

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : ENERGÉTIQUE

PAR :

NOM PRÉNOM : JUNIOR

Thème

Étude du transfert de chaleur dans un cylindre/sphère à paroi épaisse et à gradient de propriétés fonctionnelles FGM (Functionally Graded Material)

Soutenu le 17/ 07/ 2019 devant le jury composé de:

Mr. A. Djerada

Président

Mr. BENSLIMANE Abdelhakim

Rapporteur :

Mr. Adel SAHI

Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2018-2019

RMERCIEMENTS :

Je tiens à remercier les membres de jury qui font l'honneur d'examiner ce travail.

Toute ma gratitude à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation du début jusqu'à la fin.

C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que je remercier mon promoteur Mr ABDELHAKIM BENSLIMANE de m'avoir offert un sujet aussi intéressant, à sa disponibilité, orientations, et ses précieux conseils qui ma permis d'arriver à accomplir ce travail.

Enfin, tous mes ami(e)s, et ceux qui ont contribués de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

DEDICACES :

*A celle qui m'a couvert de tendresse et qui n'a rien épargné pour me voir heureux,
à toi ma douce et chère mère ;*

Au symbole de sagesse et sagacité à ma grande mère ;

A tout ma famille et mes proches

A mes aimables frère et soeurs;

A tous mes amis et collègues ...;

A tous ceux dont mon ancre les omet, mais non pas mon coeur... ;

... Je dédie le fruit de mes efforts

ABSTRACT:

Solutions have been derived for temperature in thick cylindrical and spherical shells made of functionally graded materials with power law and exponential-varying properties subjected to difference of temperature. The obtained results show that the inhomogeneity properties of FGM have a significant influence on the temperature distribution along the radial direction. A numerical solution using finite element method is also presented and good agreement was found between the analytical solutions and the solutions carried out through the FEM. The values used in this study are chosen to demonstrate the effect of inhomogeneity on temperature distributions.

RESUME :

L'analyse sur un matériau à gradient fonctionnel soumis à un gradient de température à l'état stationnaire unidimensionnel est réalisée dans cette étude. Les propriétés du matériau sont supposées varier de façon non linéaire dans la direction radiale, le coefficient de transfert de chaleur par conduction est une fonction de puissance/exponentielle avec un coefficient de non homogénéité ϕ . La répartition de la température est supposée être en fonction du rayon, avec des conditions aux limites sur les surfaces intérieures et extérieures du cylindre et de la sphère. Les résultats analytiques pour le cylindre et la sphère en FGM sous l'influence d'un gradient de température concordent bien avec les résultats d'éléments finis en utilisant des simulations FEM.

SOMMAIRE

| | |
|--|-----|
| RESUME..... | I |
| ABSTRACT..... | II |
| LISTE DES NOTATIONS..... | III |
| LISTE DES FIGURES..... | IV |
| INTRODUCTION GENERALE..... | 1 |
| CHAPITRE I : Généralités sur les matériaux FGM | |
| I – 1 INTRODUCTION:..... | 3 |
| I – 2 Historique :..... | 4 |
| I – 3 Types de matériaux FGM :..... | 5 |
| I – 3 – 1 Matériaux à gradient de composition chimique..... | 6 |
| I – 3 – 2 Matériaux à gradient de porosité :..... | 6 |
| I – 3 – 3 Matériaux à gradient microstructural :..... | 8 |
| I – 4 Domaines d’applications des matériaux à gradient fonctionnel:..... | 10 |
| I – 4 – 1 L’industrie aérospatiale :..... | 12 |
| I – 4 – 2 L’industrie Automobile :..... | 12 |
| I – 4 – 3 Biomédical :..... | 12 |
| I – 4 – 4 Défense :..... | 13 |
| I – 4 – 5 Energie :..... | 13 |
| I – 4 – 6 Électrique / Électronique :..... | 13 |
| I – 4 – 7 Marine..... | 14 |
| I – 4 – 8 Sport :..... | 14 |
| I – 4 – 9 Autres :..... | 14 |
| I – 5 Comparaison des matériaux types FGM et les matériaux composites Traditionnels..... | 14 |

| | |
|--|----|
| I – 6 Quelques méthodes d’élaboration des matériaux FGM :..... | 16 |
| I – 6 – 1 Frittage en infiltration :..... | 16 |
| I – 6 – 2 Implantation ionique :..... | 16 |
| I – 6 - 3 Technique de dépôt à la vapeur :..... | 16 |
| I – 6 - 4 Métallurgie des poudres :..... | 17 |
| I – 6 - 5 Méthode centrifuge :..... | 17 |
| I - 6 - 6 Techniques de fabrication par impression 3D :..... | 17 |
| I – 7 Avantages et inconvénients des FGM :..... | 18 |
| I – 7 – 1 Avantages des FGM :..... | 18 |
| I – 7 - 2 Inconvénients des FGM | 19 |
| I – 8 Développements récents et défis des FGM..... | 19 |
| I – 9 Sommaire des contributions au développement des FGM :..... | 20 |
| I - 10-Conclusion :..... | 22 |
| CHAPITRE II : Calculs analytiques et simulation numérique | |
| I – INTRODUCTION :..... | 23 |
| II - Formulation du problème :..... | 24 |
| II – 1 Partie analytique :..... | 24 |
| II – 1 - 1 CAS n°1 « CYLINDRE SIMPLES » : | 24 |
| II – 1 - 2 CAS n°2 « CYLINDRE FGM » :..... | 25 |
| II – 1 – 2 -1 CAS n°2 « SPHERE » :..... | 27 |
| II – 1 – 2 -2 CAS n°2 « SPHERE FGM » :..... | 29 |

| | |
|---|-----------|
| II – 2 Partie numérique :..... | 31 |
| II – 2 - 1 CAS n°1 « CYLINDRE » :..... | 31 |
| A) Définitions globales :..... | 31 |
| B) Composant :..... | 31 |
| • Géométrie :..... | 31 |
| • Matériau :..... | 31 |
| • Conditions aux limites :..... | 32 |
| C) Maillage :..... | 32 |
| II – 2 - 2 CAS n°2 « SPHERE » :..... | 33 |
| D) Définitions globales :..... | 33 |
| E) Composant :..... | 33 |
| • Géométrie :..... | 33 |
| • Matériau : | 33 |
| • Conditions aux limites :..... | 34 |
| F) Maillage :..... | 34 |
| II – 3 CONCLUSION :..... | 35 |
| CHAPITRE III : Résultats et discussion | |
| I – Résultats et discussion :..... | 36 |
| II – 1 Cas du cylindre :..... | 37 |
| II - 2 Cas de la sphère:..... | 38 |
| III – Conclusion :..... | 39 |
| CONCLUSION GENERALE | 40 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | |

LISTE DES SYMBOLES :

r : Rayon(m).

R_i : Rayon intérieur (m).

R_o : Rayon extérieur(m).

A et **B** : constante de calcul n°1 et n°2 respectivement.

LISTE DES FIGURES

Figure (I.1) : Développement des matériaux depuis l'âge de bronze.

Figure (I.2) : à gauche le schéma d'un FGM à porosité graduée, à droite une image montrant la porosité graduelle d'un os.

Figure (I.3) : Schéma d'une microstructure graduée

Figure(I.4) : Domaines d'application des trois types de matériaux à gradient fonctionnelle

Figure(I.5) : Schéma de comparaison des FGM avec les composites.

Figure(I.6) : Différentes schématisations de matériaux

Figure (II.1) : configuration d'un cylindre FGM sous pression

Figure(II.2) : configuration d'une sphère creuse FGM sous pression.

Figure (II.3) : Géométrie 2D d'un demi-cylindre creux

Figure (II.4) : Géométrie 2D d'une demi-sphère creuse

Figure (III.1) : Variation de la conductivité thermique à travers la paroi

Figure(III.4) : Variation de Température à travers la paroi du cylindre

Figure(III.16):L'évolution du déplacement le long de la paroi de la sphère : comparaison des résultats analytiques et numériques.

INTRODUCTION GENERALE :

Le développement des matériaux composites a permis d'associer des propriétés spécifiques à différents matériaux au sein d'une même pièce. L'optimisation locale de ces propriétés, par association d'un matériau de haute dureté à la surface d'un matériau tenace par exemple, pose alors le problème de l'interface. Cette transition brutale de compositions peut générer localement de fortes concentrations de contraintes. La solution d'une transition continue des propriétés recherchées, par un gradient de composition, permet d'atténuer cette singularité par l'utilisation des matériaux à gradient de propriétés (en anglais : Functionally Graded Material " F.G. M ").

D'autre part, les matériaux fonctionnellement gradués (FGM), une nouvelle génération des matériaux composites homogènes avancés d'abord proposés pour les barrières thermiques, ont été de plus appliqués pour les structures de l'ingénierie moderne dans un environnement à température élevée. Les matériaux à gradient de propriétés (FGM) ; un type de matériaux composites produit en changeant sans interruption les fractions de volume dans la direction d'épaisseur pour obtenir un profil bien déterminé, ces type de matériaux, ont suscité beaucoup d'attention récemment en raison des avantages de diminuer la disparité dans les propriétés matérielles et de réduire les contraintes thermiques .Le concept de " Matériaux à Gradient de Propriétés" a été développé dans le laboratoire national d'aérospatial du Japon en 1984 par M. Niino et ses collègues à Sendai. L'idée est de réaliser des matériaux utilisés comme barrière thermique dans les structures spatiales et les réacteurs à fusion [2].Les FGM peuvent être utilisés pour différentes applications, telles que les enduits des barrières thermiques pour les moteurs en céramique, turbines à gaz, couches minces optiques et même dans des domaines tels que le médical et dans l'armée, etc....

L'objectif est de démontrer que l'inhomogénéité du matériau a une influence significative sur les comportements mécaniques des structures creuses à parois épaisses constituées d'un matériau à gradient fonctionnel exponentiel. Ainsi, en choisissant une bonne valeur, les ingénieurs peuvent concevoir une sphère creuse FGM spécifique qui peut répondre à certaines exigences particulières.

- ✓ Le chapitre I est un aperçu détaillé sur les matériaux fonctionnellement gradués appelés « FGMs »
- ✓ Le chapitre II démonstration des calculs analytiques et numériques
- ✓ Le chapitre III discussion des résultats et comparaison entre l'analytique et le numérique

Le présent travail se termine par une conclusion générale où on souligne l'efficacité de cette proportionnalité dans les calculs des matériaux FGM.

I – 1 INTRODUCTION:

Les matériaux sont continuellement développés au fil du temps comme indiqué sur la figure (I.1) [1], des matériaux purs de l'époque aux matériaux composites qui sont utilisés aujourd'hui. Au tout début, l'utilisation des matériaux purs était plus fréquente mais ils étaient très limités, puisque l'application réelle peut ne pas être satisfaite par l'utilisation d'un seul métal, les alliages peuvent être plus forts et plus polyvalents. Le bronze, qui est l'alliage de cuivre et d'étain, était le premier alliage qui a été développé en 4000 A.J.C (âge de bronze). Depuis lors, différents mélanges de matériaux ont été réalisés afin de combiner leur forces selon les exigences fonctionnelles.

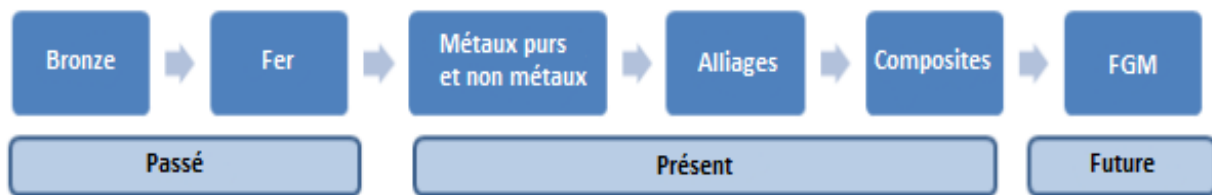


Figure (I.1) : Développement des matériaux depuis l'âge de bronze.

