

MODELISATION ANALYTIQUE DE LA PROPAGATION DU SON DANS UN MILIEU POREUX A STRUCTURE MULTICOUCHES

ANALYTICAL MODELLING OF THE DISTRIBUTION OF THE SOUND IN A POROUS ENVIRONMENT WITH STRUCTURE MULTILAYERS

RAVOLANIRINA Alain Jean de Dieu,
RATIARISON Adolphe

Laboratoire de la Dynamique de l'Atmosphère, du Climat et des Océans (DyACO), Faculté des sciences de technologies et de l'environnement (FSTE), Université de Mahajanga, Madagascar
Correspondance, courriel : ravolanasoavina@gmail.com
Tél : +261 34 51 066 76 / +261 32 60 851 49

Résumé

Le présent article consiste à étudier numériquement la propagation des ondes acoustiques dans un milieu poreux continu à structure multicouches. Les propriétés acoustiques des matériaux poreux homogènes peuvent être prédites à partir des modèles fluides équivalents et des modèles poro-viscoélastique, qui prennent en compte la géométrie des pores ou du squelette, et descriptifs des propriétés structurales du squelette. Une méthode a été développée afin de décrire ce type de matériaux à l'aide d'une matrice de transfert résultant des propriétés de l'ensemble des couches. Elle a été faite sous des conditions d'ondes planes en incidence normale. A partir du modèle de Johnson-Champoux-Allard, nous avons élaboré un modèle analytique de transparence et d'absorption acoustique pour différentes configurations tel que : Milieu poreux-Air-Mur rigide, Milieu poreux-Air-Plaque flexible et Plaque-Air-Plaque. Les vibrations du squelette sont intégrées par l'intermédiaire des impédances des plaques. Cette considération est importante pour évaluer les propriétés d'isolation phonique, car la souplesse du squelette donne généralement lieu à une augmentation des pertes par transmission dans la couche poreuse. Les résultats de

simulation montrent que l'indice d'affaiblissement est croissant en fonction de la fréquence. Mais, le coefficient d'absorption peut prendre les différentes formes (croissante, décroissante ou constante) lorsque la fréquence varie de 0 à 4000Hz.

Mots-clés : ondes acoustiques ; milieu poreux ; modèle fluide équivalent, modèle poroélastique ; coefficient d'absorption ; indice d'affaiblissement

Abstract:

The present article consists in numerically studying the propagation of acoustic waves in a continuous porous medium with a multilayer structure. The acoustic properties of homogeneous porous materials can be predicted from equivalent fluid models and poro-viscoelastic models, which take into account the geometry of the pores or of the skeleton, and descriptive of the structural properties of the skeleton. A method has been developed to describe this type of material using a transfer matrix resulting from the properties of all the layers. It was made under conditions of plane waves in normal incidence. From the Johnson-Champoux-Allard model, we have developed an analytical model of transparency and acoustic absorption for different configurations such as: Porous medium-Air-Rigid wall, Porous medium-Air-Flexible plate and Plate-Air-Plate. The skeleton vibrations are integrated through the plate impedances. This is important to assess the sound insulation properties, since the flexibility of the skeleton generally results in increased transmission losses in the porous layer. The simulation results show that the attenuation index increases with frequency. However, the absorption coefficient can take different forms (increasing, decreasing or constant) when the frequency varies from 0 to 4000Hz.

Key words: acoustic waves; porous medium; equivalent fluid model, poroelastic model; absorption coefficient; weakening index.

Introduction

La modélisation de la propagation acoustique dans le milieu poreux est un domaine qui a été de

nombreuses fois traité auparavant (Doutres, 2007 ; Tanneau, 2004 ; Glé, 2013 ; Dupont, 2002). L'un des plus connus, car le plus simple à mettre en œuvre, est le modèle de Delany et Bazley (1970). Dans cet article, nous nous intéressons à l'étude de modèle de Johnson–Champoux–Allard et le modèle poroélastique dans un milieu poreux à structure multicouche (Lafarge, 1993 ; Dauchez, 2010 ; Auffray, 2007 ; Leclaire, 2012).

