

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Optimisation de la transparence acoustique de cloison par contrôle actif du champ incident

P.-O. Mattei¹, M. Melon², C. Langrenne² et P. Herzog¹

¹ Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, 31 chemin Joseph Aiguier, 13402 Marseille Cedex 20, {mattei,herzog}@lma.cnrs-mrs.fr

² Conservatoire National des Arts et Métiers, 292 rue Saint Martin, 75003 Paris, {(melon,christophe.langrenne}@cnam.fr

Dans le cadre d'un projet de contrôle actif de la transmission sonore au travers d'une cloison, notre travail vise à identifier les principales difficultés liées à l'utilisation d'un nombre nécessairement limité de microphones de contrôle et de sources acoustiques, ainsi qu'à leur grande proximité avec la cloison. Une première partie présente un modèle permettant de simuler l'influence d'un petit nombre de sources ponctuelles sur la transmission au travers d'une plaque. Ce modèle met en évidence la grande sensibilité du dispositif à sa géométrie, ce qui conduit en général à un contrôle très localisé du champ incident, et donc à des réductions minimales de la transmission sur une large gamme de fréquence. Les principales causes des limites mises en évidence par le modèle sont alors analysées, en particulier à la lumière de mesures effectuées sur une maquette. Ainsi, des cartes du champ de pression mesuré à la surface de la maquette montrent que le nombre et la position des points de contrôle sont des paramètres essentiels lorsque l'on désire obtenir une zone de contrôle la plus étendue possible. Ces résultats permettent d'identifier quelques pistes pour optimiser les performances d'un dispositif réaliste, et notamment de déterminer des caractéristiques que devraient présenter les transducteurs à utiliser dans un tel dispositif.

1 Introduction

Ce travail s'inscrit dans le projet de recherche "PARABAS" destiné à explorer la possibilité de concevoir des cloisons sèches incluant des mécanismes de contrôle actif pour améliorer leurs performances passives aux basses fréquences. L'un des problèmes à traiter est d'améliorer les performances de telles cloisons en réduisant leur transparence acoustique aux basses fréquences, malgré une masse surfacique relativement faible.

L'approche envisagée ici est de réduire la pression incidente sur l'une des "peaux" de la cloison, afin de limiter son excitation vibroacoustique avant même qu'elle ne soit mise en vibration. Cette approche a été envisagée car elle permet de traiter le problème couplé vibroacoustique en ne considérant que le problème acoustique pour le contrôle de pression. De plus, le projet vise à explorer des solutions éventuellement industrialisables. De ce fait, il est basé sur le principe d'une juxtaposition de cellules de contrôle actif indépendantes (contrôle "décentralisé"), qui ne gèrent donc le problème de minimisation que d'un point de vue relativement local.

L'objectif du projet est donc de valider la possibilité de juxtaposer un certain nombre de ces cellules pour traiter le problème de la transparence d'une cloison, et notamment de valider deux points : le premier est de s'assurer que des cellules adjacentes ne se perturbent pas mutuellement (au risque de poser des problèmes de stabilité), et le second que la coopération de ces

cellules indépendantes peut conduire à un résultat global - malgré le fait que le problème vibroacoustique ne correspond pas à une réaction localisée.

Le travail présenté ici constitue une première étape en ce sens, visant principalement à identifier quelques-unes des limites du concept et à en déduire des pistes à explorer, pour l'essentiel en termes de cahier des charges pour les transducteurs à utiliser, qui doit tenir compte d'une contrainte essentielle : la réalisation éventuelle de cellules de contrôle doit être compatible avec l'épaisseur des cloisons, et donc actionneurs et capteurs sont nécessairement très proches les uns des autres.

