

Hiérarchisation paramétrique pour les matériaux poreux en vibroacoustique

Slahedine Chedly, Mohamed Ichchou, Morvan Ouisse, Manuel Collet

▶ **To cite this version:**

Slahedine Chedly, Mohamed Ichchou, Morvan Ouisse, Manuel Collet. Hiérarchisation paramétrique pour les matériaux poreux en vibroacoustique. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. hal-00551187

HAL Id: hal-00551187
https://hal.science/hal-00551187

Submitted on 2 Jan 2011

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 **C**ongrès **F**rançais d'**A**coustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Hiérarchisation paramétrique pour les matériaux poreux en vibroacoustique

S. Chedly[1] - M. Ichchou [1] - M. Ouisse[2] - M. Collet[2]

[1]LTDS, EC-Lyon, 36 av. Guy de Collongue 69134 Ecully, slaheddine.chedly@hotmail.fr, mohamed.ichchou@ec-lyon.fr
[2]FEMTO-ST Mécanique Appliquée, 24 rue de l'épitaphe, 25000 Besançon, {morvan.ouisse, manuel.collet}@univ-fcomte.fr

Les modèles de comportement des milieux poreux en acoustique et vibroacoustique actuellement utilisés, qu'ils soient de type fluide équivalent ou poroélastique, doivent être alimentés par un ensemble de paramètres. Le nombre de paramètres varie suivant le type de modèle utilisé : si le modèle empirique historique de Delany & Bazley ne nécessite que la connaissance de la résistivité statique au passage de l'air, les modèles plus complets de type Biot généralisé requièrent la connaissance de plus d'une dizaine de paramètres. L'objectif de l'étude présentée ici est la hiérarchisation des paramètres du modèle dans le cadre d'une utilisation du matériau poreux pour l'absorption en vibroacoustique. Il s'agit donc de déterminer les paramètres les plus sensibles du modèle sur un calcul d'impédance de surface ou de coefficient d'absorption, en se basant sur des techniques permettant d'évaluer la sensibilité de paramètres en présence de couplage et d'incertitudes. Les résultats sont présentés sur un modèle de type Johnson-Allard analytique (fluide équivalent), ainsi qu'à un modèle Biot généralisé (squelette élastique).

1 Introduction

Dans le secteur automobile, la sécurité prend de l'ampleur depuis quelques années et les constructeurs automobiles s'investissent dans le développement des nouvelles technologies pour que leurs produits soient plus sûrs pour les passagers. Plusieurs méthodes de réduction des dommages causés aux piétons ont été développées : le "capot actif", et l'airbag extérieur de protection des piétons (Pedestrian Protection Airbag). Dans le contexte normatif actuel concernant à la fois le choc piéton et le bruit des véhicules, la sélection de matériaux offrant un bon compromis entre ces deux aspects pour la conception des capots est au cœur des préoccupations des constructeurs automobiles. Une voie possible est l'utilisation de matériaux poroélastiques collés sous le capot moteur, qui offrent une bonne dissipation de l'énergie en cas du choc, et une bonne atténuation des ondes acoustiques émises par le moteur.

Ainsi, une connaissance précise et approfondie du comportement des milieux poreux et de leurs caractéristiques intrinsèques, apparaît par conséquent essentielle, non seulement afin de mieux maîtriser et d'optimiser leur utilisation, mais également de sélectionner les matériaux les plus adaptés à une application donnée. Les paramètres, dites de couplage, qui décrivent les matériaux poreux acoustiques, à squelette rigide, sont principalement la porosité, la tortuosité, la résistivité à l'écoulement, et, les longueurs caractéristiques thermique et visqueuse. Lorsque les phénomènes mis en jeu entraînent des vibrations du squelette, on utilise classiquement 4 paramètres supplémentaires qui sont la masse volumique, le module d'Young, le coefficient de Poisson et le facteur de perte du matériau constituant la phase solide du poreux, si ce dernier est isotrope.