Matériel et méthodes

Méthodes

Dans le cas de modèles fluide équivalent, le comportement effectif du milieu au niveau macroscopique est décrit par le modèle de Johnson–Champoux–Allard. La densité effective est défini par :

$$\rho_{eff}(\omega) = \frac{\alpha_{\infty} \rho_0}{\phi} \left[1 + \frac{\sigma \phi}{j \omega \rho_0 \alpha_{\infty}} \sqrt{1 + j \frac{4 \alpha_{\infty}^2 \rho_0}{\sigma^2 \Lambda^2 \phi^2}} \right] \quad (1)$$

Avec

ρ_{eff} : densité effective, $kg.m^3$; ω : fréquence, s^{-1} ;
 α_{∞} tortuosité ; P^0 pression atmosphérique de l'air, Pa ; ϕ porosité du milieu ; σ résistivité de l'air, Ns/m^4 ; Λ longueur caractéristique visqueuse, m ;

Et le module de compressibilité dynamique par :

$$K_{eff} = \frac{\gamma P_0 / \phi}{\gamma - (\gamma - 1) \left[1 - j \frac{8k}{\Lambda^2 C_p \rho_0 \omega} \sqrt{1 + j \frac{\Lambda^2 C_p \rho_0 \omega}{16k}} \right]} \quad (2)$$

$$\text{avec } Z_{mp} = \sqrt{\rho_{eff} K_{eff}}$$

γ : nombre de Prandt ;

k : nombre d'onde ; K_{eff} : module de compressibilité dynamique ; C_{pl} : vitesse de flexion de la plaque, ms^{-1}

Dans le cas des modèles poroélastiques, nous proposons d'utiliser une impédance effective Z_{eff}

afin d'intégrer les phénomènes vibratoires dans le modèle (Dupont, 2002). L'expression de l'impédance effective est :

$$Z_{eff} = \frac{Z_{vib} Z_{visc}}{Z_{vib} + Z_{visc}} \quad (3)$$

$$\text{où } Z_{vib} = \frac{\omega^2 \rho_{pl} e_{pl} \left(\frac{c_{pl}^4 \sin \theta}{c^4} - 1 \right)}{j \omega} \text{ et } Z_{visc} = Z_{mp} \rho_0 C.$$

La prédiction des propriétés acoustiques des matériaux à structure multicouches a été faite en utilisant la méthode de matrice de transfert résultant des propriétés de l'ensemble des couches. Le point de vue exposé par Dupont (2002) a été choisi et qui semble le plus clair et sans doute le plus immédiat à développer. On considère une structure composée de n couches supposées homogènes, isotropes, et de dimensions latérales infinies. Cette approche est basée sur les amplitudes de pressions. La résolution se fait sous matlab, et les coefficients d'absorption α et transmission τ sont directement exprimés par :

$$\alpha = \left| \frac{B_1}{A_1} \right|^2, \quad \tau = \left| \frac{A_{n+1}}{A_1} \right|^2 \quad (4)$$

Et l'indice d'affaiblissement par :

$$TL(\theta) = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau} \right) \quad (5)$$

Les caractéristiques des matériaux poreux utilisés sont présentées dans les tableaux 1 et 2 (Doutres, 2007 ; Tanneau, 2004).

Tableau 1. Propriétés des matériaux utilisés

Matériau	Laine de verre	Laine de verre1	Fibreux textile	Mousse	Mousse1	Mousse polymère	Mousse polymère1
L	29		23			18.9	30
σ	105	35	23	6.6	17	57	5.6
ϕ	0.95	0.98	0.95	0.98	0.97	0.97	0.98
α_{∞}	1	1	1	1.03	1.02	1.54	1.15
Λ	35.1	60	54.1	200	240	24.6	90.7
Λ'	105.3	150	162.3	380	490	73.8	272.1
E	1.4	10	17	292.8	505	214	190
ν	0	0.45	0	0.2	0.3	0.3	0.3
η	0.1	0.2	0.1	0.06	0.07	0.115	0.07
ρ	17	9.1	58	11.2	10	46	28

α : résistivité de l'air, Ns/m^4 ; ϕ : porosité du milieu; α_{∞} : tortuosité; Λ : longueur caractéristique visqueuse, m; Λ' : longueur caractéristique thermique, m; E : module de young, Pa; ν : coefficient de poisson

Tableau 2. Paramètres de la plaque testée

ρ	E	ν	η
1100	2.62 e^9	0.45	0.0624

Résultats et discussions

Il est observé que les valeurs moyennes caractérisées oscillent entre 10 et 70 dB pour une épaisseur de seulement 23 cm de matériau dans la configuration milieu poreux–Air–Mur rigide (fig. 1) et -10 à 60 dans la configuration milieu poreux–air – plaque flexible (fig. 2).

