



**HAL**  
open science

## Effet local d'une pastille piézoélectrique sur une poutre en nid d'abeille

Corine Florens, Etienne Balmès, Franck Cléro

### ► To cite this version:

Corine Florens, Etienne Balmès, Franck Cléro. Effet local d'une pastille piézoélectrique sur une poutre en nid d'abeille: Comparaison calcul/essais. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. hal-01492440

**HAL Id: hal-01492440**

**<https://hal.science/hal-01492440>**

Submitted on 20 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

---

# Effet local d'une pastille piézoélectrique sur une poutre en nid d'abeille - Comparaison calcul/essais

Corine Florens\* \*\* — Etienne Balmès\* — Franck Cléro\*\*

\* Ecole Centrale Paris MSSMat  
Grande Voie des Vignes  
F-92295 Châtenay-Malabry Cedex

\*\* ONERA DDSS/CAV  
BP 72 - 29, Av. de la Division Leclerc  
F-92322 Châtillon Cedex

Corine.Florens@onera.fr

---

*RÉSUMÉ. Afin de prévoir l'effet du contrôle actif sur les panneaux d'habillage de cabine d'avion ou d'hélicoptère, en composite sandwich nid d'abeille, une approche consiste à modéliser par éléments finis le panneau. Les modèles représentant les peaux par des éléments de type coque et le coeur NIDA, de type volume, sont classiquement employés dans l'industrie. Une étude préalable a permis de valider l'obtention de ce type de modèle par homogénéisation. Une comparaison calcul/essais du comportement dynamique d'une poutre en sandwich nid d'abeille actionnée par une pastille piézoélectrique est présentée. Plus précisément, le comportement local au voisinage de la pastille est caractérisé.*

*ABSTRACT. To predict the effect of active control on aircraft or helicopter trim panels, made with honeycomb sandwich composite, one approach consists in modeling the panel by Finite Element Method. FEM with shell elements for the laminate and volume elements for the core is classically used in industry; in a previous study the homogenized modeling approach has been validated. The aim of the present paper is to make a test/analysis comparison of the dynamic behavior of a honeycomb beam actuated by a piezoelectric patch. More precisely, the behavior in vicinity of the patch is characterized.*

*MOTS-CLÉS : sandwich nid d'abeille, pastille piézoélectrique, corrélation calcul/essais*

*KEYWORDS: honeycomb sandwich, piezoelectric patch, test/analysis correlation*

---

## 1. Introduction

La réduction du bruit dans les cabines d'avion ou d'hélicoptère, afin d'améliorer le confort des passagers, est une préoccupation importante de l'industrie aéronautique. Parmi les différentes sources de bruit interne, on s'intéresse à la transmission du bruit par vibration des panneaux d'habillage. Classiquement réalisés en matériau composite sandwich nid d'abeille (NIDA), pour leur fort ratio résistance mécanique sur masse, les panneaux d'habillage présentent de mauvaises performances acoustiques et nécessitent des traitements complémentaires. Les méthodes passives sont efficaces à hautes fréquences, le contrôle actif vibroacoustique (ASAC) est une alternative pour les faibles ou moyennes fréquences.

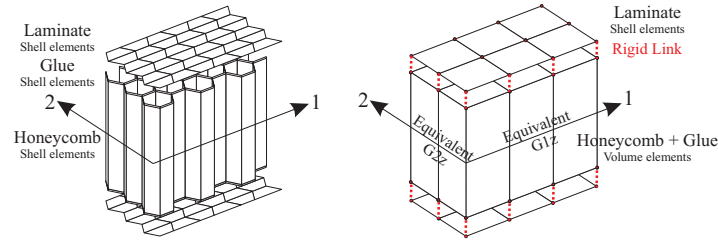
La construction de modèles Eléments Finis (EF) des panneaux d'habillage permet d'améliorer la conception de systèmes intelligents pour le contrôle actif vibroacoustique. On souhaite obtenir un modèle EF de composite NIDA, équipé de pastilles piézoélectriques, suffisamment précis pour simuler correctement le contrôle. La modélisation est décrite (*cf.* section 2, page 2), faisant référence à des modèles existants de sandwich NIDA (Florens *et al.*, 2006) et de matériaux piézoélectriques (Piefort, 2001). Afin de valider la modélisation EF mise en oeuvre avec la Structural Dynamics Toolbox pour Matlab (Balmès *et al.*, 2005), on se propose d'effectuer une comparaison calcul/essais du comportement dynamique d'une poutre composite sandwich NIDA Carbone/Nomex actionnée par une pastille piézoélectrique PZT.

