

CFA/VISHNO 2016

Génération sélective d'ondes guidées à l'aide de transducteurs co-localisés

P. Micheau, R. Guitel, N. Quaegebeur et P. Masson
Groupe d'Acoustique de l'Université de Sherbrooke, 2500 boul. de l'Université,
Sherbrooke, Canada J1K 2R1
philippe.micheau@usherbrooke.ca



LE MANS

Les systèmes de surveillance embarquée de structures (*Structural Health Monitoring*) en aéronautique ont pour objectif de détecter et localiser la présence de défauts avec des transducteurs piézoélectriques collés. Afin de concevoir de tels systèmes de surveillance intégrés, il est nécessaire de caractériser en laboratoire la propagation des ondes guidées et leur interaction avec un défaut donné dans une structure représentative du problème, et ce en fonction de la fréquence et des modes se propageant. Dans ce contexte, une méthode originale de génération d'onde guidée sélective a été développée pour des structures minces. Il s'agit d'une pince mobile permettant de placer deux transducteurs piézoélectriques rectangulaires de part et d'autre de la structure à étudier. Grâce à deux paires d'aimants, les deux transducteurs sont co-localisés avec une force de contact normalisée. En théorie, la commande à appliquer aux bornes des piézoélectriques permet de sélectionner la génération d'une onde guidée pure, S0 ou A0, via respectivement une excitation électrique symétrique ou antisymétrique. En pratique, il est nécessaire de compenser les erreurs de montage et les aléas opératoires en ajustant les signaux d'excitation des piézoélectriques. Un algorithme d'optimisation permet de calculer précisément les fonctions de transfert de compensation en se fondant sur des mesures des modes propagés. Pour cette étude, les modes propagés ont été caractérisés par des mesures de vitesse dans le plan et hors plan avec un vibromètre laser 3D à balayage. La méthode, testée en laboratoire sur plusieurs structures (métallique et composite) a démontré la possibilité de générer le mode A0 ou S0 sur une bande passante de 20 à 500 kHz. Le dispositif a été développé dans le cadre du projet DPHM 501 supporté par le Consortium de Recherche et d'Innovation en Aérospatiale au Québec (CRIAQ), Bombardier Aéronautique et L-3 MAS. Les travaux futurs porteront sur l'extension du concept à la commande de multiples piézoélectriques.

1 Introduction

Les instructions de maintien de la navigabilité d'un avion imposent un programme et des tâches de maintenance pendant toute sa durée d'exploitation commerciale. Ainsi, le programme de maintenance de la structure aéronautique porte sur les structures significatives (SSI, *Structural Significant Items*) exposées à de l'endommagement, c'est-à-dire des sous-assemblages dont la défaillance menace l'intégrité de la structure et la sécurité de l'avion. La sélection d'un SSI peut tenir à son emplacement critique (il contribue à passer une charge critique), ou bien à sa probabilité de défaillance selon l'une des trois causes de détérioration : la détérioration environnementale (corrosion), les endommagements accidentels et ceux dûs à la fatigue.

Un programme d'inspection de la structure est élaboré par l'avionneur pour satisfaire aux exigences d'inspection sur le plan de la tolérance aux dommages. Il repose sur l'intervention de techniciens certifiés afin de procéder à des inspections visuelles générales ou à des inspections détaillées. Ces interventions peuvent requérir l'immobilisation et le démantèlement partiel d'une partie de l'appareil pour accéder à la zone d'inspection, et éventuellement le recours à des outils dédiés de contrôle non-destructifs (CND). Afin de réduire les coûts liés aux inspections détaillées, l'industrie aéronautique montre un intérêt marqué à embarquer (in-situ) une technologie de surveillance de l'état des structures (SHM, *Structural Health Monitoring*) qui permettrait de réaliser une inspection sans démantèlement [1].

