



**HAL**  
open science

# Conception et Optimisation de Réseaux de Transducteurs : Application au Contrôle distribué de l'Impédance Acoustique

Manuel Collet

► **To cite this version:**

Manuel Collet. Conception et Optimisation de Réseaux de Transducteurs : Application au Contrôle distribué de l'Impédance Acoustique. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. hal-00533162

**HAL Id: hal-00533162**

**<https://hal.science/hal-00533162v1>**

Submitted on 5 Nov 2010

**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.

# 10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

## Conception et Optimisation de Réseaux de Transducteurs : Application au Contrôle distribué de l'Impédance Acoustique

Dr Manuel Collet

FEMTO-ST dept Mécanique Appliquée, UMR CNRS 6174, 24 chemin de l'Épitaphe, F-25000 Besançon, manuel.collet@univ-fcomte.fr

La recherche constante pour développer de nouveaux matériaux mieux adaptés aux nouvelles applications humaines de plus en plus performantes, intégrant de plus en plus de nouvelles contraintes liées par exemple aux nuisances écologiques (impact écologique, bruits, recyclabilité...), a conduit au développement d'une nouvelle classe de matériaux composites artificiels : les Métamatériaux. Ces nouveaux matériaux présentant des propriétés physiques qu'on ne retrouve pas dans un matériau naturel, ont été initialement élaborés en électromagnétisme. Or depuis ces dernières années, de nouveaux travaux de recherche ont montré que les concepts utilisés pouvaient être transcrits dans d'autres domaines de la physique tels que l'acoustique, la mécanique voir même la robotique. Ainsi la réalisation de matériaux structurés a permis de mettre en évidence de nouvelles fonctionnalités physiques tout à fait intéressantes pouvant conduire à la réalisation de structures multi-fonctionnelles intégrées capables de contrôler leur vibration ou la diffusion d'énergie acoustique.

Durant ces dernières années, la révolution technologique observée dans les domaines des Micro Systèmes Electro Mécaniques permet d'élargir profondément le spectre de développement des futures structures adaptatives. Nous savons aujourd'hui que l'intégration complète de systèmes hybrides constitués de matériaux adaptatifs, d'électronique, de moyens de calcul et de systèmes d'alimentation est tout à fait envisageable. Ainsi, il apparaît clairement qu'une nouvelle classe de métamatériaux adaptatifs peut être envisagée et devraient conduire à de nouvelles applications tout à fait pertinentes telles pour le contrôle des nuisances acoustiques ou des vibrations.

Nous présenterons donc un ensemble de résultats méthodologiques et expérimentaux visant à modéliser, à optimiser et à caractériser cette nouvelle classe de systèmes distribués intégrés actifs ou hybrides déployés sur des interfaces vibroacoustiques. On montrera alors comment contrôler finement leur comportement physique et venir leur conférer des propriétés acoustiques n'existant pas dans la nature et ne pouvant être introduites par des approches passives. Les prototypes de systèmes adaptatives distribuées intégrées seront décrits et caractérisés. Finalement, nous dresserons les nouvelles perspectives et axes de travail visant à la réalisation de nouveaux métamatériaux hybrides intelligents.

## 1 Introduction

Le contrôle actif du bruit et des vibrations représente, aujourd'hui un enjeu théorique et technologique majeur non seulement pour limiter nuisances sonores et vibratoires mais aussi pour induire une optimisation de conception permettant de réduire notablement les quantités de matériaux nécessaires à la réalisation des futures structures mécaniques en général. Certaines techniques de contrôle acoustique (ANC) procèdent par émission de contre bruit [1, 2, 3, 4] soit pour étouffer les bruits émis soit pour modifier localement l'impédance acoustique en vue de réaliser synthétiquement une paroi au comportements optimal [5]. Cette classe de stratégies nécessite un contrôle global de l'ensemble des actionneurs à partir du traitement numérique simultané de toutes les mesures acoustiques effectuées. Très efficaces, ces stratégies demandent cependant une puissance de traitement numérique en temps réel très importante.

