



**HAL**  
open science

## Contrôle actif de la forme de structures soumises à un chargement thermique à l'aide de piézocomposites

Marie-Laure Dano, Benjamin Jullière

► **To cite this version:**

Marie-Laure Dano, Benjamin Jullière. Contrôle actif de la forme de structures soumises à un chargement thermique à l'aide de piézocomposites. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. hal-01495612

**HAL Id: hal-01495612**

**<https://hal.science/hal-01495612>**

Submitted on 25 Mar 2017

**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.

Public Domain

---

# Contrôle actif de la forme de structures soumises à un chargement thermique à l'aide de piézocomposites

**Marie-Laure Dano et Benjamin Jullière**

*Département de génie mécanique  
Université Laval  
Québec, Canada, G1K 7P4*

*Marie-Laure.Dano@gmc.ulaval.ca*

---

*RÉSUMÉ. Ces travaux étudient l'utilisation d'actionneurs à fibres piézoélectriques (MFC) pour contrôler activement les déformations induites thermiquement dans des structures composites. Un modèle éléments finis a été développé dans le logiciel commercial ABAQUS. Un algorithme de contrôle détermine à partir du déplacement hors du plan de la structure le voltage qu'il faut appliquer aux actionneurs pour corriger la forme de la structure. Des essais expérimentaux montrent que le modèle prédit précisément le comportement de la structure et que les actionneurs à fibres piézoélectriques peuvent être utilisés pour contrôler la forme de structure soumise à des déformations thermiques.*

*ABSTRACT. This study investigates the use of Macro Fibre Composite actuators (MFC) to actively control thermally-induced deformations in composite structures. A finite-element model is developed using the commercial software ABAQUS. A control algorithm determines from the out-of-plane displacement of the structure the voltage that needs to be applied to the actuators to correct the structure shape. Experiments show that the model predicts accurately the response of the structure and that piezocomposite actuators can be used to control the shape of structure subjected to thermal deformations.*

*MOTS-CLÉS: déformations thermiques, contrôle, piézocomposite, MFC, éléments finis*

*KEYWORDS: thermal deformation, control, piezocomposite, MFC, finite elements*

---

## **1. Introduction**

Pouvoir maintenir la forme d'une structure de haute-précision comme une antenne satellite représente un défi pour les concepteurs. Ce type de structure est soumis à des changements de température susceptibles d'induire des distorsions. Cependant, le développement de nouveaux matériaux piézoélectriques offre des perspectives très intéressantes pour corriger les formes de structures et minimiser les erreurs de surface.

Jusqu'à maintenant les matériaux intelligents les plus employés pour le contrôle de forme sont les céramiques piézoélectriques (Tan (2001), Song *et al.* (2004), Sun *et al.* (2005)). Cependant ces matériaux présentent plusieurs inconvénients (fragilité, manque de flexibilité) ce qui peut rendre leur utilisation difficile dans des applications industrielles. Pour pallier à ces difficultés associées aux céramiques piézoélectriques, des composites à fibres piézoélectriques (AFC et MFC) ont été développés (Williams *et al.*, 2002). Ils sont constitués de fibres piézocéramiques unidirectionnelles noyées dans une matrice époxyde et recouvertes de films de Kapton et d'un réseau d'électrodes interdigitalisées. Les électrodes permettent d'appliquer le champ électrique le long des fibres ce qui permet d'obtenir une plus grande capacité d'allongement que les céramiques piézoélectriques. Jusqu'à présent les actionneurs MFC ont été utilisés dans quelques applications (Shultz *et al.* (2003), Sodano *et al.* (2004)). La présente étude a pour objectif d'utiliser les actionneurs MFC pour contrôler activement les distorsions thermiques dans les structures. Des analyses par éléments finis ainsi que des essais expérimentaux ont été réalisés et sont présentés.

