

Contrôle de l'absorption sonore d'un matériau poreux par addition d'une couche résistive

Fabien Chevillotte¹, Céline Sandier¹, Camille Perrot²

¹Laboratoire Vibrations Acoustique, Bâtiment St. Exupéry, Insa Lyon, 25 Bis, Avenue Jean Capelle 69621 Villeurbanne Cedex. fabien.chevillotte@2006.ecam.fr

²Université Paris Est, MSME UMR 8208 CNRS, 5 Bd Descartes, 77454 Marne-La-Vallée, France

Les matériaux poreux utilisés pour leur qualité d'absorption sonore sont couramment assemblés avec une couche résistive. Cette couche est parfois ajoutée pour augmenter les performances acoustiques du matériau mais elle est le plus souvent utilisée à des fins de protection ou de décoration. Par exemple les laines de roches, connues comme de bons absorbeurs sonores, sont souvent livrées avec une plaque perforée. Cette plaque permet de conserver une paroi rigide tout en évitant que la laine ne se détériore. Les textiles (tissés ou non tissés) sont également de plus en plus utilisés en amont de matériaux acoustiques. Cette étude montre le rôle que peut avoir une couche résistive en amont d'un complexe poreux. Par exemple, un matériau recyclable de performances médiocres muni d'un film résistif convenablement dimensionné permet de valoriser les matériaux verts. En se basant sur des simulations numériques, ces travaux dégagent les lignes directrices d'utilisation rationnelle de films résistifs pour maximiser le coefficient d'absorption sonore de complexes résistifs. Deux résultats majeurs sont que (1) la couche résistive peut contrôler l'absorption sonore du complexe et rendre négligeable la nature de la seconde couche et (2) la couche peut devenir néfaste à l'absorption sonore du complexe. Une validation expérimentale sur un complexe poreux, contrôlé par un textile tissé, appuie ces résultats.

1. Introduction

Les couches résistives, ou plaques perforées, sont fréquemment utilisées dans les assemblages de matériaux. Elles constituent parfois simplement un élément de protection ou de décoration, mais elles peuvent aussi être utilisées pour leurs propriétés acoustiques.

Peut-on contrôler l'absorption sonore d'un complexe poreux par addition d'une couche résistive ?

Afin de répondre à cette question, l'étude se focalise sur un assemblage constitué d'une couche résistive placée devant un second matériau (cf. Figure 1). Le second matériau peut être un matériau poreux ou de l'air placé sur fond rigide. Le complexe est soumis à une excitation acoustique sous incidence normale.

Après une description de la modélisation utilisée, une étude numérique est tout d'abord réalisée. Un diamètre de perforation spécifique qui maximise l'absorption sonore est mis en évidence pour différents taux de perforation. Une validation expérimentale est ensuite menée à la section 4 afin de conforter l'étude numérique. Enfin la section 5 donne quelques exemples d'applications.

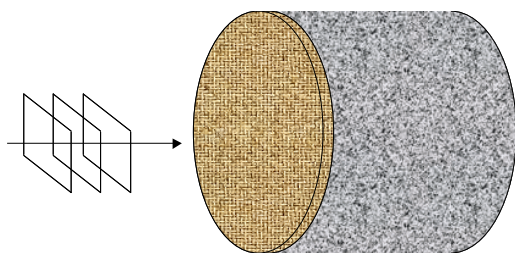


Figure 1 : Illustration d'un complexe composé d'un film résistif assemblé avec un matériau poreux.

2. Modélisation

Plusieurs modèles permettent de modéliser une plaque perforée placée devant une cavité d'air (Beranek-Ingard, Maa, Allard-Ingard) [1-4]. Ces modèles conduisent au calcul de l'impédance de surface d'une plaque perforée infinie en amont d'une cavité d'air à partir de l'impédance de surface d'une seule perforation. Les perforations sont généralement considérées comme de simples cylindres. La faible épaisseur des plaques et la forme simple des perforations permettent de négliger les effets thermiques de dissipation. La dissipation de l'énergie acoustique est principalement due aux effets visco-inertiels.

Les modèles de perforation prennent en compte une correction de longueur due à la distorsion du flux autour des perforations. Cette correction est aussi appelée correction de masse ajoutée. La différence entre les modèles réside dans la manière de prendre en compte cette correction. La méthode Allard-Ingard utilise une approche modale dans une perforation élémentaire pour calculer cette correction [4].

