



HAL
open science

Performance du contrôle actif d'une plaque FGPM en mode d33

Isabelle Bruant, Romain Carpentier, F. Mohamed Fat'Hi, Frédéric Pablo

► To cite this version:

Isabelle Bruant, Romain Carpentier, F. Mohamed Fat'Hi, Frédéric Pablo. Performance du contrôle actif d'une plaque FGPM en mode d33. 25e Congrès Français de Mécanique, Nantes, 29 août-2 septembre 2022, Aug 2022, Nantes, France. <hal-04281683>

HAL Id: hal-04281683

<https://hal.science/hal-04281683v1>

Submitted on 13 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Performance du contrôle actif d'une plaque FGPM en mode d33

I. BRUANT^a, R. CARPENTIER^a, F. MOHAMED^a, F. PABLO^a

a. Laboratoire Energétique Mécanique Electromagnétisme, isabelle.bruant@parisnanterre.fr, frederic.pablo@parisnanterre.fr

Résumé :

Cette étude porte sur le contrôle actif de matériaux FGPM (matériaux à gradient de fonction piézoélectriques) utilisés en mode d33. La structure considérée est une plaque FGPM dont les propriétés varient continûment dans l'épaisseur, suivant une loi puissance, de telle sorte que les faces externes soient pur piézoélectrique PZTG et la partie centrale soit pur aluminium. La modélisation est faite à l'aide du logiciel ANSYS, en tenant compte du phénomène de percolation. La structure est contrôlée à l'aide d'électrodes en forme de peigne. Afin d'améliorer les performances du contrôle, plusieurs paramètres géométriques de ce type d'électrodes sont considérés.

Abstract :

In this paper, the active control of Functionally Graded Piezoelectric Materials (FGPM), used in d33 mode, is performed. The material properties vary continuously across the thickness direction, according to a fraction volume power law distribution, so that top and bottom surfaces of the plate consist of pure PZTG and the mild surface is composed of pure aluminum. The percolation phenomenon is taken into account in the Finite Element modeling using ANSYS. The structure is controlled by interdigitated electrodes (IDE). Several design parameters of IDE are considered to improve the active control efficiency.

Mots clefs : Contrôle actif, piézoélectrique en mode d33, électrode en peigne, éléments finis

1 Introduction

Les sollicitations en dynamique vibratoire, qu'elles soient intentionnelles ou non, sont quasiment toujours préjudiciables pour la durée de vie des structures mécaniques. Ces sollicitations répétitives peuvent engendrer l'apparition de défauts ou d'endommagements conduisant à des ruptures par fatigue non prévues ayant potentiellement des conséquences tragiques. Afin de conserver la structure dans son état initial le plus longtemps possible, on cherche à diminuer autant que possible l'effet néfaste des sources de nuisance. Dans le cadre de structures légères, les méthodes de contrôle actif et semi-actif à l'aide de pastilles piézoélectriques apparaissent bien adaptées. Elles consistent à profiter du couplage électrique/mécanique existant dans les matériaux piézoélectriques. On cherche à rendre la structure intelligente : l'amortissement des vibrations se fait naturellement grâce aux propriétés des matériaux.

Aujourd'hui, dans la grande majorité des travaux, les actionneurs piézoélectriques sont excités en appliquant une différence de potentiel électrique dans leur épaisseur à l'aide d'électrodes placées sur le dessus et le dessous des pastilles (appelé « mode d31 »). Quelques rares études ont consisté à appliquer une différence de potentiel dans la longueur de la pastille, à l'aide d'électrodes en forme de peigne (appelé « mode d33 ») [1], [2], [3], [4]. Cette deuxième approche a l'avantage de mettre en œuvre des coefficients de couplage plus élevés générant ainsi un déplacement de contrôle plus élevé. Plusieurs articles ont cherché à améliorer les performances du contrôle en optimisant la géométrie des électrodes [5], [6], [7]. [8] a proposé d'élaborer des électrodes multicouches.

Cependant, quel que soit le mode utilisé, plusieurs inconvénients apparaissent en raison du collage de pastilles piézoélectriques sur la structure : discontinuité des caractéristiques matériaux aux interfaces entre les pastilles et la structure, apparition possible de délaminage, concentration de contraintes, effets de bord, possibilité de décollement.