Des essais vibratoires ont été effectués sur une poutre NIDA à peaux carbone, au moyen d'actionneurs et de capteurs de natures différentes (*cf.* section 3, page 4). Les résultats des essais, avec une pastille utilisée en actionneur, sont présentés, en particulier, les mesures au vibromètre laser raffinées au voisinage de l'actionneur. L'exploitation des essais et des simulations sur modèle EF sont confrontés (*cf.* section 4, page 5).

## 2. Modélisation par éléments finis d'une poutre composite sandwich nid d'abeille Nomex équipée de pastilles piézoélectriques

### 2.1. *Modèle Eléments Finis de nid d'abeille Nomex*

Deux stratégies de modélisation EF ont été considérées dans une étude préalable : un modèle de sandwich classique, avec des éléments de coque pour les peaux et des éléments volumiques pour le coeur, et un modèle très détaillé 3D, avec des éléments de coque uniquement (figure 1). Ce dernier, prend en compte précisément la géométrie des cellules de nid d'abeille et l'épaisseur de colle entre les peaux et le coeur. Une homogénéisation numérique automatique a été mise en oeuvre sous Matlab avec la Structural Dynamic Toolbox (Balmès *et al.*, 2005), pour estimer les propriétés équivalentes des éléments volumiques du coeur, à partir du modèle détaillé 3D. Une procédure similaire a permis de recalibrer les propriétés des matériaux, à partir d'essais sur des échantillons de sandwich Aluminium/Nomex. On a montré, en particulier, le comportement viscoélastique du coeur NIDA, les propriétés matériaux du Nomex et de la colle dépendent fortement de la fréquence et de la température (Florens *et al.*, 2006). On utilise ici, le modèle EF simplifié Coque-Volume-Coque (figure 1- droite).



**Figure 1.** Modèles Eléments Finis de structure en nid d'abeille sous Matlab-SDT.

## 2.2. Modèle Eléments Finis de pastille piézoélectrique

Les actionneurs et capteurs piézoélectriques, utilisés en contrôle actif vibroacoustique, sont des matériaux céramiques ayant la propriété de produire une charge électrique sous l'action d'une force extérieure (effet direct, configuration capteur). Réciproquement, ils se déforment lorsqu'on leur applique un champ électrique dans la direction de leur polarisation (effet inverse, configuration actionneur).

Les lois de comportement mécanique et électrique pour un milieu piézoélectrique sont couplées (Preumont, 2002) :

$$\begin{Bmatrix} \sigma \\ D \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^E & e \\ e & -\epsilon^\epsilon \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon \\ -E \end{Bmatrix} \quad [1]$$

D	$C/m^2$	déplacement électrique	$c^E$	$N/m^2$	rigidité à champ électrique constant
E	$V/m$	champ électrique	e	$C/m^2$	couplage piézoélectrique
$\epsilon$		déformation	$\epsilon^\epsilon$		permittivité diélectrique
$\sigma$	$N/m^2$	contrainte			sous déformation constante

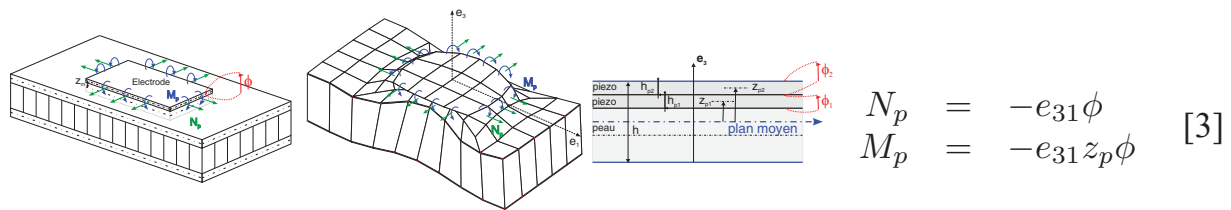
**Tableau 1.** Paramètres électromécaniques.