Un système de SHM se base typiquement sur des transducteurs piézoélectriques collés sur la structure pour générer et mesurer des ondes ultrasonores guidées (ondes de Lamb dans le cas de structures minces isotropes) afin de détecter la présence d'un endommagement dans une zone d'inspection. Afin de concevoir de tels systèmes de surveillance intégrés, il est nécessaire de caractériser en laboratoire l'interaction d'ondes guidées avec des endommagements typiques dans des structures représentatives de zones inspectées. Aussi, le Consortium de Recherche et d'Innovation en Aérospatiale au Québec (CRIAQ) a décidé de supporter le projet de recherche DPHM 501 pour construire une banque de données

regroupant « l'empreinte » de défauts dans des structures aéronautiques typiques. Dans le cadre de ce projet, un objectif était de développer un transducteur amovible utilisable en laboratoire permettant de générer une onde guidée « pure » dans une direction privilégiée à caractériser.

La section 2 de cette présentation porte sur l'état des connaissances et le principe directeur général qui a motivé le développement d'un dispositif original et de sa loi de commande. La section 3 présente le matériel et la méthode utilisée pour réaliser la preuve de principe. La section 4 expose quelques résultats expérimentaux préliminaires sur des plaques minces (matériaux en aluminium et en composite) et son utilisation pour caractériser un défaut.

2 Principe

2.1 État des connaissances

Il existe de nombreux transducteurs permettant de générer des ondes pures et directives que l'on peut répertorier en deux classes : les transducteurs à contact (montés sur un sabot à angle fixe ou variable) et ceux sans contact (couplage par air [2] ou EMATs [3]). L'avantage des transducteurs à contact est d'être plus performant que les transducteurs à couplage par air, puisque l'amplitude de l'onde injectée est plus grande, permettant un meilleur rapport signal/bruit pour la caractérisation d'un endommagement. Par contre, les transducteurs amovibles à contact sont très sensibles au couplage mécanique avec la structure (même si un couplant est utilisé).

Pour exciter un mode spécifié d'onde guidées avec un seul transducteur mono-élément, la méthode usuelle consiste à exciter la structure avec une onde incidente, afin d'obtenir une certaine sélectivité dans le domaine des modes. Dans ce cas, l'avantage net d'un transducteur à couplage par air est de pouvoir le monter sur un système motorisé afin de régler automatiquement l'angle d'attaque de l'onde acoustique incidente. À l'inverse, un transducteur à contact standard va requérir un changement mécanique du sabot afin de modifier l'angle d'incidence. Pour s'affranchir du montage sur sabot d'un transducteur à contact tout en gardant une certaine sélectivité du mode à générer, il est possible d'utiliser plusieurs éléments en

contact. Cela est réalisable avec une sonde compacte regroupement plusieurs multi-éléments sur quelques cm^2 , similaire à celle utilisée en imagerie médicale [4], ou bien en collant plusieurs éléments piézoélectriques à même la structure comme cela se fait en SHM [1]. Le recours à de multiples éléments implique un algorithme dédié afin de générer les signaux d'excitation de chacun des éléments. Dans le cas 1 D, une méthode de calcul éprouvée consiste à appliquer un déphasage spécifique à chacun des signaux de commande de type burst d'un réseau compact (*Phased array*) en plus de fenêtrages en temps et en espace [4,5]. Sous certaines conditions, cette approche par déphasage permet d'exciter le mode souhaité dans une structure isotrope ou anisotrope (composite). Dans le cas d'un réseau 2D, il est possible de combiner la sélectivité du mode avec une directivité donnée (*Beam-steering*) [6]. Cependant, comme ce dernier point n'est pas requis dans notre projet, l'approche 1D d'une sonde multi-éléments amovible est uniquement considérée.

A notre connaissance, tous les algorithmes de synthèse des signaux d'excitation des sondes en CND sont de type « boucle-ouverte », c'est-à-dire sans rétroaction ni adaptation des signaux d'excitation en fonction de mesures sur la structure. Or, dans un tout autre domaine que le CND, en contrôle actif de bruit, de nombreux travaux ont permis de développer des méthodes très précises de commande de multiples sources vibratoires en considérant l'adaptation des signaux de commande en fonction de signaux d'erreurs [7]. Dans ces applications d'atténuation active de vibration, comme une très grande précision est requise dans la commande de système multiéléments, la commande en boucle ouverte est typiquement adaptative afin de compenser parfaitement toutes les incertitudes [8]. Ainsi, il est possible de parfaitement ajuster les signaux de commande à une configuration de nature incertaine, en considération des précisions exigées sur la commande.

