der Waals entre les tubes interne et externe des nanotubes de carbone.

Les trois chiralités des nanotubes de carbone (Zig-zag, Armchaire et chiral), l'effet non local (e_0a), le rapport géométrique (L/d), le nombre de mode (N) et la rigidité du milieu élastique sur la charge critique de flambements ont été considérées, analysés et discutés dans ce calcul.

La discussion et l'analyse des paramètres mentionnés ci-dessus nous montrent l'étendue de leur impact significatif sur la charge critique, la charge critique est à sa maximum ou a sa minimum pour les paramètres suivants : chiralité des nanotubes de carbone, coefficients à petite échelle, rapport (L/d) et nombre de mode, et visversa.

Mots-clés : Nanotube de carbone double paroi ; Chiralité ; Flambement ; Elasticité non locale ; Winkler.

Abstract

The objective of this work is the study of buckling under the effect of a loading $q(x)$ of a double-walled carbon nanotube supposed to incorporate into an elastic medium of the Winkler type. The beam model considered is that of Euler-Bernoulli (neglected shear). A mathematical development gave the critical buckling load (P_{cr}) using the non-local elasticity theory which takes into account the small scale effect e_0a and the effect of elastic Van der Waals forces between the inner and outer tubes carbon nanotubes.

The three chirality of carbon nanotubes (Zig-zag, Armchaire and chiral), the nonlocal effect (e_0a), the geometric ratio (L/d), the number of modes (N) and the rigidity of the elastic medium on the load Critical buckling were considered, analyzed and discussed in this calculation.

The discussion and analysis of the parameters mentioned above show us the extent of their significant impact on the critical load, the critical load is at its maximum or at its minimum for the following parameters: chirality of carbon nanotubes, coefficients at small scale, ratio (L/d) and number of modes, and vice versa.

Keywords: double-walled carbon nanotubes; chirality; buckling; non-local elasticity;

Winkler..

الهدف من هذا العمل هو دراسة الانبعاج تحت تأثير تحميل (xq) لأنبوب كربوني مزدوج الجدار من المفترض ان يدمج في وسط مرن من نوع Winkler. نموذج الرافدة الذي تم دراسته هو نموذج أويلر برنولي (Euler Bernoulli) (القص المهمل). أعطى التحليل الحسابي للحمولة القصوى للإنحناء (Pcr) باستخدام نظرية المرونة غير المحلية التي تأخذ في الاعتبار التأثير صغير النطاق e0a و تأثير قوى فاندير فالس المرنة بين الأنابيب الداخلية و الخارجية لانايبب الكربون النانوية.

هيكله الأنابيب النانوية الكربونية الثلاثة (Zig-zag و Armchaire و chiral) و التأثير غير المحلي (e0a) والنسبة الهندسية (L / d) و عدد الأنماط (N) و صلابة الوسط المرن على الحمل الحرج تم تحليلها و مناقشتها في هذا الحساب. توضح لنا مناقشة و تحليل المعلمات المذكورة أعلاه مدى تأثيرها الكبير على الحمل الحرج، حيث يكون الحمل الحرج في أقصى حد له أو في الحد الأدنى للمعلمات التالية : هيكله الأنابيب النانوية الكربونية ، المعاملات في المقياس الصغير ونسبة (L / d) و عدد الأنماط والعكس صحيح.

كلمات مفتاحية: أنابيب نانوية كربونية مزدوجة الجدار، هيكل، انبعاج، المرونة الغير المحلية، وينكلر

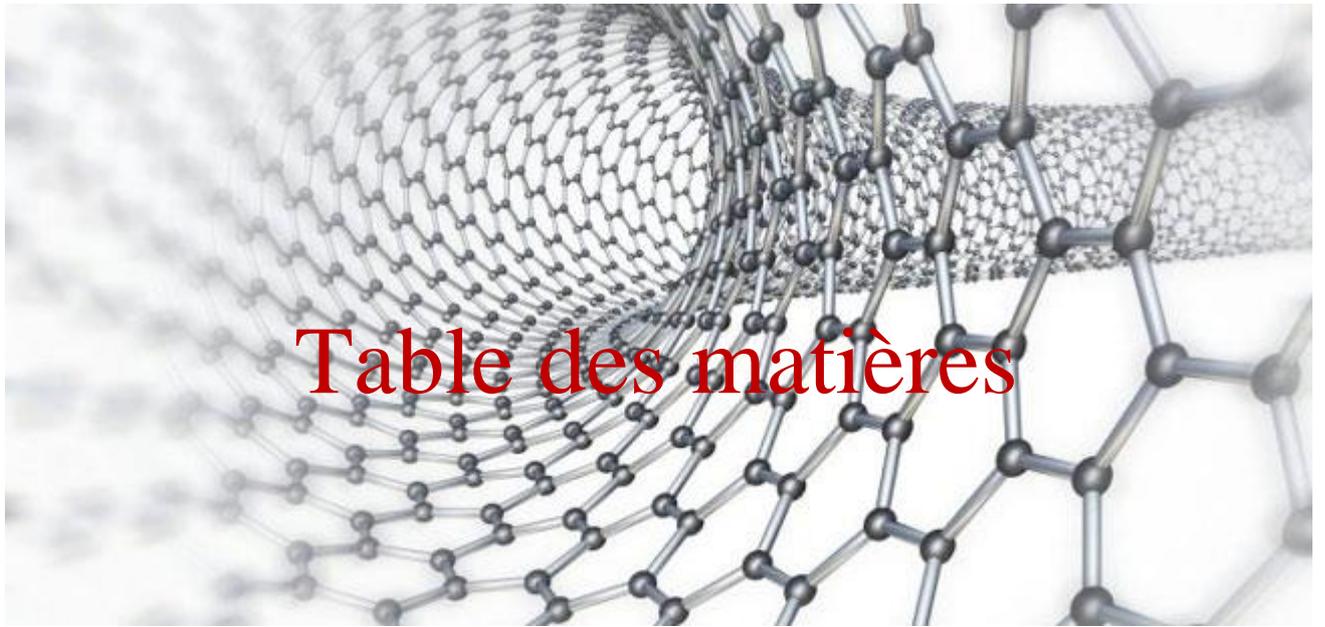


Table des matières

Table des matières

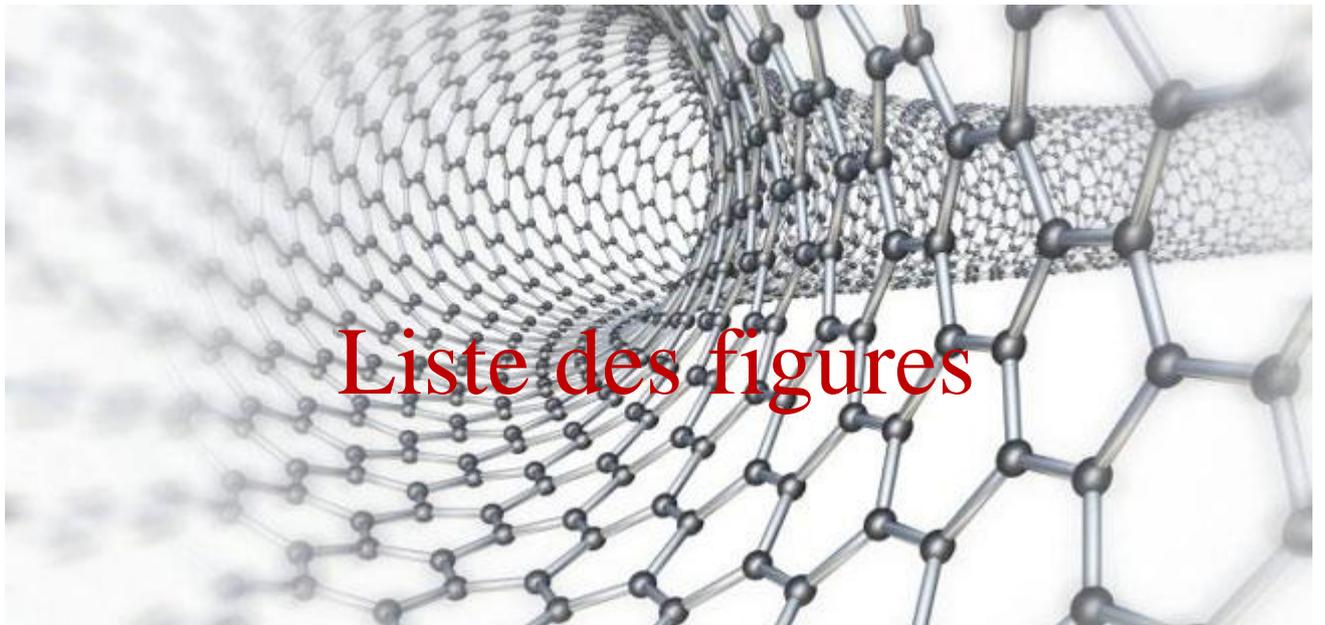
Résumé.....	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Liste des notations.....	
Introduction générale	
Chapitre 01.....	1
1.1 Introduction.....	3
1.2 Le carbone.....	3
1.2.1 Les formes de carbones.....	4
1.2.1.1 Les formes traditionnelles.....	4
a) Le graphite	4
b) Le diamant	4
c) Les carbones « mal organisés »	5
1.2.1.2 Les nouvelles formes	5
Les fullerènes	5
1.3 Les nanotubes de carbone	7
1.3.1 Nano.....	7
1.3.2 La découverte.....	7
1.3.3 La structure	7
1.3.3.1 monoparois (ou monofeuillets).....	8
1.3.3.2 multiparois (ou multifeuillets)	10
1.3.4 Les propriétés.....	10
1.3.4.1 Mécaniques	10
1.3.4.2 Thermique	11
1.3.4.3 Electriques.....	12
1.3.4.4 Optique.....	12
1.3.5 Synthèse	13
a)l'arc électrique	13
b)Ablation par laser.....	14
c)dépôt chimique en phase vapeur	14
d)Décomposition catalytique (HiPCO).....	15
1.3.6 Application.....	17
1.4 Les Nanocomposites	17
1.4.1 Les matériaux composites.....	17
1.4.1.1 Matrice	18

Table des matières

1.4.1.2 Renfort	19
1.4.2 Les matériaux composites à base de NTC	20
1.4.2.1 Incorporation des NTCs dans des métaux	21
1.4.2.2 Incorporation des NTCs dans céramiques	21
1.4.2.3 Incorporation des NTCs dans des polymères.....	22
1.4.3 Polymères.....	23
1.4.3.1 Les formes de polymère.....	23
Thermoplastique	23
Thermodurcissable.....	24
Elastomères	24
1.4.4 nanocomposites (NTC/polymère).....	25
1.4.4.1 Nanocomposite(a base de NTC)	25
1.4.4.2 Procédés d'élaboration des nanocomposites (NTC/polymère).....	26
a) Polymérisation in situ	26
b) Mélange en solution.....	26
c) Mélange à l'état fondu	26
1.4.4.3 Interface matrice-renfort dans les nanocomposites à matrice polymère.....	27
1.4.4.4 Application des nanocomposites dans le domaine de Génie civil	28
1.5 Conclusion	28
Chapitre 02.....	29
2.1 Introduction.....	29
2.2 Les poutres	29
2.3 Les théories des poutres	30
2.3.1 La théorie d'Euler-Bernoulli (théorie classique des poutres).....	30
2.3.2 La théorie de Timoshenko (déformation en cisaillement de premier ordre)	32
2.3.3 La théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé.....	33
2.4 Théories des poutres selon la prise en compte de l'effet d'échelle.....	35
a) La théorie locale d'élasticité	35
b) La théorie non locale d'élasticité.....	35
2.5 Résistance des matériaux	36
2.5.1 Les sollicitations	37
2.5.1.1 Notion de sollicitations	37
2.5.1.2 Torseur de cohésion	38
Les types de sollicitation.....	39
a) Sollicitations simples	39

Table des matières

b) Sollicitations composées.....	39
2.5.2 Phénomène de flambement	39
2.5.2.1 Charge critique d'Euler.....	41
2.5.2.2 Contrainte critique	43
2.5.2.3 Elancement critique	43
2.6 Les fondation élastiques.....	44
a) modèle de winkler.....	44
b) modèle de pasternak	45
2.7 Conclusion	46
Chapitre 03.....	47
3 .1 Introduction.....	47
3 .2 Paramètre géométriques des SWCNTs et des DWCNTs	47
3 .2.1 Le vecteur chiral	48
3 .3 étude du flambement des nanotubes de carbone.....	50
3 .3.1 Les modèles théoriques du milieu continu non local.....	51
3 .3.2 Modèle Euler-Bernoulli	51
3 .4 Conclusion	55
Chapitre 04.....	56
4 .1 Introduction.....	56
4 .2 Les paramètres utilisés dans les calculs	56
4 .3 Les résultats obtenus	58
4.3.1 Effet de chiralité.....	58
4.3.2 Effet du rapport géométrique (L/d).....	60
4.3.3 Effet du nombre de mode (N)	61
4.3.4 Effet du milieu élastique	63
4.3.5 Effet du milieu élastique Winkler (Kwin)	64
4.3.6 Comparaison Euler- Timoshenko	66
4. 4 Conclusion	67
Conclusion Générale :.....	68
Références bibliographiques	69



Liste des figures

Chapitre 01

1.1 Tableau périodique.....	3
1.2 le graphite et sa structure hexagonale.....	4
1.3 Le diamant et sa structure.....	4
1.4 Représentation moléculaire de carbone amorphe.....	5
1.5 Structure du C60.....	6
1.6 Du C60 au C80: les atomes ajoutés au C60 pour obtenir le C70 et le C80 sont représentés en rouge	6
1.7 Nanotube de carbone monocouche.....	6
1.8 explication sur la terme nano.....	7
1.9 Construction SWNT	9
1.10 SWNT de différentes chiralités	9
1.11 Structures possibles des (MWNT)	10
1.12 Schéma du Production de nanotubes par méthode de l'arc électrique	13
1.13 Schéma du Production de nanotubes par méthode de l'ablation par laser	14
1.14 Schéma d'un réacteur CVD pour la croissance des (NTC)	15
1.15 Schéma du Production de nanotubes par méthode HiPCo	15
1.16 Matériau composite	18
1.17 Différentes familles de matrices.....	19
1.18 Principaux matériaux de renfort	20
1.19 image des structures cylindriques en composite NTCs/Al-Si	21
1.20 image des structures cylindriques en composite NTCs/Al-Si	22
1.21 Méthodes d'élaborations des nanocomposites polymères.....	27

Chapitre 02

2. 1 Notion de poutre.....	29
2. 2 Cinématique de la poutre d'Euler Bernoulli	31
2. 3 Cinématique de la poutre de Timoshenko	33
2. 4 cinématique de la poutre d'ordre élevé.	34
2. 5 Démarche de calcul de RDM avec la théorie des poutres	36
2. 6 schéma d'une poutres	38
2. 7 tronçon d'une poutre	38
2. 8 flambement d'une colonne	40
2. 9 poutre de longueur L et rectiligne soumise en A et B à deux.....	42
2. 10 $M_f = F y$	42
2. 11 représentation de la fondation winkler	45
2. 12 représentation de la fondation pasternak	45
2. 13 Types de fondation: (a) modèle de Winkler, (b) à deux paramètres et (c) modèle de Pasternak	46

Liste des figures

Chapitre 03

3. 1 Repliement d'un feuillet graphène et raccordement de manière à former un nanotube.....	48
3. 2 plans de graphène aux nanotubes avec une indication de vecteur chiral, l'angle de chiralité, les vecteurs a_1 et a_2 , les indices n et m	49
3. 3 Flambement d'une poutre	50
3. 4 représentation élémentaire de la poutre d'Euler Bernoulli.....	51

Chapitre 04

4. 1 schéma montrant les dimensions du NTC à double paroi	57
4. 2 les moments quadratique en RDM	57
4. 3 Relation entre la charge critique de flambement(P_{cr}) et le coefficient d'échelle (e_0a) du nanotube de carbone double parois (Armchair) pour différents modules de Young.....	59
4. 4 Relation entre la charge critique de flambement (P_{cr}) et le coefficient d'échelle (e_0a) du nanotube de carbone double parois (Armchair) pour différents rapports géométrique ($W=L/d$).....	61
4. 5 Relation entre la charge critique de flambement (P_{cr}) et le coefficient d'échelle (e_0a) du nanotube de carbone double parois Armchair ($n= 8$, $m= 8$) pour différents nombres de mode (N).....	62
4. 6 Relation entre la charge critique de flambement (P_{cr}) et le coefficient d'échelle (e_0a) du nanotube de carbone double parois Armchair ($n= 8$, $m= 8$) pour avec et sans milieu élastique ou ($N=2$).....	63
4. 7 Relation entre la charge critique de flambement (P_{cr}) et le coefficient d'échelle (e_0a) du nanotube de carbone double parois Armchair ($n= 8$, $m= 8$) pour différents matrices polymères ou ($N=2$ et $W= 10$)4. 8.....	65



Chapitre 01

Tableau 1.1 Résumé des méthodes générales de synthèse	16
---	----

Chapitre 02

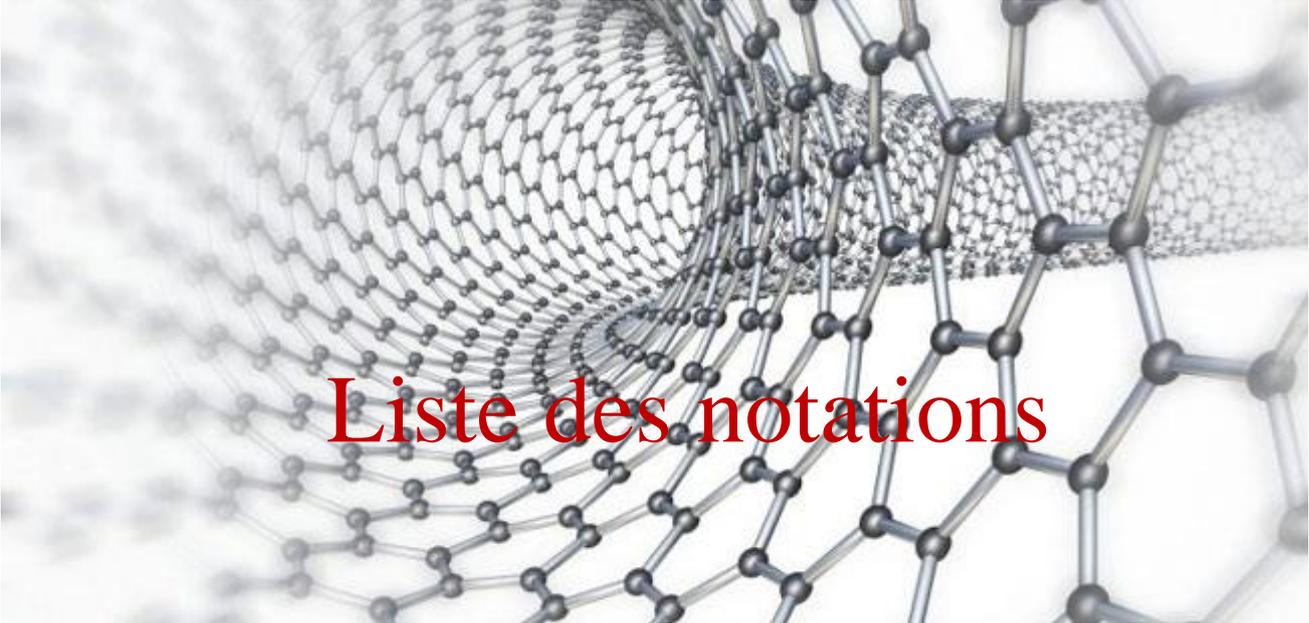
Tableau 2. 1 Les sollicitationssimple	39
Tableau 2. 2 Les sollicitations composées	39
Tableau 2. 3 Différentes configurations pour le calcul de la longueur libre	43

Chapitre 03

Tableau 3. 1 Résumé des Paramètres structuraux des nanotubes de carbone	49
Tableau 3. 2 Comment calculer le diamètre d'un nanotube de carbone mono- couche en fonction de sa symétrie	50

Chapitre 04

Tableau 4. 1 la valeur de K_{win} selon le type de la matrice polymère.....	56
Tableau 4. 2 Valeurs du module de Young des nanotubes de carbone mono et doubles parois pour différentes chiralités.	58
Tableau 4. 3 Relation entre la charge critique de flambement(P_{cr}) et le coefficient d'échelle (e_0a) du nanotube de carbone double parois (Armchair) pour différents modules de young	59
Tableau 4. 4 Relation entre la charge critique de flambement (P_{cr}) et le coefficient d'échelle (e_0a) du nanotube de carbone double parois (Armchair) pour différents rapports géométrique ($W=L/d$)	60
Tableau 4. 5 Relation entre la charge critique de flambement (P_{cr}) et le coefficient d'échelle (e_0a) du nanotube de carbone double parois Armchair ($n= 8$, $m= 8$) pour différents nombres de mode (N).....	62
Tableau 4. 6 Relation entre la charge critique de flambement (P_{cr}) et le coefficient d'échelle (e_0a) du nanotube de carbone double parois Armchair ($n= 8$, $m= 8$) pour avec et sans milieu élastique ou ($N=2$ / $N=6$).....	63
Tableau 4. 7 Relation entre la charge critique de flambement (P_{cr}) et le coefficient d'échelle (e_0a) du nanotube de carbone double parois Armchair ($n= 8$, $m= 8$) pour différents matrices polymères.....	64
Tableau 4. 8 Les valeurs de K_{win} (indice de winkler) de quelque chiralité des NTC's les K_{win} sont selon les types de matrice polymère ou ($N=6$ et $W=10$).	66
Tableau 4. 9 comparaison entre les charges critique de quelques gammes de la poutre d'Euler-Bernoulli et de Timoshenk o.....	66



Liste des notations

Liste des notations

a : Longueur du vecteur unitaire

$ac - c$: Longueur de la liaison C-C

a_1 et a_2 : Vecteurs directeurs

C : Coefficient d'interaction du tube interne par unité de longueur entre deux tubes

Ch : Vecteur de chiralité

dt : Diamètre

d_1 et d_2 : Respectivement le rayon des tubes interne et externe

E : Module de Young du matériau

e_0a : L'effet de petite taille

h : L'espacement entre les couches d'un nanotube de carbone

I : moment d'inertie

K_{win} : Le module d'élasticité du ressort

L : Longueur du Ch

L/d : Le rapport longueur/diamètre

M : moment de flexion

m et n : Indices d'Hamada

N : Nombre de mode

P : Charge axiale

q : La pression de Van der Waals

R : Rayon de nanotube de carbone

t : L'épaisseur de la couche d'u nanotube

V : La force de cisaillement

w_1 et w_2 : les modes de flambement

λ : Nombre d'onde

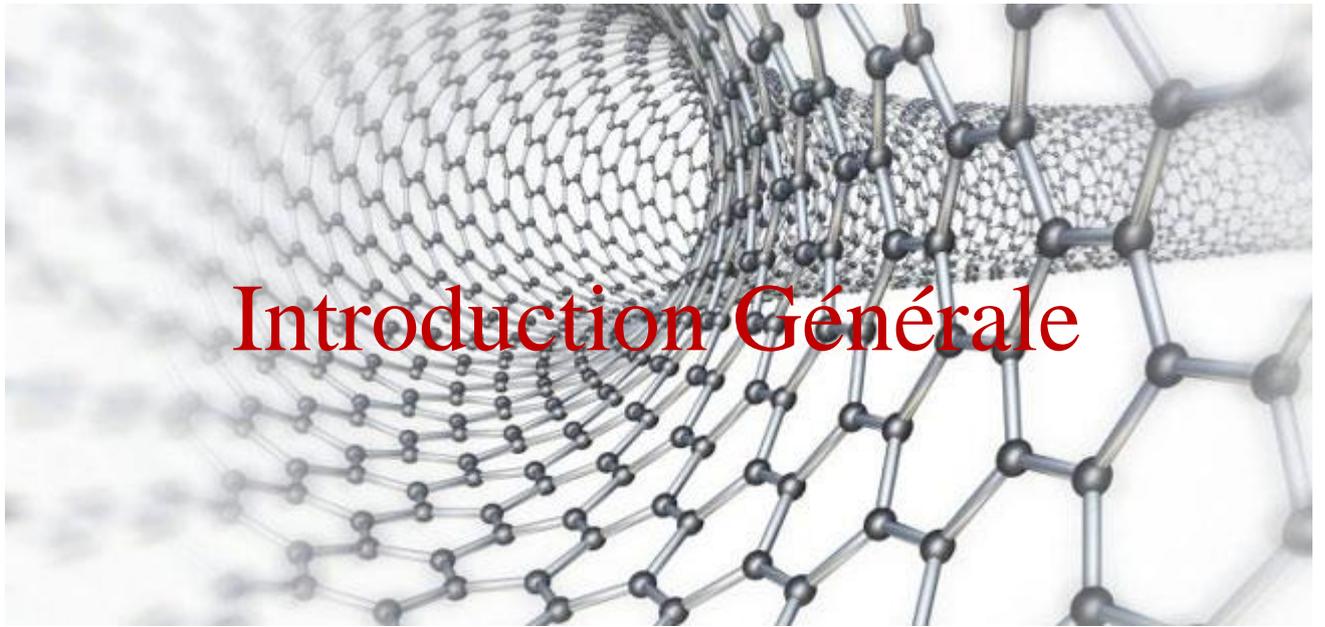
θ : L'angle chiral

ε : La déformation



Liste des abréviations

AFM: Microscopie à force atomique.
C-C: La liaison carbone-carbone.
CBT : Classical Beam Théory.
CVD: Chemical Vapor Deposition.
C60: Fullerène C60.
C70: Fullerène C70.
C80: Fullerène C80.
DWCNT : Double Wall Carbone Nanotube.
HiPCo: High Pressure dismutation of CO.
MD: La dynamique moléculaire.
MWCNT : Multi Wall Carbone Nanotube.
NTC: Carbone Nanotube.
PAI: Polyamide-imide.
PBT: Butylénique.
PC: Polycarbonate.
PEI: Polyéther-imide.
PEEK: Polyéther-éther-cétone.
PES: Polyéther-sulfone.
PET: Polytéraphtalate éthylénique.
PP : Polypropylène.
PPS: Phénylène.
PSU: Polysulfurés.
SWCNT : Single Wall Carbone Nanotube.
TD: Thermodurcissable.
TP: Thermoplastique.



Introduction Générale

Depuis le début de la modernité et du développement scientifique, l'homme a toujours manipulé les matériaux avant lui dans l'espoir de les rendre plus forts, plus légers et plus petits pour tout ce qui correspond à ses besoins et à sa modernité. Il a donc découvert de nouveaux matériaux, avec des composants plus petits, des propriétés plus fortes que jamais; Rendre son cadre de vie plus agréable. Ces matériaux nous ont amenés à la nanoscience qui nous a donné l'émerveillement des nanotubes de carbone.

Au cours des dernières décennies, ces nanotubes de carbone sont devenus une nouvelle classe de fibres de renforcement dans les composés de matrice polymère en raison de leurs propriétés mécaniques, électriques et thermiques, qui leur ont donné un grand intérêt de recherche dans le domaine de l'ingénierie des matériaux. En 1991 S.IJIMA il a découvert Les NTC qui sont des structures constituées d'un ou plusieurs feuillets de graphène (élément constitutif de base du graphite) idéalement enroulés en cylindre (texture concentrique). En fonction du nombre de feuillets, on parle de nanotube mono-paroi (SWCNTs), double parois (DWCNTs) ou multi-parois (MWCNTs) .Son diamètre est de l'ordre du nanomètre, sa longueur peut atteindre plusieurs micromètres. a chacune de ses deux extrémités se trouve une demi-molécule de fullerène. Cette molécule est constituée de 60 atomes de carbone son diamètre est d'environ un nanomètre et elle est formée d'hexagones et de pentagones qui lui donnent une forme presque sphérique, semblable à un ballon de football. 100 000 fois plus fin qu'un cheveu, un nanotube de carbone est 100 fois plus résistantes et 6 fois plus légères que l'acier [1].

Dans le présent travail, le flambement des NTC ont été étudié en utilisant la théorie classique des poutres (Classical Beam Théory - CBT). Cette théorie est basée sur les hypothèses d'Euler- Bernoulli, selon les quelles :

La négligence des déformations due au cisaillement transversal et que la section plane au plan moyen de la poutre reste normale et perpendiculaire après déformation.

Les poutres NTC étudiées dans ce travail sont-ils double parois (type armchair) reposent sur une fondation élastique de type Winkler. Des solutions analytiques et des charges de flambement sont élaborées et discutées en détail. Plusieurs paramètres : milieu élastique K_{win} , rapports géométrique L/d , coefficients de petite échelle e_0a et le nombre de modes N , ont été étudiés et qui ont un impact considérable sur la charge critique.

Ce travail se divise en quatre chapitres :

Le premier chapitre portera une synthèse bibliographique sur les nanotubes de carbone et les matériaux nano composites.

