

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES



FACULTE DES SCIENCES EXACTES

DEPARTEMENT MATERIAUX ET DEVELOPPEMENT DURABLE

THESE DE DOCTORAT

Filière : Physiques

Spécialité : Physique Energétique et Sciences des Matériaux

Sujet de thèse

Etude des propriétés hygro-thermo-élastique des nanostructures à base de métal-céramique.

Présenté par : M^{elle} Matouk Hakima

Soutenu le 07/08/2021 devant le jury composé de :

Président :	BENZAIR Abdelnour	Professeur	UDL SIDI BEL ABBES
Directeur de thèse:	BOUSAHLA Anis Abdelmoumen	MC « A »	UDL SIDI BEL ABBES
CO- Directeur de thèse :	HIRECHE Houari	Professeur	UDL SIDI BEL ABBES
Examineur	CHIKH Abdelbaki	MC « A »	UNIVERSITE TIARET

Année universitaire 2020-2021

Dédicaces

À mon très cher père.

À ma mère,

À mon frère et ma soeur,

À que j'aime de tous mon cœur,

À tous ceux qui m'ont encouragé tout au long de ce travail.

Remerciements

Mes remerciements vont tout premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la puissance qu'il m'a donné durant toutes ces années d'études. Le présent travail a été effectué au sein du **Laboratoire des Modalisation et Simulation Multi-échelle**, de l'Université Djillali Liabès Sidi Bel Abbes.

Tout d'abord, je ne pourrais pas commencer les remerciements sans évoquer la personne qui m'a proposé le sujet de la thèse et qui m'a encadré tout au long de ces années Monsieur **Bousahla Abdelmoumen Anis**.

Je tiens aussi à remercier vivement Monsieur le Professeur **Heireche Houari** CO- Directeur de thèse pour son suivi et ses conseils.

J'exprime également toute ma reconnaissance à Monsieur les membres du jury qui ont accepté d'examiner ce travail en particuliers messieurs **BENZAIR. A** et **Chikh. A**

Je souhaite exprimer ma gratitude envers l'ensemble de mes collègues du Laboratoire **Des Matériaux et Hydrologie** de l'Université Djilali Liabès de Sidi-Bel-Abbès, avec qui les échanges scientifiques, techniques ou amicaux ont été très formateurs pour ma personnalité et leur contribution a apporté un soutien scientifique important à ce travail.

Et à tous ceux que ma réussite leur tient à cœur

ملخص

في هذه الأطروحة، سوف نتعامل مع السلوك في الاهتزاز الحر للعوارض النانوية المتدرجة وظيفيًا والمرتكزة على أساس مرن وتحت تأثير بيئة حرارية باستخدام نظرية الحزمة المتكاملة الجديدة لتيموشينكو. تناولنا في الفصل الأول الأعمال المنشورة سابقًا.

كما قمنا في الفصل الثاني والثالث بمراجعة ببليوغرافية حول الهياكل النانوية بشكل عام ودرسنا نظريات الحزم. وخصص الفصل الرابع لعرض النموذج النظري باقتراح نظرية جديدة. حساب التردد بلا أبعاد والتحقق العددي من المحاكاة المفصلة في الفصل الخامس.

يحتوي النموذج الرياضي المقترح لهذه الدراسة على ثلاثة متغيرات فقط ويتطلب إدخال عامل تصحيح القص لأن تباين إجهاد القص من خلال السماكة منتظم.

تختلف الخصائص الفعالة للعوارض النانوية وفقًا لقوانين القوة السينية والقوة المتمثلة. يتم النظر في المقياس النانوي باستخدام نظرية Eringen للمرونة غير محلية.

يتم تحديد معادلات الحركة لهذا النموذج وحلها على التوالي من خلال مبدأ هاملتون وحلول نافير. تم عرض توضيح

العديد من النتائج العددية من أجل إظهار دقة وكفاءة نظرية تيموشينكو المتكاملة.

يتم أيضًا فحص ومناقشة تأثيرات المعلمات المختلفة التي تؤثر على الاستجابات الاهتزازية للعوارض النانوية

P-FG و SS-FG بالتفصيل.

الكلمات المفتاحية: نانو شعاع FG، سلوك، نظرية شعاع تيمونيشكو المتكاملة، تأثير الهيدروحرارية.

Résumé

Dans cette thèse, nous allons traiter le comportement en vibration libre des nanopoutres fonctionnellement gradués reposant sur fondation élastique et sous l'effet d'un environnement hygrothermique à l'aide d'une nouvelle théorie des poutres intégrale de Timoshenko (ITBT). Au premier chapitre nous avons abordé les travaux précédemment publiés. Aussi dans le deuxième et troisième chapitre-t-on à fait une revue bibliographique sur les nanostructures en générale et étudier les théories des poutres.

Le quatrième chapitre consacré à la présentation du modèle théorique en proposant une nouvelle théorie, calcul de la fréquence adimensionnelle et la validation numérique de simulation détaillée au cinquième chapitre.

Le modèle mathématique proposé pour cette étude contient seulement trois variables et nécessite l'introduction du facteur de correction de cisaillement car la variation de la contrainte de cisaillement à travers l'épaisseur est uniforme. Les propriétés effectives des nanopoutres varient selon deux lois de puissance sigmoïde et symétrique. L'échelle nanométrique est considérée en utilisant la théorie d'élasticité non locale d'Eringen. Les équations de mouvement du présent modèle sont déterminées et résolues respectivement par le principe d'Hamilton et les solutions de Navier. Plusieurs résultats numériques sont présentés et illustres dans le but de démontrer la précision et l'efficacité de la théorie d'intégrale de Timoshenko. Les effets des différents paramètres influençant les réponses vibrationnelles des nanopoutres P-FG et SS-FG sont également examinées et discutées en détail.

Mot clés: Nanopoutre FG, comportement vibratoire, Théorie de Timoshenko Intégrale, L'effet hygro-thermiques.

Abstract

In this thesis, we will treat the behavior in free vibration of functionally graduated nanobeams resting on an elastic foundation and under the effect of a hygrothermal environment using a new integral beam theory of Timoshenko. In the first chapter we discussed the previously published works, Also in the second and third chapter we made a bibliographical review on nanostructures in general and study the theories of beams.

The fourth chapter devoted to the presentation of the theoretical model by proposing a new theory, calculation of the dimensionless frequency and the numerical validation of simulation detailed in the fifth chapter.

The mathematical model proposed for this study contains only three variables and requires the introduction of the shear correction factor because the variation of the shear stress through the thickness is uniform. The effective properties of nanobeams vary according to two sigmoid and symmetric power laws. The nanoscale is considered using Eringen theory of non-local elasticity. The equations of motion of the present model are determined and resolved via Hamilton principle and Navier method, respectively. Several numerical results are presented and illustrated in order to demonstrate the accuracy and efficiency of Timoshenko's integral theory. The effects of different parameters influencing the vibrational responses of P-FG and SS-FG nanobeams are also examined and discussed in detail.

Keywords: FG nano-beam, vibrational behavior, Integral Timoshenko beam theory, hygro-thermal effect.

Table des matières

ملخص	I
RESUME	II
ABSTRACT	III
LISTE DES TABLEAUX	IV
LISTE DES FIGURES	V
NOMENCLATURES	IX
Introduction Générale.....	1
<i>Chapitre I Revue de littérature</i>	
Revue de littérature.....	4
<i>Chapitre II Les nanostructures</i>	
II.1 Introduction.....	9
II.2 L'échelle nanométrique.....	9
II.3 Nano.....	10
II.4 Quelques termes liés au nano.....	10
II.4.1 Nanotechnologie.....	10
II.4.2 Les nanosciences.....	10
II.4.3 Nanostructure.....	11
II.4.4 Nanomatériaux.....	11
II.4.5 Les nanocomposites.....	12
II.4.5.1 Nanocomposites à matrice céramique.....	12
II.4.5.2 Nanocomposites à matrice métallique.....	12
II. 5 Des matériaux à l'échelle nanométrique.....	13
II.5.1 Nanotube.....	13
II.5.2 Nanocristal.....	13
II.5.3 Nanoparticule.....	14
II.5.4 Nanomachine.....	14
II.5.5 Nanopoutre.....	15
II.6 Fabrication des nanostructures.....	15

Table des matières

II.6.1 Procédés top down évoluant par réduction d'échelle ou la voie descendante	15
II.6.2 Procédés bottom-up ou la voie ascendante	16
II.6.3 Fabrication des nanostructures par la technique DE PHOTOLITHOGRAPHIE	16
II.6.4. La nanoimpression	18
II.6.5 Le nanomoulage	19
II.7 Les propriétés physiques et thermiques des nanostructures	20
II.8 Les domaines d'utilisation des nanostructures	21
II.8.1 Applications industrielles de la nanostructure	21
II.8.2 Applications énergétiques de la nanostructure	21
II.9 Les avantages et les inconvénients de la nanostructure ou nanotechnologie	22
II.9.1 Inconvénient	22
II.9.2 Avantage	22
II.10 Conclusion	23

Chapitre III Les structures FGMs

III.1 Introduction	25
III.2 Définition FGM	25
III.3 Méthode d'élaboration des FGMs	26
III.4 Domaines d'applications des FGMs	27
III.5 Méthodes d'homogénéisation des matériaux à gradient de propriétés	28
III.5.1 Propriétés matérielles de la poutre E-FGM	29
III.5.2 Propriétés matérielles de la poutre P-FGM	30
III.5.3 Propriétés matérielles de la poutre S-FGM	31
III.6 Les théorie des poutres pour les matériaux fonctionnellement graduée	32
III.7 Les modèles de la théorie des poutres	33
III.7.1 Le modèle classique de la poutre d'Eluer-Bernoulli (CBT)	33

Table des matières

III.7.2 Le modèle de Timoshenko(TBT) ou du premier ordre de la déformation de cisaillement (FSDT).....	34
III.7.3 Le modèle de poutre basé sur la théorie du troisième ordre de la déformation de cisaillement (TSDT).....	36
III.8 Théorie d'élasticité non locale.....	37
III.9 Différence entre la théorie locale et non locale d'élasticité.....	38
III.10 Conclusion.....	40

Chapitre IV Etude sur les vibrations hygro-thermiques des nanopoutres P-FG et S-FG en utilisant la théorie du Timoshenko Intégrale

IV.1 Introduction.....	41
IV.2 Formations Théoriques	41
IV.2.1 Modèles du nanopoutre FG.....	41
IV.2.1.1 La loi de puissance de nanopoutre FG (P-FG).....	42
IV.2.1.2 Nanopoutre FG symétrique sigmoïde (S-SFG nanopoutre)..	42
IV.2.2 La théorie de Timoshenko intégrale.....	44
IV.2.3 Principe d'Hamilton (HP)	45
IV.2.4 Elasticité non local d'une nanopoutre FGM	47
IV.3 Solution analytique	49
IV.4 Types de charge externes (charge hygro-thermique).....	50
IV.4.1 Modèle uniforme.....	50
IV.4.2 Modèle linéaire	50
IV.4.3 Modèle sigmoïdal.....	50
IV.5 Conclusion.....	51

Chapitre V Résultats numériques et discussion

V.1 Introduction	52
------------------------	----

Table des matières

V.2 Comparaison et validation.....	52
V.3 Etudes paramétriques.....	56
V.3.1 Nanopoutre S-FGsymétrique et P-FG sans fondation élastique.....	56
3.2 Nanopoutre symétrique S-FG et P-FG sur fondation élastique.....	59
V.4 Conclusion.....	66
Conclusion Générale.....	67
Références Bibliographiques.....	69

Nomenclatures

FGM	Functionally graded material (matériau fonctionnellement gradué)
E-FGM	FGM avec fonction exponentielle
P-FGM	FGM avec fonction polynomiale
S-FGM	FGM avec fonction symétrique
<i>CBT</i>	Classical beam theory
<i>TBT</i>	Timoshenko beam theory
<i>HSDT</i>	Higher order shear deformation beam theory
$E(z)$	Module de Young en fonction de « z »
E_m	Module de Young du métal
E_c	Module de Young de céramique
$G(z)$	Module de cisaillement en fonction de « z »
$\nu(z)$	Coefficient de Poisson en fonction de « z »
ν	Coefficient de Poisson
$\rho(z)$	La densité du matériau en fonction de « z »
ρ_m	La densité du métal
ρ_c	La densité du métal
$V(z)$	Fraction volumique
$\lambda(z), \mu(z)$	Coefficients de Lamé
k	Paramètre du matériau
L	Longueur de la poutre
b	Largeur de la poutre
h	Épaisseur de la poutre
u_0, w_0, θ	Les composantes du champ de déplacement sur le plan moyen de la poutre
u, w	Les déplacements dans les directions x

Nomenclatures

φ_x, φ_y	Les rotations autour des axes x et y
σ_x, σ_z	Contraintes normales
τ_{xz}, τ_{xy}	Contraintes de cisaillement
∂	Dérivée partielle
i, j, l, m	Sont des nombres naturels.
$\varepsilon_x, \varepsilon_z$	Déformation dans la direction x et z
γ_{xz}, γ_{xy}	Déformations de distorsion
$\partial u, \partial w$	Champ virtuel de déplacement
∂U	Variation de l'énergie de déformation
∂K	Variation de l'énergie potentielle
∂T	Variation de l'énergie cinétique.
$\partial \varepsilon_x, \partial \varepsilon_z$	Champ de déformation longitudinal virtuel
$\partial \gamma_{xz}, \partial \gamma_{yz}$	Champ de déformation transversal virtuel
N_x, N_y	Efforts normaux
A_{ij}	Termes de rigidité en membrane
B_{ij}	Termes de rigidité de couplage
D_{ij}	Termes de rigidité de flexion
A_{ij}^s	Termes de rigidité de la matrice de cisaillement
H_{ij}^s	Termes de rigidité de la matrice de cisaillement
N^T	La forces appliquée due au changent de la température

Nomenclatures

N^H La forces appliquée due au changent de la l'humidité

$\mu = (e_0 a)^2$ Paramètre de l'effet non-local

(I_i, J_i, k_i) Inerties de masse

$\{ \}$ Vecteur colonne

$[]$ Matrice

Liste des Tableaux

Chapitre III

Les structures FGMs

Tableau III.1: comparaison entre les propriétés de la céramique et du métal..25

Chapitre IV

Etude sur les vibrations hygro-thermiques des nanopoutres P-FG et S-FG en utilisant la théorie du Timoshenko Intégrale

Tableau IV.1: Propriétés des matériaux en fonction de la température des composants FGM (Ebrahimi and Salari, 2015).....44

Chapitre V

Résultats Numériques et Discussion

Tableau V. 1: Comparaison de la fréquence fondamentale " $\hat{\omega}$ " non dimensionnelle du nanopoutre P-FG simplement supporté sous élévation de température linéaire sans fondation élastique avec divers indices de gradient ($L = 20h$)53

Tableau V.2: Variation des fréquences fondamentales " $\hat{\omega}$ " non dimensionnelle du nanopoutre P-FG simplement supporté sous une charge hygro-thermique uniforme (UH-TL) pour diverses théories de poutre ($L = 20h$ et $K_w = K_s = 0$)54

Tableau V.3: Variation des fréquences fondamentales " $\hat{\omega}$ " non dimensionnelle du nanopoutre P-FG simplement supporté sous une charge hygro-thermique linéaire (LH-TL) pour diverses théories de poutre ($L = 20h$ et $K_w = K_s = 0$)55

Tableau V.4: Variation des fréquences fondamentales " $\hat{\omega}$ " non dimensionnelle du nanopoutre P-FG simplement supporté sous une charge hygro-thermique sinusoidal (SH-TL) pour diverses théories de poutre ($L = 20h$ et $K_w = K_s = 0$)56

Liste des figures

Chapitre II

Les nanostructures

<i>Figure II.1</i> : fibres d'une dimension de 100 nanomètres.....	10
<i>Figure II.2</i> : Nouveau design de nanostructure d'un bâtiment.....	11
<i>Figure II.3</i> : Des matériaux à l'échelle nanométrique.....	11
<i>Figure II.4</i> : Nanocomposites en polyéthylène pour isolations de câble électrique.....	12
<i>Figure II.5</i> : Une représentation graphique d'une structure nanométrique.....	13
<i>Figure II.6</i> : Exemples de quatre types de nanocristaux à forme contrôlée.....	14
<i>Figure II.7</i> : Vue en microscopie électronique en transmission de nanoparticules de silice mésoporeuse, avec des diamètres de 20 nm.....	14
<i>Figure II.8</i> : Géométrie du nanopoutre fonctionnellement gradée.....	15
<i>Figure II.9</i> : Méthodes de lithographie et de transfert.....	16
<i>Figure II.10</i> : Méthode de nanoimpression thermique et de transfert lift-off.....	17
<i>Figure II.11</i> : Méthodes de nanoimpression assistée par UV.....	18
<i>Figure II.12</i> : Schématisation d'un nanomoulage.....	19
<i>Figure II.13</i> : Applications industrielles de la nanostructure.....	22
<i>Figure II.14</i> : Applications énergétiques de la nanostructure.....	23

Chapitre III

Les structures FGMs

<i>Figure III.1</i> : la distribution composante des matériaux.....	26
<i>Figure III.2</i> : Méthode de fabrication de FGM [Pai 2004].....	27
<i>Figure III.3</i> : Les principaux domaines d'application des FGM.....	27
<i>Figure III.4</i> : Géométrie d'une poutre en FGM.....	28
<i>Figure III.5</i> : Distribution de module de Young à travers l'épaisseur d'E-FGMs.....	30
<i>Figure III.6</i> : Distribution de module de Young à travers l'épaisseur de P-FGMs.....	30
<i>Figure III.7</i> : Variation de la fraction volumique dans une poutre S-FGM.....	31
<i>Figure III.8</i> : Principe de modélisation des poutres.....	32
<i>Figure III.9</i> : Flexion d'une poutre d'Euler-Bernoulli (CBT).....	34
<i>Figure III.10</i> : Illustration élémentaire d'une poutre en fonction de deux théories des poutres.....	35
<i>Figure III.11</i> : Illustration d'une poutre d'ordre élevé (Reddy).....	36

Liste des figures

Chapitre IV Etude sur les vibrations hygro-thermiques des nanopoutres P-FG et S-FG en utilisant la théorie du Timoshenko Intégrale

- Figure IV.1 :** Géométrie des nanopoutres FG reposant sur une fondation élastique.....41
- Figure IV. 2 :** Variation de la fraction volumique de céramique sur le long de l'épaisseur du nanopoutre P-FG.....42
- Figure IV.3 :** Variation de la fraction volumique de céramique sur le long de l'épaisseur des nanopoutres S-FG.....43

Chapitre V Résultats Numériques et Discussion

- Figure V.1a :** effet de l'humidité " ΔC " et des paramètres non locaux sur la fréquence " $\hat{\omega}$ " adimensionnelle du nanopoutre Symétrique S-FG et P-FG sous diverses charges hygro-thermiques " $p = 0.1, L = 10 h$ et $\Delta T = 40 K$ "57
- Figure V.1b :** effet de l'humidité " ΔC " et des paramètres non locaux sur la fréquence " $\hat{\omega}$ " adimensionnelle du nanopoutre Symétrique S-FG et P-FG sous diverses charges hygro-thermiques " $p = 0.1, L = 10 h$ et $\Delta T = 40 K$ "58
- Figure V.2 :** effet de la concentration d'humidité " ΔC " sur la fréquence adimensionnelle " $\hat{\omega}$ " du nanopoutre Symétrique S-FG et P-FG par rapport à différentes augmentations de température " ΔT " avec " $p = 0.1$ et $L = 10 h$ "59
- Figure V.3 :** Influence des fondations élastiques sur la fréquence adimensionnelle du nanopoutre symétrique S-FG en fonction du changement de température pour les environnements thermiques " $\Delta C = 0$ " et hygro thermiques " $\Delta C = 1$ " avec " $p = 0.1, L = 10 h$ et $\mu = 1.5 nm$ "60
- Figure V.4 :** Influence de l'indice de puissance sur la fréquence adimensionnelle " $\hat{\omega}$ " du nanopoutre symétrique S-FG pour les environnements thermiques " $\Delta C = 0$ " et hygro-thermiques " $\Delta C = 1$ ", avec " $L = 10 h, \Delta T = 40 K$ et $\mu = 1.5 nm$ "61
- Figure V.5a :** L'effet du rapport d'élanement sur la fréquence adimensionnelle du nanopoutre symétrique S-FG sous l'augmentation d'humidité uniformes et linéaires " $p = 0.1, L = 10 h, \Delta T = 40 K$ et $\mu = 1.5 nm$ "62
- Figure V.5b :** L'effet du rapport d'élanement sur la fréquence adimensionnelle du nanopoutre P-FG sous l'augmentation d'humidité uniformes et linéaires " $p = 0.1, L = 10 h, \Delta T = 40 K$ et $\mu = 1.5 nm$ "63

Liste des figures

- Figure V.6a :** Influence des paramètres des fondations élastiques " K_w, K_s " sur la fréquence adimensionnelle " $\hat{\omega}$ " des nanopoutres symétrique S-FG sous l'augmentation d'humidité uniformes et linéaires " $p = 0.1, L = 10 h, \Delta T = 40K$ et $\mu = 1.5 nm$ "63
- Figure V.6b :** Influence des paramètres des fondations élastiques " K_w, K_s " sur la fréquence adimensionnelle " $\hat{\omega}$ " des nanopoutres symétrique S-FG sous l'augmentation d'humidité uniformes et linéaires " $p = 0.1, L = 10 h, \Delta T = 40K$ et $\mu = 1.5 nm$ "64
- Figure V.7:** Influence des fondations élastiques sur la fréquence adimensionnelle des nanopoutres P-FG en fonction du changement de température " ΔT " pour les environnements thermiques " $\Delta C = 0$ " avec " $p = 0.1, L = 10 h$ et $\mu = 1.5 nm$ "65

Introduction

générale

Introduction générale

Les nanostructures sont des modèles mécaniques à petite échelle utilisées largement ces dernières années par des nombreux chercheurs (Shodja et al. 2012, Sedighi 2014, Eltaher et al. 2016, Ebrahimi and Barati 2016a, Sedighi and Bozorgmehri 2016, Ebrahimi and Barati 2017a, Sedighi and Sheikhanzadeh 2017, Romano et al. 2017, Khanik 2018, Hamidi et al. 2018, Bensaid et al. 2018, Faleh et al. 2018, Bensattalah et al. 2018b and 2019, Eltaher et al. 2018b and 2019abc, Akbas 2018, Belmahi et al. 2018 et 2019, Aria et al. 2019, Mohamed et al. 2019, Barati et al. 2019, Hussain et Naeem 2019, Aria et Friswell 2019, Forsat et al. 2020). En raison de ces modèles des structures intéressantes, plusieurs recherches ont été menées sur l'étude des comportements de ces nanostructures réalisées à partir d'une nouvelle classe de matériaux tels que les matériaux fonctionnellement gradés (structures FGM) dont les propriétés des matériaux varient progressivement et continuellement dans une direction donnée. Par exemple, Rezaiee-Pajand et al 2018 étudié l'analyse statique des poutres sandwich non-prismatiques FG. La grande déformation des structures visco-hyper élastiques FG est examinée Pascon 2018. La solution analytique pour la réponse vibrationnelle des nanopoutres FG est développée par Ebrahimi et Daman (2017).

L'analyse statique et dynamique des nanopoutres FG poreux est étudiée par Eltaher et al. (2018b) en utilisant le méthode MEF (Méthode d'élément finis). Ebrahimi et Barati (2016b) examine l'effet de la charge externe sur le paramètre vibratoire des poutres FG non locale. Ces dernières, plusieurs scientifiques ont examine l'influence de l'environnement thermique et hygro- thermique sur le comportement vibrationnel des nanopoutres FG. Ebrahimi et Salari 2015 en utilisant la théorie de la poutre non locale de Timoshenko. Barati et Shahverdi (2016) analysé la vibration thermique des nanoplaques FG sous diverses charges thermiques non-uniformes. Sobhy (2017) utilisé le HSDT pour examiner le flambement et les vibrations hygro-thermo-mécanique des nanoplaques E-FG. Ebrahimi et Heidari (2018) examine l'effet de l'environnement thermo-humide sur les caractéristiques vibratoires des nanoplaques FG en utilisant la méthode (DQM). Récemment, nombreuses recherché qui se concentrent sur l'effet de l'environnement hygro-thermiques sont publiées comme (Shahsavari et al. 2018, Hajmohammad et al. 2018, Hosseini et al. 2018, Akbas 2019a).

Introduction générale

Dans ce travail de recherche, le comportement vibratoire hygro-thermiques des nanopoutres P-FG et symétriques S-FG simplement appuyés sur des fondations élastiques Winkler-Pasternak est étudié en utilisant l'élasticité non locale et la nouvelle théorie de Timoshenko Intégrale. Le modèle développé doit garantir les contraintes de cisaillement nul à la surface libre de la poutre. La solution analytique du comportement vibratoire est déterminée selon le principe de Hamilton et méthode de Navier. La précision du modèle actuel est vérifiée en comparant les résultats obtenus avec ceux trouvés dans la littérature.

Ce travail de thèse s'articule autour de cinq chapitres. Dans la première partie de la thèse, on à présentée une revue des récents travaux scientifiques portant sur les macro/nanostructures en matériaux à gradient de propriétés en mettant l'accent sur les travaux publiés récemment.

Le deuxième chapitre est consacré à présenter les nanostructures en générale en parlant de tout ce qui concerne le nano, nanotechnologie, nanomatériaux, nanopoutre., et en suite la méthode de fabrication les propriétés thermo-physiques, les domaines d'utilisations et les avantages et les inconvénients de la nanostructure

Le troisième chapitre une présentation détaillée des matériaux à gradient de propriétés (FGM), leurs propriétés, leur définition et développement, méthodes de fabrication, ainsi que leurs principaux domaines d'application et la méthodes d'homogénéisation, avec une rappelle sur les théories des poutres (d'Eluer-Bernoulli, premier ordre de la déformation de cisaillement, et la théorie du troisième ordre de la déformation de cisaillement), utilisés pour l'analyse du comportement dynamique et vibratoire des structures en FGMs. Dans ce chapitre, nous discutons ensuite sur la théorie d'élasticité non locale et leur modèle.

Le quatrième chapitre la mise en œuvre du modèle basé sur une formulation intégrale de Timoshenko pour l'étude de l'influence du chargement combiné de l'humidité et de la température sur la vibration des nanopoutres en matériaux à gradient de propriétés reposant sur des fondations élastiques (Winkler-Pasternak).

La validation du modèle proposé d'après quelques tests standards de travaille précédant et de présenter les résultats de simulation numérique de l'analyse du comportement de la vibration libre des nanopoutres P-FG et S-FG symétrique est étudié en utilisant une théorie des poutres de déformation de cisaillement non locale intégrale avec un chargement hygro-thermique, étudié en profondeur dans le chapitre cinq.

Introduction générale

Une conclusion générale des perspectives personnelles sur les orientations des recherches futures de cette nouvelle classe de matériaux nanostructures. C'est aussi l'occasion d'évoquer diverses perspectives dans le cadre de l'étude des effets des différents types de chargement sur le comportement dynamique des structures en matériaux à gradient de propriétés (FGM) sous un chargement hygro-thermo-élastique. (Charge uniforme, Linéaire et sinusoïdal).

Chapitre I

Revue de littérature

Revue de littérature

Les chercheurs sont en compétition depuis plus de vingt-ans pour développer les nanostructures David. K. Ferry et al. (1997), Nathaniel L.R et Chad A. M. (2005), Delevue.C et al. (2004), Loucas T sakalagos. 2008, Houari Heireche et al. (2010), Abdelouahed Tounsi et al. (2013), Behrouz.K et al. (2018) dans divers domaines tels que le génie civil, la physique et les énergies, une enquête sur les caractéristiques thermiques des nanotubes de carbone à paroi unique du fauteuil intégré dans un milieu élastique basé sur l'élasticité du continuum non local Adda Bedia, W., et al. (2015), étude des propriétés physiques des matériaux à nanostructure examinée par ZAHZOUH.T, et al. (2016). Que ce soit pour améliorer les performances de leurs produits ou élargir le champ de la connaissance, Hamed Esmaili et al. (2020) faire un bref examen sur importance des morphologies des nanostructures cette revue vise à fournir des informations générales sur les avantages et les inconvénients de la morphologie des nanostructures pour aider les lecteurs à créer des nouvelles idées et à innover dans ce domaine, une étude de la dynamique moléculaire des processus de transfert de chaleur bouillante à l'échelle nanométrique sur les surfaces nanostructures publier par Nesrine Ben Saber et al. (2020).

