

Etude de l'influence des contraintes dans une plaque en matériau non homogène

Moussa Abualnour^{1,2}
Kheira Soltani³
Mohammed Sid Ahmed Houari^{1,2}

¹ Université Mustapha Stambouli de Mascara,
Faculté de Sciences et Technologie,
Département de Génie Civil, 29000 Mascara,
Algérie.

² Laboratoire Matériaux et Hydrologie,
Université de Sidi Bel Abbès,
Faculté de Technologie Sidi Bel Abbès,
Algérie.

³ LMSR, Université de Sidi Bel Abbès,
Département de Génie Mécanique,
Faculté de Technologie Sidi Bel Abbès,
Algérie.

Résumé :

L'étude sur l'analyse linéaire des contraintes résiduelles pour les matériaux à gradients de propriétés, dites FGM est l'une des sujets les plus importants en génie et sciences des matériaux grâce à leurs utilisations dans les plus importants secteurs d'industrie (réacteurs nucléaires, réacteurs de fusion, navettes spatiales et le génie civil), la différence des propriétés thermiques des plis successifs et la fabrication des pièces à haute température de traitement vers la température ambiante fait naître des contraintes résiduelles à leurs interfaces. L'objectif de ce thème est de déterminer les contraintes résiduelles dues aux sollicitations mécaniques et thermiques des structures en matériaux fonctionnellement gradués, en vue d'optimiser leur valeur en fonction des propriétés du matériau suivant la fonction de loi de puissance (P-FGM).

1. Introduction

La modification des propriétés d'un matériau en fonction de variation des paramètres extérieurs d'un environnement changeant, est possible, pour cela on a besoin d'un matériau qui a des propriétés structurales ou fonctionnelles présentant une adaptabilité à ce dernier. Pour des applications structurales à haute température, des matériaux avancés sont nécessaires pour avoir la force à cette température, à la résistance au fluage, à la dureté proportionnée et à la résistance de choc thermique. Tandis que la céramique possède la faible densité, la bonne force à un environnement agressif à haute température et la résistance au fluage, mais leur ténacité à la rupture et la résistance aux chocs thermiques sont pauvres, ce qui limite leur utilisation dans les applications exigeantes. Des matériaux métalliques, d'autre part possèdent de haute ténacité et une excellente résistance au choc thermique tandis qu'ils se caractérisent par faiblesse de leurs effectifs liés à des propriétés à haute température généralement de les rendre peu attrayants. Pour combiner les avantages de ces deux matériaux [1], [2], pour satisfaire les besoins en matériaux dans beaucoup d'applications, on rejoint la céramique avec le métal. Toutes fois les contraintes thermiques résiduelles résultant de refroidissement après un traitement à haute température et les problèmes dus à la mauvaise compatibilité chimique sont les obstacles à l'usage largement répandu en association de la céramique au métal. Le problème commun a été la grande différence dans les caractéristiques de la dilatation thermique de la céramique et des métaux qui sont d'intérêt pour les applications structurales [3]. L'adhésion de nombreuses combinaisons céramique-métal provoque des contraintes qui dépassent la résistance à la rupture de la céramique surtout dans les régions proches de la surface ce qui conduit à une fissuration de la céramique ou les joints ayant une faible force.

Les matériaux à gradient de propriété (FGM) offrent la solution au problème de contrainte thermique car ce système compose d'un changement progressif dans les fractions de volume des constituantes d'un endroit à l'autre dans un composant. Pour des applications telle que système de protection thermique, FGM sont en cours d'élaboration afin de réduire au minimum les contraintes thermiques et de choc thermique qui mène habituellement à la rupture de la céramique.

2. Gradient des Propriétés matérielles des plaques FGM

La plaque est entièrement en céramique (Al_2O_3) à la surface inférieure et changera à tout métal (Ni) à la surface supérieure. Le matériau dans la région intermédiaire se compose de différentes proportions d' Al_2O_3 et Ni. Les fractions de volume des deux phases varient dans la direction z , selon une forme fonctionnelle donnée. Dont les propriétés matérielles, module de Young et le coefficient de Poisson, de la surface supérieure et inférieure sont différents mais sont prédéterminés pour satisfaire les demandes d'exécution. Cependant, le module de Young et le coefficient de Poisson de la plaque changent de façon continue seulement dans la direction de l'épaisseur (axe z) c'est-à-dire, $E = E(z)$, $\nu = \nu(z)$. Le but principal est l'analyse linéaire des contraintes résiduelles pour les matériaux à gradients de propriétés en (P-FGM).

