

CFA/VISHNO 2016

Réduction des vibrations de structures composites par dispositifs piézoélectriques passifs, application à des aubes de turbomachines

O. Thierry^a, J.-F. Deü^a, O. De Smet^a et M. Gruin^b

^aLMSSC, CNAM, 2 rue Conté, 75003 Paris, France

^bSNECMA, Rond-Point René Ravaud, 77550 Moissy Cramayel, France

jean-francois.deu@cnam.fr



LE MANS

Cette étude concerne la réduction des vibrations de flexion en basse fréquence d'une aube de rotor de soufflante en matériau composite à partir de dispositifs piézoélectriques. L'intérêt est d'augmenter la durée de vie et de réduire les marges au flottement en réduisant l'amplitude de vibration des aubages. Les solutions envisagées consistent à utiliser des éléments piézoélectriques connectés à des circuits électriques passifs. L'utilisation de matériaux composites tissés à matrice organique pour les aubes des nouveaux moteurs du groupe Safran permet d'envisager l'intégration d'éléments piézoélectriques, par exemple sous forme de patches piézoélectriques intégrés entre le composite tissé et le revêtement de protection. L'intérêt de cette intégration est de respecter les contraintes aérodynamiques imposées pour ce type de structure tout en augmentant l'amortissement sur un des premiers modes de vibration de flexion. Le travail présenté lors de cette conférence illustrera la faisabilité d'un dispositif piézoélectrique shunté, intégré à une structure industrielle et qui ne nécessite aucun apport d'énergie. On montrera qu'un circuit résonant purement passif peut réduire de manière significative l'amplitude des premiers modes de vibration d'une aube de soufflante. Des modélisations numériques et des expérimentations sont utilisées afin de valider les concepts proposés.

1 Introduction

Les dispositifs d'amortissement piézoélectriques ont été étudiés en premier par Hagood et Von Flotow en 1991 [1]. Les deux électrodes d'un élément piézoélectrique sont connectées à une impédance électrique. Le but des composants électriques est de dissiper, par effet Joule, l'énergie électrique convertie par le matériau piézoélectrique, à partir de l'énergie mécanique générée par les vibrations de la structure.

Différents circuits peuvent être connectés au transducteur piézoélectrique. Un circuit composé d'éléments passifs est préférable pour sa simplicité, sa stabilité et parce qu'il ne nécessite pas d'alimentation électrique. Le shunt résistif est le plus simple mais ses performances sont limitées. Le shunt résonant permet de réduire de manière plus importante les niveaux de vibration quand il est accordé au mode à amortir. Ceci est dû à la résonance électrique créée par l'association d'une bobine et d'une capacité piézoélectrique.

Plusieurs études récentes, utilisant des transducteurs piézoélectriques et étant appliquées aux aubes de soufflante ou aux disques aubagés de turbomachine, ont eu pour objectif de réduire les vibrations des structures. Par exemple, Sénéchal [2] a travaillé sur une aube de soufflante en alliage de titane sur laquelle une mosaïque de patches piézocéramiques de 5 mm d'épaisseur étaient fixés à la surface. Delpero et Bachmann [3] ont proposé l'intégration de transducteur piézoélectriques dans des prototypes échelle réduite d'aube de soufflante en composite stratifié. Bachmann a développé l'intégration de piézocéramiques tandis que Delpero a étudié l'intégration de patches piézocomposite entre les plis du composite stratifié. Choi [4] a testé plusieurs patches piézocomposites pour identifier le transducteur ayant les meilleures performances. Ensuite, le piézocomposite sélectionné a été collé sur une aube de soufflante en composite stratifié et des essais de réduction de vibrations ont été effectués pour plusieurs vitesses de rotation. Zhou [5] s'est intéressé aux méthodes d'amortissement piézoélectriques shuntées appliquées aux disques aubagés désaccordés avec plusieurs patches piézocéramiques. Les transducteurs ont été fixés sur la surface interne du disque. Par conséquent, la vibration des aubages ont pu être réduite à travers le couplage aube-disque. Mokrani [6] a utilisé un système d'amortissement par shunt résonant appliqué à des structures à symétrie cyclique avec des patches piézoélectriques connectés en réseau, avec une application à un disque aubagé de moteur d'avion. Il a mentionné la possibilité d'utiliser un shunt résonant

purement passif puisque l'inductance requise pour le mode ciblé est faible. Cependant, l'auteur a indiqué une valeur de résistance requise dans le shunt qui est relativement basse, et qui peut donc être inférieure à la résistance interne d'une bobine.