Les matériaux composites sont, pour la plupart, d'une forme avancée des matériaux qui sont faits à partir de deux constituants ou plus avec les propriétés physiques et chimiques sensiblement différentes de chaque matériau. Les matériaux composites permettent d'avoir des combinaisons distinctes comme par exemple une surface dure et résistante à l'usure et un noyau doux selon la condition fonctionnelle d'application. L'hétérogénéité, l'anisotropie et la symétrie sont principales caractéristiques des matériaux composites présentant un intérêt particulier pour diverses applications. Le rapport « résistance/rigidité élevée », la résistance à la fatigue, l'usure et la corrosion, la haute fiabilité, etc... sont les avantages des composites par rapport aux métaux purs ou alliés. En dépit de tous ces avantages, les matériaux composites sont soumis à une forte transition des propriétés à l'interface, ce qui peut entraîner une défaillance des composants (par délamination) dans des conditions de travail extrêmes.

Ces inconvénients présents dans les composites classiques peuvent être éliminés par la forme modifiée des composites appelés matériaux à gradient fonctionnel (FGM). Les matériaux FGM sont des composites non homogènes effectués à partir de différentes phases

de constituants matériels (habituellement en céramique et métal). Dans les matériaux type FGM, les différentes phases microstructurales ont différentes fonctions, en variant graduellement la fraction de volume des matériaux constitutifs avec un changement doux et continu d'une surface à l'autre, ce qui élimine les problèmes d'interface et diminue les concentrations de contraintes thermiques. Par exemple, dans un FGM (métal / céramique), le côté métal riche est typiquement placé dans les régions où les propriétés mécaniques, comme la dureté ; doivent être élevée. En revanche, la céramique riche, avec une conductivité thermique faible peut résister aux températures plus élevées, et par conséquent il est utilisé dans les régions fortement exposées à la température. Les FGM permettent l'adaptation de la composition du matériel de manière à en retirer le maximum d'avantages de leur hétérogénéité. En outre, d'autres aspects d'exécution peuvent être améliorés en utilisant un FGM, par exemple, réduction de la température dans la phase de cuivre pour empêcher l'adoucissement thermique excessif du matériel, d'autres applications de FGM incluent des composants trouvés en aéronautique et aérospatiale.

I – 2 Historique :

Le concept d'un matériau à gradient fonctionnel (FGM) a été développé par des chercheurs du Japon en 1984. En 1985, un grand nombre de chercheurs des institutions publiques et de l'industrie ont uni leurs efforts pour créer ce nouveau type de matériau. Le principal objectif était de construire l'enveloppe extérieure d'une navette intercontinentale commerciale. Le problème principal à résoudre était le flux de la chaleur important frappant la majorité des surfaces qui sont exposées à la friction par l'air lors de la période de rentrée d'une navette spatiale dans l'atmosphère terrestre et, en même temps protéger l'intérieur contre les surchauffes. En 1987, le gouvernement Japonais a lancé un vaste projet intitulé « la recherche sur la technologie de base pour développement de matériaux à gradient de propriétés et l'étude de la relaxation des contraintes thermiques ». L'intérêt du projet est de développer des matériaux présentant des structures utilisées comme barrière thermique dans les programmes aérospatiaux. Les matériaux constituant les parois des engins spatiaux sont appelés à travailler à des températures de surface de 1800°C ainsi qu'à un gradient de température de l'ordre de 1300°C. A cette année-là, aucun matériau industriel n'était connu pour supporter de telles sollicitations thermomécaniques. [2]

Trois caractéristiques sont à considérer pour la conception de tels matériaux :

- ✓ Résistance thermique et résistance à l'oxydation à haute température de la couche superficielle du matériau.
- ✓ Ténacité du matériau coté basse température.
- ✓ Relaxation effective de la contrainte thermique le long du matériau [3].

L'idée originale des FGM a été proposée pour élaborer un nouveau composite profitant à la fois des propriétés des céramiques (Coté haute température) et des métaux (Coté basse température). A la fin de la première étape (1987-1989), les chercheurs avaient réussi à fabriquer des petites pièces expérimentales (10 mm d'épaisseur et 30mm de diamètre) pouvant résister à des températures maximales de 2000K (température de surface) et à un gradient de température de 1000K.

Dans la seconde étape (1990-1991), le but était de réaliser des pièces de tailles plus grandes et de formes plus complexes par rapport à celles réalisées dans la première étape. Pendant les années 90, non seulement les champs d'application des FGM s'est développé pour les matériaux de structure fonctionnant à haute température, mais s'est aussi élargi à d'autres applications : biomécaniques, technologie de capteur, optique, etc... On trouve une littérature très importante sur l'utilisation de ce matériau. Cependant, l'utilisation des structures en FGM dans les environnements avec de grands changements de température exige la connaissance des déformations.

I – 3 Types de matériaux FGM :

Au début du développement des matériaux à gradient fonctionnel, le concept était de supprimer l'interface qui existait dans le matériau composite traditionnel, et de le remplacer par une interface graduellement progressive. L'intérêt croissant pour ce type de matériau a entraîné le développement de différents types de FGM. Le type d'application prévue détermine généralement le type de FGM à utiliser. Les différents types de FGM qui sont actuellement produits comprennent le gradient de composition chimique FGM, le gradient de porosité FGM, et le gradient microstructural FGM. Chacun de ces types de FGM est discuté dans les sections suivantes.

I – 3 – 1 Matériaux à gradient de composition chimique

Il s'agit du type de FGM qu'on va traiter en détail dans ce mémoire, où la composition chimique varie progressivement, en fonction du rayon dans le matériau. Cela pourrait être sous la forme d'une seule phase, ou dans un matériau multiphasé. Un FGM monophasé est produit lorsque le composite est produit à partir d'une seule phase, en raison de la solubilité des éléments chimiques d'une phase dans l'autre phase. Cela se produit généralement pendant le processus de frittage [4]. Le changement progressif de la distribution des éléments chimiques dans la phase unique entraîne la formation du matériau à gradient fonctionnel. Selon le diagramme de phase et les limitations thermodynamiques, lorsque certains matériaux sont ajoutés à un autre matériau, le matériau qui a été ajouté serait soluble dans une gamme de conditions de composition et de mélange. Un tel matériau deviendrait ce qu'on appelle un matériau monophasé, mais avec une composition chimique variable en raison de la solubilité.

Ce type de FGM est moins commun. Les matériaux classés de façon fonctionnelle les plus couramment utilisés sont ceux qui ont une composition chimique multiphasique [5, 6]. Les phases et la composition chimique sont faites pour varier à travers le volume du matériau. Comme la composition du matériau varie d'un matériau à l'autre, il en résultera différentes phases avec différentes compositions chimiques qui aideraient à réaliser l'application prévue, pour laquelle le FGM a été conçu. Les différentes phases qui sont produites dépendent de la quantité de composition du matériau de renforcement et des conditions de fabrication, telles que la vitesse de refroidissement et le traitement thermique effectué sur ce matériau. En métallurgie des poudres, le procédé de production de FGM consiste à mettre couche par couche la composition de poudre requise, puis le compactage de la poudre et ensuite le frittage. Au cours du processus de frittage, certaines poudres métalliques réagiront pour former différents composés et phases chimiques. Ceux-ci varieraient en fonction de la position dans le volume du matériau à gradient fonctionnel.

Il en existe deux autres types qui seront cités ci-dessous.

I – 3 – 2 Matériaux à gradient de porosité :

Le matériau à gradient fonctionnel de gradient de porosité est un autre type de FGM, dans lequel la porosité dans le matériau est amenée à changer par rapport à une direction dans

le matériau. La forme et la taille des pores sont conçues et variées, selon les propriétés requises du matériau à gradation fonctionnel.

Ce type de matériau fonctionnel est très important pour les applications biomédicales, car le matériau naturel qu'ils ont l'intention de remplacer consiste en une porosité graduelle fonctionnelle, et la porosité graduelle aiderait également à l'intégration de l'implant et des tissus environnants. La porosité est importante pour le processus de cicatrisation de cet implant, et contribue également à la circulation sanguine vers les tissus intégrés. La porosité graduée aide également à réduire le poids total de l'implant et à améliorer le module d'élasticité du matériau de l'implant pour qu'il corresponde à celui du tissu humain. La porosité graduée aide à réduire la densité du bio-implant. Ceci est nécessaire pour éviter la protection contre les contraintes qui se produit lorsque le module d'élasticité de l'implant est supérieur à celui de l'os humain. Les matériaux à gradient de porosité sont produits par le dépôt de poudre avec un mélange variable de formes et de tailles de particules différentes qui aideraient à produire la porosité variable nécessaire avec les formes et tailles de pores changeantes figure (I.2).

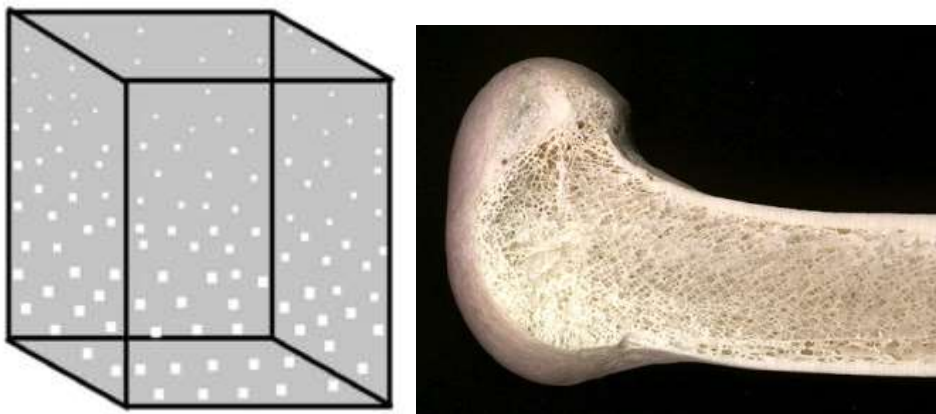


Figure (I.2) : à gauche le schéma d'un FGM à porosité graduée, à droite une image montrant la porosité graduelle d'un os.

Les matériaux à gradient de porosité pourraient être une gradation de la densité de la porosité ou une gradation de la taille des pores. La densité de porosité est produite avec la densité de la porosité changeant par rapport à la position spatiale à travers le volume du matériau. D'autre part, le gradient de taille des pores du FGM est produit en faisant varier les tailles des pores ou la forme des pores, ou les deux.

La gradation de la taille des pores peut être obtenue en faisant varier les tailles de particules de poudre qui sont utilisées à différents endroits dans le matériau pendant le processus de gradation. Il peut également être produit en faisant varier les paramètres de traitement de production ou en utilisant différents paramètres de frittage pour obtenir le gradient de porosité requis [7, 8].

La fonction de la gradation de la taille des pores est visible dans les implants osseux, où les plus grandes tailles de pores des implants à porosité fonctionnelle doivent être implantées dans l'os, afin d'aider la croissance osseuse, tandis que les pores plus petits sont utiles pour la croissance cartilagineuse [8]. La fonction du FGM à porosité comprend le changement progressif de la distribution des pores dans un FGM à porosité qui aide à absorber le choc d'un visage à l'autre. Il contribue également à fournir une isolation thermique; cela contribue à l'efficacité catalytique; et il contribue également à détendre les contraintes électriques et thermiques. Le gradient de porosité dans un FGM a également un effet sur la résistance à la traction et le module d'Young du matériau. Un certain nombre de FGM à gradient de porosité ont été rapportés dans la littérature pour l'application biomédicale [8- 9].

I – 3 – 3 Matériaux à gradient microstructural :

Le matériau à gradient fonctionnel microstructural est un autre type de FGM, où la microstructure est adaptée de sorte que les différentes microstructures sont produites dans le matériau, qui est amené à changer graduellement, de manière à obtenir les propriétés requises du matériau. La gradation microstructurale peut être obtenue au cours du processus de solidification, de sorte que la surface du matériau est trempé, par exemple, lors de la production d'une propriété de surface très dure du matériau. On laisse refroidir lentement le noyau du même matériau, ce qui aiderait à produire différentes microstructures de celles situées à la surface du matériau jusqu'à la partie la plus interne. De plus, la gradation microstructurale peut être obtenue par un processus de traitement thermique contrôlé. Par exemple, une microstructure variable peut être produite par un traitement thermique contrôlé d'une pièce cylindrique en alliage de titane.

Une microstructure fonctionnellement graduée peut être obtenue en laissant d'abord un métal liquide dont la température de fusion est inférieure à la température de fusion de l'alliage de titane et de telle sorte que la température de recristallisation de l'alliage de titane soit atteinte lorsque ce métal fondu est de l'installation de l'échangeur de chaleur. On laisse le

métal liquide s'écouler pendant un certain temps, puis on le retire, puis on laisse refroidir la pièce. La chaleur est transférée de la partie interne du cylindre à la partie externe. On s'attend à ce que la température de la partie la plus interne du cylindre soit beaucoup plus élevée que celle de la température la plus externe.

