

Amélioration de l'identification des paramètres de couplage et mécaniques des matériaux poreux par analyse de sensibilité

Matthieu Gravade^a, Morvan Ouisse^a, Mohamed Ichchou^b, Manuel Collet^a

a. FEMTO-ST - Département de Mécanique Appliquée – 24, rue de l'Ephitaphe – 25000
Besançon - FRANCE

b. LTDS, EC-Lyon, 36 av. Guy de Collongue 69134
Ecully - FRANCE

Résumé :

Les matériaux poreux sont amplement utilisés en vibro-acoustique pour différentes raisons. La modélisation du comportement des matériaux poreux en vibro-acoustique fait appel à de nombreux paramètres de couplage et mécaniques. Cet article présente une étude réalisée dans le but d'améliorer l'identification de ces paramètres. La méthode utilisée consiste à associer une étude de sensibilité globale (FAST) des sorties d'intérêt vis-à-vis des paramètres avec une optimisation permettant de recalibrer des résultats expérimentaux avec des résultats analytiques (modèle Biot-Allard). Nous présentons les résultats obtenus et les avantages de l'utilisation préalable de l'étude de sensibilité des paramètres associée à l'optimisation.

Abstract :

Porous materials are widely used in vibro-acoustics for many reasons. Modelling porous materials appears as an important challenge for optimal design. However the behaviour of these materials involves many mechanical and coupling modelling parameters. Their knowledge is fundamental for obtaining reliable models allowing efficient design procedure. This article presents a study conducted in order to improve their identification. The method associates a preliminary parameters sensitivity analysis with an optimisation study. The global sensitivity analysis of the outputs of interest is done using the FAST method. The sensitivity analysis is then used to optimize parameters by readjusting analytical results over experimental measurements. We also present the results and benefits of the methodology coupling parametric sensitivity analysis and optimal updating technique.

Mots clefs : Paramètres de couplage, matériaux poreux, mélamine, FAST

1. Introduction

L'utilisation des matériaux poreux est devenue une pratique courante pour des applications en vibro-acoustique dans l'industrie afin de réduire les nuisances sonores. Leur bas coût et leurs bonnes performances en termes d'atténuation acoustique voire de dissipation d'énergie en cas de choc, justifient sa vaste utilisation dans les secteurs des transports et de l'habitat. L'utilisation de ces matériaux nous incite à les étudier de façon à pouvoir les utiliser efficacement.

Les modèles utilisés pour décrire le comportement des matériaux poreux nécessitent la connaissance de nombreux paramètres. En général, de 5 à 9 paramètres sont utilisés dans les modèles les plus connus comme les modèles de Johnson-Allard au Biot-Allard, Réf. [1] et [2]. Ces modèles couplent une phase fluide avec une phase solide et peuvent être utilisés dans une analyse analytique pour des cas simples ou dans des modèles éléments finis.

La difficulté pour déterminer expérimentalement ces paramètres nous a amené à chercher une façon d'identifier leurs valeurs avec une précision satisfaisante pour conduire certaines études de

dimensionnement., Nous avons utilisé un modèle analytique qui a permis de calculer le coefficient d'absorption (α') et l'impédance acoustique (Z') pour les mousses. Ce modèle est basé sur la théorie de Biot-Allard, dont les équations de base peuvent être consultées dans les Réf. [1] et [2], et a été validé par la confrontation avec les résultats expérimentaux. Ainsi, nous avons pu comparer les résultats des calculs analytiques avec des résultats obtenus expérimentalement en tube de Kundt. Plusieurs paramètres ont été analysés de façon à pouvoir arriver à ajuster les valeurs et faire coïncider au mieux les courbes analytiques avec les données expérimentales. Une optimisation paramétrique [12], a été utilisée pour sélectionner les valeurs des paramètres.

Dans cet article nous avons essayé de tirer profit d'une étude préalable de sensibilité des paramètres pour pouvoir les identifier à partir de mesures simples, sans mettre en œuvre de méthodologie expérimentale complexe pour chaque paramètre. L'étude de sensibilité va nous conduire à des informations importantes vis-à-vis de leur l'influence par rapport aux résultats que nous cherchons à obtenir. Ceci va pouvoir guider les calculs que nous désirons réaliser par la suite. La méthode utilisée pour l'étude de sensibilité du modèle Biot-Allard est la méthode FAST (Fourier Analysis Sensitivity Test), Réf. [13].