Ce type d'approche en commande adaptative semble maintenant possible à transposer du domaine du contrôle actif au domaine du CND grâce à l'usage des outils de mesure laser.

2.2 Principe général

Le premier intérêt de ce travail est de considérer une commande de multi-éléments en boucle fermée afin de compenser toutes les incertitudes liées au montage de sondes multi-éléments en contact avec la structure.

La figure 1 ci-dessous illustre le concept proposé. Un réseau de N céramiques piézoélectriques montées (et non collées) sont réparties des deux côtés de la plaque. Un dispositif de commande génère différents signaux d'excitation sur tous les éléments et un vibromètre laser mesure à une certaine distance la réponse vibratoire de la structure. A partir de cette première mesure de caractérisation, un algorithme de compensation peut alors optimiser les signaux d'excitation afin de compenser les imperfections du montage mécanique des éléments et les incertitudes paramétriques. Ultérieurement, le calcul de compensation permettrait de générer de nouveaux signaux d'excitation capables de mieux concentrer l'énergie vibratoire sur le mode sélectionné.

Pour réaliser la compensation, on peut considérer la démarche utilisée en contrôle actif de vibration. Pour cela, il faut considérer le premier élément piézoélectrique ($n=1$)

comme une source de vibration primaire, et tous les autres ($n=2,3,\dots,N$) comme des sources d'anti-vibration secondaires. Le problème est dès lors de contrôler les sources secondaires afin de créer des interférences destructives sur les modes non-désirés. L'objectif est de minimiser la puissance des modes non-désirés et non de maximiser la puissance du mode sélectionné.

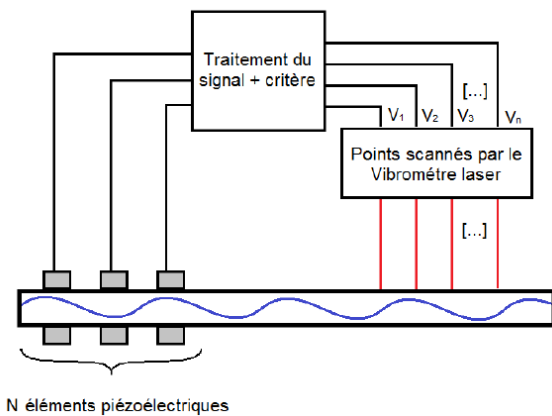


Figure 1: Schématisation du concept global de contrôle actif appliqué à propagation d'une onde guidée dans une plaque.

2.3 Excitation de part et d'autre

A notre connaissance, toutes les approches multi-éléments sont fondées sur une excitation d'un seul côté de la plaque. La première originalité est de considérer une approche de part et d'autre d'une plaque mince.

La figure 2 illustre le principe d'utilisation de deux transducteurs rectangulaires disposés de part et d'autre d'une structure et pilotés en phase ($M = +1$) ou en opposition de phase ($M = -1$). Lorsque la tension appliquée sur le transducteur du dessous est en phase avec celle du dessus ($M = +1$), l'excitation des modes symétriques sera privilégiée. En combinant ce type d'excitation avec une sélectivité en basse fréquence, il est ainsi possible de sélectionner le mode S_0 . A l'inverse, lorsque le transducteur du dessous est excité en opposition de phase ($M = -1$), l'excitation des modes asymétriques sera privilégiée. Pour l'exemple, en considérant une sélectivité en fréquence basse, le mode A_0 est sélectionné.