Plusieurs modèles existent dans la littérature décrivant le comportement de ces matériaux, pris en compte comme des milieux diphasiques : milieu solide et milieu fluide. Dans le cas des poreux à squelette rigide, on cite les modèles empiriques de Delany et Bazelet [1], de Wilson, de Mechel. Ces derniers dépendent seulement de la résistivité à l'écoulement et de la porosité du matériau, et permettent de quantifier le nombre d'onde et l'impédance caractéristique du milieu. Les modèles de Johnson-Allard (faisant appel à 5 paramètres de couplage), et de Lafarge-Allard (6 paramètres de couplage) sont des modèles macroscopiques quantifiant la densité effective et la compressibilité dynamique de tout matériau poreux à structure rigide. Ces modèles deviennent insuffisants dès que le squelette vibre, et dans ce cas on doit s'appuyer sur des modèles construits à partir des travaux de Biot, développés dans les années 1950, et adaptés notamment par Johnson, Champoux, Allard, Lafarge et al., pour constituer la théorie dite de « Biot généralisée » [2].

Un des indicateurs qui permet de qualifier les performances acoustiques d'un matériau poreux est le coefficient d'absorption acoustique. Ce coefficient s'exprime en fonction de l'impédance de surface, qui elle-même, dépend de l'impédance caractéristique et du nombre d'onde. Ces derniers peuvent s'exprimer en fonction de la densité effective et la compressibilité dynamique.

On propose dans ce travail une étude de sensibilité des paramètres de couplage sur les performances acoustiques des matériaux poreux à squelette rigide. Pour cela, on utilisera des méthodes de sensibilité globale qui permettent de quantifier la variance des paramètres sur les réponses d'un système. Cette sensibilité calculée englobe l'indice de sensibilité du facteur du 1er ordre et en ajoutant les interactions où ce facteur intervient. Les méthodes utilisées sont Sobol et FAST. Ici, l'investigation concerne l'étude des modèles de Johnson-Allard et de Biot généralisé, donnant accès à l'impédance de surface et au coefficient d'absorption acoustique. Cette étude permettra de confirmer en quelque sorte la forme des modèles empiriques de Delany et Bazelet, Wilson, Mechel,… Vu que le modèle est harmonique, la sensibilité dépendra aussi de la fréquence.

Ainsi, ce papier est organisé de la manière suivante : la première décrit présente les modèles de matériaux poroélastiques utilisés. Ensuite, on décrit brièvement les méthodes utilisées, Sobol et FAST, et les paramètres considérés dans les calculs réalisés. Les résultats obtenus et

leurs interprétations sont décrits dans la troisième partie de ce papier. Viennent en dernière partie les conclusions et les perspectives de ce travail.

2 Comportement des Matériaux Poreux

Cette partie présente le modèle décrivant les performances acoustiques (impédance de surface et absorption acoustique) des matériaux poreux à parois rigides. Dans l'étude considérée, on se limite à l'étude d'un matériau poreux en incidence normale : on suppose que l'échantillon de matériau considéré est de dimensions latérales infinies, d'épaisseur donnée, et accolé à une paroi rigide. Une onde acoustique d'incidence normale vient mettre le matériau en mouvement et l'on caractérise ce matériau par son impédance de surface et son coefficient d'absorption. Dans tels matériaux, tant que l'on ne considère pas les vibrations de la phase solide, la propagation des ondes est entièrement caractérisée par l'un des deux couples densité effective / compressibilité dynamique (ρ_e, K), ou impédance caractéristique / constante de propagation $(Z_c\ , k)$, tel que :

$$k(\omega) = \omega\sqrt{\frac{\rho_e(\omega)}{K(\omega)}} \qquad (1)$$

$$Z_c(\omega) = \sqrt{\rho_e(\omega)K(\omega)} \qquad (2)$$

La constante de propagation et l'impédance caractéristique permettent de calculer l'impédance de surface et le coefficient d'absorption acoustique d'un matériau poreux, collé à un mur rigide :

$$Z_s = -\frac{1}{\phi} jZ_c \cot(ke) \qquad (3)$$

$$\alpha = 1 - \left|\frac{Z_s - Z_0}{Z_s - Z_0}\right|^2 \qquad (4)$$

Où ϕ est la porosité du matériau, e est l'épaisseur de l'échantillon poreux, $Z_0 = \rho_0 c_0$ est l'impédance de l'air.