Les nanostructures a ajouté des grandes facilités pour trouver des solutions aux calculs et aux problèmes des structures à grande échelle à plusieurs niveaux, comme l'aérospatial et l'ingénierie avec toutes ses spécialisations, une étude de comportement de flambage thermique des nanopoutres à l'aide d'une théorie efficace des poutres non locaux de premier ordre fais par Tounsi. A, et al. (2013 C), propagation des ondes sonores dans des nanotubes de carbone à paroi unique utilisant une élasticité non locale est étudiée par Heireche. H, et al. (2008).

Une vaste série des nanostructures et des nanocomposites sont fabriqués et facilement accessibles à utiliser, Li X, Bhushan et al. (2003) à donnée l'aide techniques de nanoindentation de Caractérisation mécanique des structures micro/nanométriques pour les applications MEMS/NEMS. Pour accomplir la conception des nanocomposites en (1992) Sridhar Komarneni défini l'utilisation des nanocomposites dans le traitement des matériaux devrait avoir un impact majeur dans les matériaux catalytiques, capteurs, optiques, électrocéramiques et céramiques structurelles, un article fournit par Younan Xia et al., sur les nanostructures unidimensionnelles leurs synthèse, caractérisation et applications en (2003).

Les matériaux à gradient de propriétés (FGMs) sont des matériaux composites formés de deux ou plusieurs phases constitutives avec une composition variable et continue dans l'espace Koizumi M (1993). Le matériau à classification fonctionnelle (FGM) appartient à une classe des matériaux avancés caractérisés par des variations des propriétés lorsque la dimension varie, publiée par Mahamood. R. M, et al. (2012). Un examen critique fait par Shailendra Kumar Bohidar, et al, (2014) sur les matériaux fonctionnellement classés, les FGMs ont été initialement conçus comme matériaux de barrière thermique pour les applications structurelles aérospatiales et les réacteurs à fusion.

Cette étude présente un aperçu sur FGM, diverses méthodes de fabrication ont été mises en évidence, Fumio Watari, et al, ils étudient la fabrication et les propriétés d'implants dentaires fonctionnels. (1997), offrant le meilleur avantage sur d'autres processus en raison de la flexibilité de fabrication qu'il offre. Les chercheurs dans divers domaines étaient nombreux et se sont concentrés sur l'utilisation des FGMs comme matériau de base, par exemple Tounsi et ses collègues ont étudié une théorie trigonométrique raffinée de déformation de cisaillement pour la flexion thermoélastique des plaques de sandwich fonctionnellement classées en (2013). Flambage des poutres de Timochenko composées des matériaux bidimensionnels de qualité fonctionnelle (FGM 2D) ayant des conditions limites différentes publiée par Mesut Şimşek, (2016), Cette approche utilisé ces dernières années par des nombreux chercheurs (K.Y.Dai et al. (2005), Darilmaz, Kutlu (2014), **Bousahla. A. A et al. (2016)**, Mouffoki, Abderrahmane et al. (2017), Bourada, Fouad et al. (2019).

La conception des structures repose essentiellement sur les théories des poutres d'Euler-Bernoulli, et théorie de Timoshenko. Yebari. N et Elkhattat, à ont étudiés une équation des poutres d'Euler-Bernoulli en (2003), Les analyses du comportement des poutres fonctionnellement graduées (FGMs) à l'aide du modèle des poutres classique d'Euler-Bernoulli (CBT) ont été étudiées par He et al. (2001). Et en (2009), les propriétés de base de riesz et la stabilisation exponentielle pour une équation des poutres d'Euler-Bernoulli à coefficients variables et étudiée par Aouragh. M.D et Yebari. N, GOH ABRO. A. P et al. (2020), Sophy Chhang, (2019), Yacine Karimi et al. (2020), Les études sur le modèle de théorie de Timoshenko peuvent être trouvées dans Timoshenko. S et Woinowsky- Krieger. S en (1959). Théorie des plaques et des coquilles, Reddy. J (1997), Miara et Podio-Guidugli (2006), et puisque les théories les plus utilisées sont celles d'Euler-Bernoulli et de

Timochenko. Gustavo. G. C et Caleb. E. P. G, faire une analyse comparative entre la théorie d'Euler-Bernoulli et Timoshenko par la méthode des différences finies en (2018).

Pour éviter l'utilisation d'un facteur de correction de cisaillement, des nombreuses théories de déformation de cisaillement d'ordre élevé ont été proposées (TSDT), notamment la théorie parabolique de déformation (PSDBT) de Reddy (Reddy 1984), la théorie des poutres de déformation trigonométrique. (TSDBT) de Touratier (1991), la théorie des poutres de déformation de cisaillement hyperbolique (HSDBT) de Soldatos (1992), la théorie des poutres de déformation de cisaillement exponentiel (ESDBT) de Karama et al. (2003). Un modèle des poutres basé sur la théorie du troisième ordre de la déformation de cisaillement (TSDT), en (2019) Arshid Ehsan et al, ont étudiée l'effet de la porosité sur la vibration libre des plaques circulaires SPFG reposant sur des fondations élastiques visco-Pasternak basées sur le CPT, le FSDT et le TSDT, et autre littérature sont travaillé dans sont domaine (Tan-Van-Vu et al. (2018), Pham Hong Cong et al. (2016 et 2018), C.C. Hong en (2020)).

Nouvellement, des intérêts considérables ont été consacrés aux travaux expérimentaux et théoriques de la réponse hygrothermique des structures graduées. Lee et Kim (2013) ont étudié le comportement thermique post-flambement des plaques FGM en tenant compte de l'effet hygrothermique ainsi que l'effet d'humidité basés sur la théorie des plaques de déformation de cisaillement du premier ordre. Akbar Zadeh et Chen (2013) ont présenté une solution analytique pour les contraintes hygrothermiques dans un milieu piézoélectrique à gradient fonctionnel unidimensionnel soumis à un champ magnétique constant et reposant sur une fondation élastique de type Winkler. Zidi et al. (2014) ont étudié l'analyse de la flexion des plaques FGMs sous chargement hygro-thermomécanique à l'aide d'une théorie des plaques raffinée à quatre variables. Ebrahimi et Barati (2016a) ont étudié l'influence des environnements sur la vibration d'amortissement des nanopoutres FGM basée sur la théorie d'élasticité du gradient de contrainte non local. Sobhy (2016) a proposé une approche analytique pour illustrer la vibration hygrothermique et le flambement des plaques sandwichent FGM reposant sur des fondations élastiques Winkler-Pasternak en utilisant une nouvelle théorie précise des plaques de déformation de cisaillement à quatre variables.

Aussi, depuis peu de temps, Laoufi et al. (2016) ont présenté une méthode analytique pour déterminer la déflexion et la distribution des contraintes dans des plaques fonctionnellement graduée soumises à une charge mécanique, à des champs de température et d'humidité. Plus récemment, Beldjelili et al. (2016) ont étudié le comportement de la flexion d'une plaque en

matériau à gradient fonctionnel sigmoïde (S-FGM) reposant sur des fondations élastiques variables à deux paramètres en tenant compte de l'hypothèse hygro-thermo-mécanique basée sur une théorie des plaques raffinée à quatre variables.

Sur la base de la théorie de l'élasticité non-locale, un certain nombre des travaux ont été publiés dans les dernières années, Awda Chemi et al. (2015), Mohamed Zidour et al. (2016), Ahmed Dihaj et al. (2018), Mohammad Zamani Nejad et al. (2018). en essayant de développer des modèles des plaques non locaux et les appliquer pour les réponses des nanoplaques en flexion, dans son point de vue, Eringen A.C., discute des rapports théorie de l'élasticité non locale et quelques applications Res Mechanica, (1987).

La théorie non locale a été développée par plusieurs auteurs Peddieson et al. (2003) et Sudak, (2003). Peddieson et al. (2003), comme une réponse à l'incapacité de l'élasticité locale pour gérer les problèmes élastiques avec des singularités géométriques pointues (la propagation des ondes sonores dans les nanotubes en carbone simple et double paroi en tenant compte de l'effet non local ainsi que la température et la contrainte axiale initiale.

Il y'a plusieurs modèles d'élasticité non-locale des poutres, Nguyen et al. (2014) ont présenté des solutions analytiques du modèle EBT non local pour l'analyse de la flexion statique des poutres FGMs avec diverses conditions aux limites. Niknam et Aghdam, (2014) ont dérivé des solutions du modèle EBT non local pour les fréquences naturelles et les charges critiques de flambement des nanopoutres FGMs reposant sur une fondation élastique. Ebrahimi et Salari, (2015) ont étudié l'effet thermique sur la vibration libre des nanopoutres FGMs sous divers BCs en utilisant une approche semi-analytique. Ce dernier a été développé par Wang Q, (2005) pour étudier la propagation des ondes dans les CNTs.

Un grand nombre d'articles publiés dans la littérature ont tenté d'étudier le modèle d'élasticité non-locale des poutres basée sur la théorie de TBT, en (2018) Fils Thaï et al, ont tenté d'étudier les effets de taille sur le comportement des nanofibres conformément à diverses théories des poutres telles que la théorie des poutres d'Euler-Bernoulli (EBT), la théorie des poutres de Timochenko (TBT) et les théories de poutres de déformation du cisaillement de ordre élevé.

Le comportement structurel dépendant de la taille des nanopoutres élastiques infléchis de Timochenko est étudié par la mécanique non locale de continuum, Raffaele Barretta et al. (2018).

Le modèle d'élasticité non-locale des poutres basée sur HSDTs, Menasria Abderrahmane et al. (2017), Fahsi Asmaa et al. (2017), Bouhadra Abdelhakim et al. (2018), Belabed Zakaria et al. (2018), A.Zarei et A.Khosravifard en (2020), Pour contourner les limites du CPT et du FSDT, diverses théories de déformation du cisaillement de l'ordre supérieur(HSDTs) ont été établies au cours des deux dernières décennies en assumant des variations non ligneux le long de la coordonnée d'épaisseur, Ankit Gupta et Mohammad Talha en (2017). Des propagations d'onde dans les plaques sigmoïde fonctionnellement classées (S-FG) sont étudiées utilisant la nouvelle théorie supérieure de déformation de cisaillement (HSDT) basée sur la théorie bidimensionnelle (2D) d'élasticité ,Belaid Batou et al. (2019), pour étudier la flexion statique, la vibration libre, et les comportements de flambage des plaques fonctionnellement classées, Liu Shuo et son collègue utilisé une nouvelle théorie simple de déformation hyperbolique de cisaillement quasi-3D (S-Q3HSDT) en (2017). Pour mieux prédire le comportement des plaques, des théories de déformation de cisaillement d'ordre supérieur (HSDTs) ont été proposées pour surmonter l'inconvénient du CPT et de la FSDT, Tuan N. Nguyen Nguyen et al. (2017).

Dans les chapitres suivante on à faire un état de l'art plus détaillées sur ces à propos de la recherche et des théories et leurs applications numériques.

Chapitre II

Les Nanostructures

II.1 Introduction

La « nanoscience » est l'étude des phénomènes et la manipulation des matériaux aux échelles atomique, moléculaire et macromoléculaire, où les propriétés diffèrent significativement de celles à plus grande échelle, alors que les « nanotechnologies » regroupent tout ce qui touche à la conception, la caractérisation, la production et l'application de structures, dispositifs et systèmes par contrôle de la forme et de la taille à l'échelle nanométrique . Les nanotechnologies relèvent de la recherche appliquée. Les applications concernées présentent un potentiel économique important dans de nombreux domaines tels que la médecine, la chimie, l'énergie, l'économie des ressources ou encore l'environnement.

De nombreux termes ont vu le jour pour désigner les objets nanométriques comme par exemple « nanoparticules », « nanotubes », « nanopoutre », et bien d'autres encore. Malgré leur similitude apparente, ils couvrent des concepts bien précis et différents les uns des autres. Avant d'entamer l'exposé des différentes techniques de caractérisation, il importe de préciser la signification exacte de ces termes.

Dans ce chapitre en va présentée la diversité des termes associés à «nano» et l'utilisation de nanostructure dans des contextes spécifiques, il est important de savoir ce qu'est «nano». Quelques exemples sont considérés pour clarifier le point.

II.2 L'échelle nanométrique

Échelle de mesure qui regroupe les longueurs inférieures au micromètre comprises entre 1 et 100 nanomètres, et qui est utilisée pour calculer les dimensions de structures extrêmement petites qu'on trouve au niveau moléculaire. Pour comprendre la matière à l'échelle nanométrique, il est nécessaire de pouvoir l'observer et la manipuler. Les microscopies en champ proche sont deux des outils qui permettent d'observer la matière à l'échelle atomique et, sous certaines conditions, de la déplacer, atome par atome.

Le mouvement d'une particule de taille nanométrique est très différent du mouvement d'une particule de grosse taille. Dans un cristal, les atomes, liés les uns aux autres, sont ainsi en vibration constante, la fréquence et l'amplitude de la vibration déterminant des caractéristiques importantes comme la conductivité électrique ou l'absorption de la lumière.

Les assemblages d'atomes à l'échelle nanométrique font ainsi apparaître des propriétés nouvelles et inattendues, très souvent totalement différentes de celles des mêmes atomes

assemblés dans des matériaux à l'échelle macroscopique, notamment pour la résistance mécanique, la réactivité chimique, la conductivité électrique, la conductibilité thermique, la fluorescence...

Du fait de leurs propriétés variées et souvent inédites, les nanomatériaux recèlent de potentialités d'applications très diverses et leurs utilisations ouvrent donc de multiples perspectives. La structuration des matériaux à l'échelle nanométrique, et les propriétés nouvelles qui en découlent, permet de concilier des propriétés jusqu'ici impossibles à obtenir simultanément dans un même matériau, comme par exemple la flexibilité et la résistance.

II.3 Nano

Nano est juste un préfixe pour définir un facteur de 10^{-9} m. Les nano-objets (particules, fibres, feuillets, tubes,...) sont des objets dont au moins une dimension est inférieure à 100 nanomètres. Le nombre de dimension nanométrique est de trois pour les nanoparticules ou agrégats, deux pour les nanotubes ou nano-fils, une pour les nano-feuillets ou matériaux à deux dimensions (2D).

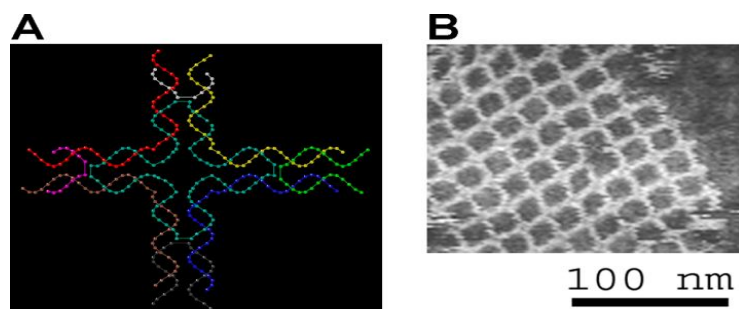


Figure II.1 : Fibres d'une dimension de 100 nanomètres. (U. Dawid et al, 2017)

II.4 Quelques termes liés au nano

II.5.1 Nanotechnologie

Le terme de nanotechnologie est un nom générique qui regroupe une multitude de disciplines et d'applications sans réelle cohérence ou connexion (les nanoélectronique, les nanomatériaux, les nanocristaux, et les nanoparticules etc.).

C'est la manipulation de la matière à l'échelle atomique, moléculaire et supramoléculaire. La description la plus ancienne et la plus répandue de la nanotechnologie faisait référence à

l'objectif technologique particulier consistant à manipuler avec précision les atomes et les molécules pour la fabrication de produit à l'échelle macroscopique. (Drexler, K. Eric, 1986)

Les innovations techniques grâce aux nanotechnologies reposent largement sur l'amélioration des propriétés des matériaux. Elles concernent donc tous les secteurs industriels, des plus sophistiqués (électronique, santé, espace) aux plus traditionnels (construction, mécanique).

II.5.2 Les nanosciences

Représentent certainement le développement le plus prometteur des sciences de la matière. Dans ce domaine, l'un des enjeux majeurs sera le contrôle total des propriétés physiques, chimiques et mécaniques des matériaux, obtenu par des voies impliquant l'échelon élémentaire atomique ou moléculaire. (U. Dawid et al, 2017)

II.5.3 Les nanostructures

Une nanostructure est une structure de taille intermédiaire entre les structures microscopiques et moléculaires. Le détail nanostructural est une microstructure à l'échelle nanométrique.

(Nanoparticules, nanopoutre, et nanotubes) Ensemble d'atomes dont l'une des dimensions est comprise entre 0,1 et 100 nanomètres, c'est-à-dire comprise entre une taille moléculaire et microscopique. Un nanomètre est un milliard de fois plus petit que le mètre. Les propriétés des objets à l'échelle nanométrique et des ensembles de ces objets sont largement étudiées en physique. (U. Dawid et al, 2017)

Toutes les familles de matériaux sont ainsi concernées : les métaux, les oxydes métalliques et les céramiques, les polymères, les matériaux carbonés, etc... Ces matériaux originaux par leur structuration et leurs propriétés sont désignés sous le nom de nanomatériaux.

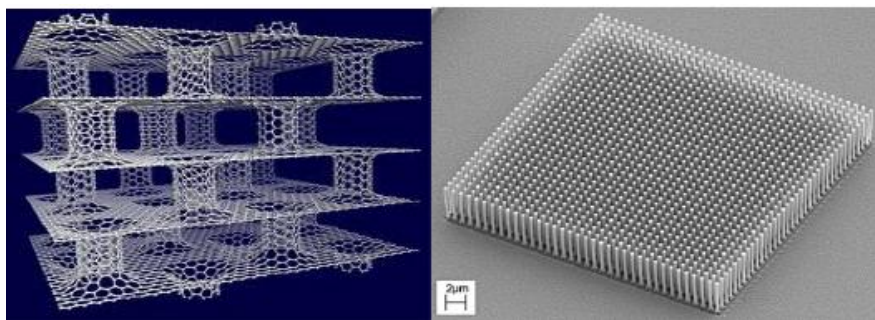


Figure II.2 : Nouveau design de nanostructure d'un bâtiment. (U. Dawid et al, 2017)

II.5.4 Les nanomatériaux

Un nanomatériau est un matériau ayant une dimension externe à l'échelle nanométrique ou ayant une structure interne ou une structure de surface à l'échelle nanométrique.

Les nanomatériaux sont des capteurs chimiques et biologiques extrêmement sensibles.

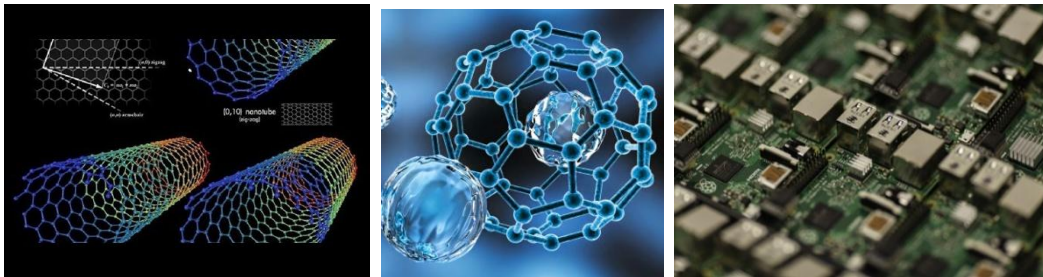


Figure II.3 : Des matériaux à l'échelle nanométrique. (U. Dawid et al, 2017)

Les développements des nanomatériaux visent de nombreux objectifs: l'amélioration des performances, la réduction des pollutions, les économies d'énergie, les économies et la préservation des ressources naturelles.

II.5.5 Les nanocomposites

Un nanocomposite est un matériau solide multiphasé dont une des phases a au moins une dimension inférieure à 100 nanomètres. Un nanocomposite est généralement constitué de deux ou plusieurs matériaux constitutifs ayant des propriétés physiques ou chimiques sensiblement différentes.

L'idée derrière nanocomposites est d'utiliser des blocs de construction avec des dimensions de l'ordre du nanomètre pour concevoir et créer de nouveaux matériaux avec une flexibilité et une amélioration sans précédent de leurs propriétés physiques. (Satir. Peter et al, 2008)

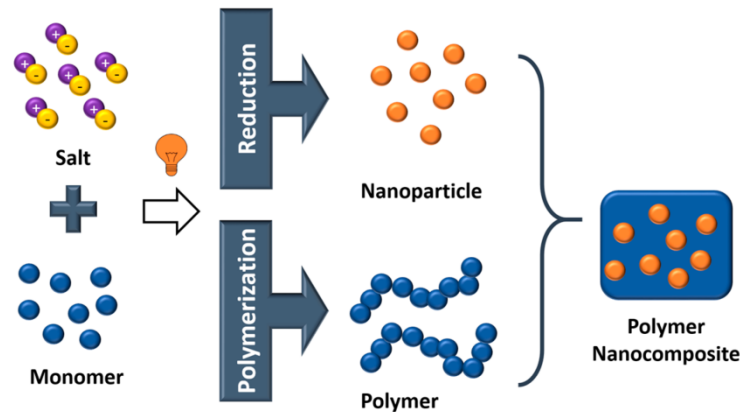


Figure II.4 : Nanocomposites en polyéthylène pour isolations de câble électrique.

(Satir. Peter et al, 2008)

II.4.5.1 Nanocomposites à matrice céramique

Les nanocomposites à matrice céramique (CMC) sont constitués des fibres céramiques noyées dans une matrice céramique. La matrice et les fibres peuvent être constituées de tout matériau céramique, y compris le carbone. La céramique occupant la majeure partie du volume est souvent du groupe des oxydes, tels que les nitrures, les borures, les siliciures, alors que le second composant est souvent un métal (Janas. U et al, 2017).

II.4.5.2 Nanocomposites à matrice métallique

Les nanocomposites à matrice métallique peuvent également être définis comme des composites à matrice métallique renforcée. Ce type de composites peut être classé comme matériaux renforcés continus et non continus.

Idéalement, les deux composants sont finement dispersés l'un dans l'autre afin d'obtenir des propriétés optiques, électriques et magnétiques (F. E. Kruis et al, 1998). Ainsi que des propriétés tribologiques, de résistance à la corrosion et autres propriétés de protection (Babonneau. D et al, 2017).

II.5 Des matériaux à l'échelle nanométrique

II.5.1 Nanotube

Les nanotubes sont des tubes en carbone (CNTs) avec des diamètres généralement mesurés en nanomètres. Les nanotubes de carbone font souvent référence aux nanotubes de carbone à paroi unique (SWCNT) avec des diamètres de l'ordre du nanomètre.

Les nanotubes de carbone font à parois multiples (MWCNT) constitués de nanotubes de carbone à paroi unique imbriqués (TEDX. H, 2011) faiblement liés par des interactions de van der Waals dans une structure en forme d'anneau d'arbre.

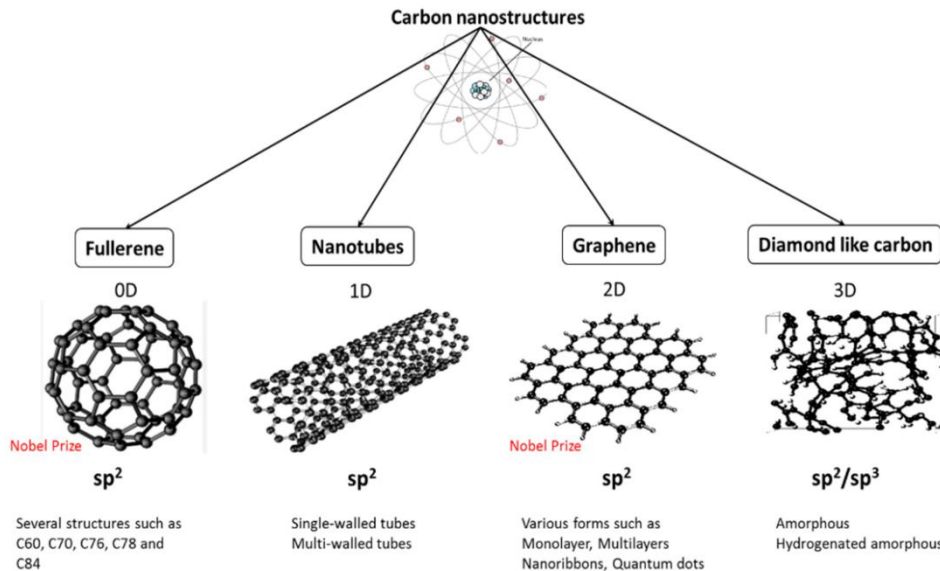


Figure II. 5 : Une représentation graphique d'une structure nanométrique. (TEDX. H, 2011)

II.5.2 Nanocrystal

Les définitions varient, mais un matériau nanocristallin est généralement défini comme une taille de cristallite (grain) inférieure à 100 nm.

Un matériau nanocristallin (NC) est un matériau polycristallin avec une taille de cristallite de seulement quelques nanomètres.

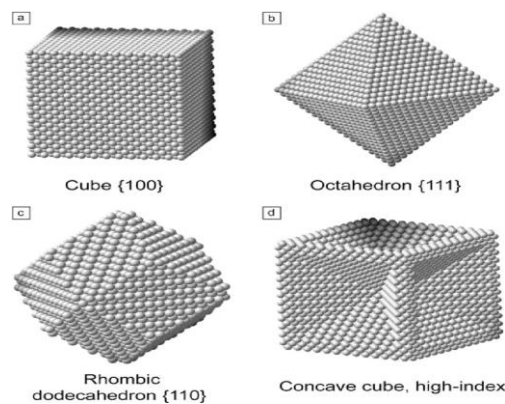


Figure II.6 : Exemples de quatre types de nanocristaux à forme contrôlée.

(U. Dawid et al, 2017)

II.5.3 Nanoparticule

Dans un autre domaine, des nanoparticules déposées sur des supports solides vont permettre d'augmenter la vitesse de réactions chimiques, et de les rendre plus sélectives, contribuant à améliorer les rendements réactionnels et à favoriser ainsi des économies sur les ressources énergétiques et sur les matières premières, tout en diminuant la production de déchets.

Les nanoparticules sont des particules aux dimensions de l'ordre du nanomètre ou au dessous, étudiées et manipulées par les nanosciences et les nanotechnologies. Le préfixe « nano » se réfère au nanomètre ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), Lorsque les particules ont des dimensions de l'ordre du nanomètre ou au-dessus, on les appelle nanoparticules.

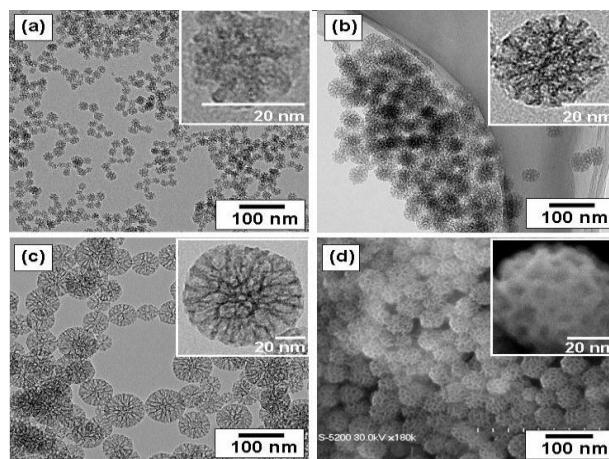


Figure II.7 : Vue en microscopie électronique en transmission de nanoparticules de silice mésoporeuse, avec des diamètres de 20 nm. (U. Dawid et al, 2017)

II.5.4 Nanomachine

Est un composant moléculaire qui produit des mouvements quasi mécaniques (sortie) en réponse à des stimuli spécifiques. (Kamigaito. O, 1991)

Le terme est également courant dans la nanotechnologie où un certain nombre de machines moléculaires très complexes ont été proposées qui visent à construire un assembleur moléculaire. (Drexler. K. E, 1991)

Au cours des dernières décennies, chimistes et physiciens ont tenté, avec plus ou moins de succès, de miniaturiser les machines trouvées dans le monde macroscopique.

II.5.5 Nanopoutre

Le terme de **poutre** désigne un élément de structure dont la longueur est grande par rapport aux dimensions transverses.

Plus précisément, cette équivalence ‘high tech’ est composée d’une poutre de quelques nanomètres de long servant de résonateur.

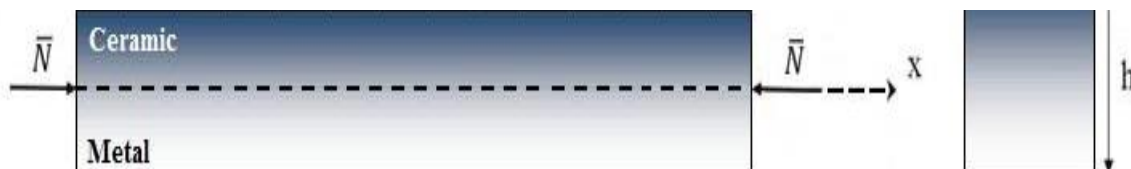


Figure II. 8 : Géométrie des nanopoutres fonctionnellement gradée.