2 Simulations de contrôle

Un modèle a été mis en place pour analyser le dimensionnement d'une cellule de contrôle en transmission, constituée d'un actuateur et d'un ou plusieurs microphones. Afin de pouvoir tester de nombreux cas, le modèle a été conçu pour permettre une résolution très rapide du problème, en admettant quelques simplifications. Ce modèle est ainsi basé sur la description modale de la vibration d'une plaque insérée dans un écran supposé infini. Le couplage au fluide environnant, considéré comme léger, est décrit par une méthode de perturbation au premier ordre, exprimé sous forme intégrale [1]. Les sources sont modélisées comme une répartition de potentiels de simple couche : quatre monopôles situés à quelques mètres pour la source de bruit primaire, et un point ou un disque à proximité

de la cloison pour la source secondaire. La géométrie résultante est illustrée par la figure 1.

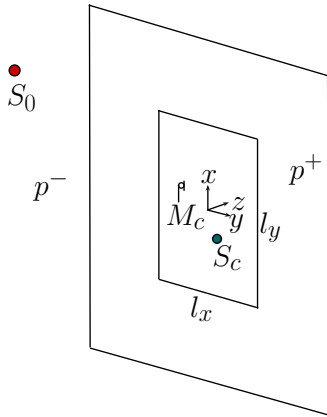


FIG. 1: Géométrie du problème simulé

La plaque est décrite de manière à approcher les caractéristiques d'une plaque de plâtre "BA13" standard, d'environ 30 kg. Ses dimensions sont fixées à 2,3 m x 1,1 m x 12,5 mm; une "bordure" d'environ 5 cm est soustraite aux dimensions réelles de la plaque afin de prendre en compte la différence entre les conditions aux limites d'encastrement considérées dans le modèle et les conditions de montage réelles. Les caractéristiques du matériau sont un module d'Young $E = 40$ GPa, un coefficient de Poisson $\nu = 0,3$ et une masse volumique $\rho = 820$ kg/m³.

Le calcul est effectué par un code FORTRAN-90 développé au LMA, et parallélisé sous OpenMP. Il est exécuté sur le calculateur central du laboratoire (8 processeurs Itanium2 dual-cores, 64 Go RAM), ce qui permet d'effectuer des simulations pour un grand nombre de positions de source et de microphone, et ainsi de rechercher des combinaisons de positions qui pourraient conduire à une meilleure efficacité de la cellule de contrôle. Cette recherche est donc effectuée en calculant toutes les combinaisons correspondant à une grille de 15 x 15 positions, les sources de contrôle se déplaçant dans un plan parallèle à 10 cm de la plaque, et les microphones sur un plan très proche (à 1 cm). Pour chaque combinaison, le débit de la source de contrôle est déterminé de manière à annuler exactement la pression incidente sur la plaque à la position du microphone, ce qui simule un contrôle "optimal" du champ incident.

La figure 2 représente la perte par insertion correspondant aux 50625 combinaisons correspondantes d'une source et d'un microphone, en fonction de la distance source-microphone, à la fréquence de résonance du premier mode de la plaque (environ 81 Hz). Le contrôle permet d'améliorer très sensiblement les performances d'isolation pour certaines combinaisons, mais un grand nombre d'entre elles conduisent au contraire à des performances dégradées par rapport à la plaque seule. A noter qu'il n'y a manifestement pas de relation directe entre la distance entre source et microphone et les performances d'isolation. Ce résultat tend à

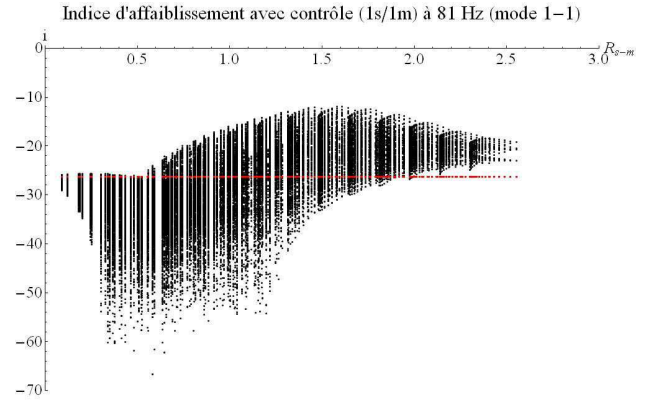


FIG. 2: Pertes par insertion de la plaque avec contrôle par une source et un microphone, à la fréquence du premier mode (81 Hz). La ligne horizontale rouge correspond à la performance de la plaque seule.

indiquer que, au moins dans le cas d'une cellule unique, la géométrie de la cellule ne peut pas être indépendante de sa position par rapport à la déformée modale qu'elle doit traiter.