La densité effective (effets visqueux et inertiels) et la compressibilité dynamique (effets thermiques) peuvent se mettre sous forme simplifiée dans le cas du modèle de Johnson-Allard [2] :

$$\rho_e(\omega) = \alpha_\infty \rho_0 \left[1 + \frac{\sigma\phi}{j\omega\rho_0\alpha_\infty} G(\omega)\right] \qquad (5)$$

$$K(\omega) = \frac{\gamma P_0}{\gamma - \dfrac{\gamma - 1}{1 + \dfrac{\sigma'\phi}{jB^2\omega\rho_0\alpha_\infty} G_p(B^2\omega)}} \qquad (6)$$

Tel que :

$$G(\omega) = \sqrt{1 + \frac{4j\alpha_\infty^2\eta\rho_0\omega}{\sigma^2\phi^2\Lambda^2}} \qquad (7)$$

$$\sigma' = \frac{8\eta\alpha_\infty}{\phi\Lambda'^2} \qquad (8)$$

$$G_p(B^2\omega) = \sqrt{1 + \frac{4j\alpha_\infty^2\eta\rho_0 B^2\omega}{\sigma'^2\phi^2\Lambda'^2}} \qquad (9)$$

σ est la résistivité, α_∞ la tortuosité, Λ et Λ' sont les deux longueurs caractéristiques visqueuse et thermique.

Les équations du modèle de Biot généralisé, qui permet la prise en compte des paramètres du squelette élastique, ne sont pas rappelées ici par manque de place, le lecteur est donc invité à se référer à l'ouvrage de référence [2] pour plus de détails. Dans la suite, on note E le module d'Young du matériau supposé isotrope, ν son coefficient de Poisson, ρ_S sa masse volumique et η son facteur de perte.

3 Calcul de sensibilité

Dans cette partie, on définit l'indice de sensibilité en général. On donnera les expressions générales des indices de sensibilité du 1er ordre et totaux. Considérons le modèle

$$Y = f(X_1, \dots, X_p) \qquad (10)$$

fini ou dénombrable, ou dans $\mathbb{R}$ ou $\mathbb{R}^p$. Si la variance de Y est finie, alors :

$$V(Y) = V[E(Y|X_i)] + E[V(Y|X_i)] \qquad (11)$$

Un indicateur de la sensibilité de Y à X_i peut être défini comme la variance de l'espérance de Y conditionnellement à X_i : $V[E(Y|X_i)]$. Plus la variable X_i sera importante, plus cette quantité sera grande. Afin d'utiliser un indicateur normalisé, nous définissons finalement l'indice de sensibilité de Y à X_i :

$$S_i = \frac{V[E(Y|X_i)]}{V(Y)} \qquad (12)$$

Cet indice est appelé indice de sensibilité de premier ordre par Sobol [3], *correlation ratio* par McKay [4], ou encore *importance measure*. Il quantifie la sensibilité de la sortie Y à la variable d'entrée X_i, ou encore la part de variance de Y due à la variable X_i.

La variance du modèle à des entrées indépendantes (10) se décompose en fait tel que :

$$V = \sum_{i=1}^{p} V_i + \sum_{1\le i<j\le p} V_{ij} + \cdots + V_{1\dots p} \qquad (13)$$

Où

$$V_i = V(E[Y|X_i])$$

$$V_{ij} = V(E[Y|X_i, X_j]) - V_i - V_j$$

$$V_{ijk} = V(E[Y|X_i, X_j, X_k]) - V_{ij} - V_{ik} - V_{jk} - V_i - V_j - V_k$$

$$\dots$$

$$V_{1\dots p} = V - \sum_{i=1}^{p} V_i - \sum_{1\le i<j\le p} V_{ij} - \cdots - \sum_{1\le i_1<\cdots<i_{p-1}\le p} V_{i_1\dots i_{p-1}}$$

Ainsi, on peut définir des indices de sensibilité de premier ordre :

$$S_i = \frac{V_i}{V} = \frac{V(E[Y|X_i])}{V} \qquad (14)$$

les indices de sensibilité d'ordre deux :

$$S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V} \qquad (15)$$

qui expriment la sensibilité de la variance de Y à l'interaction des variables X_i et X_j. On définit encore les indices de sensibilité d'ordre trois :

$$S_{ijk} = \frac{V_{ijk}}{V} \qquad (16)$$

qui expriment la sensibilité de la variance de Y aux variables X_i, X_j et X_k qui n'est pas prise en compte dans l'effet des variables seules et des interactions 2 à 2. Et ainsi de suite jusqu'à l'ordre p.

Homma et Saltelli [5] ont alors introduit des indices de sensibilité totaux, qui expriment la sensibilité totale de la variance Y à une variable. L'indice de sensibilité total ST_i à la variable X_i est défini comme la somme de tous les indices de sensibilité relatifs à la variable X_i

$$ST_i = \sum_{k\#i} S_k \qquad (17)$$

où $\sharp\, i$ représente tous les ensembles d'indices contenant l'indice i.