L'objectif de cette étude, pouvant être appliquée à une structure industrielle, est de développer un dispositif piézoélectrique shunté efficace et ne nécessitant pas d'alimentation électrique. Le système piézoélectrique est intégré sous le revêtement de protection, après le processus de moulage RTM (Resin Transfer Molding). Même si le shunt résonant est plus sensible au désaccordage que le shunt résistif, le shunt résistif requiert une quantité beaucoup plus importante de matériaux piézoélectriques intégrés à la structure qu'un shunt résonant pour obtenir des performances équivalentes. Cette étude concerne ainsi uniquement le shunt résonant.

Trois propriétés de couplage piézoélectrique peuvent être utilisées pour des applications d'amortissement. Dans cette étude, les effets du couplage 3-1 des éléments piézoélectriques sont utilisés pour réduire les vibrations. Dans ce cas, l'expansion ou la contraction des transducteurs est perpendiculaire au champ électrique (voir figure 1).

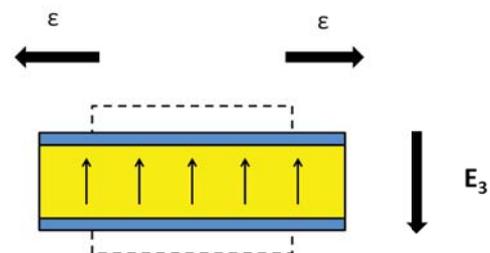


FIGURE 1 – Couplage piézoélectrique 3-1

2 Dispositif d'amortissement

Pour augmenter l'amortissement, il est essentiel de maximiser le facteur de couplage modal, qui caractérise l'énergie échangée entre la structure mécanique et les patches piézoélectriques pour un mode donné.

La structure étudiée est une aube de soufflante en composite carbon-époxy tissé. Contrairement aux

applications en alliage de titane [2][5][6], pour lesquelles le potentiel électrique de la structure est le même que celui d'une des deux électrodes de l'élément piézoélectrique, le matériau composite est hautement résistif et peut être considéré comme un isolant électrique. Ainsi, cette conductivité électrique négligeable implique l'utilisation de transducteur piézoélectriques avec des électrodes retournées de manière à ce que les électrodes soient facile d'accès. Dans le cas contraire, des fils électriques devraient être positionnés entre la structure et le patch pendant l'étape de collage. La liaison serait alors dégradée, ce qui réduirait le couplage électro-mécanique.

Les propriétés de la colle ainsi que son épaisseur ont une influence sur le couplage électro-mécanique. De manière à maximiser le couplage, l'épaisseur de la colle doit être minimisée et ses propriétés mécaniques doivent être élevées. Les propriétés viscoélastiques doivent aussi être prises en compte pour le choix de la colle. En considérant ces différents critères, une colle époxy est choisie pour ses propriétés mécaniques et parce que son comportement peut être considéré élastique en basse fréquence.

Le couplage dépend aussi des matériaux piézoélectriques utilisés. Ainsi, les piézocéramiques doivent avoir un coefficient de couplage piézoélectrique d_{31} élevé puisque l'effet du couplage 3-1 est impliqué dans la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique dans cette application.