(U. Dawid et al, 2017)

II.6 Fabrication des nanostructures

La naissance spontanée de formes dans la nature est une voie prometteuse dans la fabrication des nanostructures pour les technologies du futur amenées à être utilisées dans des domaines aussi variés que les lasers, les nouvelles technologies de l’information et de la communication, la biodétection, les ordinateurs quantiques...

Pour ce faire, on doit comprendre cette nature pour la mettre dans les conditions nécessaires afin qu’elle produise spontanément les architectures, ou moules, nanométriques souhaitées. Depuis les années 1970, la course vers la miniaturisation a été menée selon deux approches complémentaires :

La procédure qui correspond à une modification de ces techniques avec réduction d’échelle, est dite **top-down**. En dessous d’une certaine taille la procédure ne peut plus être poursuivie il faut alors suivre un autre chemin, dit **bottom-up**, où l’on construit les objets par dépôt et assemblage organisé d’atomes ou d’agrégats.

II.6.1 Procédés top down évoluant par réduction d’échelle ou la voie descendante

Elle consiste à miniaturiser les dispositifs jusqu’à atteindre l’échelle nanométrique. La voie descendante joue un rôle de plus en plus important pour la réalisation d’autres types de composants utilisés dans la télécommunication, la microrobotique, la chimie, la biologie et la recherche biomédicale.

Aujourd'hui, certains microcomposants et microsystèmes voient progressivement leurs dimensions diminuer et se rapprocher de l'échelle du nanomètre suivant la voie descendante devenant ainsi des nanocomposants et des nanosystèmes.

II.6.2 Procédés bottom-up ou la voie ascendante

Elle vise à concevoir des nanosystèmes en assemblant des éléments de base de la matière : atomes, groupes d'atomes ou de molécules. Cette approche a donné naissance au concept d'électronique moléculaire, dont le but ultime est de réaliser des composants ne comportant qu'une seule molécule.

Parallèlement, les scientifiques réfléchissent à la mise au point de nouvelles méthodes d'assemblage atome par atome, molécule par molécule, qui ouvrent la voie à la démarche ascendante.

La course à la miniaturisation des dispositifs électroniques est lancée depuis quelques temps. Dans un avenir proche, les limites des technologies actuellement employées pour la fabrication de circuits intégrés par lithographie conventionnelle seront atteintes.

II.6.3 Fabrication des nanostructures par la technique DE PHOTOLITHOGRAPHIE

À ce jour, l'industrie de la microélectronique utilise la **photolithographie par projection** pour produire des circuits intégrés de haute densité (la figure 8). (U. Dawid, 2017)

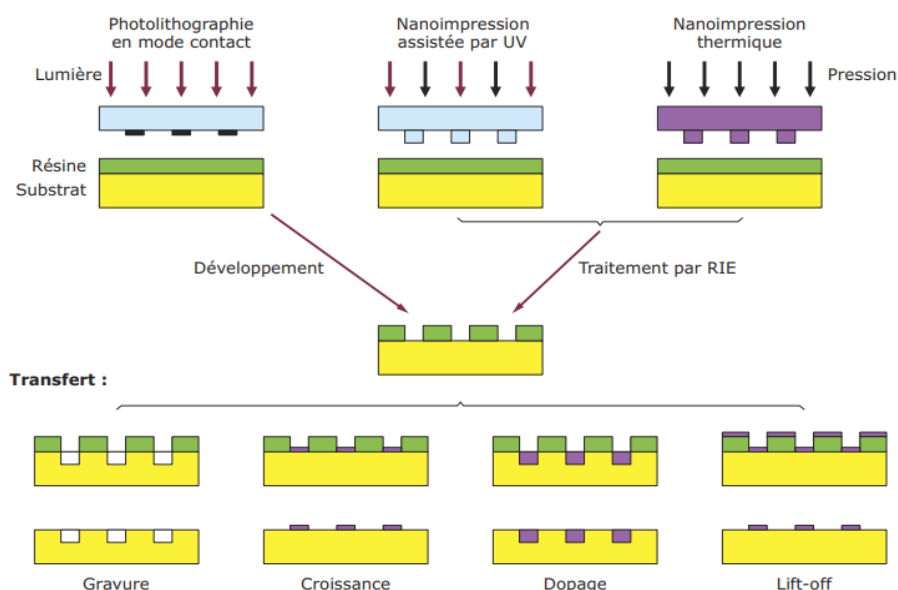


Figure II.9 : Méthodes de lithographie et de transfert. (U. Dawid et al, 2017)

Dans les laboratoires de recherche, l'utilisation de la **photolithographie par contact est plus courante** : on dépose d'abord une fine couche de résine photosensible sur un substrat que l'on

insole ensuite par un rayonnement ultraviolet (UV) à travers un masque optique sur lequel est dessiné le circuit que l'on souhaite graver.

On révèle alors les motifs dans une solution chimique, ce qui résulte en une reproduction des motifs du masque en négatif ou en positif selon le type de résine utilisé. Cette couche de résine sert alors de masque protecteur pour le micro-usinage du substrat via une attaque chimique ou une attaque par ions réactifs.

Il ne reste ensuite qu'à nettoyer la plaquette pour enlever la résine résiduelle. Pour réaliser un circuit intégré, un tel procédé doit être répété de nombreuses fois, avec une haute précision d'alignement entre chaque niveau.

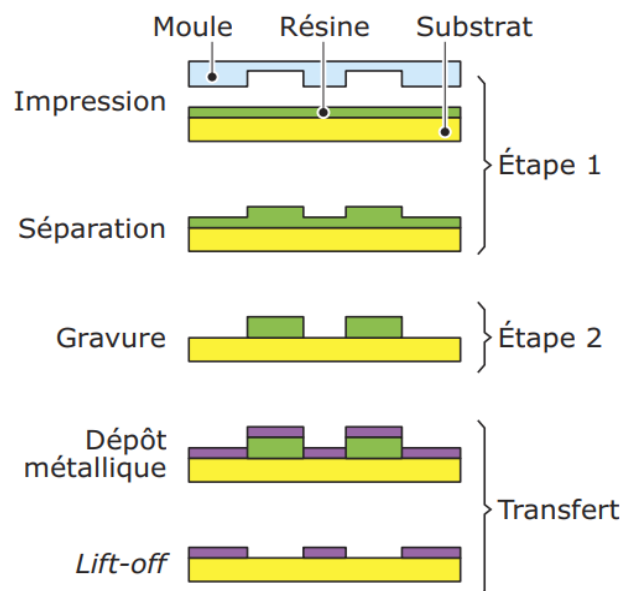


Figure II.10: Méthode de nanoimpression thermique et de transfert lift-off.

(U. Dawid et al, 2017)

II.6.4 La nanoimpression

(Nanoimpression thermique, Nanoimpression assistée par UV) : est une alternative à la photolithographie, elle a rapidement suscité un intérêt croissant grâce à son pouvoir de très grande résolution et de production en masse à faible coût.

L'idée de base de cette technique est simplement d'imprimer les motifs en relief d'un moule (template) sur une couche fine de polymère déposée sur un substrat.

Une fois la couche de polymère structurée, l'échantillon est traité dans une enceinte de plasma afin de rendre convenable, le profil final des motifs imprimés.

Soulignons que, si l'étape de fabrication du moule nécessite l'emploi d'une technique conventionnelle coûteuse de lithographie haute résolution, ce moule peut ensuite être utilisé un très grand nombre de fois pour des répliques successives.

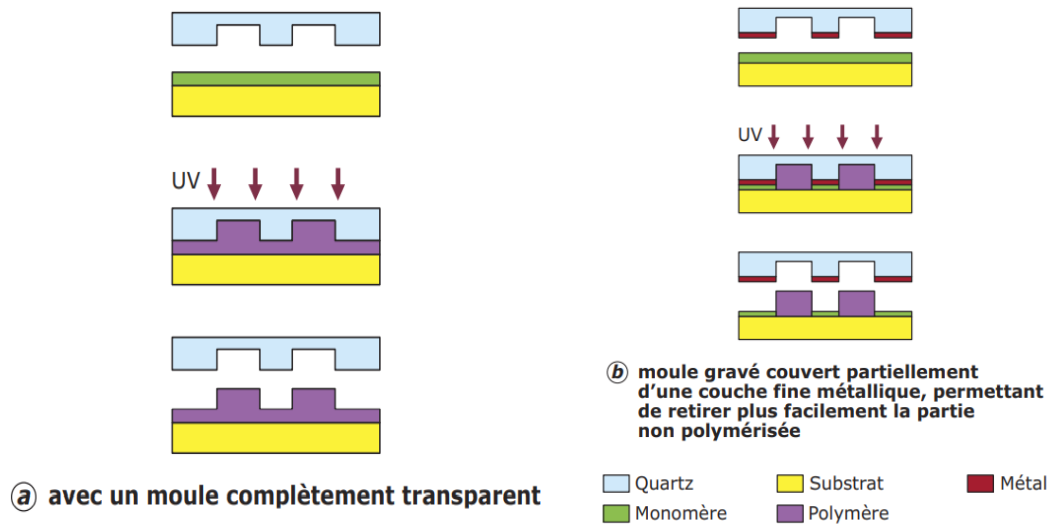


Figure II.11: Méthodes de nanoimpression assistée par UV. (U. Dawid et al, 2017)

II.6.5 Le nanomoulage

A été développé pour mouler des nanostructures directement dans une couche de polymère ou d'autres types de matériaux.

Par rapport aux techniques de moulage plus conventionnelles, telles que le moulage par injection, le nanomoulage utilise souvent des moules portant des nanostructures de surface sur une plaquette de silicium ou de quartz, fabriqués par des méthodes de microélectronique.

Bien que le nanomoulage ne soit pas a priori une méthode de lithographie compatible avec les méthodes de transfert, il est très utile pour former une surface fonctionnelle dans beaucoup d'autres domaines de la microélectronique.

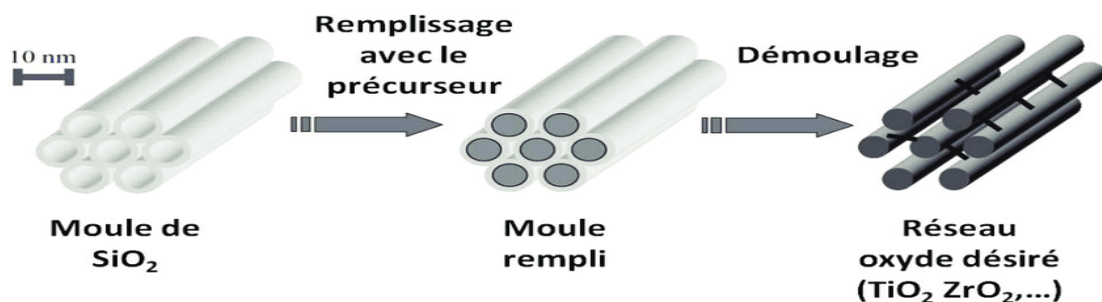


Figure II.12: Schématisation d'un nanomoulage. (Drexler. K. E, 1991)

II.7 Les propriétés physiques et thermiques des nanostructures

En dispersant correctement des nano-objets dans diverses matrices, on obtient des matériaux composites dont les propriétés offrent de nouvelles opportunités. Cependant, il est indispensable de caractériser les nano-objets au préalable et d'en contrôler la qualité pour garantir la reproductibilité des propriétés visées. **La taille, la morphologie, la composition, la surface spécifique** est des exemples de propriétés incontournables des nano-objets.

Les activités de recherche sont centrées sur l'étude des relations entre la structure et les propriétés physiques de matériaux nanostructures (surfaces, matériaux 2D, films minces ou massifs).

Les principaux enjeux concernent d'une part la compréhension des mécanismes élémentaires de formation des nanostructures obtenues par voie physique (bombardement ionique, dépôt physique en phase vapeur, métallurgie des poudres), (Babonneau. D et al, 2017) et d'autre part la modélisation et le contrôle de leurs propriétés optiques, électriques, mécaniques, etc.

Et pour les propriétés thermiques des nanostructures étant donné que les appareils continueront d'être encore réduit à moins de 100 nm suivant la tendance prévue par la loi de Moore, le thème des propriétés thermiques et le transport de ces dispositifs à l'échelle nanométrique deviennent de plus en plus importants.

La preuve de grandes potentielles nanostructures pour les applications thermoélectrique en outre, ils motivent les études concernant le transport thermique dans de tels dispositifs. (Sungtaek Y. Ju, 2005)

Ces zones, cependant, génèrent une exigence de **conductivité thermique**.

Les nanostructures ont des propriétés uniques par rapport à leurs atomes ou molécules individuels ou à leurs propriétés macroscopiques **en vrac**. Par exemple, un matériau en vrac tel que le fil de cuivre, leurs propriétés intrinsèques, par exemple la densité ou la conductivité, sont indépendantes de sa taille.

Autrement dit, si un fil de cuivre de 1 m de long, lorsqu'il est coupé en quelques morceaux, et pour ces morceaux, si la densité ou la conductivité est mesurée, on trouvera qu'ils sont identiques au fil de cuivre d'origine. Si le processus de division est effectué indéfiniment, alors l'invariance de propriété restera toujours.

Cependant, si la division se fait aux niveaux d'électrons, de protons ou de neutrons, c'est-à-dire à l'échelle nanométrique, on peut certainement s'attendre à un changement significatif de la propriété des nanostructures. Les propriétés des systèmes de matériaux à l'échelle nanométrique peuvent être considérablement affectées par les trois phénomènes suivants :

Les facteurs ci-dessus modifient considérablement les propriétés des nanostructures par rapport à leur matériau en vrac. Pour un système de nanomatériaux, l'état cristallin et l'état de surface / interface sont très importants.

Ces matériaux sont souvent à l'état métastable. Leur configuration atomique dépend du processus cinétique dans lequel ils sont fabriqués ou cultivés. Par conséquent, les propriétés des nanostructures peuvent être ajustées ou manipulées en modifiant leur taille, leur forme ou le processus par lequel elles sont fabriquées, ce qui peut souvent conduire à des résultats riches et surprenants.

II.8 Les domaines d'utilisation des nanostructures

Les nanostructures permettent à la fois des innovations incrémentales et des innovations de rupture dans de nombreux secteurs d'activité, tels que la santé, l'énergie, les transports, le bâtiment et les travaux publics, l'agroalimentaire, l'électronique, ou encore l'environnement.

II.8.1 Applications industrielles de la nanostructure

La nanostructure a un impact sur le domaine des biens de consommation, plusieurs produits qui incorporent des nanomatériaux sont déjà présents dans une variété d'articles. Des exemples de ce que les **pare-chocs** de voiture sont allégés, **les vêtements** sont plus **anti-taches**, **la crème solaire** est plus résistante aux radiations, **les os synthétiques** sont plus solides, les **écrans** de téléphone portable sont plus légers, **les emballages en verre** pour les boissons prolongent la durée de conservation et **les balles** pour divers sports sont rendus plus durables.

Ces nouveaux produits ont également un potentiel prometteur notamment dans le domaine de la cosmétique, et ont de nombreuses applications potentielles dans l'industrie lourde.



Figure II.13: Applications industrielles de la nanostructure. (U. Dawid et al, 2017)

II.8.2 Applications énergétiques de la nanostructure

Alors que la demande énergétique mondiale continue de croître, le développement de technologies plus efficaces et durables pour produire et stocker l'énergie devient de plus en plus important.

L'énergie sera le problème le plus pressant auquel l'humanité sera confrontée au cours des 50 prochaines années et la nanotechnologie au potentiel de résoudre ce problème (TEDX. H, 2011), La nanostructure, un domaine relativement nouveau de la science et de l'ingénierie, s'est avérée prometteuse d'avoir un impact significatif sur l'industrie de l'énergie.

Les avantages déjà observés de la conception de ces produits sont une efficacité accrue de l'éclairage et du chauffage, une capacité de stockage électrique accrue et une diminution de la quantité de pollution due à l'utilisation de l'énergie.



Figure II.14: Applications énergétiques de la nanostructure. (TEDX. H, 2011),

II.9 Les avantages et les inconvénients de la nanostructure ou nanotechnologie

Les scientifiques débattent actuellement des implications futures de la nanotechnologie. La nanotechnologie peut être en mesure de créer de nombreux nouveaux matériaux et dispositifs avec une vaste gamme d'applications, telles que la nanomédecine, la nanoélectronique, la production d'énergie de biomatériaux et les produits de consommation.

D'autre part, la nanotechnologie soulève bon nombre des mêmes problèmes que toute nouvelle technologie, y compris des préoccupations concernant la toxicité et l'impact environnemental des nanomatériaux (Drexler, K. Eric, 1986), et leurs effets potentiels sur l'économie mondiale,

II.9.1 Inconvénient

L'impact de la nanotechnologie s'étend de ses applications médicales, éthiques, mentales, juridiques et environnementales à des domaines tels que l'ingénierie, la biologie, la chimie, l'informatique, la science des matériaux et les communications...

Les risques potentiels comprennent les problèmes d'environnement, de santé et de sécurité; les effets de transition tels que le déplacement des industries traditionnelles à mesure que les produits de la nanotechnologie deviennent dominants, qui préoccupent les défenseurs des droits à la vie privée.

Ceux-ci peuvent être particulièrement importants si les effets négatifs potentiels des nanoparticules sont négligés.

II.9.2 Avantage

Les principaux avantages de la nanotechnologie comprennent des méthodes de fabrication améliorées, des systèmes de purification de l'eau, des systèmes énergétiques, l'amélioration physique, la nanomédecine, de meilleures méthodes de production alimentaire, la nutrition et l'auto-fabrication d'infrastructures à grande échelle (N. N, 2016).

- Matériaux et processus de tous les jours: Grâce à la nanotechnologie, les matériaux peuvent être rendus plus solides, plus légers, plus durables, plus réactifs, plus semblables à des tamis ou de meilleurs conducteurs électriques, parmi de nombreux autres traits.

- Electronique et applications informatiques: la nanotechnologie a grandement contribué aux progrès majeurs de l'informatique et de l'électronique, conduisant à des systèmes plus rapides, plus petits et plus portables capables de gérer et de stocker des quantités de plus en plus importantes d'informations.

-Applications médicales et de santé: la nanotechnologie élargit déjà les outils médicaux, les connaissances et les thérapies actuellement disponibles pour les cliniciens.

La nanomédecine, l'application de la nanotechnologie en médecine, s'appuie sur l'échelle naturelle des phénomènes biologiques pour produire des solutions précises pour la prévention, le diagnostic et le traitement des maladies.

- Applications énergétiques: la nanotechnologie trouve une application dans les sources d'énergie traditionnelles et améliore considérablement les approches d'énergie alternative pour aider à répondre à la demande énergétique croissante du monde.
- Assainissement de l'environnement: outre les façons dont la nanotechnologie peut contribuer à améliorer l'efficacité énergétique, il existe également de nombreuses façons dont elle peut aider à détecter et à nettoyer les contaminants environnementaux
- Avantages futurs en matière de transport: la nanotechnologie offre la promesse de développer des matériaux multifonctionnels qui contribueront à la construction et à l'entretien de véhicules, d'avions, de vaisseaux spatiaux et de navires plus légers, plus sûrs, plus intelligents et plus efficaces.

De plus, la nanotechnologie offre divers moyens d'améliorer les infrastructures de transport.

II.10 Conclusion

On prévoit que la nanotechnologie sera l'un des principaux moteurs de la technologie et des affaires au cours de ce siècle et promet des matériaux plus performants, des systèmes intelligents et de nouvelles méthodes de production ayant un impact significatif sur tous les aspects de la société.

Parmi les avantages de ces matériaux et appareillages, notons des matériaux légers, plus résistants, programmables, la réduction des coûts de vie (life-cycle Costas) via des pannes moindres, des appareils basés sur des principes et architectures nouveaux et l'utilisation de méthodes de fabrication à l'échelle moléculaire et des amas, etc.

Chapitre III

Les Structures FGMs

III.1 Introduction

Avec le développement de nouvelles industries et de processus modernes, de nombreuses structures servent dans des environnements thermiques, ce qui donne une nouvelle classe de matériaux composites appelés matériaux à classification fonctionnelle (FGM). Les propriétés globales des FGMs sont uniques et différentes de celles de tout matériau individuel qui le compose.

Le présent manuscrit se concentre sur un aperçu des processus de fabrication, du domaine d'application, de certaines études de recherche récentes et de la nécessité de concentrer davantage d'efforts de recherche sur l'amélioration de la méthode de fabrication des matériaux fonctionnellement gradués.

III.2 Définition des FGMs

En général, les principes fondamentaux des matériaux fonctionnellement gradués sont basés sur la céramique et le métal, dont vous êtes devenu dépendant les divers composants structurels et des développements technologiques pour plusieurs utilisations dans l'industrie notables récents.

On les considère comme le produit des matériaux composites en changeant sans interruption les fractions de volume dans la direction de l'épaisseur.

Tableau III.1: comparaison entre les propriétés de la céramique et du métal. (Cherradi. N, D, 1996)

	Métaux	céramique
Densité	Moyenne Elevée	Moyenne
Prix	Faible Elevée	Elevée Faible
Elasticité	Elevée	Très Elevée
Résistance mécanique	Elevée	Très Elevée (compression)
Tolérance aux défauts et aux chocs	Très tenace	Très fragile
Température d'utilisation	Moyenne Hauts	Hautes Très hautes
Tenue aux agressions chimiques	Moyenne Mauvaise	Bonne Très bonne
Conduction de chaleur	Bonne Très bonne	Moyenne Faible
Facilité de mise en forme	Facile	Difficile Faible
Facilité d'assemblage	Facile	Moyenne

En cas spécial les matériaux à gradient de composition, appelés aussi FGMs par référence à leur nomination anglaise (Functional Gradient Materials), sont des matériaux composites avancés formés de deux ou plusieurs phases constitutives avec une composition variable et continue dans l'espace. (Cherradi. N, D et al, 1996)

Yoshihisa (2004) a présenté un modèle simple illustrant les différences entre les matériaux à gradient des propriétés (FGMs) et les matériaux conventionnels (**la figure 1**).

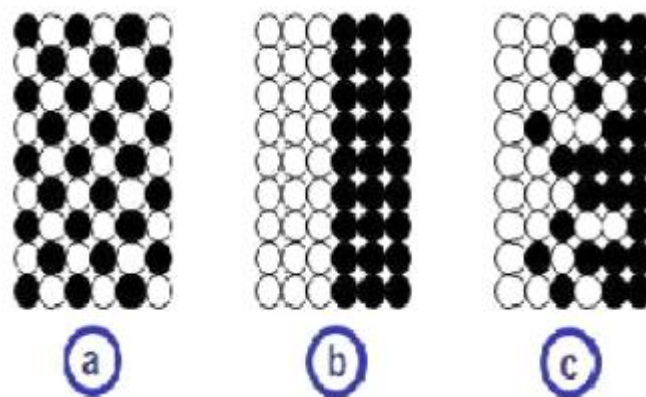


Figure III.1: La distribution composante des matériaux. (Cherradi. N, Det al, 1996)

Avec

a. Matériau plan composé, b. Matériau relié, c. Matériau à gradient de propriétés.

Le matériau plan composé a une caractéristique plane, le matériau relié a une frontière au niveau de l'interface des deux matériaux, et les FGMs ont d'excellentes caractéristiques qui les diffèrent de ceux des matériaux plans composés et reliés. Par conséquent, les FGMs suscitent beaucoup d'attention en termes de leur application dans les domaines industriels.

III.3 Méthode d'élaboration des FGMs

Le processus de fabrication des matériaux à gradient des propriétés peut être divisé en établissant la structure dans l'espace non homogène « gradation » et la transformation de cette structure en matériau en bloc « consolidation ». Il existe de nombreux procédés d'élaboration des FGMs, les paragraphes suivants s'attachent à décrire les principales méthodes d'élaboration des FGMs utilisées dans l'industrie. (Pai 2004)

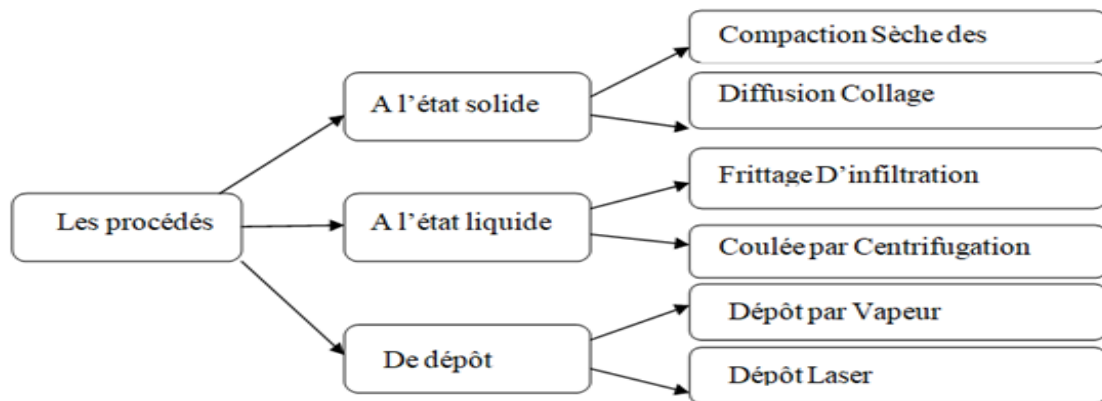


Figure III.2: Méthode de fabrication de FGM. (Pai 2004)

III.4 Les domaines d'applications des FGMs

Les matériaux à gradient des propriétés est applicable dans des nombreux domaines, comme il est illustré dans la figure 3. Il a été initialement conçu pour l'industrie de l'aéronautique, où les FGMs ont fournis deux propriétés contradictoires telles que la conductivité thermique et d'isolation thermique dans un matériau. Actuellement, elles permettent la production des matériaux légers, forts et durables, et elles sont applicables dans un large intervalle des domaines tels que les matériaux de construction, matériaux de conversion d'énergie, nucléaire et semi-conducteurs.

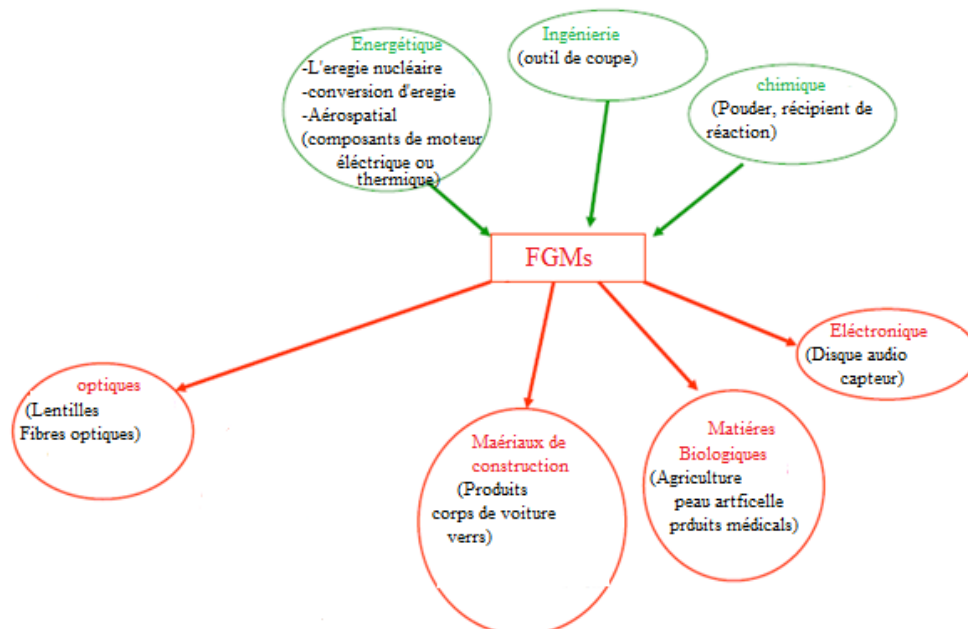


Figure III.3: Les principaux domaines d'application des FGMs.

III.5 Méthodes d'homogénéisation des FGMs

La variation continue des propriétés trouve son application lorsque, par exemple, la face supérieure est exposée à une haute température alors que la face inférieure est exposée à une basse température. Dans ce cas, la face supérieure est à 100% céramique et la face inférieure est à 100% métal, avec une transition graduelle entre les deux.