Atalla et Sgard utilisent le modèle fluide équivalent Johnson-Allard (JA) [4,5] pour modéliser les plaques perforées [6].

Considérant une plaque perforée d'épaisseur L ayant des perforations circulaires de rayon R_{perf} avec un taux d'ouverture ϕ , on peut facilement exprimer la résistivité σ et les longueurs caractéristiques visqueuses et thermiques Λ et Λ' :

$$\sigma = \frac{8\eta}{\phi R_{\text{perf}}^2}, \quad (1)$$

avec η la viscosité dynamique de l'air.

Les longueurs caractéristiques sont égales au rayon hydraulique :

$$\Lambda = \Lambda' = R_{\text{perf}}. \quad (2)$$

La correction due à la distorsion du flux est prise en compte en corrigeant la tortuosité α_∞ en fonction de la nature de la couche placée en aval. Atalla et Sgard montrent que les modèles classiques, exceptée l'approche modale, ne sont pas assez précis dans le cas où le matériau placé en aval est une mousse très résistive. Dans ce cas, une correction dynamique de la tortuosité est utilisée. Cette méthode permet ainsi de modéliser des plaques perforées avec un modèle fluide équivalent JA simplement en corrigeant la tortuosité en fonction du milieu placé en aval. La correction de tortuosité pour une plaque perforée placée devant une cavité d'air s'écrit :

$$\alpha_\infty(\omega) = 1 + \frac{2\varepsilon_e}{L}, \quad (3)$$

et

$$\alpha_\infty(\omega) = 1 + \left(1 + \Re(\tilde{\alpha})\right) \frac{\varepsilon_e}{L}, \quad (4)$$

lorsqu'elle est placée devant un matériau poreux. $\tilde{\alpha}$ correspond à la tortuosité dynamique du matériau placé en aval. La correction de longueur ε_e est calculée par l'approche modale pour des perforations circulaires [4],

$$\varepsilon_e = 0.48 \sqrt{\pi R_{\text{perf}}^2} \left(1 - 1.14 \sqrt{\phi}\right). \quad (5)$$

Cette approche est comparée aux autres modèles et à des mesures expérimentales avec succès [6]. Elle est ainsi retenue pour cette étude.

Lorsque les perforations sont rectangulaires, la modélisation fluide équivalent JA est toujours valable en utilisant directement le rayon hydraulique à la place du rayon de perforation. Le terme de correction est toujours estimé par une approche modale [4],

$$\varepsilon_e = 0.48 \sqrt{S} \left(1 - 1.25 \sqrt{\phi}\right), \quad (6)$$

avec S la surface élémentaire d'une perforation.

3. Simulations

Des simulations ont été réalisées pour deux complexes. Les deux complexes comportent un film résistif en amont. Ce film est modélisé par une plaque de 1 mm d'épaisseur avec des perforations circulaires. Les échantillons sont considérés infiniment larges. Dans le premier cas, le film est assemblé avec une cavité d'air de 20 mm (film + air). Dans le second cas, il est assemblé avec une couche de 20 mm de laine de roche (film + laine), connue comme un bon absorbeur sonore. L'absorption sonore en incidence normale de la laine seule est présentée sur la figure 2. Les simulations, qui ont été menées pour différents taux de perforation, ont montré qu'il existe, pour chaque taux de perforation, un diamètre spécifique D_{spe} qui maximise l'absorption sonore en incidence normale. Ce diamètre spécifique peut être évalué par la formule suivante [7] :

$$D_{\text{spe}} = \beta \sqrt{\frac{L}{\phi}}, \quad (7)$$

avec $\beta \approx 0.001085 \text{ m}^{1/2}$.

Les figures 3, 4 et 5 présentent les résultats de simulations pour les deux complexes, respectivement pour les taux de perforation 0.01, 0.1 et 0.3. Sur chaque figure, les résultats sont tracés pour 3 diamètres de perforations ($3D_{\text{spe}}$, D_{spe} et $D_{\text{spe}}/3$).