D'autres méthodes tendent à améliorer, par exemple, les résonateurs conventionnels passifs en étendant leur efficacité sur une bande de fréquence beaucoup plus large, grâce à un dispositif de contrôle [5]. Couplées

à des matériaux passifs, ces approches mixtes (actives/passives) profitent des avantages de robustesse induit par la présence de dissipateur passif mais pèchent bien souvent par une faible efficacité.

Deux problèmes majeurs subsistent cependant :

- le premier concerne le coût important des moyens de calcul en temps réel nécessaires à l'asservissement centralisé d'un nombre important de transducteurs. L'utilisation de méthodes adaptatives (x-filtered LMS) est alors limitée par le nombre de voies ce qui cantonne l'efficacité des systèmes envisagés sur les basses fréquences.
- le second problème est fondamental puisqu'il concerne la contrôlabilité du système. Comme l'indique le théorème de Bardos-Lebeau-Rauch [6], seules les ondes interceptant les actionneurs et les capteurs sont contrôlables. On se trouve donc très souvent face à des systèmes non contrôlables notamment lorsque les transducteurs sont ponctuels et peu nombreux.

Nous cherchons dans ce travail à conférer à des parois actives de nouvelles propriétés d'absorption acoustique

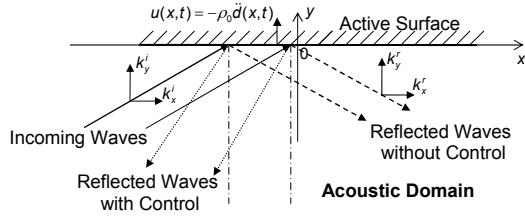


FIG. 1 – Système d’ondes acoustiques en interaction avec une surface active

pour absorber non seulement les ondes planes à incidence normale mais aussi des ondes plus complexes non normales. Ce problème revient théoriquement à chercher l’opérateur de contrôle de bord (reliant la pression pariétale aux déplacements de l’interface) qui permette de limiter au maximum toutes réflexions acoustiques. Si l’on est en incidence normale, une simple impédance  $\rho_0 c_0$  suffit à absorber toute l’énergie. Dans les autres cas l’opérateur est complexe, pseudo-différentiel ce qui limite considérablement sa mise en oeuvre expérimentale [7].

Nous présentons dans cet article, dans une première partie, la stratégie de contrôle utilisée sous forme d’opérateur aux dérivées partielles, puis les éléments de sa discrétisation en vue de son implémentation pour finalement aboutir aux solutions technologiques mis en oeuvre et aux résultats expérimentaux obtenus.

## 2 Le contrôle d’impédance de frontière

### 2.1 Le problème envisagé

Nous considérons, ici, le problème en deux dimensions décrit par le système d’équations (1). Il modélise le comportement du système vibroacoustique présenté sur la figure 1.  $p$  est le champ de pression,  $c_0$  la célérité du son dans l’air,  $u(x, t)$  le contrôle (ici l’accélération de la paroi) et  $y(x, t)$  la mesure effectuée (ici la pression pariétale).

$$\begin{cases} \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \Delta p = 0 \text{ sur } \mathbb{R}_y^{*-} \times \mathbb{R}_x \times \mathbb{R}_t^{+*} \\ \frac{\partial p(x, 0, t)}{\partial y} = u(x, t) \\ y(x, t) = p(x, 0, t) \end{cases} \quad (1)$$

L’objectif de la stratégie de contrôle proposée est de garantir une réflexion des ondes incidentes telles que la projection du nombre d’onde  $k_x^r$  de toutes ondes réfléchies soit négative ou nulle. Ainsi toutes l’énergie acoustique incidente interceptant la surface active retourne dans la direction des  $x$  négatifs afin d’annuler le transfert d’énergie acoustique dans le sens des  $x$  positifs. Cette représentation simple du problème peut directement être appliquée au cas du tube et ainsi induire une diminution notable de l’énergie acoustique transmise par le système.