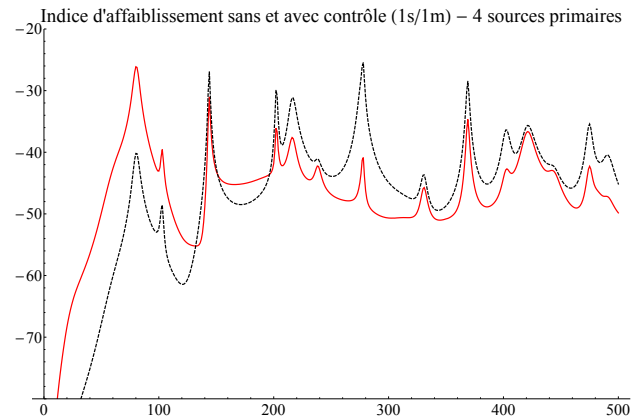


FIG. 3: Pertes par insertion de la plaque, en fonction de la fréquence. Rouge : sans contrôle ; Noire pointillée : avec contrôle par une source et un microphone.

La meilleure des combinaisons identifiée ci-avant conduit au résultat présenté sur la figure 3. Cette figure illustre que la combinaison retenue est optimale pour limiter l'excitation du premier mode, pour laquelle elle a été sélectionnée, mais que son efficacité est limitée à ce mode - ce qui n'a rien de surprenant puisque le contrôle ne traite alors qu'un unique degré de liberté d'une structure qui doit être décrite par une série modale. La solution retenue sur un critère de minimisation de la transmission globale correspond donc à une solution particulière du problème global, mais donne peu d'information concernant la conception de cellules "génériques" destinées à travailler en coopération mais sans pilotage global.

3 Analyse du problème local

La conception des cellules de contrôle nécessite donc d'analyser les phénomènes à l'échelle de la cellule, sans

prendre en compte à cette échelle le comportement de la cloison (qui est gouverné aux basses fréquences par ses modes propres de vibration, à échelle globale). Pour cela, il est utile de représenter le champ incident sur la plaque, qui constitue la source d'excitation vibratoire (en négligeant comparativement le champ transmis). Ce champ incident est représenté à la figure 4, toujours à la fréquence du premier mode vibratoire, mais avec un seul monopôle pour créer le champ primaire.