Cela entraînerait une microstructure variable, car la pièce peut refroidir. La partie externe se comporterait comme un dissipateur thermique, et la microstructure de cette zone serait plus grande en raison de la croissance des grains, tandis que la microstructure la plus interne serait plus petite et équiaxe, en raison de la microstructure raffinée pendant le processus de recristallisation. Dans un autre type de procédé de gradation microstructurale, le cylindre peut être chauffé à une certaine température, puis l'eau de refroidissement peut être acheminée à travers la partie interne du cylindre, également dans un système d'échangeur de chaleur. La partie interne du cylindre serait soumise à un refroidissement rapide, provoquant ainsi la formation d'une microstructure hors équilibre sur cette face. La microstructure la plus interne consisterait en une microstructure martensitique plus dure, tandis que la microstructure du cylindre loin de la partie la plus interne serait complètement différente de la microstructure sur la partie externe du cylindre.

Un diagramme schématique d'une microstructure typiquement graduée est présenté à la Figure. (I.3). En effet, la partie la plus externe du cylindre se refroidirait plus lentement, ce qui favoriserait la formation d'une microstructure plus équilibrée, et une microstructure largement équiaxe serait produite.

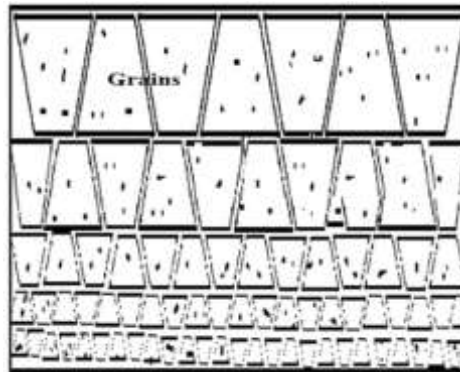


Figure (I.3) : Schéma d'une microstructure graduée.

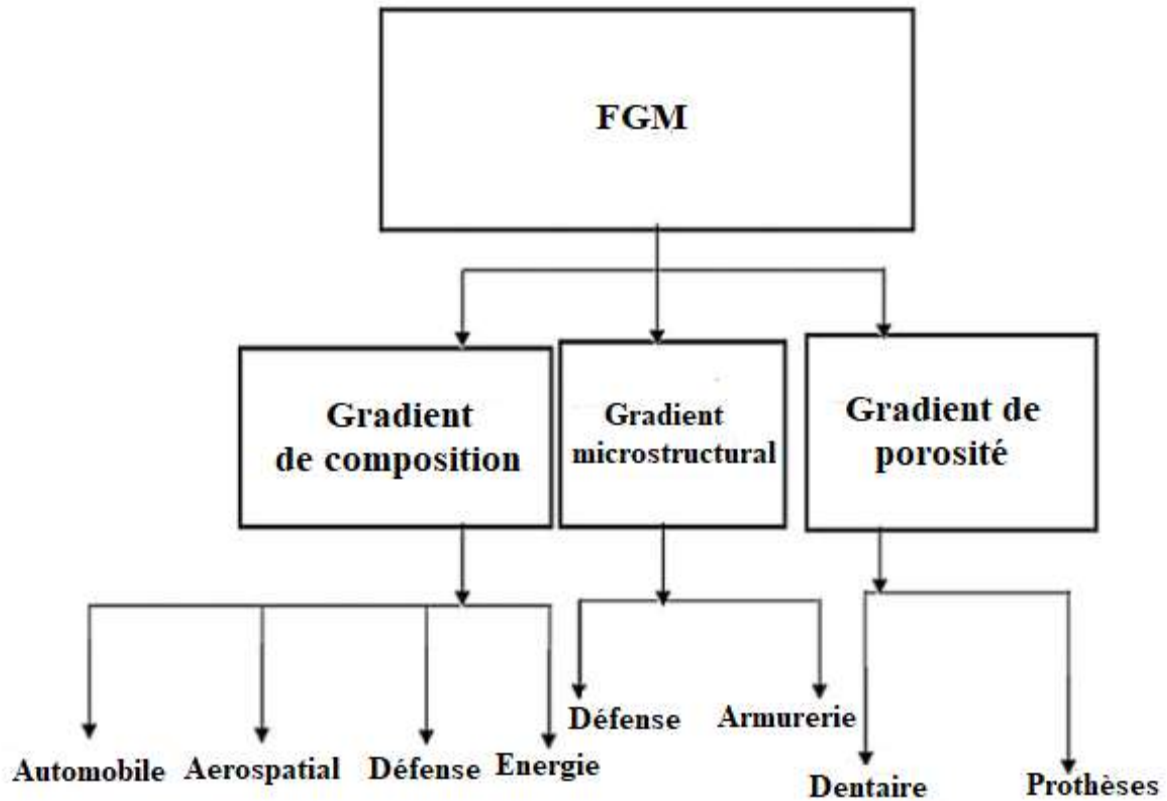
Les gradients dans la microstructure dus au traitement thermique pourraient également provoquer certains changements dans la composition élémentaire, et dans certains cas, la phase intermétallique pourrait être produite dans la microstructure graduée.

La microstructure graduée entraînerait un changement progressif des propriétés du matériau par rapport à la position, puisque la microstructure dépend de la position dans le FGM et que la microstructure est directement liée aux propriétés du matériau.

Les FGM à gradient microstructural trouvent leur application dans des composants qui doivent avoir une surface très dure pour résister à l'usure, et un noyau dur pour résister à l'impact élevé qui se produit pendant l'opération. Un exemple de ce type de matériau fonctionnellement gradué comprend l'acier cémenté, les cames ou les couronnes, les paliers ou arbres et les applications de turbine [10, 11]. Les domaines d'application des différents types de FGM sont présentés dans la section suivante.

I – 4 Domaines d'applications des matériaux à gradient fonctionnel:

Les caractéristiques importantes des FGMs les ont favorisées dans presque tous les domaines d'activité humaine. Des matériaux fonctionnellement calibrés sont actuellement utilisés dans un certain nombre d'industries, avec un potentiel énorme à utiliser dans d'autres applications à l'avenir. Les applications actuelles et l'application futuriste de la MGF sont présentées dans cette section. Les domaines d'application actuels sont l'aérospatiale, l'automobile, le biomédical, la défense, l'électricité / électronique, l'énergie, la marine, l'optoélectronique et la thermoélectronique. La figure (I.4) montre les différents types de FGM et leurs domaines d'application. L'utilisation des FGMs est très prometteuse dans les applications où les conditions de fonctionnement sont difficiles, par exemple pour les revêtements résistants à l'usure utilisés dans l'industrie minière, pour les boucliers thermiques, pour les composants des moteurs thermiques, pour les échangeurs de chaleur, pour les revêtements de plasma pour les réacteurs de fusion dans les réacteurs nucléaires, pour les générateurs thermoélectriques et dans les applications d'isolation électrique.



Figure(I.4) : Domaines d'application des trois types de matériaux à gradient fonctionnelle

Les matériaux à gradation fonctionnel sont également idéaux pour réduire le désaccord entre les propriétés thermomécaniques de la liaison métal-céramique qui aide à prévenir le décollement. Les demandes futures pour des matériaux fonctionnalisés sont dans de telles applications, où des propriétés mécaniques, thermiques et chimiques extraordinaires sont requises, et qui doivent être capables de supporter des environnements de travail sévères.

Ces futurs domaines d'application potentiels comprennent des applications où les applications structurelles et d'ingénierie nécessitent une combinaison de fonctions incompatibles, telles que la dureté et la ténacité. Les futurs domaines d'application des matériaux fonctionnels seront également étendus, lorsque les coûts de production de ces matériaux d'ingénierie importants sont réduits. Bien que certaines applications soient plus intéressées par la fiabilité du FGM que par le coût de telles matières, ces industries de niche comprennent l'aérospatiale et l'énergie nucléaire. D'autre part, le coût de production de qualité fonctionnelle les matériaux sont importants dans certaines applications telles que les outils de coupe, les pièces de machine et les composants du moteur.

L'utilisation de matériaux fonctionnels est maintenant considérée comme l'un des matériaux les plus importants, efficaces et efficaces pour promouvoir le développement durable dans les industries. Certaines de ces applications, telles que l'aérospatiale, l'automobile, le biomédical, la défense, l'énergie et l'industrie maritime, sont présentées et expliquées dans les sous-sections suivantes.

I – 4 – 1 L'industrie aérospatiale :

L'application initiale, dans laquelle des matériaux à gradient fonctionnel ont été développés, était destinée aux carrosseries planes. L'application de ce nouveau matériau est accrue au fil des années dans l'industrie aérospatiale. La plupart des équipements et des structures aérospatiales sont maintenant faits de matériaux fonctionnels. Ceux-ci comprennent les composants du moteur-fusée, la structure du treillis de l'engin spatial, les panneaux d'échange thermique et certaines structures telles que les réflecteurs, les panneaux solaires, le boîtier de la caméra, les roues de turbine, les pales, le bord d'attaque de missiles, et des navettes spatiales. Des matériaux fonctionnellement calibrés sont également utilisés pour les murs structuraux qui combinent les propriétés d'isolation thermique et acoustique. Les automobiles sont une autre industrie dans laquelle des matériaux fonctionnels ont été utilisés. Ceux-ci seront présentés dans la sous-section suivante

I – 4 – 2 L'industrie Automobile :

L'utilisation de matériaux fonctionnels dans l'industrie automobile est encore limitée en raison du coût élevé de production de matériaux fonctionnels. Cependant, le matériau est utilisé dans des parties très importantes de l'automobile, où le coût élevé actuel justifie son utilisation. Les présentes applications comprennent les chemises de cylindre de moteur pour les pistons de moteur diesel, les ressorts à lames, les bougies d'allumage, les chambres de combustion, les arbres d'entraînement, les amortisseurs, les volants, certaines pièces de carrosserie, les vitres et les freins de voiture de course. En outre, des matériaux à gradient fonctionnel sont utilisés dans des revêtements corporels améliorés pour automobiles.

I – 4 – 3 Biomédical :

Le corps humain est composé d'un certain nombre de matériaux fonctionnels, qui comprend les os et les dents. Ce sont les parties du corps humain les plus remplacées, à la

suite de dommages à ces parties, ou en raison du processus de vieillissement naturel. Les matériaux d'ingénierie qui sont biocompatibles sont utilisés pour leurs remplacements. Les parties naturelles que ces matériaux remplacent sont des matériaux fonctionnels dans la nature. C'est pourquoi la majorité des matériaux fonctionnels utilisés dans l'industrie biomédicale sont utilisés pour les implants. Les matériaux à gradient fonctionnel de porosité sont les plus couramment utilisés dans cette industrie, car leurs propriétés sont très proches de celles des pièces qu'ils ont l'intention de remplacer [12].

I – 4 – 4 Défense :

La capacité des FGM à offrir des propriétés de résistance à la pénétration en inhibant la propagation des fissures est une propriété attrayante qui fait que le matériau est favorisé dans l'industrie de la défense. Les matériaux classés fonctionnellement sont utilisés dans l'industrie de la défense dans des applications telles que les gilets pare-balles et les plaques d'armure. Un autre domaine d'application clé des matériaux fonctionnels est celui des véhicules blindés.

I – 4 – 5 Energie :

Les industries de l'énergie ont constamment besoin de différents types de matériaux fonctionnels, afin d'améliorer l'efficacité de certains de leurs équipements. Parmi les applications des matériaux fonctionnels dans l'industrie de l'énergie, citons la paroi interne des réacteurs nucléaires, le convertisseur thermoélectrique pour la conversion d'énergie, le panneau solaire, les cellules solaires, les tubes et récipients sous pression, l'électrode graduée pour la production de le combustible à oxyde solide, les matériaux piézo-électriques à gradient fonctionnel pour le transducteur à ultrasons, le diélectrique, la pile à combustible, les revêtements de pale de turbine, et pour les revêtements à barrière thermique.