### 2.2 La loi de contrôle distribué

Nous choisissons d’imposer le contrôle décrit par l’équation (2). Il s’agit d’une équation d’advection clas-

sique dont la direction de transport est orientée par l’axe ( $0x$ ) vers les  $x$  négatifs.  $C_a$  représente la célérité associée à l’équation d’advection. Il s’agit en fait d’un paramètre du contrôleur. Cette approche non classique peut se justifier en considérant les résultats concernant le couplage fluide/structure et notamment le calcul des fréquences de concordance acoustique. Ici nous cherchons à imposer un transport solidien ayant qu’un seul sens de propagation. Ce sens est bien évidemment contraire à celui dont on veut minimiser la transmission.

$$u(x, t) = -\left(\frac{1}{c_a} \frac{\partial p}{\partial t}(x, 0, t) - \frac{\partial p}{\partial x}(x, 0, t)\right) \quad (2)$$

Le problème contrôlé admet donc comme équation :

$$\begin{cases} \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \Delta p = 0 \text{ sur } \mathbb{R}_y^{*-} \times \mathbb{R}_x \times \mathbb{R}_t^{+*} \\ \frac{\partial p(x, 0, t)}{\partial y} = -\left(\frac{1}{c_a} \frac{\partial p}{\partial t}(x, 0, t) - \frac{\partial p}{\partial x}(x, 0, t)\right) \\ y(x, t) = p(x, 0, t) \end{cases} \quad (3)$$

Nous pouvons démontrer [8, 9] que seules les ondes se propageant dans le sens des  $x$  décroissants existent dans ce domaine. Nous n’aurons alors aucune onde transmise vers la droite du domaine. L’objectif fixé de non transmission vers les  $x > 0$  est alors atteint. En fait, seules les ondes établies en interaction avec l’interface de contrôle auront les propriétés énoncées.

#### Remarques

- Le nombre d’onde  $k_x^r$  selon l’axe ( $Ox$ ) présentera un minimum pour  $c_a = c_0$ . C’est pour cette condition que le retournement du sens de propagation est le moins marqué : Minimum d’énergie de contrôle
- Lorsque  $c_a = c_0$  et  $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$  c’est à dire pour une onde d’incidence normale nous aurons :  $\frac{\partial p}{\partial x} = -c_0 \frac{\partial p}{\partial y}$  ce qui constitue la condition d’absorption totale pour ces ondes acoustiques normales. Notre contrôle sera donc ”stable” au sens où il absorbe l’énergie des ondes normales se propageant dans le demi-plan des  $y < 0$  et interceptant la droite active.

### 2.3 Discrétisation de la stratégie sur un réseau de transducteurs

L’équation de contrôle (2) développée en 2 dimensions peut être appliquée directement pour le contrôle de l’écoulement acoustique en interaction avec une interface active possédant une distribution périodique de haut-parleurs électrodynamiques et de microphones présentée sur la figure 2. Nous en utilisons alors une forme discrétisée sur la distribution de transducteurs acoustiques de la figure 2. Pour cela nous introduisons la discrétisation spatiale de l’équation (2) selon la direction contrôlée ( $Ox$ ) c’est à dire selon la longueur de la surface active telle que :  $p(ix, t) = p_i$  et  $\frac{\partial p}{\partial t}(ix, t) = \dot{p}_i$ . Pour notre étude  $dx = 0.03m$ , les actionneurs ayant quant à eux un diamètre de  $0.01 m$ .

La discrétisation par différences finies de l’équation (2) s’écrit alors :

$$\frac{\partial p(x, y, t)}{\partial y} = -\left(\frac{1}{c_a} (\dot{p}_{i+1} + \dot{p}_i)/2 - \frac{1}{dx} (p_{i+1} - p_i)\right) \quad (4)$$

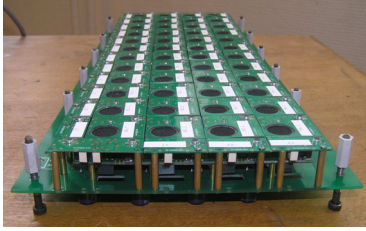


FIG. 2 – Distribution de transducteurs utilisée expérimentalement

On doit alors imposer une tension de contrôle distribuée  $v_i(t)$  correspondant à la distribution spatiale de la tension de contrôle et ainsi suivre "au mieux" l'équation aux dérivées partielles décrivant la stratégie théorique (eq 2)). En utilisant l'hypothèse de réponse monomodale des actionneurs électrodynamiques et le fait que la fréquence de fonctionnement se situe au delà de la fréquence propre du mode fondamental de l'actionneur, nous obtenons la relation suivante explicitant la tension à appliquer pour suivre la commande 4 :