Les matériaux à gradient de propriétés sont interprétés comme des matériaux hétérogènes ou non homogènes à cause de leurs structures microscopiques ou/et macroscopiques. (DERKAOUI. F. Z, GORINE. S, 2019)

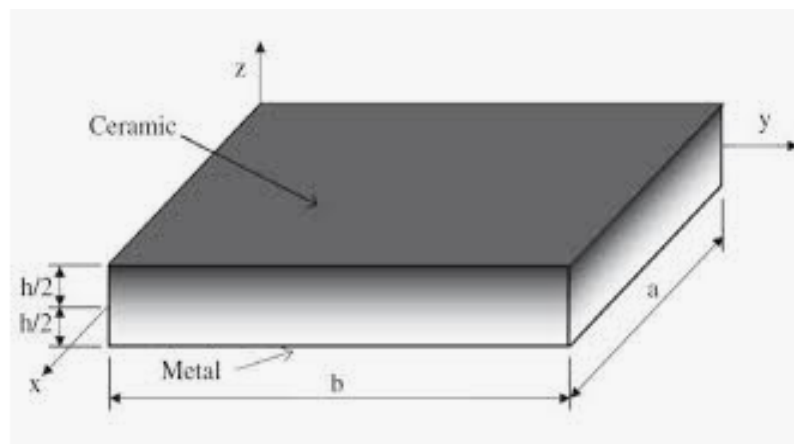


Figure III.4 : Géométrie d'une poutre en FGM. (DERKAOUI. F. Z, GORINE. S, 2019)

La surface inférieure de la poutre de matériau à gradation fonctionnelle est une couche métallique et la surface supérieure est une couche de céramique. La région entre les deux surfaces comprend un matériau avec différents rapports de mélange de la céramique et du métal et peut être exprimé comme dans l'équation suivante :

$$P_f = (1-V(z))P_m + V(z)P_c \quad \text{(III.1)}$$

Où P_f est la propriété matérielle effective du matériau à gradation fonctionnelle, P_m et P_c sont les propriétés du métal et de la céramique, respectivement.

$V(z)$ est la fraction volumique du constituant métallique de matériau fonctionnellement gradué (FGM).

Où z est la coordonnée d'épaisseur ($-h/2 \leq z \leq h/2$).

La coordonnée x définit la longueur de la poutre, tandis que l'axe z perpendiculaire à l'axe neutre de la poutre et dans la direction de l'épaisseur.

Les propriétés des matériaux dont le module de Young E et le coefficient de Poisson ν sur les surfaces supérieures et inférieures sont différentes mais sont déterminés selon les besoins.

Toutefois le module de Young et le coefficient de Poisson varient de façon continue, dans le sens de l'épaisseur (l'axe z) soit : $E = E(z), \nu = \nu(z)$

Une présentation détaillée faite par A.H. Akbarzadeh et al. Pour examiner l'influence des modèles micromécaniques sur la réponse des poutres en FGMs. Trois méthodes d'homogénéisation employées dans la plupart des récents travaux, établis pour analyser le comportement statique et dynamique des poutres en FGMs. Nous citons pour évaluer le module d'Young $E(z)$ les méthodes suivantes :

- Fonction de la loi de puissance (**P-FGM** : la fonction polynômiale)
- La fonction exponentielle (**E-FGM**)
- La fonction sigmoïde (**S-FGM**).

III.5.1 Propriétés matérielles de la poutre E-FGM

La première méthode la fraction volumique est donnée sous forme d'une fonction exponentielle à travers l'épaisseur

$$E = E_0 e^{k \left(\frac{z+1}{h+2} \right)} \quad (\text{III.2})$$

Ou

k : est un paramètre matériel.

h : est la hauteur de la poutre.

Avec

$$k = \frac{1}{h} \ln \left(\frac{E_m}{E_c} \right) \quad (\text{III.3})$$

et

$$E_0 = \sqrt{E_m E_c} \quad (\text{III.4})$$

Les indices m et c sont les modules élastiques de la face intérieure ($z = -h/2$) **métal** et la face supérieure ($z = h/2$) **céramique** respectivement.

La variation du module de Young à travers l'épaisseur de la poutre E-FGM est représentée dans la figure 5.

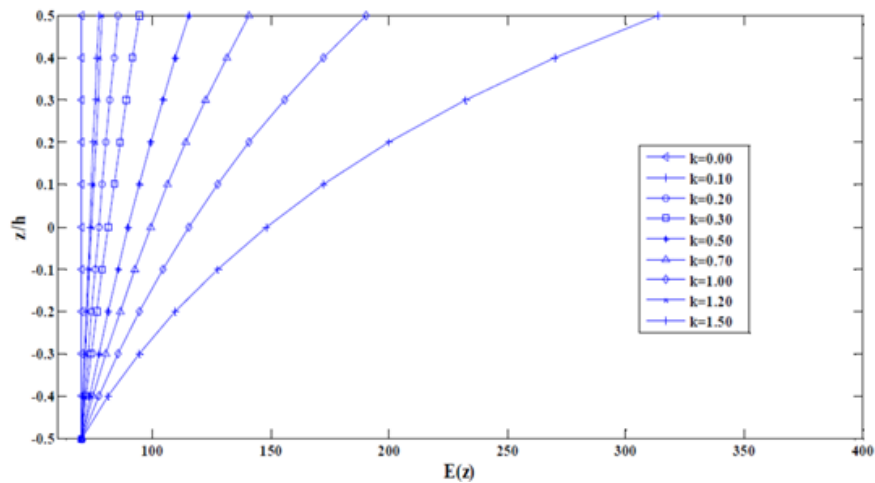


Figure III.5: Distribution de module de Young à travers l'épaisseur d'E-FGMs. (Reddy J.N, 2010)

III.5.2 Propriétés matérielles de la poutre P-FGM

La loi des puissances est souvent introduite par plusieurs chercheurs pour évaluer le module d'Young, dans les cas statiques ou dynamiques, elle est utilisée pour estimer le module d'Young des poutres, modérément épaissies et épaisses. (https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_des_poutres)

Il est expliqué avec la formule suivante :

$$E(z) = E_m + (E_c - E_m) \left(\frac{2z + h}{2h} \right)^k \tag{III.5}$$

Avec

E_m et E_c sont les modules élastiques de la face intérieure ($z = -h/2$) **métal** et la face supérieure ($z = h/2$) **céramique** respectivement.

La figure 6 montre que la variation de la fraction volumique représente les distributions polynômiales, et cette poutre FGM est appelée (Poutre P-FGM).

Il apparait clairement d'après la **figure 6** que la fraction volumique change rapidement près de surface supérieure pour, $k < 1$ et augmenté rapidement près de la surface inférieure pour $k > 1$.

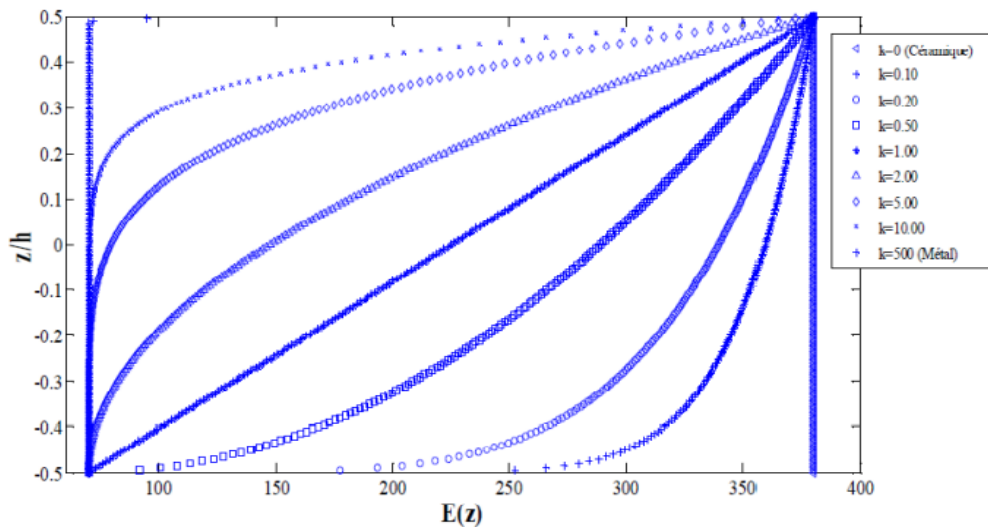


Figure III.6 : Distribution de module de Young à travers l'épaisseur de P-FGM.

(https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_des_poutres).

III.5.3 Propriétés matérielles de la poutre S-FGM

Pour le type S-FGM la fraction volumique prend une autre forme, en utilisant deux fonctions à travers l'épaisseur :

$$V_m(z) = \frac{1}{2} \left(\frac{h/2 + z}{h/2} \right)^k \quad \text{pour } -\frac{h}{2} \leq z \leq 0 \tag{III.6.a}$$

$$V_m(z) = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{h/2 - z}{h/2} \right)^k \quad \text{pour } 0 \leq z \leq \frac{h}{2} \tag{III.6.b}$$

En utilisant la loi des mélanges, le module de Young de la poutre S-FGM peut être calculé par

$$E_m(z) = V_m(z)E_m + [1 - V_m(z)]E_m \tag{III.7.a}$$

pour $-\frac{h}{2} \leq z \leq 0$

$$E_c(z) = V_c(z)E_c + [1 - V_c(z)]E_c \tag{III.7.b}$$

pour $0 \leq z \leq \frac{h}{2}$

La figure 7 montre que la variation de la fraction volumique dans les équations (I.6.a) et (I.6.b) représente les distributions sigmoïdes, et cette poutre FGM est appelée (Poutre S-FGM).

Pour différent valeur de n , la figure 7 représente la variation du module de Young dans la direction d'épaisseur de la poutre S-FGM.

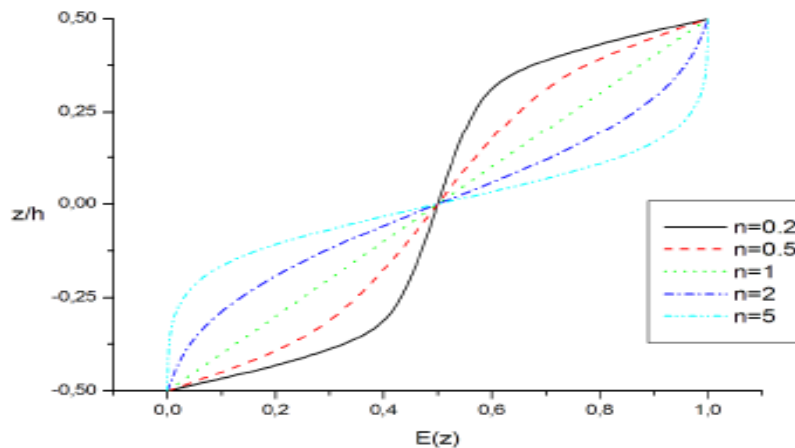


Figure III.7 : Variation de la fraction volumique dans une poutre S-FGM.

(https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_des_poutres)

III.6 Les théories des poutres pour les matériaux fonctionnellement graduée

On appelle poutre un solide engendré par des surfaces finies (Berrabah. H. M et al 2016), appelées **sections droites**, pour étudier les poutres (la figure 8), on définit les théories des poutres qui est un modèle utilisé dans le domaine de la résistance (RDM) des matériaux.

La théorie des poutres dans RDM peut être vue principalement de deux manières différentes. La première approche est à partir des considérations particulières pour des grandes familles d'exemples, cette approche nécessite une bonne connaissance et une bonne maîtrise de la modélisation des problèmes physiques à résoudre.

Tandis que la seconde approche, plus systématique, permet une formulation rigoureuse de la théorie des poutres à partir de considérations purement mécaniques.

La théorie des poutres est une application de la théorie de l'élasticité est fournie des solutions en champs des déplacements ou le champ de contrainte elle permet d'obtenir une solution approchée, qui donne une bonne idée sur les efforts et les déplacements on considère les hypothèses suivantes qui représentent des simplifications acceptables de la réalité.

- ✓ Modèle d'Euler Bernoulli ou bien la théorie classique des poutres.
- ✓ Modèle de Timoshenko ou bien la théorie de premier ordre.
- ✓ Théorie d'ordre élevé.

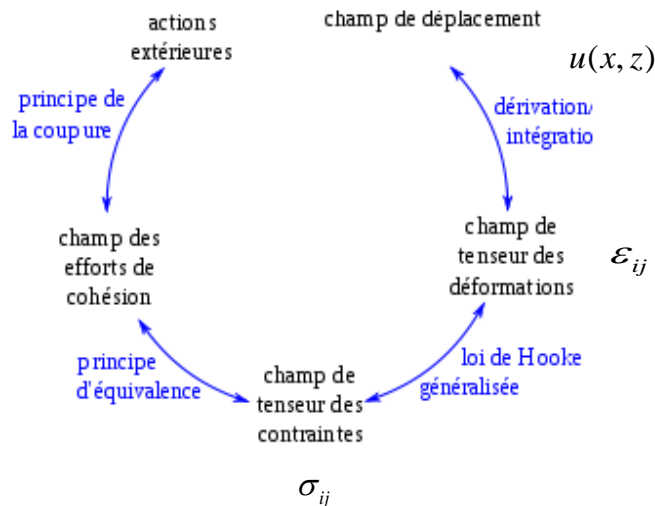


Figure III.8 : Principe de modélisation des poutres. (Berrabah. H. M et al 2016)

III.7 Les modèles de la théorie des poutres

III.7.1 Le modèle classique de la poutre d'Eluer-Bernoulli (CBT)

Il a été énoncé pour la première fois vers 1750, est une simplification de la théorie linéaire de l'élasticité qui fournit un moyen de calculer les caractéristiques de charge et de déflexion des poutres, qui néglige l'influence de cisaillement dans le cas de la flexion au cours de la déformation, les sections droites restent perpendiculaires à la courbe moyenne (pas de gauchissement comme une définition le gauchissement apparait lorsque la section transversale de la poutre perd sa planéité), Cette hypothèse n'est pas valable pour les poutres courtes car ces dernières sont hors des limites de validité du modèle de poutre. (https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_des_poutres)

D'après la théorie classique des poutres, le champ de déplacement d'une poutre élançée d'un point de coordonnées (x, z) à l'instant t s'écrit :

$$\begin{aligned}
 u(x, z) &= u_0(x) - z \frac{\partial w_0(x)}{\partial x} \\
 w(x, z) &= w_0(x)
 \end{aligned}
 \tag{III.8}$$

$u(x, z)$: C'est le déplacement suivant X .

$w(x, z)$: C'est le déplacement dans la direction de Z ou bien la flèche.

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

$$\frac{\partial w_0(x)}{\partial x} = \frac{\partial w_0}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} \quad (\text{III.9})$$

Où (u_0, w_0) sont deux fonctions de déplacement inconnues de l'axe médian de la poutre ($z = 0$).

$$\gamma_{xz}(x) = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (\text{III.10})$$

Cela veut dire que la distorsion est nulle et par conséquent la contrainte de cisaillement est nulle puisque,

$$\tau_{xz} = G_{xz} \gamma_{xz} = 0 \quad (\text{III.11})$$

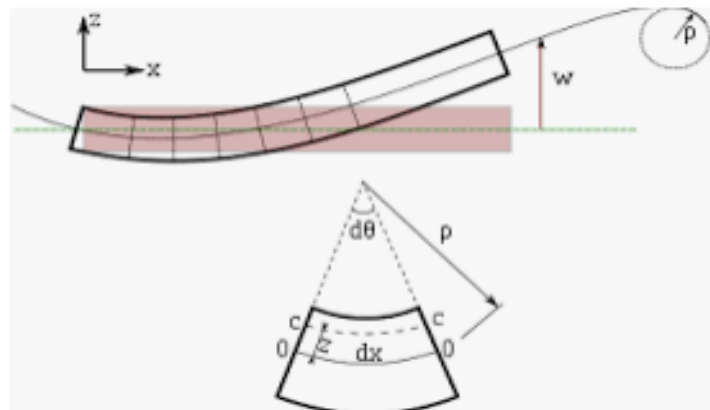


Figure III.9 : Flexion d'une poutre d'Euler-Bernoulli (CBT).

Dans cette théorie, les modèles sont basés sur une distribution linéaire des déplacements suivant l'épaisseur de la poutre.

- Après déformation, les déformations dues au cisaillement transversal sont négligées
- La section transversale reste perpendiculaire à la ligne moyenne de la poutre et la section plane reste plane.
- La fonction $f(z)$ qui décrit la répartition de déplacement suivant l'épaisseur de la poutre est nulle.

Ce qui limite la validité de cette théorie aux poutres courtes Ashton. (1970), Timoshenko et al. (1959).

III.7.2 Le modèle de Timoshenko(TBT) ou du premier ordre de la déformation de cisaillement (FSDT)

Timoshenko a été le premier à étudier les effets des déformations de cisaillement et de l'inertie de rotation dans l'analyse des poutres, qui ont été développés au début du XXe siècle Timoshenko et Woinowsky. K, (2009), Reddy. J (1997), Miara et Podio. G (2006).

Ce qui appliqué pour le cas des poutres courtes, dans ce cas les contraintes et les déformations sont constantes à travers l'épaisseur de la poutre.

Cela oblige l'introduction d'un facteur de correction k dépendent de la forme géométrique de la poutre considérée (par exemple, pour une poutre de section rectangulaire $k = 5/6$), elle est basée sur le principe, qu'après déformation la section plane reste plane mais elle perd sa perpendicularité par rapport à la ligne moyenne de la poutre, Dans ce cas, la fonction $f(z)$ est égale à z .

La théorie du premier ordre est basée sur le champ de déplacement de L'équation résultante est du 4ème ordre mais, contrairement à la théorie des poutres d'Euler – Bernoulli, il existe également une dérivée partielle du second ordre.

$$\begin{aligned} u(x, z) &= u_0 + z\phi(x) \\ w(x, z) &= w_0 \end{aligned} \quad (\text{III.12})$$

Où (u_0, w_0) et $\phi(x)$ sont les déplacements dans la surface moyenne et la rotation autour de l'axe y , respectivement, **la figure 10** en remplaçant :

$$\phi_x = -\frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (\text{III.13})$$

La TBT est donc une extension de la cinématique de la CBT par une déformation de cisaillement transversale de la poutre dans leur hypothèse cinématique.

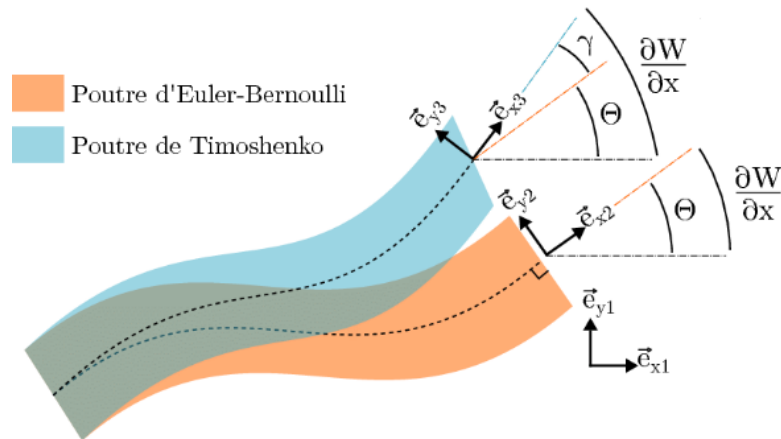


Figure III.10 : Illustration élémentaire d'une poutre en fonction de deux théories des poutres.

L'angle de flexion pure Θ est représenté par (e_{x1}, e_{x2}) et l'angle de cisaillement pur γ correspond à (e_{x2}, e_{x3}) .

L'équation de déformation est donnée par la relation suivante :

$$\gamma_{xz}(x) = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} = \varphi_0(x) \tag{III.14}$$

Sachant que la contrainte de cisaillement est égale :

$$\tau_{xz} = G_{xz} \gamma_{xz} = G_{xz} \varphi_0 \tag{III.15}$$

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

III.7.3 Le modèle de poutre basé sur la théorie du troisième ordre de la déformation de cisaillement (TSDT)

Contrairement à la théorie CPT et la théorie FSDT, la théorie d'ordre élevé est basée sur une distribution non linéaire des champs de déplacement selon l'épaisseur de la poutre.

Ces modèles permettent de représenter le gauchissement de la section dans la configuration déformée, plusieurs théories d'ordre élevé ont été proposées par Hildebrand, F.B et *al.*1949, Naghdi, P. M., (1957), Liberscu, L, (1967), Nelson, R., et *al.*1974, Lo, K. H., et *al.*1977a ; 1977b, Kant, T., Swaminathan, (2002), Pour éviter l'utilisation d'un facteur de correction en cisaillement.

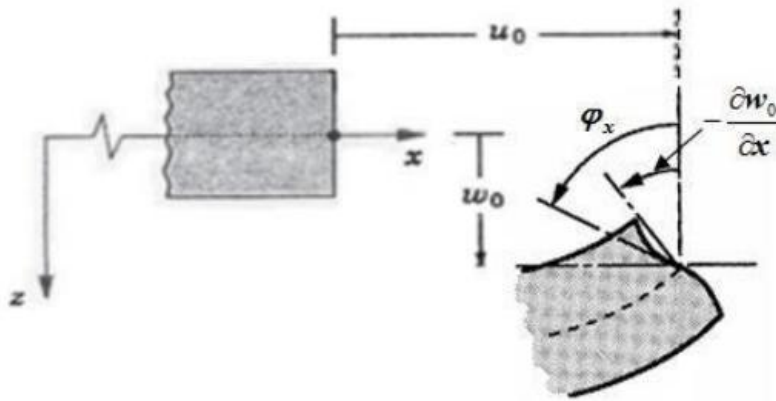


Figure III.11 : Illustration d'une poutre d'ordre élevé (Reddy).

Dans ce modèle de théorie, le champ de déplacement s'écrit sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} u(x, z) &= u_0(x) - z \frac{\partial w_0}{\partial x} + f(z)\varphi_0(x) \\ w(x, z) &= w_0(x) \end{aligned} \tag{III.16}$$

$$\begin{aligned} \gamma_{xz}(x) &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{\partial w_0(x)}{\partial x} + f'(z)\varphi_0(x) + \frac{\partial w_0(x)}{\partial x} \\ \gamma_{xz}(x) &= f'(z)\varphi_0(x) \end{aligned} \tag{III.17}$$

Voici quelques contributions importantes de développement de modèles d'ordre supérieur qui se sont distingués dans la littérature et qui diffèrent par la fonction de formes $f(z)$

✓ L'hypothèse de [Reissner, 1945], Panc, et Kaczkowski avec ;

$$f(z) = \frac{5}{4}z \left(1 - \frac{4z^2}{3h^2} \right) \tag{III.18}$$

✓ L'hypothèse d' [Ambartsumyan, 1969] avec ;

$$f(z) = \frac{z}{2} \left(\frac{h^2}{4} - \frac{z^2}{3} \right) \tag{III.19}$$

- ✓ la théorie des déformations du troisième ordre (the third-order shear deformation theory ou TSDT)
L'hypothèse [Reddy, 1984]:

$$f(z) = z \left(1 - \frac{4}{3h^2} z^2 \right) \quad \text{(III.20)}$$

Cette revue se concentre principalement sur les théories de la couche unique équivalente, y compris la théorie classique de la poutre (CBT), la théorie de la déformation de cisaillement de premier ordre (FSDT), les théories d'ordre élevé de la déformation de cisaillement (HSDTs), des théories simplifiées et théories mixtes puisqu'elles ont été largement utilisées dans la modélisation des plaques et coques à gradient fonctionnel.

III.8 Théorie d'élasticité non locale

La théorie de l'élasticité non locale initiée par Eringen a été appliquée pour le cas des structures macro et nano métrique est l'une des prometteuses théories qui tient compte de leur taille. La théorie non locale suppose que les contraintes à un point dépendent non seulement de la déformation à ce point, mais aussi sur des déformations dans les autres points du corps.

Ces effets peuvent être déterminés à l'aide de la mécanique des milieux continus qui dépend de la théorie de déformation. (Reddy J.N, 2010)

Selon Eringen les contrainte non locales du tenseur σ a un point est exprimé par :

$$(1 - \mu \nabla^2) \sigma = \tau \quad \text{(III.21)}$$

Avec

∇^2 : L'opérateur Laplacien du système de coordonnées cartésiennes à deux dimensions.

$\mu = (e_0 a^2)$: Le paramètre non local qui incorpore l'effet à petite échelle

La forme explicite de l'équation (III. 21) peut être écrite pour les problèmes unidimensionnels (1D) avec des matériaux isotropes comme suit :

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} - \mu \frac{d^2 \sigma_{xx}}{dx^2} &= E \varepsilon_{xx} \\ \sigma_{xz} - \mu \frac{d^2 \sigma_{xz}}{dx^2} &= \frac{E}{1 + \nu} \varepsilon_{xz} \end{aligned} \quad \text{(III.22)}$$

Où ε_{ij} sont les composantes du tenseur de déformation ; et E et ν sont le module de Young et le coefficient de Poisson des matériaux, respectivement.

Comparé au modèle intégral, le différentiel est largement utilisé pour les nanostructures en raison de sa simplicité.

Cependant, le modèle différentiel peut donner des résultats paradoxaux dans certains cas, par exemple : problèmes en flexion et en vibration des poutres en porte-à-faux.

Jusqu'à présent, il n'y a pas d'études rigoureuses faites sur l'estimation de la valeur du paramètre non locale (Polizzotto C, 2001), il est suggéré que sa valeur peut être déterminée par expérience ou par la conduite d'une comparaison des courbes de dispersion de la mécanique des milieux continus non locaux ainsi qu'avec des simulations dans la dynamique moléculaire.

Les caractéristiques qui distinguent les théories non locales des théories classiques sont des énoncés de postulats pour l'ensemble du corps. (Eringen A.C et Edelen D.G.B, 1972)

III.9 Différence entre la théorie locale et non locale d'élasticité

La théorie classique d'élasticité cette théorie ne tient pas en compte de l'effet d'échelle dans ces hypothèses et donc néglige les forces entre atomiques. Le domaine d'application est intimement relié à grandes échelles de temps et de longueur. L'élasticité non locale a expliqué l'effet d'échelle en élasticité.

III.10 Conclusion

En raison de vaste champ qui se développe rapidement sur les FGMs. En conclusion les matériaux à gradient de propriétés représentent un domaine en évolution rapide en sciences et en ingénierie avec de nombreuses applications pratiques. Les besoins de recherche dans ce domaine sont particulièrement nombreux et variées, les FGMs promettent des avantages potentiels importants qui justifient la nécessité des efforts importants.

Chapitre IV

Etude sur les vibrations hygro-thermiques des nanopoutres P-FG et S-FG en utilisant la théorie du Timoshenko Intégrale

VI.1 Introduction

Au cours de cette thèse, nous avons développé un outil numérique, basé sur une formulation en terme intégrale nonlocale de Timoshenko pour l'étude de l'influence du chargement combiné de l'humidité et de la température sur la vibration des nanopoutres en matériaux à gradient de propriétés reposant sur des fondations élastiques (Winkler-Pasternak). Le principal avantage de cette théorie réside dans la prise en compte de l'effet de cisaillement transverse avec seulement un champ de déplacement modélisé, d'où le facteur de correction de cisaillement est requis.

VI.2 Formulations théoriques

IV.2. 1 Modèles des nanopoutres FG

Dans la présente étude, considérons un nanopoutre FG simplement appuyée avec des dimensions (*longueur "a", largeur "b" et épaisseur "h"*) reposant sur le type de Winkler Pasternak (comme le montre dans **figure 1**). Deux types des nanopoutres FG simplement appuyée sont employés, à savoir le nanopoutre FG sigmoïde de symétrique. Les propriétés efficaces des nanopoutres FG des deux types sont données comme suite

$$P(z) = P_c V_c + P_m V_m \quad (\text{IV.1})$$

Avec

$$V_c + V_m = 1 \quad (\text{IV.2})$$

Où P_i et V_i sont les propriétés et la fraction volumique du matériau avec ($i = c, m$).

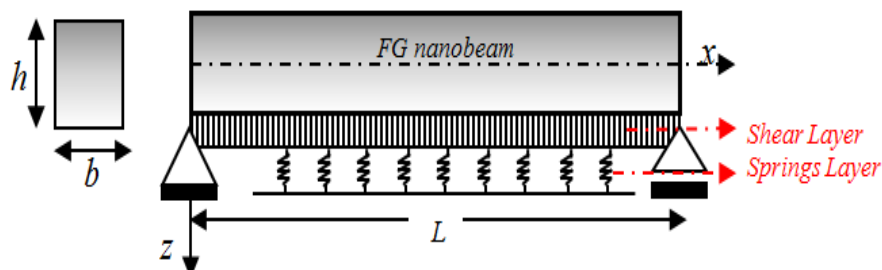


Figure. IV.1 : Géométrie des nanopoutres FG reposant sur une fondation élastique.