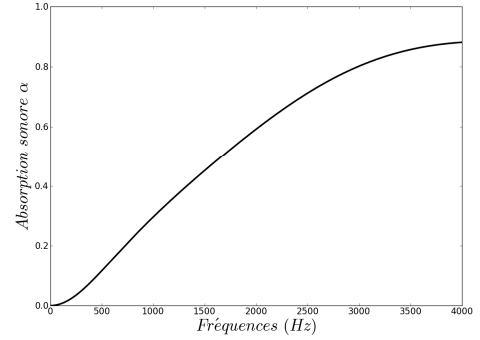


Figure 2 : Absorption sonore en incidence normale de l'échantillon de 20 mm d'épaisseur de laine utilisée pour les simulations ($\phi = 0.975$, $\sigma = 8500 \text{ N.s.m}^{-4}$, $\Lambda = 80 \mu\text{m}$, $\Lambda' = 150 \mu\text{m}$, $\alpha_\infty = 1.07$)

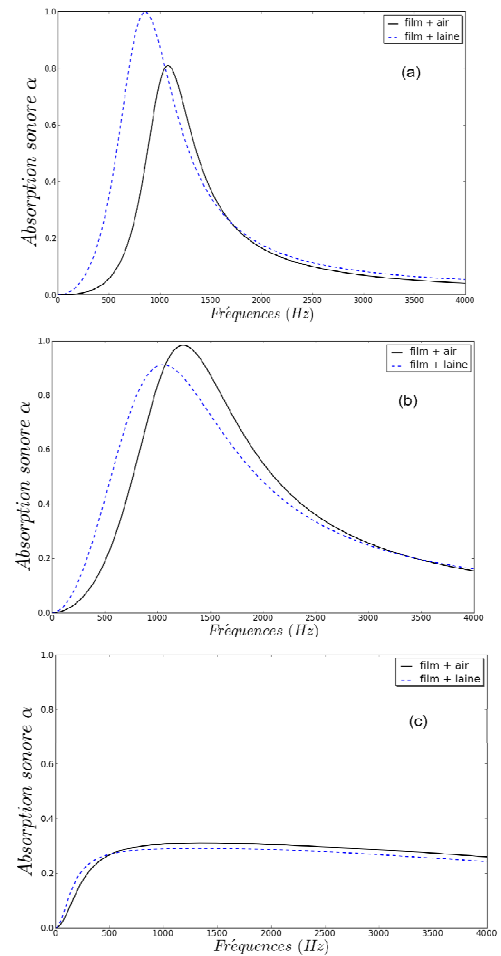


Figure 3 : Absorption sonore en incidence normale de complexes film-air et film-laine avec un taux de perforation de 0.01 pour 3 diamètres de perforations : a) $D_{\text{perf}} = 3 D_{\text{spe}}$, b) $D_{\text{perf}} = D_{\text{spe}}$ et c) $D_{\text{perf}} = D_{\text{spe}}/3$

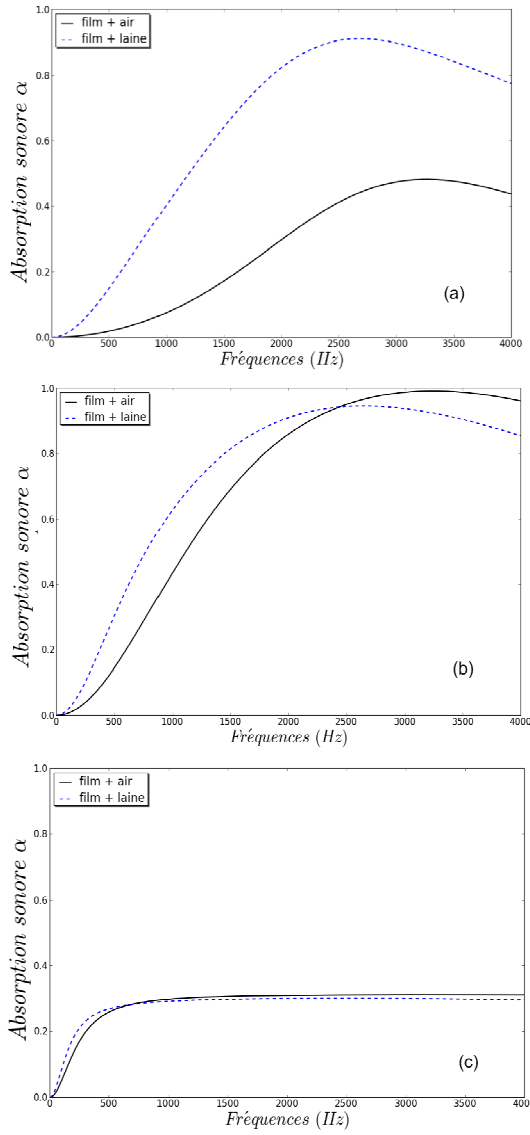


Figure 4: Absorption sonore en incidence normale de complexes film-air et film-laine avec un taux de perforation de 0.1 pour 3 diamètres de perforations : a) $D_{\text{perf}}=3 D_{\text{spec}}$, b) $D_{\text{perf}}=D_{\text{spec}}$ et c) $D_{\text{perf}}=D_{\text{spec}}/3$