Depuis quelques années, de nouveaux matériaux composites sont apparus, initialement pour traiter des problèmes thermiques. Leur particularité est d'avoir leurs propriétés qui varient continûment selon une ou plusieurs directions. Ils consistent en l'association de deux matériaux (souvent céramique et métallique) aux propriétés structurales et fonctionnelles différentes avec une transition idéalement continue de la composition, de la structure et de la distribution des porosités entre ces matériaux. Ils ont été étendus depuis peu aux matériaux piézoélectriques. Appelés FGPM (Functionally Graded Piezoelectric Materials), ils ont pour but d'améliorer les capacités de contrôle de vibrations en remplaçant les structures à base de matériaux classiques munies de pastilles piézoélectriques par un seul matériau FGPM structurel. La fibre moyenne de la structure est constituée de métal (remplaçant ainsi la structure hôte) et les parties externes sont constituées de matériau piézoélectrique (reproduisant les pastilles). Les inconvénients cités précédemment sont réduits, voire disparaissent. Les travaux récemment menés au LEME ont montré l'intérêt et la pertinence de l'utilisation de ces matériaux en contrôle actif, en mode d31 [9], [10]. D'autres auteurs ont également abordé le contrôle actif de FGPM [11], [12].

L'objet de l'article est de présenter les premières simulations de contrôle actif effectuées en mode d33 pour une plaque FGPM en flexion. La variation des propriétés mécaniques et électriques est modélisée par une loi des mélanges où la fraction volumique du métal est représentée par une loi de puissance, d'indice k . Le phénomène de percolation électrique est pris en compte. Les paramètres géométriques des électrodes en forme de peignes sont optimisés afin de maximiser le déplacement engendré par l'actionneur piézoélectrique, pour différentes valeurs de k . L'ensemble des simulations est effectué à l'aide du logiciel ANSYS.

2 Le modèle de la plaque FGPM

On considère une plaque FGPM, de longueur L (dans la direction x), d'épaisseur h (dans la direction z), supposée infinie dans la direction y . Elle est composée de trois parties : une partie centrale, pure aluminium et deux parties externes, FGPM, faites d'un mélange de matériau piézoélectrique (PZTG) et d'aluminium, de telle sorte que les propriétés mécaniques varient continûment dans l'épaisseur de la structure (figure 1). On suppose que le FGPM est polarisé dans la direction x .

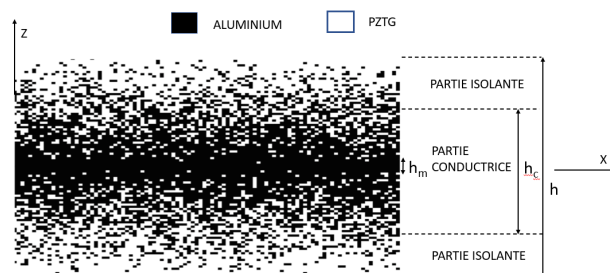


Figure 1 : le FGPM

2.1 Loi de comportement FGPM

Le matériau étudié étant un mélange conducteur/isolant, le phénomène de percolation doit être pris en compte. Ainsi, lorsque la concentration de particules conductrices, $V_m(z)$, atteint le seuil de percolation, noté V_T , la structure devient conductrice. D'après les modèles de percolation de la littérature, [13], [14], [15], on peut considérer dans ce travail que V_T vaut 0.3.

Afin de modéliser la variation des propriétés du FGPM selon z , on utilise la loi des mélanges. Soit P une propriété du matériau :

$$P(z) = (P_m - P_p)V_m(z) + P_p \quad \text{avec} \quad V_m(z) + V_p(z) = 1 \quad (1)$$

Où P_m et P_p : représentent respectivement les propriétés métalliques et piézoélectriques
 V_m et V_p : les fractions volumiques du métal et de la céramique.