Nous allons présenter comment les valeurs des paramètres ont été déterminées pour la caractérisation du matériau poreux. Dans un premier temps, nous présenterons les paramètres utilisés dans le modèle. Puis, dans l'étude de sensibilité, les valeurs limites admises pour chaque paramètre et les valeurs initiales adoptées seront données, enfin, les paramètres seront hiérarchisés en fonction de la fréquence selon l'étude de sensibilité menée. Enfin, on présentera l'optimisation utilisée pour ajuster les valeurs des paramètres et les résultats mesurés.

2. Paramètres des matériaux poreux

Les paramètres étudiés ici sont ceux que nous trouvons dans le modèle de Biot-Allard [1]. C'est le modèle que nous avons adopté. Ces paramètres peuvent être séparés en deux groupes, les paramètres mécaniques et les paramètres de couplage (paramètres de Biot).

Les paramètres mécaniques sont : le module d'Young (E), le coefficient de Poisson (ν), le coefficient de perte (η) et la masse volumique (ρ).

Les paramètres de couplage sont : la porosité (Φ), la résistivité (σ), la tortuosité (α_∞), la longueur caractéristique visqueuse (Λ) et la longueur caractéristique thermique (Λ').

3. Etude de sensibilité

Les sensibilités des paramètres sur les performances acoustiques des matériaux poreux varient selon la fréquence et le paramètre étudié. Une étude de sensibilité des paramètres de couplage sur les performances acoustiques des matériaux poreux à squelette rigide a été faite proposée dans la référence [3], utilisant les méthodes Sobol et FAST. Basé sur ces études, nous avons fait une étude de sensibilité utilisant la méthode FAST pour de la mousse mélamine.

Les limites de valeur pour les paramètres étudiés ainsi que pour la bande de fréquences qui nous intéresse peuvent être fixées relativement aux matériaux poreux en général ([3]), ou par des méthodes plus adaptées au matériau étudié, notamment via la réduction de l'espace de recherche de l'algorithme d'optimisation appliqué.

Basé sur des valeurs rencontrées dans la littérature [4-11], nous avons adopté les limites suivantes pour les paramètres de la mélamine :

Paramètres de couplage :			
Paramètre	Unité	Limite inférieure	Limite supérieure
Φ	[-]	0.98	0.99
σ	$[Nsm^{-4}]$	9000	11000
α_∞	[-]	1	1.03

Λ	[μm]	80	100
Λ'	[μm]	100	300
Paramètres mécaniques :			
Paramètre	Unité	Limite inférieure	Limite supérieure
E	[kPa]	100	300
ν	[-]	0.14	0.45
ρ	[Kgm^{-3}]	8.5	14.5
η	[%]	5	15

Tableau 1 : Limites inférieures et supérieures pour chaque paramètre

La bande de fréquences considérée est de 200 à 1600 Hz. Ces valeurs ont été choisies en accord avec les conditions expérimentales. Le diamètre du tube de Kundt (10 cm) utilisé nous permet d'acquérir des résultats pour cette bande de fréquence.

L'épaisseur de l'échantillon de mélamine est de 4,7 cm.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous :