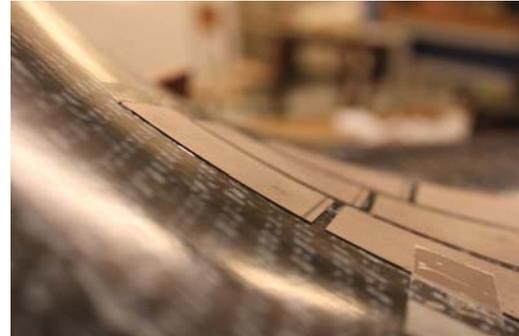
A cause de la forme complexe de l'aube et de ses propriétés de masse et de raideur, un patch n'est pas suffisant pour amortir les vibrations de la structure en basse fréquence. Ainsi, une mosaïque de patches est utilisée dans le dispositif d'amortissement et les patches sont connectés en parallèle de façon à minimiser la valeur de l'inductance du shunt. Pour obtenir une atténuation suffisante sur le second mode de flexion tout en réduisant les dimensions du dispositif piézoélectrique, 9 patches piézocéramiques ($50 \times 30 \times 0.2$ mm) sont utilisés (voir figure 2 et 3). Puis de manière à maximiser l'énergie électrique créée, la mosaïque de patches doit être située dans la zone où les déformations sont maximales pour le mode ciblé. Même si cette zone évolue avec la vitesse de rotation, on la considérera ici fixe (pour une vitesse de rotation nulle) et adaptée au deuxième mode de flexion. Ensuite, les patches sont positionnés en quinconce pour optimiser le coefficient de couplage.



FIGURE 2 – Patches piézocéramiques sur l'intrados



(a)



(b)

FIGURE 3 – Aube avec patches (a) Vue d'ensemble (b) Zoom sur la surface

3 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental de l'aube de soufflante encastrée est présenté sur la figure 4. Le dispositif d'excitation est un système sans contact de type bobine-aimant [7]. La vitesse est mesurée avec un vibromètre laser. Les fonctions de réponse en fréquence sont mesurées à l'extrémité de l'aube sur l'extrados et l'aimant est collé de l'autre côté (voir figure 5). Le signal de référence est le courant circulant dans la bobine, qui peut être considéré proportionnel à la force appliquée sur l'aube dans la bande de fréquence étudiée [7]. Le signal utilisé est un bruit blanc qui permet d'exciter tous les modes de l'aube encastrée. Les patches sont connectés en parallèle avec un fil électrique ayant un diamètre de 0.255 mm.

La bobine est conçue spécialement pour cette application. Elle permet d'obtenir un shunt résonant purement passif et ainsi de ne pas avoir besoin d'une inductance synthétique, contrairement aux autres études portant sur des applications similaires. La bobine est constituée d'un cœur en ferrite qui permet d'atteindre des valeurs élevées d'inductance [8]. Pour accorder le shunt résonant sur le second mode de vibration, l'inductance nécessaire vaut 0.6 H (voir figure 6) et la résistance est d'environ 40 Ω . L'inductance nécessaire pour accorder le shunt résonant sur le second mode est basse et correspond à la valeur de la résistance interne de la bobine. Ainsi, il n'y a pas besoin d'ajouter de résistance supplémentaire puisque la bobine est suffisamment résistive.

4 Formulation éléments finis

A partir des équations locales du problème électro-mécanique et de la loi de comportement piézoélectrique

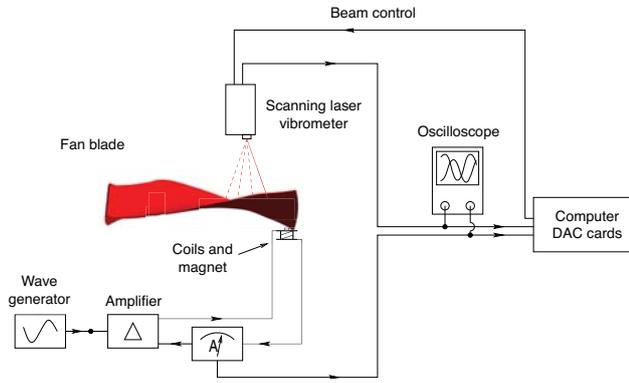
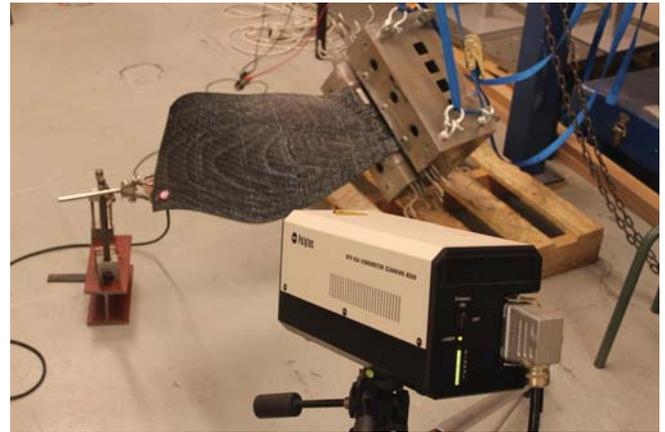