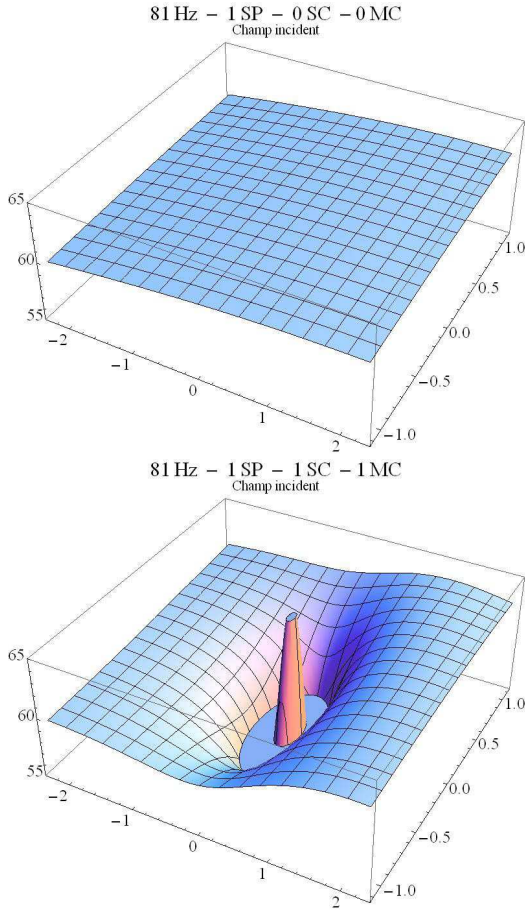


FIG. 4: Champ incident sur la plaque à 81 Hz. Haut : sans contrôle; Bas : avec contrôle par une source et un microphone.

Cette figure illustre la grande différence d'échelle de variations spatiales entre le champ primaire (quasi uniforme à cette échelle car la plaque est en champ lointain), et le champ contrôlé : la source secondaire étant très proche de la plaque, elle y génère un champ axisymétrique très rapidement variable, qui ne coïncide avec le champ primaire qu'au niveau d'une couronne d'annulation de pression. L'excitation vibratoire à cette fréquence est proportionnelle à la moyenne de la pression incidente pondérée par la déformée du mode mis en jeu. Pour le premier mode de flexion, l'effet de la source de contrôle est donc significatif quand elle est située au voisinage du centre géométrique de la déformée, et que le microphone de minimisation voit la "juste" proportion de champ primaire et secondaire : le nombre de positions possibles est donc très restreint, ce qui explique le résultat obtenu au §2.

Il est clair que cette simulation ne correspond pas

rigoureusement à un cas concret, mais l'interprétation qu'elle induit semble plus générale. A titre d'exemple, la figure 5 représente la mesure par holographie en champ proche d'une maquette comportant un haut-parleur de petit diamètre, contrôlé à partir d'un microphone, le tout étant placé juste derrière une grille devant supporter une plaque de matériau fibreux, enlevée pour la mesure. Cette configuration correspond à une cellule absorbante hybride, pour laquelle l'annulation de pression derrière le matériau fibreux constitue une méthode d'optimisation de l'absorption [2, 3]. La mesure holographique permet alors d'examiner la zone de la surface du matériau où la condition d'annulation de pression est correctement réalisée. La carte du haut de la figure 5 correspond au cas où le microphone est placé sur l'axe du haut-parleur, et celle du bas au cas où le microphone est décentré. L'étendue de la zone contrôlée est clairement augmentée dans le deuxième cas, et elle prend alors une allure annulaire, similaire à celle prédite par le modèle utilisé au §2 pour le contrôle en transmission.

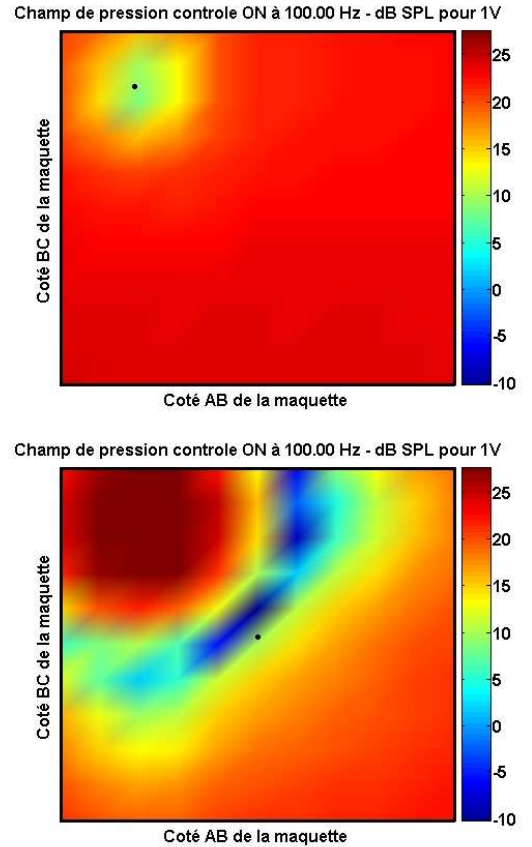


FIG. 5: Champ devant le Hp d'une maquette (coin haut gauche). Contrôle sur un micro dans l'axe du HP (haut) ou décentré (bas).