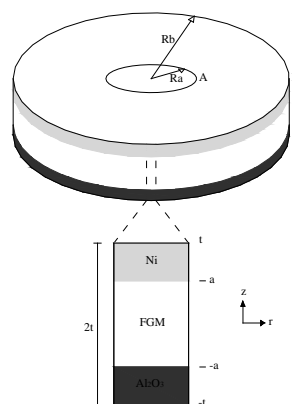


Figure 1. Schéma d'un système de matériau à gradient de propriété (FGM).

Le calcul du module d'élasticité de chacun des constituants en fonction de la température est considéré comme varier selon [4], [5]

$$G(T) = G_0 + \left[1 + \frac{(T-300)}{T_m} \theta\right] \quad \text{Avec} \quad \theta = \frac{T_m}{G_0} \frac{dG}{dT} \quad (1)$$

$$E(T) = 2G(T)(1 + \nu) \quad (2)$$

Dans lesquels $G(T)$, G_0 , T_m , θ et ν sont le module de cisaillement à la température T , module de cisaillement à 300 K, la température de fusion, le module qui dépend de la température, et le coefficient de Poisson, respectivement.

Le coefficient d'expansion thermique qui dépend de la température peut être exprimé par [6]

$$\alpha(T) = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 \quad (3)$$

Dans lesquels a_0 , a_1 , et a_2 des constantes. Les paramètres indépendants de la température et les valeurs des constantes dans les équations (1) et (3) sont données dans le tableau 3.1 indiqué ci-après. Dans les calculs indépendants de la température, les valeurs de coefficients de dilatation thermique sont linéarisées de 300 à 1373 K et les valeurs du module d'élasticité à la température ambiante ont été utilisées.

Table 1. Valeurs des constants utilisés dans les calculs des contraintes thermiques résiduelles [5], [6].

Les Constants	AL ₂ O ₃	Ni
α (T indépendant)	8×10^{-6}	17×10^{-6}
G_0 (MPa)	1.55×10^5	7.89×10^4
T_m (K)	2320	1726
θ	-0.35	-0.64
ν	0.22	0.3
a_0	6.3×10^{-6}	1.5×10^{-5}
a_1	2.3×10^{-9}	3.4×10^{-9}
a_2	5.1×10^{-13}	5.8×10^{-12}

3. Les propriétés matérielles de la plaque P-FGM

On assume que la fraction de volume du P-FGM suit une fonction de loi de puissance :

$$V_c(z) = 1 \quad \text{pour} \quad -t \leq z \leq -a \quad (4a)$$

$$V_c(z) = \left(\frac{a-z}{2a}\right)^n \quad \text{pour} \quad -a \leq z \leq a \quad (4b)$$

$$V_c(z) = 0 \quad \text{pour} \quad a \leq z \leq t \quad (4c)$$

Où n est un paramètre du matériau, V_c est la fraction de volume d'Al₂O₃. z est la coordonnée dans la direction de l'épaisseur.

Une fois que la fraction de volume local a été définie, les propriétés matérielles de la plaque P-FGM peuvent être déterminées par la loi de mélange [7]:

$$E(z) = V_c(z)E_c + [1 - V_c(z)]E_m \quad (5a)$$

$$\text{Et} \quad \alpha(z) = V_c(z)\alpha_c + [1 - V_c(z)]\alpha_m \quad (5b)$$

Où E_m et E_c sont respectivement les modules de Young de la surface supérieure (Ni) et de la surface inférieure (Al₂O₃) de la plaque FGM.