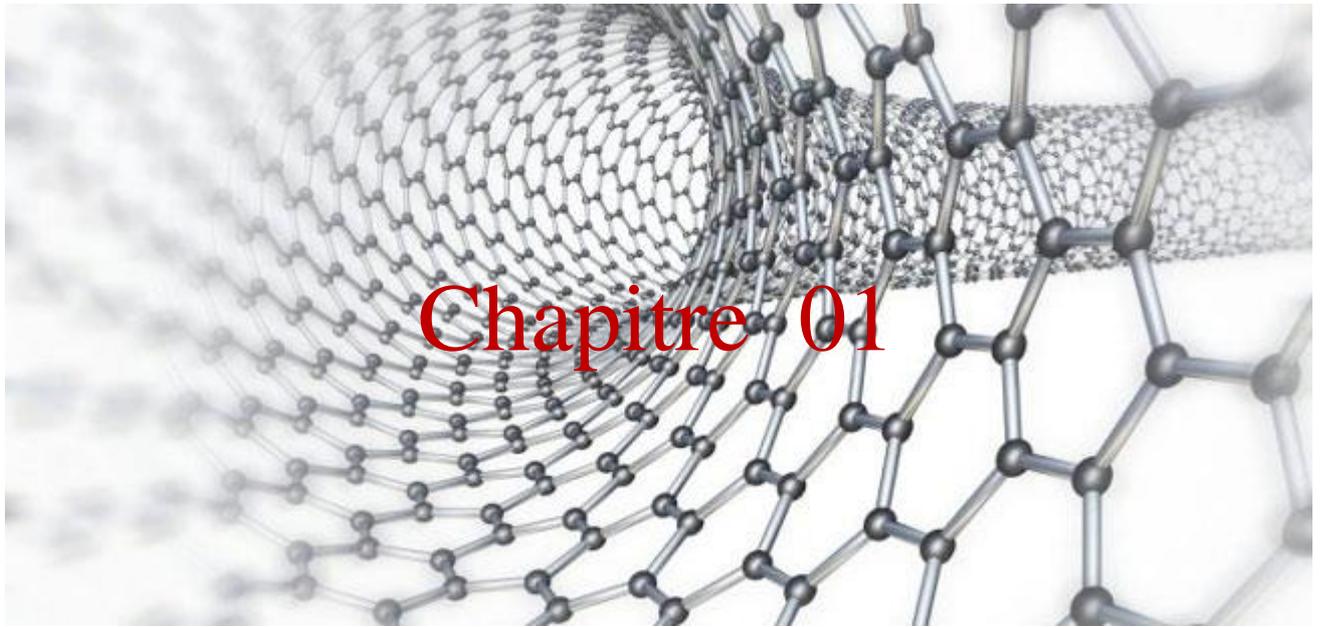
Introduction Générale

Le deuxième chapitre regroupera les différentes théories des poutres tout en donnant les hypothèses de chaque théorie et en montrant les différences entre ces dernières et il décrira aussi d'une façon générale les fondations élastiques.

Le troisième chapitre sera consacré aux formulations mathématiques, un développement des différents modèles sera présenté et qui permettra d'étudier analytiquement les poutres en nano composites renforcées par des nanotubes de carbone et reposant sur une fondation élastique.

Le quatrième chapitre présentera les résultats numériques obtenus. Ils seront comparés avec d'autres résultats déjà obtenus par d'autres auteurs.

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



1 .1 Introduction

Dans ce premier chapitre nous avons parlé à la fois des nanotubes de carbones et des nano composites. Pour bien comprendre la définition et la structure des nanotubes de carbone il est important de passer par le carbone et ses formes traditionnelles telles que le graphite, le diamant, le fullerène et autres.

Le nanotube de carbone présente des caractéristiques mécaniques et physiques élevées qui rendent ce matériau très utilisable dans plusieurs domaines en mécanique, en électronique, en aéronautique et même dans la construction. Ce matériau peut être associé à d'autres matériaux pour donner un nouveau matériau dit composite. Des travaux de recherche ont été déjà faits pour leur incorporer dans des métaux, des céramiques, plus communément dans des polymères. L'ajout de ces nanotubes de carbone (NTCs) d'une manière homogène dans la matrice polymère, permet d'obtenir une amélioration significative des propriétés du nouveau matériau obtenu.

1.2 Le carbone

Le carbone est l'élément chimique non métallique de symbole C et de numéro atomique 6. Il est présent dans de nombreux composés naturels : gaz carbonique de l'atmosphère, roches calcaires, combustibles (gaz, pétrole, charbons minéraux). C'est un constituant fondamental de la matière vivante [2] et le 4e élément le plus abondant dans l'univers. Il s'inscrit dans les éléments du deuxième cycle et la quatorzième groupe appelé groupe de carbone selon le tableau périodique de la Figure 1.1.

Le tableau périodique des éléments chimiques est présenté ci-dessous. Le carbone (C) est mis en évidence par un cercle rouge. Les groupes sont étiquetés en haut du tableau, et les périodes en gauche.

IA																	VIIA	VIIIA
1	1 H Hydrogène																	2 He Hélium
2	3 Li Lithium	4 Be Béryllium											5 B Bore	6 C Carbone	7 N Azote	8 O Oxygène	9 F Fluor	10 Ne Neon
3	11 Na Sodium	12 Mg Magnésium											13 Al Aluminium	14 Si Silicium	15 P Phosphore	16 S Soufre	17 Cl Chlore	18 Ar Argon
4	19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titane	23 V Vanadium	24 Cr Chrome	25 Mn Manganèse	26 Fe Fer	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Cuivre	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Sélénium	35 Br Brome	36 Kr Krypton
5	37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molibdène	43 Tc Technétium	44 Ru Ruthénium	45 Rh Rhodium	46 Pd Paladium	47 Ag Argent	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Étain	51 Sb Antimoine	52 Te Tellure	53 I Iode	54 Xe Xénon
6	55 Cs Césium	56 Ba Baryum	* Lanthanoïdes	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantale	74 W Tungstène	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platine	79 Au Or	80 Hg Mercure	81 Tl Thallium	82 Pb Plomb	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astatine	86 Rn Radon
7	87 Fr Francium	88 Ra Radium	** Actinoïdes	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Uub Ununbium	113 Uut Ununtrium	114 Uuq Ununquadium	115 Uup Ununpentium	116 Uuh Ununhexium	117 Uus Ununseptium	118 Uuo Ununoctium
			* lanthanoïdes	57 La Lanthane	58 Ce Cérite	59 Pr Praseodyme	60 Nd Néodyme	61 Pm Prométhée	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutécium
			** actinoïdes	89 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkélium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium

Figure 1.1 Tableau périodique [3]

1.2.1 Les formes de carbones

1.2.1.1 Les formes traditionnelles

a) Le graphite

Le graphite est un minéral noir friable utilisé depuis des siècles pour l'écriture (encre de Chine, crayon à mine). La structure du graphite est constituée d'un empilement de plans, chacun étant constitué d'un pavage régulier d'hexagones en nid d'abeilles[4].

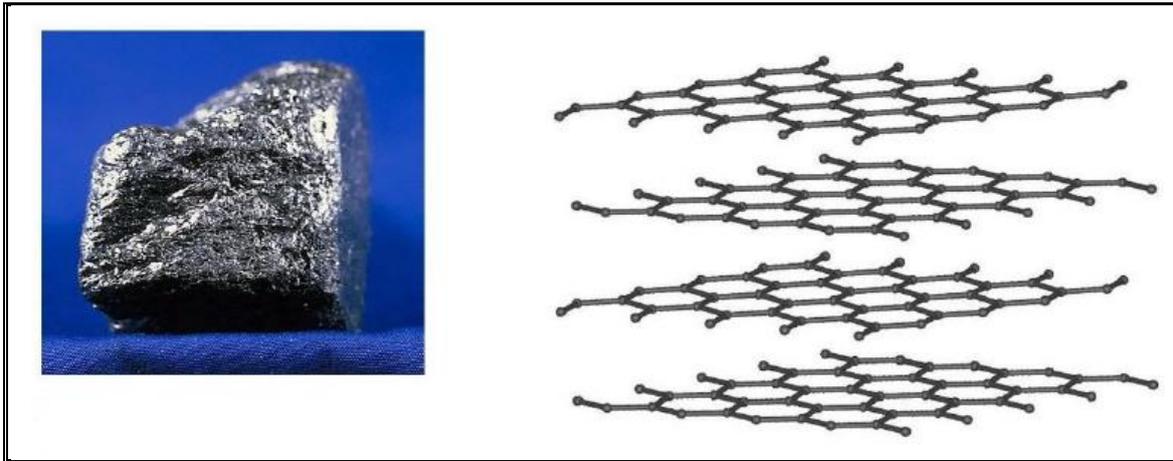


Figure 1.2 le graphite et sa structure hexagonale

b) Le diamant

Le diamant est un minéral transparent composé de cristaux de carbone pur. Cette pierre précieuse est connue pour être le minéral le plus dur qui soit. C'est seulement à la fin du XVIII^e siècle que le diamant fut identifié comme une forme cristalline du carbone par Lavoisier et Tennant. Dès lors, les chimistes ont cherché à le synthétiser. Ils n'y sont parvenus qu'au milieu du XX^e siècle[5].

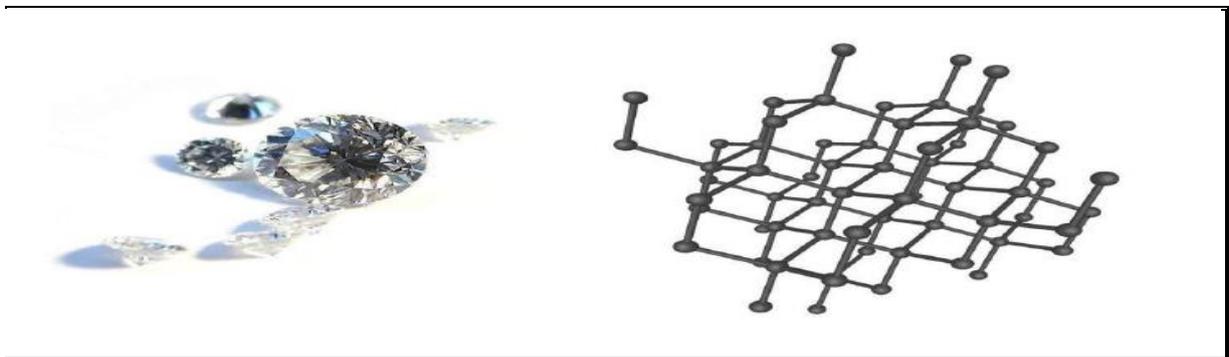


Figure 1.3Le diamant et sa structure

c) Les carbones « mal organisés »

Le carbone peut être présent sous une forme mal organisée et comme le cas du carbone amorphe. Le carbone amorphe est rare. Il est présent dans les particules des couches extérieures de l'atmosphère des étoiles froides, appelées poussières d'étoiles.

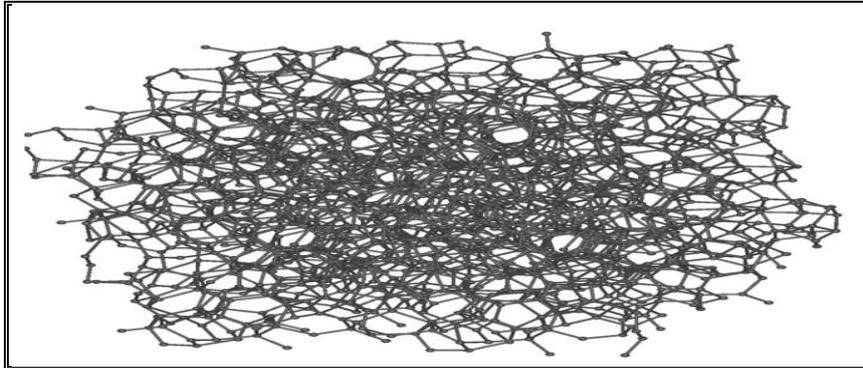


Figure 1.4 Représentation moléculaire de carbone amorphe

1.2.1.2 Les nouvelles formes**Les fullerènes**

La découverte de la molécule C₆₀, le « footballène », a donné le coup d'envoi à tout un champ des nanosciences. Avec une riche moisson dont font aujourd'hui partie les nanotubes et le graphène.[6]

le nombre de liaisons pendantes sur les bords d'un plan graphène devient élevé : la structure doit alors « se refermer » sur elle-même. Si le nombre de carbones est inférieur à quelques centaines, les structures stables sont fermées : il s'agit des fullerènes, de formule brute C_{2n}. En conséquence directe du théorème d'Euler, on peut calculer que 12 pentagones sont nécessaires pour donner la courbure permettant à la structure de se refermer sur elle-même, avec 12 pentagones et 20 hexagones on forme le fameux C₆₀, Ce fullerène est représenté sur la figure 1.5 avec ses deux types de liaisons C-C[1].

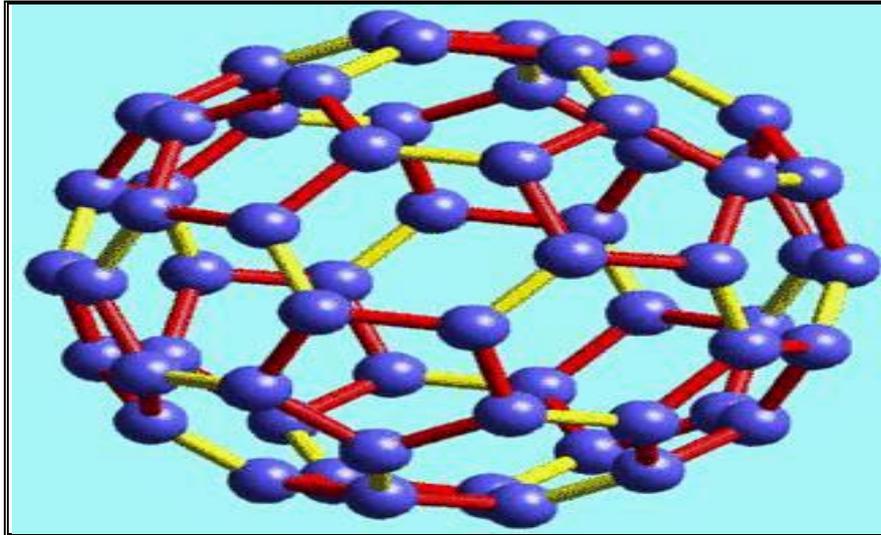


Figure 1.5 Structure du C60 [7]

En coupant en deux parties égales le C60 et en ajoutant des atomes de carbone avant de refermer la structure (figure 1.6), on peut construire le C70 (25 hexagones, 12 pentagones) et le C80 (30 hexagones, 12 pentagones) [1].

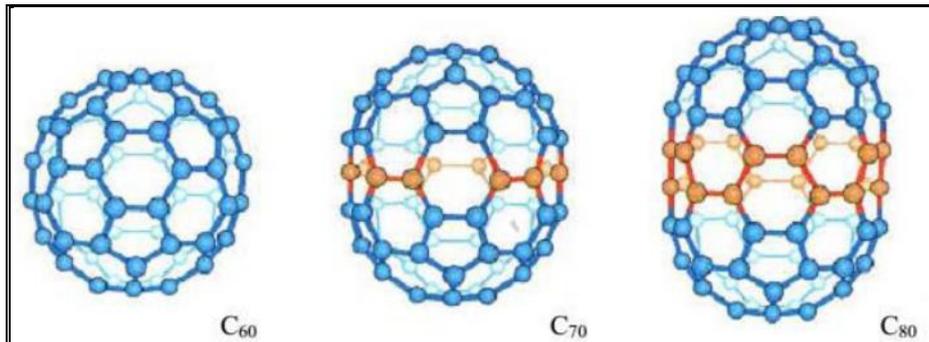


Figure 1.6 Du C60 au C80: les atomes ajoutés au C60 pour obtenir le C70 et le C80s ont représentés en rouge

En ajoutant encore des carbones, on arrive à un fullerène allongé avec plusieurs centaines à plusieurs millions d'hexagones et 12 pentagones, on obtient un nanotube de carbone monocouche (figure 1.7) [1].

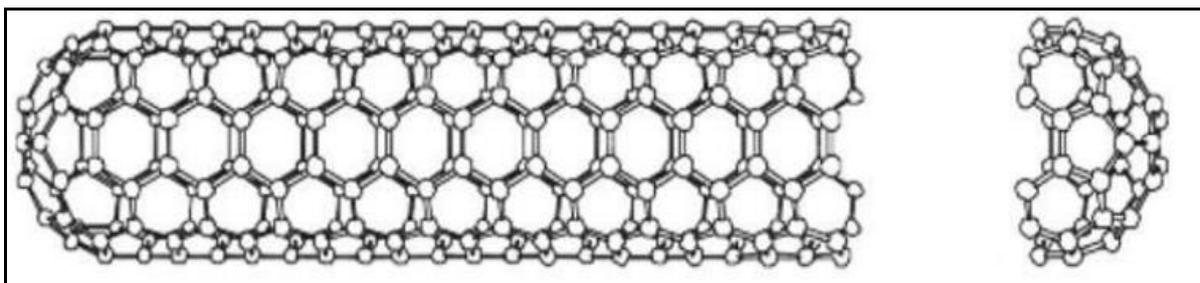


Figure 1.7 Nanotube de carbone monocouche

1.3 Les nanotubes de carbone

1.3.1 Nano

Le préfixe nano est le préfixe du Système international d'unités qui représente 10^{-9} (un milliardième). aussi est très utilisé pour les dimensions atomiques et subatomiques (nanomètre : $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$).

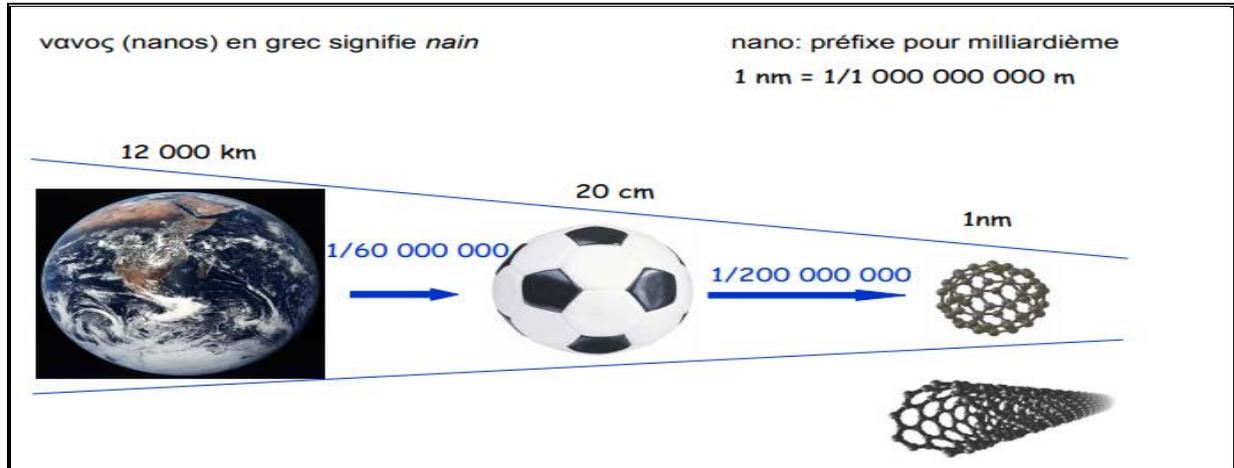


Figure 1.8 explication sur la terme nano [8]

1.3.2 La découverte

Les nanotubes de carbone sont de minuscules molécules cylindriques, que l'on ne peut observer qu'à l'aide de puissants microscopes. Mais aussi petits soient-ils, ils ouvrent de grandes perspectives d'avenir. Découverts par Sumio Iijima chez NEC Corporation (Japon), ils sont la substance la plus dure que l'on connaisse et sont 1 000 fois plus conducteurs que le cuivre. Les nanotubes de carbone pourraient ouvrir une nouvelle ère, dans laquelle les ordinateurs seraient plus rapides et les matériaux plus solides qu'on ne l'a jamais cru possible[9].

1.3.3 La structure

Imaginez des atomes de carbone, chacun relié à trois atomes voisins, selon une structure hexagonale ou en nid d'abeille, pour former une plaque d'une épaisseur de seulement un atome. Imaginez à présent cette plaque enroulée de manière à ce que ses bords se rejoignent pour former un cylindre : on obtient un nanotube de carbone. Ces tubes peuvent être simples (mono paroi) ou bien comprendre deux tubes concentriques de diamètres différents ou plus, placés les uns à l'intérieur des autres (multi parois) [8].

1.3.3.1 mono parois (ou mono feuillets)

En 1993 les SWNT (mono feuillets) ont été synthétisés par Bethune et al et Iijima. Un SWNT est constitué d'un feuillet de graphène enroulé sur lui-même et forme un tube ayant à ses extrémités un semblant de demi fullerène.¹⁰ Le diamètre des nanotubes est compris entre 0.4 nm et 3 nm. La façon dont laquelle les feuillets de graphène sont enroulés détermine les propriétés structurales qui déterminent les propriétés électroniques des tubes.

L'enroulement consiste à superposer un atome de carbone O sur un autre A (figure 1.9) pour former un cylindre. OA détermine le vecteur de chiralité C_h qui est un vecteur

perpendiculaire à l'axe du tube : $\mathbf{C}_h = n\mathbf{a}_1 + m\mathbf{a}_2$ (1.1)

\mathbf{a}_1 et \mathbf{a}_2 sont les vecteurs unitaires du réseau de Bravais du graphène, et n et m sont deux entiers appelés indices chiraux du nanotube ou indice de Hamada. dt, le diamètre du nanotube est déterminé par la relation suivante :

$$d_t = \frac{|\mathbf{C}_h|}{\pi} = \frac{\sqrt{3} \cdot a_{c-c}}{\pi} \sqrt{n^2 + nm + m^2} \quad (1.2)$$

où $a_{c-c} = 0,144$ nm, la distance entre deux atomes de carbone voisins. θ_t est l'angle chiral entre le vecteur \mathbf{a}_1 et le vecteur \mathbf{C}_h . θ est compris entre 0° et 30° , il est déterminé par la relation :

$$\cos(\theta) = \frac{2n+m}{2\sqrt{n^2+nm+m^2}} [9] \quad (1.3)$$

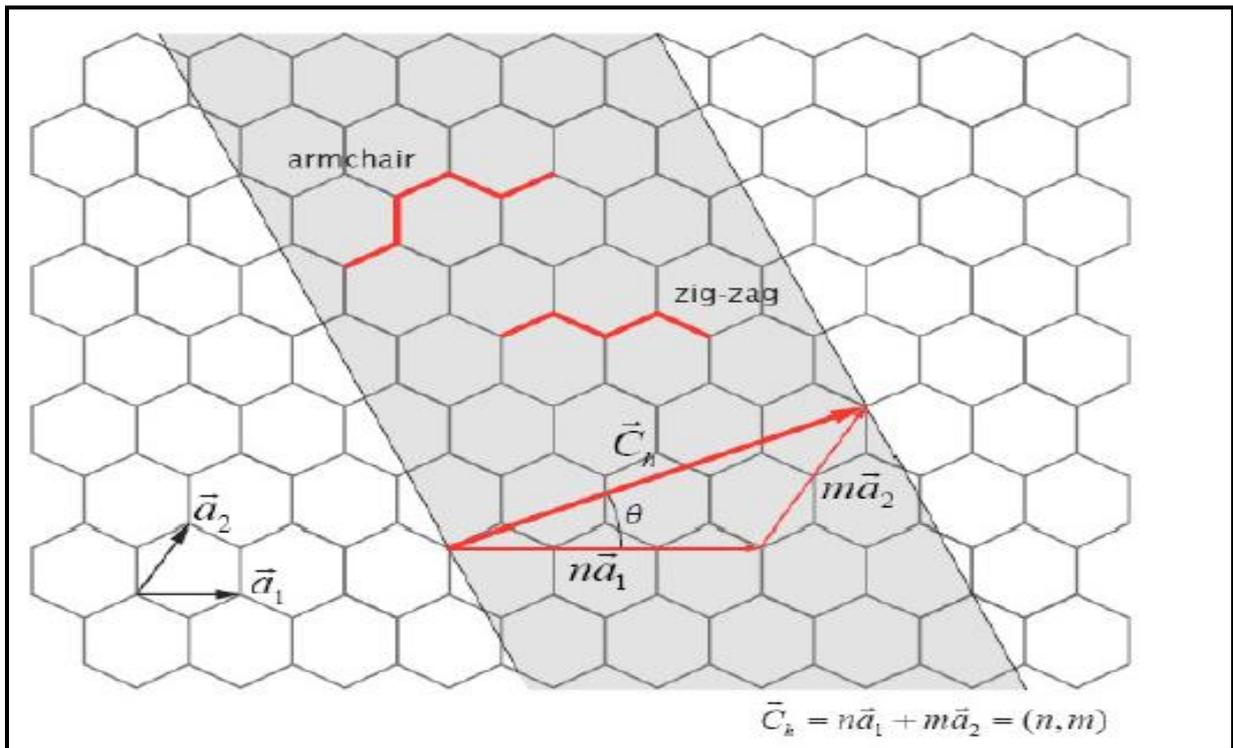


Figure 1.9 Construction SWNT

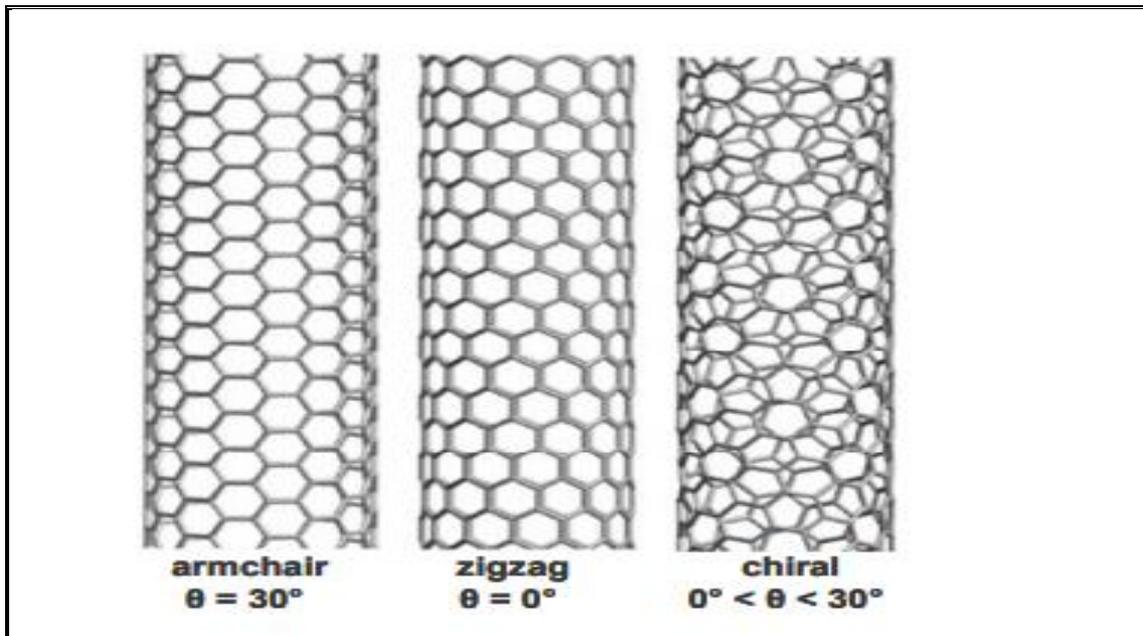


Figure 1.10 SWNT de différentes chiralités. De gauche à droite : nanotube « armchair », « zigzag » et chiral.

Selon la valeur de θ , les nanotubes de carbone sont classés en trois familles (figure 1.10): ☐

. si θ est nul soit $m = 0$ ou $n = 0$, les nanotubes sont appelés « zig-zag ».

. si $\theta = 30^\circ$ soit $m = n$, les nanotubes sont appelés « armchair ». ☐

. si $0^\circ < \theta < 30^\circ$ soit $m \neq n \neq 0$, les nanotubes sont chiraux [10].

1.3.3.2 Multi parois (ou multi feuillets)

Le développement des techniques de caractérisation parmi elles la microscopie électronique Cela a permis à Iijima Simo de découvrir MWNT les nanotubes multi feuillets (ou nanostructures graphitiques unidimensionnelles), Cette découverte a été réalisée en travaillant sur la synthèse des NTC par la méthode de l'arc électrique.

Les nanotubes multi feuillets sont constitués de plusieurs feuillets de graphène enroulés de façon concentrique. L'espace entre 2 feuillets de graphène est d'environ 3.6 nm . Le diamètre des nanotubes varie selon le nombre de feuillets et peut varier de 3 nm jusqu'à 30 nm [9].

Il existe deux modèles pour décrire la structure des nanotubes multi-feuillets :

- le modèle poupée russe : les plans de graphène sont arrangés en cylindres concentriques.
- le modèle parchemin : un seul feuillet de graphène est enroulé sur lui-même, comme une feuille de papier.