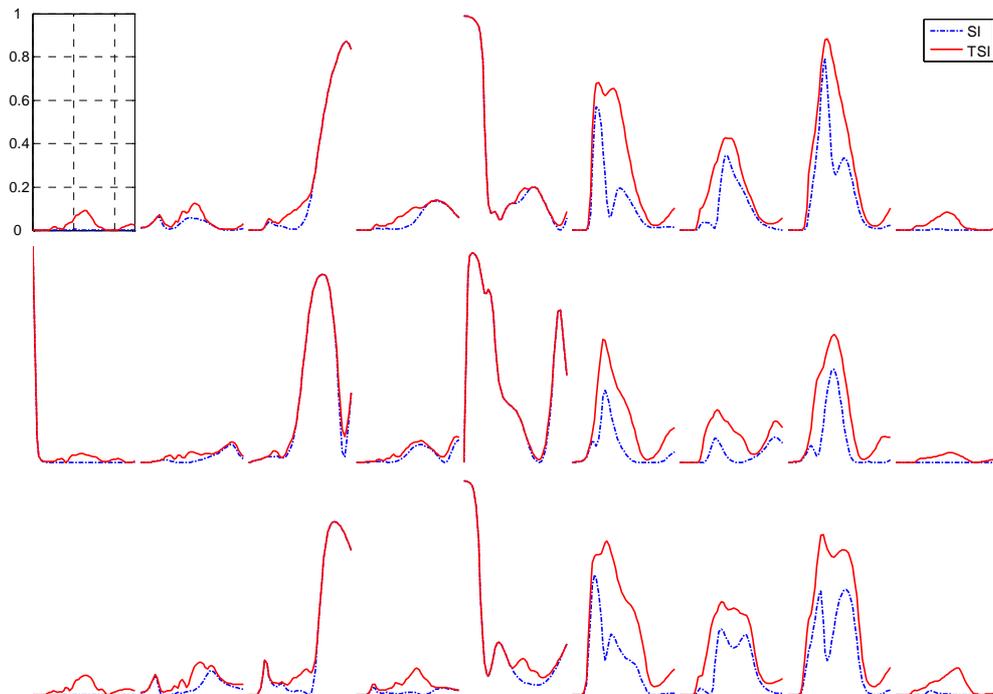


Figure 1 : Indices de sensibilité (partiel : SI et total : TSI) des paramètres sur le modèle de Johnson-Allard pour la mélamine

Nous avons représenté dans la Fig. 1 les indices 1er ordre (SI), lignes bleues en pointillés, et les indices totaux (TSI), lignes rouges continues. Les courbes font respectivement référence à la partie réelle de l'impédance, la partie imaginaire et au coefficient d'absorption.

Suivant les résultats obtenus nous avons classé les paramètres selon leur importance sur l'impédance acoustique et le coefficient d'absorption en fonction de la fréquence. Ils ont été ordonnés en utilisant l'indice du 1er ordre intégrant uniquement l'influence de chaque paramètre sur les résultats finaux indépendamment de l'interaction qui peut exister avec les autres paramètres. Il existe aussi les indices totaux (TSI) qui prennent en compte l'influence entre les paramètres mais nous ne les avons pas utilisés dans ce travail.

Pour l'impédance en ordre d'importance, les quatre paramètres les plus influents sont : Λ' , ν , E et ρ . Ensuite, avec un peu moins d'importance nous avons α_∞ , σ et Λ . Et finalement présentant peu d'importance nous avons η et Φ .

Pour le coefficient d'absorption en ordre d'importance les quatre premiers sont : Λ' , E , ν et ρ . Suivant ces paramètres nous avons avec moins d'influence α_∞ , σ et Λ , et enfin les deux paramètres les moins influents sont Φ et η .

4. Simulations

Nous avons alors cherché à déterminer les valeurs des 9 paramètres du modèle. La démarche suivie a été de comparer les valeurs des courbes expérimentales avec les résultats obtenus par un calcul analytique. Les valeurs des paramètres ont été recalées en minimisant un critère (F) représentatif de l'écart entre les courbes analytiques avec les courbes expérimentales :

$$F_{i=200}^{1600} = 2 \cdot \sum_{i=200}^{400} f_i + \sum_{i=400}^{925} f_i + 1.5 \cdot \sum_{i=925}^{1600} f_i \quad (1)$$

Où

$$f_i = \left| \frac{\alpha_i - \alpha_{\text{exp } i}}{\alpha_{\text{exp } i}} \right| + \left| \frac{|Z_i| - |Z_{\text{exp } i}|}{|Z_{\text{exp } i}|} \right| \quad (2)$$

Tel que i représente l'indice de la fréquence, α_i le coefficient d'absorption analytique donné, $\alpha_{\text{exp } i}$ le coefficient d'absorption expérimentale, Z_i l'impédance acoustique analytique et $Z_{\text{exp } i}$ l'impédance acoustique expérimental. Les valeurs limites pour chaque paramètre ont été présentées dans le tableau 1. Les valeurs initiales utilisées pour chaque paramètre lors de l'optimisation sont la valeur moyenne entre les limites supérieures et inférieures. Nous avons utilisé le logiciel Matlab® [12], pour faire les calculs et la fonction « fmincon (Find minimum of constrained nonlinear multivariable function) » a été utilisée pour faire l'optimisation.

Plusieurs simulations ont été faites pour déterminer la meilleure méthodologie permettant de profiter de l'étude préalable de sensibilité. Nous avons essayé de déterminer les valeurs des paramètres en les optimisant tous en même temps, ou par groupes en les optimisant suivant leur influence.

Dans la simulation n°1 tous les paramètres ont été optimisés en même temps. Dans la simulation n°2, nous avons seulement optimisé les quatre paramètres plus importants (Λ' , ν , E et ρ) en gardant des valeurs moyennes pour les autres paramètres. Dans la simulation n°3 nous avons optimisé premièrement les quatre paramètres les plus importants (Λ' , ν , E et ρ) pour ensuite optimiser les trois paramètres qui présentent moins d'influence (α_∞ , σ et Λ) et nous avons utilisé des valeurs moyennes pour les deux paramètres avec peu d'influence (Φ et η). Finalement dans la simulation n°4 nous avons optimisé premièrement les quatre paramètres les plus importants (Λ' , ν , E et ρ) pour ensuite optimiser les trois paramètres qui présentent moins d'influence (α_∞ , σ et Λ) et finalement optimiser les deux paramètres avec peu d'influence (Φ et η).