4. Modèle de contrainte thermique.

Les contraintes résiduelles sont habituellement définies comme celles existants dans une pièce au repos, en absence de chargement appliqué (des contraintes internes auto-équilibrantes qui existent dans un matériau soumis à aucune force extérieure). Les contraintes résiduelles sont liées à des déformations créées par les incompatibilités entre les grains, ou bien la grande différence entre le coefficient de dilatation thermique dans le cas de l'assemblage de deux matériaux différents [3], [8]. Elles peuvent être générées lors d'un processus de fabrication, généralement à haute température pour les matériaux FGM puis un refroidissement à température ambiante, ou par une sollicitation mécanique, thermique ou chimique, etc. les contraintes résiduelles ont une grande influence sur les comportements de matériau et leur présence peut entraîner la concentration de contrainte qui se superpose sur le chargement extérieur. Elles influencent alors la résistance, la ductilité, le fluage et la ténacité du matériau.

Les contraintes résiduelles après refroidissement ou de chauffage de ce système de FGM comportent deux principales contributions, un résultant de la contrainte d'équilibre due à la contraction ou dilatation et d'autres qui vient du moment d'équilibre en raison de la distribution des contraintes asymétriques [8]. Cette dernière résulte de l'asymétrie des variations dans la proportion des constituants et par conséquent les caractéristiques d'élasticité et de la dilatation thermique, à travers l'épaisseur. Toutes ces contraintes peuvent être déterminées de la façon suivante : si par exemple, la plaque de FGM est considérée comme à refroidir vers le bas après traitement à haute température, les couches riches en métal en haut contractent plus que les couches riches en céramique en bas de la plaque. Si la plaque est limitée dans la direction r à deux endroits, A et B (figure 1) et, en outre, si le plan de flexion est empêché, les contraintes opposant à ces restrictions se développent dans la plaque. Les contraintes de traction $\sigma_r(z)$, résultant de restriction seulement, les contractions dans la direction r sont données par :

$$\sigma_r(z) = E(z)\alpha(z)\Delta T \quad (6)$$

Où $\Delta T = T_p - 300$ (K). T_p est la température à laquelle la plaque de FGM est fabriquée, par exemple, à haute pression ou à température de frittage. On peut éliminer la contrainte si une force de compression statiquement équivalente F est superposée aux contraintes de traction.

La grandeur de cette force est donnée par :

$$F = - \int_{-t}^t E(z)\alpha(z)\Delta T dz \quad (7)$$

Les contraintes de compression $\sigma_c(z)$, produits par cette force varient dans la direction z due à la variation du module d'élasticité et sont définies comme suit :

$$\sigma_c(z) = -E(z) \frac{\int_{-t}^t E(z)\alpha(z)\Delta T dz}{\int_{-t}^t E(z) dz} \quad (8)$$

Les contraintes résiduelles, $\sigma_t(z)$ dans la plaque sont données par la superposition des contraintes dans les équations (6) et (8). Ils sont définies par :

$$\sigma_t(z) = E(z)\alpha(z)\Delta T - E(z) \frac{\int_{-t}^t E(z)\alpha(z)\Delta T dz}{\int_{-t}^t E(z) dz} \quad (9)$$

Il est à noter que ces contraintes ne sont applicables que lorsque la plaque reste droite à cause de la contrainte sur la flexion. En l'absence d'une telle contrainte, la flexion de la plaque (dans le cas présent, vers le haut) résulte de l'asymétrie dans le degré de contraction à travers l'épaisseur de la plaque. Les contraintes effectives dans une plaque de FGM sont les contraintes à l'équilibre après la suppression de la contrainte de flexion. Lorsque la flexion est empêchée, le moment net généré par les contraintes asymétriques de contraction aurait été annulé par le moment externe introduit par la contrainte. Ce moment d'équilibre est exprimée par :

$$-M_t + \int_{-t}^t \sigma_t(z) z dz = 0 \quad (10)$$

Dans lequel M_t est le moment égal et opposé au moment s'est produit par des contraintes dans l'équation (9). Sur la suppression de la contrainte de flexion, les contraintes supplémentaires de la flexion de la plaque sont ensuite données par [9] :

$$\sigma_b(z) = M_t E(z) D \quad (11)$$

Avec

$$D = \frac{z \int_{-t}^t E(z) dz - \int_{-t}^t E(z) z dz}{\int_{-t}^t E(z) dz \int_{-t}^t E(z) z^2 dz - \left[\int_{-t}^t E(z) z dz \right]^2} \quad (12)$$