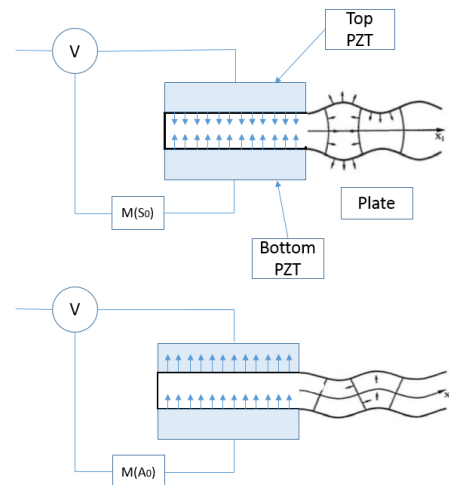


Figure 2: Le principe d'opération de la pince pour la génération du mode S_0 (haut) et du mode A_0 (bas)

2.4 Compensation

En pratique, il y a de nombreuses imprécisions : des défauts d'alignement entre les deux transducteurs, des variations dans l'épaisseur de couplant avec la plaque, des variations dans les caractéristiques des transducteurs. À cause de ces incertitudes paramétriques, le facteur de compensation M peut ne pas être simplement $M = -1$ pour le mode A0 ou $M = +1$ pour le mode S0 mais il devra être adapté à la fréquence et la situation expérimentale.

En accord avec le principe général de reproduire un système de contrôle actif de vibration, l'optimisation du coefficient de compensation M est posé avec l'objectif de minimiser l'amplitude des modes non désirés.

La transformée de Fourier bidimensionnelle des vitesses normales mesurées sur une portion de la surface permet d'évaluer quantitativement l'amplitude d'un mode propagé selon une direction donnée [7]. Ainsi, elle permet d'extraire l'amplitude en fonction de la fréquence en considérant

$$A_{n,m}(\omega) = \iint u_n(x,t) e^{-jk_m(\omega)x - j\omega t} dx dt \quad (1)$$

avec $u_n(x,t)$ la vitesse normale mesurée en surface excité par le transducteur n , $A_{n,m}(\omega)$ l'amplitude du mode m due à l'excitation transducteur n , $k_m(\omega)$ le nombre d'onde associé au mode m se propageant selon la direction $x > 0$.

Pour le cas particulier de la pince, le premier transducteur ($n=1$) est considéré comme la source de vibration primaire et le second ($n=2$) est considéré comme la source d'anti-vibration qui doit compenser la source primaire afin d'atténuer activement le mode non-désiré. De plus, pour les deux premiers modes de Lamb, on peut noter $m = 1$ pour le premier mode antisymétrique, soit le A0, et $m = 2$ pour le premier mode symétrique, soit le S0.

Pour optimiser le mode A0 ($m = 1$), l'objectif de contrôle est d'adapter le compensateur $M(\omega)$ afin de minimiser l'amplitude du S0 ($m = 2$), soit le problème d'optimisation :

$$M_2(\omega) = \arg \min_{M_2(\omega)} \|A_{1,2}(\omega) + M(\omega)A_{2,2}(\omega)\|_2 \quad (2)$$

Pour optimiser le mode S0 ($m = 2$), l'objectif de contrôle est d'adapter le compensateur $M(\omega)$ afin de minimiser l'amplitude du mode A0 ($m = 1$), soit le problème d'optimisation :

$$M_1(\omega) = \arg \min_{M_1(\omega)} \|A_{1,1}(\omega) + M(\omega)A_{2,1}(\omega)\|_2 \quad (3)$$

2.5 Validation numérique

Des simulations numériques ont été réalisées avec COMSOL afin de valider la pertinence de l'approche pour le cas particulier d'un désalignement des deux transducteurs de part et d'autre de la plaque. La figure 4 présente une partie du modèle de dimension 1.54 x 400 mm. Chacun des deux transducteurs sont rectangulaire de dimension de 0.25 x 5 mm. Le maillage utilisé est un maillage

quadratique, composé de 4 éléments dans l'épaisseur des transducteurs, et de 24 dans l'épaisseur de la plaque. Une ligne de points de mesure est positionnée sur la partie supérieure de la zone non absorbante de la plaque. Cette ligne de points est composée de 400 points positionnés sur $L_{mes}=330$ mm tous les 0.5 mm, respectant ainsi les conditions de mesures expérimentales (théorème de Shannon).

La ligne de points de mesures est positionnée à une distance de $L_{eva}=2$ mm max afin de limiter la mesure des ondes évanescentes. Une erreur d'alignement entre les deux transducteurs de 0 mm à 3.5 mm avec un pas de 0.1 mm. Pour chaque fréquence d'excitation, le rapport (en pourcentage) entre l'amplitude du mode optimisé et l'amplitude du mode à minimiser est calculé.