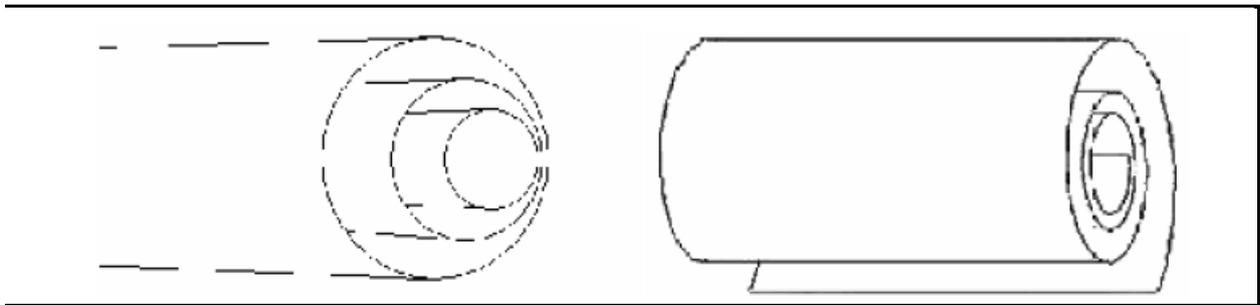


Figure 1.11 Structures possibles des (MWNT). Gauche : modele poupée russe. Droite : modele rouleau de Parchemin .

1.3.4 Les propriétés

1.3.4.1 Mécaniques

Tout en découvrant des nanotubes de carbone, un certain nombre de scientifiques l'ont étudié théoriquement, confirmant que la valeur de son module De Young varie entre 1 et 1.5 Tpa. Les premières mesures expérimentales réalisées à la fin des années 90 sont en accord avec la théorie en rapportant des valeurs de module allant de 0,4 à 3,7 TPa (moyenne de 1,8 TPa, supérieure au module du diamant de 1,2 TPa). Les mesures sont réalisées par microscopie à force atomique (AFM) (Wong et al, 1997), ainsi qu'en utilisant la fréquence de vibration thermique des nanotubes de carbone dans un microscope électronique à transmission (Treacy et al, 1996)). Salvetat et al (1999) ont démontré que ce module est indépendant du diamètre des nanotubes pour les MWNT mais que les défauts dans un nanotube affectaient et dégradaient de manière considérable sa valeurs. Malgré cette grande rigidité, les nanotubes

peuvent, sous une certaine contrainte, se déformer de manière réversible en flexion en formant un angle pouvant atteindre jusqu'à 110° pour un SWNT (Iijima et al, 1996, Despres et al, 1995). Les nanotubes présentent donc une grande aptitude à la déformation qui interviendra non seulement dans les propriétés des nano composites à l'état solide mais également pour expliquer le comportement de suspensions de NTC dans des pré-polymères (thermodurcissables) et des polymères fondus (thermoplastiques). Au-delà de leur raideur significative, les nanotubes de carbone présentent également une grande résistance à la traction. Yu et al (2000) ont calculé cette résistance en sollicitant un MWNT entre deux pointes d'un AFM. Il est alors apparu que seul le feuillet extérieur intervient et supporte la sollicitation contrainte de rupture en traction comprise entre 11 et 63 GPa). Les travaux de Lourie et al (1998) rapportent une contrainte de rupture en compression de MWNT comprise entre 110 et 150 GPa (en compression, tous les feuillets supportent la contrainte appliquée). Toujours grâce à un dispositif AFM, Walters et al (1999) ont calculé une contrainte de rupture en traction moyenne de $45 (+/- 7)$ GPa. Wagner et al (1998) ont utilisé une méthode de calcul indirecte considérant un nano composite (NTC dans une matrice polymère) et ont ainsi mesuré une contrainte de rupture en traction moyenne de 55 GPa pour des SWNT. Les méthodes de calculs théoriques (notamment par modélisation numérique) ont également permis de rapporter des valeurs de contraintes à rupture en traction. Ainsi Yakobson et al (2001) et Belytshko et al (2002) mentionnent des contraintes à rupture des NTC de 150 GPa et comprises entre 93 et 112 GPa respectivement. Il est nécessaire de préciser que, dans ce type d'approches de modélisation, les structures des nanotubes sont considérées comme parfaites.[8] La raison principale de ces propriétés fortes est La liaison C-C du graphite est une liaison chimique forte et L'énergie de dissociation de cette liaison est en effet de 348 kJ.mol^{-1} .

Les nanotubes de carbone devraient constituer des fibres de renfort idéales pour les matériaux composites. Ils présentent en effet une forte résistance à la traction. En outre, ils ont un rapport longueur/diamètre très élevé (typiquement quelques milliers), tout en étant suffisamment courts pour être coulés à travers les équipements classiques de mise en forme des polymères, autorisant ainsi des formes complexes[1].

1.3.4.2 Thermique

La mesure des propriétés thermiques d'un nano-objet comme le nanotube est délicate. Cependant, quelques études expérimentales ont permis de mesurer la conductivité thermique de nanotubes multi feuillets. Leur conductivité est grande (de 600 à $2000 \text{ W. m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), mais significativement plus faible que celle du graphite. Ces résultats sont a priori décevants, mais

ils peuvent s'expliquer en considérant le fait que tous les feuillets ont participé à la conduction thermique alors que seul le feuillet externe a été utilisé pour les mesures. Ces considérations permettent d'estimer la magnitude de la conduction d'un tube mono feuillet au même ordre de grandeur que celle du graphite.

Les nanotubes pourraient accroître fortement la conductivité thermique de composites à fibres discontinues. Ces derniers pourraient bénéficier en outre des propriétés mécaniques des tubes[1].

1.3.4.3 Electriques

Les différentes études théoriques sur la conductivité électrique des nanotubes de carbone (Tans et al, 1997- Mintmire et al, 1992) ont été validées par des approches expérimentales (valeurs pouvant aller de $1,5 \cdot 10^4$ à $2,107 \text{ S.m}^{-1}$) (Issi et al, 1995, Ebbesen et al, 1996). La principale difficulté résidant dans le fait qu'il est très difficile d'effectuer ce type de mesure sur un nanotube unique (de la même façon que pour une caractérisation du comportement mécanique). Dohn et al (2005) ont utilisé une méthode de mesure quatre pointes alors que les équipes de Wilder (1998) et Odom et al, (1998) ont réalisé cette mesure par microscopie à effet tunnel (STM) et par spectroscopie sur des nano composites à base de nanotubes de carbone[11].

Des approches théoriques prédisent une densité de courant électrique de $4 \cdot 10^9 \text{ A.cm}^{-2}$ pour un nanotube de type SWNT métallique, c'est à dire supérieure à celle du cuivre de près de trois ordres de grandeur (Hong et al, 2007). Wei et al (2001) ont vérifié expérimentalement les valeurs des densités de courant dans les nanotubes de carbone ainsi que l'influence du temps et de la température sur ce paramètre. Il apparaît qu'aucun changement majeur n'est relevé à ce niveau après deux semaines à 250°C ce qui en fait d'excellents candidats pour les applications électroniques et notamment pour des propriétés d'émetteurs d'électrons. En effet, leur grand facteur de forme va leur conférer, sous champ électrique, un fort effet de pointe. Ainsi, avec des tensions relativement faibles, de très grands champs électriques sont générés à leur extrémité. Ces champs vont arracher des électrons à la matière pour les émettre vers l'extérieur[11].

1.3.4.4 Optique

Les nanotubes de carbone présentent des propriétés de limitation optique dans une très large gamme de longueurs d'onde (du visible au proche infra-rouge). Des densités optiques égales voire supérieures à celles d'autres bon limiteurs optiques (60 C ou noir de carbone) ont été obtenues avec des SWNT en suspension dans des solutions aqueuses (Vivien et al, 1999).

Ce type de dispersion s'avère donc être un excellent système de limitation optique à bande large. Il faut noter que ce phénomène peut aussi s'observer dans un film polymère (Sun et al,1998).

1.3.5 Synthèse

Une multitude de techniques existent pour la synthèse des nanotubes de carbone, Le principal défi est la synthèse de NTCs purs, ayant une longueur et un diamètre définis et ayant le moins de défauts possible.

Il existe plusieurs méthodes de la synthèse des NTCs entre eux:

a) l'arc électrique

La technique de l'arc électrique est un procédé de synthèse haute température. Cette technique a permis de synthétiser les fullerènes en grande quantité, et de produire les premiers nanotubes multi feuillets identifiés par S. Iijima. Cette méthode utilisée par Sumio Iijima consiste à insérer deux tiges de graphite, l'anode et la cathode, dans une chambre de production par arc électrique, remplie de gaz non réactifs. Lorsqu'on les rapproche et qu'un courant électrique les parcourt, un arc est produit, il se consume pour former un plasma dont la température peut atteindre 6 000 °C, ce qui vaporise instantanément la pointe d'une des deux tiges. Du gaz de carbone produit lors de cette vaporisation, se forme des nanotubes qui possèdent généralement 20 à 30 parois. Si on ajoute des catalyseurs métalliques à l'intérieur de l'anode, il est possible d'obtenir des nanotubes de carbone mono feuillets[11].

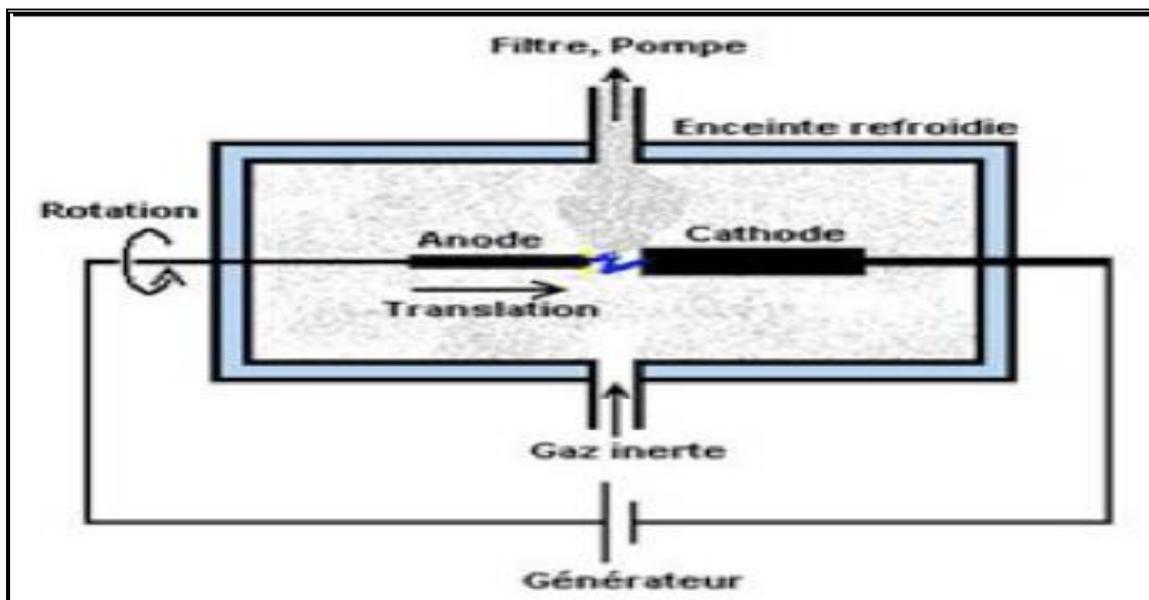


Figure 1.12 Schéma du Production de nanotubes par méthode de l'arc électrique [11]

b) Ablation par laser

Technique réalisée par le groupe de R. Smalley, à l'Université de Houston (USA), qui consiste à bombarder une tige de graphite avec un rayonnement laser continu (à flux continu) ou pulsé (à impulsions brèves, il peut être plus puissant que le laser continu). Ce procédé a permis de faire baisser la température de la réaction à 1 200 °C. Le graphite est soit vaporisé soit expulsé en petits fragments de quelques atomes, le procédé est plus coûteux, mais a un rendement de synthèse plus important que la méthode de production par arc électrique, elle permet aussi un contrôle plus facile, ce qui permet l'étude des conditions de synthèse et leur modélisation afin de n'obtenir que les produits désirés[12].

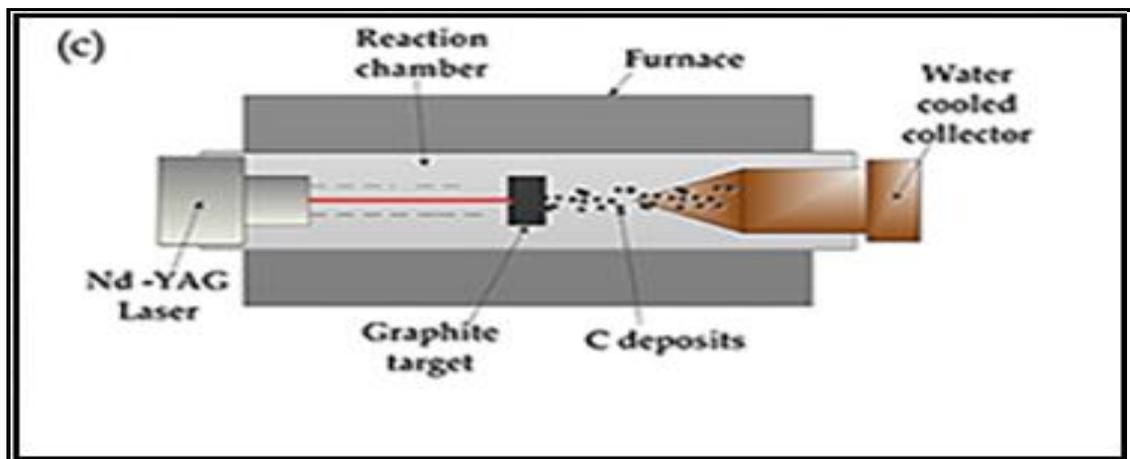


Figure 1.13 Schéma de la Production de nanotubes par méthode de l'ablation par laser [12]

c) dépôt chimique en phase vapeur

Par la méthode CVD, décomposition chimique en phase vapeur, la source de carbone est un gaz de type hydrocarbure (comme le méthane ou l'éthylène) décomposé à haute température (500-1100 °C) en présence d'un catalyseur, le plus souvent des particules métalliques de Fer, Cobalt ou Nickel. Le support catalytique peut être fixe, on parle alors de croissance supportée, ou être sous forme d'un aérosol injecté dans le four, on parle alors de croissance flottante. La croissance supportée se fait en déposant le catalyseur sur un support de type silice ou carbone déposé dans le four. Cette méthode permet un meilleur contrôle de la taille du catalyseur et ainsi de la longueur et de la structure des CNTs. Elle permet aussi la croissance de CNTs alignés. Cette synthèse par CVD permet une production à plus grande échelle grâce à son utilisation possible en continu. Elle permet d'obtenir des CNTs avec un taux d'impuretés plus faible[1].



Figure 1.14 Schéma d'un réacteur CVD pour la croissance des (NTC) [13]

d) Décomposition catalytique (HiPCO)

Le procédé (HiPCO) (High Pressure dismutation of CO) a été développé par le groupe de R. Smalley. Ce procédé fait partie de la famille des procédés de décomposition catalytique à moyenne température. Un flux continu de penta carbonyle de fer ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) et de monoxyde de carbone (CO) est introduit sous une pression de (10 atm) dans une enceinte chauffée à (1200°C). L'originalité du procédé tient au fait que le catalyseur, nécessaire à la croissance des tubes mono feuillets, est formé in situ par la décomposition du gaz précurseur. De surcroît, le monoxyde de carbone utilisé comme source de carbone pour la croissance des tubes ne se pyrolyse pas à (1200°C), ce qui permet d'obtenir des nanotubes de carbone mono feuillets. L'avantage de cette méthode est de permettre la production d'échantillons de nanotubes, a priori sans carbone amorphe. Les seules "impuretés" dans le produit de synthèse sont les particules de catalyseurs métalliques. D'autre part, cette méthode permet de produire des nanotubes dans des quantités comparables à celles obtenues par la méthode d'ablation laser et d'obtenir des nanotubes avec un diamètre moyen plus petit de l'ordre de (0,7 nm).

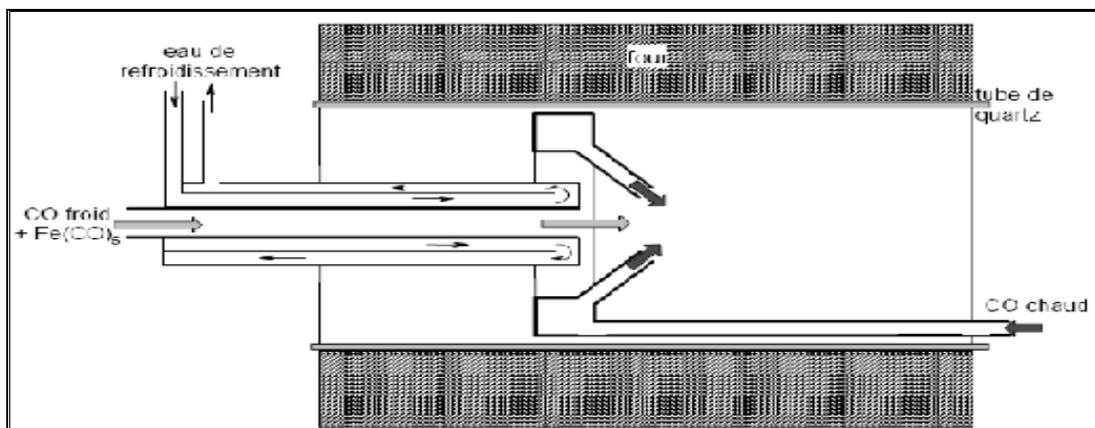


Figure 1.15 Schéma du Production de nanotubes par méthode HiPCo [14]

Tableau 1.1 Résumé des méthodes générales de synthèse

méthode	Arc électrique	cvd	Ablation par laser
par	Ebessen and ajayanNec japan	Endo, Shinshuunivjapan	Smalley, Rice 1995
comment	connectez deux tiges de graphite à une alimentation, placez-les à quelques millimètres l'une de l'autre et lancez l'interrupteur à 100 ampères, le carbone se vaporise et forme du plasma chaud	placer le substrat dans le four, chauffer à 600 ° C et ajouter lentement un gaz porteur de carbone tel que le méthane, car le gaz se décompose libère des atomes de carbone, qui se recombinent sous forme de nanotubes	vous faites exploser du graphite avec des impulsions laser intenses, utilisez les impulsions laser plutôt que l'électricité pour générer du gaz carbonique à partir duquel les nanotubes se forment, essayez diverses conditions jusqu'à ce que vous tombiez sur celle qui produit des quantités prodigieuses de nanotubes de carbone (mono feuille)
Rendement typique	30 a 90 (%)	20 a 100 (%)	jusqu'à 70%
mono feuille	tubes courts de diamètres de 0.6- 1.4 nm	longs tubes de diamètres 0.6-4 nm	longs faisceaux de tubes (5-20 microns) avec des diamètres individuels 1-2 nm
multi feuille	tubes courts avec un diamètre intérieur de 1 à 3 nm et un diamètre extérieur d'environ 10 nm	longs tubes de diamètres 10-240 nm	pas très intéressé par cette technique car elle est trop chère, mais la synthèse mwnt est possible par cette méthode
Les avantages	peut facilement produire SWNT, MWNT. SWNT a peu de défauts structuraux MWNT sans catalyseur pas trop cher synthèse en plein air possible	passage à la production industrielle le plus facile SWNT diamètre contrôlable	principalement SWNT avec un bon contrôle du diamètre et peu de défauts
les inconvenients	les tubes tendres courts avec des tailles et des directions aléatoires	les nanotubes sont généralement MWNT et souvent criblés de défauts	technique coûteuse, car elle nécessite des lasers coûteux et des besoins en puissance élevés,

1.3.6 Applications des nanotubes de carbone

Grace à leurs propriétés puissantes, les nanotubes de carbone sont susceptibles à l'avenir d'être utilisés dans de nombreux domaines à part notre cas, notamment :

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

- dans le domaine militaire, particulièrement pour la construction de canon électrique .

- dans les disques durs : ils serviraient de réservoirs de lubrifiant, celui-ci fondant par l'utilisation d'une nouvelle technique de chauffage par laser (modifiant les propriétés magnétiques) avant écriture.

- le 19 mai 2006, des chercheurs de l'université de Berkeley et de Livermore, en Californie, ont trouvé une nouvelle application pour les nanotubes : ils pourraient servir à séparer différents gaz ou liquides. En effet, ces chercheurs ont démontré que les molécules passaient bien plus facilement à travers ces tubes que dans d'autres pores de taille équivalente.

1.4 Les Nano composites

Le nano composite à base polymérique est un mélange de nanoparticules appelées nano-charges et d'une résine polymérique. Le produit qui en découle possède de meilleures propriétés mécaniques, barrières et thermiques que la résine de base[15].

1.4.1 Les matériaux composites

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

La matrice et le renfort peuvent être métalliques, céramiques ou plastiques, ce qui permet d'envisager une multitude de combinaisons. Nous ne présenterons pas ici une revue exhaustive

sur les matériaux composites mais nous concentrerons sur ceux dont la matrice est constituée d'un polymère[16].

Les matériaux composites sont constitués principalement :

- D'une matrice à laquelle sont ajoutés, dans certains composites des charges,
- D'un renfort.
- D'une interface.

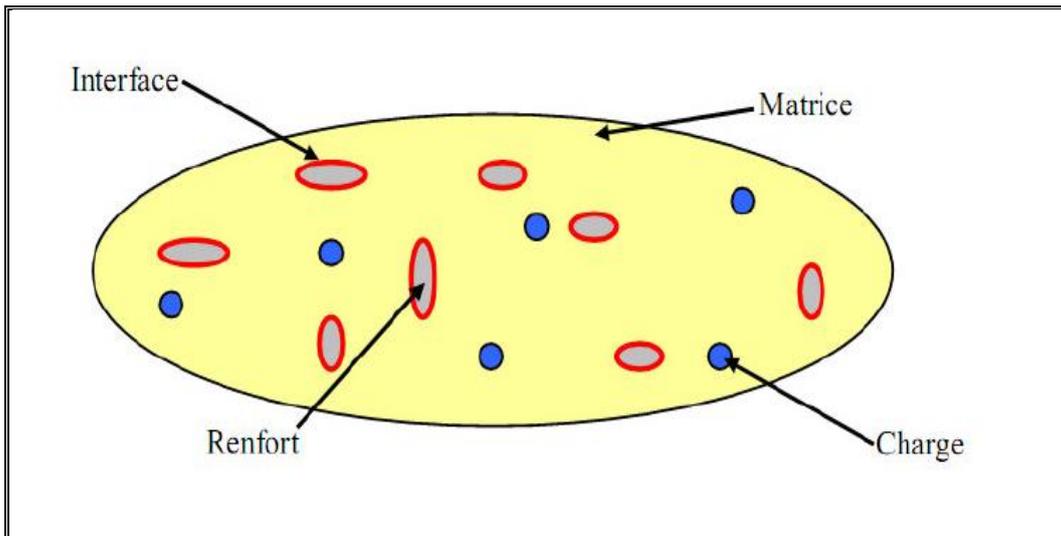


Figure 1.16Matériau composite

1.4.1.1 Matrice

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

- celles dites organiques, qui regroupent essentiellement les polymères :

- a) les thermoplastiques
- b) les thermodurcissable
- c) les élastomères

- et l'autre nommée les minérales, qui regroupent :

- a) les métalliques
- b) les céramiques

L'utilisation de matrices métalliques renforcées par des CNTs fut d'actualité à une période, mais celle-ci a été rapidement écartée pour laisser la place aux polymères. Les matrices polymères, et en particulier les résines thermodurcissables sont utilisées en abondance de nos

jours du fait de leurs nombreux avantages : bonnes propriétés mécaniques, masses faibles, mise en forme simple et rapide [1].

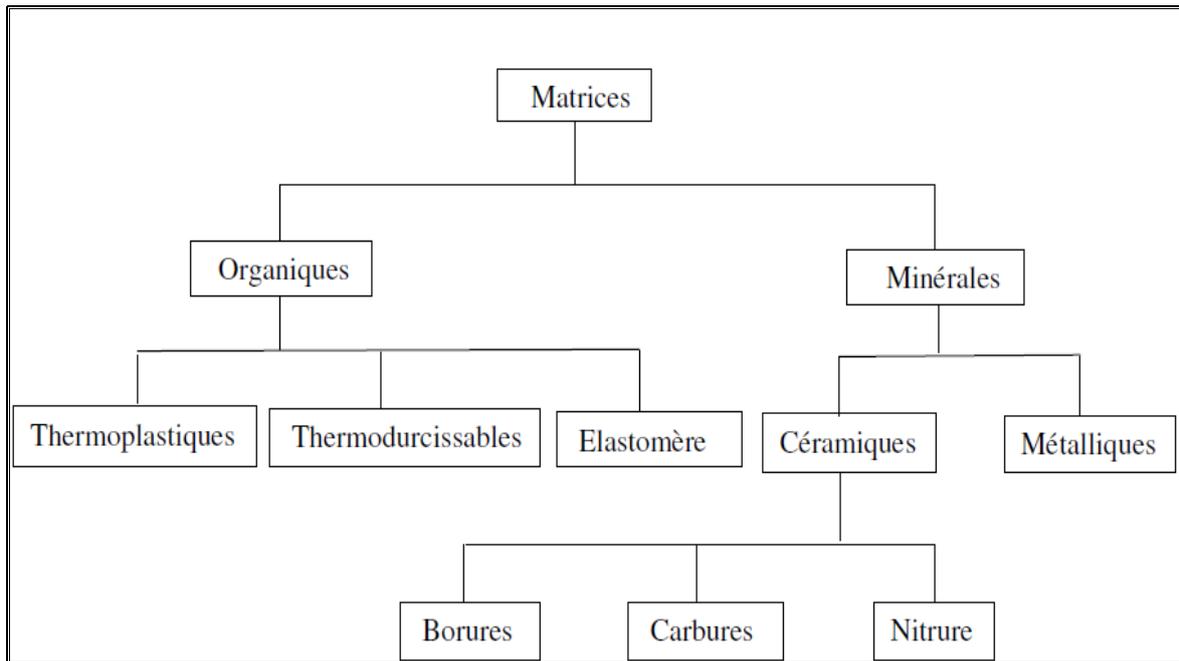


Figure 1.17 Différentes familles de matrices

1.4.1.2 Renfort

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

- verre ;
- carbone ;
- carbure de silicium,...

Dans notre cas, nous allons utiliser les CNTs comme renforts dans une matrice polymère. On parlera donc de nano composites[1].

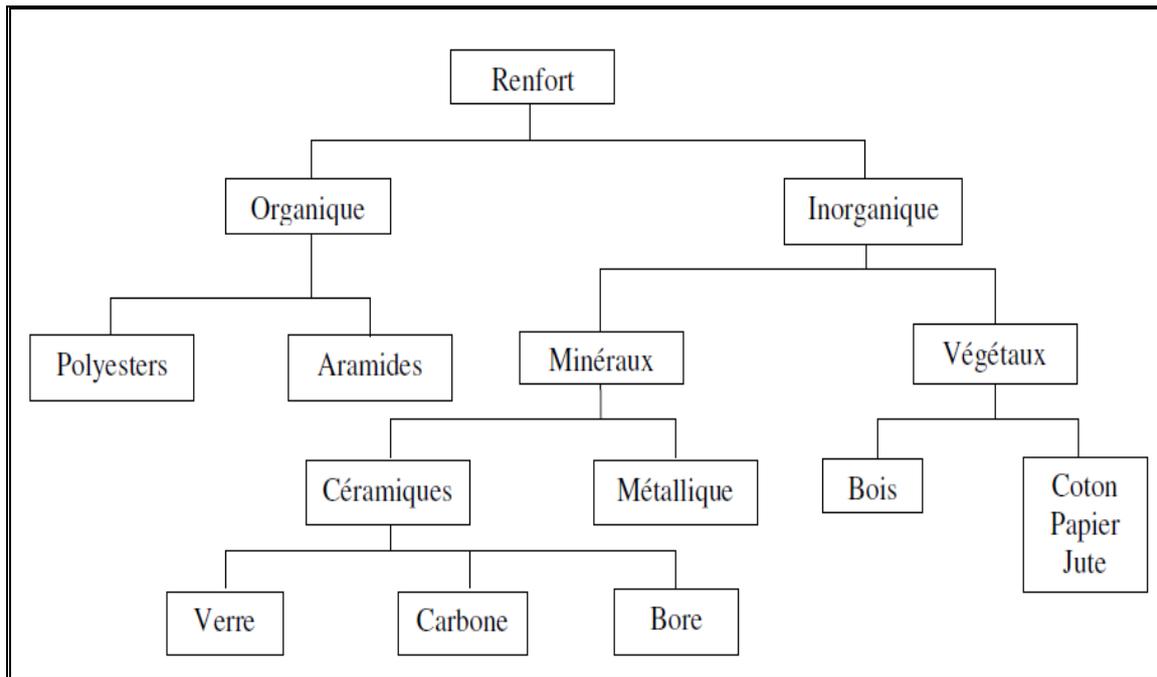


Figure 1.18 Principaux matériaux de renfort

1.4.2 Les matériaux composites à base de NTC

Une voie possible d'utilisation des nanotubes de carbone est leur association avec d'autres matériaux. Des travaux de recherche ont déjà été faits pour leur incorporation dans des métaux, des céramiques, plus communément dans des polymères. Le but premier de ces nouveaux matériaux à base de NTCs étant de changer les propriétés électriques du matériau. L'ajout de ces nano-objets (NTCs) permet de passer d'un état isolant à un état conducteur en passant par un seuil p_c (seuil de percolation). Cependant, la condition sine qua none pour obtenir une amélioration significative de toutes ces propriétés est de parvenir à disperser ces nano-objets de manière homogène dans la matrice polymère[1].