## 2. Description du problème

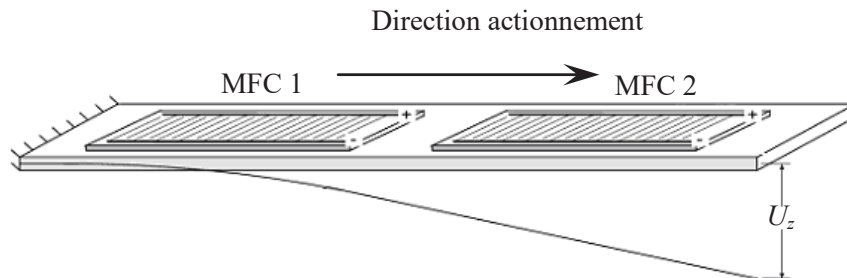
La structure étudiée est une plaque composite encadrée à une extrémité et soumise à un changement de température. Deux actionneurs MFC sont collés sur la surface supérieure (voir Figure 1). L'objectif est de déterminer le voltage à appliquer aux actionneurs pour corriger les distorsions induites thermiquement dans la plaque. Dans cette étude, la plaque est faite à partir d'un stratifié carbone-époxy non symétrique  $[0/90_3]_T$  afin d'obtenir de larges distorsions en appliquant simplement un changement de température uniforme. La structure est plane à la température de mise en œuvre (94°C) mais lorsqu'elle refroidit les déformations thermiques induisent une courbure. On peut ensuite induire des changements de courbure en faisant varier la température.

## 3. Modèle théorique

### 3.1. Description

La plaque est modélisée dans ABAQUS avec des éléments quadratiques à 20 nœuds à intégration réduite (C3D20R). Des éléments semblables avec un degré de liberté supplémentaire pour le potentiel électrique (C3D20RE) sont utilisés pour mailler la partie active des actionneurs MFC. Le maillage de la plaque comporte 15 éléments dans la largeur et 96 éléments dans la longueur. Deux éléments sont utilisés pour modéliser l'épaisseur des actionneurs. Chacune des quatre couches du stratifié compte un élément dans l'épaisseur. Les déplacements sont fixés à zéro aux nœuds localisés sur l'extrémité encadrée de la plaque. La température est

initialement égale à  $94^{\circ}\text{C}$ , la température de mise en œuvre. Des changements de température sont ensuite imposés comme conditions limites. Le champ électrique est appliqué aux actionneurs en imposant des conditions limites aux éléments piézoélectriques. Les analyses sont non linéaires géométriques car la plaque est sujette à de grands déplacements. Les propriétés utilisées dans les simulations pour le matériau composite et le MFC sont indiquées dans le Tableau 1.



**Figure 1.** Description de la structure étudiée

**Tableau 1.** Propriétés des matériaux

Propriétés	Panex 33/RS-1	MFC
$E_1$ (GPa)	101.6	30.3
$E_2$ (GPa)	7.91	15.9
$E_3$ (GPa)	7.91	11.47
$G_{12}$ (GPa)	3.01	5.50
$G_{13}$ (GPa)	3.01	2.60
$G_{23}$ (GPa)	2.71	2.14
$\nu_{12}$	0.318	0.310
$\nu_{13}$	0.318	0.289
$\nu_{23}$	0.458	0.327
$\alpha_1$ ( $\mu^{\circ}\text{C}$ )	-0.0598	5.9
$\alpha_2$ ( $\mu^{\circ}\text{C}$ )	41.7	29.6
$\alpha_3$ ( $\mu^{\circ}\text{C}$ )	41.7	19
$d_{11}$ (pm/V)	-	360
$d_{13}$ (pm/V)	-	-190

### 3.2. Algorithme de contrôle actif

L'objectif est de déterminer le champ électrique à appliquer pour que la structure garde sa forme initiale pendant un changement de température. L'algorithme est basé sur la mesure du déplacement hors du plan  $U_z$  au bout de la plaque. A chaque pas de calcul  $k$ , le champ électrique à appliquer est calculé par,