La fraction volumique $V_m(z)$ varie dans l'épaisseur selon la loi suivante, où k est l'indice de gradation du FGPM (positif) :

$$\begin{cases} V_m(z) = \left(1 + \frac{h_m - 2z}{h - h_m}\right)^k, & z \in \left[\frac{h_m}{2}; \frac{h}{2}\right] \\ V_m(z) = 1, & z \in \left[-\frac{h_m}{2}; \frac{h_m}{2}\right] \\ V_m(z) = \left(1 + \frac{h_m + 2z}{h - h_m}\right)^k, & z \in \left[-\frac{h}{2}; -\frac{h_m}{2}\right] \end{cases}$$

L'équation (1) est valable pour le module de Young. Par contre, les coefficients de couplage piézoélectriques dépendant de la percolation, ils sont nuls dès que le matériau devient conducteur. Ainsi, en notant h_T la hauteur de percolation, on a :

$$\begin{cases} d_{ij}(z) = -d_{ij}^p \left(1 + \frac{h_m - 2z}{h - h_m}\right)^k + d_{ij}^p, & z \in \left[\frac{h_T}{2}; \frac{h}{2}\right] \\ d_{ij}(z) = 0, & z \in \left[-\frac{h_T}{2}; \frac{h_T}{2}\right] \\ d_{ij}(z) = -d_{ij}^p \left(1 + \frac{h_m + 2z}{h - h_m}\right)^k + d_{ij}^p, & z \in \left[-\frac{h}{2}; \frac{h_T}{2}\right] \end{cases}$$

Le coefficient de Poisson est considéré constant dans la hauteur.

2.2 Le contrôle actif en mode d33

Le contrôle actif des vibrations utilise couramment le mode d_{31} . Il consiste à engendrer un déplacement dans la direction 1, lorsque l'on applique un champ électrique dans la direction 3. Très peu d'études ont considéré le mode d_{33} consistant à appliquer un champ électrique dans la direction 3 et induisant un déplacement dans la même direction. L'intérêt de ce second mode est qu'il met en jeu des coefficients de couplage plus élevés. A notre connaissance, ce type de contrôle n'a pas été étudié pour des structures FGPM. Dans cette configuration, le matériau est polarisé dans la direction 3 et est équipé d'électrodes en peigne afin de guider le champ électrique dans la longueur de structure (figure 2).

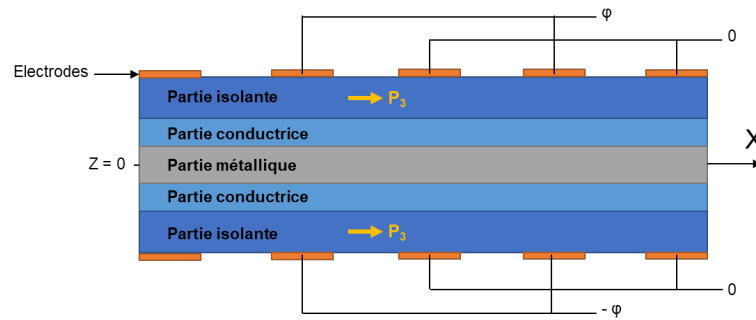


Figure 2 : le FGPM muni d'électrodes.

On peut identifier 3 zones [16], [5], [8] (figure 3) : la zone morte sous les électrodes, où l'intensité du champ électrique est faible. Dans la zone aux extrémités des électrodes, le champ électrique se déplace suivant \vec{x} et \vec{y} : c'est la zone de transition. Enfin, la zone active où le champ électrique se déplace seulement dans la direction \vec{x} .

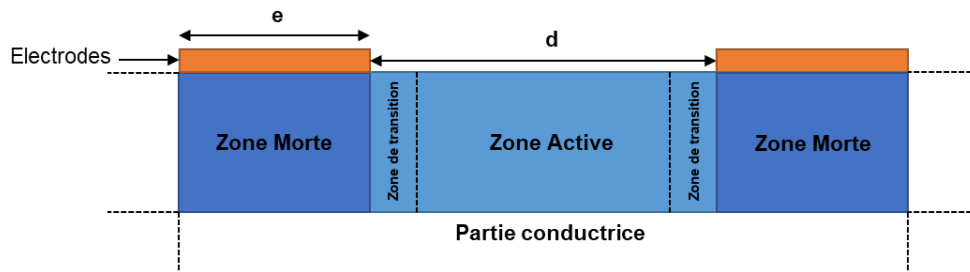


Figure 3 : Différentes zones d'actions

3 Simulations numériques

On considère dans la suite une plaque FGPM encastrée libre, munie d'électrodes en peigne sur ses faces externes et à l'interface de la zone de percolation. On applique une différence de potentiel en chaque peigne de manière à faire fléchir la plaque. Au vu des conditions aux limites le problème peut être résolu en 2D, avec l'hypothèse de contraintes planes. La structure est ainsi modélisée à l'aide du logiciel ANSYS, en utilisant l'élément fini PLANE13. Les variations des paramètres dans l'épaisseur sont modélisées à l'aide de couches numériques. Une étude de convergence a permis de fixer le nombre à 10. Le nombre d'éléments dans la longueur entre deux électrodes est égale à 80.