La géométrie des pastilles, épaisseur faible par rapport aux autres dimensions, justifie le choix d'éléments finis de type coque. La formulation de coque piézoélectrique faite par (Piefort, 2001) a été choisie pour l'implémentation sous SDT. Celle-ci est obtenue par application du principe d'Hamilton, en prenant en compte des degrés de liberté supplémentaires *électriques*  $\{\phi_i\}$ , en complément des déplacements  $\{u_i\}$ . Dans la formulation [2],  $[M]$ ,  $[K_{uu}]$ ,  $[K_{u\phi}]$ ,  $[K_{\phi\phi}]$ , représentent respectivement, les matrices élémentaires de masse, de rigidité, de couplage électromécanique, et de capacitance électrique entre les deux électrodes d'un élément piézoélectrique,  $\{f_i\}$  et  $\{g_i\}$  sont les efforts mécaniques et les charges électriques extérieurs.

$$\begin{aligned} [M] \{\ddot{u}_i\} + [K_{uu}] \{u_i\} + [K_{u\phi}] \{\phi_i\} &= \{f_i\} \\ [K_{\phi u}] \{u_i\} + [K_{\phi\phi}] \{\phi_i\} &= \{g_i\} \end{aligned} \quad [2]$$

Sous l'action d'un champ électrique,  $\vec{E} = -grad\phi$  dans la direction  $\vec{e}_3$ , l'actionneur piézoélectrique PZT (titanate-zirconate de plomb) se déforme en extension dans son plan. L'effort produit sur la structure  $N_p$  suivant  $\vec{e}_1$  dépend du coefficient de couplage

$e_{31}$  et du potentiel électrique  $\phi$ . L'actionneur étant déporté par rapport au plan moyen de l'assemblage multicouche, constitué de la peau du sandwich et de la pastille, l'effort induit un moment  $M_p$  sur la peau (formules [3]).



**Figure 2.** Efforts équivalents exercés par une pastille rectangulaire.

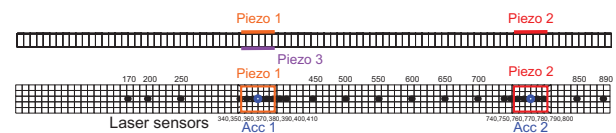
### 3. Essais sur poutre composite en nid d'abeille équipée de capteurs et actionneurs piézoélectriques

Les essais ont été effectués sur une poutre composite sandwich NIDA Carbone/Nomex de dimensions  $900 \times 45 \times 21$  mm, suspendue par 4 élastiques afin d'être en configuration libre-libre. Les peaux sont des tissus carbone/carbone, le cœur est une structure nid d'abeille à base de papier Nomex (cf. tableau 2). Trois pastilles Midé QP20w ont été collées sur les faces supérieure et inférieure du sandwich (figure 4). Elles sont constituées de 2 électrodes piézoélectriques, de type PZT-5H, encapsulées dans un film de résine (Midé, 2004). Chaque pastille peut fonctionner en configuration actionneur, commandé en tension, ou capteur, mesure de charge.

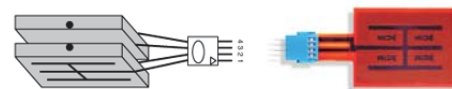
La vitesse hors plan a été mesurée en 26 points centrés sur la face supérieure de la poutre par un vélocimètre laser Polytech. La charge en sortie des capteurs piézoélectriques a été mesurée dans différentes configurations de chargement.