$$v_i(t) = -\frac{S_{sp}}{g_e} \left( \frac{p_{i+1} + p_i}{2} \right) + \frac{M_{sp}}{\rho_0 g_e S_{sp}} \left[ \frac{1}{c_a} \left( \frac{\dot{p}_{i+1} + \dot{p}_i}{2} \right) - \frac{p_{i+1} - p_i}{dx} \right] \quad (5)$$

où  $\rho_o$  est la masse volumique de l'air,  $c_a = c_o$ ,  $M_{sp}$ ,  $S_{sp}$  et  $g_e$  représentent respectivement la masse de pompage du HP, sa surface active et le gain électrique d'amplification. Afin de faciliter la mise en oeuvre de ce contrôle, qui n'est valide que dans le cadre des hypothèses précédemment explicitées, nous appliquons au système des tensions de contrôle filtrées par un filtre passe bande ciblant la bande de fréquence située entre le mode fondamental et le premier mode interne de la membrane du haut parleur.

De même lors du développement théorique, nous avons supposé une interface active distribuée sur une surface infinie. Ici, nous avons une semi-distribution de transducteurs sur un domaine rectangulaire fini. Afin de limiter les effets de bords induits, nous pondérerons les tensions à appliquer telles que  $v_{iapp}(t) = Hanning(i) * v_i(t)$   $i = 1..12$  par des coefficients correspondants à une fenêtre de Hanning à 12 coefficients selon la direction de propagation contrôlée (la surface active possédant 12 rangées d'actionneurs).

### 3 Mise en oeuvre et validation expérimentale du réseau distribué

#### 3.1 Architecture et composants utilisés

La discrétisation utilisée de 30 mm de distance entre chaque rangée de capteurs correspond à une fréquence maximum de contrôle de 6.5 kHz. La petite taille de la cellule de base nécessite un haut degré de miniaturisation et d'intégration technologique afin d'obtenir un réseau assez dense pour l'application envisagée. Deux plaques actives ont été réalisées comprenant chacune  $4 \times 12$  cellules de base soit  $9 \times 36$  cm<sup>2</sup> de surface

active. Chaque cellule est composée de trois couches d'électronique : 1/ une couche de support avec l'alimentation électrique le système de support mécanique et de fixation, 2/ Une couche de calcul intégrant le microcontrôleur utilisé et 3/ La surface active intégrant un haut parleur et un microphone avec leur électronique de pilotage. Sur les figures 2, 3 et 4 nous présentons des vues plus précises du réseau et des cellules élémentaires.

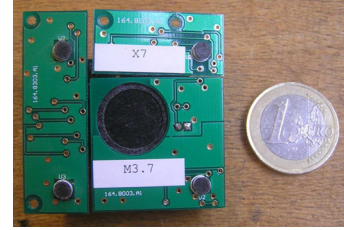


FIG. 3 – Face avant des cellules

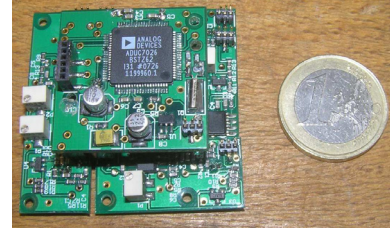


FIG. 4 – Face arrière des cellules

Le microcontrôleur utilisé est un ADuC7026. Son architecture 16-bit effectue 40.10<sup>6</sup> instructions par seconde, permet la conversion A/D et D/C sur 12-bit. Il est programmable en C et présente des dimensions compatibles avec notre système. Les micro haut-parleurs utilisés ont des caractéristiques électriques 0.3 W/8 Ω et sont généralement utilisés dans des application en téléphonie mobile. Ils ont été choisis pour leur bon rapport performance/taille même si leur résonance fondamentale à 750 Hz réduit l'efficacité du contrôle en basse fréquence. Les microphones miniatures 'électrets' 2.2 kΩ/2 V ont été utilisés en raison de leur taille et de leur bonne linéarité dans la bande fréquentielle et les niveaux requis pour notre application. Finalement, l'architecture électronique du réseau distribué peut être schématisée sur la figure 5