Le fait d'obtenir une variation spatiale extrêmement rapide sur la surface de la plaque (plâtre ou fibreux) à des fréquences aussi basses (la longueur d'onde est de l'ordre de 4 mètres) peut paraître contre-intuitif. Ceci est dû à la proximité immédiate de la source, dont le champ proche domine largement le champ incident. Ce champ proche est singulier dans le cas d'un monopôle, ce qui suggérerait d'utiliser plutôt dans le modèle une

source de surface finie, par exemple un piston plan. Le calcul conduit alors à un comportement très similaire à celui du monopôle, confirmé par le fait que la mesure effectuée par holographie correspond à une haut-parleur de taille finie, assimilable à un piston, et qu'il présente le même type de comportement. Quelle que soit sa forme physique, le champ proche d'une source varie très rapidement du fait de la réorientation des vitesses au bord ; ceci reste même vrai dans le cas d'un piston plan sur écran infini [4].

4 Conception d'un nouvel actuateur

L'analyse du champ local permet ainsi de réaliser l'importance de la proximité des sources pour le fonctionnement d'un éventuel dispositif de contrôle : c'est le champ proche des sources qui est utilisé pour le contrôle de la pression sur la plaque, et ce champ décroît beaucoup plus rapidement qu'un champ propagatif. Ceci a deux conséquences : la première est qu'il faut concevoir la source de contrôle spécifiquement pour la géométrie particulière du problème, la deuxième est que le champ d'une source de contrôle devrait alors avoir moins d'influence sur les cellules adjacentes que s'il était propagatif. Sous réserve de savoir concevoir une telle source, cette situation peut donc être favorable au contrôle décentralisé.

L'objectif de conception de la source devient donc d'avoir une répartition spatiale de pression très contrastée : relativement uniforme devant la source, de manière à s'opposer au champ primaire sur une surface significative, et décroissant rapidement au-delà de sa "zone d'activité" pour limiter les interactions entre cellules. Des simulations ont ainsi été effectuées en considérant des répartitions de sources sous forme de trois anneaux concentriques (*cf* figure 6), et en déterminant leurs répartitions relatives d'amplitude pour obtenir une pression relativement uniforme devant cette source secondaire "composite".

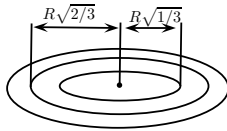


FIG. 6: Géométrie d'une source optimisée pour un contrôle en champ proche

Les commandes relatives sont alors déterminées de manière à rendre égales les pressions mesurées par trois microphones situés devant les trois couronnes, ce qui conduit alors à la répartition de pression illustrée par la figure 7. Cette simulation démontre donc la faisabilité théorique d'une répartition de pression contrastée, qui semblerait favorable au contrôle décentralisé en champ proche. Cependant elle est basée sur une représentation intégrale ne comportant que des potentiels de simple couche : la diffraction par le corps de la source ne

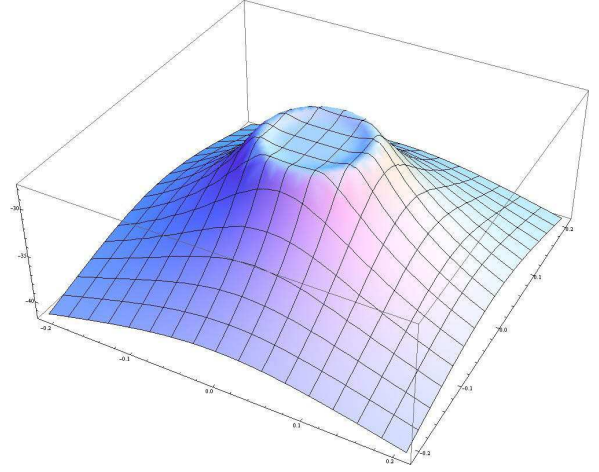


FIG. 7: Pression générée par la source optimisée

peut donc pas être prise en compte simplement. Les éventuels effets liés au confinement entre la source secondaire et la plaque ne sont donc pas décrits correctement.