Pour chaque taux de perforation, on peut voir que lorsque le diamètre de perforation est supérieur à D_{spe} , le complexe film+laine présente systématiquement une meilleure absorption sonore que le complexe film+air (Fig 3a, 4a et 5a). Dans ce cas, le film a une faible résistivité et la dissipation visco-thermique de l'énergie acoustique peut s'exercer dans le matériau poreux (ici la laine). On peut noter que le film permet tout de même dans certains cas d'améliorer l'absorption sonore de la laine en moyennes fréquences. Cet effet est dû à la bi-perméabilité du complexe film+laine. Ce phénomène a déjà été observé [8] et est expliqué par Allard [4].

Dès que le diamètre de perforation est inférieur ou égal au diamètre spécifique D_{spe} , l'absorption sonore des complexes est essentiellement contrôlée par le film résistif (Fig 3b, 4b et 5b). Proche de D_{spe} , le film seul permet de maximiser l'absorption sonore des complexes (film + air) et (film + laine).

Lorsque le diamètre de perforation est considérablement inférieur à D_{spe} , l'absorption sonore des complexes est toujours contrôlée par le film résistif mais elle est fortement dégradée (résistivité trop élevée) (Fig 3c, 4c et 5c). Les ondes acoustiques sont alors réfléchies et la dissipation visco-thermique ne peut s'exercer.

On peut noter que la sélectivité de l'absorption sonore augmente lorsque le taux de perforation décroît.

4. Validation expérimentale

Afin de vérifier les propos de la section 3, un film tissé est choisi pour effectuer une validation expérimentale avec un complexe film+air et un complexe film+laine. Le film tissé présente des ouvertures rectangulaires (figure 6) et a une épaisseur de 250 μm . A partir de mesures au microscope, un simple traitement d'image permet de mesurer le taux de perforation et les tailles d'orifice.

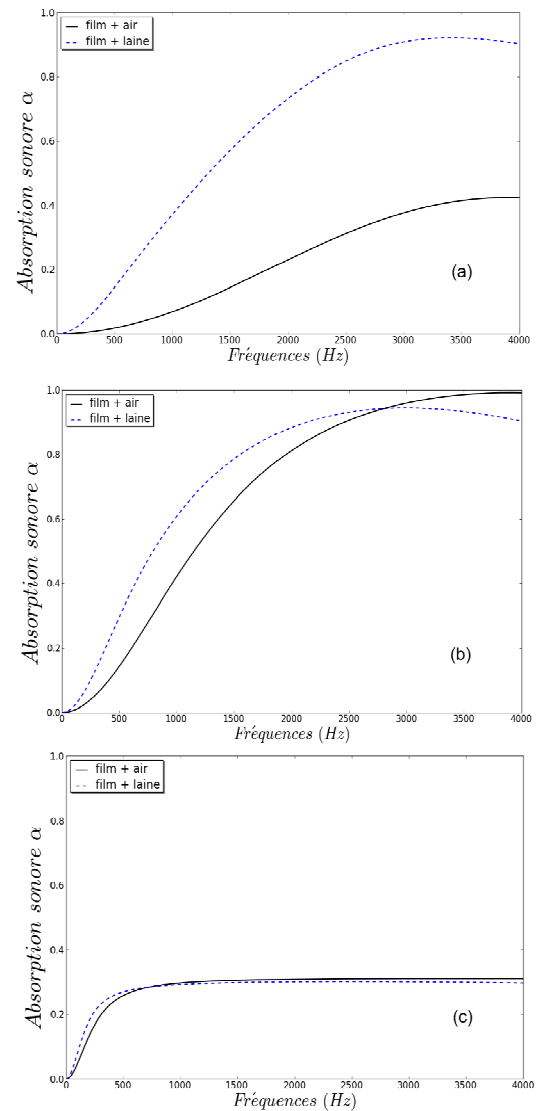


Figure 5 : : Absorption sonore en incidence normale de complexes film-air et film-laine avec un taux de perforation de 0.3 pour 3 diamètres de perforations : a) $D_{\text{perf}}=3 D_{\text{spec}}$, b) $D_{\text{perf}}=D_{\text{spec}}$ et c) $D_{\text{perf}}=D_{\text{spec}}/3$