La contrainte résiduelle totale dans la plaque FGM en l'absence de toute contrainte est donnée par l'ajout de contraintes dans l'équation (11) à ceux qui sont dans l'équation (9) et en utilisant l'équation (10).

$$\sigma_{res}(z) = E(z) \left[\alpha(z) - \frac{A_1}{E_1} - \frac{(A_2 - \frac{A_1 E_2}{E_1})(z E_1 - E_2)}{E_1 E_3 - E_2^2} \right] \Delta T \quad (13)$$

Avec

$$(A_1, A_2) = \int_{-t}^t (1, z) \alpha(z) E(z) dz$$

$$(E_1, E_2, E_3) = \int_{-t}^t (1, z, z^2) E(z) dz \quad (14)$$

5. Résultats et discussions

Les caractéristiques du module d'élasticité et de dilatation thermique des constituants Al_2O_3 et Ni qui dépend de la température sont présentées dans les figure 2 et 3.

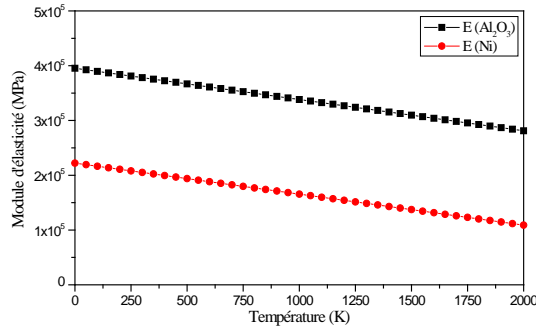


Figure 2. Caractéristique du module d'élasticité en fonction de la température.

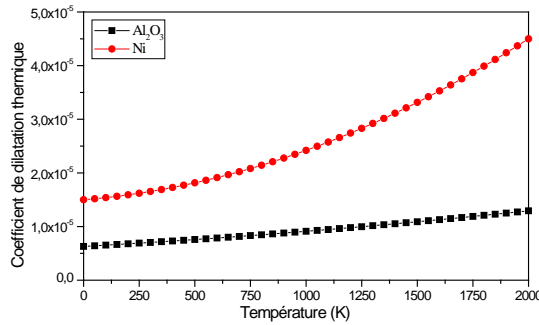
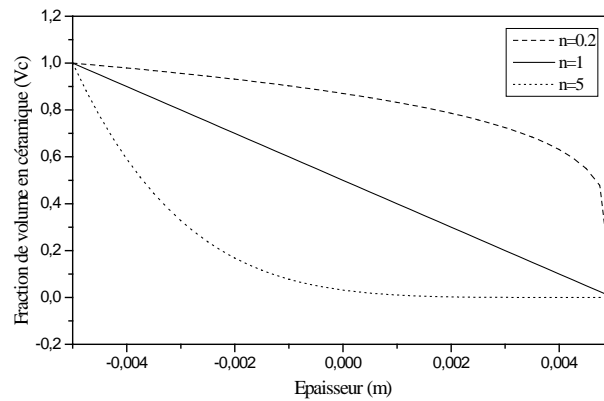


Figure 3. Caractéristique du coefficient de dilatation thermique en fonction de la température.

5.1. Résultats obtenus d'une plaque P-FGM

(a)



(b)