IV.2.1.1 La loi de puissance des nanopoutres FG (P-FG)

Les propriétés des nanopoutres FG dans le premier modèle, varient en fonction de la fraction volumique de la loi de puissance (**figure 2**), la fonction de la fraction volumique céramique peut s'écrire

$$V_c = \left(\frac{2z+h}{2h} \right)^p \quad \text{avec } p \geq 0 \quad (\text{IV.3})$$

$$P(z) = (P_c - P_m) \times \left(\frac{2z+h}{2h} \right)^p + P_m \quad (\text{IV.4})$$

Pour obtenir les propriétés efficaces des nanopoutres P-FG où E , G , ρ , α , et β sont le module de Young, module de cisaillement, la masse volumique, les coefficients de dilatation thermique et dilatation d'humidité, respectivement. Il juste de remplacer la fraction volumique dans le modèle correspondant en Eq. (1).

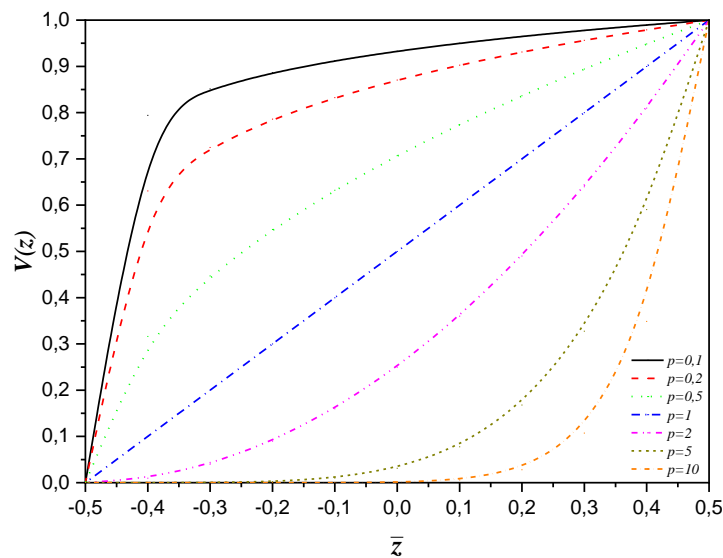


Figure. IV.2 : Variation de la fraction volumique de céramique sur le long de l'épaisseur des nanopoutres P-FG.

IV.2.1.2 Nanopoutre FG symétrique sigmoïde (SS-FG nanopoutre)

Le deuxième type de la fraction volumique (SS-FG) varie symétriquement par rapport à l'axe moyen en utilisant deux fractions de volume de loi de puissance (voir **figure 3**).

La fraction volumique sigmoïde symétrique est exprimée en :

$$V_m(z) = \begin{cases} \left(\frac{2z+h}{h}\right)^p & \text{pour } -h/2 \leq z \leq 0 \\ \left(\frac{-2z+h}{h}\right)^p & \text{pour } 0 \leq z \leq h/2 \end{cases} \quad \text{(IV.5)}$$

$$P(z) = (P_m - P_c) \times \left(\frac{z}{h} + 0.5\right)^p + P_c \quad \text{(IV.6)}$$

Pour obtenir les propriétés efficaces des nanopoutres SS-FG telles que $(E(z), G(z), \rho(z), \alpha(z), \beta(z))$ il juste de remplacer la fraction volumique dans le modèle correspondant en Eq. (1).

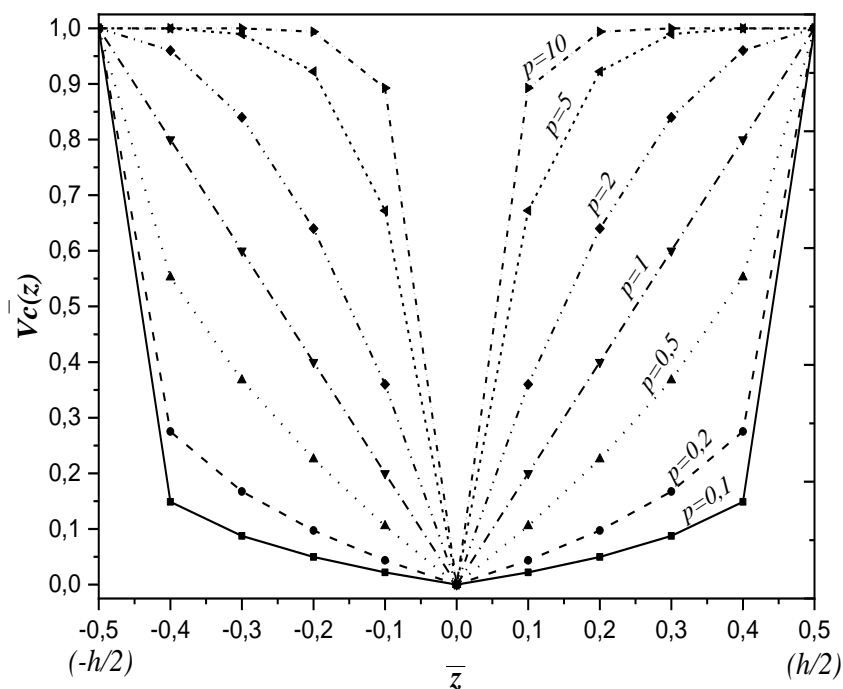


Figure. IV.3 : Variation de la fraction volumique de céramique sur le long de l'épaisseur des nanopoutres S-FG.

Pour étudier précisément le comportement des nanopoutres FG sous chargement thermique, la température a été prise en fonction des propriétés du matériau. Les propriétés du matériau

thermo-élastique " P " en fonction de la température " $T(k)$ " peuvent être données sous la forme non linéaire comme (Ebrahimi and Salari 2015).

$$P(T) = P_0 (P_{-1}T^{-1} + 1 + P_1T^1 + P_2T^2 + P_3T^3) \quad (IV.7)$$

Où P et T sont la propriété du matériau et la température ambiante, respectivement P_i indique les coefficients dépendant de la température du SUS 304 (Métal) et Si_3N_4 (Céramique) comme mentionné dans le tableau.

Tableau IV.1: Propriétés des matériaux en fonction de la température des composants FGM (Ebrahimi and Salari, 2015).

Material	proprietes	P_0	P_{-1}	P_1	P_2	P_3
Si_3N_4	$E(Pa)$	3,4843e+11	0	-3,070e-04	2,160e-07	-8,946e-11
	$\alpha (K-1)$	5,8723e-06	0	9,095e-04	0	0
	$\rho (Kg/m3)$	2370	0	0	0	0
	ν	0,24	0	0	0	0
SUS 304	$E(Pa)$	2,0104e+11	0	3,079e-04	-6,534e-07	0
	$\alpha (K-1)$	1,233e-05	0	8,086e-04	0	0
	$\rho (Kg/m3)$	8,17e+03	0	0	0	0
	ν	3,262e-01	0	-2,002e-04	3,797e-07	0

IV.2. 2 La théorie de Timoshenko en terme intégrale nonlocale

Basé sur la théorie de Timoshenko et en supposant que la rotation totale de flexion est égale $k_1 \int \theta(x,t) dx$. Le champ de déplacement en cours de la théorie de Timoshenko en terme intégrale nonlocale peut être exprimé comme

$$\begin{aligned} u(x, z, t) &= u_0(x, t) - zk_1 \int \theta(x, t) dx \\ w(x, z, t) &= w_0(x, t) \end{aligned} \quad (IV.8)$$

Où $u_0(x,t)$, $w_0(x,t)$ et $\theta(x,t)$ sont des déplacements inconnus. " $k_1 = \lambda^2$ " Avec λ présenté dans Eq. (9). Le terme intégral apparaît dans Eq. (7) peut être résolu par la méthode de Navier et peut être exprimé comme

$$\int \theta \, dx = A' \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (\text{IV.9})$$

Où le coefficient est adopté selon la solution actuelle (Méthode de Navier) et peut être obtenu comme

$$A' = -\frac{1}{\lambda^2} \text{ avec } \lambda = m\pi / a \quad (\text{IV.10})$$

Les déformations non-nulles de la présent théorie de Timoshenko en terme intégrale nonlocale sont obtenues comme suit

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x^0 + zk_1 A' \eta_x \quad (\text{IV.11})$$

$$\gamma_{xz} = \gamma_{xz}^0 + k_1 A' \beta_{xz} \quad (\text{IV.12})$$

Avec

$$\begin{aligned} \varepsilon_x^0 &= \frac{\partial u_0}{\partial x}, \eta_x = -\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \\ \gamma_{xz}^0 &= \frac{\partial w_0}{\partial x}, \beta_{xz} = -\frac{\partial \theta}{\partial x} \end{aligned} \quad (\text{IV.13})$$

IV.2.3 Principe d'Hamilton (HP)

Dans l'investigation actuelle, les trois équations de mouvement de la poutre FG sont déterminées par le principe d'Hamilton, qui stipule que le mouvement des nanopoutres FG pendant le temps $t \in [0, t]$. La forme analytique du principe d'Hamilton peut être exprimée (Eltaher et al. 2018, Yüksela et Akbaş 2018)

$$0 = \int_0^t \delta(U + V - K) dt \quad (\text{IV.14})$$

Où δU , δV et δK sont les variations de l'énergie de déformation, du travail effectué par des forces externes et l'énergie cinétique de la poutre FG.

La formulation de la variation de l'énergie de déformation " δU " peut être exprimée comme

$$\begin{aligned} \delta U &= \int_0^L \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_x \delta \varepsilon_x + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz}) dx dz \\ &= \int_0^L (N_x \delta \varepsilon_x^0 + M_x k_1 A' \eta_x + Q_{xz} \gamma_{xz}) dx \end{aligned} \quad (IV.15)$$

Avec

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ M_x \end{Bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x \begin{pmatrix} 1 \\ z \end{pmatrix} dz; \quad Q_{xz} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xz} dz \quad (IV.16)$$

Où " N_x, M_x et Q_{xz} " sont les résultants de la contrainte.

Les variations du travail effectué par les forces appliquées (charge Hygrothermique et foundation élastique) peuvent prendre la forme mathématique suivante :

$$\delta V = \int_0^L \left[\begin{aligned} &(N^T + N^H) \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial \delta w_0}{\partial x} \right) \\ &-K_w w_0 \delta w_0 + K_s \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial \delta w_0}{\partial x} \right) \end{aligned} \right] dx \quad (IV.17)$$

Où " K_w, K_s et N^T, N^H " sont les coefficients de Winkler, Pasternak et les forces appliquées dues aux chargements de température et d'humidité, respectivement.

Le " N^H et N^T " peuvent être donnés comme

$$N^H = \int_{-h/2}^{h/2} E(z) \beta(z, T) (C - C_0) dz \quad (IV.18a)$$

$$N^T = \int_{-h/2}^{h/2} E(z) \alpha(z, T) (T - T_0) dz \quad (IV.18b)$$

Où " T_0 et C_0 " sont la température de référence et la concentration d'humidité, respectivement.

La variation de l'énergie cinétique est exprimée comme

$$\delta K = \int_0^L \int_{-h/2}^{h/2} [\dot{u}\delta\dot{u} + \dot{w}\delta\dot{w}] \rho(z) dx dz \quad (IV.19)$$

En remplaçant les champs de déplacement d'Eq. (8) dans Eq. (19), on obtient

$$\delta K = \int_0^L \left[\begin{array}{l} I_0 (\dot{u}_0 \delta \dot{u}_0 + \dot{w}_0 \delta \dot{w}_0) \\ -I_1 \left(k_1 A' \dot{u}_0 \frac{\partial \delta \dot{\theta}}{\partial x} + k_1 A' \delta \dot{u}_0 \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial x} \right) \\ + I_2 (k_1 A')^2 \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial x} \frac{\partial \delta \dot{\theta}}{\partial x} \end{array} \right] dx \quad (IV.20)$$

Avec

$$\dot{u}_0 = \frac{\partial u_0}{\partial t}, \dot{w}_0 = \frac{\partial w_0}{\partial t} \text{ and } \dot{\theta} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (IV.21)$$

et

$$(I_0, I_1, I_2) = \int_{-h/2}^{h/2} (1, z, z^2) \rho(z) dz \quad (IV.22)$$

Où " I_0, I_1, I_2 " sont le moment d'inertie.

" $\rho(z)$ " est la masse volumique.

Remplacer l'Eq. (15)-(19) et Eq. (19) dans Eq. (14), en intégrant par parties les résultats des équations, et séparer les termes de déplacement " $\delta u_0, \delta w_0$ et $\delta \theta$ ". Les équations de mouvement de la poutre FG exprimé par les contraintes résultantes " N_x, M_x et Q_{xz} " sont obtenues comme

$$\delta u_0 : \frac{\partial N_x}{\partial x} = I_0 \ddot{u}_0 + I_1 k_1 A' \frac{\partial \ddot{\theta}}{\partial x} \quad (IV.23a)$$

$$\delta w_0 : -\frac{\partial Q_{xz}}{\partial x} - (N^T + N^H) \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} - K_w w_0 - K_s \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} = -I_0 \ddot{w}_0 \quad (IV.23b)$$

$$\delta\theta: -k_1 A' \frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + k_1 A' \frac{\partial Q_{xz}}{\partial x} = I_1 k_1 A' \frac{\partial \ddot{u}_0}{\partial x} + I_2 k_1^2 A'^2 \frac{\partial^2 \ddot{\theta}}{\partial x^2} \quad (\text{IV.23c})$$

IV.2.4 Elasticité non local d'une nanopoutre FGM

La théorie non locale de (Eringen 1972 et 1983) est utilisée ici pour dériver les équations de mouvement non locales, qui prend en compte l'effet à petite échelle. Donc, les contraintes normales et de cisaillement " σ et τ " de la théorie non locale pour les nanopoutres FG peuvent être obtenus comme

$$(1 - \mu \nabla^2) \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \tau_{xz} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & 0 \\ 0 & Q_{44} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \gamma_{xz} \end{pmatrix} \quad (\text{IV.24})$$

Où $\mu = (e_0 a)^2$ et Q_{ii} sont l'effet à petite échelle et coefficient de rigidité, et peut être défini comme

$$Q_{11} = E(z), Q_{44} = G(z) \quad (\text{IV.25})$$

Remplacer Eq. (16) dans Eq. (24). Les forces résultantes et le moment " N_x, M_x et Q_{xz} " peut être obtenu sous la forme non locale comme suit

$$(1 - \mu \nabla^2) \begin{pmatrix} N_x \\ M_x \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & B_{11} \\ -k_1 A' B_{11} & -k_1 A' D_{11} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \eta_x \end{pmatrix} \quad (\text{IV.26})$$

Avec

$$(1 - \mu \nabla^2) Q_{xz} = A_{44}^s \gamma_{xz} \quad (\text{IV.27})$$

Où les composants de rigidité A_{11}, B_{11}, D_{11} et A_{55} sont définis comme

$$\{A_{11}, B_{11}, D_{11}\} = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{11}(z) (1, z, z^2) dz \quad (\text{IV.28})$$

$$A_{44}^s = F_c^s \int_{-h/2}^{h/2} Q_{44}(z) dz \quad (\text{IV.29})$$

Avec " F_c^s " est le facteur de correction de cisaillement.

Pour obtenir les équations du mouvement en fonction des termes de déplacement " $\delta u_0, \delta w_0$ et $\delta \theta$ ", il suffit de remplacer Eq. (24) dans (26). Les équations du mouvement deviennent:

$$A_{11} \frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} - k_1 A' B_{11} \frac{\partial^3 \theta_0}{\partial x^3} = I_0 \ddot{u}_0 + I_1 k_1 A' \frac{\partial^3 \ddot{\theta}_0}{\partial x^3} \quad (\text{IV.30a})$$

$$\begin{aligned} & -A_{55} \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} - k_1 A' \frac{\partial^2 \theta_0}{\partial x^2} \right) - (N^T + N^H) \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \right) - k_w w_0 \\ & -k_s \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \right) = -I_0 \ddot{w}_0 \end{aligned} \quad (\text{IV.30b})$$

$$\begin{aligned} & -k_1 A' B_{11} \frac{\partial^3 u_0}{\partial x^3} - k_1 A' D_{11} \frac{\partial^4 \theta_0}{\partial x^4} + A_{44}^s k_1 A' \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} - k_1 A' \frac{\partial^2 \theta_0}{\partial x^2} \right) = \\ & I_1 k_1 A' \frac{\partial \ddot{u}_0}{\partial x} + I_2 (k_1 A')^2 \frac{\partial^2 \ddot{\theta}_0}{\partial x^2} \end{aligned} \quad (\text{IV.30c})$$

VI.3 Solution analytique

Pour résoudre analytiquement les équations de mouvement ci-dessus pour étudier le comportement vibratoire des nanopoutres FG simplement appuyée, il est préférable d'utiliser la méthode de Navier dont les termes de déplacement sont supposés comme suit (Ebrahimi et Salari 2015).

$$\begin{Bmatrix} u_0 \\ w_0 \\ \theta \end{Bmatrix} = \sum_{m=1}^{\infty} \begin{Bmatrix} u_m \cos(\lambda x) e^{i\omega t} \\ w_m \sin(\lambda x) e^{i\omega t} \\ \theta_m \sin(\lambda x) e^{i\omega t} \end{Bmatrix} \quad (\text{IV.31})$$

Où les termes " u_m, w_m et θ_m " sont des paramètres arbitraires à trouver, " ω " est la fréquence propre correspondre au m -theigenmo de substitution de la solution analytique (Méthode de Navier) d'Eq. (30) dans les équations de mouvement Eq. (29), on obtient le système matricielle suivant :

$$\left(\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} - \xi \omega \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} u_m \\ w_m \\ \theta_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (\text{IV.32})$$

Où

$$\begin{aligned} a_{11} &= -A_{11} \lambda^2; & a_{12} &= 0 \\ a_{13} &= -B_{11} k_1 A' \lambda^3; & a_{21} &= a_{12} \\ a_{22} &= -A_{55}^s \lambda^2 + (N^T + N^H) \lambda^2 \\ a_{23} &= -A_{55}^s k_1 A' \lambda^2; & a_{31} &= B_{11} \lambda^3 \\ a_{32} &= A_{55}^s k_1 A' \lambda^2 + D_{11} k_1 A' \lambda^4 \\ a_{33} &= -A_{55}^s \lambda^2 \\ m_{11} &= -I_0; & m_{12} &= 0 \\ m_{13} &= I_1 k_1 A'; & m_{21} &= m_{12} \\ m_{22} &= -I_0; & m_{23} &= 0 \\ m_{31} &= -I_1 \lambda; & m_{32} &= m_{23} \\ m_{33} &= I_2 k_1 A' \lambda^2; & \xi &= 1 + \mu \lambda^2 \end{aligned} \quad (\text{IV.33})$$

Dans le premier modèle l'humidité et la température augmentent uniformément. L'humidité de " C_0 " à une valeur finale " C " avec " $\Delta C = C - C_0$ ". aussi, la température de " T_0 " à une valeur finale " T " avec " $\Delta T = T - T_0$ ".

VI.4 Types de charge externes (charge hygro-thermique)

IV.4.1 Modèle uniforme

Dans le premier modèle l'humidité et la température augmentent uniformément. L'humidité de " C_0 " à une valeur finale " C " avec " $\Delta C = C - C_0$ ". aussi, la température de " T_0 " à une valeur finale " T " avec " $\Delta T = T - T_0$ ".

IV.4.2 Modèle linéaire

Dans le deuxième modèle, l'humidité et la température augmentent linéairement à travers l'épaisseur des nanopoutres FG (Kiani and Eslami, 2013).

$$\begin{aligned} T &= T_m + \Delta T \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right) \\ C &= C_m + \Delta C \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right) \end{aligned} \quad (\text{IV.34})$$

Où $(\Delta T, \Delta C)$ sont définies comme

$$\Delta T = T - T_0 \quad \text{and} \quad \Delta C = C - C_0 \quad (\text{IV.35})$$

IV.4.3 Modèle sinusoïdale

Dans le troisième modèle, l'élévation de l'humidité et la température sont appuyée varier selon la fonction sinusoïdale (Na and Kim 2004; Ebrahimi and Barati 2016b).

$$\begin{aligned} T &= T_m + \Delta T \left(1 - \cos \left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right) \right) \right) \\ C &= C_m + \Delta C \left(1 - \cos \left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right) \right) \right) \end{aligned} \quad (\text{IV.36})$$

Avec
$$\Delta T = T - T_0 \quad \text{et} \quad \Delta C = C - C_0 \quad (\text{IV.37})$$

Sont les changements de température et d'humidité.

VI.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une solution générale du comportement mécanique en vibration libre des nanopoutres en matériaux à gradient des propriétés « FGMs » en utilisant une nouvelle théorie d'ordre élevé d'où le nombre de fonctions inconnues est seulement deux, tandis que trois ou plus dans le cas des autres théories déformation de cisaillement. La théorie présentée à une forte similitude avec la théorie classique des poutres dans de nombreux aspects, n'exige pas de facteur de correction de cisaillement, et donne une description parabolique des contraintes de cisaillement à travers l'épaisseur tout en remplissant la condition de contraintes de cisaillement nulles sur les bords libres. Les résultats présentés dans le chapitre suivant permettent d'apprécier clairement l'apport de cette théorie en les comparants avec les résultats des autres théories d'ordre élevé.

Chapitre V

Résultats Numériques et Discussion

V.1 Introduction

Dans ce travail, le comportement de la vibration libre des nanopoutres P-FG et S-FG symétrique est étudié en utilisant une théorie des poutres de déformation de cisaillement en terme intégrale nonlocale. La poutre est reposée sur une fondation élastique de type (Winkler-Pasternak). Dans la première section, plusieurs comparaisons sont fournies pour valider le modèle actuel et la deuxième partie est dédiée pour les études paramétriques pour déterminer les différents facteurs influençant la fréquence fondamentale des nanopoutres FG simplement appuyé reposant sur des fondations élastiques.

V.2 Comparaison et validation

Pour comparer les résultats actuels obtenus en utilisant une théorie de déformation par cisaillement en terme intégrale nonlocale avec ceux obtenus par les autres théories existantes dans la littérature, les fréquences fondamentales non dimensionnelles et les paramètres de fondation sont présentés sous la forme adimensionnelle suivante :

$$\hat{\omega} = \omega L^2 \sqrt{\frac{\rho_c A}{E_c I}},$$

$$K_w = k_w \frac{L^4}{E_c I}, K_s = k_s \frac{L^2}{E_c I} \quad (V.1)$$

Tableau 1 présenter une comparaison de la fréquence fondamentale non-dimensionnel " $\hat{\omega}$ " des nanopoutres P-FG simplement appuyée sous élévation linéaire de température thermique avec ($L/h = 20; F_c^s = 5/6$ et $K_w = K_s = 0$). Le tableau montre que les résultats actuels sont en bon accord avec ceux donnés par la théorie des poutres de Timoshenko "TBT" développée par Ebrahimi et Salari (2015) et la théorie des poutres classique "CBT" exagérer légèrement la fréquence fondamentale " $\hat{\omega}$ " en raison de la négligence de l'effet de déformation par cisaillement et ceci est assuré pour toutes les valeurs de l'indice de loi de puissance " p " et l'effet d'échelle " μ ".

La Comparaison de la fréquence fondamentale adimensionnel " $\hat{\omega}$ " des nanopoutres P-FG sans fondation élastique ($K_w = K_s = 0$) sous les trois types proposés de la charge hygro-thermique (uniforme, Linéaire et sinusoïdal) sont présentés dans les tableaux (2, 3 et 4), respectivement. À partir des résultats présentés dans les tableaux, il est confirmé encore une fois que le modèle actuel donne presque les mêmes valeurs de la fréquence fondamentale adimensionnelle " $\hat{\omega}$ " que

le modèle "TBT" publié par Ebrahimi et Salari (2015), et le modèle "CBT" donne des grandes valeurs de fréquence " $\hat{\omega}$ " à cause de la négligence de l'effet de déformation de cisaillement. On peut observer sur les tableaux que la fréquence fondamentale " $\hat{\omega}$ " est en relation inverse avec l'indice de puissance " p " pour les différents valeurs de l'effet d'échelle " μ " et toute type de chargement hygro-thermique (charge uniforme, Linéaire et sinusoïdal) avec $(\Delta T, \Delta C) = (0, 0), (20, 1)$ et $(40, 2)$. On peut conclure que l'augmentation des valeurs de la charge hygro-thermique $(\Delta T, \Delta C)$ conduit à diminuer les valeurs de la fréquence " $\hat{\omega}$ ".