L'objectif des simulations est de faire varier les paramètres afin d'obtenir le déplacement transversal maximal en bout de plaque. Dans toutes les simulations qui suivent, on considère les peignes sur toute la longueur. On s'intéresse à quatre valeurs de k : 0.5, 1, 2 et 5.

3.1 Variation de la distance d entre deux électrodes et de la largeur e des électrodes

On considère ici $k=2$ (les résultats sont similaires pour $k=0.5$, 1 et 5). La figure 4a représente le déplacement transversal maximal u_z en fonction de e pour différentes distances d . On constate que pour chaque valeur de d , une même valeur optimale est obtenue : $e=0,3$ mm . [5] a obtenu le même résultat mais pour une structure piézoélectrique classique.

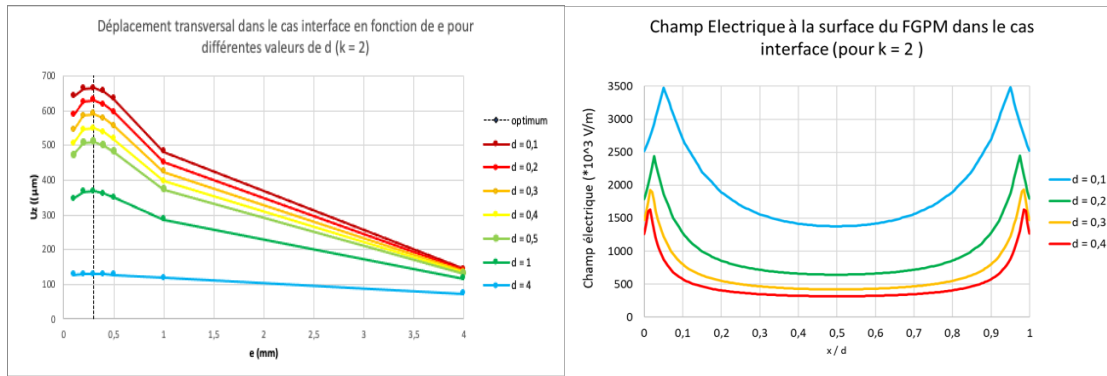


Figure 4 : variations des paramètres pour k=2

En traçant la variation du champ électrique pour différentes valeurs de d , (figure 4b), on remarque que plus d est petit, plus le champ électrique est élevé et le palier qui correspond à la « zone active » du champ est court. Afin d’avoir un palier le plus large possible, on choisit de se fixer une valeur de $d = 0,4$ mm. Cette valeur permet de maximiser le nombre d’électrodes que l’on peut mettre sur les peignes et nous évite d’avoir un champ électrique trop important, ce qui peut entraîner une dépolarisation du FGPM. On fixe ainsi les dimensions.

La variation du champ électrique dans l’épaisseur entre deux électrodes est présenté à la figure 5, pour les différentes valeurs de k : à la surface du FGPM ($z = \frac{h}{2}$), au milieu de la partie isolante et à l’interface entre la partie isolante et la partie conductrice ($z = \frac{h_T}{2}$). A la surface de la structure, le champ électrique est le plus élevé puisque les électrodes y sont appliquées. Malgré la présence d’électrodes à l’interface, le champ électrique est plus faible à cause de la dégradation des propriétés piézoélectriques dans l’épaisseur. D’autre part, plus k est grand, plus le champ électrique au milieu de la partie isolante est faible, en raison de l’épaisseur importante d’isolant.