Par exemple, pour un modèle à trois variables d'entrée, nous avons :

$$ST_1 = S_1 + S_{12} + S_{13} + S_{123}$$

Pour plus de détails sur les méthodes Sobol et FAST, le lecteur peut se référer aux papiers [6-11].

La connaissance des indices de sensibilité totaux permettent de classifier l'importance des paramètres sur le modèle en question. Les paramètres dont l'indice est supérieur à 0.8, sont considérés comme très importants. Dans le cas où l'indice est entre 0.5 et 0.8, les paramètres sont jugés importants, alors que s'ils varient entre 0.5 et 0.8, ils ne sont pas importants. Enfin, dans le cas ou l'indice de sensibilité total est inférieur à 0.3, le paramètre est jugé insignifiant.

4 Résultats et interprétations

L'analyse de sensibilité est réalisée sur ce modèle et par le biais de deux méthodes : FAST et Sobol. Pour mener à bien nos calculs d'indices de sensibilité, le tableau 1 présente l'inventaire des paramètres de couplage :

Paramètre	Unité	Lim. Inf.	Lim. Sup.
ϕ	-	0.7	0.99
σ	Nsm^{-4}	1500	200 000
α_∞	-	1	3
Λ	μm	5	200
Λ'	μm	5	400
E	Pa	1000	5 000 000
ν	-	0	0.44
ρ_S	$kg\ m^{-3}$	8	200
η	-	0	1

Table 1 : plages paramétriques considérées dans les analyses

Ces plages de variations permettent d'inclure la plupart des matériaux poroélastiques utilisés au niveau industriel pour les applications vibroacoustiques. Parmi les combinaisons possibles, un certain nombre ne correspond à aucun matériau existant à ce jour. Cela permet cependant de dégager les grandes lignes qui régissent globalement la hiérarchisation paramétrique des modèles considérés, indépendamment du type de matériau considéré (pour peu que son comportement soit conforme à la théorie).

La hiérarchisation est réalisée sur les fonctions suivantes : parties réelle et imaginaire de l'impédance de surface, coefficient d'absorption acoustique. Ces grandeurs sont obtenues en fonction de la fréquence, l'étude de sensibilité est réalisée entre 100 et 2000 Hz.

Les algorithmes utilisés génèrent des calculs des performances acoustiques pour un certain nombre de jeux de caractéristiques du matériau. Le nombre de tirages à effectuer doit être choisi de façon à avoir une bonne précision des calculs des indices de sensibilité. Dans le cas de l'analyse par la méthode de Sobol, le nombre de tirages nécessaire est généralement plus faible mais le calcul doit être répété pour conduire à la convergence, ce qui induit un coût global de calcul plus important, ce qui balance le fait que l'approche de Sobol fournit des résultats plus complets. Le nombre de calculs dépend essentiellement des plages de variation des caractéristiques intrinsèques et de leurs effets sur les performances en question. À titre d'exemple, dans le cas du modèle de Johnson-Allard, la méthode FAST a nécessité 20000 calculs pour avoir des résultats de sensibilité fiables. Concernant la méthode Sobol, il a fallu 7000 calculs avec 10 répétitions.

4.1 Sobol vs FAST

La méthode Sobol donne les valeurs moyennes des indices de sensibilité ainsi que les écarts types correspondants. On se contentera ici de présenter les moyennes. Le tableau 2 donne les indices de sensibilité du 1er ordre et totaux concernant les parties réelle et imaginaire de l'impédance de surface, et le coefficient d'absorption acoustique, à 1000 Hz pour le modèle de Johnson-Allard.

Ces résultats mettent en évidence l'équivalence des méthodes FAST et Sobol pour la détermination de la moyenne : on obtient des résultats proches avec une erreur maximale de 1%. Notons aussi que la méthode Sobol est gourmande en temps de calcul par rapport à FAST, cette dernière converge plus vite alors que Sobol demande une étude complète pour optimiser les nombres de répétition et de sites (jeux de paramètres).