**Figure 3.** Montage expérimental



**Figure 4.** Schéma de la poutre test.



**Figure 5.** QuickPack QP20w Midé.

	Paramètres géométriques		paramètres matériaux			
Peau Carbone	$h_{lam}$	1	$\rho_{lam}$	1.6	$E_{lam,ref}$	15
NIDA Nomex	$h_h, t, a, b, \theta$	$20, 2.54 \cdot 10^{-2}, 2.75, 2.75, \frac{\pi}{6}$	$\rho_h$	1.38	$E_{h,ref}$	9
Colle epoxy	$h_{glue} = \frac{h_{lam}}{2}, t_{glue}$	0.5, 0.1	$\rho_{glue}$	1	$E_{glue}$	5
Electrode piézo.	$L_p \times l_p \times t_p$	$46 \times 33.3 \times 0.25$	$\rho_p$	7.7	$c_{11p}^L, c_{33p}^E$	69, 55

Longueurs en mm, angle en rad, masses volumiques en  $10^3 \text{ kg/m}^3$ , modules élastiques en GPa

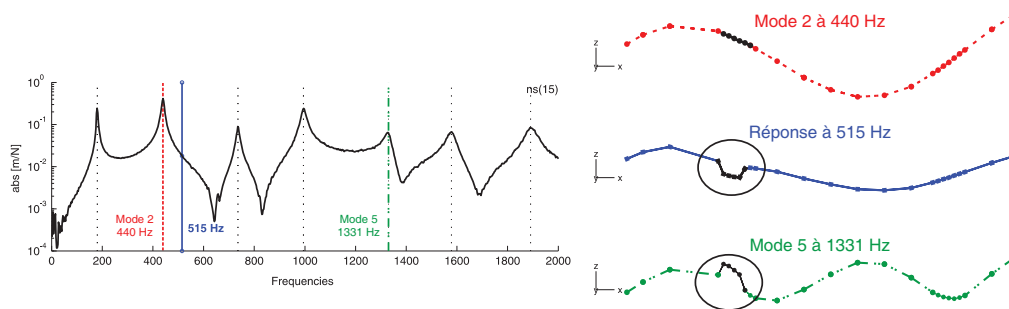
**Tableau 2.** Définitions des propriétés du composite Carbone/Nomex.

## 4. Résultats

### 4.1. Exploitation des essais

Le comportement hors plan a été mesuré au moyen d'un vibromètre laser. Le phénomène observé est une *cloque* locale de la pastille piézoélectrique, qui induit une forte discontinuité dans l'allure globale de la déformée. La cloque n'apparaît pas sur les premiers modes de la poutre, toutefois, hors résonance, le phénomène local est observable, ainsi que sur les modes plus haute fréquence (figure 6). Ainsi, en on conclut que l'influence de la flexibilité résiduelle des modes haute fréquence est non négligeable dans la bande considérée et induit des phénomènes très localisés au voisinage de l'actionneur piézoélectrique, hors des premières résonances.

Cette cloque est l'effet des moments induits sur le contour de la pastille donnés par la formulation [3] (figure 2), du fait de la distance au plan moyen du multicouche (peau, électrodes), et dépend de la raideur relative entre l'actionneur et la peau. On souhaite retrouver ce phénomène par simulation numérique (*cf.* section 4.2).



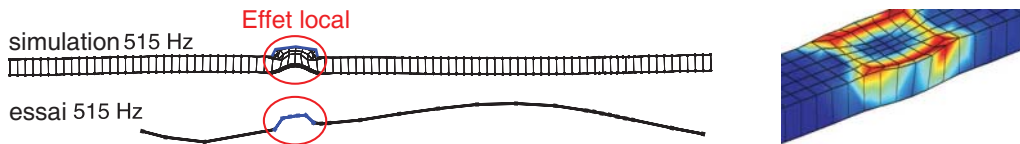
**Figure 6.** Réponse fréquentielle de la poutre NIDA carbone/Nomex actionnée par la pastille piézoélectrique 1 - Déformées à la résonance (mode 2 et 5) et hors résonance.