Tableau V. 1: Comparaison de la fréquence fondamentale " $\hat{\omega}$ " non-dimensionnelle des nanopoutres P-FG simplement appuyée sous élévation de température linéaire sans fondation élastique avec divers indices de gradient ($L = 20h$)

μ	$p = 0$			$p = 0.2$			$p = 1$			$p = 5$		
	CBT	TBT	Présente	CBT	TBT	Présente	CBT	TBT	Présente	CBT	TBT	Présente
0	9,1796	9,1475	9,1454	7,3681	7,342	7,3423	5,374	5,3537	5,3545	4,3059	4,2875	4,2878
1	8,691	8,6601	8,6601	6,967	6,9419	6,9422	5,0676	5,048	5,0488	4,0496	4,0317	4,0320
2	8,2608	8,231	8,2310	6,6135	6,5892	6,5895	4,7967	4,7777	4,7785	3,8223	3,8049	3,8052
3	7,8777	7,8488	7,8488	6,2983	6,2747	6,2750	4,5545	4,536	4,5367	3,6185	3,6015	3,6018
4	7,5334	7,5053	7,5053	6,0145	5,9916	5,9918	4,3357	4,3177	4,3184	3,4338	3,1472	3,4175

Tableau V.2: Variation des fréquences fondamentales " $\hat{\omega}$ " non dimensionnelle des nanopoutres P-FG simplement appuyée sous une charge hygro-thermique uniforme (UH-TL) pour diverses théories de poutre ($L = 20h$ et $K_w = K_s = 0$)

Théorie des poutres		$(\Delta T, \Delta C) = (0,0)$			$(\Delta T, \Delta C) = (20,1)$			$(\Delta T, \Delta C) = (40,2)$		
		$p=0.2$	$p=1$	$p=5$	$p=0.2$	$p=1$	$p=5$	$p=0.2$	$p=1$	$p=5$
0	CBT	7,9923	5,9506	4,8629	7,4706	5,2423	4,0328	6,9006	4,4134	2,9692
	TBT	7,9683	5,9324	4,8466	7,4449	5,2216	4,0132	6,8728	4,3887	2,9423
	présente	7.9687	5.9333	4.847	7.4452	5.2224	4.0134	6.8731	4.3894	2.9425
1	CBT	7,6249	5,677	4,6393	7,0759	4,9289	3,7594	6,471	4,0354	2,5845
	TBT	7,602	5,6597	4,6238	7,0512	4,9089	3,7402	6,4439	4,0108	2,5564
	présente	7.6023	5.6606	4.6242	7.0515	4.9097	3.7405	6.4442	4.0115	2.5566
2	CBT	7,3039	5,438	4,444	6,7285	4,6511	3,5148	6,0889	3,6902	2,2125
	TBT	7,2819	5,4214	4,4292	6,7047	4,6316	3,496	6,0625	3,6655	2,1824
	présente	7.2823	5.4223	4.4295	6.705	4.6323	3.4962	6.0628	3.6661	2.1826
3	CBT	7,0203	5,2269	4,2714	6,4193	4,4018	3,2933	5,7452	3,37	1,8393
	TBT	6,9992	5,2109	4,2572	6,3963	4,3828	3,2747	6,7193	3,345	1,8057
	présente	6.9995	5.2118	4.2575	6.3966	4.3835	3.2749	5.7196	3.3456	1.8058
4	CBT	6,7673	5,0385	4,1175	6,1415	4,176	3,0904	5,4328	3,0686	1,4438
	TBT	6,747	5,0231	4,1038	6,1191	4,1574	3,0721	5,4074	3,0431	1,4039
	présente	6.7473	5.024	4.1041	6.1194	4.1581	3.0723	5.4077	3.0436	1.404

Tableau V.3: Variation des fréquences fondamentales " $\hat{\omega}$ " non dimensionnelle des nanopoutres P-FG simplement appuyée sous une charge hygro-thermique linéaire (LH-TL) pour diverses théories de poutre ($L = 20h$ et $K_w = K_s = 0$)

μ	Théorie des poutres	$(\Delta T, \Delta C) = (0,0)$			$(\Delta T, \Delta C) = (20,1)$			$(\Delta T, \Delta C) = (40,2)$		
		$p=0.2$	$p=1$	$p=5$	$p=0.2$	$p=1$	$p=5$	$p=0.2$	$p=1$	$p=5$
0	CBT	7,9053	5,868	4,7844	7,688	5,5817	4,4153	7,46	5,2763	4,0085
	TBT	7,881	5,8496	4,7679	7,6631	5,5623	4,3974	7,4343	5,2557	3,9887
	présente	7.8814	5.8505	4.7683	7.6634	5.5632	4.3977	7.4346	5.2565	3.989
1	CBT	7,5336	5,5904	4,557	7,3051	5,2885	4,167	7,0644	4,9645	3,7326
	TBT	7,5105	5,5728	4,5413	7,2812	5,2698	4,1498	7,0397	4,9445	3,7132
	présente	7.5108	5.5737	4.5416	7.2815	5.2707	4.1501	7.04	4.9453	3.7135
2	CBT	7,2086	5,3476	4,358	6,9691	5,0306	3,9478	6,7162	4,6882	3,4854
	TBT	7,1864	5,3307	4,3429	6,9461	5,0126	3,9311	6,6923	4,6688	3,4663
	présente	7.1867	5.3316	4.3432	6.9464	5.0134	3.9314	6.6927	4.6695	3.4666
3	CBT	6,9211	5,1327	4,1819	6,6711	4,8011	3,7519	6,4063	4,4405	3,2612
	TBT	6,8997	5,1164	4,1674	6,6489	4,7836	3,7357	6,3831	4,4216	3,2424
	présente	6.9	5.1173	4.1677	6.6492	4.7844	3.7359	6.3834	4.4223	3.2426
4	CBT	6,6644	4,9408	4,0246	6,4042	4,5949	3,5752	6,1277	4,2163	3,0556
	TBT	6,6437	4,9251	4,0105	6,3827	4,578	3,5593	6,1052	4,1978	3,037
	présente	6.644	4.9259	4.0108	6.383	4.5788	3.5596	6.1055	4.1985	3.0372

Tableau V.4: Variation des fréquences fondamentales " $\hat{\omega}$ " non dimensionnelle des nanopoutres P-FG simplement appuyée sous une charge hygro-thermique sinusoïdal (SH-TL) pour diverses théories de poutre ($L = 20h$ et $K_w = K_s = 0$)

μ	Théorie des poutres	$(\Delta T, \Delta C) = (0,0)$			$(\Delta T, \Delta C) = (20,1)$			$(\Delta T, \Delta C) = (40,2)$		
		$p=0.2$	$p=1$	$p=5$	$p=0.2$	$p=1$	$p=5$	$p=0.2$	$p=1$	$p=5$
0	CBT	7,9053	5,868	4,7844	7,7592	5,6833	4,5349	7,607	5,4897	4,2683
	TBT	7,881	5,8496	4,7679	7,7344	5,6642	4,5174	7,5818	5,4699	4,2497
	présente	7,881	5,851	4,768	7,7348	5,6651	4,5178	7,582	5,471	4,25
1	CBT	7,5336	5,5904	4,557	7,3799	5,3956	4,2936	7,2194	5,1907	4,0102
	TBT	5,5105	5,5728	4,5413	7,3562	5,3773	4,2768	7,1953	5,1717	3,9922
	présente	7,511	5,574	4,542	7,3565	5,3782	4,2771	7,1955	5,1725	3,9925
2	CBT	7,2086	5,3476	4,358	7,0475	5,143	4,0811	6,8791	4,9272	3,7812
	TBT	7,1864	5,3307	4,3429	7,0248	5,1254	4,0649	6,8558	4,9087	3,7637
	présente	7,187	5,332	4,343	7,0251	5,1263	4,0652	6,8561	4,9095	3,7640
3	CBT	6,9211	5,1327	4,1819	6,753	4,9188	3,892	6,5768	4,6921	3,5756
	TBT	6,8997	5,1164	4,1674	6,731	4,9018	3,8763	6,5543	4,6742	3,5585
	présente	6,9	5,117	4,168	6,7313	4,9026	3,8766	6,5546	4,6750	3,5588
4	CBT	6,6644	4,9408	4,0246	6,4894	4,7178	3,7219	6,3058	4,4806	3,3892
	TBT	6,6437	4,9251	4,0105	6,4682	4,7013	3,7067	6,284	4,4631	3,3724
	présente	6,644	4,926	4,011	6,4685	4,7021	3,7070	6,2842	4,4639	3,3727

V.3 Etudes paramétriques

V.3.1 Nanopoutre S-FG symétrique et P-FG sans fondation élastique

Dans cette partie présente l'analyse du comportement dynamique des nanopoutres P-FG et S-FG symétrique sous une charge hygro-thermique (HTL) sans fondation élastique ($K_w = K_s = 0$) avec " $p = 0.1$ et $L = 10h$ ".

La **fig. 1** présente la variation des fréquences non-dimensionnelle " $\hat{\omega}$ " des nano-poutres S-FG symétrique et P-FG simplement appuyées sous des charges hygro-thermiques uniforme (UHTL), linéaire (LHTL) et sinusoïdal (SHTL) en fonction de la concentration d'humidité " ΔC " et de l'effet à petite échelle " μ " avec " $\Delta T = 40K$ ". à partir des graphes tracés, on peut observer que les fréquences non dimensionnelle " $\hat{\omega}$ " diminuent avec l'augmentation de la concentration d'humidité " ΔC " et l'effet à petite échelle " μ ".

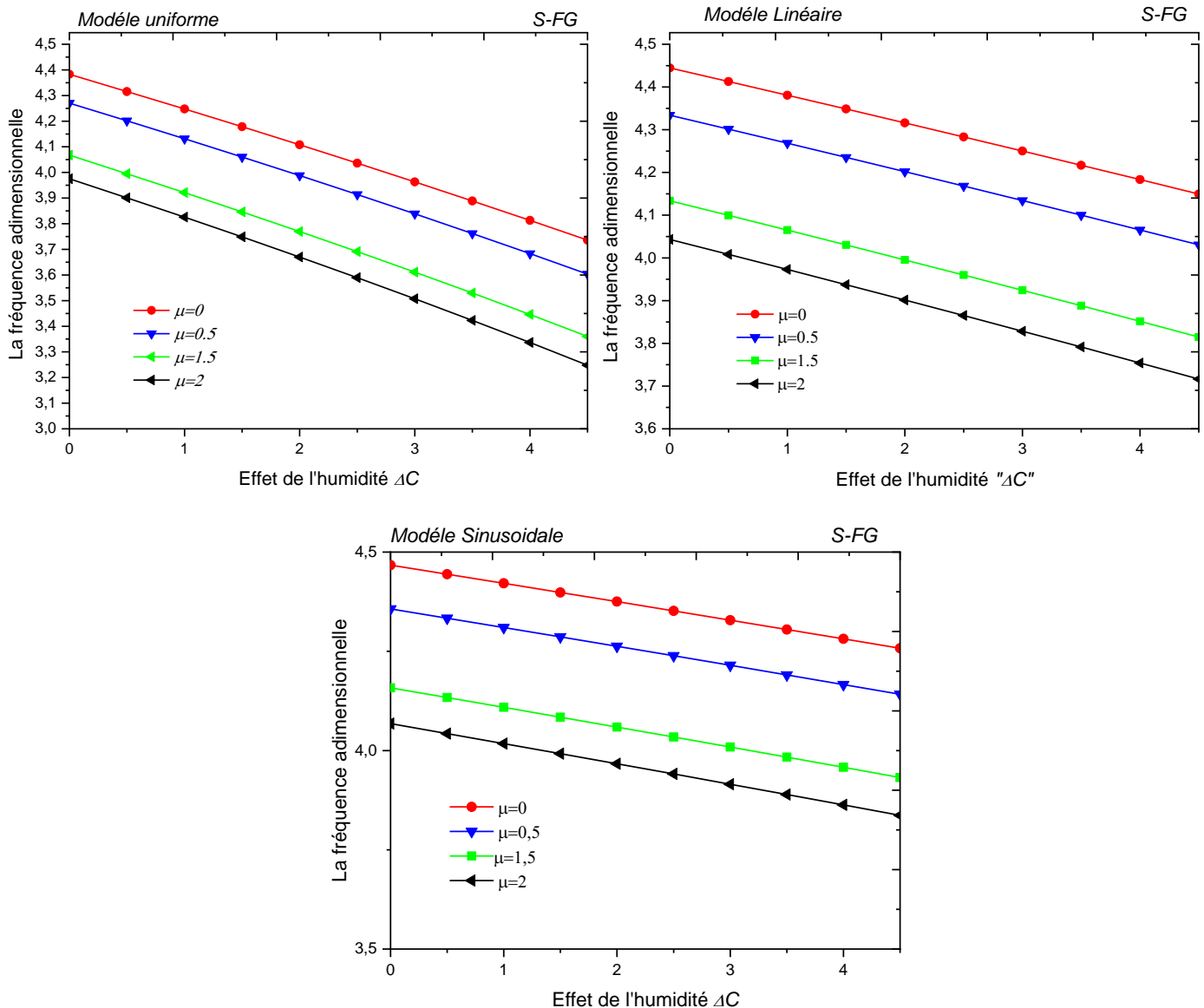


Figure V.1a : Effet de l'humidité " ΔC " et des paramètres non locaux sur la fréquence " $\hat{\omega}$ " adimensionnelle des nanopoutres Symétrique S-FG sous diverses charges hygro-thermiques " $p = 0.1, L = 10 h$ et $\Delta T = 40K$ "

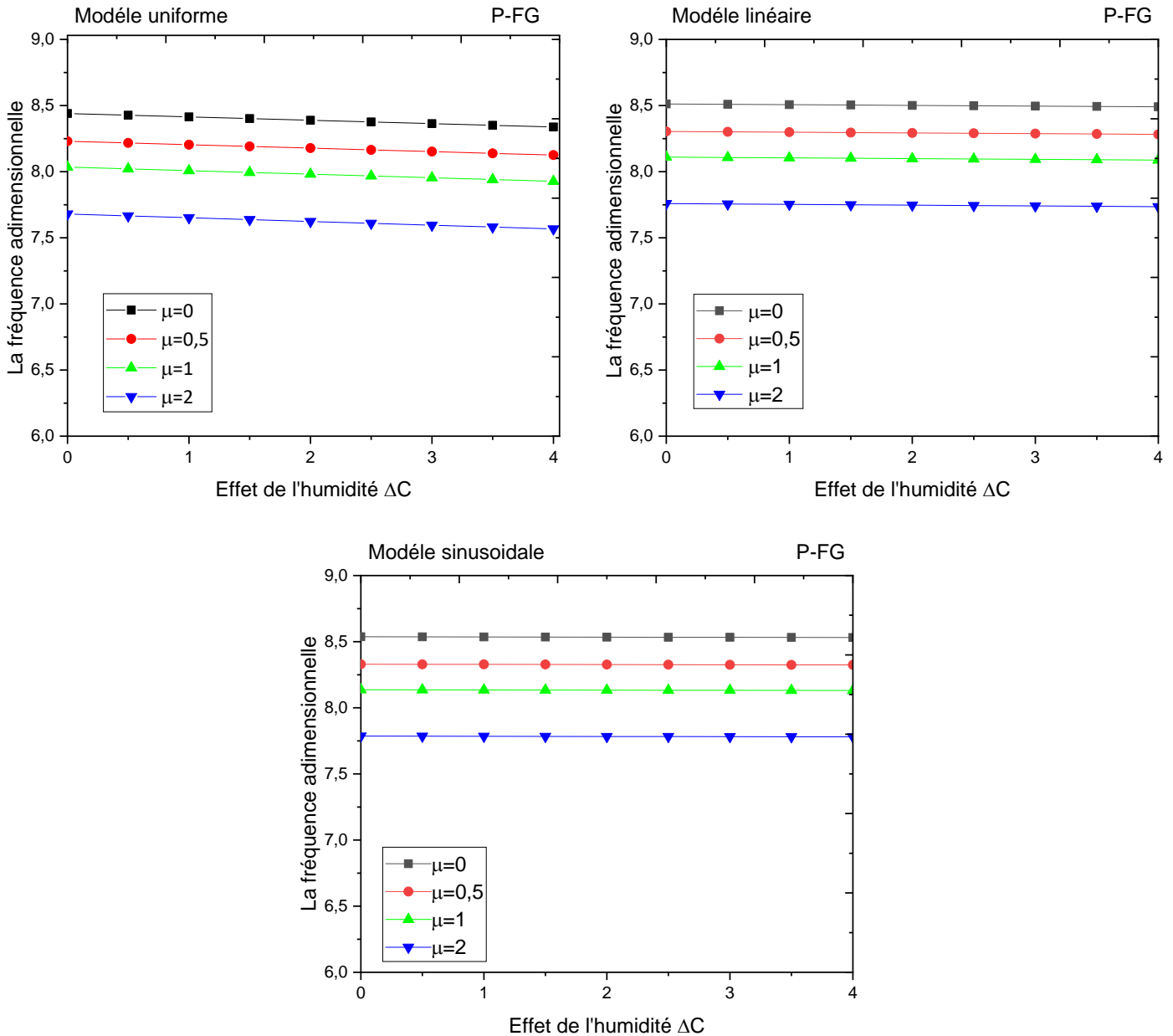


Figure V.1b : effet de l'humidité " ΔC " et des paramètres non locaux sur la fréquence " $\hat{\omega}$ " adimensionnelle des nanopoutres P-FG sous diverses charges hygro-thermiques " $p = 0.1, L = 10 h$ et $\Delta T = 40K$ "

L'effet de l'élévation de température et de l'humidité " ΔC " sur la fréquence adimensionnelle " $\hat{\omega}$ " des nano-poutres S-FG symétrique et P-FG sous diverses charges hygro-thermiques est illustré dans la Fig.2. Il est remarquable d'après les résultats obtenus que l'augmentation de la température " ΔT " et de l'humidité " ΔC " conduit à la diminution des valeurs de la fréquence " $\hat{\omega}$ " et ceci est valable pour les trois types de charges hygro-thermiques (UHTL, LHTL et SHTL). Les

plus petites valeurs de la fréquence adimensionnelle " $\hat{\omega}$ " sont obtenues par le modèle de chargement uniforme(UHTL).

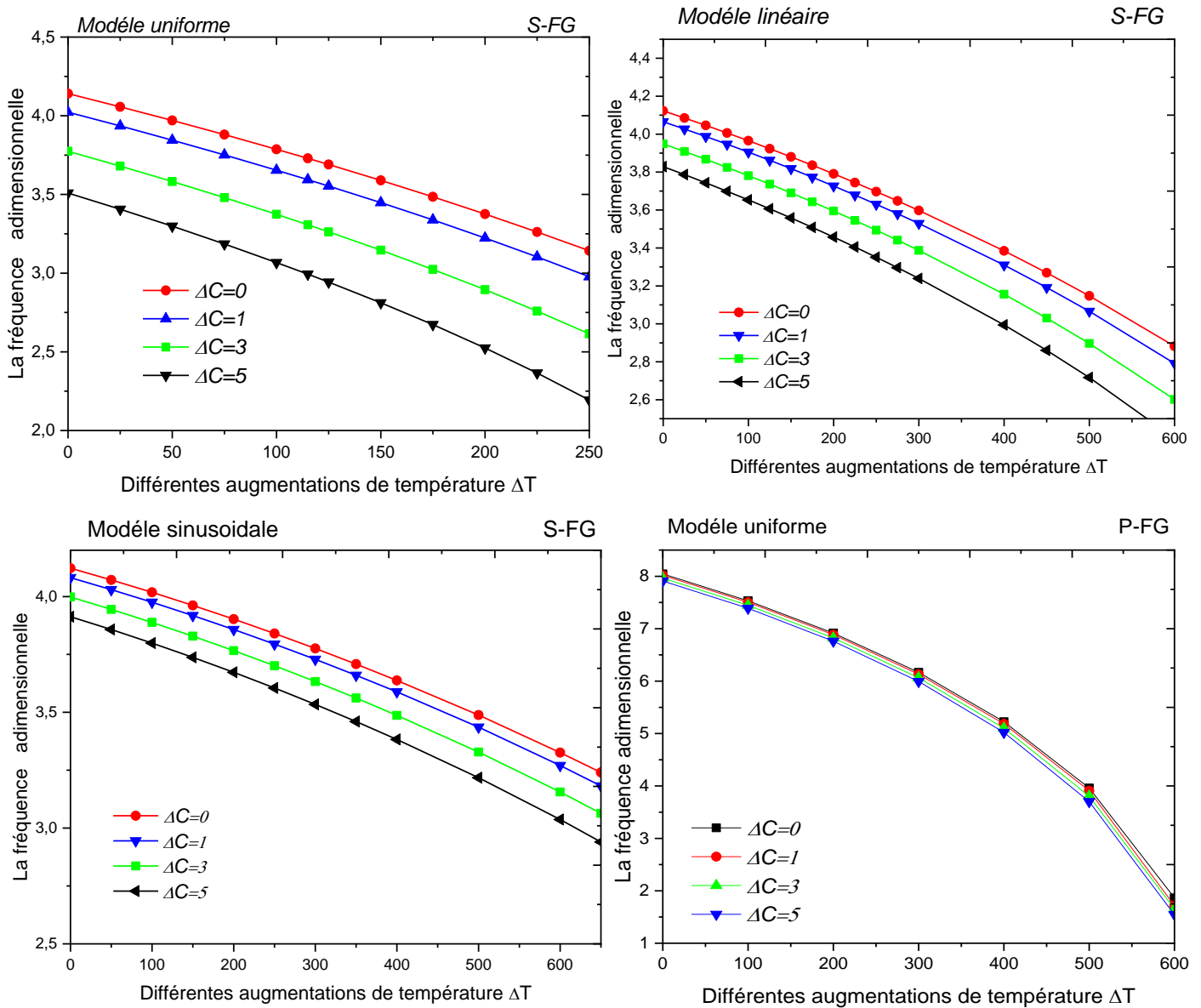


Figure V.2 : effet de la concentration d'humidité " ΔC " sur la fréquence adimensionnelle " $\hat{\omega}$ " des nanopoutres Symétrique S-FG et P-FG par rapport à différentes augmentations de température " ΔT " avec " $p = 0.1$ et $L = 10 h$ "

3.2 Nanopoutre symétrique S-FG et P-FG sur fondation élastique

La **fig.3** illustre la variation des valeurs de la fréquence adimensionnelle " $\hat{\omega}$ " des nano-poutres S-FG symétrique et P-FG sous des charges thermiques et hygro-thermiques uniformes, linéaires et sinusoïdales en fonction des paramètres de la fondation " K_w et K_s " et l'élévation de température " ΔT " avec " $p = 0.1$, $L = 10 h$ et $\mu = 1.5 nm$ ". On peut voir sur les figures que la

fréquence adimensionnelle " $\hat{\omega}$ " est en relation inverse avec les paramètres de fondation élastique et la température " ΔT ". Les fréquences des nano-poutres FG sous la charge thermique uniquement " $\Delta C = 0$ " donne des valeurs de fréquence plus élevées par rapport au nano-poutres FG sous chargement hygro-thermique avec " $\Delta C = 1$ "

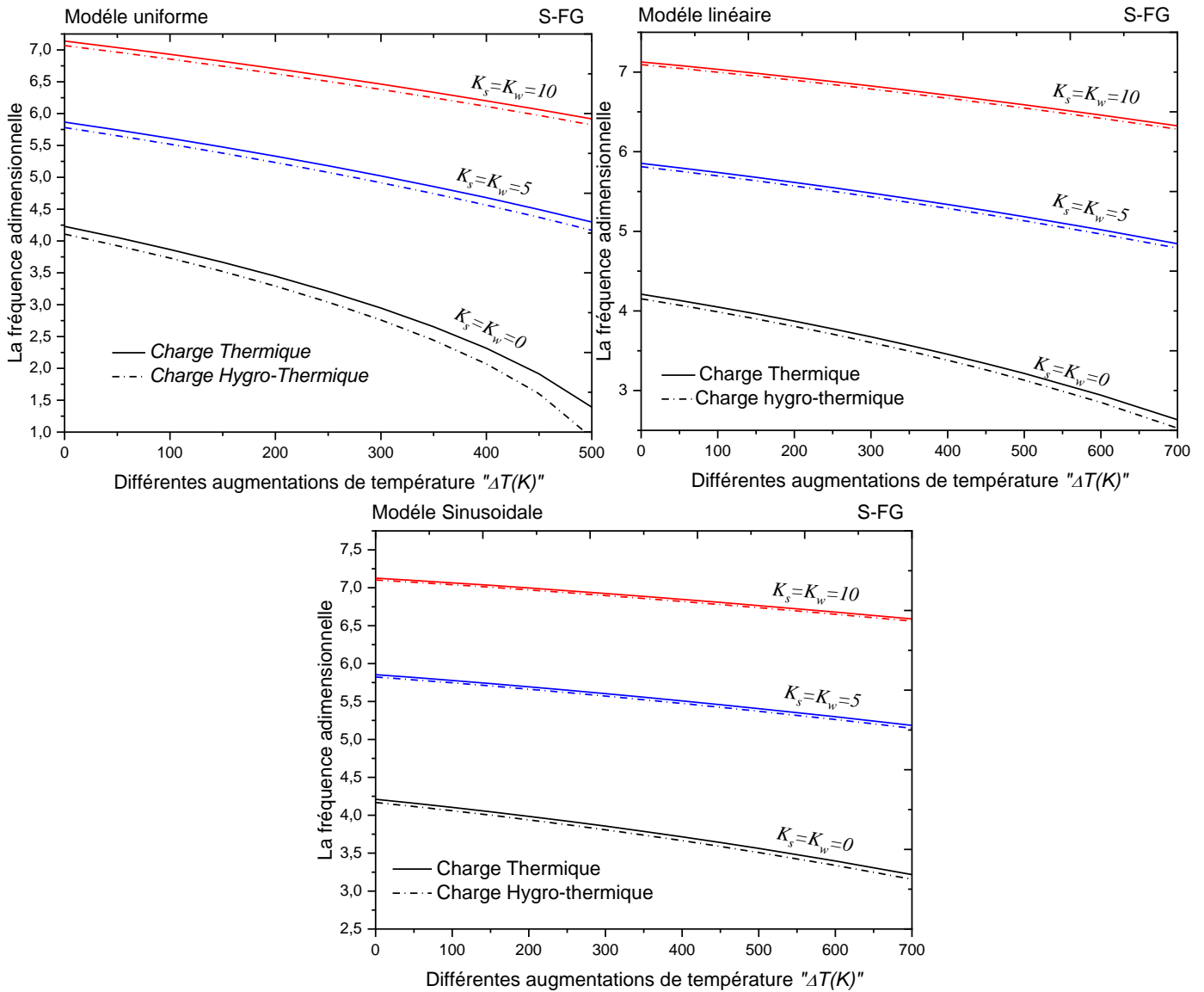


Figure V.3 : Influence des fondations élastiques sur la fréquence adimensionnelle des nanopoutres symétrique S-FG en fonction du changement de température pour les environnements thermiques " $\Delta C = 0$ " et hygro thermiques " $\Delta C = 1$ " avec " $p = 0.1, L = 10 h$ et $\mu = 1.5 nm$ ".

La variation des valeurs de la fréquence adimensionnelle " $\hat{\omega}$ " des nano-poutres S-FG symétrique sous chargement thermique " $\Delta C = 0$ " et hygro-thermique " $\Delta C = 1$ " en fonction de

l'indice de puissance " p " et du paramètre de fondation élastique " K_w et K_s " est présentée dans **fig.4**.

IL est a noté à partir des courbes tracées que la fréquence adimensionnelle " $\hat{\omega}$ " est en relation de corrélation directe avec l'indice de matériel " p " et la fondation élastique et cela est valable pour tous les types de distributions (uniforme, linéaire et sinusoidal).

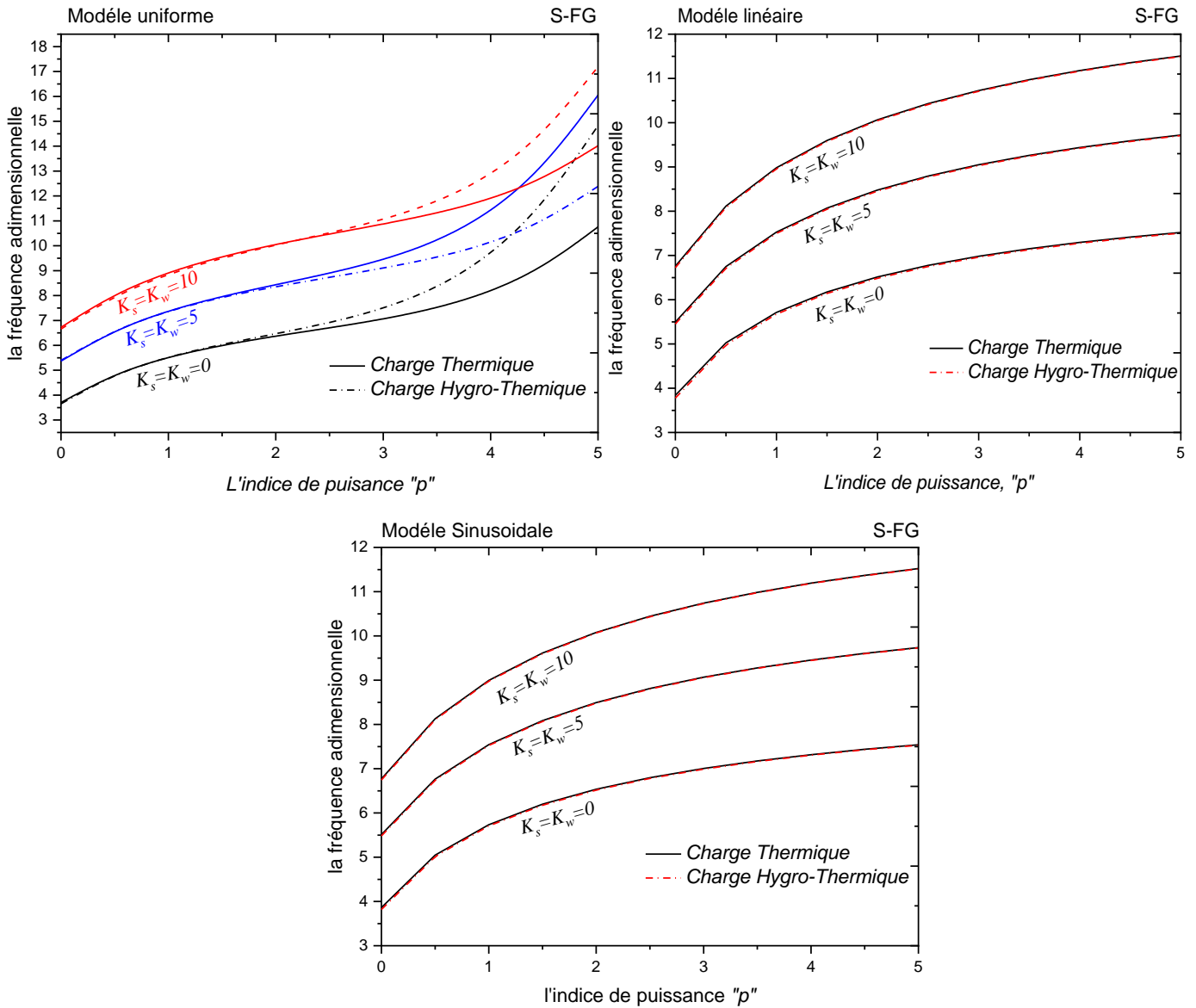


Figure V.4 : Influence de l'indice de puissance sur la fréquence adimensionnelle " $\hat{\omega}$ " des nanopoutres symétrique S-FG pour les environnements thermiques " $\Delta C = 0$ " et hygro-thermiques " $\Delta C = 1$ ", avec " $L = 10 h$, $\Delta T = 40 K$ et $\mu = 1.5 nm$ "