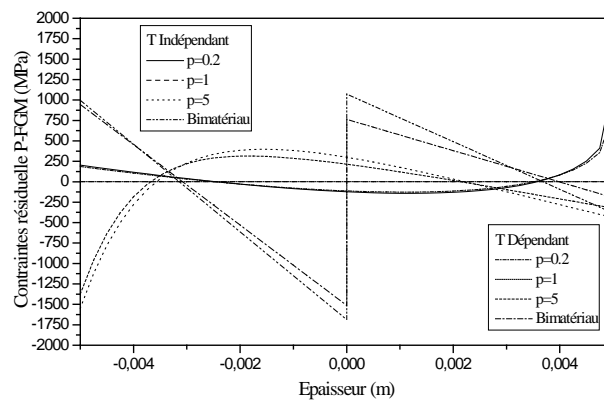
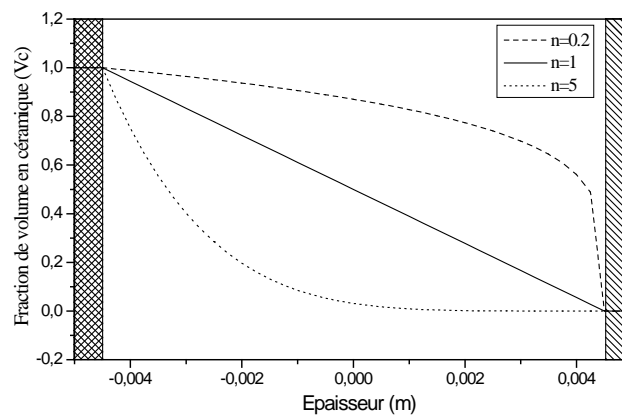


Figure 4. La fraction de volume dans la céramique (a) Contraintes résiduelles correspondantes dans une plaque P-FGM entièrement graduée (b).

(a)



(b)

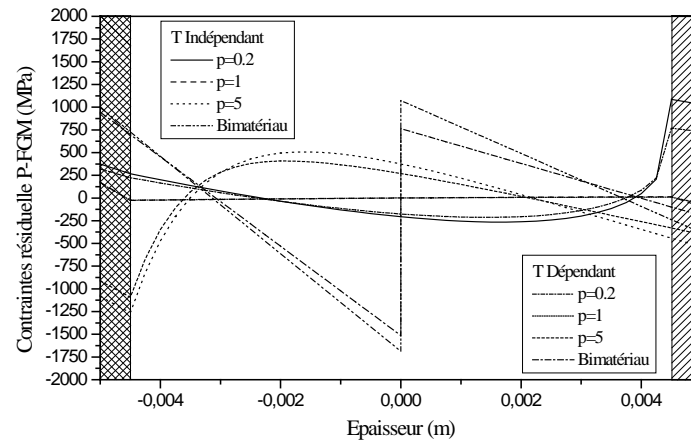
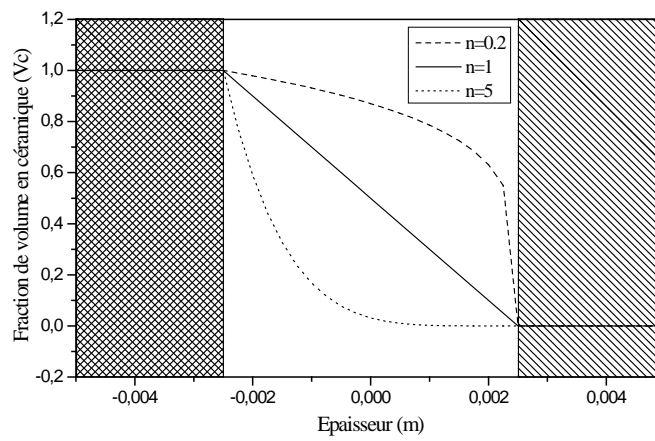


Figure 5. La fraction de volume dans la céramique (a) Contraintes résiduelles correspondantes dans une plaque P-FGM avec des couches entièrement en céramique et entièrement en métal (5% d'épaisseur totale) touchant la zone graduée (b).