I – 4 – 6 Électrique / Électronique :

Les matériaux fonctionnellement classés sont utilisés dans les industries électriques et électroniques de plusieurs façons. Ceux-ci comprennent la relaxation de la contrainte de champ dans l'électrode et l'interface espaceur de champ [13, 14], dans les diodes, dans les semi-conducteurs, pour les isolateurs, et pour la production de capteurs. Les éléments de protection thermique dans la micro-électronique sont également fabriqués à partir des matériaux fonctionnalisés à nanotubes de carbone.

I – 4 – 7 Marine :

Les matériaux fonctionnellement classés trouvent également leur application dans l'industrie maritime. Les applications des matériaux fonctionnels dans l'industrie marine et sous-marine comprennent l'arbre d'hélice, les cylindres de plongée, les dômes sonar, le système de tuyauterie composite et la coque cylindrique sous pression.

I – 4 – 8 Sport :

Des matériaux fonctionnellement calibrés sont utilisés dans un certain nombre d'équipements sportifs, tels que les clubs de golf, les raquettes de tennis et les skis. Ceux-ci sont tous faits de matériaux à gradient fonctionnels.

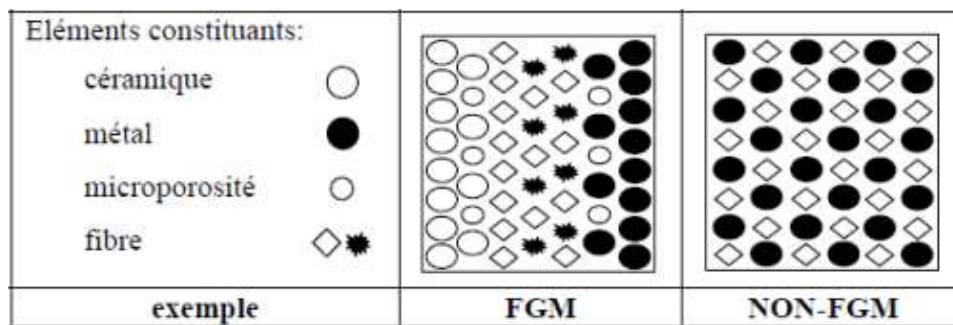
I – 4 – 9 Autres :

L'application de matériaux classés de manière fonctionnelle comprend également, mais sans s'y limiter, les outils et matrices de coupe pour améliorer la résistance thermique de l'outil de coupe et de la matrice, lames de rasoir en fer-aluminide / acier inoxydable [15] comme les bouteilles d'air pour la lutte anti-incendie, les portes ignifuges, les montures de lunettes et les casques. D'autres comprennent les tubes cryogéniques de l'IRM, les récipients sous pression, les réservoirs de carburant, les mallettes pour ordinateurs portables, les instruments de musique et les tables de radiographie. Les applications des MGF au Japon ont également été présentées par Miyamoto [16]. Les lecteurs peuvent consulter le matériel pour d'autres lectures. Le domaine d'application des matériaux gradués fonctionnellement devrait augmenter si le coût de production de ce matériau est réduit à l'avenir.

I – 5 Comparaison des matériaux types FGM et les matériaux composites**Traditionnels :**

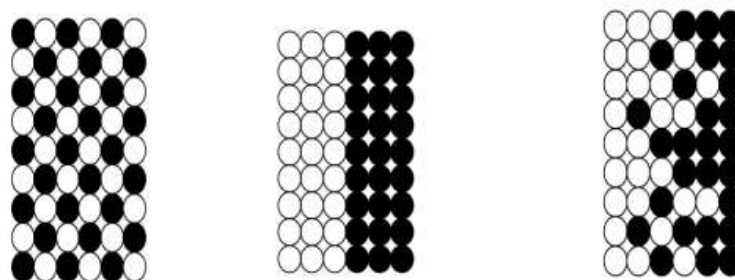
On peut facilement comparer les FGM aux composites car ils partent du même principe, si on prend les FGM on peut généralement dire que ce sont des matériaux contenant des composants différents tels que les céramiques et les métaux. La différence avec les composites c'est que les FGM sont non homogènes figure(I.5), et leur changement continue dans la composition et donc dans la microstructure. Dans certains cas on peut avoir un FGM constitué d'un même matériau mais de microstructure différente.

Le concept FGM peut être appliqué dans divers domaines pour des usages structuraux et fonctionnels. Au Japon, plusieurs programmes ont été conduits au cours des années 80 et 90 afin de développer l'architecture des FGM, et d'étudier également ces matériaux pour les applications de hautes températures (par exemple, éléments pour navettes spatiales hypersoniques) ainsi que pour des applications fonctionnelles (par exemple, convertisseurs thermoélectriques et thermo-ioniques). Ces programmes ont conduit au développement de la conception architecturale du FGM et de ces perspectives.



Figure(I.5) : Schéma de comparaison des FGM avec les composites.

Yoshihisa [17] a établi un modèle simple illustrant les différences entre les matériaux à gradient de propriétés (FGM) et les matériaux plus conventionnels figure (I.6). Le matériau plan composé a une caractéristique plane, et le matériau relié, a une frontière sur l'interface de deux matériaux. Les FGM ont d'excellentes caractéristiques qui diffèrent de ceux des matériaux plans composés et reliés. Par conséquent, les FGM attirent l'attention en termes de leur application dans les domaines industriels puisqu'ils ont une double propriété des deux matières premières qui sont mélangées ensemble, et la distribution composante est graduée sans interruption. Par exemple, l'un des FGM qui se compose du métal et de la céramique a la caractéristique de la conductivité thermique et de la force métallique dans le côté en métal et la résistivité aux hautes températures dans le côté en céramique.



Matériau plan composé (a), Matériau relié (b), Matériau fonctionnellement gradué(c).

Figure(I.6) : Différentes schématisations de matériaux

I – 6 Quelques méthodes d’élaboration des matériaux FGM :

Plusieurs techniques sont disponibles pour produire des matériaux fonctionnalisés (FGM). Quelques un d'entre eux sont décrits ci-dessous en détail.

I – 6 – 1 Frittage en infiltration :

Cette technique est constituée de deux étapes et convient à la fabrication d’un composite à gradient de fonction composé de deux matériaux dont les températures de fusion sont très différentes. La première étape est de fabriquer une matrice frittée du matériau à haute température de fusion avec un gradient de porosité. La seconde étape est de remplir ces porosités avec le deuxième matériau fondu par infiltration. Le résultat est excellent pour la diminution de la contrainte thermique [18]. Cette technique peut être généralement appliquée pour plusieurs combinaisons de matériaux qui sont chimiquement inertes et qui ont des points de fusion bien différents les uns par rapport aux autres.

I _ 6 – 2 Implantation ionique :

C’est une technique avancée pour la fabrication des FGMs permettant de réaliser seulement des épaisseurs fines (sur différents substrats (plastique, céramique, et métaux). Le traitement d’effectue par les faisceaux énergétiques d’ions eu via de gaz réactifs. Les couches fabriquées présenteront un gradient de composition qui peut être très finement contrôlé

I – 6 - 3 Technique de dépôt à la vapeur :

Les techniques de dépôt à la vapeur décrivent une variété de méthodes de dépôt sous vide qui peuvent être utilisées pour produire des films minces sur les matériaux de base. Toutes ces techniques peuvent être utilisées pour produire des FGM minces uniquement. Différents types de techniques de dépôt en phase vapeur comprennent le dépôt physique en phase vapeur (PVD) et le dépôt chimique en phase vapeur (CVD). Ils consomment beaucoup d’énergie et produisent des jauges toxiques comme sous-produits [19]. D'autres techniques

basées sur le dépôt qui peuvent déposer des revêtements minces fonctionnellement dégradés sont le dépôt par faisceau d'électrons (EBD), le dépôt par faisceau ionique (IBD) et la synthèse à haute température auto-propagatrice (SHS) [20]. Toutes les méthodes mentionnées ci-dessus ne sont pas économiques pour produire des MGF de type en vrac.

I – 6 - 4 Métallurgie des poudres :

La technique basée sur la métallurgie des poudres peut être utilisée pour produire des MGF de type en vrac avec une structure discontinue (par étapes). Le procédé est réalisé en utilisant des étapes comprenant le pesage et le mélange de poudre selon la distribution spatiale préconçue selon les exigences fonctionnelles, l'empilage et l'éperonnage des poudres prémélangées, et enfin le frittage [21].

I – 6 - 5 Méthode centrifuge :

La méthode centrifuge est capable de produire des FGM de type en vrac à structure continue. Il utilise la force de gravité par filage de la moisissure pour produire des matériaux fonctionnels [22]. La différence de densité des matériaux et le filage des moules produisent des FGM. Cette méthode a deux inconvénients: cette méthode ne peut produire que des FGM de forme cylindrique et il existe une limite à laquelle le type de gradient peut être produit.

I - 6 - 6 Techniques de fabrication par impression 3D :

En anglais : Solid free form fabrication (SFF)/Additive manufacturing (AM), également appelée impression 3D, est un processus de jonction de matériaux pour fabriquer des objets à partir de données de modèles 3D, généralement couche par couche, par opposition à la technologie de fabrication soustractive [23]. Cet outil sans procédé de fabrication peut produire des pièces métalliques denses en peu de temps, avec une grande précision. Les processus de AM en métal peuvent être classés en deux groupes principaux: - les technologies basées sur la technologie de fusion de lit de poudre (PBF) et les technologies basées sur le DED (Directed Energy Deposition). Ces deux technologies peuvent en outre être

classées selon le type de source d'énergie utilisée. Dans les technologies à base de PBF, l'énergie thermique fusionne sélectivement les régions de lit de poudre. Le frittage / fusion sélectif au laser (SLS / SLM) et la fusion par faisceau d'électrons (EBM) sont les principaux processus représentatifs des technologies basées sur le PBF. Dans les technologies à base de DED, l'énergie est utilisée pour fondre les matériaux (poudre ou fil métallique) par fusion. Le formage au laser par laser (LENS) / le dépôt direct de métal (DMD), la fabrication de forme libre de faisceau d'électrons (EBFFF) et l'AM à base d'arc sont quelques-unes des technologies à base de DED.

I – 7 Avantages et inconvénients des FGM :

Les matériaux fonctionnellement gradués présentent des avantages et des inconvénients:

I – 7 – 1 Avantages des FGM :

Outre l'accomplissement de son objectif principal, c'est à dire de fournir les différents requis des propriétés en divers points et des surfaces du futur produit qui, pourrait être réalisé par un simple revêtement [24] et beaucoup d'autres soulignent divers avantages supplémentaires de la FGM. Ils énumèrent certains avantages qui en résultent principalement de la non-existence d'une interface forte FGM, tels que:

- ✓ Diminuer les contraintes thermiques causées par les différences de coefficients de dilatation thermique des matériaux utilisés.
- ✓ Absence d'une interface nette devrait conduire à un contrôle d'ensemble mieux des contraintes
- ✓ Meilleure cohésion entre différents matériaux, par exemple un métal et une céramique.
- ✓ Extension de la région fonctionnelle avant d'atteindre la valeur limite de la déformation plastique.
- ✓ Suppression de délaminage.

- ✓ Augmentation de la ténacité à la rupture.
- ✓ Elimination des singularités des contraintes à divers endroits, tels que les surfaces libres, des coins, des racines de fissures, etc.

I – 7 - 2 Inconvénients des FGM :

Le principal obstacle à une application plus large de la FGM est leur fabrication compliquée en raison de l'inadéquation des propriétés différentes, par exemple, la température de fusion, des affinités différentes pour divers autres éléments, la taille des particules, la morphologie, etc. Un exemple type est un mélange d'un métal avec la température de fusion (T_1) et une céramique avec une température de fusion (T_2). Dans la plupart des cas, un tel couple est habituellement ($T_1 \ll T_2$). Puis, si la température de fabrication est d'environ (T_1), la céramique est encore non fondue et la structure finale contient des particules de céramique non fondue dans une matrice métallique. Dans de nombreux cas, une telle structure présente une grande porosité et une petite adhérence entre les différents composants et son application générale est limitée. Cependant, pour des applications spéciales, la présence de particules très dures (carbures) dans une matrice solide peut être souhaitable.

D'autre part, travailler autour de (T_2) va certainement entraîner une oxydation rapide et de l'évaporation de nombreux métaux. La formation de phases indésirables, etc. Les matériaux doivent être fabriqués dans une atmosphère protectrice ou à une basse pression et ces deux technologies sont très coûteuses [24].