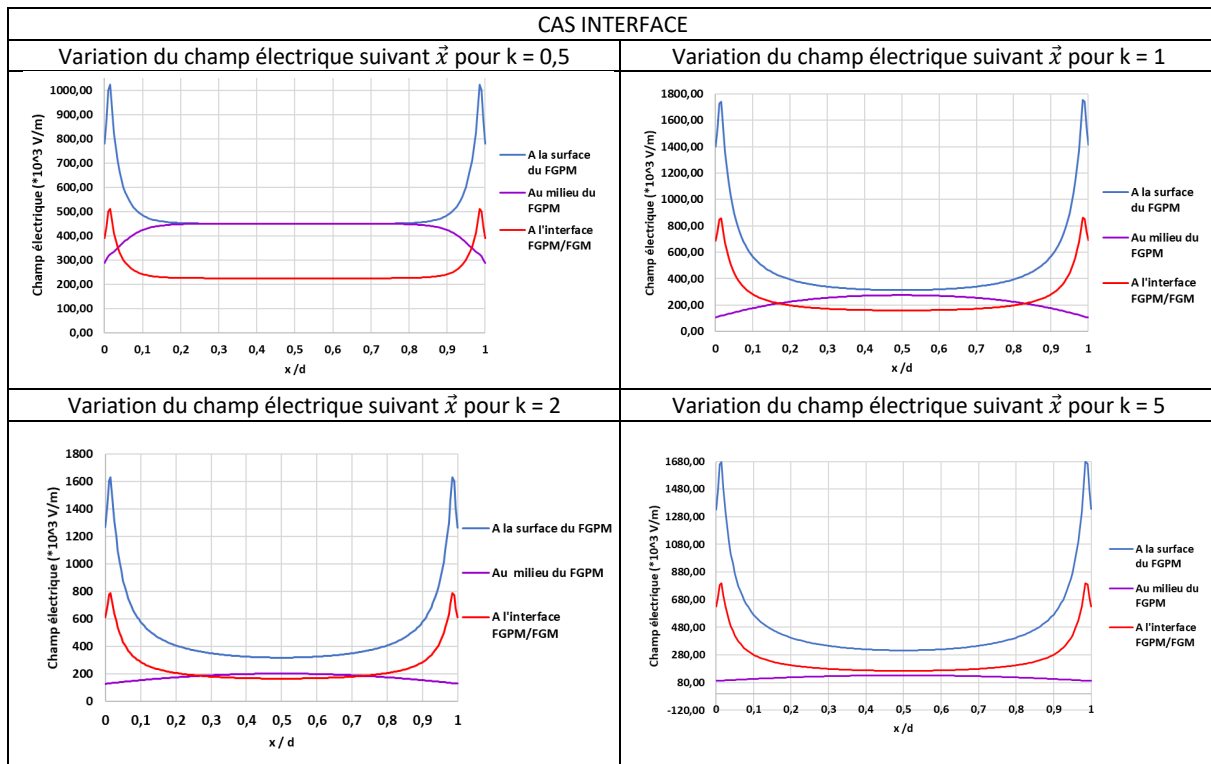


Figure 5 : Champ électrique dans l’épaisseur de l’isolant pour différentes valeurs de k

Afin d'évaluer la qualité du contrôle, on compare le déplacement maximal obtenu en bout de plaque (appelé « cas interface ») avec le cas « idéal » où l'on considère les électrodes perpendiculaires (tableau 1). Dans cette configuration idéale, sur toute l'épaisseur d'isolant, le champ électrique est parallèle à l'axe horizontal (il n'y a pas de zone de transition). Seule, la simulation pour $k=0.5$ donne des résultats proches du cas idéal. Pour les autres valeurs, l'épaisseur de la partie isolante entraîne une dégradation des performances du contrôle.

Comparaison Interface/Idéal				
k	0,5	1	2	5
Uz Cas interface (μm)	201	454	549	562
Uz Cas idéal (μm)	207	683	851	994
Ecart relatif (%)	2,90	33,53	35,49	43,46

Tableau 1 : Comparaison cas interface et cas idéal

3.2 Variation du nombre de peignes

Afin d'améliorer les résultats précédents, on choisit de suivre l'approche de [8] qui consiste à ajouter des peignes dans l'épaisseur du FGPM (figure 6). Numériquement, on place les peignes entre les couches numériques. On dénomme ces simulations « cas intercouche ».