### 4.2. Comparaison Calcul/Essais

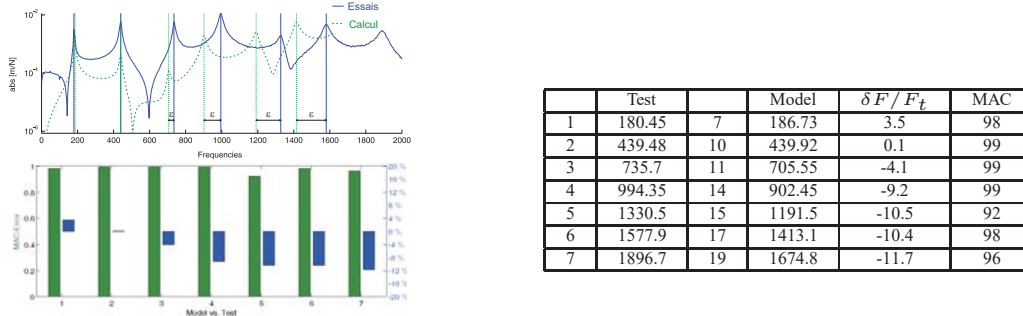
La qualité du modèle de poutre NIDA équipée d'actionneur piézoélectrique (*cf.* section 2, page 2) dépend de sa capacité à reproduire correctement les phénomènes observés lors des essais. Dans un premier temps et d'un point de vue qualitatif, les déformées sont comparées hors résonance à 515 Hz, afin de vérifier la bonne représentation du phénomène local de cloque. Dans un second temps, une corrélation calcul/essais des modes de flexion permet de quantifier la qualité de la corrélation.

Le comportement local autour de la pastille 1 a été simulé à partir du modèle présenté (*cf.* section 2, page 2). La déformée simulée à la fréquence 515 Hz met en évidence les phénomènes locaux observés (figure 7).

De façon plus quantitative, la figure 8 montre une corrélation calcul/essais du comportement dynamique de la poutre Carbone/Nomex actionnée par la pastille 1. Les déformées modales sont bien corrélées, le critère de MAC (Lieven *et al.*, 1988) est supérieur à 90% pour les 7 premiers modes de flexion mesurés. L'erreur sur les fréquences montre cependant qu'un recalage des paramètres est indispensable.



**Figure 7.** Déformées mesurée et simulée à la fréquence 515 Hz - phénomènes locaux autour de l'actionneur piézoélectrique.



**Figure 8.** FRF Piezo1/Piezo2 - Corrélation calcul/essais Piezo1/laser.

## 5. Conclusion

Un modèle par éléments finis de poutre NIDA Carbone/Nomex a été développé avec la Structural Dynamics Toolbox pour Matlab. La formulation de coque piézoélectrique (Piefort, 2001) a été intégrée au modèle, en prenant en compte les potentiels électriques comme degrés de liberté supplémentaires, permettant ainsi de simuler le comportement dynamique d'une poutre sous l'effet d'un actionneur piézoélectrique. Nous avons mis en évidence un effet local au voisinage de l'actionneur piézoélectrique, cloquage de la pastille, lors d'une campagne d'essais au vibromètre laser. La cloque apparaît lorsque qu'on monte en fréquence et hors résonance, c'est l'effet des modes résiduels sur la réponse dynamique. Les simulations numériques reproduisent les phénomènes locaux observés, toutefois, quelques recalages seront nécessaires. Par la suite ce modèle très fin, pourra être utilisé pour estimer de façon plus fiable l'efficacité du contrôle actif vibroacoustique d'une structure composite en nid d'abeille au moyen d'actionneurs piézoélectriques.

## 6. Bibliographie

- Balmès E., Leclère J.-M., *Structural Dynamics Toolbox - FEMLink, User's Guide V 5.2*, 2005.
- Florens C., Balmès E., Clero F., Corus M., « Accounting for glue and temperature effects in Nomex based honeycomb models », ISMA, 2006.
- Lieven N., Ewins. D., « Spatial correlation of modeshapes, the coordinate modal assurance criterion (comac) », International Modal Analysis Conference, 1988.
- Midé, <http://www.mide.com/>, Mide Technology Corporation website, 2004.
- Piefort V., Finite Element Modelling of Piezoelectric Active Structures, PhD thesis, Active Structures Laboratory Department of Mechanical Engineering and Robotics, ULB, 2001.
- Preumont A., *Vibration control of active structures - An introduction - 2nd edition*, Solid Mechanics and its Applications - Kluwer Academic Publishers, 2002.