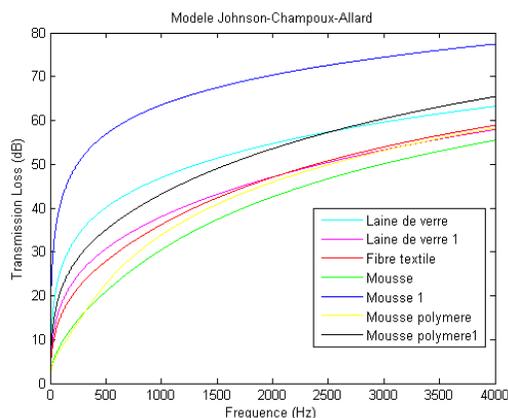


Figure 1 – Transmission loss pour la configuration Milieu poreux–Air–Mur rigide

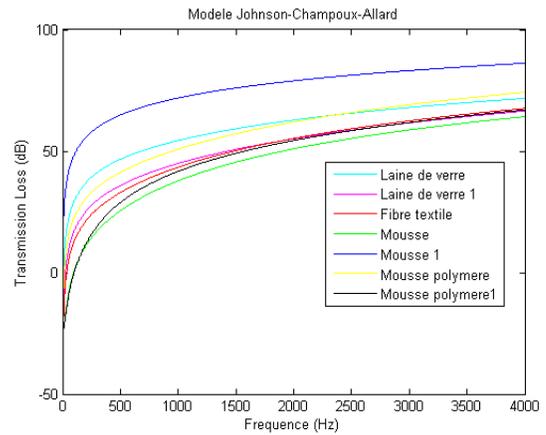


Figure 2 – Transmission loss pour la configuration Milieu poreux–Air–Plaque

Il est également remarqué aussi que l'indice d'affaiblissement est maximum dans les deux configurations pour le cas de mousse. Cela est due que la mousse possède une résistivité de l'air plus importante.

On observe que la transmission loss est comprise entre 0 à 15 dB pour la configuration air–milieu poreux– mur rigide (fig. 3). Et même remarque que précédemment pour le cas de la mousse. Dans le cas de la configuration air-milieu poreux-plaque flexible, l'indice d'affaiblissement varie entre 47 à 90 dB (fig. 4).

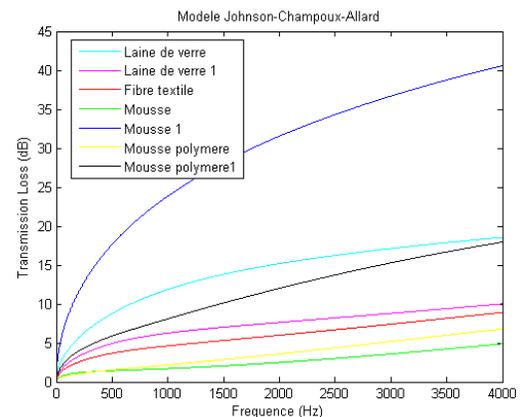


Figure 3 – Transmission loss pour la configuration Air–Milieu poreux–Mur rigide

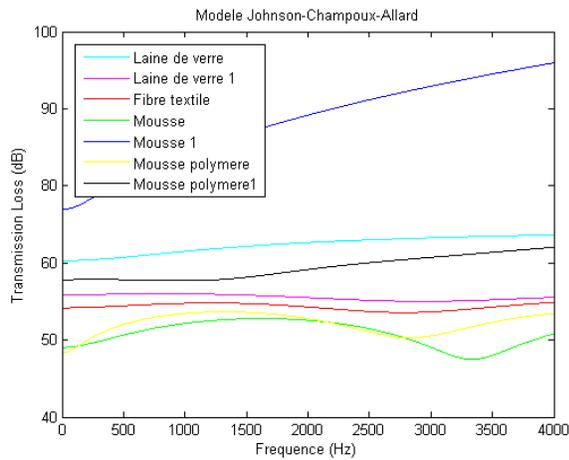


Figure 4 – Transmission loss pour la configuration Air–Milieu poreux–Plaque flexible.