$$E^{(k)} = E^{(k-1)} + G * \Delta U_z^{(k-1)} \quad [1]$$

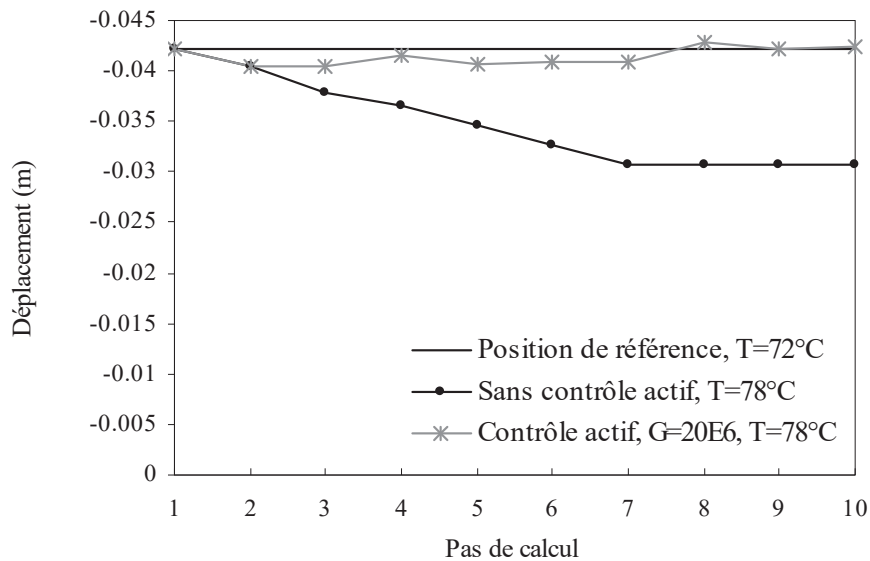
où G est un paramètre de gain de contrôle et  $\Delta U_z^{(k-1)}$  est défini par,

$$\Delta U_z^{(k-1)} = U_z^{(k-1)} - U_z^{ref} \quad [2]$$

$U_z^{ref}$  et  $U_z^{(k-1)}$  sont les déplacements hors du plan au bout de la plaque à la position initiale (référence) et au pas de calcul k-1, respectivement.

### 3.3. Résultats numériques

La structure est initialement à une température de référence de 72°C au 1<sup>er</sup> pas de calcul. Elle est ensuite soumise à une augmentation linéaire de la température jusqu'à ce que la température finale de 78°C soit atteinte au 7<sup>ème</sup> pas de calcul. La température reste ensuite à 78°C jusqu'à la fin de l'analyse. A partir du troisième pas de calcul et jusqu'à la fin de l'analyse, le champ électrique appliqué est déterminé en utilisant les équations [1] et [2] de l'algorithme de contrôle. L'analyse s'arrête quand la variation de  $U_z$  est moins de 0.1 mm.



**Figure 2.** Déplacement hors du plan de l'extrémité de la plaque ( $U_z$ )

La Figure 2 présente le déplacement  $U_z$  du bout de la plaque en fonction des pas de calcul et pour un gain de contrôle G égal à  $20^{E6}$ . La position de référence ainsi que le déplacement du bout de la plaque sans contrôle actif sont également représentés. On voit que le contrôle actif permet de rapidement faire converger la position du bout de la plaque vers la position de référence. Le voltage atteint alors une valeur de 960 V.

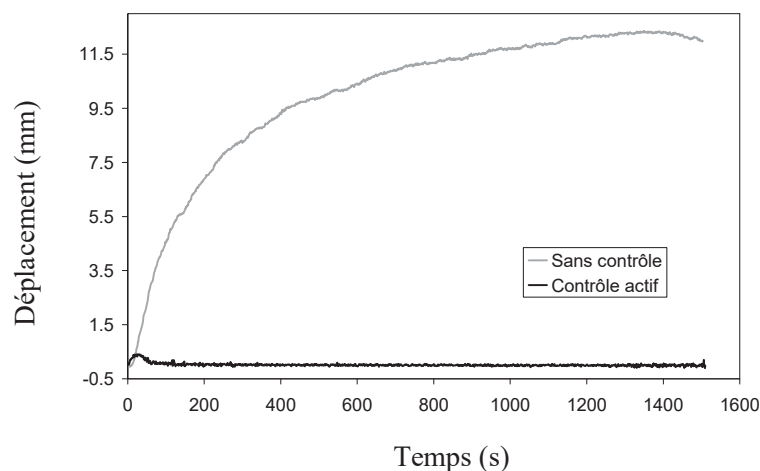
## 4. Étude expérimentale

### 4.1. Description

Une plaque stratifiée  $[0/90_3]_T$  munie de deux actionneurs MFC a été fabriquée. La plaque est encastrée à une extrémité et placée dans un four. Pendant l'essai, le déplacement du bout de la plaque est mesuré à travers la fenêtre du four par un laser. Un algorithme de contrôle PID est utilisé pour corriger activement la forme de la plaque quand la température change. L'algorithme détermine la valeur du voltage à appliquer aux actionneurs en fonction du déplacement mesuré par le laser.