Afin d'étayer l'intérêt de ces nouveaux matériaux, des études récentes ont démontré l'importance de ces matériaux à base de nanotubes pour des applications micro-ondes à l'échelle macroscopique telle que la protection électromagnétique de salles entières et de matériaux absorbant pour des applications antennes. Les recherches actuelles s'orientent maintenant vers des applications à l'échelle micrométrique intégrables en microélectronique[1].

1.4.2.1 Incorporation des NTCs dans des métaux

Dans le domaine des composites métalliques renforcés en NTCs, nous pouvons citer l'alliage Al-Si dopé en NTCs par l'université de Floride (USA) dans le but de renforcer les propriétés mécaniques de l'alliage. Cet alliage (Al-Si) peut être utilisé dans l'industrie de l'automobile pour sa forte résistance corrosive et sa forte durée de vie. Dans le but de renforcer l'Al-Si, une quantité de 10%.m (pourcentage de NTCs en poids massique) de nanotubes de carbone est ajouté dans la structure. Pour améliorer l'homogénéité des NTCs et de l'alliage, Par pulvérisation plasma, la poudre composite NTCs/Al-Si est ensuite déposée sur une structure en aluminium.

Cependant la faible adhérence entre la surface des sphères Al-Si et la paroi des nanotubes de carbone ne donne pas un renforcement très important par rapport aux attentes de départ. Des études récentes présentent des intérêts thermiques de ces composites métalliques/NTCs[1].

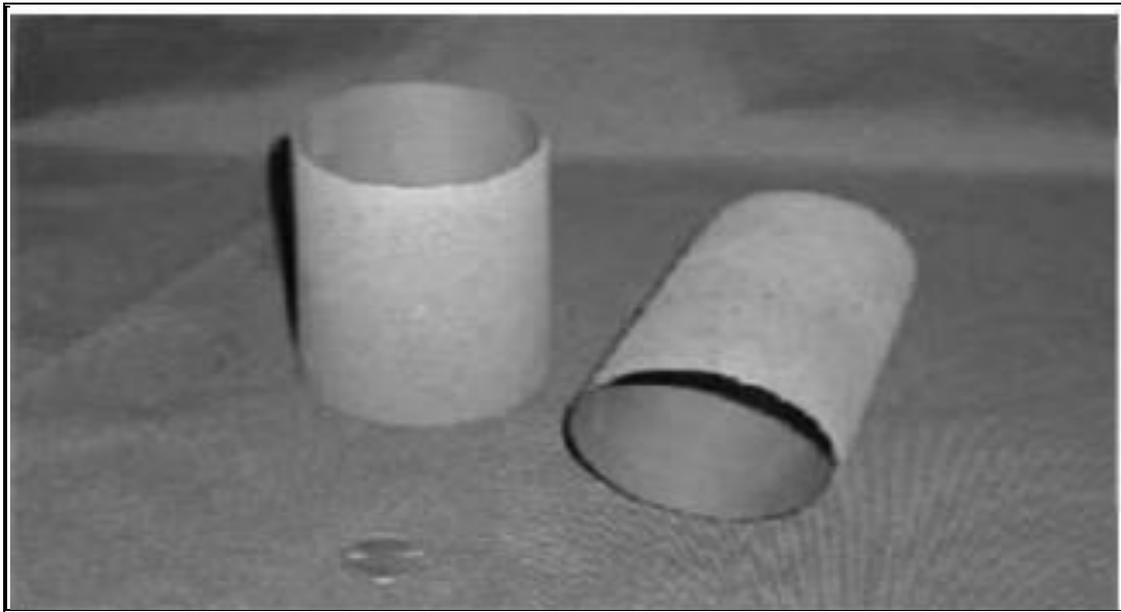


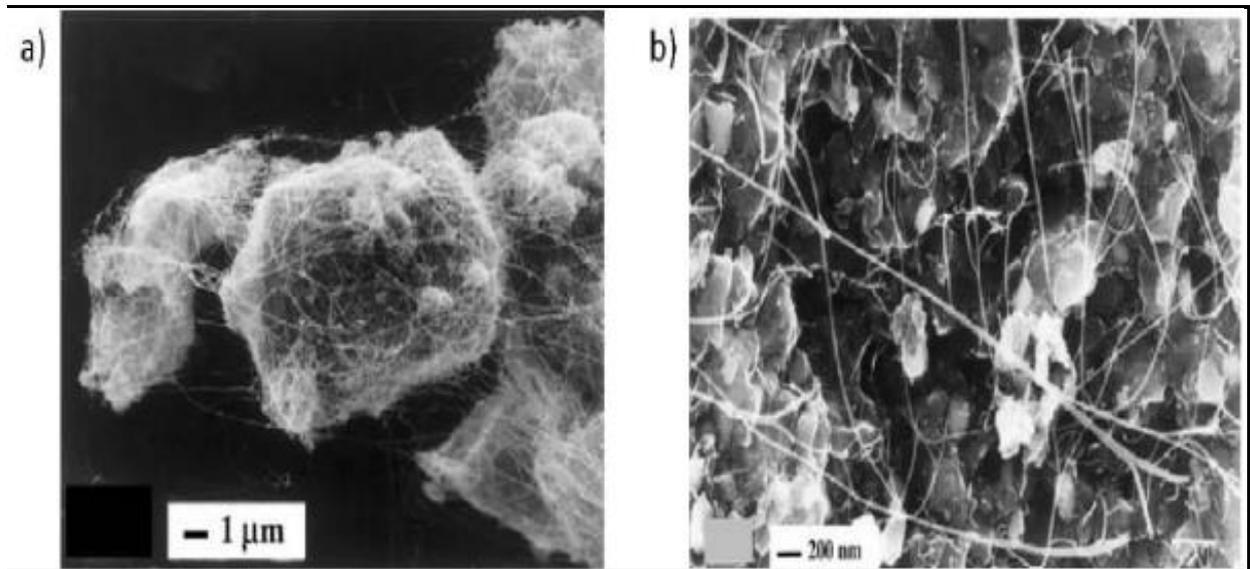
Figure 1.19 image des structures cylindriques en composite NTCs/Al-Si

1.4.2.2 Incorporation des NTCs dans céramiques

Pour les composites céramiques renforcées en NTCs, les matrices les plus utilisées sont en alumine de type Al_2O_3 . Durant les thèses d'Emmanuel Flahaut et d'Anne Cordier du CIRIMAT à Toulouse, ils ont développé une méthode de fabrication du composite NTC/ Al_2O_3 par une croissance in-situ des nanotubes de carbone.

Elle comprend la préparation d'une solution solide $Al_{2-2x}Fe_{2x}O_3$ et d'une réduction sélective par un mélange gazeux H_2-CH_4 . Puis aboutit à une poudre nano-composite NTC-Fe-

$\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$. Des images MEB (Microscopie électronique à balayage) démontrent la bonne homogénéité des nanotubes de carbone dans le matériau par ce procédé de fabrication.



a) Images MEB du nano-composite NTC/FeAl₂O₃ b) zoom du nano-composite

Figure 1.20 image de nano-composite

Des mesures de conductivité thermique démontrent un gain de 218% de l'apport des nanotubes de carbone par rapport au matériau alumine. Cependant, en 2000 Flahaut et al ont mis en évidence que le composite NTC/céramique et notamment NTC/Fe- $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$ possédait une conductivité électrique (σ) non nulle. Il a été clairement démontré que cette conductivité électrique n'était pas due à la présence des catalyseurs métalliques (Fe, Co, etc...) dans la matrice mais de la présence des NTCs. De plus, la conductivité électrique des composites est d'autant plus élevée que la fraction volumique en NTC est importante. Les travaux de Rul apportent une première idée sur le contrôle du comportement électrique du composite NTC/MgAl₂O₄ suivant la quantité de nanotube insérée. Dans l'esprit de changer les propriétés électriques des composites, les polymères peuvent ajouter un rôle important dans cette tâche.

1.4.2.3 Incorporation des NTCs dans des polymères

Depuis quelques années les polymères sont de plus en plus présents dans la microélectronique. L'adjonction de nanotubes de carbone dans ces polymères apporterait de nouvelles propriétés mécaniques, électriques et thermiques. Les polymères composites étudiés dans la littérature ont des buts différents mais peuvent présenter cependant un intérêt similaire à l'amélioration du module d'Young. Une des premières avancées dans la rigidité des

polymères a été observée par Cadek et al [17] sur un composite NTC/PVA. Il a démontré une amélioration du module d'Young du composite NTC/PVA (7GPa → 12,6GPa) et NTC/PVK (2GPa → 5,6GPa) avec une insertion de 0,6%.m et 4,8%.m de NTCs respectivement dans les polymères. En 2002, Kulmar et al [18] ont étudié la rupture d'un composite NTC/PBO. Le PBO possède un module d'Young de 138GPa et se voit augmenter à 167GPa en insérant 10%.m de NTCs. En ajoutant ce composite sur une fibre, la force de rupture est améliorée de 2,6GPa à 4,2GPa.

1.4.3 Polymères

Le terme polymère désigne une molécule de masse moléculaire élevée généralement organique ou semi-organique. Une macromolécule constituée d'un enchaînement d'un grand nombre d'unités de répétition, d'un ou de plusieurs monomères, unis les uns aux autres par des liaisons covalentes. Ainsi l'amidon ou les protéines sont-ils des polymères, au même titre que la soie ou le bois sont constitués de polymères.

Les matériaux thermoplastiques, thermodurcissables et élastomères comptent également parmi les polymères. Et les matrices polymères sont beaucoup utilisées dans les matériaux composites.[19]

1.4.3.1 Les formes de polymère

a) Thermoplastique

L'emploi de ces matrices s'est développé à partir des années 1970. Ils se présentent sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme (les chaînes se plient alors), et les refroidir pour les fixer (les chaînes se bloquent). Cette opération est réversible et ces polymères sont recyclés par simple chauffage. Ils sont de loin les plus employés du fait de leur faible coût et de leur facilité d'utilisation. Le changement d'état solide/liquide ou pâteux peut se faire plusieurs fois avec une perte de caractéristiques à chaque cycle. Les principales matrices thermoplastiques TP utilisées (possédant tous une tenue en température supérieure à (100 °C) sont les suivantes:

- Polytéraphthalate éthylénique et butylénique (PET, PBT) : bonne rigidité, bonne ténacité.
- Polycarbonate (PC): tenue au choc.
- Polysulfure (PSU et PPS): bonne stabilité chimique, peu de fluage, tenu au chaud.
- Polypropylène (PP): peu onéreux et assez stable en température, mais combustible.

De plus en plus, on utilise des thermoplastiques (tenue thermomécanique est de l'ordre de 140°C), en particulier les suivants:

- Polyamide-imide (PAI);
- Polyéther-imide (PEI);
- Polyéther-sulfone (PES);
- Polyéther-éther-cétone (PEEK).

b) Thermodurcissable

Nous présentons dans cette partie les principales caractéristiques de cette famille de polymères utilisés en abondance dans l'industrie pour des applications structurales (automobile, aéronautique).

Les polymères thermodurcissables TD sont particulièrement plus adaptés que les thermoplastiques, pour fabriquer des matériaux composites. Aussi, il est à noter que la mise en forme des polymères thermodurcissables est en général plus compliquée que celle des thermoplastiques, qui peuvent par exemple, être extrudés et injectés sous pression dans un moule. La fabrication des thermodurcissables nécessitent donc une parfaite maîtrise des procédés afin d'obtenir un matériau de qualité (sans porosité, homogène, etc.). Les polymères thermodurcissables sont amorphes et sont formés par un réseau 3D de macromolécules. Ils possèdent un taux de réticulation beaucoup plus élevé que les élastomères, d'où une élasticité et plasticité assez faibles, car les mouvements moléculaires sont fortement limités par les nœuds, ce qui leur confère une bonne rigidité. Le module de Young E d'une résine époxy est $\sim 3,5$ GPa, ce qui l'ordre de grandeur pour les polymères, en général [1].

c) Elastomères

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

- Capacité à subir de grandes déformations sous faible compressibilité.
- Capacité à dissiper de l'énergie, phénomène qui permet d'obtenir des propriétés d'isolation vibratoire et acoustique.

Le préfixe "élasto" rappelle les grandes déformations élastiques possibles, tandis que le suffixe "mère" évoque leur nature de polymères, et donc leur constitution macro moléculaire. A l'état brut, le caoutchouc n'a guère de possibilités d'emploi pratique. Pour obtenir un produit présentant de meilleures propriétés mécaniques, le caoutchouc brut doit subir un traitement chimique appelé vulcanisation : ce procédé consiste à malaxer du caoutchouc brut, à y ajouter

du soufre et à chauffer le mélange. L'ensemble se transforme en un matériau élastique, stable dans une gamme de température beaucoup plus large, et résistant au fluage sous contrainte. Ce procédé de vulcanisation, fut découvert accidentellement par Goodyear en 1839 .On citera quelques exemples de matière élastomère:

- le polyisoprène (caoutchouc naturel)
- le polybutadiène (caoutchouc artificiel)
- le polychloroprène (néoprène).

1.4.4 Nano composites (NTC/polymère)

1.4.4.1 Nano composite (à base de NTC)

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

Les NC présentent plusieurs intérêts par rapport aux composites classiques. Un premier intérêt réside dans la surface inter faciale entre les nano charges et la matrice .Pour un poids donné, les nanoparticules présentent une surface d'échange beaucoup plus importante que les particules de taille microscopique .Les NC ont donc des meilleures propriétés comparativement aux composites classiques, comme par exemple une meilleure répartition des contraintes à l'intérieur de la matrice. Bien que l'ajout de charges microscopiques dans une matrice permette d'améliorer quelques propriétés, cela se fait au détriment d'autres propriétés. Outre le problème de purification et de séparation des différents types de nanotubes de carbone, la fabrication de nano composites à partir de ces derniers se heurte à une difficulté majeure : la dispersion des nanotubes.

Il existe différentes techniques pour obtenir une solution stable de nanotubes :
Signification des nanotubes dans un solvant (préparation d'une émulsion à l'aide d'ultrasons),
modification de la surface par des surfactants qui ont le désavantage d'apporter des impuretés ou fonctionnalisation des extrémités ou des parois latérales. A noter que le procédé de fabrication ne doit pas endommager les nanotubes pour conserver l'intégrité de leurs propriétés notamment mécaniques [11].

1.4.4.2 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 (Althues, 2007).

a) 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 (Palkovits, 2005).

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)[11].

b) Mélange en solution

Cette méthode consiste à disperser des nanoparticules dans une solution polymère à l'aide d'un solvant adéquat, puis à évaporer ce solvant pour former des films ou des feuilles nano composites. Elle permet en effet d'abaisser la viscosité permettant ainsi de faciliter la dispersion des (NTC). Le solvant du polymère utilisé doit également pouvoir disperser de manière homogène les nanotubes de carbone. La matrice polymère est tout d'abord mise en solution dans son solvant. Les nanotubes sont de leur côté dispersés dans le même solvant sous agitation par ultrasons. Cette solution de (NTC) est ensuite ajoutée à la matrice solubilisée sous agitation. Les nanotubes peuvent de cette manière s'introduire entre les chaînes macromoléculaires du polymère. Enfin Le solvant est extrait par évaporation [11].

c) Mélange à l'état fondu

C'est une des techniques classiques pour préparer des composites polymères qui consiste à disperser des particules dans un polymère, généralement un thermoplastique, 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, polyméthacrylate de méthyle et autres polymères thermoplastiques ont été obtenus par cette méthode (Aubry, 2009). L'inconvénient de cette méthode est que la viscosité augmente considérablement avec le taux de (NTC) (Lee et al, 2008)[11].

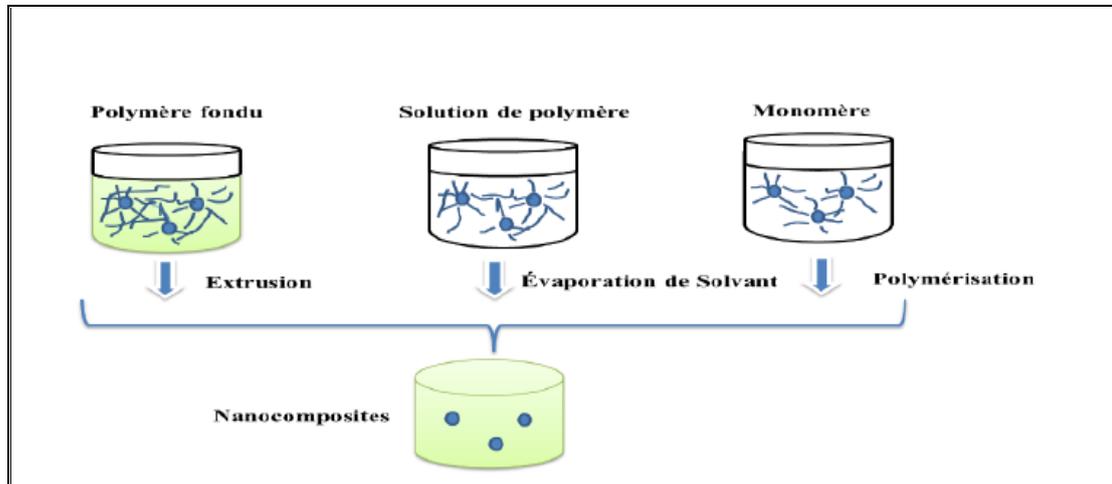


Figure 1.21 Méthodes d'élaborations des nano composites polymères : a) mise en œuvre dans le fondu, b) mise en solution et c) polymérisation in situ

1.4.4.3 Interface matrice-renfort dans les nano composites à matrice polymère

La liaison entre la matrice et les renforts est un phénomène physico-chimique fondamental qui est créée lors de la phase d'élaboration du matériau composite. C'est l'interface (matrice/renfort) qui sera déterminante au niveau des propriétés finales du composite, et notamment du point de vue mécanique (Ajayan et al , 2007). il est à rappeler que pour la plupart des matrices polymères, la compatibilité avec les (CNTs) est faible du fait de leurs structures chimiques très différentes. En effet, l'adhésion entre un CNT et un polymère est mauvaise du fait des tensions superficielles trop élevées (Gao et al ,2005). Ce désagrément empêche par ailleurs une dispersion efficace et homogène des (CNTs) à l'intérieur de la matrice.

De nombreuses études sont menées afin de comprendre et d'améliorer les phénomènes à l'interface (Wei, 2006), (Ajayan et al, 2000). Il s'agit principalement de travailler au niveau de la cohésion entre les deux éléments constitutifs du composite. Ceci peut être réalisé grâce à une modification de surface des (CNTs) avant leur insertion dans la matrice.

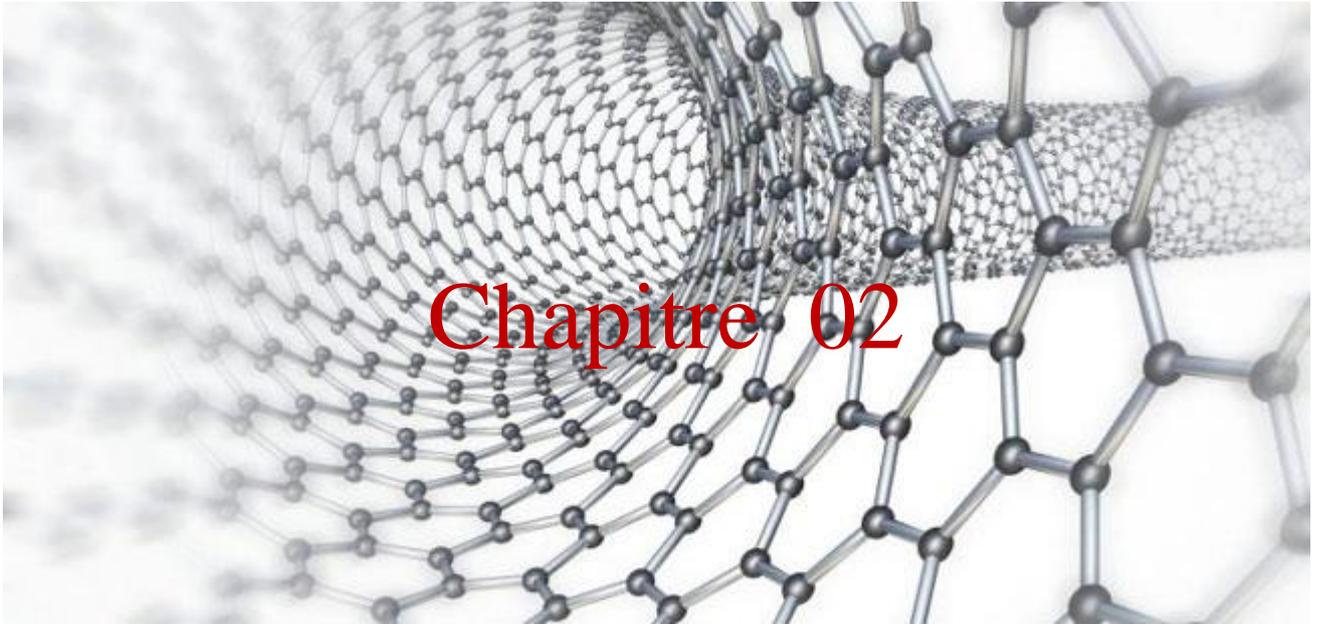
1.4.4.4 Application des nano composites dans le domaine de Génie civil

- l'amélioration de certaines propriétés (allègement et renforcement des structures, amélioration des propriétés optiques, augmentation de la durabilité, mais également résistance au feu, aux températures élevées et aux chocs thermiques).
- L'industrie des produits céramiques cherche à renforcer les céramiques en introduisant des nano poudres comme les nanoparticules de nitrure de silicium qui permettent de renforcer l'alumine.
- Des recherches sont en cours pour réaliser des revêtements plus résistants ou présentant des propriétés anti-salissures ou antidérapantes.
- D'autre part, dans le domaine du génie civil et des grands ouvrages, l'amélioration de la sûreté passe par le renforcement des matériaux de construction. Une des réalisations exceptionnelles touche le secteur des matériaux cimentaires. Un nouveau procédé basé sur les nanotechnologies permet en effet le remplacement de la fumée de silice, une ressource peu accessible employée dans les bétons haute performance. « La nano poudre de verre ou nano silice provenant des déchets recyclés est transformée en fine poudre, explique le professeur Arezki Tagnit-Hamou de l'Université de Sherbrooke. « Les nano sphères contenues dans la poudre de verre densifient le béton, le rendant encore plus résistant et moins perméable. » Une avenue qui laisse présager un bel avenir pour cette ressource, quand on sait que la production de béton dans le monde dépasse les quatre milliards de mètres cube par année et constitue la matière la plus utilisée sur la terre après l'eau.

1.5 Conclusion

A partir des informations récoltées dans ce chapitre sur les nanotubes de carbone et les nano composites, en particulier sur les méthodes de leur fabrication et leurs propriétés mécanique et physiques, nous avons constaté que ces propriétés exceptionnelles font bénéficier ces nano composites d'une immense résistance mécanique et électrique, en plus d'une grande rigidité grâce à leur module de Young.

Ce qui le qualifie pour une utilisation dans de nombreux domaines tels que le génie civil, la médecine, la plasturgie, le textile et l'industrie automobile.



2.1 Introduction

Pour trouver la charge critique du flambement d'un nanotube de carbone, il faut d'abord comprendre le phénomène de flambement et comment calculer la charge, mais avant cela il faut passer par les fondements de la résistance des matériaux ainsi que les théories des poutres.

il est nécessaire de choisir la bonne théorie écrivant correctement le comportement statique et dynamique de la structure, On utilise trois théories :

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

2.2 Les poutres

On appelle poutre un solide engendré par une surface plane (Σ) qui peut être variable et dont le centre de gravité G décrit un segment $[AB]$, le plan de (Σ) restant perpendiculaire à cette courbe. Il faut également que la longueur AB soit grande devant les dimensions des sections transverses (figure 2.1) [19].

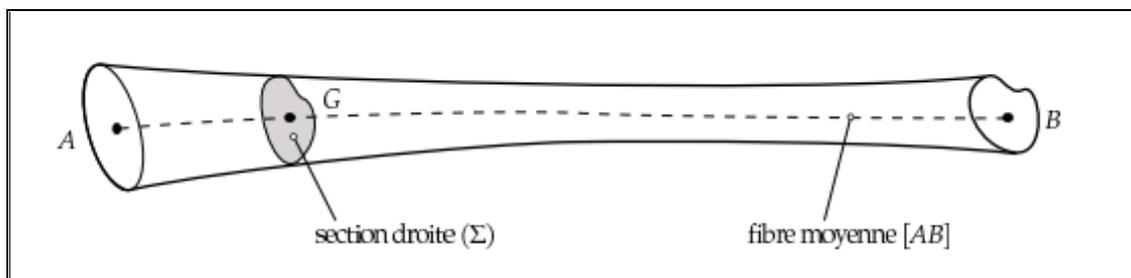


Figure 2.1 Notion de poutre [20]

(Σ) est appelée section droite et peut être :

- constante le long de (AB), on parle alors de poutre à section constante
- variable, on parle alors de poutre à section variable

(AB) est la fibre moyenne de la poutre (ou ligne moyenne ou encore lieu des centres d'inertie des sections droites de la poutre) et Si la fibre moyenne (AB) de la poutre est :

- contenue dans un plan, on parle de poutre plane (ou poutre à plan moyen)
- une droite, on parle de poutre droite
- courbe, on parle de poutre gauche.

Une poutre est donc un volume dont une dimension est grande devant les deux autres. De manière analogue, employé dans de nombreux types de structures, tels que : bâtiments,

charpentes, ponts, et elle est armée par des aciers principaux longitudinaux, destinés à reprendre les efforts de traction dus à la flexion, et des aciers transversaux, cadres et épingles (ou étriers), destinés à reprendre l'effort tranchant.

2.3 Les théories des poutres

La théorie des poutres est un outil supplémentaire pour déterminer des solutions analytiques en considérant des hypothèses additionnelles elle s'applique aux milieux élancés. Trouvée dans les systèmes Mécanique pour laquelle le rapport rigidité / poids doit être maximisé. L'avantage des solutions analytiques sur les prévisions obtenues par des méthodes numériques est de permettre de visualiser l'influence de différents paramètres (de forme, de taille, de comportement du matériau...etc.) [21]. Ils sont très utilisés dans le domaine de la résistance des matériaux.

Parmi les théories les plus utilisées, on cite :

- la théorie d'Euler-Bernoulli.
- la théorie de Timoshenko.
- la théorie d'ordre élevé.

2.3.1 La théorie d'Euler-Bernoulli (théorie classique des poutres)

La théorie classique des poutres (classical Beam Theory - CBT) se base sur les hypothèses d'Euler- Bernoulli, selon les quelles :

- une section plane et normale au plan moyen de la poutre reste normale et perpendiculaire après déformation [22].
- Les déformations dues au cisaillement transversal sont négligées (pas de cisaillement sur la hauteur de la poutre).

En outre, en supposant que les normales ne changent pas de longueur et en prenant compte de la petitesse des déformations, cela nous donnera un déplacement transversal similaire pour tous les points de la même section.

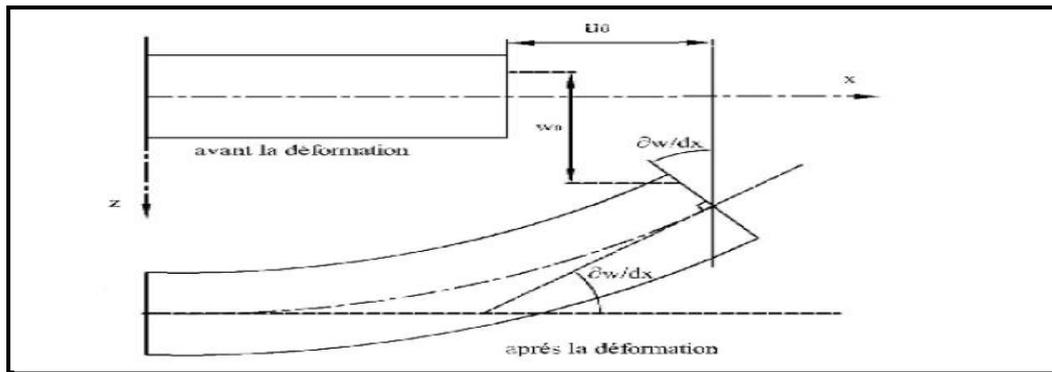


Figure 2.2 Cinématique de la poutre d'Euler Bernoulli

Dans cette théorie, les déplacements ont une distribution linéaire suivant l'épaisseur de la poutre et la fonction qui décrit la répartition de déplacement suivant l'épaisseur de la poutre $\Phi(Z)$ égale à zéro [8]. Alors, le champ de déplacement peut se donner par

$$u(x, z) = u_0(x) - z \frac{\partial w(x)}{\partial x} \quad (2.1)$$

$$w(x, z) = w_0(x) \quad (2.2)$$

Avec :

- Le déplacement axial de la membrane $u_0(x)$
- Le déplacement axial dû à la flexion $z \frac{\partial w(x)}{\partial x}$
- Le déplacement transversal $w_0(x, z)$

Où u_0 : est le déplacement de la fibre moyenne

$z \frac{\partial w(x)}{\partial x}$: est la rotation due à la flexion et $w_0(x, z)$ est le déplacement transversal de la fibre moyenne.