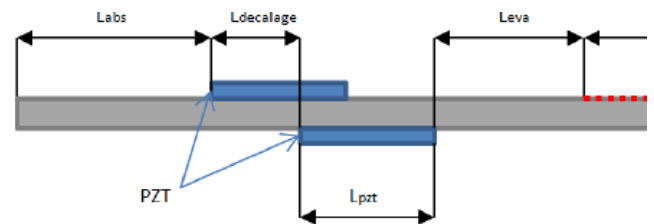


Figure 3: Numérisation 2D du problème sous COMSOL.

Dans le cas d'un alignement parfait des deux PZTs et d'un couplage identique de ces derniers avec la plaque, il est possible d'avoir une erreur relative très faible : inférieure à 0.05 % pour l'optimisation du mode A0 (soit une minimisation du mode S0) et inférieure à 0.09 % pour l'optimisation du mode S0 (soit une minimisation du mode A0). Cependant, la sélectivité se dégrade rapidement avec l'insertion d'un décalage des transducteurs, en particulier avec le mode S0 pour lequel on relève par exemple pour un décalage de 0.6 mm et à une fréquence de 400 kHz une erreur relative de 40%. Au regard de ces simulations, on conclut qu'il faut développer une pince garantissant un alignement au demi-millimètre près des PZTs.

3 Matériel et méthode

3.1 Présentation de la pince

La figure 3 présente l'un des deux mors de la pince qui a été réalisée. Le bâti du mors est en Polyoxyméthylène (DuPont™ Delrin®). Chaque mors est équipé d'une céramique piézoélectrique rectangulaire de 50 x 5 x 0.5 mm (3) raccordée à un connecteur SMB (6) et recouverte d'une couche protectrice d'époxy. Des aimants permanents localisés sur la pince (1) permettent d'assurer un alignement précis sur une structure mince et de maintenir la pince en place.

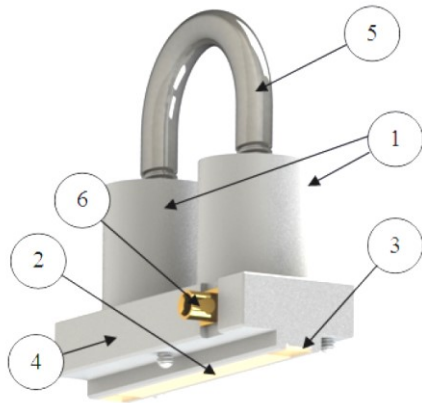


Figure 4: Vue isométrique d'un des mors de la pince. 1) Aimants 2) PZT 3) Couche d'Époxy 4) Bâti en Delrin 5) Profilé en U 6) Connecteur SMB.

3.2 Montage expérimental

Le schéma de l'installation expérimentale et la représentation des connectiques et des systèmes utilisés sont représentés sur la figure 5. La figure 6 présente un montage typique en laboratoire. Les mesures de la vitesse normale en surface sont réalisées avec un vibromètre laser PSV-500-3D-M de Polytec équipé de trois têtes de mesure. La bande passante du laser va de 0 Hz et 1.5 MHz pour une plage de vitesse de 0.1 m/s à 10 m/s. Il peut scanner une grille de points définie par l'utilisateur avec une résolution pouvant aller jusqu'au demi-millimètre et avec un balayage angulaire de 45 degrés.

Le système laser génère une tension d'excitation de type bruit blanc qui est amplifiée par un amplificateur linéaire haute tension (NOVO UAP 8400) puis appliqué à chacun des transducteurs. Le système laser dispose d'un système de calcul interne qui estime les fonctions de transfert entre la tension d'excitation délivrée et les mesures de vitesse sur la grille de mesure. Ces fonctions de transfert sont ensuite exportées sous la forme d'un fichier universel à une station de calcul (Dell Precision T-7500). À l'aide du logiciel Matlab (Mathworks), les données sont réorganisées pour être post-traitées selon la procédure d'optimisation.