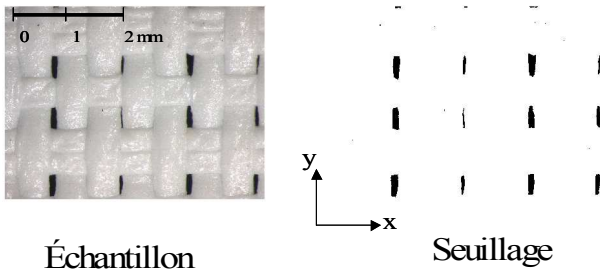


Figure 6 : Micrographie et seuillage du textile tissé.

Les profils de chaque orifice sont tracés et estimés sur chaque direction comme le montre la figure 7. La longueur moyenne L_m et la largeur moyenne l_m sont ensuite moyennées sur 12 orifices.

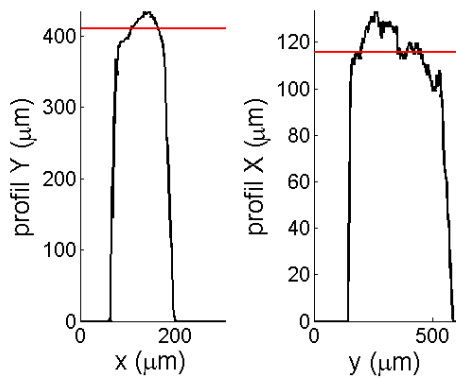


Figure 7 : Exemple de profils pour un orifice.

Le taux de perforation est $\phi_p = 0.0231$ et les paramètres microscopiques moyens sont $L_m = 367 \pm 18 \mu m$ et $l_m = 74 \pm 12 \mu m$. Le rayon hydraulique moyen vaut donc $\Lambda' = 62 \mu m$. Les propriétés de la laine utilisée expérimentalement sont calculées par inversion ($\phi = 0.975$, $\sigma = 13000 \text{ N.s.m}^{-4}$, $\Lambda = 60 \mu m$, $\Lambda' = 120 \mu m$, $\alpha_\infty = 1.01$).

La figure 8 compare les mesures et les simulations de la laine seule, du complexe film+air et du complexe film+laine. La couche d'air et la couche de laine utilisées ont toujours une épaisseur de 20 mm. La corrélation mesures/simulations est très bonne pour la laine seule et le complexe film+air. La corrélation est légèrement moins bonne pour le complexe film+laine. Ceci est certainement dû à la caractérisation des paramètres de la laine qui est simplement réalisée par inversion. L'effet recherché du film résistif est tout de même observé. Le complexe film+air est presque aussi performant que le complexe film+laine en terme d'absorption sonore. Le diamètre spécifique d'un film de $250 \mu m$ avec un taux de perforation de 0.0231 est $D_{spe} \approx 112 \mu m$ (soit $\Lambda' = 56 \mu m$). Le rayon hydraulique mesuré est proche du rayon spécifique. La figure 8 montre en effet qu'on est proche de la configuration (b) des figures 3, 4 et 5.

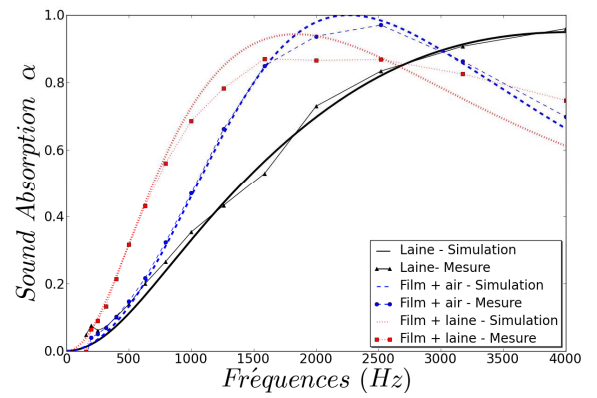


Figure 8 : Comparaison des mesures aux simulations.

5. Applications

Même si l'air est peu coûteux, réaliser un montage avec une cavité d'air est contraignant. Par contre, on pourrait assembler un film résistif, convenablement dimensionné, sur un matériau poreux peu onéreux afin de créer un complexe qui présente de bonnes propriétés acoustiques et qui serait facile à mettre en place. On pourrait notamment assembler ce type de film résistif sur un matériau recyclé.