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

$$\gamma_z = \frac{du}{dx} + \frac{dw}{dz} = -\frac{dw}{dx} + \frac{dw}{dx} = 0 \quad (2.3)$$

Qui en résulte une contrainte nulle de cisaillement

$$\tau_{xz} = \gamma_{xz} * G = 0 \quad (2.4)$$

Avec G : le module de cisaillement transverse.

Donc on résume que le cisaillement est négligeable par cette théorie. Ce modèle donne

des bons résultats pour les poutres élancées, mais il n'est pas valable pour les poutres courtes [15].

2.3.2 La théorie de Timoshenko (déformation en cisaillement de premier ordre)

La théorie de Timoshenko est plus riche et plus générale que la théorie élémentaire des poutres au prix d'une fonction supplémentaire. Cette solution permet d'affiner les solutions analytiques issues de la théorie classique. Toutefois ces solutions sont entachées d'erreurs au voisinage des appuis et de la zone indentation où nous pouvons avoir des concentrations de contrainte et des champs de déplacement non homogènes [11].

Cette théorie a prolongé la théorie classique des poutres en tenant compte de l'effet de cisaillement transverse, et cela à travers ces hypothèses. L'hypothèse de base porte sur une schématisation du champ de déplacement à l'intérieur du solide (hypothèse "cinématique") le solide est assimilé à un milieu curviligne, le champ de déplacement du milieu continu étant ensuite évalué à partir de la solution trouvée en supposant qu'une section droite initialement plane et perpendiculaire à la "ligne moyenne" ainsi définie reste plane mais non perpendiculaire. En un point quelconque du milieu curviligne, il est donc possible de résumer la solution du problème par la connaissance de trois composantes de déplacement (selon x, y, z), et de trois rotations (de type flexion autour de y et z, et de type torsion autour de x). Pour le cas d'une poutre plane chargée dans son plan, il ne subsiste que trois inconnues, deux translations de la ligne moyenne (respectivement U(s) et V (s) selon x et z à l'abscisse s), et une rotation (angle $\theta(s)$, caractérisant la flexion autour de y). Le champ de déplacement pour un point M(x, z) quelconque s'exprime en fonction de ces inconnues :

$$u(x, z) = u_0(x) - z \frac{\partial w(x)}{\partial x} + z\phi_y \quad (2.5)$$

Champ se décompose en trois parties :

- Le déplacement axial de la membrane $u_0(x)$
- Le déplacement axial dû à la flexion $z \frac{\partial w(x)}{\partial x}$
- Le déplacement dû au cisaillement $z\phi_y$, où ϕ_y est la rotation due au cisaillement.

Si on veut calculer la contrainte de cisaillement :

$$\gamma_z = \frac{du}{dx} + \frac{dw}{dz} = -\frac{dw}{dx} + \frac{dw}{dx} + \phi_y = \phi_y \quad (2.6)$$

$$\tau_{xz} = \gamma * G \neq 0 \quad (2.7)$$

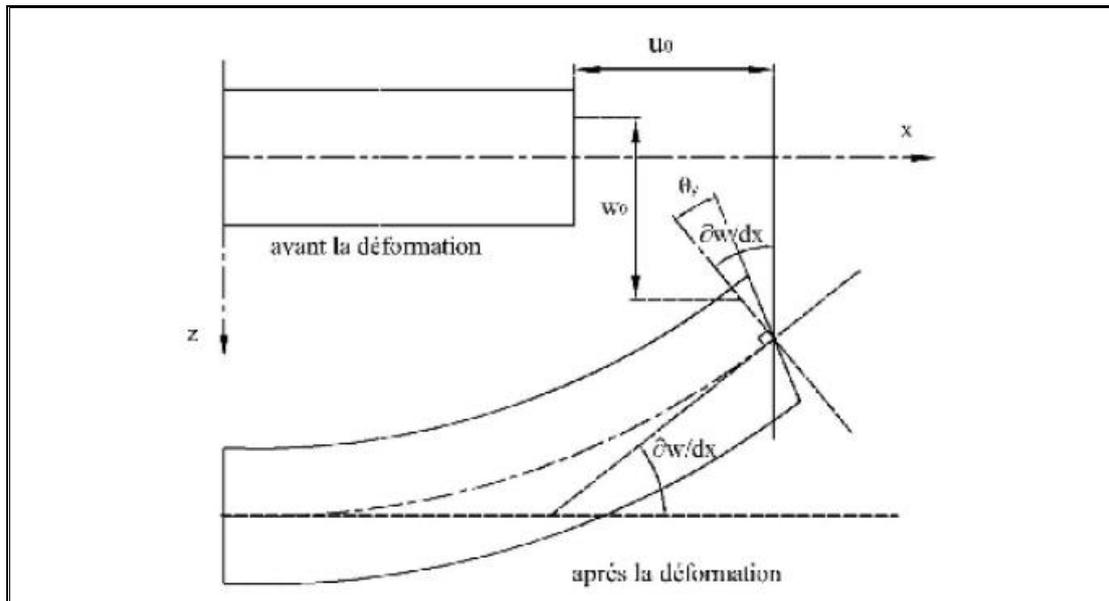


Figure 2.3 Cinématique de la poutre de Timoshenko

Cette théorie a corrigé le défaut de la théorie classique qui ne tient pas compte du cisaillement transverse, mais au même temps ces contraintes sont constantes à travers l'épaisseur, ce qui ne représente pas la réalité. Pour cela, un groupe de chercheurs Shyang-Ho et Yen-Ling, 2006 ;

Davoodinik, 2005; Ugural, 1981,2006; Nowinski, 1978 ; Zhong et Yu, 2007 ; Chabraborty et al, 2003 a trouvé des coefficients correcteurs pour régler ce problème.

pour éviter l'introduction d'un facteur de correction, des théories de déformation en cisaillement d'ordre élevée ont été développées [23].

2.3.3 La théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé

À la différence de la théorie classique et de celle de Timoshenko avec les acceptations de la distribution linéaire du déplacement à travers l'épaisseur, la théorie d'ordre élevé est basée sur une distribution non linéaire des champs dans l'épaisseur. Par conséquent, on tient compte des effets de la déformation transversale de cisaillement et/ou de la déformation normale transversale. Ces modèles n'exigent pas des facteurs de correction.

Le champ de déplacement est généralement écrit comme suit:

$$u(x, z) = u_0(x) - z \frac{\partial w_0(x)}{\partial x} + \Psi(z)\phi_y(x) \quad (2.8)$$

$$w(x, y, z) = w_0(x, y) \quad (2.9)$$

- Le déplacement axial de la membrane $u_0(x)$
- Le déplacement axial dû à la flexion $z \frac{\partial w(x)}{\partial x}$
- est la rotation due au cisaillement ϕ_y
- La fonction de gauchissement $\Psi(z)$

le déplacement axial du au cisaillement n'est plus linéaire. Donc, on remplace le « z » pour la théorie précédente par une fonction $\Psi(z)$ qu'on l'appelle « fonction de gauchissement » ou « fonction de forme ». Cette dernière représente l'allure de la déformation de la section transversale, c'est ce qu'on appelle « le gauchissement ».

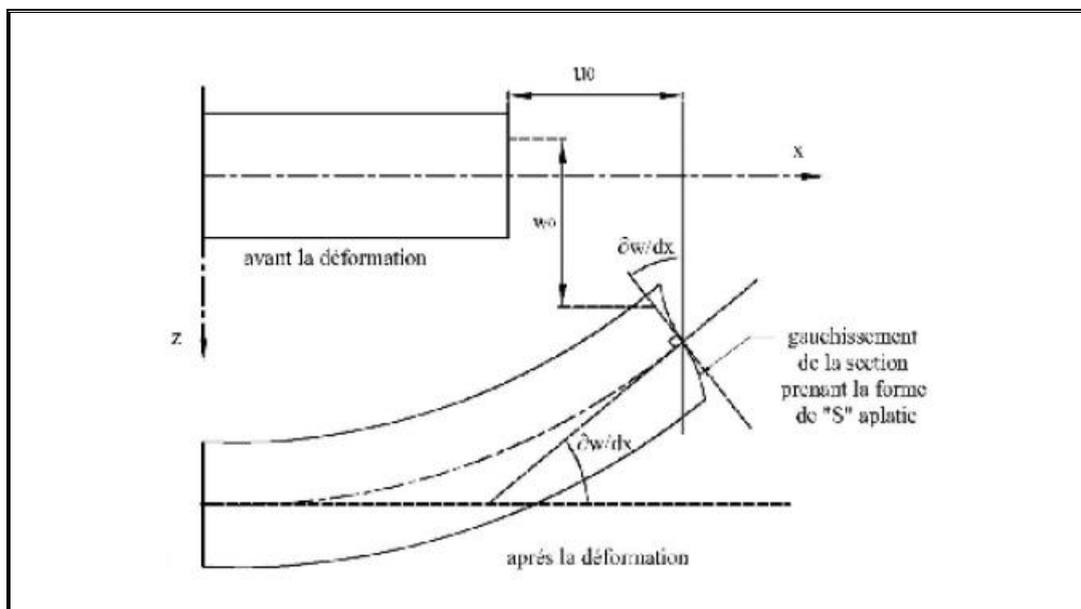


Figure 2.4 cinématique de la poutre d'ordre élevé.

En effet, les déplacements de la théorie classique des poutres sont obtenus en prenant $\Psi(z) = 0$, alors que la théorie de premier ordre peut être obtenue en mettant $\Psi(z) = z$.

Plusieurs modèles de fonctions de forme ont été proposés par plusieurs auteurs, chacune d'elle donne des résultats comparable et très proche [22].

Comme nous l'avons mentionné précédemment, ces trois théories précédentes fusionnent dans le groupe des théories des poutres selon la prise en compte du cisaillement.

Par conséquent, nous devons mentionner un deuxième groupe qui est « Théories des poutres selon la prise en compte de l'effet d'échelle ».

2.4 Théories des poutres selon la prise en compte de l'effet d'échelle

a) La théorie locale d'élasticité

La théorie d'élasticité locale ou dite d'élasticité classique ne prend pas en compte l'effet de l'échelle sur ces hypothèses et néglige donc les forces entre les atomes. La théorie est applicable dans le cas de structures métriques et ne peut pas être appliquée à l'étude de petites structures nanométriques.

b) La théorie non locale d'élasticité

L'effet de l'échelle a une influence significatif sur le comportement des structures métriques et des structures nanométriques aux niveaux micro et nanométrique, ce qui a conduit à une différence marquée dans la modélisation des structures métriques avec d'autres structures nanométriques.

Les théories de l'élasticité non locale sont concernées par la physique des corps matériels dont le comportement à un point matériel est influencé par l'état de tous les points du corps. Le domaine de l'applicabilité des théories classiques de l'élasticité est intimement relié à grandes échelles de temps et de longueur. Si L dénote la longueur caractéristique externe (par exemple, longueur de la fissure, longueur d'onde...etc.) et l la longueur caractéristique interne (par exemple, distance entre granulaire, paramètre granulaires), dans un champ où $L/l \gg 1$ les théories classiques locales prédisent suffisamment le comportement de ce corps solide, alors que si $L/l \cong 1$, les théories locales échouent et nous devons recourir aux théories atomiques qui peuvent expliquer les attractions interatomique à longue portée, même dans une cas dynamique, il y aura un raisonnement semblable T/τ_l où T est le temps caractéristique externe (par exemple, l'échelle de temps des charges appliquées) et τ_l le temps caractéristique interne (par exemple, l'échelle de temps de la transmission du signal d'une molécule à une autre). Encore, les théories classiques échouent lorsque $T/\tau_l \cong 1$, et on se trouve encore face à un besoin d'une théorie non locale. Mais les attractions interatomique sont très couteuse en termes de calcul informatique. Pour ces raisons et pour le fait que même la construction d'un modèle moléculaire a besoin de quelques considérations théoriques, les chercheurs ont préférés une formulation « enrichie » continue, où les effets de la micro ou nanostructure et les forces intermoléculaires sont pris en considération dans la modélisation, dans un sens approprié [22].

Suivez les étapes d'Eringen qui expliquent l'effet de l'échelle sur l'élasticité en supposant que la force à un point de référence peut être considérée comme une fonction du champ de pression à chaque point du champ de Peddieson et d'autres ont conclu que la mécanique non locale continue peut jouer un rôle utile dans l'analyse associée aux applications de la nanotechnologie, en proposant une version d'élasticité non local pour formuler une version non local de théorie de poutre d'Euler-Bernoulli.

2.5 Résistance des matériaux (RdM)

La résistance des matériaux est une discipline particulière de la mécanique des milieux continus permettant le calcul des contraintes et déformations dans les structures des différents matériaux.

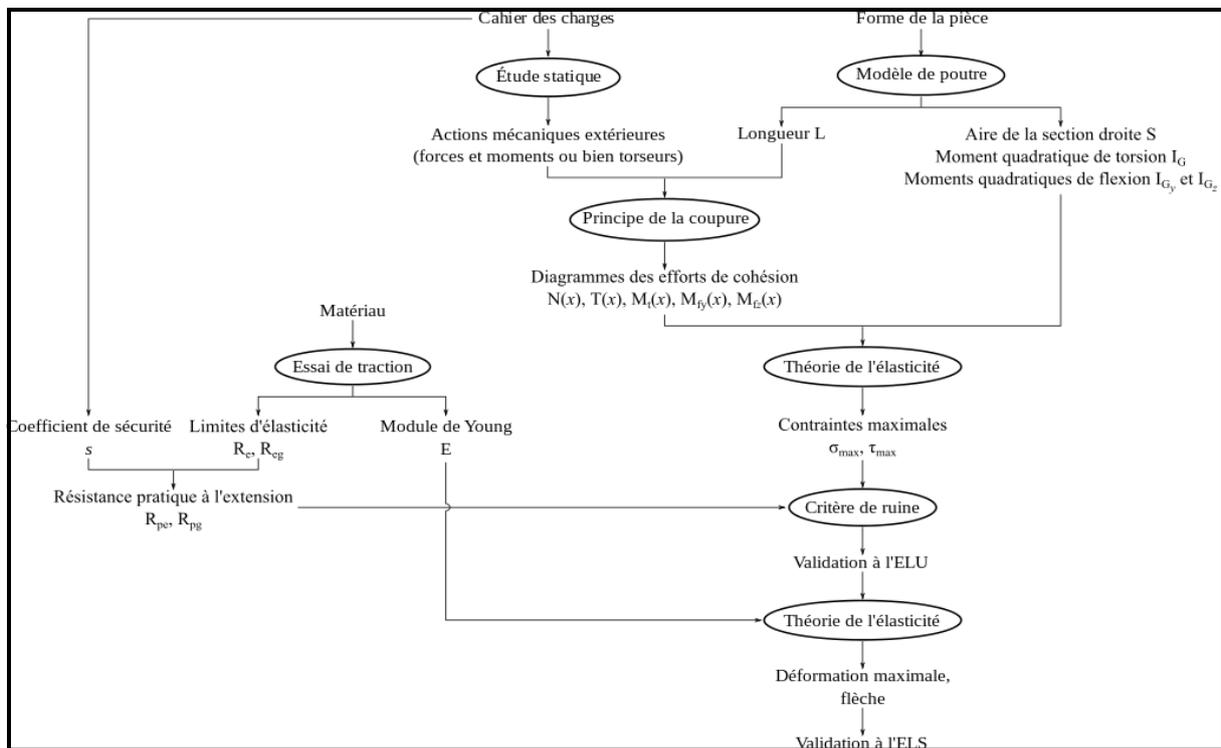


Figure 2.5 Démarche de calcul de RDM avec la théorie des poutres.

Concevoir une pièce mécanique, un ouvrage d'art ou tout objet utilitaire, c'est d'abord imaginer les formes et le squelette géométrique remplissent les fonctions demandées c'est ensuite déterminer les quantités de matière nécessaires et suffisantes pour réaliser ces formes et assurer une résistance sans dommage de l'objet à tous les efforts auxquels il sera soumis pendant son service. Ce dimensionnement fait appel à des calculs qui prévoient le

comportement de l'objet dont la conception doit réunir les meilleures conditions de sécurité, d'économie et d'esthétique ; la résistance des matériaux est l'outil majeur des bureaux d'étude. La *résistance* d'un élément de construction est un concept complexe, car cet élément peut être mis hors d'usage de diverses manières, chacune d'elles correspondant à des phénomènes physiques différents pour cela il y a quelques critères usuels de sécurité :

- **la contrainte maximale** : en tout point du solide, on doit s'assurer que la contrainte (force par unité de surface) ne dépasse pas une valeur fixée par les possibilités du matériau et les résultats découlant de l'expérience de constructions semblables.
- **le déplacement maximal** : les déformations de la pièce ne doivent pas dépasser les limites au-delà desquelles ses fonctions ne sont plus correctement assurées.
- **la rupture par fatigue** : les pièces soumises à de fortes vibrations peuvent se rompre au bout d'un certain temps de service si les amplitudes de contrainte sont trop élevées.
- **la rupture par fissuration** : un défaut du métal est parfois générateur d'une fissure susceptible de se propager brutalement jusqu'à provoquer une rupture "catastrophique" si certaines conditions entre la contrainte et la taille du défaut ne sont pas respectées.
- **l'instabilité par flambement** : certains éléments, comme les colonnes droites élancées chargées en compression, peuvent subir un changement de forme brutal (courbure) pour une valeur critique de la charge.
- **l'instabilité dynamique** : certains types de vibrations s'auto-amplifient jusqu'à rupture des éléments si certaines conditions entre la masse et la raideur desdits éléments sont remplies [23].

2.5.1 Les sollicitations

2.5.1.1 Notion de sollicitations

La poutre ci-dessous est soumise à des efforts extérieurs. La direction et le sens de ces efforts par rapport à la ligne moyenne définissent le type de sollicitation que subit la poutre.

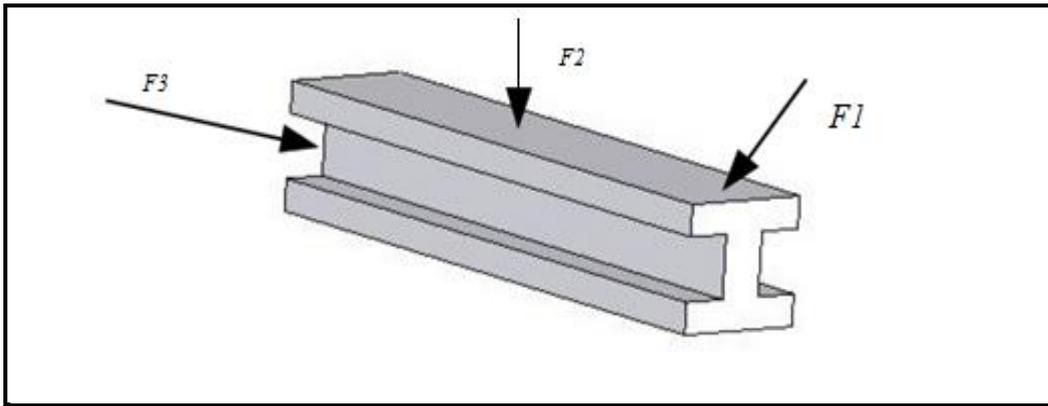
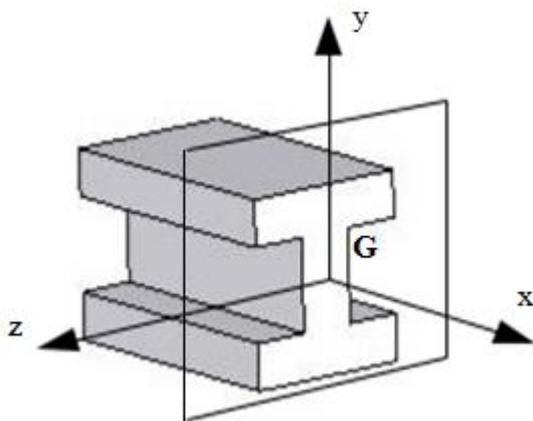


Figure 2.6 schéma d'une poutre

Afin de déterminer à quel type de sollicitations est soumise cette poutre, on la divise virtuellement en deux tronçons, et on « isole » la partie gauche.

2.5.1.2 Torseur de cohésion

L'action du tronçon droit sur le tronçon gauche est une action d'encastrement qui se modélise par un torseur d'inter-effort. La réduction de ce torseur au point G, centre de la section, est appelé torseur des forces de cohésion.



NOTATION :

$$\left\{ T_{\text{gcoh}} \right\}_G = \begin{Bmatrix} N & Mt \\ T_y & M_{fy} \\ T_z & M_{fz} \end{Bmatrix}_G$$

Figure 2.7 tronçon d'une poutre [24]

N : effort normal

Mt : momentt de torsion.

Ty : effort tranchant

Mfy : moment fléchissant

Tz : effort tranchant

Mfz: moment fléchissant

2.5.1.3 Les types de sollicitation

a) Sollicitations simples

Tableau 2.1 Les sollicitations simple [24]

CAS	COMPOSANTES			
	N	T	Mt	Mf
Traction	N	0	0	0
Cisaillement	0	T	0	0
Torsion	0	0	Mt	0
Flexion pure	0	0	0	Mfz

b) Sollicitations composées

Tableau 2.2 Les sollicitations composées [24]

CAS	COMPOSANTES			
	N	T	Mt	Mf
Flexion simple	0	Ty	0	Mfz
Flexion + Traction	N	Ty	0	Mfz
Flexion + Torsion	0	Ty	Mt	Mfz
Flambement	N	0	0	Mfz

2.5.2 Phénomène de flambement

Également appelé flambement, le flambage est un phénomène physique relevant des principes de la résistance des matériaux. Lorsqu'une structure est compressée dans le sens de la longueur, elle a tendance à fléchir perpendiculairement à l'axe de la force appliquée, en raison

d'un phénomène d'instabilité élastique. Plus la structure (une poutre, par exemple) est longue et étroite, plus elle est se plie facilement, mais d'autres facteurs interviennent comme le système d'attache de la structure au niveau des points de compression [25].

Est une sollicitation composée de compression et de flexion, mais dont l'étude est différente de la flexion composée parce que les méthodes sont différentes et que le flambement est un phénomène rapidement destructif. En effet, dans le cas du flambement, les déformations ne peuvent plus être supposées infiniment petites et négligées comme dans les chapitres précédents. De même, les forces extérieures ne sont plus proportionnelles aux déformations et, dans certains cas, de grandes déformations peuvent être causées par des accroissements de charge infimes. Tous ces phénomènes sont connus sous le nom d'instabilité élastique. Le risque de flambement d'un élément étant lié aux dimensions de cet élément, on dit que le flambement est un phénomène d'instabilité de forme.

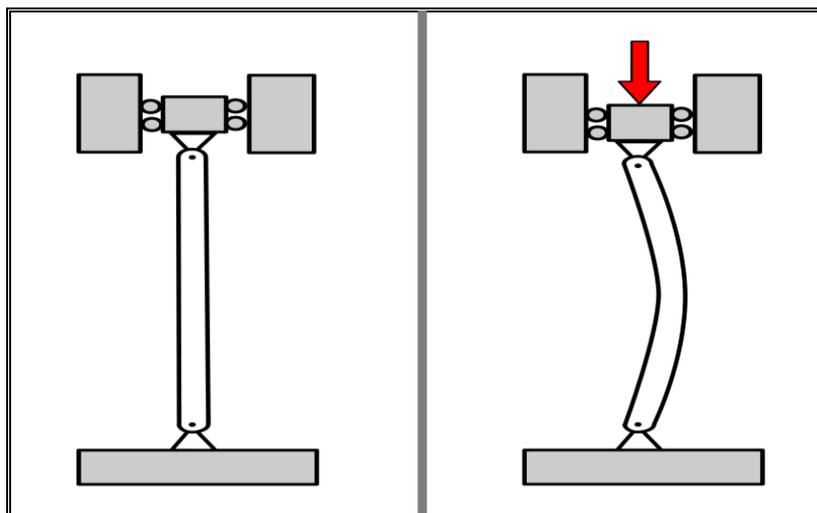


Figure 2.8 flambement d'une colonne

En résistance des matériaux le flambage est un phénomène d'instabilité élastique mis en évidence lorsqu'une poutre est comprimée, il se développe un moment de flexion parasite amplifié par les déformations et déplacements de la poutre chargée. Même si le terme poutre est employé ici, l'hypothèse RdM des petits déplacements doit être abandonnée pour que le modèle soit plus réaliste. Le modèle RdM doit être complété avec les hypothèses supplémentaires que les déformations restent petites mais que les déplacements peuvent être grands, cela permet de prendre en compte les phénomènes du second ordre négligés dans le modèle RdM.

Ce modèle RdM complété n'est plus linéaire, la résolution se fait par itérations successives jusqu'à convergence éventuelle du résultat. Ce modèle met en évidence des instabilités dont la charge critique d'Euler est un exemple simple.

Comme cette formule ne fait intervenir que des termes issus du modèle RdM élastique linéaire (module de Young et géométrie de la poutre), on dit alors que le flambement est un phénomène d'instabilité élastique. En général le flambement élastique n'est que le début d'un comportement non linéaire bien plus complexe qui une fois amorcé conduit à des déformations plastiques dans le matériau puis à la ruine de la poutre.

Pour une poutre d'inertie constante soumise à un effort normal de compression simple, la charge critique de flambage théorique est donnée par la formule d'Euler [26].

2.5.2.1 Charge critique d'Euler

Prenons le cas d'une poutre droite avant déformation, articulée à ses deux extrémités A et B, et chargée de F rigoureusement suivant son axe ou sa ligne moyenne (Figure 2.7).

Utilisons la formule de la déformée en flexion : $M_f = -EI y''$.

Le moment de flexion est : $M_f = Fy$ (figure 2.8).

On aura une l'équation différentielle $EIy'' + Fy = 0$ dont la solution après intégration nous donne : $y(x) = C \sin \frac{n\pi x}{L}$

Sa dérivée seconde $y''(x) = -C \sin \frac{\pi^2}{L^2} \sin \frac{\pi x}{L}$

Pour $n=1$: la déformée est une arche de sinusöide et la poutre est flambée.

L'équation différentielle devient :

$$Fy(x) = F C \sin \frac{\pi x}{L} = EI C \frac{\pi^2}{L^2} \sin \frac{\pi x}{L}$$

D'où $F = EI \frac{\pi^2}{L^2}$

Cette valeur de F est donc l'effort de compression qui est le seuil de flambement, nommée

Charge critique d'Euler et notée : $F_c = EI \frac{\pi^2}{L^2}$ (2.10) [27].

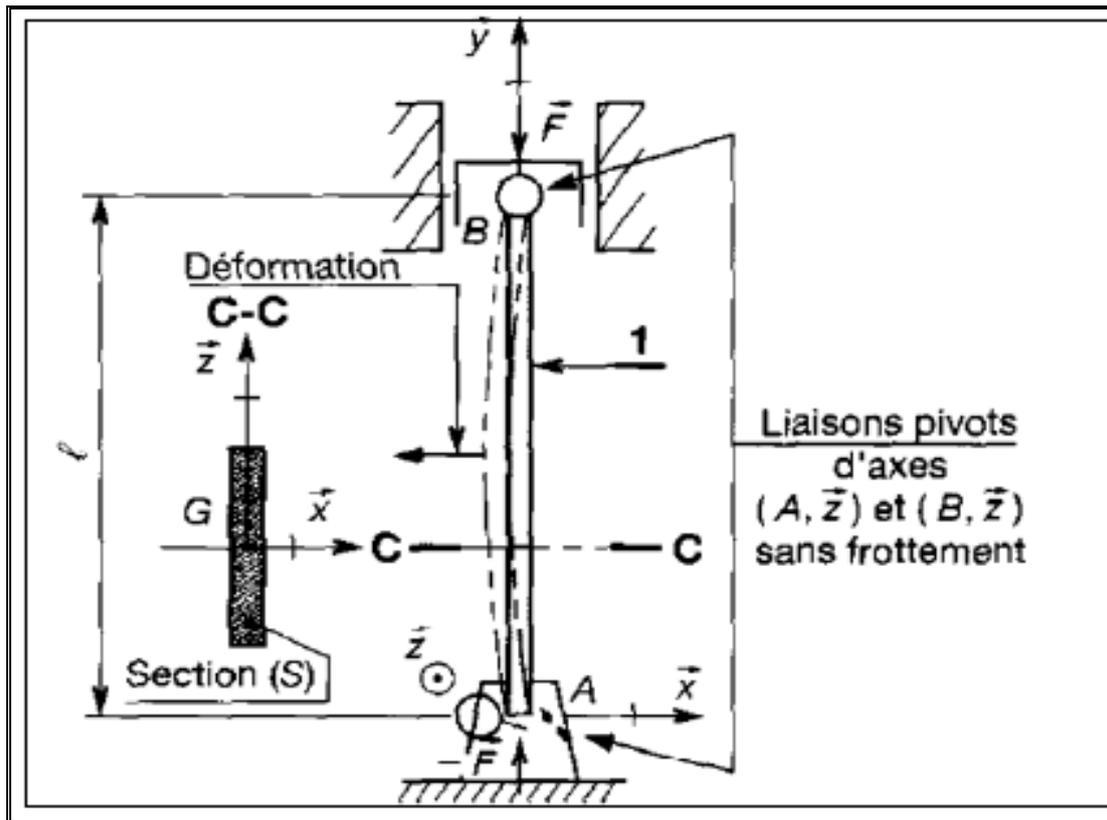


Figure 2.9 poutre de longueur L et rectiligne soumise en A et B à deux glisseurs directement opposés, qui augmentent progressivement.