Pour résumer, les quatre étapes sont:

- excitations successives des deux transducteurs ;
- extraction des fonctions de transfert des champs de vitesses dus à l'excitation de chacune des PZT ;
- détermination par post-traitement du facteur de compensation en phase et en amplitude M ;
- reconstitution d'un champ de vitesse du mode pur.

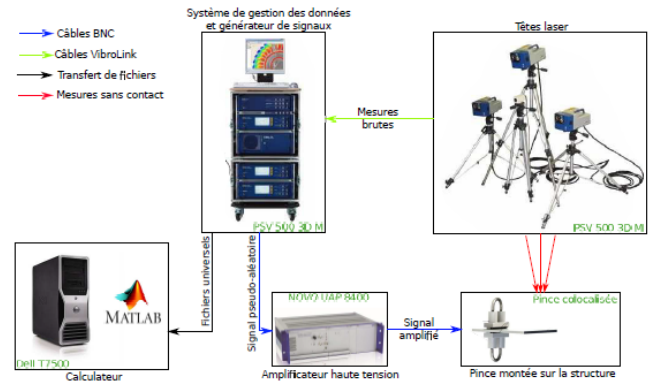


Figure 5: Schéma de l'installation expérimentale et représentation des connectiques et des systèmes utilisés.

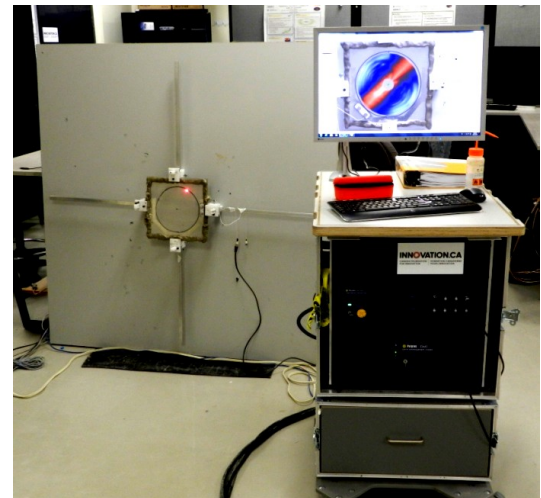


Figure 6: Montage expérimental typique.

4 Résultats

4.1 Plaque en aluminium

Des mesures expérimentales ont été réalisées sur une plaque en aluminium de 40 x 400 x 1 mm. La grille de mesure est composée de 48 lignes centrées sur la pince. Chaque ligne est composée de 124 points espacés de 1 mm. La pince est excitée avec un bruit pseudo-aléatoire sur une plage de fréquence de 1.25 kHz à 500 kHz. La figure 7 illustre la grille avec la pince localisée au centre.

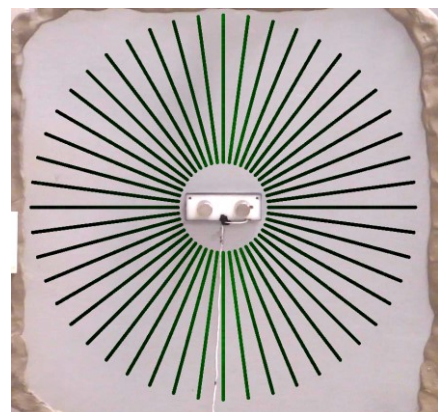


Figure 7: Illustration d'un réseau de mesure avec le vibromètre laser pour caractériser la pince placée au centre.

Afin de caractériser la directivité de la pince, la figure 8 montre une mesure de la vitesse quadratique moyenne à une fréquence de 200 kHz. La majorité de l'énergie est confinée en avant et en arrière de la pince avec une différence de 15 dB entre la moyenne quadratique de la vitesse en avant et en arrière de la pince et le reste de la plaque.

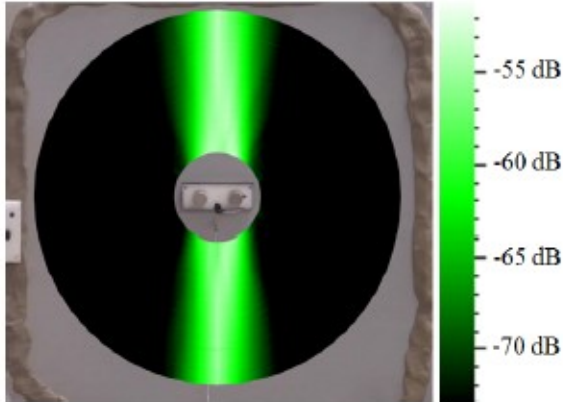


Figure 8: Mesure de la vitesse normale générée par la pince.