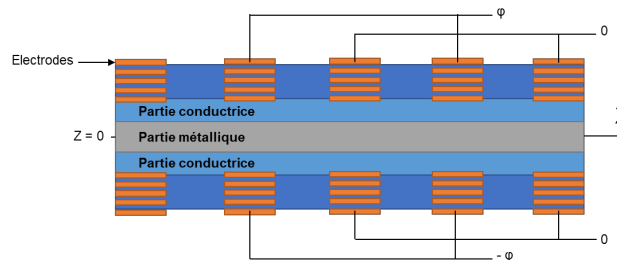
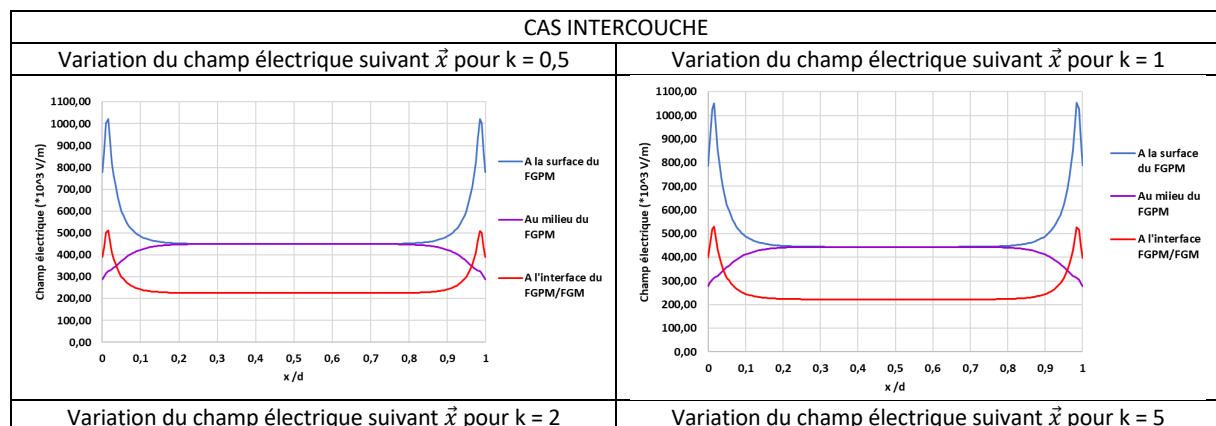


Figure 6 : FGPM muni de plusieurs peignes

Les résultats sont présentés à la figure 7 et au tableau 2. Le champ électrique au milieu de l'isolant est proche de celui de la surface extérieure. D'autre part, on peut voir que la zone active est plus large que dans le cas interface utilisant seulement deux peignes. Le déplacement maximal vertical obtenu est comparé au cas idéal. L'écart relatif est faible quelle que soit la valeur de k .



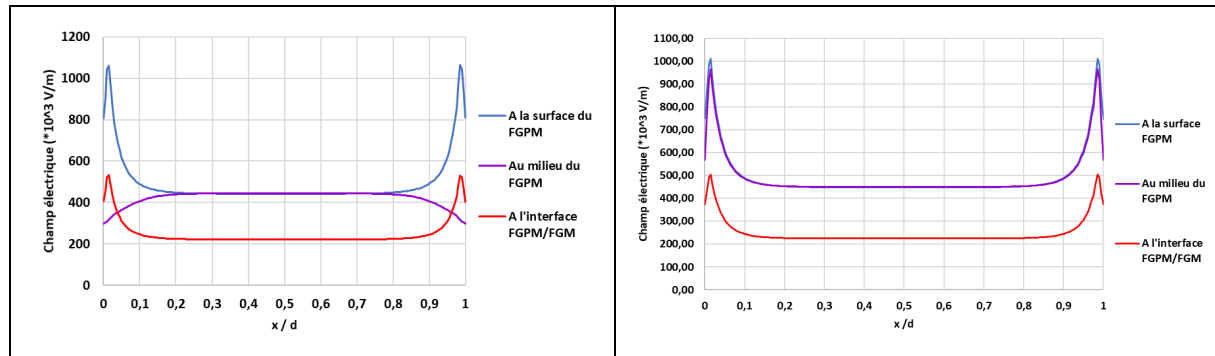


Figure 7 : Champ électrique dans l'épaisseur de l'isolant pour différentes valeurs de k