Dans le cas de la configuration air-milieu poreux-mur rigide, on voit que le coefficient d'absorption augmente en fonction de la fréquence (fig. 5). Et pour la configuration air-milieu poreux-plaque flexible, on observe pour le cas de la mousse des fréquences de respiration : 600Hz et 3200 Hz (fig. 6).

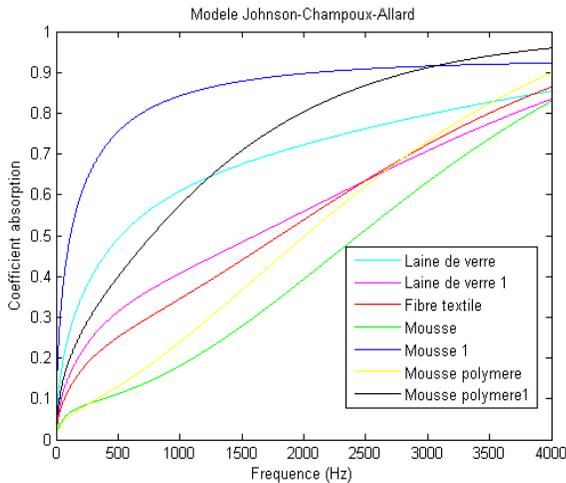


Figure 5 – Coefficient d'absorption pour la configuration Air–Milieu poreux–Mur rigide

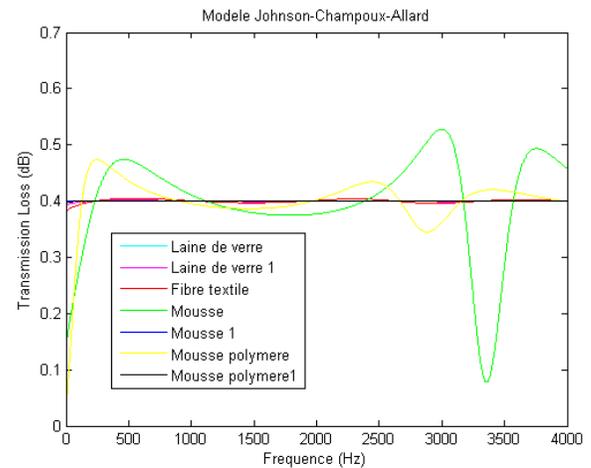


Figure 6 – Coefficient d'absorption pour la configuration Air–Milieu poreux–Plaque flexible

Pour la configuration milieu poreux flexible-air, même remarque que dans les différentes configurations c'est-à-dire que l'indice d'affaiblissement croit en fonction de la fréquence. Et dans le cas milieu poreux flexible–air –mur rigide, il y a décroissance de l'indice d'affaiblissement entre les fréquences 50 à 750 Hz pour les différents matériaux.

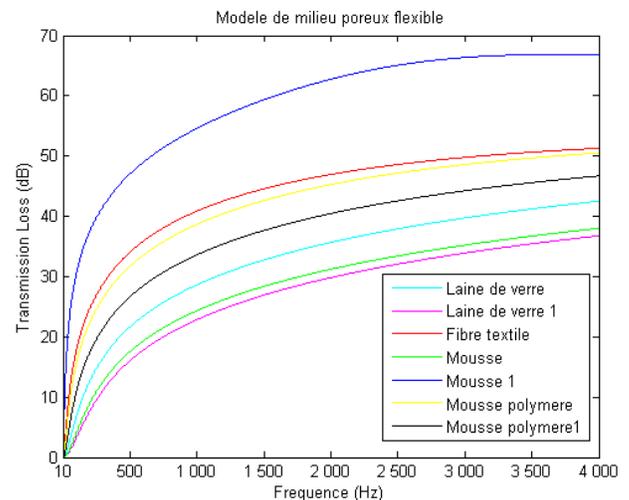


Figure 7 – Transmission loss pour la configuration Milieu poreux flexible –Air

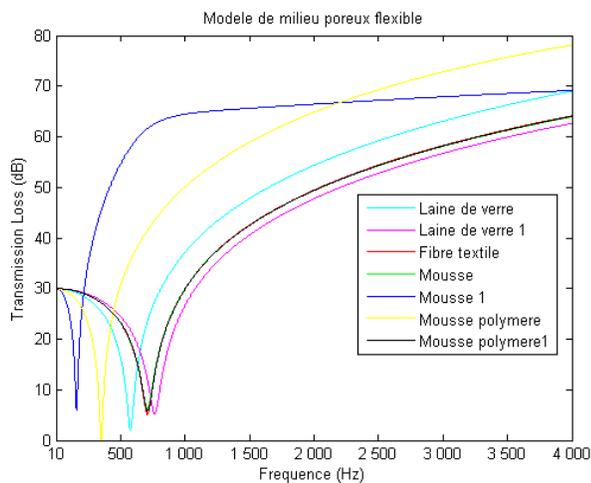


Figure 8 – Transmission loss pour la configuration Milieu poreux flexible–Air–Mur rigide