En appliquant une analyse en nombre d'onde des transferts en vitesse, on obtient le tracé k - f avec une dynamique de 40 dB sur la figure 10 pour la plaque d'aluminium. Ces tracés font ressortir les courbes de dispersion des modes A0 et S0.

L'application par post-traitement de l'algorithme d'optimisation permet de faire ressortir le mode A0 (figure 10) ou le mode S0 (figure 11). La figure 10 présente le cas de l'optimisation du mode A0. L'amplitude du mode optimisé varie en fonction de la fréquence. L'amplitude du mode S0 (à atténuer) est inférieure à 0.5% de l'amplitude du mode A0 en moyenne sur la plage de fréquence. La figure 11 présente des résultats similaires dans le cas de l'optimisation du mode S0. L'amplitude du mode A0 est inférieure ou égale à 2% de l'amplitude du mode S0. Ainsi, ces résultats expérimentaux permettent de valider que cette méthode permet bien de maximiser un mode par rapport à l'autre dans une plaque d'aluminium.

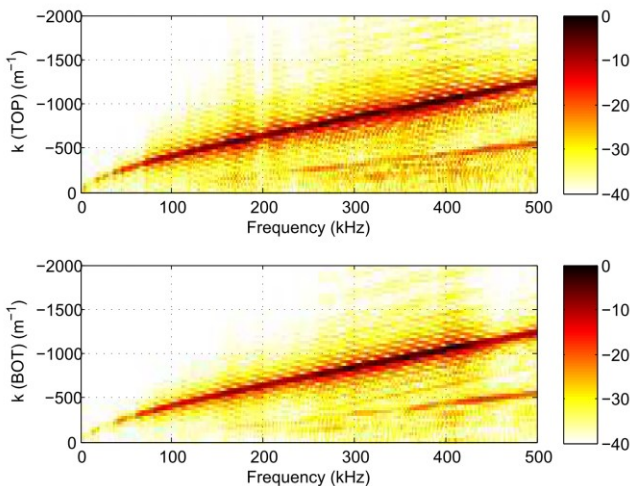


Figure 9: Tracé k - f (échelle en dB) de la vitesse hors plan pour une excitation par le dessus (TOP) et le dessous (BOT)

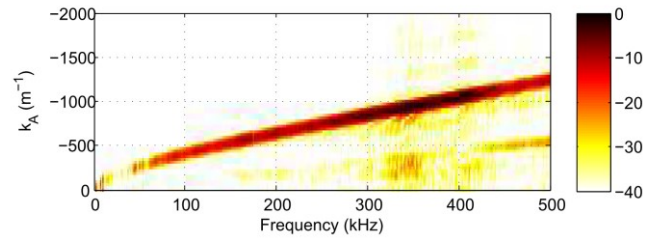


Figure 10: Analyse du champ de vitesse reconstruit avec optimisation du mode A0 (atténuation du S0)

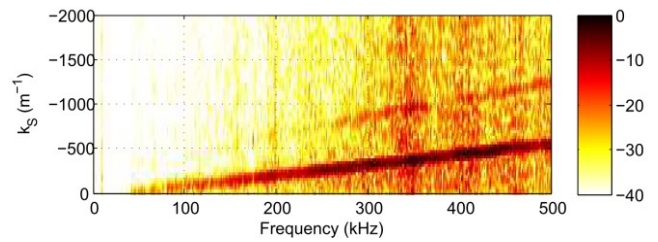


Figure 11: Analyse du champ de vitesse reconstruit avec optimisation du mode S0 (atténuation du A0).