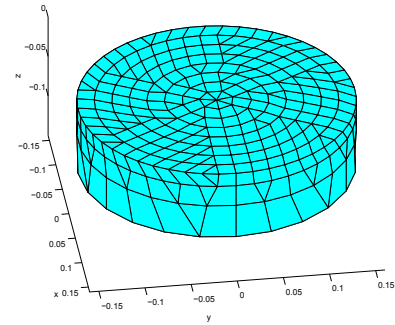


FIG. 8: Maillage utilisé pour modéliser une source concentrique

Un nouveau calcul a donc été effectué, en utilisant cette fois le logiciel commercial Synoise© pour analyser un modèle par éléments de frontières (BEM). La source secondaire est représentée sous forme d'un disque d'épaisseur finie, dont la face avant comporte huit couronnes concentriques conduisant à un rayon extérieur de 15 cm (*cf* figure 8), et située à 2 cm d'une surface totalement rigide. Cette dernière hypothèse permet un calcul rapide, et se rapproche de la situation "en contrôle", puisque si celui-ci était parfait la plaque ne vibrerait pas.

La répartition de pression résultante dans le plan rigide (correspondant à la plaque du modèle précédent) est alors représentée à la figure 9. La figure du haut correspond au cas où seul le petit piston central est utilisé, le reste du maillage étant rigide. Le contrôle est simulé en annulant la pression en un point, décalé de 10 cm par rapport à l'axe de la source : cette position correspond approximativement à minimiser la pression moyenne sur la surface. Malgré la présence de l'obstacle diffractant que constitue le corps de la source, les variations radiales de pressions sont très rapides ; la pression s'annule bien au rayon correspondant à la position du microphone virtuel, mais passe par un maximum très prononcé au centre, et tend vers la pression primaire à

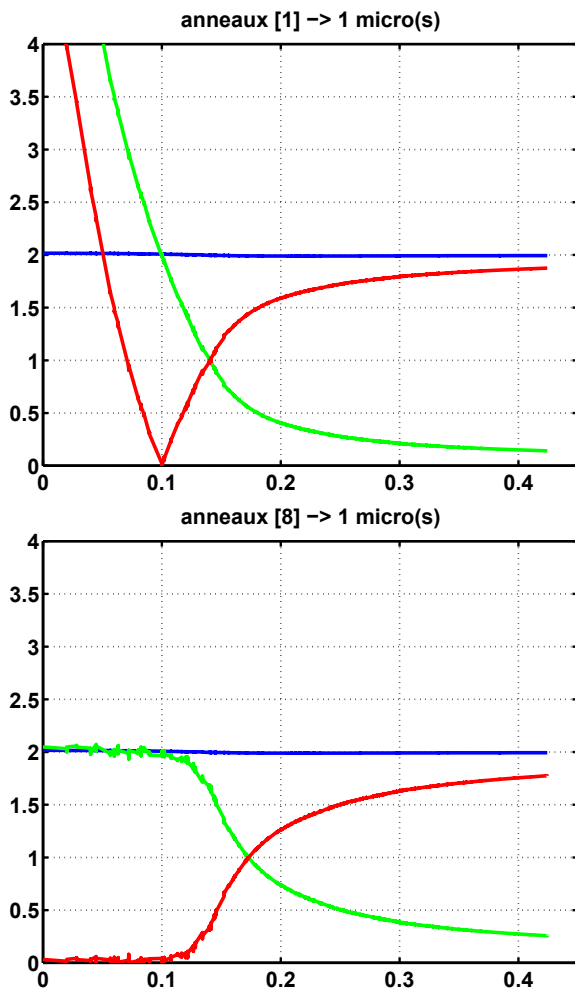


FIG. 9: Pressions calculées par BEM. Petit piston au centre (haut), Multiples couronnes (bas) ; Champs primaire (bleu), secondaire (vert) et total (rouge).