#### 3.2 Montage acoustique

Le montage expérimental est composé d'un tube acoustique à section rectangulaire en 'contreplaqué', d'un haut-parleur à l'entrée du tube, de deux surfaces actives distribuées et d'une terminaison pseudo-anéchoïque. Une vue générale du système se trouve sur la figure 6. Les dimensions du tube sont 90 × 135 × 1500 (mm). Il consiste en l'assemblage de trois différents tronçons permettant le démontage de la partie active. La source de perturbation est une haut-parleur de 8 cm de diamètre de haute qualité audio. La terminaison pseudo-anéchoïque réduit effectivement l'apparition de modes stationnaires dans la bande d'étude (0 – 3000 Hz). Nous noterons que le premier mode de propagation non plan est à 1270 Hz ce qui nous permettra de valider notre système lors du contrôle d'ondes non-planes.

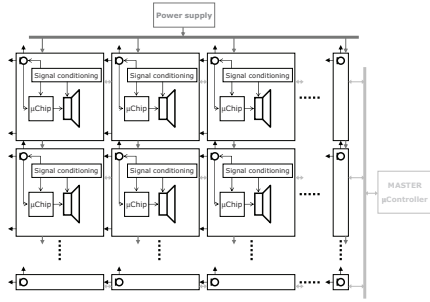


FIG. 5 – Fonctionnement schématique du réseau

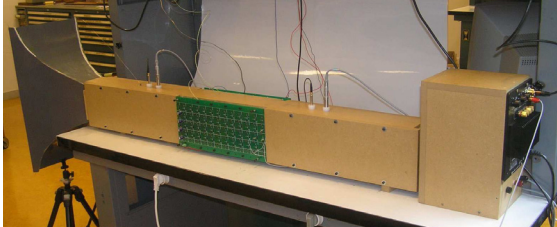


FIG. 6 – Montage Acoustique

### 3.3 Validations expérimentales

Seules les fonctions de transfert acoustiques ont été mesurées dans cette première étape d'investigation. Des microphones de précision placés de part et d'autre du segment actif du tube ont permis la mesure des fonctions de réponses en fréquence du système avec et sans contrôle. L'excitation primaire émise par le haut-parleur placé en tête de tube était un brut blanc dans la bande de fréquence d'étude 0-3000 Hz.

La figure 7 présente l'atténuation obtenue sur la fonction de transfert en pression avant et après la section active lorsque le système de contrôle est en fonctionnement en comparaison avec la même fonction de transfert sans paroi active (remplacée par des parois rigides). En plus des 8 dB obtenus par le simple fait de placer les peaux actives non alimentées, nous obtenons 22 dB d'atténuation maximum dans la bande d'efficacité du contrôleur entre 800 Hz (premier mode de pompage des membrane des haut-parleur) et 1500 Hz correspondant à la coupure introduite par le temps de retard lié à la boucle de rétroaction. Nous soulignons que le contrôle fonctionne même après 1200 Hz lorsque les ondes internes ne sont plus planes. Nous noterons que la puissance nécessaire pour la mise en oeuvre du contrôle est inférieure à 20 Watt, ce qui est beaucoup plus petit que ce que nécessiterait la mise en oeuvre d'autres stratégies comme un 'X filtered LMS' (voir [8]).

Sur la figure 8 nous montrons la valeur du TL ('Transmission Loss') de notre section active. Cette estimation prost traitée n'est valable que sous l'hypothèse d'ondes planes c'est à dire pour des fréquences inférieures à 1270 Hz. Nous notons que l'atténuation est presque uniforme dans toute la gamme de fréquence d'étude.

## 4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce papier une nouvelle méthodologie de conception de stratégie de contrôle

basée sur l'utilisation de réseaux de transducteurs distribués. Avec l'objectif du contrôle du transfert de l'énergie acoustique à travers un tube, nous avons montré sur cet exemple simple, le type de résultats que l'on peut obtenir. Bien qu'ils montrent clairement les gains potentiels que l'on peut envisager, ils présentent aussi les difficultés de mise en oeuvre notamment celles introduites en hautes fréquences par les déphasages induit par le calcul de la commande et par le couplage basses fréquences avec le mode de suspension. Ces problèmes technologiques devront être introduits dès la conception des futurs systèmes. La définition des différents transducteurs étant intrinsèquement liée à la qualité du contrôle, une approche intégrée multi-physique devra alors être adoptée.