FIGURE 4 – Schéma du dispositif expérimental



(a)



(b)

FIGURE 5 – Dispositif expérimental (a) intrados (b) extrados

linéaire, on montre de façon classique que le problème discrétisé par éléments finis s'écrit [7][9] :

$$\left(-\omega^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M}_u & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_u & \mathbf{K}_{u\psi} \\ -\mathbf{K}_{u\psi}^T & \mathbf{K}_\psi \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \mathbf{U} \\ \Psi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{q} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

avec $\{\mathbf{U}\}$ le vecteur des degrés de liberté relatifs aux déplacements mécaniques, de taille N_m (nombre de ddl mécanique), $[\mathbf{M}_u]$ et $[\mathbf{K}_u]$ correspondent aux matrices de masse et de raideur, de dimension $N_m \times N_m$, et $\{\mathbf{F}\}$ est le vecteur des forces nodales, de taille N_m . De plus, $\{\mathbf{q}\}$ et $\{\Psi\}$ représentent les vecteurs des charges électriques et des potentiels de taille N_{el} . La matrice de couplage électro-mécanique $[\mathbf{K}_{u\psi}]$ et la matrice diélectrique $[\mathbf{K}_\psi]$ sont respectivement de dimension $N_m \times N_{el}$ et $N_{el} \times N_{el}$.

On considère maintenant le cas où les éléments piézoélectriques ont la forme de patches piézoélectriques, avec leurs surfaces inférieures et supérieures recouvertes d'une très fine épaisseur de matériau conducteur pour obtenir des électrodes. La condition d'équipotentialité sur les électrodes est réalisée en assignant un seul degré de liberté électrique pour les noeuds d'une électrode. Pour un patch piézoélectrique p , $\{\Psi^{(p)}\}$ peut être défini tel que :

$$\{\Psi^{(p)}\} = [\psi_+^{(p)} \quad \Psi_{int}^{(p)} \quad \psi_-^{(p)}]^T \quad (2)$$

avec $\psi_+^{(p)}$ et $\psi_-^{(p)}$ correspondant respectivement au potentiel électrique des surfaces supérieures et inférieures. $\{\Psi_{int}^{(p)}\}$ représente le vecteur des potentiels électriques des noeuds situés entre les électrodes. Pour réduire la taille du problème, une méthode de condensation est appliquée sur les potentiels électriques internes des patches.

La formulation (1) est particulièrement adaptée au cas où des patches piézoélectriques sont shuntés, c'est-à-dire, connectés à un circuit électronique, qui n'impose ni la charge, ni la différence de potentiel, mais plutôt une relation entre les deux [7].

5 Modèle EF de l'aube composite avec patches piézoélectriques

Un modèle éléments finis de l'aube composite tissée avec patches piézoélectriques est représenté sur la figure 7. Les déplacements des noeuds appartenant aux flancs du pied sont bloqués pour prendre en compte l'encastrement dans le mors

d'essai. La colle n'est pas modélisée du fait de ses propriétés mécaniques ainsi que son épaisseur qui est négligeable.

Les éléments finis utilisés sont des éléments hexaédriques pour les parties mécaniques et piézoélectriques. Les noeuds des éléments piézoélectriques possèdent 4 degrés de liberté : le déplacement dans les trois directions de l'espace et le potentiel électrique. Plusieurs maillages sont réalisés, avec des éléments linéaires et quadratiques, et pour un nombre d'éléments variable dans l'épaisseur des patches piézoélectriques. La comparaison des différents modèles avec des essais a pour but de déterminer le modèle le plus pertinent en terme de précision et de temps de calcul.