l'extérieur de la source. La figure du bas est obtenue en pilotant les différentes couronnes de manière à homogénéiser la pression secondaire devant la source. L'annulation de la pression en un point conduit alors à son annulation sur une zone de surface voisine de celle de la source, alors qu'elle rejoint toujours rapidement la pression primaire à l'extérieur. L'objectif de "pression contrastée" semble donc réalisable, même en tenant compte de la diffraction engendrée par le corps de la source.

5 Conclusion

Le travail présenté ici reste préliminaire, dans la mesure où il est basé sur des simulations numériques comportant des hypothèses encore loin d'un système réaliste. Ces simulations ont néanmoins permis d'identifier le caractère très spécifique du problème de contrôle de transmission lorsque les sources secondaires sont très proches de la paroi dont on veut contrôler la transparence. Dans une telle situation, le champ de la source de contrôle est un champ proche, presque totalement évanescant ; ses variations spatiales sont donc beaucoup plus rapides que dans le cas de sources plus éloignées de la paroi.

Cette particularité peut être mise à profit, car elle favorise l'indépendance des cellules adjacentes, et est donc favorable à une stratégie de contrôle décentralisé. Deux modèles basés sur des hypothèses différentes semblent indiquer qu'il est de plus possible de déterminer une répartition annulaire de débit qui conduit sur la paroi à des variations de pression lentes, donc plus proches de celles du champ primaire que dans le cas de sources secondaires monopôlaires. Une telle répartition de débit permettrait alors de réduire la pression sur une plus grande zone de la paroi, ce qui devrait être bénéfique pour le contrôle de transparence.

Ces conclusions doivent cependant être tempérées par le fait que le comportement d'une telle source n'a pas encore été validé expérimentalement, et qu'il n'est pas non plus acquis que la coopération d'un nombre limité de cellules de contrôle basées sur ce concept soit susceptible de réduire la transparence d'une paroi sur une large gamme de fréquences. Dans le cas des plaques de plâtre envisagées ici, la densité modale est relativement faible ; il semblerait donc plausible de pouvoir contrôler le champ incident jusqu'à environ 300 Hz avec huit cellules, ce qui serait compatible avec les dimensions envisagées dans nos simulations. La réalisation de telles cellules, et leur validation expérimentale, sont donc les perspectives les plus logiques de ce travail - ce qui ne manquera probablement pas de faire apparaître de nouveaux aspects à traiter.

Remerciements

Ce travail a été en partie financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), projet ANR-06-BLAN-0081-01.

Les auteurs souhaitent remercier Pierre-Emile Chartrain qui a réalisé les mesures sur maquette lors de son stage au C.N.A.M., et Thierry Scotti qui a participé à la modélisation au L.M.A.

Références

- [1] Filippi P.J.T., Mattei P.O., Van der Burgh A.H.P. and De Jong C.J.M., "Sound transmission through a thin baffled plate : validation of a light fluid approximation with numerical and experimental results", *J. Sound Vib.* 229(5), 1157-1169 (2000).
- [2] Furstoss M., Thenail D., Galland M.-A., "Surface impedance control for sound absorption : direct and hybrid passive/active strategies", *J. Sound Vib.* 203(2), 219-236 (1997).
- [3] Galland M.-A., Mazeaud B., Sellen N., "Hybrid passive/active absorbers for flow ducts", *Applied Acoustics* 66, 691-708 (2005).
- [4] Zemanek J., "Beam Behavior within the Nearfield of a Vibrating Piston", *J. Acoust. Soc. Am.* 49 (1), 181-191 (1971).