			ϕ	σ	α_∞	Λ	Λ'
Sensibilité 1er ordre	$Real(Z_s)$	*FAST*	0.0732	0.5012	0.0432	0.3305	0.0469
		SOBOL	0.0741	0.5044	0.0433	0.3314	0.0459
	$Imag(Z_s)$	*FAST*	0.0121	0.9502	0.0055	0.0041	0.0125
		SOBOL	0.0122	0.9568	0.0058	0.0042	0.0133
	α	*FAST*	0.0251	0.877	0.0012	0.0427	0.0144
		SOBOL	0.0227	0.876	0.0014	0.0412	0.0142
Sensibilité totale	$Real(Z_s)$	*FAST*	0.1762	0.5575	0.1803	0.417	0.1495
		SOBOL	0.1744	0.5532	0.1792	0.4126	0.1471
	$Imag(Z_s)$	*FAST*	0.0217	0.9669	0.0205	0.0337	0.0231
		SOBOL	0.0208	0.9642	0.0195	0.0347	0.0254
	α	*FAST*	0.0356	0.9233	0.0349	0.1062	0.0281
		SOBOL	0.0346	0.9213	0.0334	0.1074	0.0272

Table 2 : Indices de sensibilité des paramètres selon les méthodes FAST et Sobol (modèle de Johnson-Allard)

4.2 Indices du 1er ordre vs indices totaux

On étudie plus particulièrement l'évolution des indices de sensibilité du 1er ordre et totaux en fonction de la fréquence, pour chacun des 5 paramètres de couplage sur l'impédance de surface et l'absorption acoustique. Les courbes de la figure 1 donnent les indices de sensibilité de chaque paramètre en fonction de la fréquence. Les figures sont triées dans un tableau. Chacune des 3 lignes correspond à une fonction (parties réelle et imaginaire de l'impédance de surface et le coefficient d'absorption acoustique). Les colonnes désignent les paramètres dont on étudie les sensibilités. Les lignes discontinues désignent les courbes des indices du 1er ordre alors que les courbes continues évaluent l'évolution des indices totaux.

Deux points méritent d'être cités suite à ce graphe. En premier lieu, on peut apprécier l'importance des paramètres de couplage tout au long de l'échelle fréquentiel. Par exemple, dans le cas de la partie réelle de l'impédance de surface, les sensibilités de 1er ordre et totaux de la porosité, la tortuosité et les longueurs caractéristiques visqueuse et thermique augmentent dans le même ordre que la fréquence, tandis que l'opposé peut être vu pour la résistivité. Dans le cas du coefficient d'absorption acoustique, la résistivité gardera une sensibilité totale supérieure à 80 % sur la plage fréquentielle d'intérêt. La

porosité et la tortuosité ont entre 2 % et 5,5 % d'influence chacun sur l'absorption acoustique, la longueur caractéristique thermique entre 1 % et 4,5 %, et la longueur caractéristique visqueuse entre 5 % et 15 % de sensibilité totale.

Le deuxième point d'intérêt concerne l'importance des interactions entre les paramètres de couplage sur les performances acoustiques. En effet, pour le cas de la partie réelle de l'impédance de surface, les interactions (d'ordre supérieur à 2) entre la porosité et le reste des paramètres de couplage peuvent aller jusqu'à 60 % de l'indice de sensibilité total de la porosité. Celles de la résistivité peuvent aller jusqu'à 15 % de l'indice total, celles de la tortuosité jusqu'à 70 % de l'indice total correspondant, celles de la longueur caractéristique thermique jusqu'à 75 %, alors que dans le cas de la longueur caractéristique visqueuse elles vont jusqu'à 17 % de l'indice total. Pour la partie imaginaire de l'impédance de surface, les interactions faisant intervenir la porosité peuvent aller jusqu'à 53 % de l'indice de sensibilité total de ce paramètre, celles de la résistivité peuvent aller jusqu'à 3 % de l'indice total ; celles de la tortuosité jusqu'à 70 %, celles de la longueur caractéristique visqueuse jusqu'à 85 % et pour le cas de la longueur caractéristique thermique les interactions peuvent aller jusqu'à 50 %. Finalement, en étudiant la sensibilité des paramètres de couplage sur le coefficient d'absorption acoustique, les interactions faisant intervenir la porosité constituent 75 % de l'indice de sensibilité total du paramètre en question, celles de la résistivité peuvent aller jusqu'à 8 %, celles de la tortuosité jusqu'à 95 % alors que pour la longueur caractéristique visqueuse peuvent aller jusqu'à 50 %, et pour finir celles de la longueur caractéristique thermique peuvent atteindre 95 % de l'indice de sensibilité total.