La procédure présentée a le grand mérite d'être très efficace en permettant une atténuation très importante du transfert acoustique sans demander de trop forts déplacements des membranes d'interface, ni une importante puissance d'alimentation.

Finalement, nous ne pouvons que souligner le fort potentiel de cette approche pour le contrôle d'interaction fluide-structures en milieu confiné, semi-ouvert mais aussi ouvert comme le montrent de récents résultats.

## Références

- [1] M. Furstoss, D. Thenail, and M. A. Galland, "Surface impedance control for sound absorption : Direct and hybrid passive/active strategies," *J. Sound Vib.*, vol. 203, no. 2, pp. 219–236, 1997.

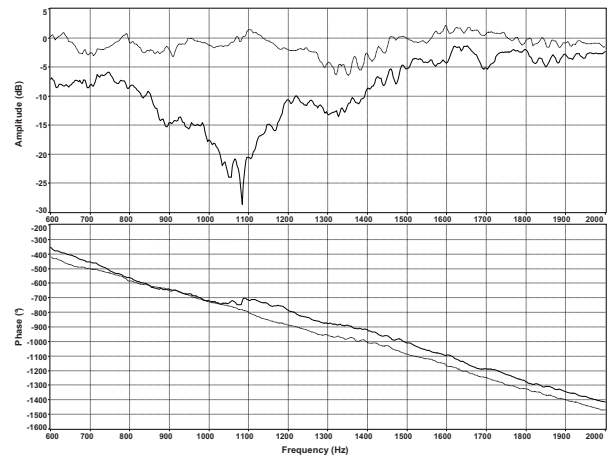


FIG. 7 – Fonction de transfert en pression, — Surfaces actives contrôlées; ... surface rigide

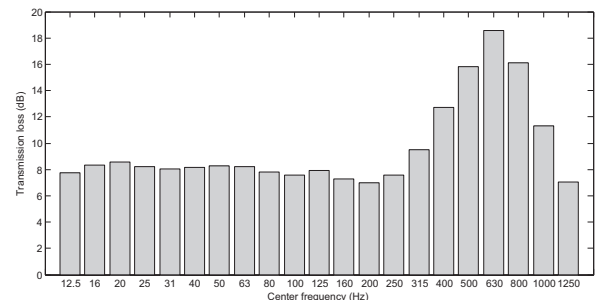


FIG. 8 – TL en 1/3 octave

- [2] B. Mazeaud, *Developing of an intelligent sound coating for a duct in the presence of flow*. Ph.d. thesis, Laboratory of Fluid Mechanics and Acoustics, Centrale Lyon, 2005.
- [3] P. A. Nelson and S. J. Elliott, *Active Control of Sound*. London : Academic Press, 1992.
- [4] D. Guicking and K. Karcher, “Active impedance control for one-dimensional sound,” *ASME J. Vib., Acoust., Stress, Reliab. Des.*, vol. 106, pp. 393–396, 1984.
- [5] M. A. Galland, B. Mazeaud, and N. Sellen, “Hybrid passive/active absorbers for flow ducts,” *Appl. Acoust.*, vol. 66, no. 6, pp. 691–708, 2005.
- [6] C. Bardos, G. Lebeau, and J. Rauch, “Sharp sufficient conditions for the observability, control and stabilization of waves from the boundary,” *SIAM J. Cont. Optim.*, vol. 30, no. 5, pp. 1024–1065, 1992.
- [7] G. Montseny, “Diffusive representation of pseudo-differential time-operator,” *ESAIM : Proceedings, Fractional Differential Systems : Models, Methods and Applications*, vol. 5, pp. 159–175, 1998.
- [8] M. Collet, P. David, and M. Berthillier, “Active acoustical impedance using distributed electrodynamic transducers,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 125, no. 2, pp. 882–894, 2009.
- [9] M. Collet, P. David, and J. M. Cote, “Experimental implementation of acoustic impedance control by 2d network of distributed smart cells,” *J. Smart Materials and Structures*, vol. 19, p. 035028, 2010.