(a)



(b)

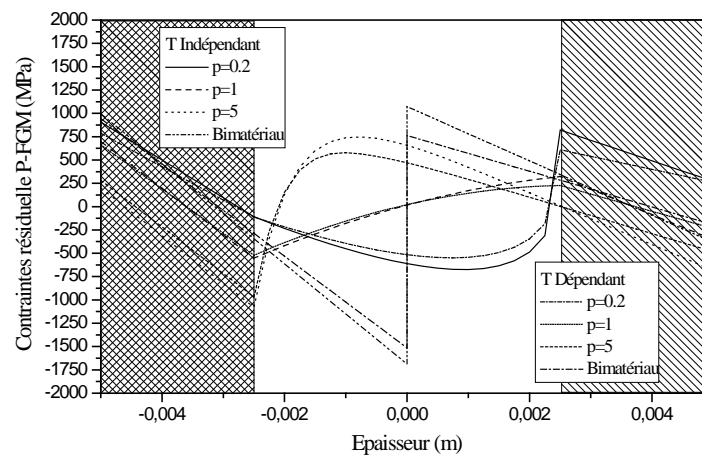


Figure 6. La fraction de volume dans la céramique (a) Contraintes résiduelles correspondantes dans une plaque P-FGM avec des couches entièrement en céramique et entièrement en métal (25% d'épaisseur totale) touchant la zone graduée (b).

6. Conclusion

Dans cet étude, on a utilisé un modèle unidimensionnelle pour modéliser les contraintes résiduelles dans un système en matériaux à gradients de propriétés qui se constitue en deux composantes tels que le métal et le céramique à partir de leur température de fabrication ou de traitement thermique à la température ambiante, les calculs ont été effectués en loi de puissance (P-FGM) sur une plaque FGM.

La distribution et l'importance des contraintes résiduelles dans une plaque FGM peuvent être adaptées en maîtrisant le gradient de la composition appelé le paramètre du matériau (p) et en choisissant une combinaison appropriée à la géométrie dans le cas de la présence des régions monolithiques.

Une gradation linéaire des constituants donne un affaiblissement accentué des contraintes résiduelles après un traitement à haute température. L'inclusion des régions entièrement en céramique et entièrement en métal touchant la région graduée augmente la grandeur des contraintes. Le caractère des contraintes résiduelles (traction contre la compression) dans la région en céramique s'inverse quand la forme fonctionnelle de gradation change de concave vers le haut jusqu'au concave vers le bas. Avec le profil concave vers le bas, la région pleinement en céramique est sous compression.

Les changements dépendants de température dont les modules d'élasticité et les coefficients de dilatation thermique du céramique et du métal n'affectent pas de manière significative les contraintes résiduelles.

Généralement, on ne peut pas éliminer les contraintes résiduelles dans la plaque en FGM par un simple traitement à haute température, parce qu'elles apparaissent de nouveau au cours de la période de refroidissement.

References

- [1] Suganuma K., Okamoto T., Shimada M. and Koizumi M., New method for solid-state bonding between ceramics and metals, *commun. J. Am. Ceram. Soc.* (1983) C-1 17-C-118
- [2] Kumar P. and Greenhut V.A. (eds.), *Metal-Ceramic Joining*, TMS-AIME, Warrendale, PA, 1991.
- [3] Ravichandran K. Thermal residual stresses in a Functionally Graded Material system. *Mater. Sci. Eng. A201*, 1995, 269 – 276.
- [4] Sallai B.O., Tounsi A., Mechab I., Bachir Bouiadjra M., Meradjah M., Adda Bedia E.A., A theoretical analysis of flexional bending of Al/Al₂O₃ S-FGM thick beams, *Computational Materials Science* 44, 2009, 1344-1350.
- [5] Frost H. J., M. F. Ashby M. F., *Deformation-Mechanism Maps: The Plasticity and Creep of Metals and Ceramics*, Pergamon Press; 1 st edition, New York, 1982, 184 pages.
- [6] Fei Y., *Thermal Expansion*, Carnegie Institution of Washington, Geophysical Laboratory, 5251 Broad Branch Road, NW. Washington, DC 20015-1305, 1995, 29-44.
- [7] Bao G., Wang L., Multiple cracking in functionally graded ceramic/metal coatings. *International Journal of Solids and Structure* 32, 1995, 2853–2871.
- [8] Timoshenko S.P. and Goodier J.N., *Theory of Elasticity*, 3rd edn., McGraw-Hill, 1970, 433-439.
- [9] Hashin Z. And Shtrikman S., A variational approach to the theory of the elastic behavior of multiphase systems, *J. Mech. Phy. Solids*, II (1963), 127-140.