Cette étude va dans le même sens que l'analyse de Delany et Bazeley [1] qui indiquent que la résistivité à l'écoulement reste dominante et le paramètre le plus influent sur les performances acoustiques d'un matériau poreux à squelette rigide.

La figure 2 présente les résultats d'une étude similaire menée sur le modèle de Biot généralisé, à 9 paramètres. Les tendances sont globalement assez proches de celles observées précédemment, avec cependant quelques différences méritant d'être soulignées :

- globalement, les évolutions fréquentielles sont plus chahutées que précédemment. Cela s'explique par l'existence de résonances de la phase élastique, dont la position fréquentielle varie suivant les tirages. Un choix différent des bornes des paramètres de la phase solide aurait conduit aux mêmes tendances, avec cependant des accidents fréquentiels légèrement décalés.

- en très basses fréquences, la résistivité, si elle reste globalement dominante, n'est plus le seul paramètre influent. Les effets élastiques jouent indirectement sur l'importance de la porosité et de la longueur caractéristique thermique.

- les effets des autres paramètres non liés à la phase élastique sont globalement identiques à ceux observés dans le cadre du modèle de Johnson-Allard.

- les effets du module d'Young et de la masse volumique sont assez proches l'un de l'autre, partant d'un effet nul à très basse fréquence jusqu'à une participation à hauteur de 10 à 20 % de la sensibilité totale sur la bande de fréquence considérée. Cette équivalence entre les deux paramètres est assez logique puisque leur ratio est une grandeur directement liée aux conditions de résonance de la phase solide. Il convient enfin de souligner que, concernant ces deux paramètres, la sensibilité totale est largement supérieure à la sensibilité du premier ordre, ce qui indique de forts effets de couplage avec les autres paramètres. Ainsi, une analyse de sensibilité trop vite menée ne permet pas d'identifier les effets de ces paramètres, alors que leurs effets, lorsqu'ils sont croisés avec les variations des autres paramètres, peuvent atteindre 20 % de la sensibilité totale.

- enfin, les autres paramètres élastiques (coefficient de Poisson et facteur de perte) montrent une faible sensibilité dans l'étude menée.

5 Conclusion

L'étude présentée ici concerne la hiérarchisation des paramètres de couplage en étudiant les modèles de Johnson-Allard et Biot généralisé qui décrivent le comportement acoustique des matériaux poreux à squelette rigide et élastique. Les résultats ont montré d'un côté une forte dépendance des indices de sensibilité en fonction de la fréquence, et d'un autre côté, la forte dépendance des caractéristiques acoustiques de la résistivité à l'écoulement. Suite à ces résultats, et de manière quantitative, les sensibilités (incluant les interactions qui peuvent exister) des paramètres de couplage sont connues.

Cette étude a été réalisée en considérant des variations paramétriques incluant l'ensemble des matériaux poreux utilisés au niveau industriel. Elle présente une hiérarchisation paramétrique globale, et ces résultats sont à différencier d'une étude portant sur un type de matériau donné, en considérant uniquement les variations liées aux incertitudes de fabrication et de mise en œuvre du matériau. Ces aspects seront développés dans les prochains travaux afin de les mettre en balance avec les résultats présentés ici. De même, l'utilisation d'un modèle éléments finis permettra de confirmer ou d'informer les tendances observées ici dans le cadre d'excitations et de géométries plus complexes.

Bibliographie

[1] M.A. Delany and E.N. Bazley. "Acoustic properties of fibrous absorbent materials". *Appl. Acoust.,* 3, 105-116 (1970)

[2] J.-F. Allard, "Propagation of sound in porous media: Modelling sound absorbing materials", *Elsevier*, (1993)

[3] I.M. Sobol, "Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models", *Mathematical Modelling and Computational Experiments*, 1, 407–414, (1993)

[4] M.D. McKay, "Evaluating prediciton uncertainty, Technical Report NUREG/CR-6311", *US Nuclear Regulatory Commission and Los Alamos National Laboratory*, (1995)

[5] T. Homma and A. Saltelli. "Importance measures in global sensitivity analysis of non linear models". *Reliability Engineering and System Safety*, 52, 1–17, (1996)

[6] R.I. Cukier, C.M. Fortuin, K.E. Shuler, A.G. Petschek, and J.H. Schaibly. Study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate

coefficients – theory". *Journal Chemical Physics*, 59, 3873–3878, (1973)