On observe que dans la figure 9 que le coefficient d'absorption pour les différents matériaux est maximal pour des fréquences comprise entre 100 à 300 Hz. Et dans la figure 10, on distingue deux types de comportement : un comportement d'absorption centré sur une fréquence et un comportement d'absorption large bande.

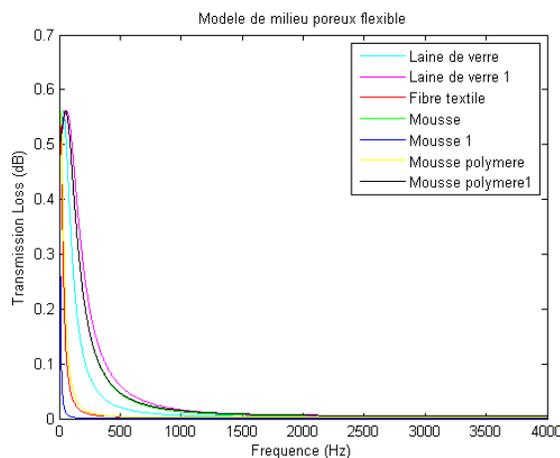


Figure 9 – Coefficient d'absorption pour la configuration Milieu poreux flexible – Air

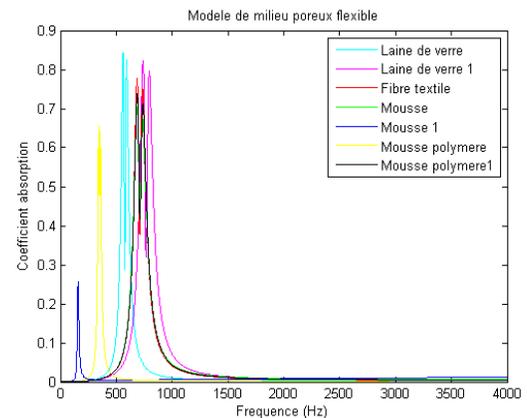


Figure 10 – Coefficient d'absorption pour la configuration Milieu poreux flexible–Air–Mur rigide

Conclusion

La modélisation analytique de la propagation du son, nous a permis de bien cerner l'ensemble des phénomènes physiques mise en jeu dans la transparence et l'absorption acoustiques des matériaux à structure multicouche. La méthode de matrice de transfert a été utilisée pour décrire les propriétés de l'ensemble des couches. L'étude a été faite en deux dimensions pour des incidences normales. L'analyse paramétrique sur les différentes configurations a permis de souligner les avantages de l'utilisation d'un milieu poreux.

Références

- Auffray, N., (2007). Modèles d'acoustique phénoménologiques -Application à la conception de matériau sur mesure.
- Dauchez, N., (2010). Optimisation acoustique de paroi par algorithme génétiques et l'influence de l'habillage par une couche poreuse.
- Delany, M.E., and E.N. Bazley, (1970). Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics*, (3) : 105-116.
- Doutres, O., (2007). Caractérisation mécanique de matériaux fibreux en vibroacoustique.

- Dupont, T., (2002). Transparence et absorption acoustiques des structures microperforées.
- Glé, P., (2013). Acoustique des matériaux du bâtiment à base de Fibres et Particules végétales - Outils de caractérisation, modélisation et Optimisation.
- Lafarge, D., (1993). Propagation du son dans les matériaux poreux a structure rigide saturés par un fluide viscothermique : définition de paramètres géométriques, analogie électromagnétique, temps de relaxation.
- Leclaire, P., (2012). Characterization of porous absorbent materials.
- Tanneau, O., (2004) Modélisation de panneaux d'isolation aéronautiques.

V - SCIENCES DE LA SOCIÉTÉ : ÉDUCATION, POLITIQUE ET ÉCONOMIQUE