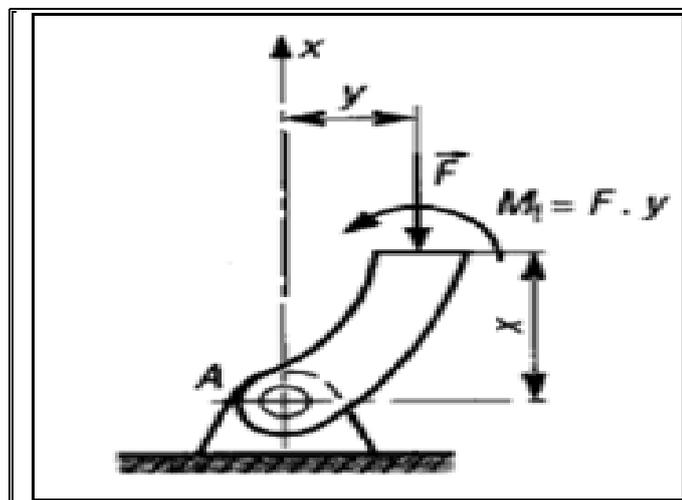


Figure 2.10 $M_f = F \cdot y$

La compression est remplacée par du flambage si la poutre est longue et ses dimensions Transversales sont faibles.

Cette proportion est caractérisée par : $\lambda = \frac{L}{\rho}$

λ : élancement d'une poutre (sans unité).

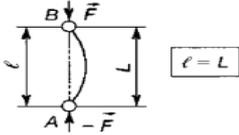
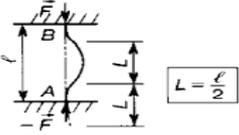
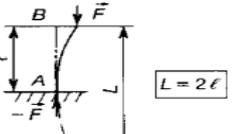
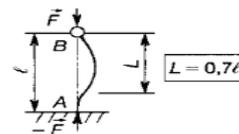
L : longueur libre de flambage (mm).

ρ : rayon de giration de la section (mm), défini par : $\rho = \sqrt{\frac{I_{GZ}}{S}}$

S : air de la section droite (mm²).

I_{GZ} : moment quadratique minimal de la section suivant l'axe principal perpendiculaire à la direction de la déformation (mm⁴).

Tableau 2.3 Différentes configurations pour le calcul de la longueur libre

LONGUEURS LIBRES DE FLAMBAGE			
Types de liaisons	Valeurs de L	Types de liaisons	Valeurs de L
① En A et B : liaisons pivots.	 $L = l$	③ En A et B : liaisons encastrement.	 $L = \frac{l}{2}$
② En A : liaison encastrement. En B : extrémité libre.	 $L = 2l$	④ En A : liaison encastrement. En B : liaison pivot.	 $L = 0,7l$

2.5.2.2 Contrainte critique

La longueur libre de flambage L sera prise d'après le tableau précédent, cherchons la charge critique F_c en fonction de l'élancement de la poutre λ .

$$\text{On a } \begin{cases} \lambda^2 = \frac{L^2}{\rho^2} \\ \rho = \frac{I_{GZ}}{S} \end{cases} \implies \lambda^2 = \frac{L^2}{I_{GZ}} * S = \frac{S}{\lambda^2}$$

L'expression de la charge critique nous donne : $F_c = \frac{\pi^2 E S}{\lambda^2}$ (2.11)

On appelle contrainte critique le rapport entre la charge critique F_c et l'air de la section

droite S de la poutre. $\sigma_c = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$ (2.12)

2.5.2.3 Elancement critique

On pose la contrainte critique $\sigma_c = R_e$ pour ne quitter pas le domaine élastique. On aura

$$\text{Alors : } R_e = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad \text{avec } \lambda = \lambda_c \qquad \lambda_c^2 = \frac{\pi^2 E}{R_e} \quad (2.13)$$

λ_c : élancement critique (ne dépend que de la nature du matériau).

E : Module d'élasticité longitudinal (Mpa).

R_e : Résistance élastique du matériau (Mpa) [26].

2.6 Les fondations élastiques

Pour calculer les contraintes s'exerçant sous une fondation reposante sur un milieu élastique, Winkler (1867) a supposé que la réaction du sol à chaque point sous la fondation est proportionnelle à la déflexion de la fondation à ce point (figure 2.9). La déformation verticale caractéristique de la fondation est donc définie par l'utilisation de ressorts identiques, indépendants, étroitement espacés, discrets et linéairement élastiques. La constante de proportionnalité de ces ressorts est connue comme étant le coefficient de réaction du sol. L'inconvénient de ce modèle est qu'il ne prend pas en compte l'interaction entre les ressorts. Ceci a été amélioré plus tard par Pasternak (1954) qui a tenu compte des interactions entre les ressorts séparés dans le modèle de Winkler en présentant un nouveau paramètre dépendant. Des lors, le modèle de Pasternak a été largement employé pour décrire le comportement mécanique des interactions (structures-bases) [11].

a) Modèle de Winkler

Winkler représente le sol comme un système identique mais mutuellement indépendant, étroitement ressorts espacés, discrets, linéairement élastiques. Selon cette idéalisation, déformation des fondations en raison de la charge appliquée est limitée aux régions chargées uniquement. La figure (2.9) montre la représentation physique du Winkler fondation.

La relation pression - déflexion en tout point est donnée par $p = kw$, où k = module de réaction du sol de fondation [28].

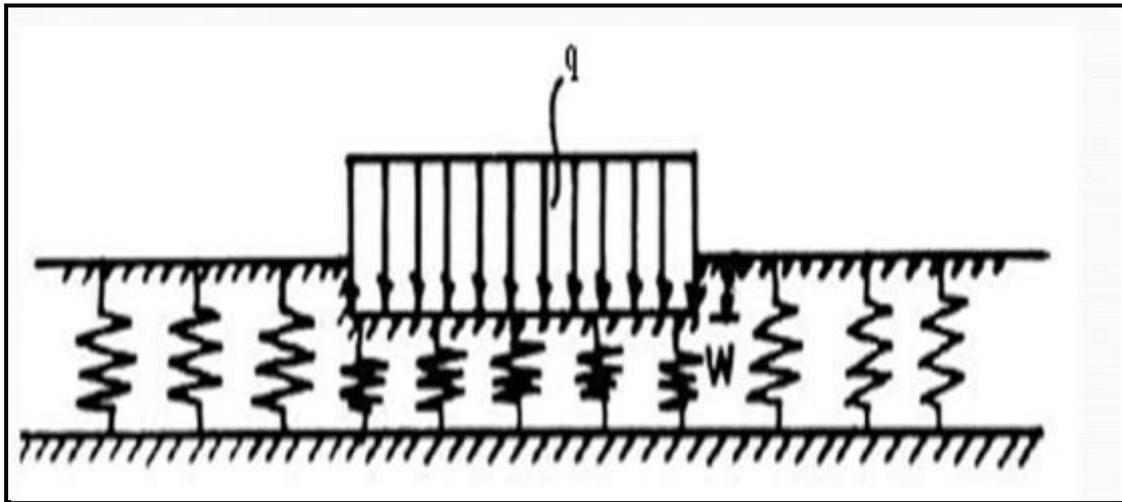


Figure 2.11 représentation de la fondation winkler

b) **modèle de Pasternak**

Dans ce modèle, l'existence d'une interaction de cisaillement entre les éléments de ressort est supposé qui est accompli par reliant les extrémités des ressorts à une poutre ou une plaque ne subit qu'une déformation de cisaillement transversale. La relation charge-flèche est obtenue par compte tenu de l'équilibre vertical d'une couche de cisaillement [28].

$$p = Kw - G\nabla^2 w \quad (2.14)$$

Où G est le module de cisaillement de la couche de cisaillement

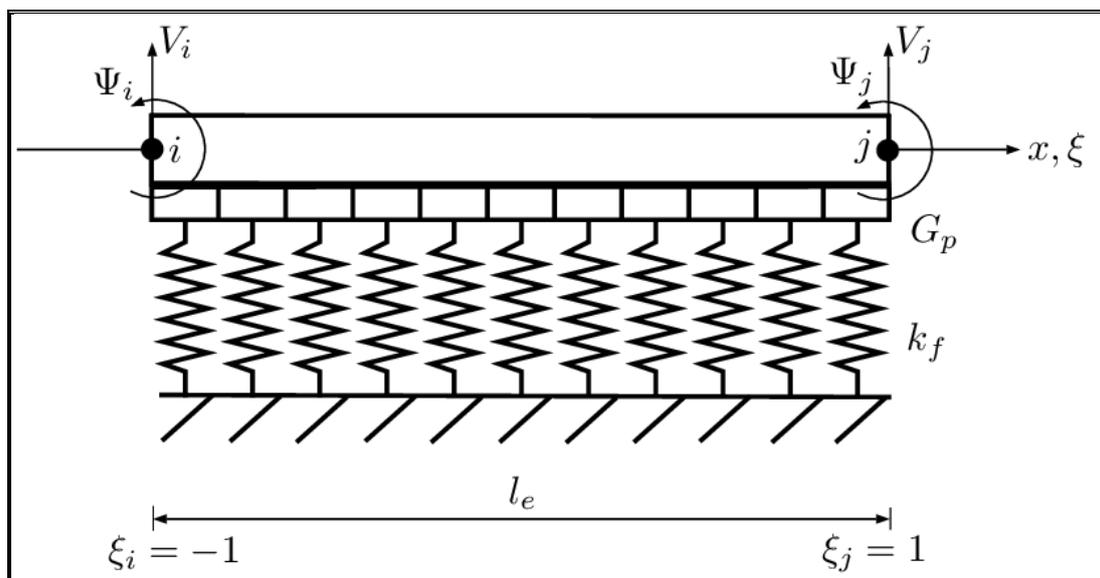


Figure 2.12 représentation de la fondation Pasternak

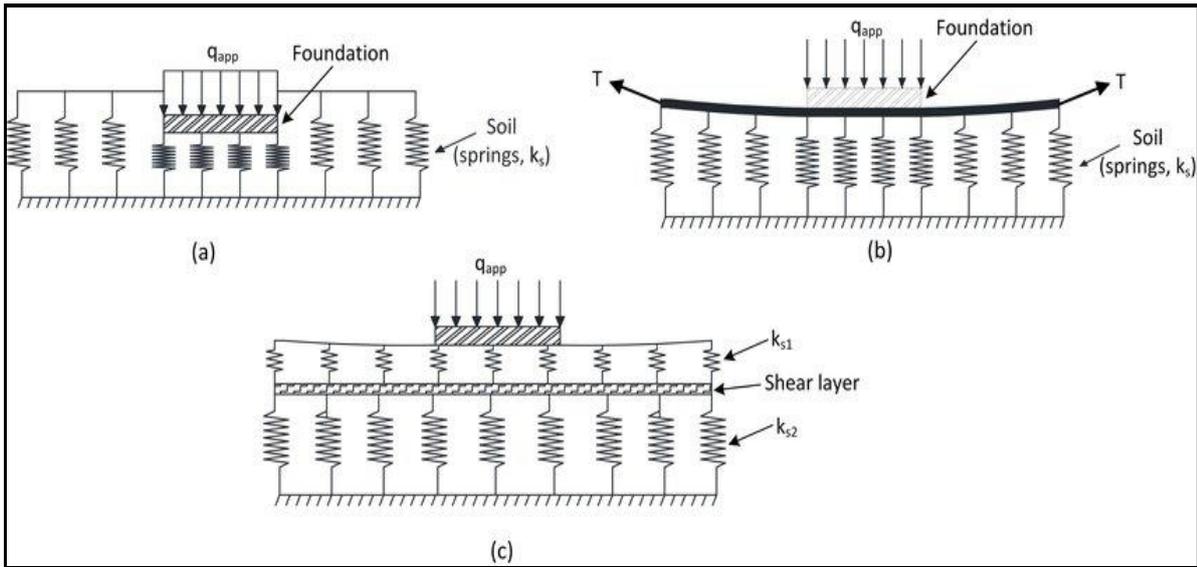
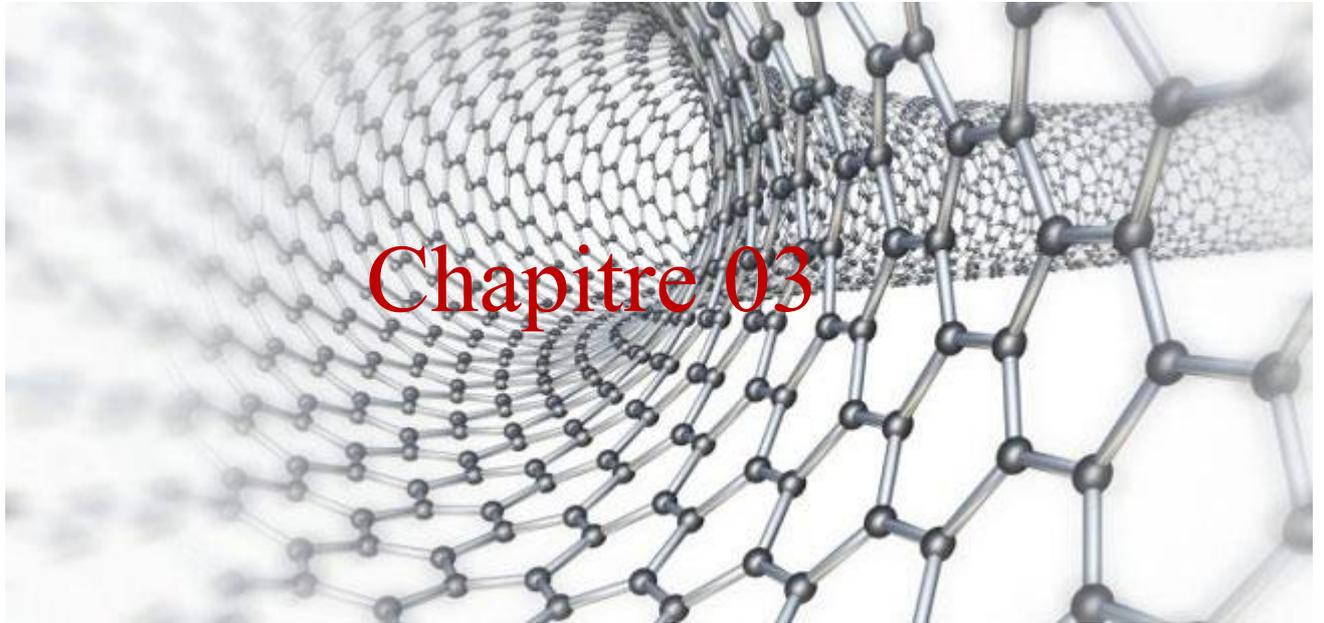


Figure 2.13 Types de fondation: (a) modèle de Winkler, (b) à deux paramètres et (c) modèle de Pasternak [29]

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur les différentes théories des poutres à savoir la théorie classique des poutres (Euler-Bernoulli), la théorie de déformation en cisaillement du premier ordre (Timoshenko) et la théorie de déformation de cisaillement d'ordre élevé. Et aussi la Phénomène de flambement, indiquant comment calculer la charge critique, contrainte critique et l'élanement. En ce qui concerne les fondations élastiques, en particulier la Fondation Winkler et la Fondation Pasternak.

On va utiliser la théorie non locale de la poutre d'Euler-Bernoulli pour calculer la charge critique d'une nano poutre reposant sur fondation élastique de Winkler



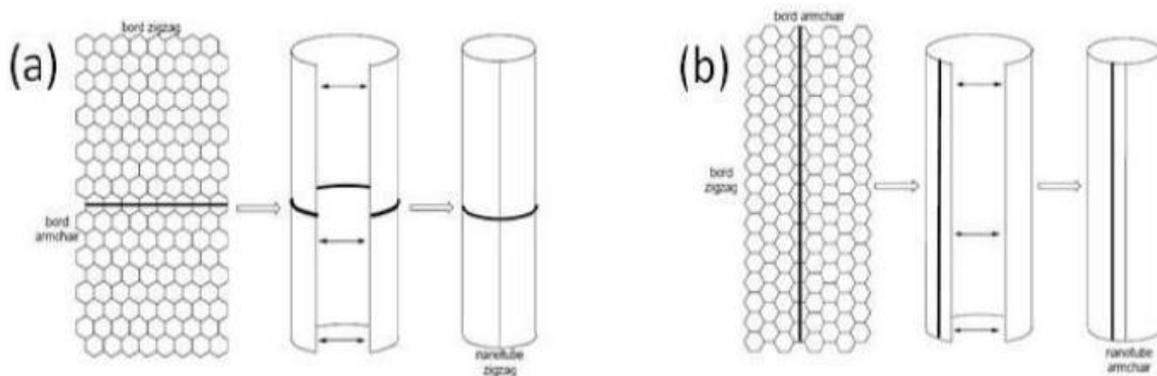
3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons présenté le calcul de la charge critique du flambement non local à partir d'un développement mathématique basé sur la théorie de la poutre d'Euler Bernoulli traité en chapitre 02, des équations et des lois existantes connues en mécanique et en résistance des matériaux. Le nanotube de carbone considéré est une double paroi.

3.2 Paramètres géométriques des SWCNTs et des DWCNTs

Un nanotube peut avoir une seule (single-walled nanotube, SWNT) ou plusieurs (multi-walled nanotubes, MWNT). Afin de mieux comprendre ce matériau, il faut d'abord définir le nanotube mono-couche. Il est, théoriquement, possible de constituer un SWCNT en enroulant un feuillet de graphite (Structure hexagonale en nid d'abeilles, formée d'atomes de carbones en hybridation sp^2) sur lui-même pour former un cylindre. Leur diamètre (d) est typiquement d'environ 0,6 à quelques nm et la longueur (l) de 100 nm à quelques millimètres. La feuille de graphène "possède deux types de bords" (armchair et zigzag).

Suivant le sens d'enroulement nous pouvons obtenir un nanotube de type d'armchair ou zigzag (Figure 3.3 - a et b). Puis la dernière possibilité est d'effectuer une translation d'un bord du feuillet de graphène par rapport à l'autre, parallèlement à l'axe du tube (Figure 3.3 - c). Cette dernière possibilité donne des nanotubes pour différents types de chiralité [11].



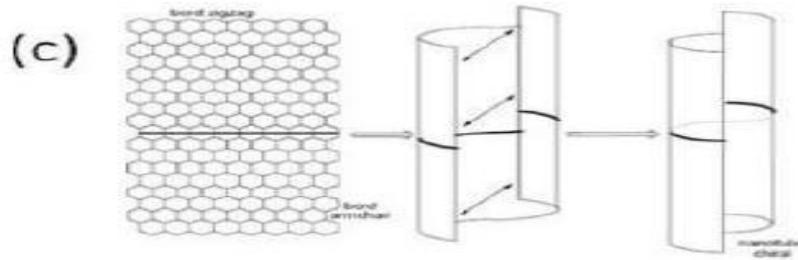


Figure 3.1 Repliement d'un feuillet graphène et raccordement de manière à former un nanotube (a) zigzag, (b) chaise (armchair), (c) chiral [14]

3.2.1 Le vecteur chiral

Le nanotube mono feuillet peut être modélisé par l'enroulement d'une feuille de graphène sur elle-même. Cette feuille de graphène présente une structure de type nid d'abeille, dont on peut donner deux vecteurs directeurs, a_1 et a_2 . On définit ensuite le vecteur de chiralité, C_h orthogonal à l'axe du nanotube Ce vecteur peut donc être décomposé en deux composantes, selon les vecteurs a_1 et a_2 . Soient m et n les scalaires (indices d'Hamada) tels que :

$$C_h = n a_1 + m a_2 \quad (3.1)$$

$$a_1 = \left(\frac{3}{2} a_{cc}, \frac{\sqrt{3}}{2} a_{cc} \right)$$

$$a_2 = \left(\frac{3}{2} a_{cc}, -\frac{\sqrt{3}}{2} a_{cc} \right)$$

$$|a_1| = |a_2| = \sqrt{3} a_{cc} = a = 2.49 \text{ \AA}$$

a_{cc} : c'est la longueur de la liaison C-C (1.421 Å en graphite, nanotubes 1.44 Å – courbure) La longueur du vecteur chiral C_h est la longueur de la circonférence du nanotube :

$$|C_h| = \sqrt{3} a_{cc} \sqrt{n^2 + m^2 + nm} \quad (3.2)$$

a partir de (3.2) le rayon de nanotube de carbone (R) et l'angle chiral (θ) sera :

$$R = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} a_{cc} \sqrt{n^2 + m^2 + nm} \quad (3.3)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{3} m}{2n+m}\right) \quad (3.4)$$

Selon les trois types d'enroulements, donc trois types de nanotubes peuvent être décrits :

- si $m = 0$, le nanotube a une structure de type « zig-zag » ;
- si $m = n$, le nanotube a une structure de type « armchair » ;
- dans tous les autres cas, le nanotube est « chiral ».

Ces différences de chiralité donneront aux nanotubes de carbone des propriétés différentes. Notamment, en ce qui concerne les propriétés électriques. Un nanotube de carbone de type « armchair » possède un comportement électrique métallique par exemple. D'autres chiralités ont des comportements semi-conducteurs[30],[31],[32].

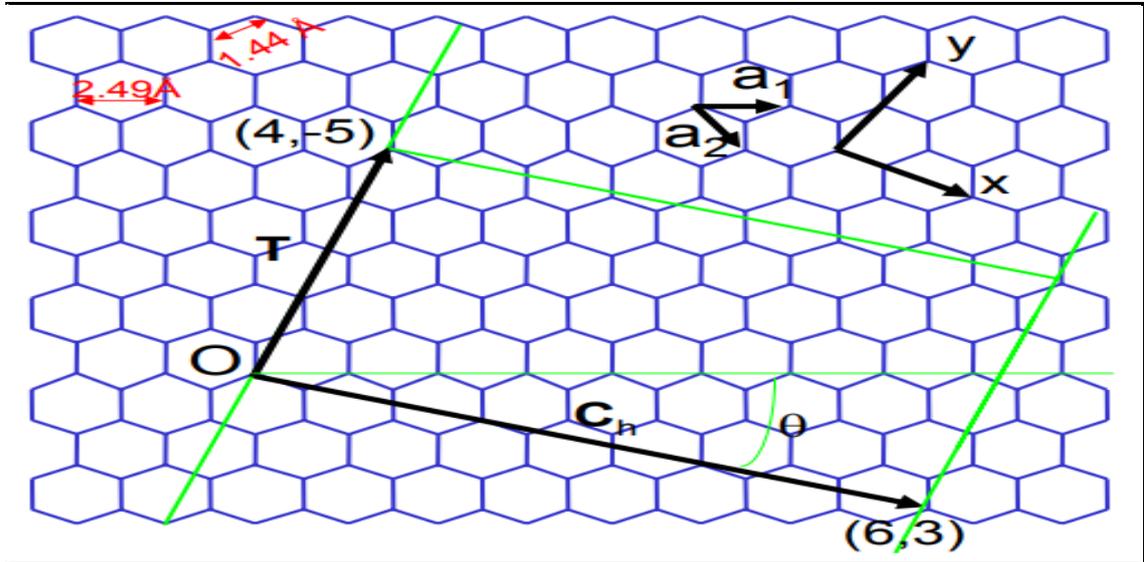


Figure 3.2 plans de graphène aux nanotubes avec une indication de vecteur chiral, l’angle de chiralité, les vecteurs a_1 et a_2 , les indices n et m [31]

Tableau 3.1Résumé des Paramètres structuraux des nanotubes de carbone [31]

symbole	Nom	formule	valeur
a	longueur du vecteur unit	$\sqrt{3}a_{cc} = a = 2.49\text{Å}$	ac-c = 1.44 Å
a_1 a_2	vecteur unitaire	$a_1 = (\frac{3}{2}a_{cc}, \frac{\sqrt{3}}{2}a_{cc})$ $a_2 = (\frac{3}{2}a_{cc}, -\frac{\sqrt{3}}{2}a_{cc})$	coordonnées x, y
C_h	vecteur chiral	$C_h = n a_1 + m a_2$	$0 \leq m \leq n$
L	longueur du C_h	$L = \sqrt{3}a_{cc}\sqrt{n^2 + m^2 + nm}$	
d_t	Diamètre	$d_t = \frac{L}{\pi}$	
θ	angle chiral	$\sin\theta = \frac{\sqrt{3} m}{2\sqrt{n^2 + m^2 + nm}}$ $\cos\theta = \frac{2n + m}{2\sqrt{n^2 + m^2 + nm}}$	$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{6}$ $\tan(\frac{\sqrt{3} m}{2n + m})$

Tableau 3.2 Comment calculer le diamètre d'un nanotube de carbone mono- couche en fonction de sa symétrie [14]

Symétrie	Indice	angle chiral	Diamètre
zigzag	(n, 0) ou (0, m)	$\theta = 0^\circ$	$d_t = a_{cc} \frac{\sqrt{3} m}{\pi}$
Aramchair	(n, n) n=m	$\theta = 30^\circ$	$d_t = a_{cc} \frac{3n}{\pi}$
chirale	(n, m) n m	$0^\circ < \theta < 30^\circ$	$d_t = a_{cc}$

3.3 étude du flambement des nanotubes de carbone

La propagation transversale d'onde dans les nanotubes de carbone a été étudiée en utilisant la théorie d'élasticité non local et le modèle de poutre d'Euler– Bernoulli. L'effet de petite taille sur les caractéristiques du flambement des nanotubes de carbone a été traité par un modèle de poutre continu [11].

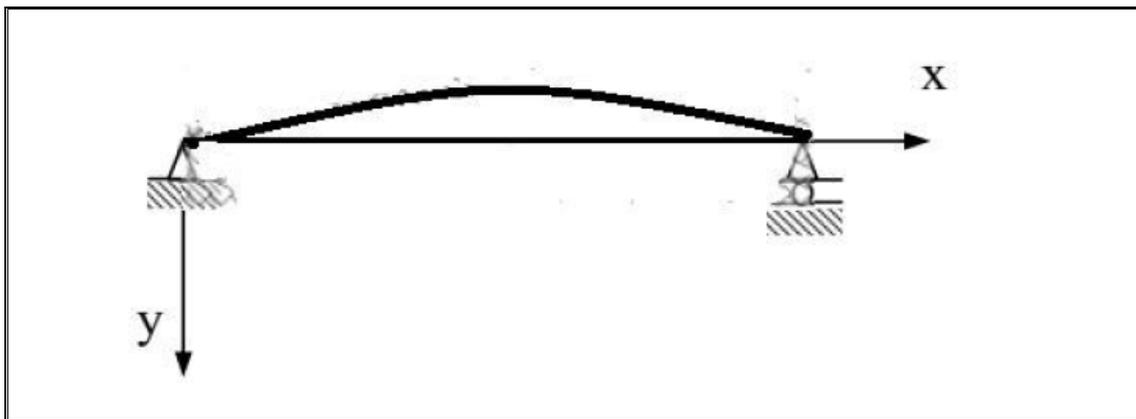


Figure 3.3 Flambement d'une poutre

3.3.1 Les modèles théoriques du milieu continu non local

Dans la théorie d'élasticité non local la contrainte au niveau d'un point de référence (x) est considéré comme une fonction du champ de déformation estimée à chaque point dans le corps. Cette observation est conforme au modèle atomique et aux observations expérimentales sur la dispersion des photons. En outre, quand l'effet des contraintes aux autres points que (x) est négligé, la théorie non local d'élasticité se conforme à la théorie (locale) classique d'élasticité ceci en mettant ($e_0a = 0$). Par conséquent, la théorie non local fournit une description plus précise du comportement matériel comparée à la théorie (locale) classique d'élasticité.