Pour les fonctions de réponse en fréquence, une méthode de projection modale est utilisée et un amortissement modal déterminé expérimentalement est pris en compte. La base modale est tronquée aux 15 premiers modes de l'aube encadrée et la réponse harmonique forcée est calculée pour trois conditions électriques : circuit ouvert, circuit fermé et shunt résonant accordé sur le second mode de flexion.

6 Résultats des simulations et de l'expérience

L'aube de soufflante testée dans ce projet est un prototype sans revêtement de protection.

Les résultats de l'atténuation de vibration sont présentés figure 9, pour le modèle avec les éléments quadratiques et un élément dans l'épaisseur du patch, et sont comparés avec les résultats expérimentaux. Une réduction de vibration de l'ordre de 16 dB est obtenue pour les modèles ainsi



FIGURE 6 – Bobine du shunt résonant pour le second mode de flexion



FIGURE 7 – Dispositif expérimental et modèle éléments finis

que pour les essais. Ces résultats d'atténuation sont très élevés compte tenu des dimensions et du poids du dispositif d'amortissement (patches et bobine).

La bonne corrélation entre les résultats numériques et les courbes d'essais valide les hypothèses faites sur les modèles. Les valeurs de résistance et d'inductance requises pour le shunt résonant sont mentionnées sur les figures 8 et 9. Pour les modèles avec des éléments linéaires ayant un (P1H08) et trois (P3H08) éléments piézoélectriques dans l'épaisseur du patch, la résistance et l'inductance requise valent respectivement 30 Ω et 1.04 H. Ainsi, les paramètres du shunt résonant sont les mêmes et ne varient pas en fonction du nombre d'éléments dans l'épaisseur. La conclusion avec les éléments quadratiques est la même : les modèles avec un (P1H20) et trois (P3H20) éléments dans l'épaisseur nécessite les mêmes valeurs de résistance et d'inductance qui valent respectivement 30 Ω et 1.07 H. Cependant, les valeurs d'inductances varient pour les deux types d'éléments testés puisque les valeurs propres sont distinctes. Ainsi, l'inductance vaut 1.04 H lorsque des éléments linéaires sont utilisés et 1.07 H pour des éléments quadratiques. L'inductance nécessaire pour des modèles quadratiques est plus grande que pour les modèles avec éléments linéaires puisque la fréquence propre du second mode est plus faible avec le modèle quadratique qu'avec le modèle linéaire.

Le maillage constitué d'éléments hexaédriques linéaires et avec un seul élément dans l'épaisseur (P1H08) suppose que le potentiel électrique est linéaire dans l'épaisseur. Par conséquent, le potentiel induit est négligé dans ce cas mais cette hypothèse est correcte ici car les patches sont très fins. Cependant, le modèle (P1H20) corrèle mieux avec

l'expérience c'est pourquoi, dans ce cas, il a été retenu par rapport aux autres modèles.

La détermination du coefficient de couplage électromécanique, $k_{eff,i}^2 = (\omega_{oc}^2 - \omega_{sc}^2)/\omega_{sc}^2$ avec ω_{oc} la pulsation propre en circuit ouvert et ω_{sc} la pulsation en circuit fermé, permet de vérifier la convergence du modèle avec l'augmentation du nombre d'éléments dans l'épaisseur du patch. Les valeurs du coefficient de couplage modal, environ 1.7% pour toutes les configurations, montre qu'un dispositif d'amortissement piézoélectrique peut être efficace même si la valeur du couplage est relativement faible.

De manière à illustrer nos résultats, le tableau 1 contient les fréquences adimensionnées et les coefficients de couplage des 4 premiers modes pour les modèles avec des éléments linéaires et quadratiques.

7 Conclusion

L'objectif de cette étude était d'intégrer un dispositif d'amortissement piézoélectrique adapté à une structure composite complexe dans le domaine des basses fréquences. L'aube de soufflante testée est un prototype sans revêtement de protection. Ainsi, l'ajout de celui-ci permet de protéger le dispositif piézoélectrique et de lisser la surface de l'aube pour les performances aérodynamiques. Nous avons montré, via des expériences et des simulations numériques, que le système proposé permettait de réduire de manière significative les vibrations du deuxième mode de flexion de la structure (environ 16 dB) avec un shunt résonant purement passif de petite dimension.