I – 8 Développements récents et défis des FGM

Dans le cas de la plupart des MGF, une propriété matérielle varie dans le sens de l'épaisseur [25]. Cependant, les applications modernes peuvent exiger des matériaux FG dans lesquels les propriétés matérielles dans l'épaisseur et les directions axiales [26]. Récemment, un matériau de gradient dans lequel les propriétés varient dans les deux directions sont également développés et étudiés en profondeur [27, 28]. Ces matériaux intelligents sont connus sous le nom de matériaux à gradient fonctionnel bidirectionnel (BDFGM). La technique AM basée sur le dépôt de métaux au laser est la plus appropriée pour produire de

tels BDFGM [29]. Bien que d'importants progrès technologiques aient été réalisés dans le domaine des FGM, quelques problèmes critiques doivent encore être résolus. Une base de données correcte des FGM en termes de paramètres et de tests n'est toujours pas disponible. La méthode d'essai et de mesure conventionnelle peut ne pas convenir pour évaluer les performances des MGF modernes, de sorte que des développements de méthodes d'essai avancées sont nécessaires [29]. La plupart des techniques de traitement des FGM sont très coûteuses, de sorte qu'une technique de traitement à faible coût qui peut produire en masse des MGF de grande taille et complexes reste encore un défi. Le choix du matériau approprié pour l'application prévue est le défi immédiat et direct pour le développement futur de la technologie dans le domaine de la recherche sur les FGM.

I – 9 Sommaire des contributions au développement des FGM :

Les matériaux fonctionnalisés (FGM) ont généralement des modules variant continuellement dans une ou plusieurs directions spatiales et leur utilisation peut optimiser une ou plusieurs caractéristiques fonctionnelles d'une structure, par exemple en utilisant des MGF on peut réduire la concentration des contraintes autour d'un trou [30] et aux interfaces entre couches adjacentes constituées de matériaux distincts [31]. De même, les propriétés des matériaux peuvent être adaptées pour optimiser la fréquence fondamentale d'une plaque laminée [32]. Les références [33-34] ont discuté des performances mécaniques des structures FG telles que les cylindres, les sphères et les plaques utilisées dans les domaines de l'aérospatiale, de la marine et du génie civil. Du point de vue mathématique, les structures FG sont des corps inhomogènes, et des solutions pour plusieurs problèmes impliquant des matériaux élastiques linéaires inhomogènes peuvent être trouvées dans le livre de Le khnitskii [35]. On pourrait potentiellement diviser une plaque FG en plusieurs couches minces parfaitement liées ayant des propriétés matérielles différentes mais constantes, par exemple, voir le livre de Timoshenko et Goodier [36] pour les cylindres composites. Avec une augmentation du nombre de couches, la solution de la structure en couches se rapproche de celle d'un corps FG. Même si Batra [37] a utilisé la méthode des éléments finis pour analyser les déformations finies axisymétriques d'un cylindre creux pressurisé composé d'un matériau FG Mooney-Rivlin, son évaluation des propriétés du matériau aux points d'intégration équivaut à diviser le cylindre en plusieurs cylindres homogènes fait d'un matériau homogène. Pan et Roy [38] ont utilisé une technique similaire couplée à la méthode de séparation des

variables et à l'expansion des inconnues en termes de séries de Fourier dans la direction circonférentielle pour étudier les déformations statiques en déformation plane d'un cylindre élastique FG isotrope. Horgan et Chan [39] ont analysé les déformations d'un cylindre FG composé d'un matériau élastique linéaire isotrope compressible avec un module de Young E une fonction de loi de puissance du rayon r et du coefficient de Poisson ν constant. Tarn [40] a étudié les déformations thermomécaniques des cylindres FG déformés en tension, en torsion, en cisaillement et en dilatation radiale dus à la charge de pression et aux changements de température. Jabbari et al. [41] et Zimmerman et Lutz [42] ont analysé les problèmes thermo élastiques bidimensionnels pour les cylindres FG creux. Oral et Anlas [43] ont calculé des contraintes dans un cylindre FG anisotrope. Shao et Ma [44] ont étudié les déformations thermo-élastiques tridimensionnelles d'un panneau cylindrique FG de longueur finie et soumis à des charges thermiques mécaniques et stationnaires non uniformes. Tarn et Chang [45] ont analysé la torsion de barres circulaires élastiques de matériaux orthotropes radialement inhomogènes et cylindriques, en mettant l'accent sur les effets terminaux. Batra [46] a étudié les déformations en torsion d'un cylindre circulaire solide composé d'un matériau isotrope élastique linéaire incompressible dont le module de cisaillement varie dans la direction axiale. En plus de supposer que les modules d'élasticité varient selon une fonction de loi de puissance de r , certains chercheurs ont supposé qu'ils sont des fonctions exponentielles de r . Basé sur l'hypothèse que le coefficient de Poisson ν est constant et le module de Young E est une fonction exponentielle de r , Tutuncu [47], Chen et Lin [48], et Theotokoglou et Stampouloglou [49] ont analysé les contraintes et déplacements dans les cuves sous pression. . Les travaux précités ont supposé que ν est constant mais E varie. Cependant, les mesures expérimentales de Marur et Tippur [50] indiquent que ν varie également avec la position dans un matériau FG. Des problèmes avec E et ν variant avec la position ont été étudiés dans [51, 52]; Par exemple, Mohammadi et Dryden [51] ont supposé que ν varie de la même manière que E , et Li et Peng [52] ont analysé les déformations axisymétriques d'un cylindre ou disque creux FG avec des propriétés matérielles arbitrairement variables en exprimant le déplacement radial en termes de Legendre polynômes. Nous étudions ici des problèmes axisymétriques et non-axisymétriques pour un cylindre FG avec E et ν fonctions indépendantes de r . Nous étudions également le problème de personnalisation du matériau et trouvons la variation spatiale des propriétés du matériau pour obtenir une distribution de contrainte souhaitée dans un cylindre sous une limite prescrite.

I - 10-Conclusion :

Les FGM, pour la plupart, sont des matériaux constitués des composants différents le plus connu étant les céramiques et les métaux. Ce sont donc des composites améliorés présentant des caractéristiques macroscopiquement inhomogènes. Le changement continu dans la composition est donc dans la microstructure des matériaux, distingue les FGM des matériaux composites conventionnels. Il en résulte un gradient qui déterminera les propriétés matérielles des FGM. Dans certains cas, on peut avoir un FGM constitué d'un même matériau mais de microstructure différente ou d'une porosité graduelle.

Dans ce chapitre I on a donné une idée sur ces matériaux, leurs domaines d'utilisation, leurs avantages et inconvénients, leur fabrication ainsi qu'une brève comparaison avec les composites conventionnels

Dans les chapitres suivants on va présenter une solution analytique pour les contraintes et les déplacements des cylindres et sphères creux à parois épaisses sous pression en matériau gradué fonctionnellement avec des propriétés exponentiellement variables.

I – INTRODUCTION :

Les formes creuses à paroi épaisse sont des éléments structuraux communs à de nombreuses applications d'ingénierie, notamment les réservoirs sous pression, les coques de navires, les ailes et les fuselages d'avions, les structures de confinement des centrales nucléaires, les tuyaux, les roquettes, les missiles, les toits en béton, les cheminées, les tours de refroidissement, les réservoirs de stockage de liquide et de nombreuses autres structures. La coquille sphérique et le cylindre à paroi épaisse soumis à la pression sont des problèmes classiques du génie mécanique étudiés par plusieurs chercheurs dans le passé.

Une classe de nouveaux matériaux composites avancés comprend des matériaux fonctionnels (FGM) avec des propriétés de matériau variant en continu. Ces matériaux ont reçu une attention considérable dans de nombreuses applications d'ingénierie depuis leur apparition en 1984 au Japon [54, 55].

Dans ce travail, on a utilisé la méthode des éléments finis pour analyser les températures axisymétriques d'un cylindre et d'une sphère creux. La sphère et le cylindre sont composés d'un matériau élastique, linéaire à gradient de propriétés fonctionnelles.

Le coefficient de transfert de chaleur est représenté par une loi de puissance puis variant exponentiellement. L'équation qui régit le transfert de chaleur se transforme en une équation différentielle non linéaire que nous avons résolu analytiquement.

Une étude numérique par méthode des éléments finis a été présentée, les résultats sont présentés sous forme d'évolution de la température dans la direction radiale. Les résultats analytiques sont ensuite comparés au numérique pour trouver un bon accord entre les deux.

II - Formulation du problème :

II – 1 Partie analytique :

II – 1 – 1-1 CAS n°1 « CYLINDRE SIMPLE » :

Considérons un cylindre creux à paroi épaisse axisymétrique et infiniment long, c'est-à-dire, sa longueur est grande devant son diamètre.

Le cylindre est constitué d'un matériau solide avec un rayon intérieur R_i et un rayon extérieur R_o . Il est soumis à une température intérieure T_1 et une température extérieure T_2 . On suppose que le matériau est solide élastique isotrope linéaire et homogène avec le coefficient de transfert de chaleur par conduction λ est constant de la direction radiale.

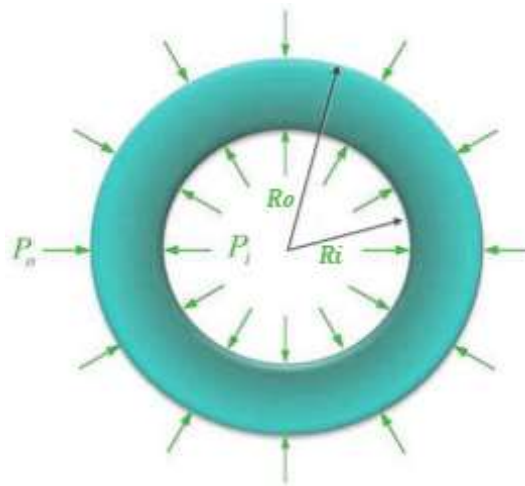


Figure (II.1) : configuration d'un cylindre FGM sous pression.

En l'absence des forces de volume, l'équation d'équilibre en coordonnées cylindriques (r, θ) peut s'écrire de la manière suivante :

$$\frac{d}{dr} \left(r \lambda \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (1)$$

Où $T(r)$ est la distribution de la température le long de la paroi.

En intégrant l'équation (1) on obtient:

$$r \frac{dT}{dr} = C_1 \quad ; \quad \frac{dT}{dr} = \frac{C_1}{r} \quad (2a,b)$$

En intégrant une seconde fois:

$$T(r) = C_1 \ln(r) + C_2 \quad (3)$$

Où : C_1 et C_2 sont les constantes d'intégration.

Dans le cas d'un cylindre soumis à un gradient de température, les constantes C_1 et C_2 peuvent être obtenues à partir des conditions aux limites suivantes :

$$\begin{aligned} T(r = R_1) &= T_1 \\ T(r = R_2) &= T_2 \end{aligned} \quad (4)$$

D'où :

$$\begin{aligned} T(r = R_1) &= C_1 \ln(R_1) + C_2 = T_1 \\ T(r = R_2) &= C_1 \ln(R_2) + C_2 = T_2 \end{aligned} \quad (5)$$

On obtient :

$$C_1 = \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}, \quad C_2 = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)} \ln(R_1) \quad (6a,b)$$

La distribution de température est donnée par :

$$T(r) = \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)} \ln\left(\frac{r}{R_1}\right) + T_1 \quad (7)$$

II – 1 – 1-2 CAS n°1 « CYLINDRE FGM » :

Considérons un cylindre creux à paroi épaisse axisymétrique et infiniment long, c'est-à-dire, sa longueur est grande devant son diamètre.