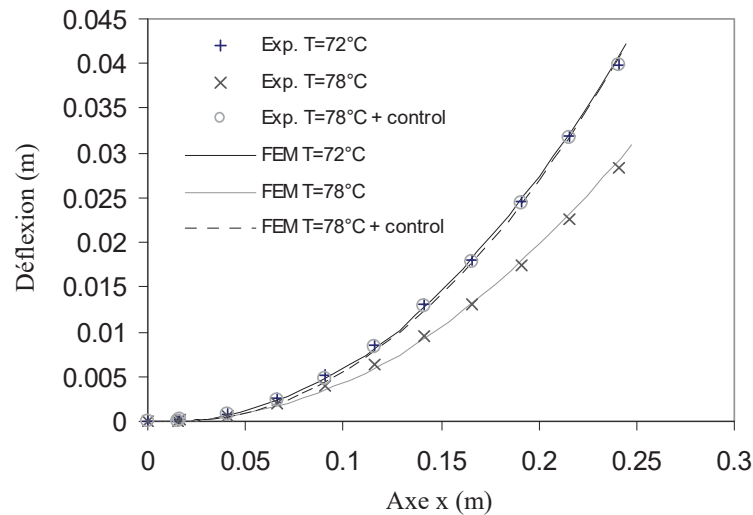
### 4.2. Résultats et comparaisons

Un essai sans contrôle actif et un essai avec contrôle actif ont été réalisés alors que la température de la plaque augmente de  $72^\circ\text{C}$  à  $78^\circ\text{C}$ . La Figure 3 montre les déplacements au bout de la plaque mesurés lors des deux essais. On voit clairement que le contrôle actif a permis de maintenir le bout de la plaque tout près de sa position initiale. Le voltage appliqué aux actionneurs atteint  $1075\text{ V}$  à la fin de l'essai. Il est donc  $13\%$  plus haut que celui prédit par le modèle numérique.



**Figure 3.** Déplacement hors du plan de l'extrémité de la plaque

Finalement, la Figure 4 compare la forme de la plaque à  $78^\circ\text{C}$  obtenue lors des essais avec et sans contrôle actif à la forme de référence ( $T=72^\circ\text{C}$ ). On y voit que les actionneurs parviennent à très bien contrôler la forme de la plaque sur toute sa longueur. Les résultats numériques sont également représentés et on constate que la corrélation avec les résultats expérimentaux est excellente.



**Figure 4.** *Déflexion le long de la plaque*

## 5. Conclusion

Ces travaux exploraient l'utilisation d'un nouveau type d'actionneurs, les piézocomposites MFC, pour le contrôle actif de la forme de structures. Les résultats sont très encourageants puisqu'ils montrent que les actionneurs MFC sont capables de contrôler la forme d'une structure soumise à des changements de température. De plus, le modèle développé prédit avec précision les résultats obtenus expérimentalement.

Shultz M. R., Hyer M. W., "Snap-through of unsymmetric cross-ply laminates using piezoceramic actuator", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 14, n° 12, 2003, p. 795-814.

Sodano H. A., Park G., Inman D. J. "An investigation into the performance of macro-fiber composites for sensing and structural vibration applications", *Mechanical System and Signal Processing*, vol. 18, n° 3, 2004, p. 683-697.

Song G., Zhou X., Binienda W., "Thermal deformation compensation of a composite beam using piezoelectric actuators", *Smart Materials and Structures*, vol. 13, n° 1, 2004, p. 30-37.

Sun D., Tong L., "Design optimization of piezoelectric actuator patterns for static shape control of smart plates", *Smart Materials and Structures*, vol. 14, n° 6, 2005, p. 1353-1362.

Tan D., "Compensation for thermal deformation of a paraboloid shell using distributed structural actuation", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 38, n° 17, 2001, p. 2893-2919.

Williams R. B., Park G., Inman D. J., Wilkie W. K., "An overview of composite actuators with piezoceramic fiber", *SPIE 20<sup>th</sup> Int. Modal Analysis Conf.*, Los Angeles, CA, 2002, p. 421-427.