4.2 Plaque en composite

La méthode a été testée sur une plaque de composite de 16 plis dont les orientations sont $[+45, -45, 0, 90]_{2s}$ d'épaisseur totale de 1 mm. La caractérisation a été réalisée selon la direction principale de propagation sur une ligne de 123 points espacés de 1 mm. La méthode de post-traitement est encore applicable et a donné des résultats probants. L'application par post-traitement de l'algorithme d'optimisation permet de faire ressortir le mode A0 (figure 12) ou le mode S0 (figure 13).

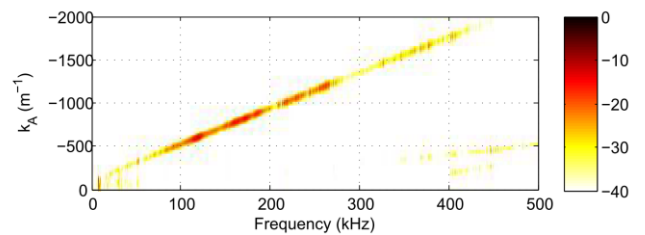


Figure 12: Analyse du champ de vitesse reconstruit avec optimisation du mode A0 (plaque composite).

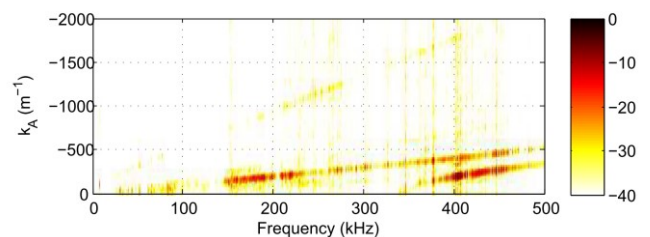


Figure 13: Analyse du champ de vitesse reconstruit avec optimisation du mode S0 (plaque composite).

5 Conclusion

Les simulations numériques sous COMSOL ont confirmé le bien fondé d'utiliser des éléments de part et d'autre d'une plaque. Elles ont permis de recommander une précision de l'ordre du mm dans l'alignement des mors de la pince. Les travaux expérimentaux ont validé par post-traitement la pertinence du dispositif et de l'algorithme pour optimiser $M_m(\omega)$. La généralisation du concept à une configuration à multiples éléments ne pose aucun problème théorique. Les travaux futurs porteront donc sur l'extension du concept à la commande adaptée de multiples éléments actifs afin de minimiser physiquement l'énergie des modes non-désirés.

Remerciements

Les travaux ont été supportés par projet DPHM 501 intitulé « Characterization of guided wave propagation in aircraft structures », supporté par le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et Génie (CRSNG), le Consortium de Recherche et d'Innovation en Aérospatiale au Québec (CRIAQ), Bombardier Aéronautique et L-3 MAS.

Références

- [1] Giurgiutiu, V., *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors*, Academic Press, (2007).
- [2] Castaings, M.; Cawley, P., The generation, propagation, and detection of Lamb waves in plates using air-coupled ultrasonic transducers, *J. Acoust. Soc. Am.*, **100**(5), 3070-3077 (1996).
- [3] Hsu DK, Im KH, Yang IY, Applications of electromagnetic acoustic transducers in the NDE of non-conducting composite materials. *KSME Int. J.* **13**(5), 403–413 (1999).
- [4] Leleux A., Micheau P., Castaings M., Long range detection and defects in composite plates using Lamb waves generated and detected by ultrasonic phased array probes, *J. Nondestruct. Eval.*, **32**(2), 200-214 (2013).
- [5] Drinkwater, B.W., Wilcox, P.D., Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review, *NDT&E International*, **39**(7) 525-541 (2006).
- [6] Yu L, Giurgiutiu, V, In situ 2-D piezoelectric wafer active sensors arrays for guided wave damage detection. *Ultrasonics* **48**, 117–134 (2008).
- [7] Fuller DR, Elliott SJ, Nelson PA, *Active Control of Vibration*, Academic Press, New York (1996).
- [8] Baudry M., Micheau P. and Berry A., Decentralized active vibration control of a flexible plate using PZT actuator – PVDF sensor pairs, *J. Acoust. Soc. Am.*, **119**(1) (2006).
- [9] Alleyne, N.D. Cawley P., A 2-Dimensional Fourier transform method for the quantitative measurement of Lamb modes. *Ultrasonics*, 1143-1146 (1990).