Les résultats sont présentés dans les tableaux ci-dessous :

Simulation	Fonction objectif valeur finale	Temps de calcul (secondes)
1	14.6	34.2
2	24.7	8.9
3	18.5	12.4
4	16.3	18.5

Tableau 2 : Valeur finale de la fonction objectif et temps de calcul

Nous pouvons observer dans le Tableau 2 des résultats assez proches en ce qui concerne les fonctions objectifs pour les simulations n°1 et n°4, par contre les temps de calcul présentent un grand écart entre eux. Une amélioration de 45% dans le temps de calcul a été obtenue.

Paramètre	Simulation			
	1	2	3	4
Λ' [μm]	168	177	177	177
E [kPa]	213	207	207	207
ν [-]	0.302	0.299	0.299	0.299
ρ [Kg m^{-3}]	14.5	14.5	14.5	14.5
α_∞ [-]	1	1	1	1
σ [Nsm^{-4}]	11000	10000	11000	11000
Λ [μm]	99.9	89.9	91.4	91.4
η [%]	0.138	0.100	0.100	0.056
Φ [-]	0.990	0.985	0.985	0.990

Tableau 3 : Valeurs rencontrées pour les paramètres dans les différentes simulations

Dans le Tableau 3, nous pouvons observer que les simulations n°1 et n°4 présentent peu d'écart par en terme de valeurs de paramètres. Il vaut la peine de souligner que la simulation n°4 prend en compte l'influence des paramètres en partant des plus influents aux moins influent, ce qui n'est pas considéré dans la simulation n°1.

Les graphiques des deux meilleurs résultats, c'est-à-dire, simulation n°1 et n°4, sont présentés ci dessous :

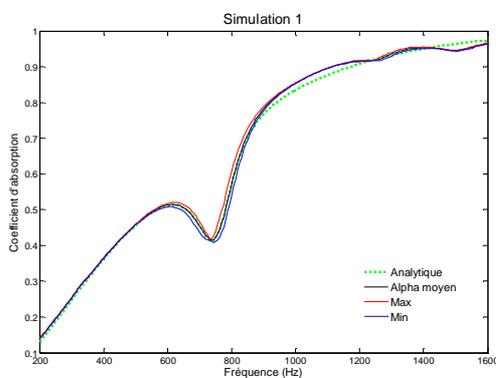


Figure 2 : Coefficient d'absorption, Simulation 1

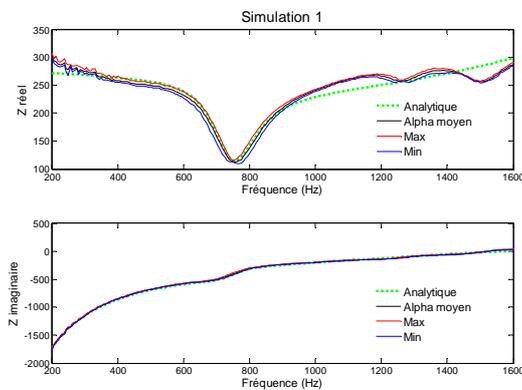


Figure 3 : Impédance, Simulation 1

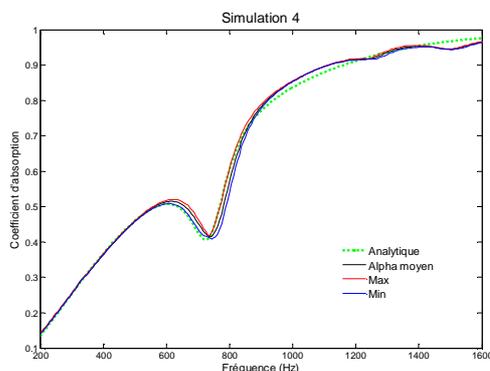


Figure 4 : Coefficient d'absorption, simulation 4

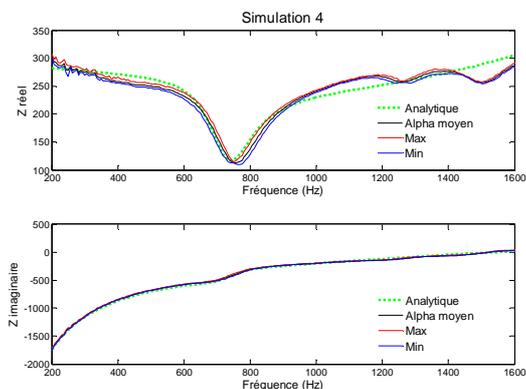


Figure 5 : Impédance, Simulation 4

Dans les figures 1,2,3 et 4 nous avons les courbes avec les valeurs maximales expérimentales (Max), les valeurs minimales expérimentales (Min), les valeurs moyennes expérimentales (Alpha moyen) et les valeurs analytiques calculées (Analytique).