[7] R.I. Cukier, R.I. Levine, and K.E. Shuler. "Nonlinear sensitivity analysis of multiparameter model systems". *Journal Computational Physics*, 26, 1–42, (1978)

[8] A. Saltelli, S. Tarantola, and K.P.-S. Chan. "A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output". *Technometrics*, 41(1), 39–56, (1999)

[9] A. Saltelli and R. Bolado. "An alternative way to compute fourier amplitude sensitivity test (FAST)". *Computational Statistics Data Analysis*, 26:445–460, (1998)

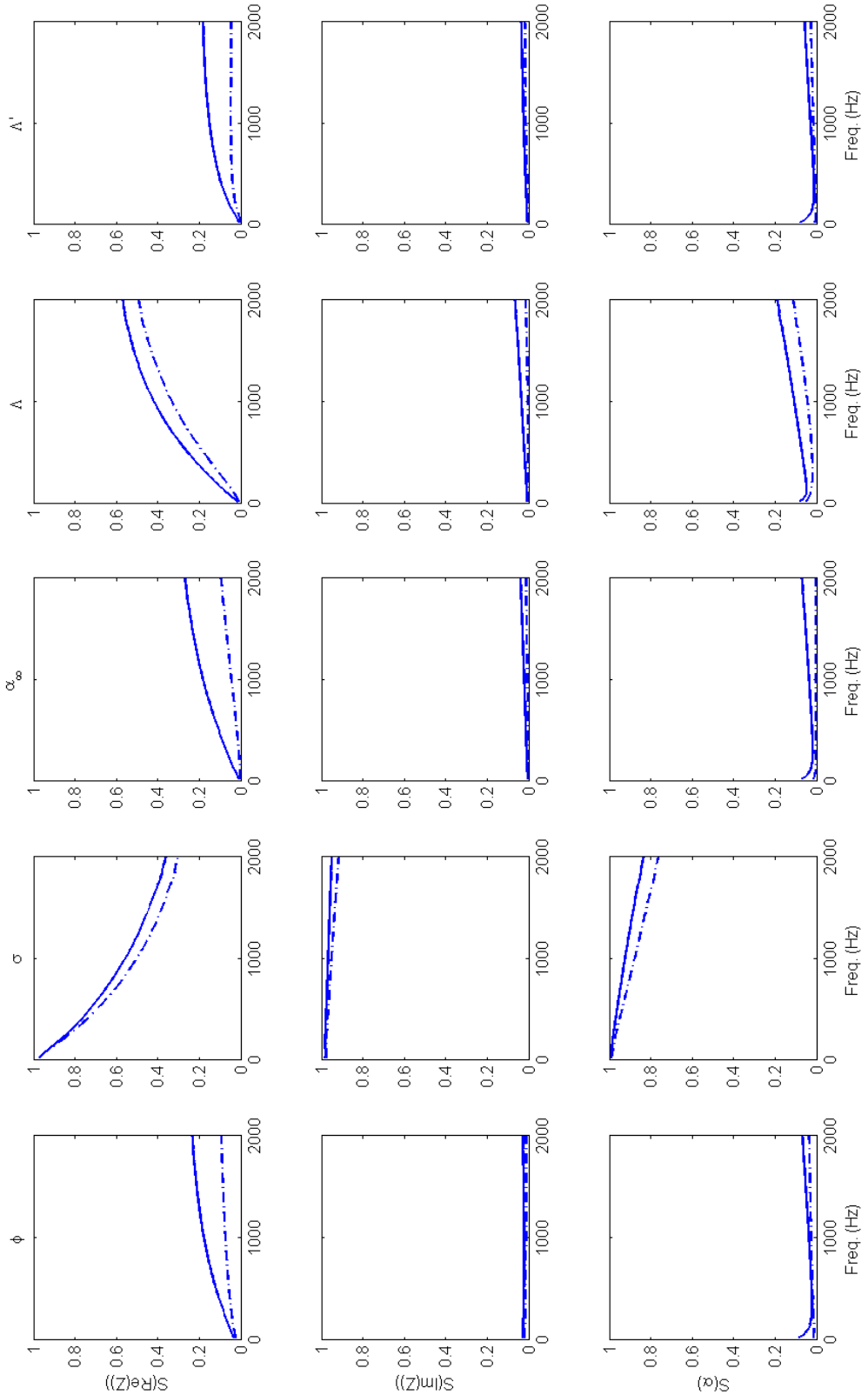


Figure 1 : Indices de sensibilité des paramètres de couplage sur le modèle de Johnson-Allard – indices de sensibilité du 1er ordre (trait continu) et indices totaux (traits discontinus)