Les équations de base pour un solide élastique non local, linéaire, homogène et isotrope, n'a pas soumis par une force extérieure sont données par:

$$\sigma_{ij,j} = 0$$

$$\sigma_{ij}(x) = \int \alpha(|x - x'|, \tau) C_{ijkl} \varepsilon_{kl}(x') dV(x'), \quad \forall x \in V \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$$

La loi de Hooke pour un état uni-axial de contrainte a été déterminée par cette équation :

$$\left(1 - e_0a^2 \frac{\partial}{\partial x^2}\right) \sigma_k = E\varepsilon(x) \quad (3.6)$$

Ou (E) est le module de Young du matériau. Ainsi le coefficient (e_0a) représente l'effet de petite taille. La déformation ε pour le modélé d'Euler-Bernoulli est donnée par :

$$\varepsilon = -y \frac{d^2W}{dx^2} \quad (3.7)$$

3.3.2 Modèle Euler-Bernoulli

Considérons une poutre homogène d'une section constante (A). Dans le cas du modèle de poutre d'Euler-Bernoulli, le mouvement de vibration transverse est décrit comme suit:

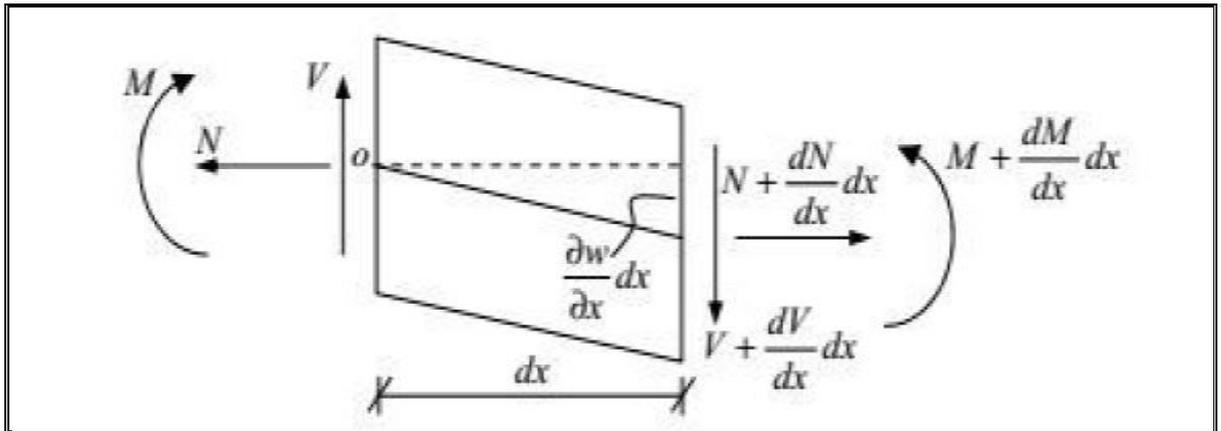


Figure 3.4 représentation élémentaire de la poutre d'Euler Bernoulli [1]

Les équations d'équilibre de la force dans la direction et le moment sur la structure unidimensionnelle peuvent être facilement fournies à partir du diagramme du corps libre d'un élément infinitésimal d'une structure de poutre soumise à une charge axiale P [1]

$$\frac{dV}{dx} + q(x) - k_{in} w(x) = 0 \tag{3.8}$$

$$\frac{dV}{dx} = -q(x) + k_{in} w(x) \tag{3.8'}$$

$$\frac{dM}{dx} = -P \frac{dW}{dx} + V \tag{3.9}$$

La dérivation de l'équation (3.9) est comme suit:

$$\frac{d^2M}{dx^2} = -P \frac{d^2W}{dx^2} + \frac{dV}{dx} \tag{3.10}$$

Substituons l'équation (3.8') dans (3.10) :

$$\frac{d^2M}{dx^2} = -P \frac{d^2W}{dx^2} - q(x) + k_{in} w(x) \tag{3.11}$$

Le moment de flexion résultant dans une section de poutre est donné comme suit :

$$M = \int_A^1 y \sigma dA \tag{3.12}$$

A partir des relations (3.6), (3.7) et (3.12), le moment de flexion M pour le modèle non local peut être exprimé par :

$$M = \int_A^1 y \left(e_0 a^2 \frac{\partial \sigma}{\partial x^2} \right) dA - \int_A^1 E y \frac{d^2W}{dx^2} y dA \tag{3.13}$$

$$M = (e0a^2) \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} - \int_A^1 Ey^2 \frac{d^2 W}{dx^2} dA \quad (3.14)$$

$$M = (e0a^2) \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} - E \int_A^1 y^2 dA \frac{d^2 W}{dx^2} \quad (3.14')$$

Où le moment d'inertie de la section du nano tube est donné comme suit:

$$I = \int_A^1 y^2 dA \quad (3.15)$$

Substituons l'équation (3.15) dans (3.14'), on aura :

$$M = (e0a^2) \frac{d^2 M}{dx^2} - EI \frac{d^2 W}{dx^2} \quad (3.16)$$

$$[1 - (e0a^2) \frac{d^2}{dx^2}] M = -EI \frac{d^2 W}{dx^2} \quad (3.17)$$

Substituons les équations (3.11) dans l'équation (3.17)

$$M = -EI \frac{d^2 W}{dx^2} + (e0a^2) \left[-P \frac{d^2 W}{dx^2} - q(x) + k_{win} w(x) \right] \quad (3.18)$$

La dérivation de l'équation (3.18) et substituons l'équation (3.11) dans l'équation (3.18) est comme suit :

$$\frac{d^2 M}{dx^2} = -EI \frac{d^4 W}{dx^4} + (e0a^2) \left[-P \frac{d^4 W}{dx^4} - \frac{d^2 q(x)}{dx^2} + k_{win} \frac{d^2 w}{dx^2}(x) \right] \quad (3.19)$$

Substituons les équations (3.11) dans l'équation (3.19)

$$-P \frac{d^2 W}{dx^2} - q(x) + k_{win} w(x) = -EI \frac{d^4 W}{dx^4} + (e0a^2) \left[-P \frac{d^4 W}{dx^4} - \frac{d^2 q(x)}{dx^2} + k_{win} \frac{d^2 w}{dx^2}(x) \right] \quad (3.20)$$

$$-EI \frac{d^4 W}{dx^4} + (e0a^2) \left[-P \frac{d^4 W}{dx^4} - \frac{d^2 q(x)}{dx^2} + k_{win} \frac{d^2 w}{dx^2}(x) \right] + P \frac{d^2 W}{dx^2} + q(x) - k_{win} w(x) = 0$$

$$\text{Donc} \quad EI \frac{d^4 W}{dx^4} + (1 - (e0a^2) \frac{d^2}{dx^2}) \left[-P \frac{d^2 W}{dx^2} - q(x) + k_{win} w(x) \right] = 0 \quad (3.21)$$

La pression de Van der Waals devrait être une fonction linéaire de la différence des déflexions des deux couches adjacentes au point comme suit :

$$q_{12} = ct(w_2 - w_1) \quad (3.22)$$

$$q_{21} = -\frac{d1}{d2} ct(w_2 - w_1) \quad (3.23)$$

Où d1 et d2 sont respectivement le rayon des tubes interne et externe. C'est le coefficient d'interaction du tube interne par unité de longueur entre deux tubes.

Substituons les équations (3.18) et (3.19) dans l'équation (3.17)

$$EI \frac{d^4 w_1}{dx^4} + (1 - (e0a^2) \frac{d^2}{dx^2}) [-P \frac{d^2 W_1}{dx^2} - ct(w_2 - w_1) + kwinw_1(x)] = 0 \quad (3.24a)$$

$$EI \frac{d^4 w_2}{dx^4} + (1 - (e0a^2) \frac{d^2}{dx^2}) [-P \frac{d^2 W_2}{dx^2} + \frac{d1}{d2} ct(w_2 - w_1) + kwinw_2(x)] = 0 \quad (3.24b)$$

Supposons les modes de flambement comme :

$$w_1 = W_1 \sin(\lambda x) \quad (3.25a)$$

$$w_2 = W_2 \sin(\lambda x) \quad (3.25 b)$$

Après la substituons de l'équation (3.25) dans l'équation (3.24) on va obtenue le système homogène suivant :

$$[EI_1 \lambda^4 + (1 + e0a^2 \lambda^2)(ct + kwin + P\lambda^2)] W_1 - [(1 + e0a^2 \lambda^2) ct] W_2 \quad (3.26a)$$

$$[-(1 + e0a^2 \lambda^2) \frac{d1}{d2} ct] W_1 + [EI_2 \lambda^4 + (1 + e0a^2 \lambda^2) (\frac{d1}{d2} ct + kwin + P\lambda^2)] W_2 \quad (3.26b)$$

L'équation (3.22) sous forme matricielle nous donne

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \end{pmatrix} = 0 \quad (3.27)$$

Le déterminant de cette matrice nous donne:

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} = 0 \gg \gg \gg k_{11} * k_{22} - k_{12} * k_{21} = 0 \quad (3.28)$$

$$[EI_1 \lambda^4 + (1 + e0a^2 \lambda^2)(ct + kwin + P\lambda^2)] * [EI_2 \lambda^4 + (1 + e0a^2 \lambda^2) (\frac{d1}{d2} ct + kwin + P\lambda^2)] - [-(1 + e0a^2 \lambda^2) ct] * [-(1 + e0a^2 \lambda^2) \frac{d1}{d2} ct] = 0 \quad (3.29)$$

Et à partir de là, la solution de l'équation (déterminant = 0) est la suivante :

$$aP^2 + bP + c = 0 \quad (3.30)$$

$$a = \lambda^4 + e0a^4 \lambda^8 + 2e0a^2 \lambda^6$$

$$b=2e0a^4\lambda^6 K_{win} + EI_1\lambda^8 e0a^2 + 2\lambda^2 k_{win} + 4\lambda^4 e0a^2 K_{win} + e0a^4\lambda^6 \frac{d1}{d2} ct + 2cte0a^2\lambda^4 + EI_1\lambda^6 + \lambda^6 EI_2 + e0a^2\lambda^8 EI_2 + ct\lambda^2 + \lambda^2 \frac{d1}{d2} ct + e0a^4\lambda^6 ct + 2\lambda^4 e0a^2 \frac{d1}{d2} ct$$

$$c=e0a^4\lambda^4 K_{win}^2 + K_{win} EI_2\lambda^4 + K_{win} \frac{d1}{d2} ct + e0a^2\lambda^6 ct EI_2 + 2e0a^2\lambda^2 K_{win}^2 + ct EI_2\lambda^4 + E^2 I_1\lambda^8 I_2 + e0a^2\lambda^6 K_{win} EI_2 + EI_1\lambda^4 K_{win} + e0a^4\lambda^4 ct K_{win} + K_{win}^2 + 2cte0a^2\lambda^2 K_{win} + e0a^4\lambda^4 K_{win} \frac{d1}{d2} ct + ct K_{win} + EI_1\lambda^6 e0a^2 K_{win} + 2K_{win} e0a^2\lambda^2 \frac{d1}{d2} ct + EI_1\lambda^4 \frac{d1}{d2} ct + EI_1\lambda^6 e0a^2 \frac{d1}{d2} ct$$

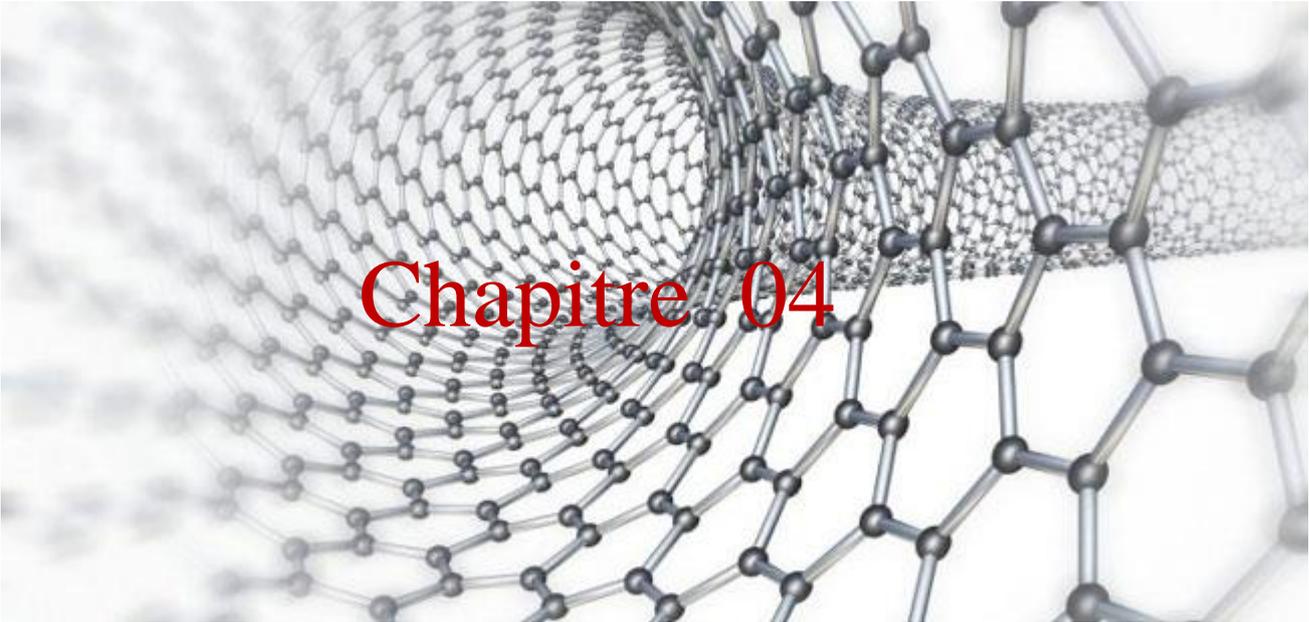
L'équation de résolution donne la pression de flambement du (DWCNT) dans lequel les effets des différents paramètres sont indiqués.

$$P = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \tag{3.31}$$

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on étudie des L'équation finale de la résolution qui donne la pression de flambement du (DWCNT) À partir de la loi de hook pour un état uni-axial de contrainte Prise en compte du coefficient (e0a) qui représente l'effet de petite taille en utilisant les lois du modèle de poutre d'Euler-Bernoulli Avec l'ajout de l'indice de fondation de Winkler (Kwin) et les formules de moment de flexion (M) pour ce modèle et de moment d'inertie de la section du nanotube (I) Que nous utiliserons dans le chapitre suivant pour déterminer la valeur de la charge critique avec un changement de l'un des paramètres a chaque fois.

De plus, nous avons mentionné les paramètres géométriques des nanotubes de carbone, de particulier Le vecteur chiral et la valeur de sa longueur, ce qui nous amène à calculer le diamètre des (NTC), et aussi l'angle chiral, les indices n et m Afin de définir les types de nanotubes.



4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter et discuter un ensemble de résultats notamment la charge critique de flambement d'un nanotube de carbone double parois incorporer dans une matrice élastique de type Winkler sur la base des formulations obtenues avec le modèle de poutres d'Euler-Bernoulli. La théorie d'élasticité non locales qui prend en considération l'effet de petit échèle a été prise en considération.

Les résultats ont pris on considérations les différents paramètres suivant : le rapport géométrique (L/d), l'effet du coefficient à petite échelle non locale (e_0a). le nombre de mode et l'effet de la chiralité.

4.2 Les paramètres utilisés dans les calculs

Les paramètres utilisés dans les calculs de (DWCNT) sont donnés comme suit: L'épaisseur effective de (NTC) prise à 0,285 nm, la masse volumique, $\rho = 2,3 \text{ g/cm}^3$, distance entre couche $h = 0,34 \text{ nm}$, coefficient de poisson $\nu = 0,19$ [33], [34]. La rigidité du milieu élastique K_{win} a été donnée selon le tableau suivant :

Tableau 4.1 la valeur de K_{win} selon le type de la matrice polymère

<i>Polymères</i>	<i>k_{win} (GPa)</i>
Polyéthylène (PE)	0,9
Polycarbonate (PC)	2,2
Résine epoxy	2,7
Polyester	3,2

Les nanotubes de carbone qui seront utilisés dans cette étude sont considérés comme des doubles parois, nous avons donc deux cylindres de diamètre (d1 et d2):

$$d1 = \frac{\sqrt{3}}{\pi} a_{cc} \sqrt{(n^2 + m^2 + nm)}$$

$$d2 = d1 + 2 h$$

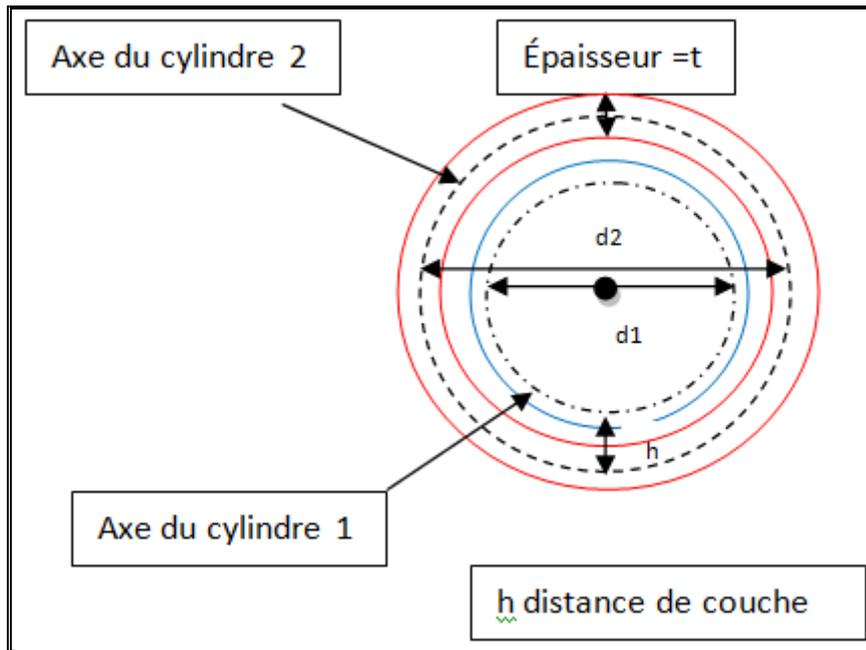


Figure 4.1 schéma montrant les dimensions du NTC à double paroi

Pour les moments quadratiques I_1 et I_2 seront calculés à partir de la figure suivante :

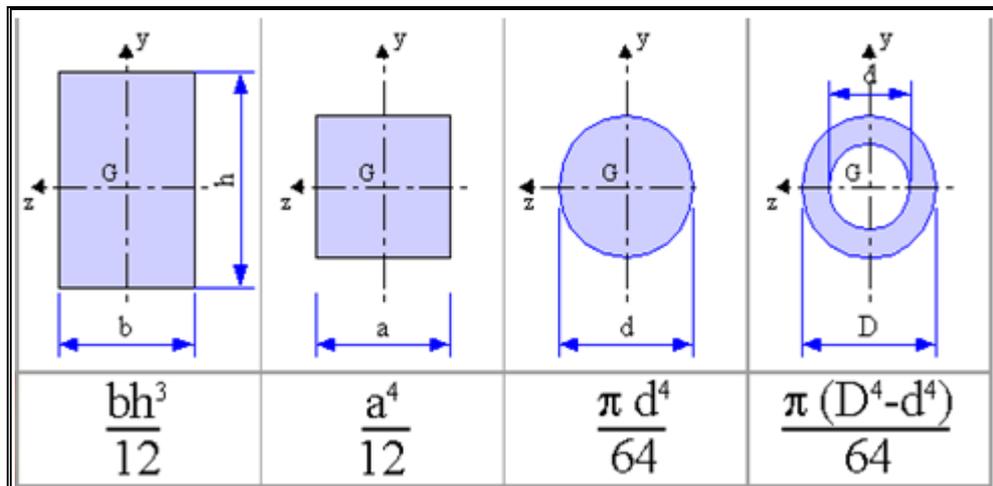


Figure 4.2 les moments quadratique en RDM

Donc :

$$I_1 = \frac{(d_1 + t)^4 - (d_1 - t)^4}{64} \pi \quad I_2 = \frac{(d_2 + t)^4 - (d_2 - t)^4}{64} \pi$$

Les valeurs de module de Young des (SWCNTs) et (DWCNTs) utilisées dans cette étude (Tableau 4.2), sont calculés par Bao et al. (2004) [35], Tu et Ou-Yang (2002) [36] respectivement. A partir de tableau 4.1 on voit qui il y a certain nanotubes de différentes chiralités ont des faibles modules de Young par rapport aux autre. cette différence est a cause

de la rayon du nanotube elle-même parce que si le rayon augmente, le module du young diminue. et cela a été confirmé après une simulation du module de Young des SWCNT avec Dynamique moléculaire e [37].

Tableau 4.2 Valeurs du module de Young des nanotubes de carbone mono et doubles parois pour différentes chiralités.

Indices d'hamada (n,m)	Module de Young (SWNT) (GPa) Bao WenXing et al. (2004)	Module de Young (DWNT) (GPa) Tu and Ou-Yang (2002)
Armchair		
(8,8) (12,12)	934.960	852.684
(10,10) (15,15)	935.470	853.149
(12,12) (17,17)	935.462	853.141
(14,14) (19,19)	935.454	853.134
(16,16) (21,21)	939.515	856.838
(18,18) (23,23)	934.727	852.471
(20,20) (25,25)	935.048	852.764
Zigzag		
(14,0) (23,0)	939.032	856.397
(17,0) (26,0)	938.553	855.960
(21,0) (30,0)	936.936	854.486
(24,0) (33,0)	934.201	851.991
(28,0) (37,0)	932.626	850.555
(31,0) (40,0)	932.598	850.529
(35,0) (44,0)	933.061	850.952
Chiral		
(12,6) (18,10)	927.671	846.036
(14,6) (20,10)	921.616	840.514
(16,8) (22,12)	928.013	846.348
(18,9) (24,13)	927.113	845.700
(20,12) (26,16)	904.353	824.000
(24,11) (30,15)	910.605	830.200
(30,8) (36,12)	908.792	828.800

4.3 Les résultats obtenus

4.3.1 Effet de chiralité

Le tableau 4.3 représente la relation entre la charge critique d'un nanotube de carbone à double parois et le coefficient de petite échelle avec le module de young changeant à la fois

$$E = 934.960 \text{ GPa}$$

$$E = 935.454 \text{ GPa}$$

$$E = 935.048 \text{ GPa}$$

Tableau 4.3 Relation entre la charge critique de flambement(Pcr) et le coefficient d'échelle (e0a) du nanotube de carbone double parois (Armchair) pour différents modules de young

e0a	n=m=8	n=m=14	n=m=20
0	612,99437	883,16977	1154,39411
0,2	586,19877	864,63773	1140,26012
0,4	518,22004	813,42118	1099,85459
0,6	434,24132	740,3033	1038,50098
0,8	353,88243	657,50545	963,23696
1	285,80037	574,78093	881,08152
1,2	231,32501	498,10197	797,84029
1,4	188,7336	430,18919	717,63224
1,6	155,606	371,63474	642,96127
1,8	129,73548	321,8924	575,05528
2	109,35944	279,93368	514,25925

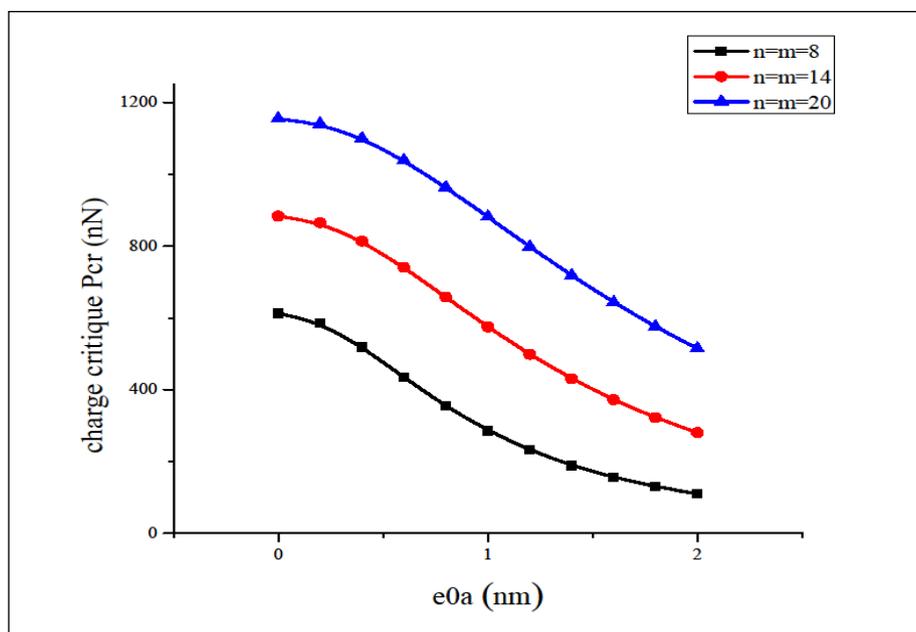


Figure 4.3 Relation entre la charge critique de flambement(Pcr) et le coefficient d'échelle (e0a) du nanotube de carbone double parois (Armchair) pour différents modules de Young.

La figure 4.3 montre la relation entre la charge critique de flambement des nanotubes de carbone et le coefficient de petite échelle (e_0a). A travers cette courbe, nous voyons que la charge critique (P_{cr}) diminue pour des valeurs croissantes de coefficient de petite échelle quel que soit la chiralité des nanotubes de carbones. Cette variation démontre la précision de la théorie non locale.

Aussi, on peut constater que quel que soit la valeur des indices d'hamada, la valeur de la charge critique est grande, ainsi la charge critique du flambement la plus élevée est correspondante aux indices d'hamada les plus élevés.

L'effet observé de ces indices sur la charge critique est dû au fait qu'ils sont inclus dans le calcul du diamètre du nanotube.

De sorte que chaque fois que l'indice est grand, le diamètre est grand, et puisque nous avons également supposé que la valeur de L/d est de 10 pour tous les cas, l'effet de ces indices s'étend jusqu'à la longueur du nanotube, ce qui le rend également plus grand, et nous en constatons que quelle que soit la longueur du nanotube, la valeur de la charge critique diminue alors.

4.3.2 Effet du rapport géométrique (L/d)

Le tableau 4.4 représente la relation entre la charge critique d'un nanotube de carbone à double parois et le coefficient de petite échelle avec un changement de le rapport géométrique (ou la longueur) à chaque fois du plus petit au plus grand.

Tableau 4.4 Relation entre la charge critique de flambement (P_{cr}) et le coefficient d'échelle (e_0a) du nanotube de carbone double parois (Armchair) pour différents rapports géométrique ($W=L/d$)

e_0a	$W=10$	$W=20$	$W=30$	$W=40$
0	612,994	149,471	59,253	22,852
0,2	586,198	147,740	58,910	22,744
0,4	518,220	142,773	57,899	22,425
0,6	434,241	135,180	56,281	21,906
0,8	353,882	125,780	54,143	21,203
1	285,800	115,411	51,593	20,338
1,2	231,325	104,787	48,744	19,336
1,4	188,733	94,438	48,744	18,224
1,6	155,606	84,701	42,577	17,030
1,8	129,735	75,760	39,440	15,778
2	109,359	67,685	36,359	14,492

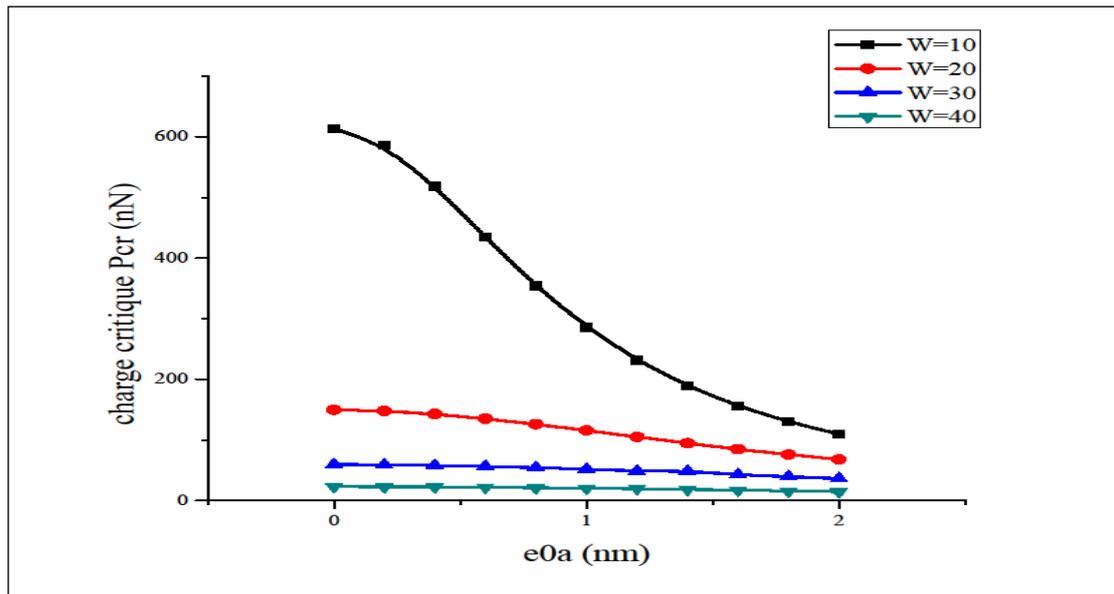


Figure 4.4 Relation entre la charge critique de flambement (P_{cr}) et le coefficient d'échelle (e_0a) du nanotube de carbone double parois (Armchair) pour différents rapports géométriques ($W=L/d$)

La figure 4.4 montre l'effet du coefficient (e_0a) sur la charge critique de flambement non local pour divers rapports (L/d) de nanotubes de carbone double parois de type armchair ($n=8$, $m=8$).

La charge critique de flambement est réduite lorsque la valeur de L (la longueur du nanotube) est augmentée. Par conséquent, la longueur affecte les charges qui peuvent être supportées par ces nanotubes. Cet effet se produit en raison du phénomène d'instabilité élastique. Lorsqu'une structure est compressée dans le sens de la longueur, elle a tendance à fléchir perpendiculairement à l'axe de la force appliquée, et c'est ce que représente le phénomène physique (flambement).

Nous voyons également, que la valeur de la charge critique est à son maximum pour le coefficient de petite échelle (e_0a) et la valeur du rapport géométrique (L/d) les plus faibles. C'est ce que nous observons lorsque nous comparons les deux courbes: le représentant de $W=10$ et le représentant de $W=40$. Le premier correspond à une valeur (charge critique) beaucoup plus grande que la seconde bien que la seconde représente un nanotube quatre fois plus long que la première.