Le cylindre est constitué d'un matériau solide FGM avec un rayon intérieur R_i et un rayon extérieur R_o . Il est soumis à une température intérieure T_i et une température extérieure T_o . On suppose que le matériau est solide élastique isotrope linéaire et nonhomogène avec un coefficient de transfert de chaleur par conduction $\lambda(r)$ est une fonction de la direction radiale.

$$\frac{d}{dr} \left(r \lambda(r) \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (8)$$

Avec :

$$\lambda(r) = \lambda_1 \left(\frac{r}{R_1} \right)^n \quad (9)$$

En remplaçant (9) dans l'équation (8) on obtient :

$$\frac{d}{dr} \left(\lambda_1 \left(\frac{r}{R_1} \right)^n r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (10)$$

Ce qui donne :

$$\frac{d}{dr} \left(\left(\frac{\lambda_1}{R_1^n} \right) r^{n+1} \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{d}{dr} \left(r^{n+1} \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (12)$$

En intégrant l'équation (12) :

$$\left(r^{n+1} \frac{dT}{dr} \right) = C_1 \quad (13)$$

En intégrant une seconde fois :

$$T(r) = \frac{C_1}{n} r^{-n} + C_2 \quad (14)$$

Dans le cas d'un cylindre soumis à un gradient de température, les constantes C_1 et C_2 peuvent être obtenues à partir des conditions aux limites suivantes :

$$\begin{aligned} T(r = R_1) &= T_1 \\ T(r = R_2) &= T_2 \end{aligned} \tag{15}$$

D'où :

$$\begin{aligned} T(r = R_1) &= \frac{C_1}{n} R_1^{-n} + C_2 = T_1 \\ T(r = R_2) &= \frac{C_1}{n} R_2^{-n} + C_2 = T_2 \end{aligned} \tag{16}$$

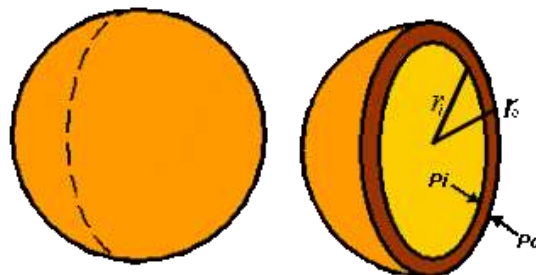
On obtient :

$$C_1 = \frac{T_1 - T_2}{R_2^{-n} - R_1^{-n}} n ; C_2 = T_1 + \frac{T_1 - T_2}{R_2^{-n} - R_1^{-n}} R_1^{-n} \tag{17a,b}$$

La distribution de température est donnée par :

$$T(r) = \frac{T_1 - T_2}{R_2^{-n} - R_1^{-n}} R_1^{-n} \left(1 - \frac{r^{-n}}{R_1^{-n}} \right) + T_1 \tag{18}$$

II – 1 – 2 -1 CAS n°2 « SPHERE » :



Figure(II.2) : configuration d'une sphère creuse FGM sous pression.

Considérons une sphère creuse avec un rayon interne R_1 et un rayon externe R_2 , soumis respectivement à la température interne et externe T_1 et T_2 (Fig. II.2). On suppose que le coefficient de transfert de chaleur par conduction λ prend une valeur constante.

L'équation de la chaleur sous sa forme sphérique est donnée par :

$$\frac{1}{r^2} \left(r^2 \lambda \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (19)$$

En intégrant l'équation (19) on obtient :

$$r^2 \frac{dT}{dr} = C_1 \frac{dT}{dr} = \frac{C_1}{r^2} \quad (20a,b)$$

En intégrant une seconde fois on obtient la distribution de la température le long de la paroi.

$$T(r) = -\frac{C_1}{r} + C_2 \quad (21)$$

Dans le cas d'une sphère soumis à un gradient de température, les constantes C_1 et C_2 peuvent être obtenues à partir des conditions aux limites suivantes :

$$\begin{aligned} T(r = R_1) &= T_1 \\ T(r = R_2) &= T_2 \end{aligned} \quad (22)$$

D'où :

$$\begin{aligned} T(r = R_1) &= -\frac{C_1}{R_1} + C_2 = T_1 \\ T(r = R_2) &= -\frac{C_1}{R_2} + C_2 = T_2 \end{aligned} \quad (23)$$

On obtient :

$$C_1 = \frac{(T_1 - T_2)(R_1 \cdot R_2)}{R_1 - R_2} ; \quad C_2 = T_1 + \frac{(T_1 - T_2)(R_1 \cdot R_2)}{R_1 - R_2} \frac{1}{R_1} \quad (24a,b)$$

La distribution de température est donnée par :

$$T(r) = \frac{(T_1 - T_2)(R_1 \cdot R_2)}{R_1 - R_2} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{r} \right) + T_1 \quad (25)$$

II – 1 – 2 -2 CAS n°2 « SPHERE FGM » :

Considérons une sphère creuse avec un rayon interne R_i et un rayon externe R_o , soumis respectivement à la température interne et externe T_1 et T_2 (Fig. II.2). On suppose que le coefficient de transfert de chaleur par conduction $\lambda(r)$ varie suivant la direction radiale.

L'équation de la chaleur sous sa forme sphérique est donnée par :

$$\frac{1}{r^2} \left(r^2 \lambda(r) \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (26)$$

Avec :

$$\lambda(r) = \lambda_1 \left(\frac{r}{R_1} \right)^n \quad (27)$$

En remplaçant (9) dans l'équation (8) on obtient :

$$\frac{d}{dr} \left(\lambda_1 \left(\frac{r}{R_1} \right)^n r^2 \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (28)$$

Ce qui donne :

$$\frac{d}{dr} \left(\left(\frac{\lambda_1}{R_1^n} \right) r^{n+2} \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (29)$$

$$\frac{d}{dr} \left(r^{n+2} \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (30)$$

En intégrant l'équation (30) on obtient :

$$r^{n+2} \frac{dT}{dr} = C_1 \frac{dT}{dr} = \frac{C_1}{r^{n+2}} \quad (31a,b)$$

En intégrant une seconde fois on obtient la distribution de la température le long de la paroi.

$$T(r) = -C_1 \frac{r^{-(n+1)}}{n+1} + C_2 \tag{32}$$

Dans le cas d'une sphère soumis à un gradient de température, les constantes C_1 et C_2 peuvent être obtenues à partir des conditions aux limites suivantes :

$$\begin{aligned} T(r = R_1) &= T_1 \\ T(r = R_2) &= T_2 \end{aligned} \tag{33}$$

D'où :

$$\begin{aligned} T(r = R_1) &= -C_1 \frac{R_1^{-(n+1)}}{n+1} + C_2 = T_1 \\ T(r = R_2) &= -C_1 \frac{R_2^{-(n+1)}}{n+1} + C_2 = T_2 \end{aligned} \tag{34}$$

On obtient :

$$C_1 = \frac{(T_1 - T_2)(n+1)}{(R_2^{-(n+1)} - R_1^{-(n+1)})} ; \quad C_2 = T_1 + \frac{(T_1 - T_2)(n+1)}{(R_2^{-(n+1)} - R_1^{-(n+1)})} R_1^{-(n-1)} \tag{35a,b}$$

La distribution de température est donnée par :

$$T(r) = \frac{(T_1 - T_2)(n+1)}{(R_2^{-(n+1)} - R_1^{-(n+1)})} R_1^{-(n+1)} \left(1 - \frac{r^{-(n+1)}}{R_1^{-(n+1)}} \right) + T_1 \tag{36}$$

II – 2 Partie numérique :

Une méthode de résolution numérique à base de la méthode des éléments finis a été utilisée afin de simuler le comportement thermique et la distribution des températures d'une sphère et d'un cylindre FGM, soumis à un gradient de température, ce qui peut nous mener à des résultats qu'on pourra par la suite comparer avec solution analytique en guise de validation du modèle numérique.

II – 2 - 1 CAS n°1 « CYLINDRE » :

Les étapes de l'étude numérique se feront comme suit :

A) Définitions globales :

Dans cette section on définit les variables.

La seule variable à définir dans ce cas est $r=(x^2+y^2)^{0.5}m$

B) Composant :

Dans cette section on doit donner la géométrie, implémenter un matériau à la géométrie, définir les conditions aux limites et lui donner un maillage

- **Géométrie :**

On travaille sur un model 2D, dans lequel on trace 2 cercles pleins. Le premier aura un rayon $R_2=0.2m$ dans lequel on va soustraire un autre cercle plein de rayon $R_1=0.1m$ pour arriver à la forme qui suit dans la figure (II.3).

- **Matériau :**

On travaillera dans le domaine de la mécanique du solide. Le matériau utilisé est de type élastique linéaire. Le coefficient de transfert de chaleur a été implémenté dans le modèle numérique :

- Coefficient de transfert de chaleur par conduction en loi de puissance :

$$\lambda(r) = \lambda_1 \left(\frac{r}{R_1} \right)^n$$

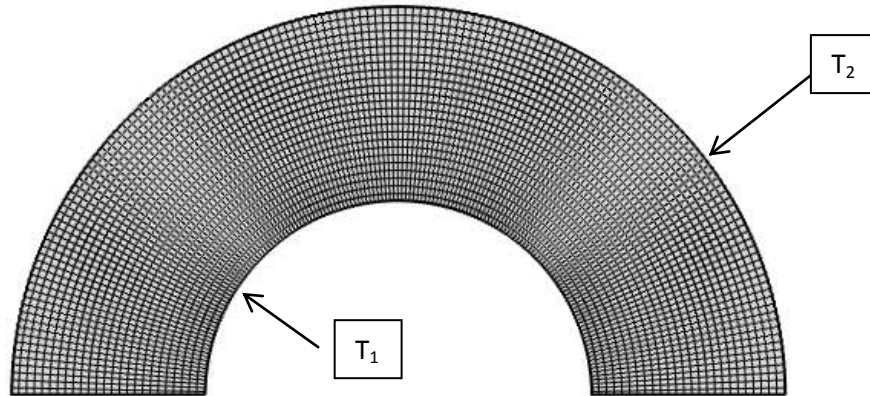


Figure (II.3) : Géométrie 2D d'un demi-cylindre creux

- **Conditions aux limites :**

Une condition aux limites est une contrainte sur les valeurs que prennent les solutions des équations aux dérivées ordinaires et des équations aux dérivées partielles sur une frontière.

1. Nous allons supposer un demi-cylindre pour des raisons de symétrie. Pour cela nous imposons sur les deux bords du cylindre la condition de **symétrie**.
2. Le cylindre aura une température extérieure $T_2 = 20^\circ\text{C}$ pour $R_2 = 0.2$ m.
3. Et enfin, une température intérieure $T_1 = 100^\circ\text{C}$ est imposé au niveau de la frontière interne $R_1 = 0.1$ m,

C) Maillage :

Un maillage est la discrétisation géométrique d'un domaine par des éléments proportionnés fins et bien définis. L'objet d'un maillage est de procéder à une simplification d'un système par un modèle représentant ce système et, éventuellement, son environnement (le milieu), dans l'optique de simulations de calculs ou de représentations graphiques.

Sachant que plus le maillage est fin, plus les résultats obtenus seront précis, au dépend du temps de calculs que pourrait prendre le logiciel.

II – 2 - 2 CAS n°2 « SPHERE » :

Les étapes de l'étude numérique se feront comme suit :

A) Définitions globales :

Dans le cas de la sphère qui sera un corps 2D la variable r sera définie comme suit :

$$r=(x^2+y^2)^{0.5} \text{ m.}$$

B) Composant :

Dans cette section on doit donner la géométrie, implémenter un matériau à la géométrie, définir les conditions aux limites et lui donner un maillage.