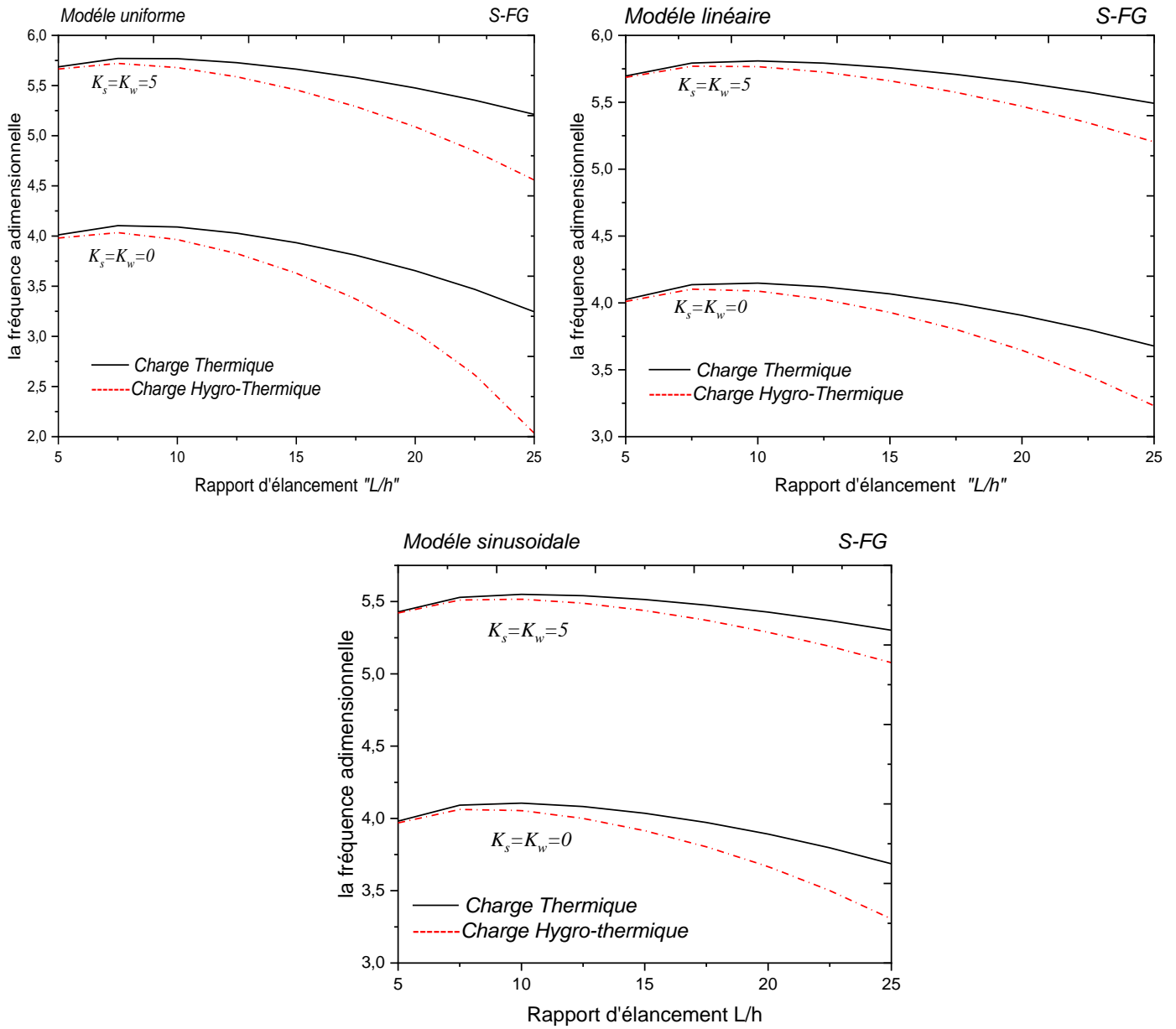


Figure V.5a : L'effet du rapport d'élanement sur la fréquence adimensionnelle des nanopoutres symétrique S-FG sous l'augmentation d'humidités uniformes et linéaires
 " $p = 0.1, L = 10 h, \Delta T = 40K$ et $\mu = 1.5 nm$ "

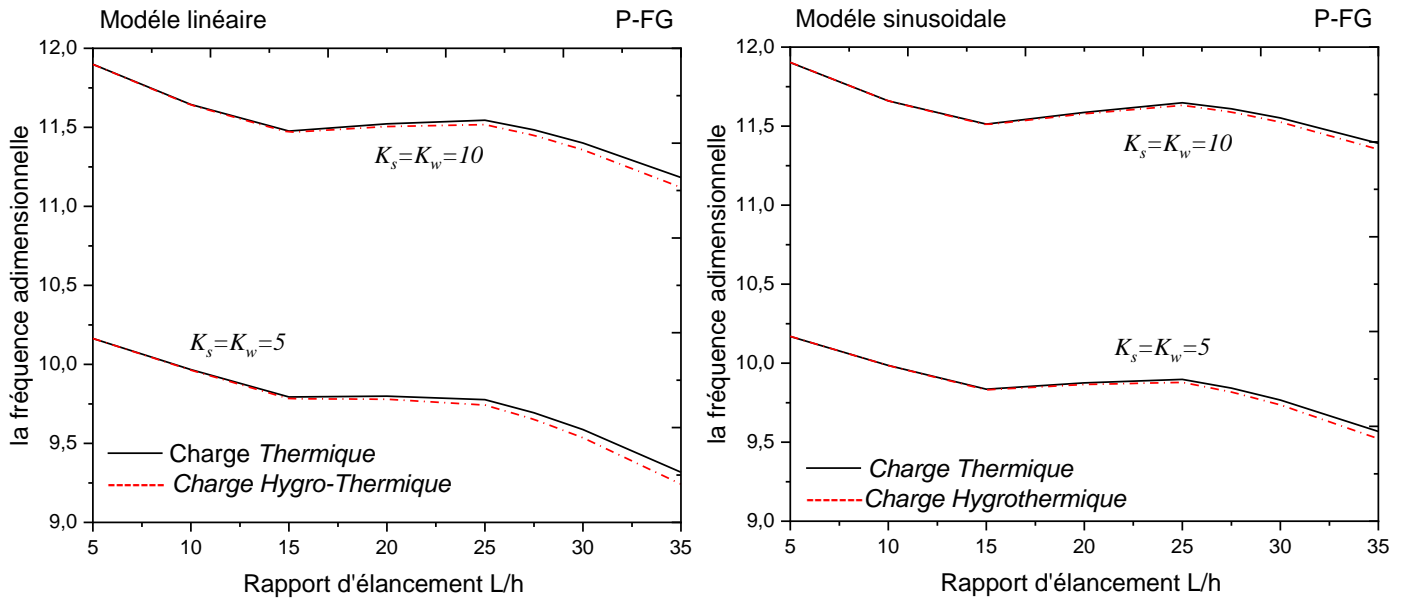


Figure V.6b : L'effet du rapport d'élongement sur la fréquence adimensionnelle des nanopoutres P-FG sous l'augmentation d'humidités uniformes et linéaires " $p = 0.1, L = 10 h, \Delta T = 40K$ et $\mu = 1.5 nm$ "

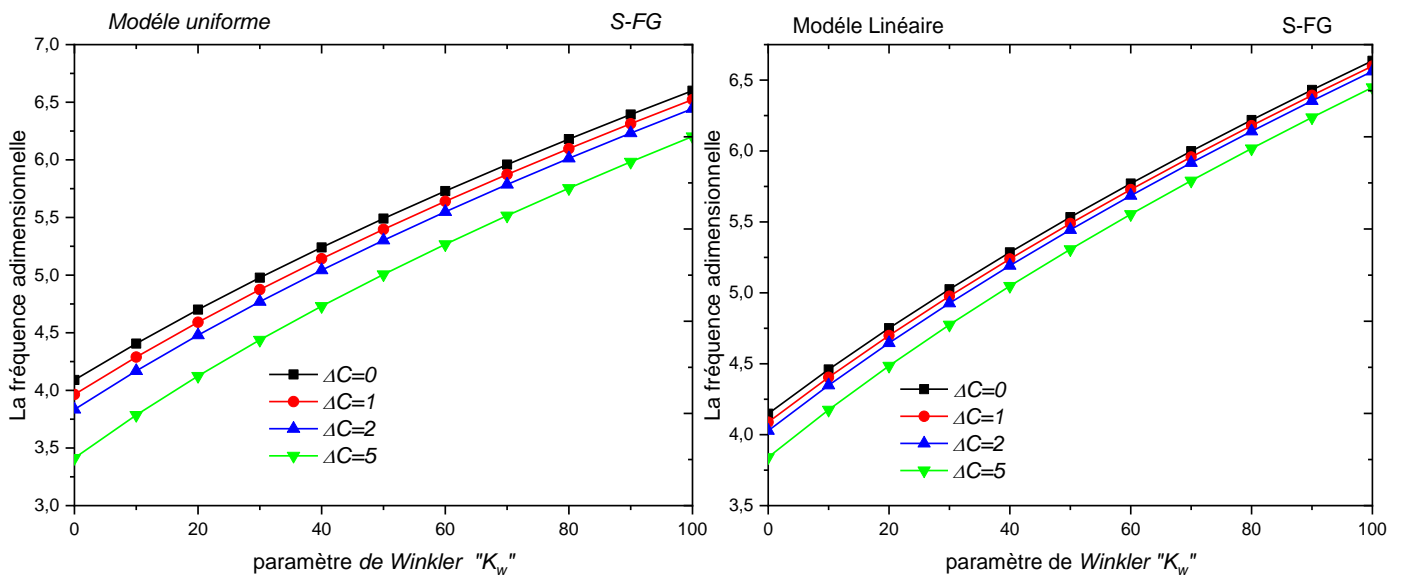


Figure V.6a : Influence des paramètres des fondations élastiques " K_w, K_s " sur la fréquence adimensionnelle " $\hat{\omega}$ " des nanopoutres symétrique S-FG sous l'augmentation d'humidité uniformes et linéaires " $p = 0.1, L = 10 h, \Delta T = 40K$ et $\mu = 1.5 nm$ "

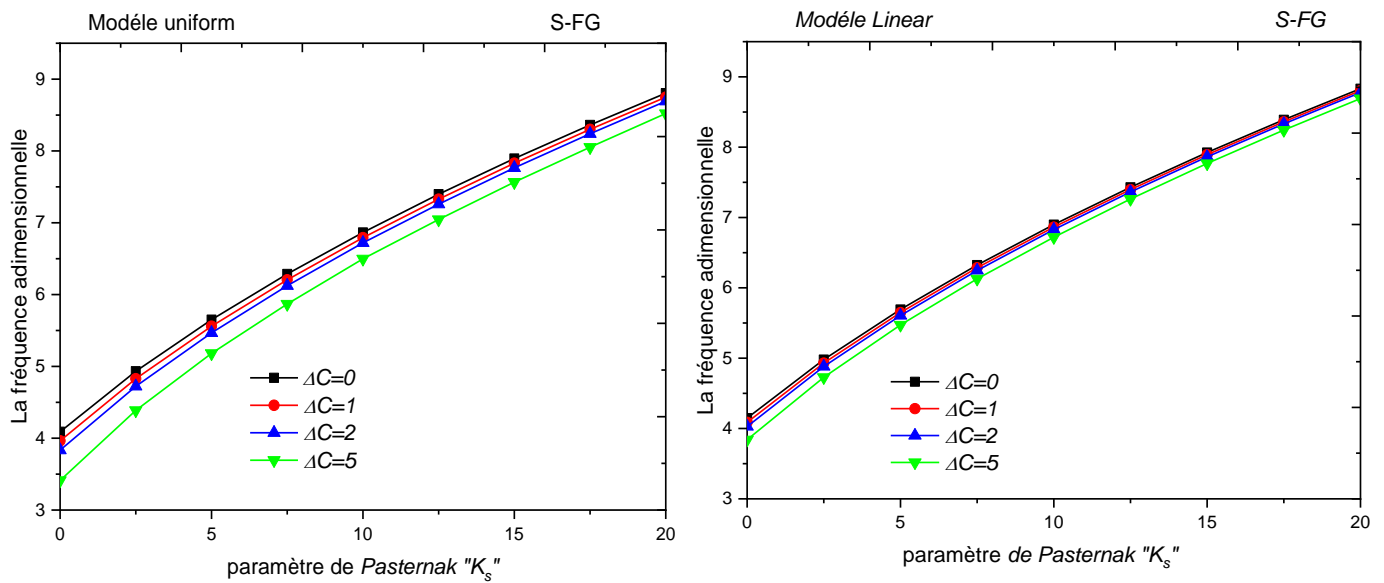


Figure V.6b : Influence des paramètres des fondations élastiques " K_w, K_s " sur la fréquence adimensionnelle " $\hat{\omega}$ " des nanopoutres symétrique S-FG sous l'augmentation d'humidité uniformes et linéaires " $p = 0.1, L = 10 h, \Delta T = 40K$ et $\mu = 1.5 nm$ "

Effet du rapport de géométrie " L/h " sur la fréquence adimensionnel " $\hat{\omega}$ " des nanopoutres symétrique S-FG et P-FG sous une augmentation d'humidité uniforme et linéaire " ΔC " avec " $p = 0.1, L = 10 h, \Delta T = 40K$ " est illustré dans les courbes traces sur la **Fig. 5**.

On peut observer que l'augmentation du rapport d'élanement conduit à une augmentation légère de la fréquence adimensionnelle " $\hat{\omega}$ " jusqu'à une valeur maximale pour " $L/h = 7.5$ " puis la fréquence " $\hat{\omega}$ " diminue car la nano-poutre devient élancée.

Fig. 6 montre les variations de la fréquence adimensionnelle " $\hat{\omega}$ " des nano-poutres S-FG symétrique sous des changements uniformes et linéaires d'humidité " ΔC " avec " $p = 0.1, et \mu = 1.5 nm$ " en fonction du paramètre de Winkler et Pasternak " K_w, K_s ". A partir des résultats obtenus, on peut conclure que la présence de la fondation élastique conduit a une augmentation de la fréquence nondimensionnelle " $\hat{\omega}$ " parce que les nano-poutres S-FG symétrique deviennent plus rigide.

Il est remarquable aussi que l'augmentation de l'humidité réduit les valeurs de la fréquence " $\hat{\omega}$ " et cela est valide pour le chargement hygrothermique uniforme et linéaire.

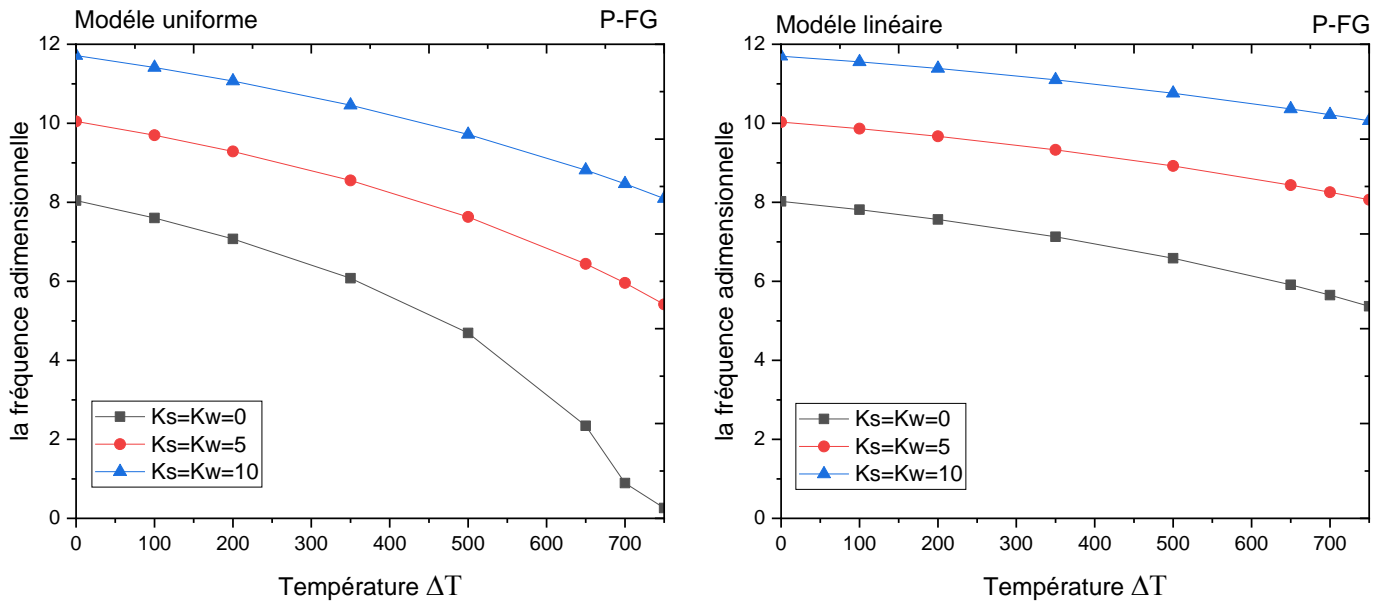


Figure V.7 : Influence des fondations élastiques sur la fréquence adimensionnelle des nanopoutres P-FG en fonction du changement de température " ΔT " pour les environnements thermiques " $\Delta C = 0$ " avec " $p = 0.1$, $L = 10 h$ et $\mu = 1.5 nm$ ".

La **fig.7** illustre la variation des valeurs de la fréquence adimensionnelle " $\hat{\omega}$ " des nano-poutres P-FG sous des charges thermiques uniformes et linéaires en fonction des paramètres de la fondation Winkler-Pasternak " K_w et K_s " et l'élévation de température " ΔT " avec $\Delta C = 0$ " $p = 0.1$, $L = 10 h$ et $\mu = 1.5 nm$ ". On peut voir sur les figures que la fréquence adimensionnelle " $\hat{\omega}$ " est en relation inverse avec les paramètres de fondation élastique et la température " ΔT ".

V.4 Conclusion

Dans le travail actuel, une théorie des poutres de Timoshenko en terme intégrale nonlocale est développée pour l'analyse de vibration libre des nano-poutres P-FG et S-FG symétriques reposant sur une fondation Winkler-Pasternak soumis à un chargement thermique et hygrothermique. Les propriétés des matériaux thermo-élastiques sont considérées distribuées d'une façon non linéaire. La solution analytique de la présente investigation est obtenue sur la base du modèle de Hamilton et Navier. Plusieurs comparaisons numériques et études paramétriques ont été présentées et discutées en détail pour montrer la validité du modèle actuel et déterminer les différents paramètres influençant la fréquence fondamentale des nano-poutres FG. Une amélioration de la formulation actuelle sera envisagée dans les futures travaux pour examiner d'autres types de matériaux (Sharma et al. 2009, Kolahchi *et al.* 2016, Bozyigit et Yesilce 2016, Daouadji 2017, Lal et al. 2017, Salamat et Sedighi 2017, Kar *et al.* 2018, Panjehpour *et al.* 2018, Selmi et Bisharat 2018, Shahadat *et al.* 2018, Ayat et al. 2018, Li et al. 2018, Behera et Kumari 2018, Narwariya et al. 2018, Akbas 2019b, Katariya et al. 2019, Othman et al. 2019, Yüksela et Akbaş 2019, Abdou et al. 2019, Rajabiand Mohammad imehr 2019, Avcar 2019, Selmi 2019, Esmacili et Beni 2019).

Conclusion

générale

Conclusion Générale

Dans ce travail, d'une nouvelle théorie des poutres de Timoshenko intégral (I-TBT) a été développée pour l'analyse du comportement vibratoire des nano-poutres fonctionnellement graduées intégré dans un environnement hygrothermiques et reposant sur la fondation élastique type Winkler-Pasternak. L'effet de la petite échelle a été introduit en utilisant la théorie d'élasticité non-locale d'Eringen. Les équations de mouvement ont été dérivées et résolues par le principe d'Hamilton et les solutions analytiques de Navier.

Plusieurs résultats numériques ont été présentés pour montrer la validité, la simplicité et la précision de la présente théorie.

Les résultats obtenus sont très intéressants et sont comparés avec la théorie des poutres de Timoshenko "TBT" développée par Ebrahimi et Salari (2015) et la théorie des poutres classique "CBT". Un bon accord est confirmé entre le présent modèle et ceux trouvés dans la littérature.

A travers ce travail de recherche on peut conclure :

- la théorie des poutres classique "CBT" surestime légèrement la fréquence fondamentale " $\hat{\omega}$ " en raison de la négligence de l'effet de la déformation de cisaillement
- la fréquence fondamentale " $\hat{\omega}$ " est en relation inverse avec l'indice de puissance " p " pour les différentes valeurs de l'effet d'échelle " μ " et toute type de chargement hygro-thermique (charge uniforme, Linéaire et sinusoïdal)
- l'augmentation des valeurs de la charge hygro-thermique ($\Delta T, \Delta C$) conduit à diminuer les valeurs de la fréquence " $\hat{\omega}$ ".
- les fréquences non dimensionnelles " $\hat{\omega}$ " diminuent avec l'augmentation de la concentration d'humidité " ΔC " et l'effet à petite échelle " μ ".
- la fréquence adimensionnelle " $\hat{\omega}$ " est en relation inverse avec les paramètres de fondation élastique et la température " ΔT ".
- Les fréquences des nano-poutres FG sous la charge thermique uniquement " $\Delta C = 0$ " donne des valeurs de fréquence plus élevées par rapport au nano-poutres FG sous chargement hygro-thermique avec " $\Delta C = 1$ ".

Finalement, nous pouvons dire que le modèle actuel est exact pour résoudre les problèmes de l'analyse dynamique des nanostructures fonctionnellement gradué simplement appuyées

Conclusion Générale

reposant sur fondation élastiques type Winkler-Pasternak. La formulation analytique développée dans le cadre de cette thèse de doctorat peut être développée et enrichie. Nous envisageons, par exemple, en perspective, d'appliquer le présent modèle pour l'étude statique et dynamique des différentes formes de structures court et semi-courte en matériaux composites et fonctionnellement gradué ((Sharma et al. 2009, Kolahchiet *al.* 2016, Bozyigit et Yesilce 2016, Daouadji 2017, Lal et al. 2017, Salamat et Sedighi 2017, Karet *al.* 2018, Panjehpouret *al.* 2018, Selmi et Bisharat 2018, Shahadat *et al.* 2018, Ayat et al. 2018, Li et al. 2018, Behera and Kumari 2018, Narwariya et al. 2018, Akbas 2019b, Katariya et al. 2019, Othman et al. 2019, Yüksela et Akbaş 2019, Abdou et al. 2019, Rajabi and Mohammadimehr 2019, Avcar 2019, Selmi 2019, Esmaili and Beni 2019) avec différentes conditions aux limites et de chargements .

Références
bibliographiques

Références Bibliographiques

Chapitre I Revue de Littérature

- Adda Bedia, W., Benzair, A., Semmah, A., Tounsi, A. and Mahmoud, S.R. (2015), "On the thermal buckling characteristics of armchair single-walled carbon nanotube embedded in an elastic medium based on nonlocal continuum elasticity", *Brazil. J. Phys.*, 45(2), 225-233.
- Akbarzadeh, A.H. and Chen, Z.T. (2013), "Hygrothermal stresses in one-dimensional functionally graded piezoelectric media in constant magnetic field", *Compos. Struct*, 97, 317-331.
- Ankit Gupta, Mohammad Talha and Wolfgang Seemann, "Free vibration and flexural response of functionally graded plates resting on Winkler–Pasternak elastic foundations using nonpolynomial higher-order shear and normal deformation theory", (2018), *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 6, 523-538, <https://doi.org/10.1080/15376494.2017.1285459>.
- Ankit Gupta et Mohammad Talha, "Large amplitude free flexural vibration analysis of finite element modeled FGM plates using new hyperbolic shear and normal deformation theory", (2017), 67, 287-308, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.04.015>.
- Aouragh, My Driss ; Yebari, Naji, "Stabilisation exponentielle d'une équation des poutres d'Euler-Bernoulli à coefficients variables", (2009), *Annales Mathématiques Blaise Pascal*, 16, 483-510, <https://doi.org/10.5802/ambp.275>.
- Arshid, Ehsan, Khorshidvand, Ahmad Reza , Khorsandijou, S. Mahdi, "The effect of porosity on free vibration of SPFG circular plates resting on visco-Pasternak elastic foundation based on CPT, FSDT and TSDT", (2019), *Structural Engineering and Mechanics*, 70, 97-112, <https://doi.org/10.12989/sem.2019.70.1.097>.
- A.Zarei et A.Khosravifard, "Mesh free investigation of the vibrational behavior of pre-stressed laminated composite plates based on a variationally consistent plate model", (2020), *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 111, 118-133, <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2019.11.004>.
- Belabed, Zakaria , Bousahla, Abdelmoumen Anis , Houari Mohammed Sid Ahmed , Tounsi Abdelouahed, Mahmoud. S.R, A, "new 3-unknown hyperbolic shear deformation theory for vibration of functionally graded sandwich plate", (2018), *Earthquakes and Structures*, 14(2), 103-115, <https://doi.org/10.12989/eas.2018.14.2.103>

Références Bibliographiques

- Bouhadra Abdelhakim, Tounsi Abdelouahed, Bousahla Abdelmoumen Anis , Benyoucef, Samir, "Improved HSDT accounting for effect of thickness stretching in advanced composite plates", (2018), *Structural Engineering and Mechanics*, 66(1), 61-73, <https://doi.org/10.12989/sem.2018.66.1.061>.
- David. K. Ferry and Stephen Marshall Goodnick, "Transport in Nanostructures", (1997), <http://www.vcambridge.org> , book
- Delevue. C and M. Lannoo. " Nanostructures theory and modeling", (2004), *Nanoscience and technology*, 1434-4904, doi: 10.1007/978-3662-08903-3.
- Darilmaz Kutlu, "Vibration analysis of functionally graded material (FGM) grid systems", (2015), *Steel and Composite Structures*, 18, 395-408, <https://doi.org/10.12989/scs.2015.18.2.395>.
- Fahsi Asmaa, Tounsi Abdelouahed, Hebali Habib ,Chikh Abdelbaki , Adda Bedia E.A, A , "four variable refined nth-order shear deformation theory for mechanical and thermal buckling analysis of functionally graded plates", (2017), *Geomechanics and Engineering*, 13(3), 385-410, <https://doi.org/10.12989/gae.2017.13.3.385>.
- Fumio Watari, Atsuro Yokoyama, Fuminori Saso, Motohiro Uo, Takao Kawasaki, "Fabrication and properties of functionally graded dental implant", (1997), *Composites Part B: Engineering*,28, 5-11, [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(96\)00021-2](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(96)00021-2).
- Hamed Esmaili, Elaheh Kowsari et Rama krishna Seeram, "Importance des morphologies de nanostructure dans les cellules photo-électro-chimiques de fractionnement de l'eau : un bref examen, (2021), *Journal de la structure moléculaire*", 1230,129856 , <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.129856>.
- HADJ ELMRABET, Abderrahman, "Analyse des propriétés physiques des nanomatériaux à base nitrure de bore et de carbone", (2017), <http://hdl.handle.net/123456789/3047>.
- Houari Heireche, Abdelouahed Tounsi, Hachemi Benhassaini, Abdelnour Benzair, Malika Bendahmane, Miloud Missouri et Sabrina Mokadem. "Nonlocal elasticity effect on vibration characteristics of protein microtubules", (2010), 42(9), 2375-2379, <https://doi.org/10.1016/j.physe.2010.05.017>.