Remerciements

Ce travail (Thèse Cifre), en collaboration avec Snecma, fait partie du programme de recherche MAIA dont les partenaires sont le CNRS, l'ONERA et le groupe Safran.

Références

- [1] N. W. Hagood, A. Von Flotow, Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks, *J. Sound Vib.* **146**, pp. 243-268 (1991).
- [2] A. Sénéchal, O. Thomas, J.-F. Deü Optimization of shunted piezoelectric patches for vibration reduction of complex structures - Application to a turbojet fan blade, *Proc. ASME IDETC/CIE*, Montréal, Canada (2010).
- [3] F. Bachmann et al, Passive damping of composite blades using embedded piezoelectric modules or shape memory alloy wires : a comparative study, *Smart Mater. and Struct.* **21**, 075027 (2012).
- [4] B. Choi, K. Duffy, J. Kauffman, N. Kray, Optimal topology and experimental evaluation of piezoelectric materials for actively shunted general electric polymer matrix fiber composite blades, *Technical Report NASA/TM-2012-217631* (2012).
- [5] B. Zhou, F. Thouverez, D. Lenoir, Vibration Reduction of Mistuned Bladed Disks by Passive Piezoelectric

TABLEAU 1 – Fréquences adimensionnées et coefficients de couplage pour les différents modèles

Modes	Type de mode	Elastique		Court circuit		Circuit ouvert		Coeff. de couplage	
		H08	H20	H08	H20	H08	H20	H08	H20
1	1F	0.36980	0.37060	0.36980	0.37060	0.36982	0.37061	0.85%	0.83%
2	2F	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00015	1.00015	1.74%	1.71%
3	1T	1.30428	1.30681	1.30428	1.30681	1.30428	1.30682	0.32%	0.30%
4	3F	2.54418	2.53807	2.54418	2.53807	2.54422	2.53810	0.56%	0.51%

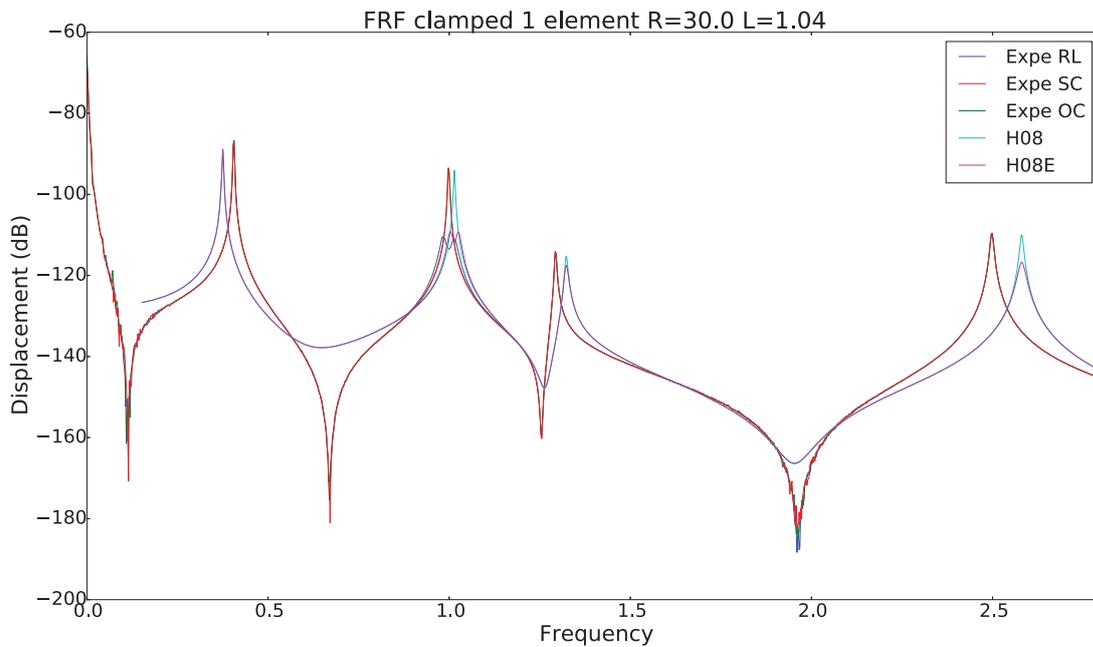


FIGURE 8 – Comparaison entre l’expérience et les modèles avec éléments linéaires pour un élément dans l’épaisseur (PIH20)