• Géométrie :

Nous avons construit un model 2D, dans lequel un quart de sphère creuse a été représenté en raison de l'axisymétrie que présente la géométrie. La partie pleine aura un rayon externe $R_2=0.2$ m et la partie interne aura un rayon $R_1=0.1$ m. La géométrie est présenté sur la figure (II.4) :

• Matériau :

On travaillera dans le domaine de la mécanique du solide. Le matériau utilisé est de type isotrope, élastique et linéaire, avec :

- Le coefficient de transfert de chaleur par conduction est une fonction en loi de

$$\text{puissance : } \lambda(r) = \lambda_1 \left(\frac{r}{R_i} \right)^n$$

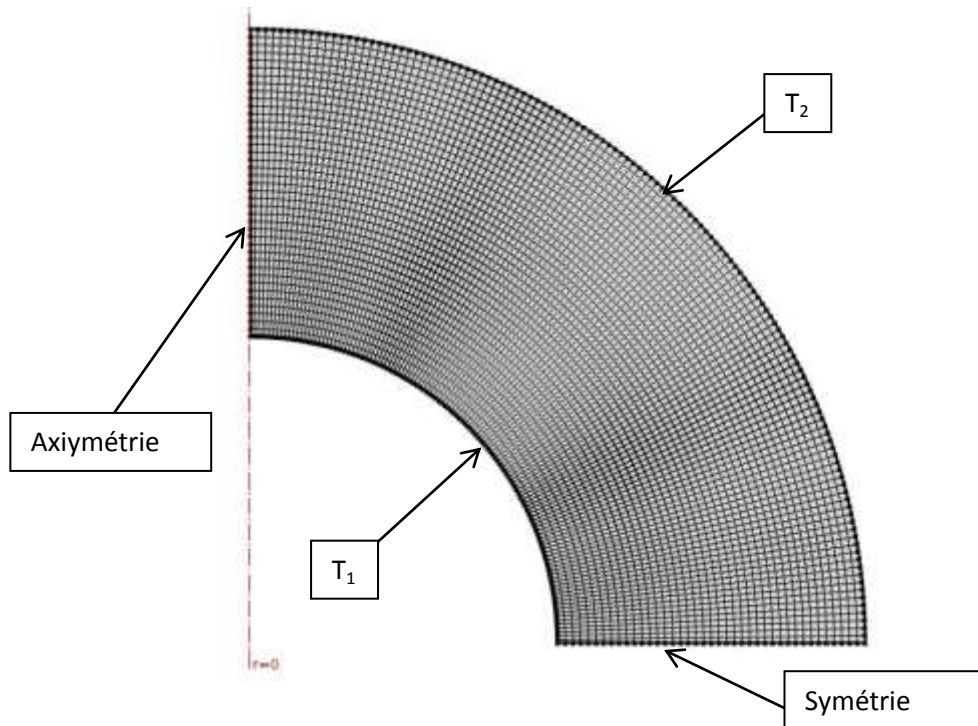


Figure (II.4) : Géométrie 2D d'une demi-sphère creuse

- **Conditions aux limites :**

Une condition aux limites est une contrainte sur les valeurs que prennent les solutions des équations aux dérivées ordinaires et des équations aux dérivées partielles sur une frontière.

1. En raison de la symétrie du problème, nous avons considéré un quart de sphère. Une condition d'axisymétrie a été imposée au bord de celle-ci, tandis qu'une condition de symétrie a été imposée à l'autre bord
2. Une température $T_2=20^\circ\text{C}$ a été imposée sur la frontière externe $R_1=0.2$ m
3. Une température $T_1=100^\circ\text{C}$ a été imposée sur la frontière interne au niveau de $R_2=0.1$ m,

C) Maillage :

Pour ce cas on utilisera un maillage tétraèdre libre, Figure (II.4). Sachant que plus le maillage est fin, plus les résultats obtenus seront précis, au dépend du temps de calculs que pourrait prendre le logiciel.

III - CONCLUSION :

Dans ce chapitre, les deux méthodes (analytique et numérique), utilisées a fin d'étudier le comportement thermique du matériau FGM pour deux géométries de formes différentes (cylindrique et sphériques) ont été présentés.

Les paramètres entre le cylindre et la sphère sont prises sous les mêmes conditions afin de pouvoir comparer entre les deux géométries dans le chapitre qui va suivre.

Les résultats obtenus seront présentés dans le chapitre III sous forme d'évolution des températures.

I – Résultats et discussion :

Considérons un cylindre à gradient fonctionnel creux de rayon intérieur $R_1 = 0,1$ m et le rayon extérieur $R_2 = 0,2$ m. Le coefficient de transfert de chaleur par conduction à la paroi interne est $\lambda_1 = 41 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Les températures internes et externes appliquées sont de 100°C et 20°C respectivement.

Dans une seconde partie, un modèle numérique a été construit à l'aide d'un code de calcul éléments finis (FEM). Ensuite, la fonction du coefficient de transfert de chaleur par conduction du matériau FGM a été implémentée dans le code de calcul FEM. Le modèle numérique construit peut être validé analytiquement dans un premier cas étudié (cylindre).

Dans un premier temps, pour différentes valeurs de n , le coefficient de transfert de chaleur par conduction est tracé en fonction du rayon à travers la paroi du cylindre.

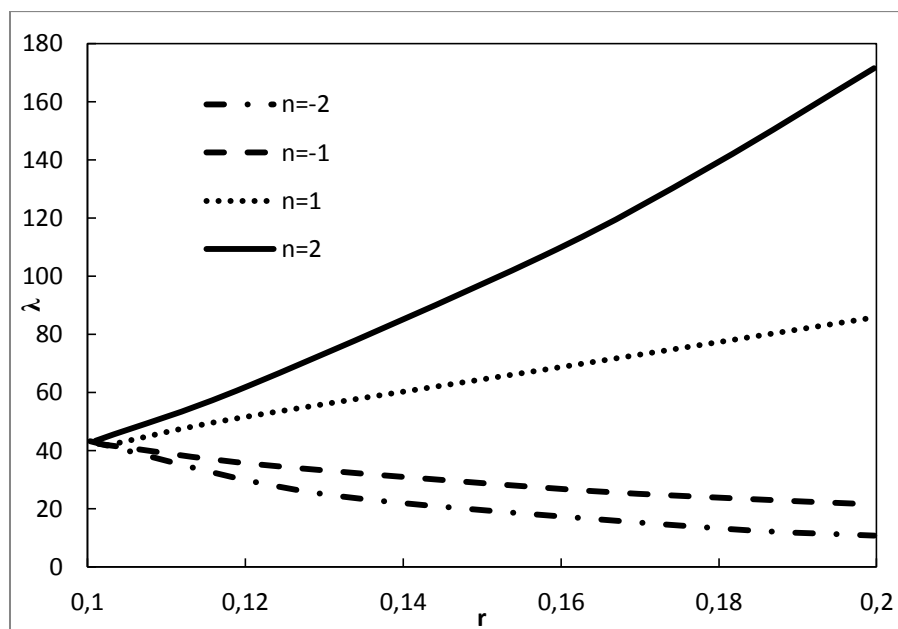


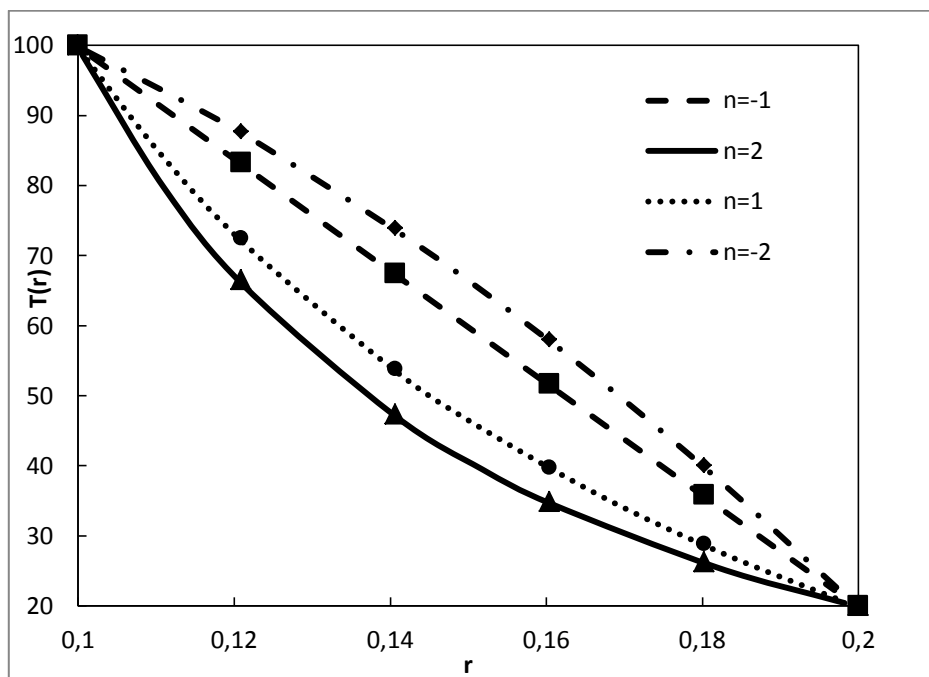
Figure (III.1) : Variation de la conductivité thermique à travers la paroi

La figure (III.1) illustre la distribution de la conductivité thermique pour différentes valeurs du coefficient de non homogénéité $n \in [-2, -1, 0, 1, -1]$ à travers l'épaisseur du cylindre/sphère.

Pour des valeurs de n positives, la conductivité thermique du matériau est croissante en fonction du rayon du cylindre, tandis que pour des valeurs négatives, elle est décroissante.

Il ressort qu'une augmentation positive de n signifie une diminution de la résistance thermique du matériau. Alors que les valeurs négatives augmentent la résistance thermique dans la direction radiale.

II – 1 Cas du cylindre :



Figure(III.4) : Variation de Température à travers la paroi du cylindre

La figure (III.4) illustre l'évolution de la température $T(r)$ en fonction du rayon à travers l'épaisseur de la paroi du cylindre et cela pour différentes valeurs du paramètre de non-homogénéité $n \in [-2, -1, 1, 2]$.

Les résultats ont été obtenus en considérant la distribution radiale de la température avec le coefficient de non-homogénéité, comme indiqué à la figure III.4 qui présente une

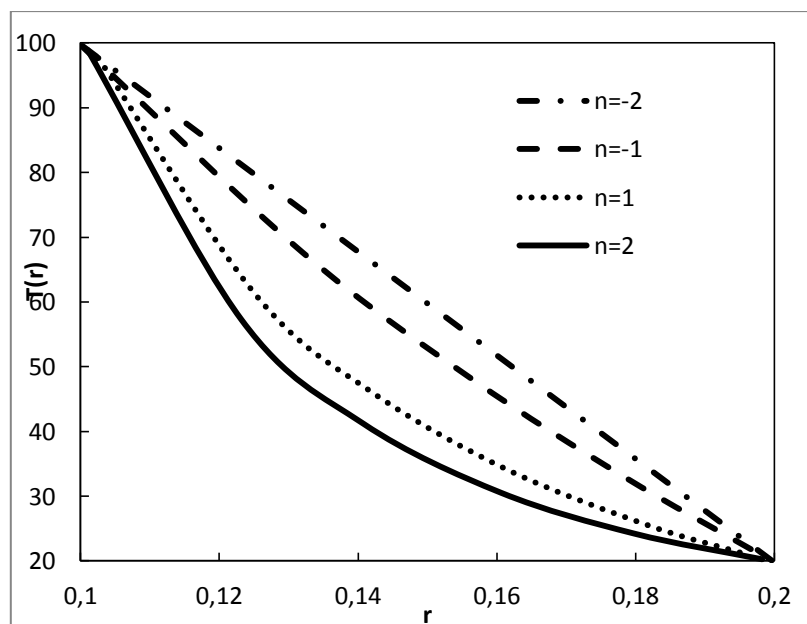
comparaison entre les résultats obtenus par les deux méthodes, analytique et numérique, et nous pouvons conclure que les résultats sont en accords avec les uns et les autres.

Il est a observé dans la figure (III.4) que la température est maximale sur la paroi interne $r=R_i$ et est minimale sur la paroi externe du cylindre $r=R_0$. La température diminue de la paroi interne à la paroi externe du cylindre. Cette observation est faite pour toutes les valeurs du paramètre de non homogénéité $n \in [-2, -1, 0, 1, -1]$.

Pour des valeurs négatives de ϕ , la température est plus important, tandis que pour des valeurs positives de ϕ , la température est plus faible pour une position radiale donnée. C'est-à-dire qu'en augmentant la valeur du paramètre de non homogénéité, qui n'est autre qu'une augmentation dans la conductivité thermique, il en résulte une diminution des températures à travers la paroi du cylindre.

II - 2 Cas de la sphère:

Dans cette partie, de la même manière que le premier cas nous allons suivre la même démarche mais cette fois ci le cas d'une sphère sous pression est considéré, en raison de la symétrie que présent la sphère il n'est pas nécessaire de prendre la géométrie complète. Nous nous contenterons de mener l'étude dur une demi-sphère.



Figure(III.16):L'évolution du déplacement le long de la paroi de la sphère :comparaison des résultats analytiques et numériques.

La figure (III.16) illustre l'évolution de la température $T(r)$ en fonction du rayon à travers l'épaisseur de la paroi de la sphère et cela pour différentes valeurs du paramètre de non homogénéités $n \in [-2, 2]$.

Il est observé dans la figure (III.16) que les températures sont maximales sur la paroi interne $r=R_i$ et sont minimales sur la paroi externe de la sphère $r=R_0$. L'intensité des températures diminue de la paroi interne à la paroi externe de la sphère. Cette observation est faite pour toutes les valeurs du paramètre de non homogénéité $n \in [-2, -1, 0, 1, -1]$.