On peut aussi imaginer un matériau avec de bonnes caractéristiques mécaniques et/ou thermiques mais une mauvaise absorption sonore. L'ajout d'un film résistif convenablement dimensionné permettrait de lui ajouter la performance acoustique.

La figure 9 présente l'absorption sonore d'une mousse polymère avec une absorption sonore moyenne. Cette figure montre que l'ajout d'un film résistif sur cette mousse permet d'augmenter considérablement son absorption sonore. On peut encore une fois noter que les complexes film+air et film+mousse ont des coefficients d'absorption sonore similaires.

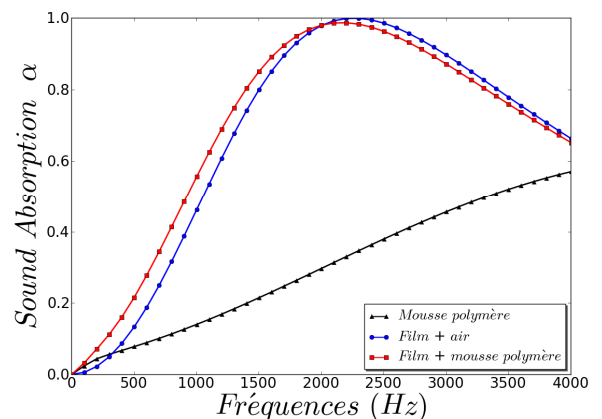


Figure 9 : Amélioration de l'absorption sonore d'une mousse de polymère par addition d'un film résistif.

Conclusion

Ce travail a permis de mettre en évidence un diamètre de perforation spécifique qui maximise l'absorption sonore en incidence normale des films résistifs. Les simulations ont montré que pour chaque taux de perforation, l'absorption sonore d'un complexe film+poreux est principalement contrôlée par le film résistif placé en amont du complexe lorsque le diamètre des perforations est inférieur ou égal au diamètre spécifique.

Ces simulations ont été validées expérimentalement sur un complexe film+air et un complexe film+laine.

La conclusion majeure de ce travail est qu'il est possible d'augmenter considérablement la propriété d'absorption sonore d'un matériau par addition d'une couche résistive convenablement dimensionnée. Il est alors facile d'ajouter la propriété d'absorption sonore à un matériau présentant d'autres propriétés intéressantes (mécaniques, thermiques, ...). Ce concept peut également être utilisé pour valoriser des matériaux recyclés.

On a également pu constater que l'ajout d'un film résistif permet d'augmenter l'absorption sonore d'une laine en moyennes fréquences. Il faut tout de même être vigilant car ce même film dégrade l'absorption en hautes fréquences. Une attention particulière doit être portée lorsqu'on ajoute une plaque perforée ou un film résistif pour protéger ou décorer un matériau poreux.

Enfin, nous avons constaté que la sélectivité de l'absorption sonore diminue lorsque le taux de perforation augmente. Les films non tissés, autorisant des taux de perforation plus élevés que les films tissés, permettraient d'avoir des absorptions sonores plus large bande.

Remerciements

Les auteurs remercient François-Xavier Bécot et Luc Jaouen pour leurs commentaires constructifs.

Références

- [1] K.U. Ingard, "Notes on sound absorption Technology", Noise Control Foundation, New York, 1994.
- [2] L.L. Beranek, I.L. Ver, "Noise and Vibration control Engineering", Wiley, New York, 1992.
- [3] D.Y. Maa, "Microperforated wideband absorbers", Noise Control Engineering Journal, 29(3) 77- 84 (1987).
- [4] J. F. Allard and N. Atalla, "Propagation of sound in porous media. Modeling sound absorbing materials," – 2nd Ed. (Wiley, Chichester, UK, 2009).
- [5] D. L. Johnson, J. Koplik, and R. Dashen, "Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media, " J. Fluid Mech. 176, 379-402 (1987).
- [6] N. Atalla, F. Sgard, "Modeling of perforated plates and screens using rigid frame porous models", J. Sound Vib. 303 195-208 (2007).
- [7] F. Chevillotte, C. Perrot, R. Panneton, "Microstructure based model for sound absorption predictions of perforated closed-cell foams," submitted to J. Acoust. Soc Am. (11/2009)
- [8] A. Duval, J.-F. Rondeau, G. Deshayes, F. Lhuillier, L. Bischoff, B. Teyssandier, "Generalizes light-weight concept: a comprehensive acoustic package weight reduction strategy," Automotive Comfort Conference, November 15-16, 2006, Le Mans, France.