Comparaison Intercouche/Ideal				
k	0,5	1	2	5
Nombre de peignes	2	4	6	9
Uz intercouche (µm)	201	656	846	992
Uz Cas idéal (µm)	207	683	851	994
Ecart relatif (%)	2,90	3,95	0,59	0,20

Tableau 2 : Comparaison cas intercouche et cas idéal

4. Conclusion

Les performances du contrôle actif d'une structure FGPM en mode d_{33} ont été évaluées. Elles ont été améliorées en optimisant les paramètres géométriques des peignes. Afin d'obtenir des résultats similaires au cas idéal, il est nécessaire d'augmenter le nombre de peignes, dès que l'isolant devient épais. Une comparaison avec le mode d_{31} permettra de savoir quel mode d'action est préférable pour chaque valeur de k. Une étude complémentaire pourra également être menée dans le cas d'une application de récupérateur d'énergie.

Références

- [1] : N. Hagood, R. Kindel, K. Ghandi, Improving transverse actuation of piezoceramics using interdigitated surface electrodes, Smart Structures and Intelligent Systems (1993) 1917 341-352
- [2] : M. Pietrzakowski, An active functionally graded piezocomposite plate subjected to a stochastic pressure, Archives of acoustics (2015) 40 (1) 101-108
- [3] : A. Kovalovs, E. Barkanov, S. Gluhihs, Active control of structures using macro-fiber composite (MFC), Journal of physics : conference series (2007) 93 012034-41
- [4] : P. Hareesh, S. Gross, I. Misri, S. Yang, D. De Voe, Transverse interdigitated electrode actuation of homogeneous bulk PZT, Journal of Microelectromechanical Systems (2012) 21 1513-18
- [5] : C.R. Bowen, L.J. Nelson, R. Stevens, M.G. Cain, M. Stewart, Optimisation of interdigitated electrodes for piezoelectric actuators and active fibre composites, J. Electroceram (2006) 16:263-269.
- [6] : C. Mo, S. Kim, W. Clark, theoretical analysis of energy harvesting performance for unimorph piezoelectric benders with interdigitated electrodes, Smart material and structures (2009) 18 055017-055025
- [7] : N. Nguyen, B. Yoon, K. Park, K. Yoon, Analytical model and optimal design of a d_{33} -mode active layer for the lightweight unimorph piezo-composite actuator, J. Electroceramic (2011) 26 175-184
- [8] : M.S. Lee, C.I. Kim, W. I. Park & al, Energy harvesting performance of unimorph piezoelectric cantilever generator using interdigitated electrode lead zirconate titanate laminate , Energy (2019) 179

373-382

[9] : J. Maruani, modélisation et optimisation des matériaux piézoélectriques à gradient de propriétés (FGPM), application au contrôle actif de structures planes, Thèse de doctorat de Université Paris-Nanterre, 2018.

[10] : J. Maruani, I. Bruant, F. Pablo, L. Gallimard, Active vibration control of a smart FGPM plate using an adaptive fuzzy controller strategy, *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, Vol. 30, Issue 14, 2019.

[11] : A. Sharma, A. Kumar, R. Kumar, R. Vaish, V.S. Chauhan, Finite element analysis on active vibration control using lead zirconate titanate-Pt-based functionally graded piezoelectric material, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* (2015) 27 (4) 490-499

[12] : C. Susheel, R. Kumar, V.S. Chauhan, Active shape and vibration control of functionally graded thin plate using functionally graded piezoelectric material, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* (2016)

[13] : P. Chylek, V. Srivastava, Dielectric constant of a composite inhomogeneous medium., *Physical Review B* (1983) 27 (8) 5098

[14] : J.F.Li, K. Takagi, N. Terakubo, R. Watanabe, Electrical and mechanical properties of piezoelectric ceramic/metal composites in the Pb(Zr, Ti)O₃/Pt system, *Applied Physics Letters* (2001) 79 (15) 2441-2443

[15] : K. Takagi, J.F. Li, S. Yokoyama, R. Watanabe, A. Almajid, M. Taya, Design and fabrication of functionally graded PZT/Pt piezoelectric bimorph actuator *Science and Technology of Advanced Materials* (2002), 3 (2) 217-224

[16] : W. Beckert, W. Kreher, Modeling piezoelectric modules with interdigitated electrode structures, *Computational Material Sciences* (2003) 26 36-45