Pour des valeurs négatives de n , la température est plus importante, tandis que pour des valeurs positives de n , la température est plus faible. C'est-à-dire qu'en augmentant la valeur du paramètre de non homogénéité, qui n'est autre qu'une augmentation dans la conductivité du matériau, il en résulte une diminution des températures à travers la paroi du cylindre pour une position radiale donnée.

III - Conclusion

Pour montrer l'effet de l'inhomogénéité sur les distributions de température, différentes valeurs de n ont été considérées pour le paramètre de non-homogénéité de matériau. La distribution de température a été calculée analytiquement puis comparée aux solutions de la méthode des éléments finis (FEM) et un bon accord a été trouvé.

On a comparé les résultats analytiques des températures pour chacune des 2 structures cylindrique et sphérique soumises à un gradient de température et pour différentes valeurs de n .

Les résultats présentés montrent que l'inhomogénéité du matériau a une influence significative sur les comportements thermique des structures creuses épaisses tels que le cylindre et la sphère constituées de matériaux à gradient fonctionnel exponentiel. Ainsi, en utilisant ces données et en choisissant une bonne valeur, les ingénieurs peuvent concevoir ces structures FGM spécifique qui peut répondre à certaines exigences particulières.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire on a présenté les matériaux FGM, comme étant des composites améliorés permettant de subvenir aux besoins des structures dans d'extrêmes conditions. Leur importance et leurs domaines d'applications ne cesse de s'élargir au fil des décennies, néanmoins leur fabrication reste un défi. Pour pouvoir concevoir et généraliser un tel matériau il faut d'abords passer par une étude analytique et numérique afin de pouvoir le faire et c'est ce qu'on a proposé dans ce document.

Une solution analytique et un modèle numérique ont été développés permettant d'obtenir la distribution de la température dans une sphère et un cylindre creux constitués d'un matériau fonctionnellement gradué sous la charge de pressions. Les propriétés du matériau sont supposées être graduées le long de la direction radiale selon une fonction de loi de puissance.

Pour montrer l'effet de l'inhomogénéité sur les distributions de contraintes, différentes valeurs de n ont été considérées pour le paramètre de non-homogénéité de matériau. D'après les résultats obtenus, on peut conclure que l'indice de loi de puissance a un grand effet sur la température radial dans ces deux cas FGM. Les distributions de température a été comparées aux solutions de la méthode des éléments finis (FEM) et un bon accord a été trouvé.

Les résultats présentés montrent que l'inhomogénéité du matériau a une influence significative sur les comportements thermique des structures creuses épaisses tels que le cylindre et la sphère constituées de matériaux à gradient fonctionnel exponentiel. Ainsi, en utilisant ces données et en choisissant une bonne valeur, les ingénieurs peuvent concevoir ces structures FGM spécifique qui peut répondre à certaines exigences particulières.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:

- [1] Shahistha A, Varghese B, Baby A 2014 A review on functionally graded materials *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)*, Volume 3, Issue 6, Pages 90-101, ISSN (e): 2319 – 1813 ISSN (p): 2319 – 1805.
- [2] Koizumi M. the concept of FGM. *Ceramic transaction, functionally graded materials* (1992) 34, 3-10.
- [3] ABDIZADEH, H., *Elaboration Et Caractérisation De Composites Duplex, «Composites Laminaires Tri-Couches A Base D'alumine »*, Thèse Docteur D'état, Institut National Des Sciences Appliquées De Lyon Et L'université Claude Bernard Lyon IFrance, 1997, 212p.
- [4] Bharti, I., Gupta, N., Gupta, K.M.: Novel applications of functionally graded nano, opto-electronic and thermo-electric materials. *Int. J. Mater. Mech. Manuf.* 1, 221–224 (2013).
- [5] Mahamood, R.M., Akinlabi, E.T.: Laser-metal deposition of functionally graded Ti6Al4V/TiC. *Mater.Des.*84, 402–410 (2015).
- [6] Mahamood, R.M., Akinlabi, E.T., Shukla M., Pityana, S.: Functionally graded material: An overview. In: *Proceedings of the world congress on engineering WCE 2012*, vol. 3, pp. 1593– 1597 (2012).
- [7] Mahamood, R.M., Akinlabi, E.T.: Modelling of process parameters influence on degree of porosity in laser-metal deposition process. In: Yang G-C et al. (eds) *Transactions on Engineering Technologies*. Springer, pp. 31–42 (2015).
- [8] Mia, X., Sun, D.: Graded/gradient porous biomaterials. *Materials* 3, 26–47 (2010).doi:10.3390/ma3010026.
- [9] Hsu, Y.H., Turner, I.G., Miles, A.W.: Fabrication of porous bioceramics with porosity gradients similar to the bimodal structure of cortical and cancellous bone. *J. Mater. Sci. Mater. Med.* 18, 2251–2256 (2007).
- [10] Schneider, M.J.: The Timken Company, and Madhu S. Chatterjee, bodycote introduction to surface hardening of steels. In: Dossett, J., Totten, G.E. (eds) *ASM Handbook, Steel Heat-Treating Fundamentals and Processes*, vol. 4 (2013).
- [11] Lu, L., Chekroun, M., Abraham, O., Maupin, V., Villain, G.: Mechanical properties estimation of functionally graded materials using surface waves recorded with a laser interferometer. *NDT and E Int.* 44(2), 169–177 (2011).
- [12] Thieme, M., Wieters, K.P., Bergner, F., Scharnweber, D., Worch, H., Ndop, J., Kim, T.J., Grill, W.: Titanium-powder sintering for preparation of a porous functionally graded material destined for orthopaedic implants. *J. Mater. Sci.* 12, 225–231 (2001).
- [13] Shumiya, H., Kato, K., Okubo, H.: Feasibility studies on FGMs (functionally graded materials) application for gas insulated equipment. In: *IEEE Conference on Electrical Insulation and dielectric Phenomena*, pp. 360–363 (2004).

- [14] Kato, K., Kurimoto, M., Shumiya, H., Adachi, H., Sakuma, S., Okubo, H.: Application of functionally graded material for solid insulator in gaseous-insulation systems. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 13(2), 362–372 (2006).
- [15] Miyamoto, Y., Kaysser, W.A., Rabin, B.H., Kawasaki, A., Ford, R.G.: *Functionally Graded Materials: Design, Processing and Applications*. Kluwer Academic, Boston (1999).
- [16] Miyamoto, Y.: The applications of functionally graded materials in Japan. *Mater. Technol.* 11(6), 230–236 (1996).
- [17] Yoshihisa Uchida (2004), —Properties of functionally graded materials, Manufactured by Progressive Lamination Method for Applications, 39-51-B, Vol. 39-B.
- [18] TAKAHASHI. M. ITOH. Y KASHIWAYA fabrication and evaluation of w/cu gradient material by sintering and infiltration technique , in proceeding of the first international symposium on functionally gradient materials Japan 1990.
- [19] J. F. Groves, and H. N. G. Wadley 1997 Functionally graded materials synthesis via low vacuum directed vapor deposition *Composites Parts B* 28B, (1997), 57-69.
- [20] R. Knoppers, J. W. Gunnink, J. Van den Hout, and W. Van Vliet The reality of functionally graded material products *TNO Science and Industry*, The Netherlands, pp 38-43.
- [21] Zhu J, Lai Z, Yin Z, Jeon J, and Lee S Fabrication of ZrO₂–NiCr functionally graded material by powder metallurgy *Materials Chem. Phys.* 68 130. Crossref.
- [22] Watanabe Y, Inaguma Y, Sato H, and Miura-Fujiwara E 2009 Novel fabrication method for functionally graded materials under centrifugal force: the centrifugal mixed-Powder method *Materials*, Vol. 2, No. 4, pp.2510-2525.
- [23] Bhavar V, Kattire P, Patil V, Khot S, Gujar K, Singh R 2014 A Review on Powder bed fusion technology of metal additive manufacturing *AMSI Conference 2014*, Bangalore, India.
- [24] Narottam P. Bansal, Jitendra P. Singh, Jacques Lamon, Sung R. Choi, "Processing and Properties of Advanced Ceramics and Composites III: Ceramic Transactions" ; John Wiley & Sons; page 110, 4 août, (2011).
- [25] Hao D, Wei C 2016 Dynamic characteristics analysis of bi-directional functionally graded Timoshenko beams *Composite structures (Sciencedirect)*, 141, (2016), 253-263.
- [26] Simsek M 2015 Bi-directional functionally graded materials (BDFGMs) for free and forced vibration of Timoshenko beams with various boundary conditions *Composite structures (Sciencedirect)*, 133, (2015), 968-978.
- [27] Qian LF, Batra RC 2005 Design of bidirectional functionally graded plate for optimal natural frequencies. *J Sound Vib* 2005;280:415–24.
- [28] Enab T Performance improvement of total knee replacement joint through bidirectional functionally graded material *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS* Vol:14 No:02.

- [29] Udupa G, Rao S, Gangadharan K 2014 Functionally graded composite materials: An overview”, *International conference on advances in manufacturing and material engineering, AMME 2014*.
- [30]. Leissa, W., Vagins, M.: The design of orthotropic materials for stress optimization. *Int. J. Solids Struct.***14**, 517–526 (1978)
- [31]. Icardi, U., Ferrero, L.: Optimizing fiber direction in perforated orthotropic media to reduce stress concentration. *Compos. Sci. Technol.* **69**, 575–585 (2009)
- [32]. Batra, R.C., Jin, J.: Natural frequencies of a functionally graded anisotropic rectangular plate. *J. Sound Vib.* **282**, 509–516 (2005)
- [33]. Zamani, N.M., Rahimi, G.H.: Deformations and stresses in rotating FGM pressurized thick hollow cylinder under thermal load. *Sci. Res. Essay* **4**(3), 131–140 (2009)
- [34]. Jin, X., Wu, L.Z., Sun, Y.G., Guo, L.C.: Microstructure and mechanical properties of ZrO₂/NiCr functionally graded materials. *Mater.Sci. Eng. A* **509**, 63–68 (2009)
- [35]. Lee, K.H., Lee, Y.J., Cho, S.B.: Characteristics of a transiently propagating crack in functionally graded materials. *J. Mech. Sci. Technol.* **23**, 1306–1322 (2009)
- [36]. Genin, G.M., Birman, V.: Micromechanics and structural response of functionally graded, particulate matrix, fiber-reinforced composites. *Int. J. Solids Struct.***46**, 2136–2150 (2009)
- [37]. NematAlla, M., Ahmed, K.I.E., Hassab Allah, I.: Elastic-plastic analysis of two-dimensional functionally graded materials under thermal loading. *Int. J. Solids Struct.***46**, 2774–2786 (2009)
- [38]. Khabbaz, R.S., Manshadi, B.D., Abedian, A.: Nonlinear analysis of FGM plates under pressure loads using the higher-order shear deformation theories. *Compos.Struct.***89**, 333–344 (2009)
- [39]. Lechnitskii, S.G.: *Theory of Elasticity of an Anisotropic Body*. Mir, Moscow (1981)
- [40]. Timoshenko S, P., Goodier, J.N.: *Theory of Elasticity*. McGraw–Hill, New York (1969)
- [41]. Batra, R.C.: Finite plane strain deformations of rubberlike materials. *Int. J. Numer. Methods Eng.* **15**(1), 145–160 (1980) Exact Solutions and Material Tailoring for Functionally Graded Hollow 201
- [42]. Pan, E., Roy, A.K.: A simple plane-strain solution for functionally graded multilayered isotropic cylinders. *Struct. Eng. Mech.* **24**(6), 727–740 (2006)
- [43]. Horgan, C.O., Chan, A.M.: Pressurized hollow cylinder or disk problem for functionally graded isotropic linear elastic materials. *J. Elast.* **55**(1), 43–59 (1999)
- [44]. Tarn, J.Q.: Exact solutions for functionally graded anisotropic cylinders subjected to thermal and mechanical loads. *Int. J. Solids Struct.***38**, 8189–8206 (2001)
- [45]. Jabbari, M., Sohrabpour, S., Eslami, M.R.: General solution for mechanical and thermal stresses in a functionally graded hollow cylinder due to nonaxisymmetric steady-state loads. *J. Appl. Mech.* **70**, 111–118 (2003)