Références Bibliographiques

- J.C.Monge, J.L.Mantari, S.Charca, N.Vladimir, "An axiomatic/asymptotic evaluation of the best theories for free vibration of laminated and sandwich shells using non-polynomial functions", (2018), *Engineering Structures* 172, 1011-1024, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.020>.
- J.N.Reddy, "A refined nonlinear theory of plates with transverse shear deformation", (1984), *International Journal of Solids and Structures*, 20, 881-896, [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(84\)90056-8](https://doi.org/10.1016/0020-7683(84)90056-8).
- Koizumi M, "The Concept of FGM", (1993), *Functionally Graded Materials*, American Ceramic Society, 34, 3-10, <https://ci.nii.ac.jp/naid/10014680673/>.
- Loucas T sakalakos. (2008), "Nanostructures for photovoltaics", 62(6), 175-189, <https://doi.org/10.1016/j.mser.2008.06.002>.
- Lee, C.Y. and Kim, J.H. (2013), "Hygrothermal postbuckling behavior of functionally graded plates", *Compos. Struct.*, 95, 278-282.
- Mahamood, RM , Akinlabi, ET, Shukla, M, Pityana, Sisa L, "Functionally Graded Material: An overview", (2012), *ResearchSpace Repository*4-6, http://www.iaeng.org/publication/WCE2012/WCE2012_pp1593-1597.pdf.
- Menasria Abderrahmane, Bouhadra Abdelhakim ;Tounsi Abdelouahed, Bousahla Abdelmoumen Anis ; Mahmoud S.R.A, " new and simple HSDT for thermal stability analysis of FG sandwich plates", (2017), *Steel and Composite Structures*, 25(2), 157-175, <https://doi.org/10.12989/scs.2017.25.2.157>.
- Mesut Şimşek, "Nonlinear free vibration of a functionally graded nanobeam using nonlocal strain gradient theory and a novel Hamiltonian approach", (2016), *International Journal of Engineering Science*, 105, 12-27, <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2016.04.013>.
- Nesrine Ben Saber , Amine Mezni , Arwa Alrooqi , Tariq Altalhi , "A review of ternary nanostructures based noble metal/semiconductor for environmental and renewable energy applications" , (2020), *Journal of Materials Research and Technology*, 9, 15233-15262, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.10.090>.
- Nathaniel. L. Rosin and Chad A. Mirkin. "Nanostructures in Biodiagnostics ", (2005), *American Chemical Society*, 105(4), 1547–1562. <https://doi.org/10.1021/cr030067f>.
- P. GOH ABRO , J. M. GOSSRIN BOMISSO, A. KIDJÉGBO TOURÉ, AND ADAMA COULIBALY, "A NUMERICAL METHOD BY FINITE ELEMENT METHOD (FEM) OF

Références Bibliographiques

- AN EULER-BERNOULLI BEAM TO VARIABLE COEFFICIENTS", (2020), *Advances in Mathematics*, 9, 8485–8510, <https://doi.org/10.37418/amsj.9.10.77>.
- Raffaele Barretta, Raimondo Luciano, Francesco Marotti de Sciarra, Giuseppe Ruta, Stress-driven nonlocal integral model for Timoshenko elastic nano-beams, (2018), *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 72, 275-286, <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2018.04.012>.
- Shuo Liu, Tiantang Yu, Tinh Quoc Bui, Shuohui Yin, Duc-KienThai, Satoyuki Tanaka, "Analysis of functionally graded plates by a simple locking-free quasi-3D hyperbolic plate isogeometric method", (2017), *Composites Part B: Engineering*, 120, 182-196, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.061>.
- Shailendra Kumar Bohidar , Ritesh Sharma , Prabhat Ranjan Mishra, "Functionally Graded Materials: A Critical Review", (2014), *International Journal of Research*, 7, 2348-6848, <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.674.2604&rep=rep1&type=pdf>.
- Sophy Chhang, "Energy-momentum conserving time-stepping algorithms for nonlinear dynamics of planar and spatial euler-bernoulli/timoshenko beams", (2019), Thèse de doctorat, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02136223>.
- Son Thai, Huu-Tai Thai, Thuc P.Vo, Vipulkumar Ishvarbhai and Patel, A, "simple shear deformation theory for nonlocal beams", (2018), *Composite Structures*, 183, 262-270, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.03.022>.
- Soldatos. K. P, "A transverse shear deformation theory for homogeneous monoclinic plates", *Acta Mechanica*, (1992), 94(3), 195-220.
- Sridhar Komarneni," Nanocomposites", (1992), *Journal of Materials Chemistry*, 12, <https://doi.org/10.1039/JM9920201219>.
- Tounsi, A., Houari, M.S.A., Benyoucef, S. and Adda Bedia, E.A. "A refined trigonometric shear deformation theory for thermoelastic bending of functionally graded sandwich plates", (2013), *Aerosp. Sci. Technol.*, 24(1), 209-220.,
- Tounsi, A, Semmah, A., Bousahla, A.A. "Thermal buckling behavior of nanobeams using an efficient higher-order nonlocal beam theory", (2013c), *ASCE Journal of Nanomechanics and Micromechanics*, 3, 37-42.
- Timoshenko, S, Woinowsky-krieger, S, "THEORY OF PLATES AND SHELLS: BENDING MOMENTS IN A SIMPLY SUPPORTED RECTANGULAR PLATE WITH A CONCENTRATED LOAD", (1959), The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, <https://trid.trb.org/view/102976>.
- Tuan N.Nguyen, Tuan D.Ngo, H.Nguyen-Xuan, "A novel three-variable shear deformation plate formulation: Theory and Isogeometric implementation", (2017), *Computer Methods in*

Références Bibliographiques

- Applied Mechanics and Engineering*, 326, 376-401, <https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.07.024>.
- Touratier, M, (1991), "An efficient standard plate theory", *Int. J. Eng. Sci.*, 29(8), 901-916, [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(91\)90165-Y](https://doi.org/10.1016/0020-7225(91)90165-Y).
- Xiaodong Li, Bharat Bhushan, Kazuki Takashima, Chang-Wook Baek, Yong-Kweon Kim, "Mechanical characterization of micro/nanoscale structures for MEMS/NEMS applications using nanoindentation techniques", (2003), *Ultramicroscopy*, 97, 481-494, [https://doi.org/10.1016/S0304-3991\(03\)00077-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3991(03)00077-9).
- Y. Xia, P. Yang, Y. Sun, Y. Wu, B. Mayers, B. Gates, Y. Yin, F. Kim, H. Yan, "One-Dimensional Nanostructures: Synthesis, Characterization, and Applications", (2003), *Advanced Materials*, 15, 353-389, <https://doi.org/10.1002/adma.200390087>.
- Yacine Karmi, Sabiha Tekili, Youcef Khadri, "Free vibrations analysis of sandwich beams with viscoelastic core", (2020), *African Journals Online*, 25, <https://www.ajol.info/index.php/srst/article/view/192426>.
- Yebari Naji, Elkhattat Abderahmane, "Stabilisation uniforme d'une équation des poutres d'Euler-Bernoulli", (2003), 10, 161-180, <https://doi.org/10.5802/ambp.172>.
- ZAHZOUH.T. (2016), "Etude des propriétés physiques des matériaux à nanostructure", Thèse de doctorat, <https://www.pnst.cerist.dz/detail.php?id=50517/>.
- Zidi, M., Tounsi, A., Houari, M.S.A., Adda Bedia, E.A. and Anwar Bég, O. (2014), "Bending analysis of FGM plates under hygro-thermo-mechanical loading using a four variable refined plate theory", *Aerosp. Sci. Technol.*, 34, 24-34.

Références Bibliographiques

Chapitre II Les Nanostructures

- "About the National Nanotechnology Initiative". United States National Nanotechnology Initiative. 2016. Retrieved 4 June 2016.)
- Babonneau, D, E. Vandenhecke, S. Camelio, "Formation of nanoripples on amorphous alumina thin films during low-energy ion-beam sputtering: Experiments and simulations *Physical Review B*", (2017), 95, 085-412. 10.1103/PhysRevB.95.085412.
- Drexler, K. Eric, (1986), "The Coming Era of Nanotechnology", *Engines of Creation*, Doubleday, and 978-0-385-19973-5.
- Drexler, K. E. (July 1991). "Molecular directions in nanotechnology", *Nanotechnology*, 2 (3): 113 -118. Bibcode: 1991Nanot...2...113D. Doi: 10.1088/0957-4484/2/3/002, 0957-4484.
- U. Dawid; Liszka, Barbara Janas, (2017), "Matériaux nanostructures industriels", (mediachimie.org), 53. "Copper matrix nanocomposites based on carbon nanotubes or graphene". *Mater. Chem. Front.* 2: 22–35. doi:10.1039/C7QM00316A.
- Kamigaito, O (1991). "What can be improved by nanometer composites?". *J. Jpn. Soc. Powder Powder Metall.* 38 (3): 315–21. doi:10.2497/jjspm.38.315. in Kelly, A, *Concise encyclopedia of composites materials*, Elsevier Science Ltd, 1994).
- Satir, Peter; Søren T. Christensen (2008-03-26). "Structure and function of mammalian cilia". *Histochemistry and Cell Biology.* 129 (6): 687–93. doi:10.1007/s00418-008-0416-9. PMC 2386530. PMID 18365235. 1432-119X.
- Sungtaek Y. Ju, "Phonon Transport chaleur dans la Silicon Nanostructures, en *Applied Physics Letters*", vol. 87, 2005, p. 153106, DOI:10.1063 / 1,2089178.
- TEDX Houston, (2011), *Wade Adams*, "Nanotechnology and Energy", 2020-04-28.
- Zhang. S, D. Sun; Y. Fu; H. Du, (2003). "Recent advances of superhard nanocomposite coatings: a review". *Surf. Coat. Technol.* 167 (2–3): 113–119. doi:10.1016/S0257-8972(02)00903-9.
- Abderrahmane MOUFFOKI, E.A. Adda Bedia, Mohammed Sid Ahmed Houari, Abdelouahed Tounsi and S.R. Mahmoud, (2017), "Vibration analysis of nonlocal advanced nanobeams in hygro-thermal environment using a new two-unknown trigonometric shear deformation beam theory ", *Smart Structures and Systems An Int'l Journal* , 20(3), 369-383

Références Bibliographiques

Chapitre III Les structures FGMs

- BACHIR BOUIADJRA Mohamed, BOUKHELF Fouad, FEKRAR Abdelkader, KHETIR Hafid, "ETUDE ANALYTIQUE DU COMPORTEMENT DES PLAQUES A L'ECHELLE NANOMETRIQUE". (2016).
- Berrabah Hamza Madjid, Adda Bedia El Abbas, Tounsi Abdelouahed, "Comparaison des différentes théories de poutre non locale raffinée pour la flexion et l'analyse du flambement des nano-poutres", (2016 e), 2170-127X, © Mouloud Mammeri University of Tizi-Ouzou, Algeria
- Cherradi. N, D. Delfosse, B. Ilschner et A. Kawasaki, "Functional gradient materials: application of the concept", (1996), *production techniques by powder metallurgy*, 93(2), 185-196.
- DERKAOUI Fatima Zohra et GORINE Somia, " Analyse des contraintes d'une plaque FGM avec des couches de surface piézoélectriques par la théorie de déformation en cisaillement ", (2019), MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE
- ELLALI Mokhtar, "Analyse du flambement thermique des matériaux FGM piézoélectriques», THESE de DOCTORAT, (2018/2019), Centre Universitaire Belhadj Bouchaib-Ain Témouchent.
- Eringen A.C and Edelen D.G.B, "On nonlocal elasticity", *Int J Eng Sci*, (1972), 10:233
- Eringen AC. "Nonlocal polar elastic continua", *Int J EngSci*, (1972); 10: 1–16.
- Eringen AC, "On differential equations of nonlocal elasticity and solutions of screw dislocation and surface waves", (1983), *J Appl Phys*; 54: 4703–4710.
- Eringen A.C, "Theory of nonlocal elasticity and some applications", *Res Mechanica*, (1987), 21, 313- 342.
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_des_poutres.
- Reddy J.N, "Nonlocal nonlinear formulations for bending of classical and shear deformation theories of beams and plates", (2010), *Int J eng Sci*, 48, 1507-1518.
- Polizzotto C, "Nonlocal elasticity and related variational principles", (2001), *International Journal of Solids and Structures*, 38, 7359-7380.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- Abdou, M. A., Othman, M. I. A., Tantawi, R. S., & Mansour, N. T. (2019). "Exact solutions of generalized thermoelastic medium with double porosity under L–S theory", *Indian Journal of Physics.*, doi:10.1007/s12648-019-01505-8.
- Akbas, S. D. (2018), "Forced vibration analysis of cracked functionally graded microbeams", *Advances in Nano Research*, **6**(1), 39-55. <https://doi.org/10.12989/anr.2018.6.1.039>.
- Akbas, S.D., (2019a). "Hygro-thermal post-buckling analysis of a functionally graded beam", *Coupled Systems Mechanics.*, **8**(5), 459-471. <https://doi.org/10.12989/csm.2019.8.5.459>.
- Akbas, S.D., (2019b). "Forced vibration analysis of functionally graded sandwich deep beams", *Coupled Systems Mechanics.*, **8**(3), 259-271. <https://doi.org/10.12989/csm.2019.8.3.259>.
- Aria, A.I., Friswell, M. I. (2019), "A nonlocal finite element model for buckling and vibration of functionally graded nanobeams", *Composites Part B.*, **166**, 233-246. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.071>.
- Aria, A.I., Rabczuk, T., & Friswell, M.I. (2019). "A finite element model for the thermo-elastic analysis of functionally graded porous nanobeams". *European Journal of Mechanics - A/Solids.* <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2019.04.002>.
- Avcar, M. (2019), "Free vibration of imperfect sigmoid and power law functionally graded beams", *Steel and Composite Structures*, **30**(6), 603-615. <https://doi.org/10.12989/scs.2019.30.6.603>.
- Ayat, H., Kellouche, Y., Ghrici, M., Boukhatem, B. (2018), "Compressive strength prediction of limestone filler concrete using artificial neural networks", *Advances in Computational Design*, **3**(3), 289-302. <https://doi.org/10.12989/acd.2018.3.3.289>.
- Barati, M. R., & Shahverdi, H. (2019). "Finite element forced vibration analysis of refined shear deformable nanocomposite graphene platelet-reinforced beams", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering.*, **42**(1). doi:10.1007/s40430-019-2118-8.
- Barati, M.R. and Shahverdi, H. (2016), "A four-variable plate theory for thermal vibration of embedded FG nanoplates under non-uniform temperature distributions with different boundary conditions", *Struct. Eng. Mech.*, **60**(4), 707-727. <https://doi.org/10.12989/sem.2016.60.4.707>.

Références Bibliographiques

- Behera, S., Kumari, P. (2018), "Free vibration of Levy-type rectangular laminated plates using efficient zig-zag theory", *Advances in Computational Design*, **3**(3), 213-232.<https://doi.org/10.12989/acd.2017.2.3.165>
- Belmahi, S., Zidour, M., & Meradjah, M. (2019). "Small-scale effect on the forced vibration of a nano beam embedded an elastic medium using nonlocal elasticity theory", *Advances In Aircraft And Spacecraft Science.*, **6**(1), 1-18.<https://doi.org/10.12989/aas.2019.6.1.001>.
- Belmahi, S., Zidour, M., Meradjah, M., Bensattalah, T., and Dihaj, A. (2018). "Analysis of boundary conditions effects on vibration of nanobeam in a polymeric matrix", *Structural Engineering And Mechanics.*, **67**(5), 517-525.<https://doi.org/10.12989/sem.2018.67.5.517>.
- Bensaid, I., Bekhadda, A., Kerboua, B. (2018), "Dynamic analysis of higher order shear-deformable nanobeams resting on elastic foundation based on nonlocal strain gradient theory", *Advances in Nano Research*, **6**(3), 279-298.<https://doi.org/10.12989/anr.2018.6.3.279>.
- Bensattalah, T., Zidour, M., HassaineDaouadji, T. (2018b), "Analytical analysis for the forced vibration of CNT surrounding elastic medium including thermal effect using nonlocal Euler-Bernoulli theory", *Advances in Materials Research.*, **7**(3), 163-174.<https://doi.org/10.12989/amr.2018.7.3.163>.
- Bensattalah, T., Zidour, M., HassaineDaouadji, T. and Bouakaz, K. (2019), "Theoretical analysis of chirality and scale effects on critical buckling load of zigzag triple walled carbon nanotubes under axial compression embedded in polymeric matrix", *Structural Engineering and Mechanics.*, **70**(3), 269-277.<https://doi.org/10.12989/sem.2019.70.3.269>.
- Bozyigit, B, Yesilce, Y. (2016), "Dynamic stiffness approach and differential transformation for free vibration analysis of a moving Reddy-Bickford beam", *Structural Engineering and Mechanics*, **58** (5), 847-868. DOI: 10.12989/sem.2016.58.5.847
- Daouadji, T.H. (2017), "Analytical and numerical modeling of interfacial stresses in beams bonded with a thin plate", *Advances in Computational Design*, **2**(1), 57-69.<https://doi.org/10.12989/acd.2017.2.1.057>.
- Ebrahimi, F. and Barati, M.R. (2016a), "Nonlocal strain gradient theory for damping vibration analysis of viscoelastic inhomogeneous nano-scale beams embedded in visco-Pasternak foundation", *J. Vib. Control*, <https://doi.org/10.1177/1077546316678511>.
- Ebrahimi, F. and Barati, M.R. (2016b), "A unified formulation for dynamic analysis of nonlocal heterogeneous nanobeams in hygro-thermal environment", *Appl. Phys.A*, **122**, 792.<https://doi.org/10.1007/s00339-016-0322-2>.

Références Bibliographiques

- Ebrahimi, F. and Heidari, E. (2018), "Vibration characteristics of advanced nanoplates in humid-thermal environment incorporating surface elasticity effects via differential quadrature method", *Struct.Eng.Mech., Int. J.*, **68**(1), 131-157. <http://dx.doi.org/10.12989/sem.2018.68.1.131>.
- Ebrahimi, F. and Salari, E. (2015), "Effect of various thermal loadings on buckling and vibrational characteristics of nonlocal temperature dependent FG nanobeams", *Mech. Adv. Mater.Struct.*,**23**(12), 1379-1397.<https://doi.org/10.1080/15376494.2015.1091524>.
- Ebrahimi, F., &Barati, M. R. (2017a). "Buckling analysis of nonlocal strain gradient axially functionally graded nanobeams resting on variable elastic medium", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science.*,**232**(11), 2067–2078. doi:10.1177/0954406217713518.
- Ebrahimi, F., Daman, M. (2017), "Dynamic characteristics of curved inhomogeneous nonlocal porous beams in thermal environment", *Structural Engineering and Mechanics*, **64**(1), 121-133.<https://doi.org/10.12989/sem.2017.64.1.121>.
- Eltaher, M. A., El-Borgi, S., & Reddy, J. N. (2016). "Nonlinear analysis of size-dependent and material-dependent nonlocal CNTs", *Composite Structures.*, **153**, 902–913. doi:10.1016/j.compstruct.2016.07.013.
- Eltaher, M.A., Almalki, T.A., Ahmed, K.I.E., Almitani, K.H. (2019c), "Characterization and behaviors of single walled carbon nanotube by equivalent-continuum mechanics approach", *Advances in Nano Research*, **7**(1), 39-49. DOI: <https://doi.org/10.12989/anr.2019.7.1.039>
- Eltaher, M.A., Almalki, T.A., Almitani, K.H., Ahmed, K.I.E. (2019b), "Participation factor and vibration of carbon nanotube with vacancies", *Journal of Nano Research*, **57**, 158-174.<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.57.158>
- Eltaher, M.A., Fouda, N., El-midany, T., Sadoun, A.M. (2018b), "Modified porosity model in analysis of functionally graded porous nanobeams", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **40**,141.<https://doi.org/10.1007/s40430-018-1065-0>.
- Eltaher, M.A., Omar, F.A., Abdalla, W.S., Gad, E.H. (2019a), "Bending and vibrational behaviors of piezoelectric nonlocal nanobeam including surface elasticity", *Waves in Random and Complex Media*, **29**(2), 264-280. <https://doi.org/10.1080/17455030.2018.1429693>.
- Eltaher, M.A., Agwa, M., Kabeel, A (2018). "Vibration Analysis of Material Size-Dependent CNTs Using Energy Equivalent Model", *Journal of Applied and Computational Mechanics.*,**4**(2), 75-86. doi:10.22055/JACM.2017.22579.1136.

Références Bibliographiques

- Eringen, A.C. (1972), "Nonlocal polar elastic continua", *Int. J. Eng. Sci.*, **10**, 1-16, [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(72\)90070-5](https://doi.org/10.1016/0020-7225(72)90070-5).
- Eringen, A.C. (1983), "On differential equations of nonlocal elasticity and solutions of screw dislocation and surface waves", *J. Appl. Phys.*, **54**, 4703-4710, <https://doi.org/10.1063/1.332803>.
- Esmaeili, M., Beni, Y.T. (2019), "Vibration and buckling analysis of functionally graded flexoelectric smart beam", *Journal of Applied and Computational Mechanics*, **5**(5), 900-917.
- Faleh, N.M., Ahmed, R.A., Fenjan, R.M. (2018), "On vibrations of porous FG nanoshells", *International Journal of Engineering Science*, **133**, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2018.08.007>.
- Forsat, M., Badnava, S., Mirjavadi, S. S., Barati, M. R., & Hamouda, A. M. S. (2020). "Small scale effects on transient vibrations of porous FG cylindrical nanoshells based on nonlocal strain gradient theory", *The European Physical Journal Plus.*, **135**(1). doi:10.1140/epjp/s13360-019-00042-x.
- Hajmohammad, M.H., Farrokhian, A. and Kolahchi, R. (2018), "Smart control and vibration of viscoelastic actuator-multiphase nanocomposite conical shells-sensor considering hygrothermal load based on layerwise theory", *Aerosp. Sci. Technol.*, **78**, 260270. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.04.030>.
- Hamidi, A., Zidour, M., Bouakkaz, K., and Bensattalah, T. (2018). "Thermal and Small-Scale Effects on Vibration of Embedded Armchair Single-Walled Carbon Nanotubes", *In Journal of Nano Research.*, **51**, 24-38. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.51.24>.
- Hosseini, H., Kolahchi, R. (2018), "Seismic response of functionally graded-carbon nanotubes-reinforced submerged viscoelastic cylindrical shell in hygrothermal environment", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, **102**, 101–109, <https://doi.org/10.1016/j.physe.2018.04.037>.
- Hussain, M., Naeem, M.N. (2019), "Rotating response on the vibrations of functionally graded zigzag and chiral single walled carbon nanotubes", *Applied Mathematical Modelling*, **75**, 506-520. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.05.039>.
- Kar, V.R., Mahapatra, T.R., Panda, S.K. (2017), "Effect of different temperature load on thermal post buckling behaviour of functionally graded shallow curved shell panels", *Composite Structures*, **160**, 1236-1247. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.125>.
- Katariya, P.V., Hirwani, C.K., Panda, S.K. (2019), "Geometrically nonlinear deflection and stress analysis of skew sandwich shell panel using higher-order theory", *Engineering with Computers*, **35**(2), 467-485. <https://doi.org/10.1007/s00366-018-0609-3>.

Références Bibliographiques

- Khanik, H. B. (2018). "On vibrations of nanobeam systems", *International Journal of Engineering Science.*, **124**, 85–103.doi:10.1016/j.ijengsci.2017.12.010.
- Kiani, Y., and Eslami M. R. (2013), "An exact solution for thermal buckling of annular FGM plates on an elastic medium".*Composites Part B: Engineering***45**(1),101-110, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.034>.
- Kolahchi, R., Safari, M., Esmailpour, M. (2016), "Dynamic stability analysis of temperature-dependent functionally graded CNT-reinforced visco-plates resting on orthotropic elastomeric medium", *Compos. Struct.*,**150**, 255–265.<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.05.023>.
- Lal, A., Jagtap, K.R., Singh, B.N. (2017), "Thermo-mechanically induced finite element based nonlinear static response of elastically supported functionally graded plate with random system properties", *Advances in Computational Design*, **2**(3), 165-194.<https://doi.org/10.12989/acd.2017.2.3.165>.
- Li, D. H., Guo, Q. R., Xu, D., Yang, X. (2017), "Three-dimensional micromechanical analysis models of fiber reinforced composite plates with damage", *Computers & Structures*, **191**, 100-114, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.06.005>.
- Mohamed, N., Eltahir, M.A., Mohamed, S.A., Seddek, L.F. (2019), "Energy equivalent model in analysis of postbuckling of imperfect carbon nanotubes resting on nonlinear elastic foundation", *Structural Engineering and Mechanics*, **70**(6), 737-750.<https://doi.org/10.12989/sem.2019.70.6.737>
- Na, K.S. and Kim, J.H. (2004), "Three-dimensional thermal buckling analysis of functionally graded materials", *Compos. B Eng.*,**35**(5), 429-437, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2003.11.013>.
- Narwariya, M., Choudhury, A., Sharma, A.K. (2018), "Harmonic analysis of moderately thick symmetric cross-ply laminated composite plate using FEM", *Advances in Computational Design*, **3**(2), 113-132, <https://doi.org/10.12989/acd.2018.3.2.113>.
- Othman, M. I. A., Abouelregal, A. E., & Said, S. M. (2019). "The effect of variable thermal conductivity on an infinite fiber-reinforced thick plate under initial stress", *Journal of Mechanics of Materials and Structures.*, **14**(2), 277–293. doi:10.2140/jomms.2019.14.277.
- Panjehpour, M., Eric Woo Kee Loh, Deepak T.J. (2018), "Structural Insulated Panels: State-of-the-Art", *Trends in civil Engineering and its architecture*, **3**(1) 336-340.10.32474/TCEIA.2018.03.000151.

Références Bibliographiques

- Pascon, J.P. (2018), "Large deformation analysis of functionally graded visco-hyperelastic materials", *Computers et Structures*, **206**, 90-108, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2018.06.001>.
- Rajabi, J., Mohammadimehr, M. (2019), "Bending analysis of a micro sandwich skew plate using extended Kantorovich method based on Eshelby-Mori-Tanaka approach", *Computers and Concrete*, **23**(5), 361-376. <https://doi.org/10.12989/cac.2019.23.5.361>.
- Rezaiee-Pajand, M., Masoodi, A.R., Mokhtari, M. (2018), "Static analysis of functionally graded non-prismatic sandwich beams", *Advances in Computational Design*, **3**(2), 165-190, <https://doi.org/10.12989/acd.2018...165>.
- Romano, G., Barretta, R., Diaco, M. (2017), "On nonlocal integral models for elastic nano-beams", *International Journal of Mechanical Sciences*, **131–132**, 490-499, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.07.013>.
- Salamat, D., Sedighi, H.M. (2017), "The effect of small scale on the vibrational behavior of single-walled carbon nanotubes with a moving nanoparticle", *Journal of Applied and Computational Mechanics*, **3**, 208-217. doi.10.22055/JACM.2017.12740
- Sedighi, H.M. (2014), "Size-dependent dynamic pull-in instability of vibrating electrically actuated microbeams based on the strain gradient elasticity theory", *Acta Astronautica*, **95**(1), 111-123.
- Sedighi, H.M., Bozorgmehri, A. (2014), "Dynamic instability analysis of doubly clamped cylindrical nanowires in the presence of Casimir attraction and surface effects using modified couple stress theory", *Acta Mechanica*, **227**(6), 1575-1591.
- Sedighi, H.M., Sheikhanzadeh, A. (2017), "Static and dynamic pull-in instability of nano-beams resting on elastic foundation based on the nonlocal elasticity theory", *Chin. J. Mech. Eng.*, **30**, 385–397. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0079-3>
- Selmi, A. (2019), "Effectiveness of SWNT in reducing the crack effect on the dynamic behavior of aluminium alloy", *Advances in Nano Research*, **7**(5), 365-377. <https://doi.org/10.12989/anr.2019.7.5.365>.
- Selmi, A., Bisharat, A. (2018), "Free vibration of functionally graded SWNT reinforced aluminum alloy beam", *Journal of Vibroengineering*, **20**(5), 2151-2164. <https://doi.org/10.21595/jve.2018.19445>.
- Shahadat, MRB, Alam, MF, Mandal, MNA, Ali, MM. (2018), "Thermal transportation behaviour prediction of defective graphene sheet at various temperature: A Molecular Dynamics Study", *American Journal of Nanomaterials*, **6**(1), 34-40. [10.12691/ajn-6-1-4](https://doi.org/10.12691/ajn-6-1-4).

Références Bibliographiques

- Shahsavari, D., Karami, B., Mansouri, S. (2018), "Shear buckling of single layer graphene sheets in hygrothermal environment resting on elastic foundation based on different nonlocal strain gradient theories", *Eur. J. Mech. A, Solids*, **67**, 200-214. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2017.09.004>.
- Sharma, J. N., Chand, R., & Othman, M. I. A. (2009). "On the propagation of Lamb waves in viscothermoelastic plates under fluid loadings", *International Journal of Engineering Science.*, **47**(3), 391–404. doi:10.1016/j.ijengsci.2008.10.008.
- Shodja, H. M., Ahmadpoor, F., Tehranchi, A. (2012). "Calculation of the additional constants for fcc materials in second strain gradient elasticity: Behavior of a nano-size Bernoulli–Euler beam with surface effects", *The Journal of Applied Mechanics -Transaction ASME*, **79** 021008:1-8. doi:10.1115/1.4005535.
- Sobhy, M. (2017), "Hygro-thermo-mechanical vibration and buckling of exponentially graded nanoplates resting on elastic foundations via nonlocal elasticity theory", *Struct. Eng. Mech., Int. J.*, **63**(3), 401-415. <http://dx.doi.org/10.12989/sem.2017.63.3.401>.
- Yüksela, Y.Z., and Akbaş, S.D. (2019), "Buckling Analysis of a Fiber Reinforced Laminated Composite Plate with Porosity", *Journal of Computational Applied Mechanics.*,**50**(2), 375-380. DOI: 10.22059/jcamech.2019.291967.448.
- Yüksela, Y.Z., and Akbaş, S.D. (2018), "Free Vibration Analysis of a Cross-Ply Laminated Plate in Thermal Environment", *International Journal of Engineering & Applied Sciences (IJEAS)*,**10**(3), 176-189. <http://dx.doi.org/10.24107/ijeas.456755>.