4.3.3 Effet du nombre de mode (N)

Le tableau 4.5 représente la relation entre la charge critique d'un nanotube de carbone à double parois et le coefficient de petite échelle mais avec un nombre de modes différent à chaque fois

Tableau 4.5 Relation entre la charge critique de flambement (Pcr) et le coefficient d'échelle (e0a) du nanotube de carbone double parois Armchair (n= 8 , m= 8) pour différents nombres de mode (N)

e0a	N=2	N=4	N=6
0	59,25365	270,62011	612,99437
0,2	58,91008	265,19567	586,19877
0,4	57,89992	250,14347	518,22004
0,6	56,28173	228,49853	434,24132
0,8	54,14399	203,76372	353,88243
1	51,59373	178,80954	285,80037
1,2	48,74458	155,46061	231,32501
1,4	45,70631	134,60318	188,7336
1,6	42,5773	116,48421	155,606
1,8	39,44003	100,99234	129,73548
2	36,35965	87,85283	109,35944

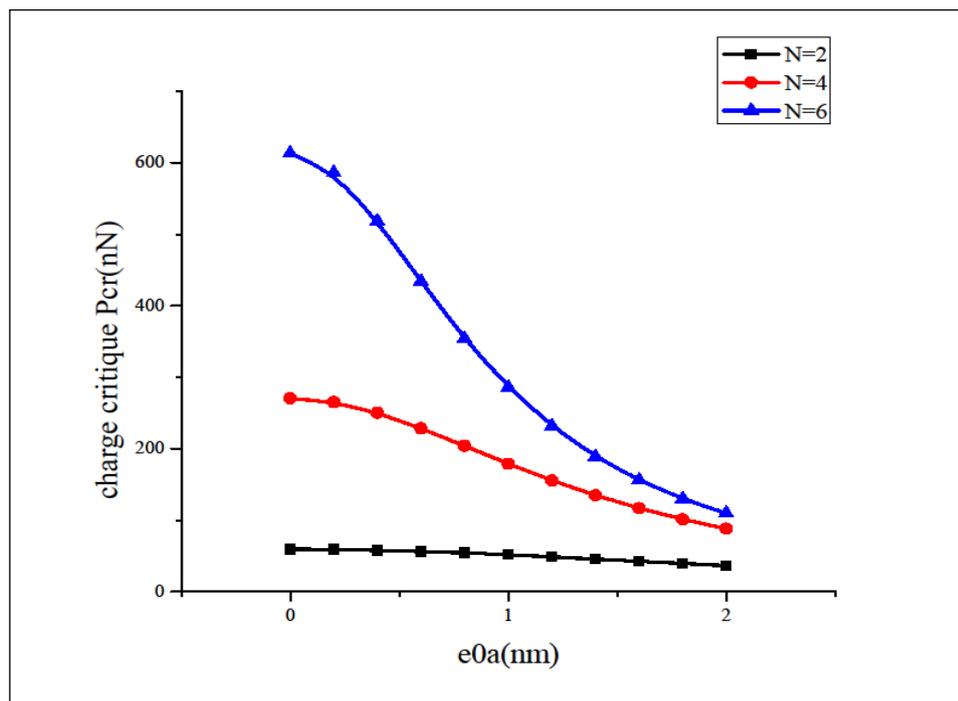


Figure 4.5 Relation entre la charge critique de flambement (Pcr) et le coefficient d'échelle (e0a) du nanotube de carbone double parois Armchair (n= 8 , m= 8) pour différents nombres de mode (N)

L'effet du coefficient de petite échelle (e0a) sur la charge critique de flambement non locale pour différents nombres de mode (N) de nanotubes de carbone double parois de type armchair (n= 8 , m= 8) est illustré dans la figure 4.5 avec un rapport (L /d = 10). Il est à noter

que le nombre de mode a un impact significatif sur la charge critique des nanotubes. Cette dernière a sa valeur maximale pour le nombre de mode le plus élevé.

4.3.4 Effet du milieu élastique

Le tableau 4.6 représente la relation entre la charge critique d'un nanotube de carbone à double parois et le coefficient de petite échelle en tenant compte de la présence d'un milieu élastique ou non, et une fois avec un plus petit nombre de modes et encore avec un plus grand nombre de modes.

Tableau 4.6 Relation entre la charge critique de flambement (Pcr) et le coefficient d'échelle (e0a) du nanotube de carbone double parois Armchair (n= 8 , m= 8) pour avec et sans milieu élastique ou (N=2 / N=6).

e0a	N=2		N=6	
	Sans	avec	sans	avec
0	66.35389865	41.10855544	613.7832850	610.9782465
0,2	66.01033615	40.76499298	586.9876835	584.1826450
0,4	65.00017120	39.75482798	519.0089540	516.2039155
0,6	63.38198535	38.13664209	435.0302401	432.2252022
0,8	61.24424675	35.99890362	354.6713521	351.8663138
1	58.69398595	33.44864279	286.5892899	283.7842518
1,2	55.84483015	30.59948702	232.1139297	229.3088914
1,4	52.80656765	27.56122446	189.5225174	186.7174792
1,6	49.67754858	24.43220545	156.3949192	153.5898810
1,8	46.54028630	21.29494310	130.5244006	127.7193624
2	43.45989872	18.21455550	110.1483608	107.3433227

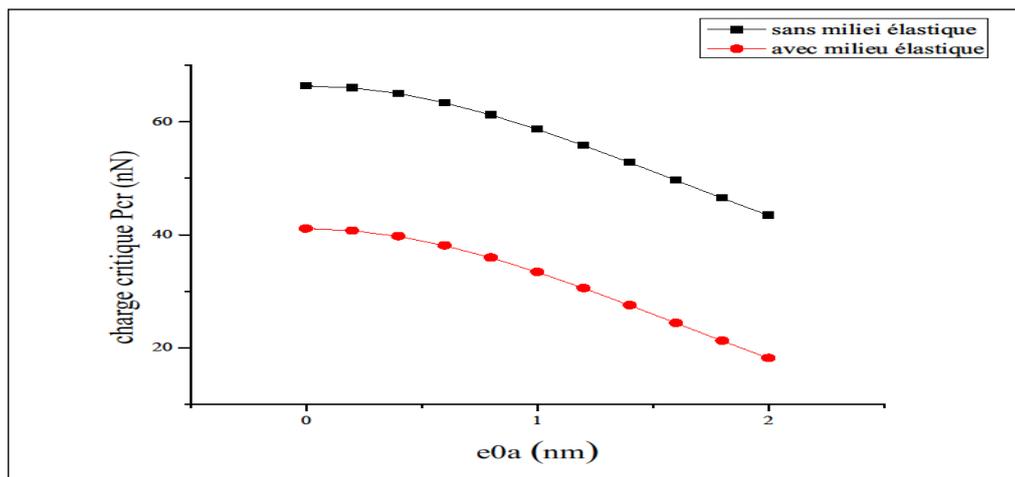


Figure 4.6 Relation entre la charge critique de flambement (Pcr) et le coefficient d'échelle (e0a) du nanotube de carbone double parois Armchair (n= 8 , m= 8) pour avec et sans milieu élastique ou (N=2).

À partir de la figure 4.6 On voit que la charge critique est affectée ou non par la présence du milieu élastique, comme on le voit, l'introduction du milieu élastique diminue la charge critique et vis versa. Cette différence est due aux faibles forces de van der Waals entre les tubes intérieur et extérieur (Les résultats du Tableau 4.6 le démontrent) .

Il est observé sur le tableau 4.6 que lorsque le nombre de mode (N) augmente, la charge critique de flambement augmente et l'effet de milieu élastique est évident pour le mode fondamental. La signification dans les modes supérieurs est attribuée au diamètre et à l'influence de la petite longueur d'onde. Pour de plus petites longueurs d'onde, les interactions entre les atomes augmentent et ces charges ont une augmentation des effets non locale. Ce phénomène diminue l'effet du milieu élastique [1] .

4.3.5 Effet du milieu élastique Winkler (Kwin)

Le tableau 4.7 représente la relation entre la charge critique d'un nanotube de carbone à double parois et le coefficient de petite échelle avec le changement de la matrice polymère à chaque fois

Tableau 4.7 Relation entre la charge critique de flambement (Pcr) et le coefficient d'échelle (e0a) du nanotube de carbone double parois Armchair (n= 8 , m= 8) pour différents matrices polymères .

e0a	N=2				N=6			
	0.9	2.2	2.7	3.2	0.9	2.2	2.7	3.2
0	59,25365	48,99773	45,05314	41,10856	612,99437	611,85482	611,41653	610,97825
0,2	58,91008	48,65416	44,70958	40,76499	586,19877	585,05922	584,62093	584,18264
0,4	57,89992	47,644	43,69941	39,75483	518,22004	517,08049	516,6422	516,20392
0,6	56,28173	46,02581	42,08123	38,13664	434,24132	433,10178	432,66349	432,2252
0,8	54,14399	43,88807	39,94349	35,9989	353,88243	352,74289	352,3046	351,86631
1	51,59373	41,33781	37,39323	33,44864	285,80037	284,66083	284,22254	283,78425
1,2	48,74458	38,48866	34,54407	30,59949	231,32501	230,18547	229,74718	229,30889
1,4	45,70631	35,45039	31,50581	27,56122	188,7336	187,59405	187,15577	186,71748
1,6	42,5773	32,32138	28,37679	24,43221	155,606	154,46646	154,02817	153,58988
1,8	39,44003	29,18411	25,23953	21,29494	129,73548	128,59594	128,15765	127,71936
2	36,35965	26,10373	22,15914	18,21456	109,35944	108,2199	107,78161	107,34332

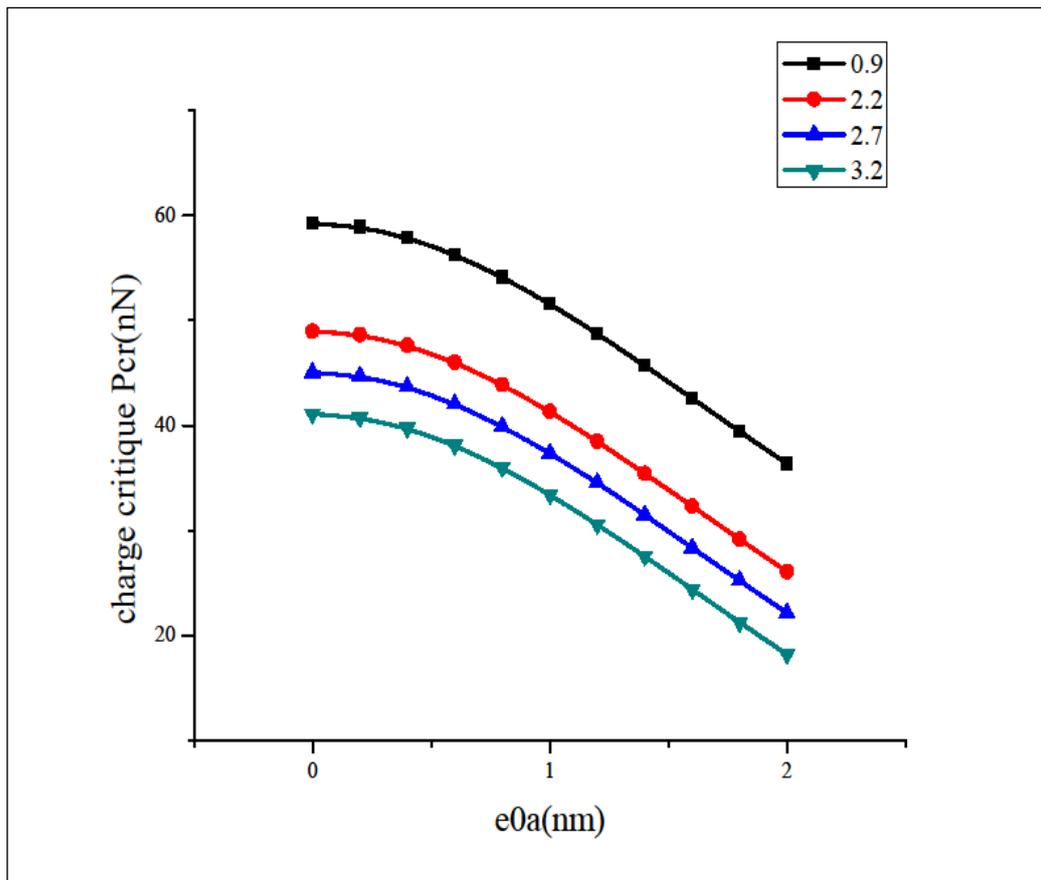


Figure 4.7 Relation entre la charge critique de flambement (P_{cr}) et le coefficient d'échelle (e_0a) du nanotube de carbone double parois Armchair ($n=8$, $m=8$) pour différents matrices polymères ou ($N=2$ et $W=10$).

Comme déjà indiqué dans les figures précédentes (4.3-6), les valeurs de la charge critique de flambement sont maximales pour les coefficients de petites échelles les plus faibles ou petits, en ce qui concerne la relation entre la charge critique et le coefficient de Winkler (K_{win}), il devient clair que plus la valeur du K_{win} est petite, plus la valeur de la charge critique est élevée et vis versa, comme nous l'avons montré dans le tableau précédent (Tableau 4.6), plus le nombre de mode (N) est élevé, plus la différence entre les valeurs de K_{win} deviennent moins importantes ou presque égales. Au fur et à mesure que la valeur du nombre de mode (N) augmente.

Dans le tableau 4.8 suivant, nous ferons de même, avec l'ajout de deux autres types de nanotubes de carbone.

Tableau 4.8 Les valeurs de K_{win} (indice de winkler) de quelque chiralité des NTC's les K_{win} sont selon les types de matrice polymère ou ($N=6$ et $W=10$).

K_{win} (polymère)	0.9 (PE)	2.2 (PC)	2.7 (RE)	3.2 (Polyester)
armchair (8,8)	109.3594439	108.2198972	107.7816100	107.3433227
chiral (18,10)	284.0819642	281.6008792	280.6466163	279.6923530
zigzag (23,0)	256.5505487	254.2990656	253.4331105	252.5671555

Le Tableau 4.8 prouve que ce que nous avons mentionné précédemment est compatible avec tous les types de nanotubes de carbone et n'est pas limité à un type spécifique.

4.3.6 Comparaison Euler- Timoshenko

Le tableau 4.9 représente la différence entre la poutre d'Euler Bernoulli et la poutre de Timoshenko dans la valeur de la charge critique, les trois types de nanotubes de carbone étant calculés.

Tableau 4.9 comparaison entre les charges critique de quelques gammes de la poutre d'Euler-Bernoulli et de Timoshenko [1]

	Modèle Euler-Bernoulli		Modèle Timoshenko [1]	
	L/d=5	L/d=10	L/d=5	L/d=10
armchair (8,8)	127.3138094	109.3594438	136.5680850	122.2090818
chiral (18,10)	377.3596068	284.0819639	441.8352116	354.9343603
zigzag (23,0)	333.8849343	256.5505480	385.9863984	315.5417370

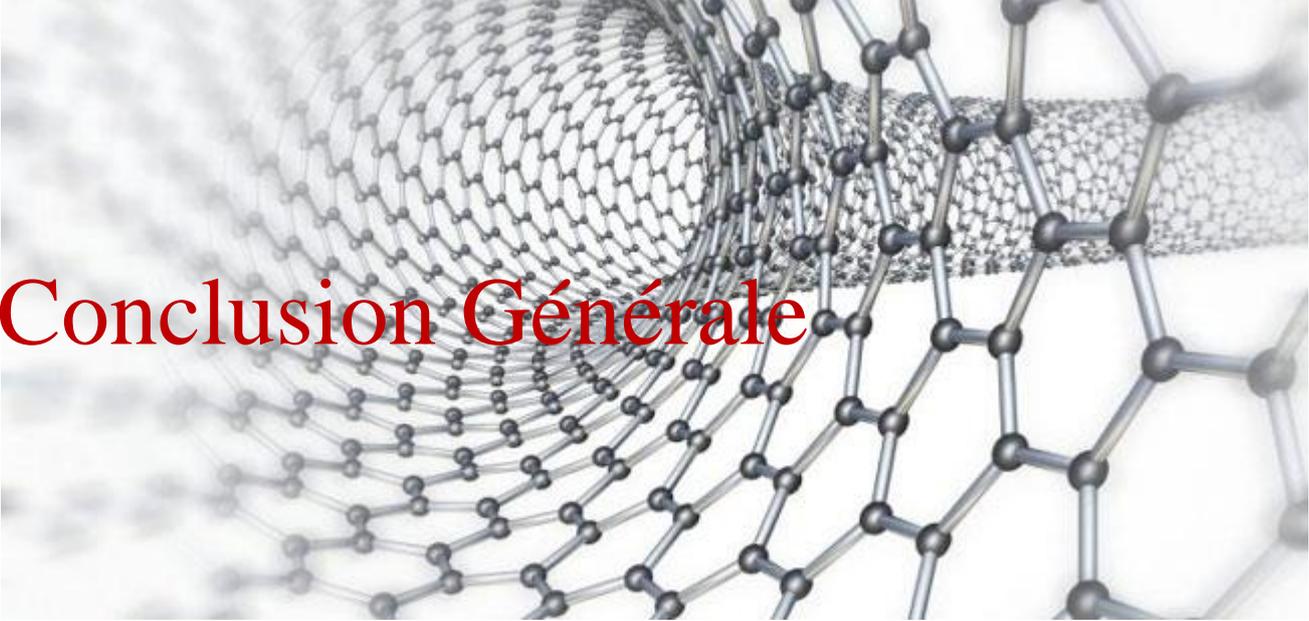
On voit clairement que la gamme chiral (18,10) de poutre de Timoshenko peut supporter la plus grande valeur de la charge critique mais avec les petits rapports géométrique ($W=L/d$) ou bien les petites longueurs

4. 4 Conclusion

Ce travail étudie l'influence du coefficient de petite échelle non local, le nombre de modes vibrationnels, le rapport (L/d) et la chiralité des nanotubes de carbone double parois (DWCNT) sur les charges critiques de flambement non locales utilisant la théorie non locale de la poutre d' Euler-Bernoulli. Les formulations théoriques comprennent les différents paramètres, les équations gouvernantes pour les (DWCNTs) sont résolues et les charges critiques de flambement non locales sont obtenues.

Selon l'étude, les résultats ont montré la dépendance des charges critiques de flambement non locales avec les différents paramètres (chiralité des nanotubes de carbone, coefficients à petite échelle, rapport (L/d) et nombre de mode).

La charge critique est à sa maximale ou a sa minimum pour les paramètres suivants : chiralité des nanotubes de carbone, coefficients à petite échelle, rapport (L/d) et nombre de mode, et viceversa.



Conclusion Générale

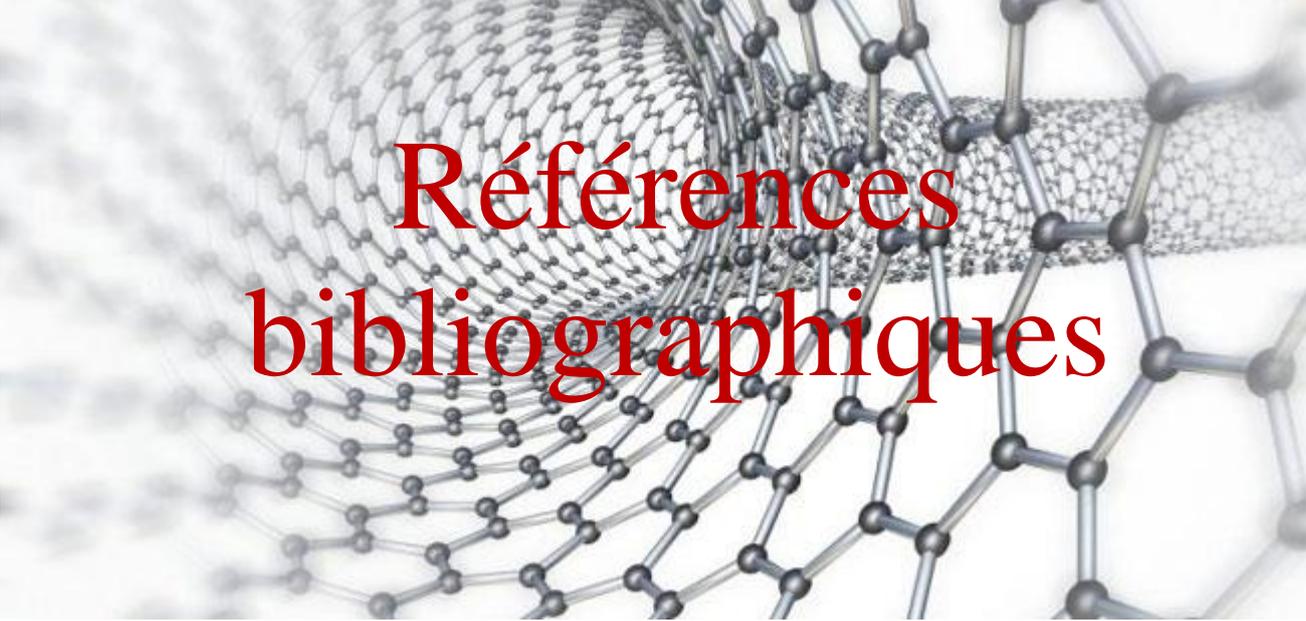
Conclusion Générale

Au cours de cette recherche, qui représente le projet de fin d'étude, nous avons étudié les nanotubes et nano composites de carbone et leurs méthodes de fabrication et leurs propriétés mécaniques et physiques, et ce qui les rend exceptionnels afin de les utiliser dans le domaine de la construction en plus de fournir un aperçu des différentes théories des poutres, en particulier la théorie classique des poutres (Euler-Bernoulli) Ce que nous méritons pour atteindre l'équation mathématique que nous avons ajoutée pour atteindre les résultats que nous mentionnerons plus loin.

Après cela, nous avons fait une étude sur l'effet des certains paramètres des nanotubes de carbone double parois sur les charges critiques non locales en utilisant la théorie non locale des poutres d'Euler-Bernoulli.

Ces paramètres (coefficient de petite échelle non local e_0a , le nombre de modes vibrationnels N , le rapport géométrique L/d) ont prouvé leur forte influence sur les charges critiques. Plus le nombre de modes et le coefficient de petite échelle sont grands et plus la longueur du nanotube est petite, plus la valeur de charge critique est élevée et elle est à son maximum tandis que le milieu élastique affecte inversement, et vis versa.

En perspective, en complément de cette étude, nous envisageons d'étudier une comparaison sur l'effet des mêmes paramètres mentionnés précédemment, sur la charge critique de toutes les trois types de nanotubes de carbone double parois et mono parois (Armchair , Chiral , Zigzag) avec une comparaison de la façon dont chaque paramètre affecte la charge critique de chacun de ces types en introduisant à chaque fois une théorie non locale différente du poutre à partir des trois théories non locale du poutre (Euler-Bernoulli , Timochenko , ordre élevé).



Références
bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] C. Awda, La charge critique de flambement d'un nanotube en carbone, Thèse de Doctorat, Université sidi bel abbes, 2018.
- [2] Jean Amiel, Henry Brusset, « CARBONE », Encyclopædia Universalis [en ligne], <http://www.universalis.fr/encyclopedie/carbone/>
- [3] Le carbone : un élément chimique incontournable, Superprof [en ligne], <https://www.superprof.fr/ressources/scolaire/physique-chimie/tout-niveau/tableau-periodique/formation-et-caracteristiques-du-carbone.html>
- [4] Graphite, futura_science [en ligne] , <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/matiere-graphite-3870/>
- [5] Diamant, futura science [en ligne] , <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/matiere-diamant-3869/>
- [6] Annick, L. (2017, 25 octobre). Les fullerènes nouvelle forme du carbone. Consulté sur https://www.pourlascience.fr/sd/chimie/les-fullerenes-nouvelle-forme-du-carbone-9925.phpecologique_6024156_3232.html.
- [7] [Image digitale]. (s.d.). Consulté sur <http://www.godunov.com/Bucky/buckyball-1.gif>
- [8] [Image digitale]. (S.d.). Consulté sur https://www.lps.u-psud.fr/IMG/pdf_LesNTC.pdf
- [9] Sumio Iijima, Akira Koshio & Masako Yudasaka (Japon). (s. d.). epo. https://www.epo.org/news-events/events/european-inventor/finalists/2015/ijima_fr.html
- [10] D. Salem, Synthèse de nanotubes de carbone monofeuillets individuels et composites modèles polymères – nanotubes de carbone. Application à l'effet photovoltaïque, Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, 2012.
- [11] H. samira, Analyse de la flexion statique, le flambement et la vibration des structures composites renforcées par des nanotubes de carbone Thèse de Doctorat, Université Sidi bel Abbes, 2017.
- [12] t.p.e Nanotubes de carbone. (s.d.). perso.esiee. <https://perso.esiee.fr/~subramaktpe/production.html>

Références bibliographiques

- [13] 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
- [14] P. Marcoux, Réactivité et manipulation de nanotubes de carbone mono-couches: fonctionnalisation de surface par greffage covalent et mise en oeuvre comme agent structurant, Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale d'Angers, 2002.
- [15] B. Mounir, Conception d'un montage de micro fabrication pour Les nano composites à base de résines thermoplastiques, diplôme de Maîtrise ès sciences appliquées ,École Polytechnique de Montréal Université de Montréal, 2011.
- [16] K. Naima, Prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans le dimensionnement de structures en matériaux composites, diplôme de magister ,Université de Science et Technologie Oran , 2016.
- [17] M. Cadek, J.N. Coleman, V. Barron, Morphological and mechanical properties of carbon nanotube reinforced semicrystalline and amorphous polymer composites, Applied Physics Letters, 2002, 81, 27, 5123-5125.
- [18] S. Kumar, T.D. Dang, F.E. Arnold, A.R. Bhattacharyya, B.G. Min, X. Zhang, R.A. Vaia, C. Park, W.W. Adams, R.H. Hauge, R.E. Smalley, S. Ramesh, P.A. Willis, Macromolecules, 2002, 35, 9039A,.
- [19] Polymère, futura-science [en ligne], /<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-polymere-803/>
- [20] Anders Thorin, Gilles Forêt. Calcul des structures : Introduction au calcul de structures élastiques linéaires. École d'ingénieur. (MEC441) MODAL - Génie Civil, Palaiseau, France. 2013, pp.56.
- [21] D. Ryckelynck. introduction à la théorie des poutres. Centre des Matériaux. Mines ParisTech, France .2012, pp.29.
- [22] A. zemri , Etude comparative entre la théorie locale et non locale d'élasticité: Application aux structures homogènes, THESE DE DOCTORAT, univbelabass , 2016

Références bibliographiques

- [23] Abdellaoui, A. (s. d.). Plan Résistance des Matériaux. Consulté sur, <https://brindesciences.pagesperso-orange.fr/rdm.htm>
- [24] Résistance Des Matériaux ,(2016). [pdf]. Disponible sur : <https://institut-de-formation-technique-imouzzar-kandar-87.websself.net/cours>
- [25] Flambage. (s. d.). futura science .<https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/maison-flambage-10695/>
- [26] Flambage. (2020, avril 22). Wikipédia, l'encyclopédie libre. <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Flambage&oldid=169897150>.
- [27] *Cours RDM / A.U : 2012-2013*
- [28] S. Chandra .Modelling of Soil behaviour. Indian Institute of Technology Kanpur, India. 2013, pp.68.
- [29] Evaluating the effects of tunnel construction on buildings – Figure Scientific a ResearchGate. Consulté sur : https://www.researchgate.net/figure/Foundation-types-a-Winkler-b-two-parameter-and-c-Pasternaks-models_fig5_321794772
- [30] J.W.G. Wildöer, L.C. Venema, A.G. Rinzler, R.E. Smalley, C. Dekker, Electronic structure of atomically resolved carbon nanotubes, *Nature* 1, 1998, 391, 59-61,
- [31] Cours de Nanomatériaux et Applications. Nanotubes de carbone : structures et croissance. (s.d.). consulté sur, <https://www.enseignement.polytechnique.fr/profs/physique/francois.anceau/phy569/phy%20569B/amphi/coursntc1.pdf>
- [32] Cours de Physique des Solides. Les Nanotubes de Carbone. (s.d.). consulté sur, <https://docplayer.fr/23484605-Cours-de-physique-des-solides-les-nanotubes-de-carbone.html>
- [33] M. Naceri, M. Zidour, A. Semmah, S.A. Houari, A. Benzair, A. Tounsi, *Sound wave propagation in armchair single walled carbon nanotubes under thermal environment*, *J. Appl. Phys*, 2011, 110, 124- 322.

Références bibliographiques

[34] L. Boumia, M. Zidour, A. Benzair, A. Tounsi, *Timoshenko beam model for vibration analysis of chiral single-walled carbon nanotubes*, Physica E, 2014, 59, 186-191.

[35] W.X. Bao, Ch.Ch. Zhu, W.Zh. Cui, *Simulation of Young's modulus of single-walled carbon nanotubes by molecular dynamics*, Physica B, 2004, 352, 156-163.

[36] Z.C. Tu, Z.C. Ou-Yang, *Single-walled and multiwalled carbon nanotubes viewed as elastic tubes*

with the effective Young's modulus dependent on layer number, Phys. Rev. B, 2002, 65, 233407.

[37] S. Sharma, P. Kumar, A. Benzair, N. Kumar, *Molecular dynamics simulation of carbon nanotubes*, Nanomechanics Science and Technology, 2013, 04(01), 26.