Il est important de souligner que lorsque l'objectif est de valider le modèle du matériau poreux utilisé, il est nécessaire de prendre en compte les écarts rencontrés entre les différentes mesures, pour un même matériau, réalisées avec le tube de Kundt. Ici, cinq mesures expérimentales ont été utilisées. En prenant en compte cette observation nous pouvons dire que les résultats présentés dans les figures 1, 2, 3 et 4 associés aux simulations n°1 et n°4 sont acceptables.

5. Conclusion

Considérant les écarts rencontrés entre les différentes mesures réalisées en tube de Kundt, pour un même matériau, nous pouvons dire que les résultats obtenus avec les simulations n°1 et n°4 sont acceptables pour caractériser la mousse mélamine étudiée. Nous avons identifié les paramètres à partir de mesures simples, sans mettre en œuvre de méthodologie dédiée à l'identification de chacun d'entre eux. La simulation n°4 nous montre qu'avec une étude de sensibilité préalable nous pouvons sélectionner les paramètres les plus influents et les organiser afin d'obtenir des résultats satisfaisants tout en améliorant beaucoup le temps de calcul et en prenant en compte les influences croisées. Dans la simulation n°4 nous avons obtenu une amélioration d'environ 45% du temps de calcul par rapport à la simulation n°1. L'étude s'avère intéressante pour des sollicitations plus complexes, nécessitant des calculs par éléments finis, quand le temps de calcul est un facteur limitant ou contraignant.

Références

- [1] J. F. Allard et N. Atalla, Propagation of sound in Porous Media, Modelling Sound in Absorbing Materials, Wiley ISBN: 978-0-470-746615-0, 2009,
- [2] F. Sgard, Modélisation par éléments finis des structures multi-couches complexes dans le domaine des basses fréquences, Habilitation à diriger des recherches en sciences, Université Claude Bernard Lyon 1, Lyon, France, 2002
- [3] S. Chedly, M. Ichchou, M. Ouisse, M. Collet, Hiérarchisation paramétrique pour les matériaux poreux en vibroacoustique, 10^{ème} Congrès Français d'Acoustique, 2010
- [4] P. Shrivage, P. Bonfiglio and F. Pompoli, Hybrid Inversion technique for predicting geometrical parameters of Porous Materials, Sfa, acoustics'08 Paris, 2008
- [5] N. Kino, T. Ueno, Y. Suzuki, H. Makino, Investigation of non-acoustical parameters of compressed melamine foam materials, Applied Acoustics 70, 2009; 595-604
- [6] L. Boeckx, P. Leclaire, P. Khurana, C. Glorieux, and W. Lauriks, Investigation of the phase velocities of guided acoustic waves in soft porous layers, J. Acoust. Soc. Am 117 (2), 2005; 545-554
- [7] N. Geebelen, L. Boeckx, G. Vermeir, W. Lauriks, Measurement of the Rigidity Coefficients of a Melamine Foam, Acta Acustica United with Acustica vol. 93, 2007; 783-788
- [8] P. Göransson, Tailored acoustic and vibrational damping in porous solids – Engineering performance in aerospace applications, Aerospace Science and Technology 12, 2008; 26-41
- [9] L. Jaouen, Contribution à la caractérisation mécanique de matériaux poro-viscoélastiques en vibroacoustique, Ph. D. thesis, Université de Sherbrooke, Canada, 2003
- [10] L. Jaouen, A. Renault, M. Deverge, Elastic and damping characterizations of acoustical porous materials: Available experimental methods and applications to a melamine foam, Applied Acoustics 69, 2008; 1129-1140
- [11] B. Tressard, Modélisation de matériaux poreux par élément finis, projet de fin d'études, Ensmm, Besançon, France, 2008
- [12] Logiciel Matlab®, Version 7.9.0.529 (R2009b)
- [13] A. Saltelli, S. Tarantola and K. Chan, A quantitative, model independent method for global sensitivity analysis of model output, Technometrics 41, 1999; 39-56