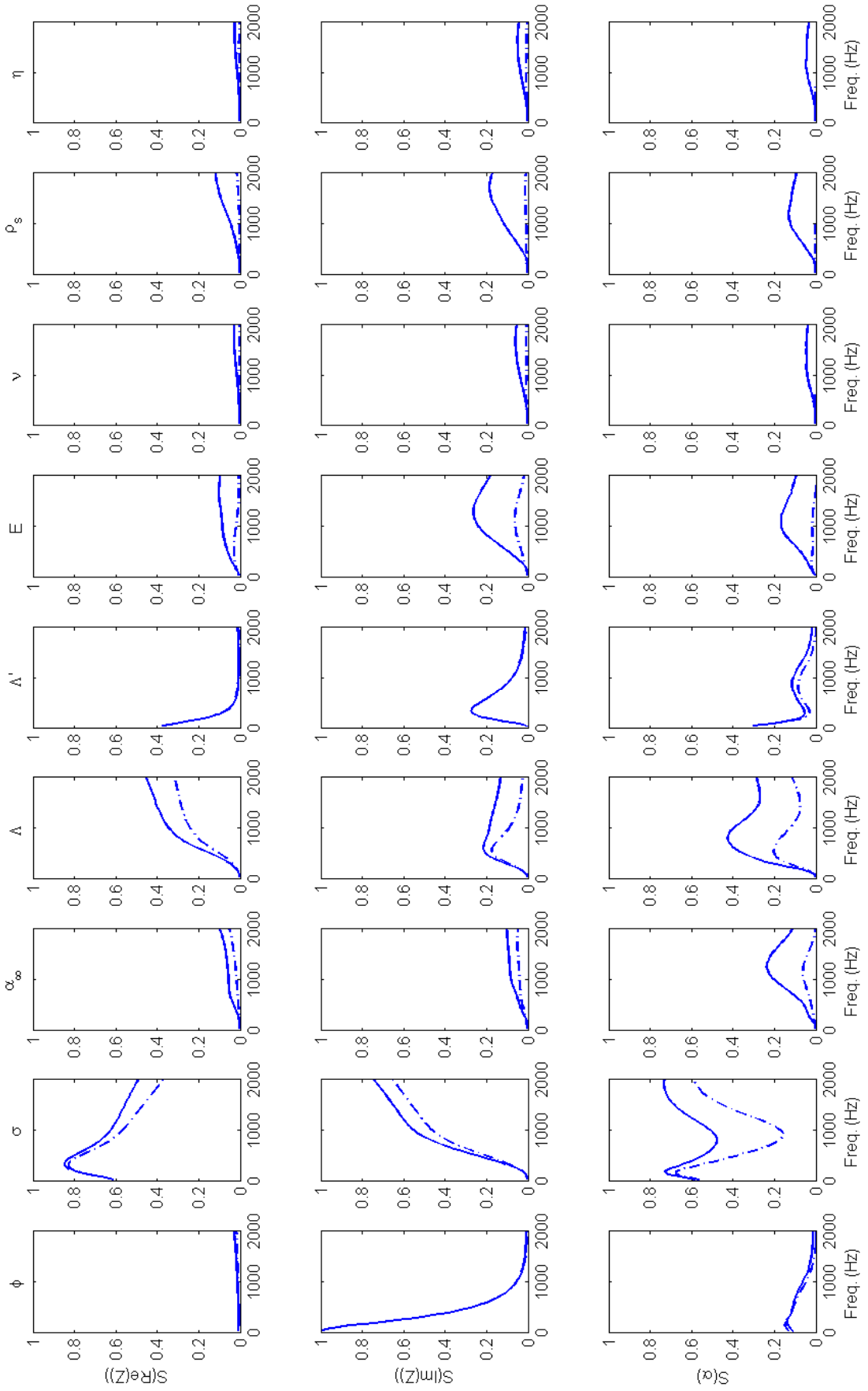


Figure 2 : Indices de sensibilité des paramètres de couplage sur le modèle de Biot généralisé – indices de sensibilité du 1er ordre (trait continu) et indices totaux (traits discontinus)