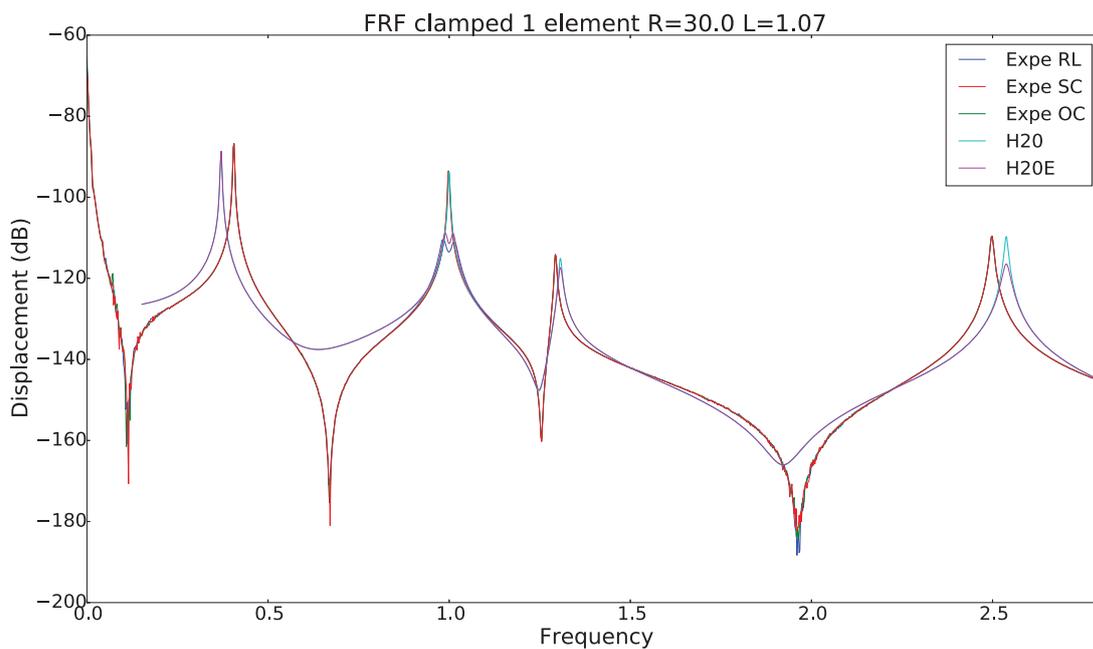


FIGURE 9 – Comparaison entre l’expérience et les modèles avec éléments quadratiques pour un élément dans l’épaisseur (PIH20)

- Shunt Damping Techniques, *AIAA J.* **52**, pp. 1194-1206 (2014).
- [6] B. Mokrani, R. Bastaits, M. Horodincu, I. Romanescu, I. Burda, R. Viguié, A. Preumont, Parallel piezoelectric shunt damping of rotationally periodic structures, *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2015**, 162782 (2015).
- [7] O. Thomas, J. Ducarne, J.-F. Deü, Performance of piezoelectric shunts for vibration reduction, *Smart Mater. Struct.* **21**, 015008 (2012).
- [8] B. Lossouarn, O. Thierry, M. Aucejo, J.-F. Deü, Comparison of passive inductor designs for piezoelectric shunt damping, *Proc. SPIE Smart Structures/NDE*, Las Vegas, United States (2016).
- [9] L. Pereira da Silva, W. Larbi, J.-F. Deü Comparison of finite element formulations for the dynamic analysis of elastic structures with piezoelectric patches, *Proc. ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials*, Turin, Italy (2013).