

DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DU MODULE DE RIGIDITÉ EN FLEXION D'UNE PLAQUE DE POREUX AUX BASSES FRÉQUENCES

B. Brouard, M. Etchessahar, S. Sahraoui

Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine - UMR CNRS 6613, Av O. Messiaen - 72085 Le Mans Cedex 9 - France

1. INTRODUCTION

La connaissance des constantes viscoélastiques des matériaux poreux sont indispensables pour analyser les vibrations du squelette aux basses fréquences et décrire le comportement vibroacoustique des structures comportant des couches poreuses telles que les mousses polymères. Cette étude présente une méthode expérimentale de détermination du module de rigidité en flexion des plaques de ces matériaux qui sont souvent utilisés dans cette configuration. On montre que pour les faibles résistivités au passage de l'air la prise en compte de la nature diphasique de ces matériaux n'est pas nécessaire aux fréquences de résonances obtenues (10-100 Hz).

La propagation des ondes acoustiques dans un matériau poreux saturé d'air tel que les mousses ou les laines de verres est décrite par la théorie du fluide équivalent où le squelette est supposé immobile (en hautes fréquences) et par le modèle de Biot-Johnson-Allard [1] quand la phase solide se déforme (en basses fréquences). L'étude des propriétés mécaniques de ces matériaux sur le plan expérimental pose de nombreuses difficultés liées à leur nature diphasique et à leur morphologie fibreuse ou cellulaire.

Un banc de mesure des constantes viscoélastiques a été mis en place au laboratoire pour analyser la dépendance fréquentielle [4] des mousses sur des échantillon cubiques. Ces travaux ont mis en évidence leur anisotropie transverse et ont pu dégager les possibilités d'atteindre les constantes élastiques [5].

Dans les applications industrielles (bâtiment et transports en particulier), les matériaux poreux utilisés se présentent sous forme de plaques plus ou moins épaisses travaillant en flexion. Notons que les travaux de Dauchez [2] ont montré le rôle important joué par ces matériaux dans l'amortissement des structures plaque-poreux. Pour ces raisons, la méthode de mesure proposée ici vise à atteindre directement le module de rigidité en flexion. Dans un premier temps on s'intéressera à des plaques suffisamment peu résistives au passage de l'air pour négliger les effets de couplages entre les 2 phases. Cette hypothèse est vérifiée numériquement par éléments finis. Dans une deuxième étape, non présentée dans ce papier, nous aborderons le problème plus général incluant ces effets.

2. LES MATÉRIAUX ÉTUDIÉS

L'étude menée ici est concentrée sur les mousses polymères, matériaux souvent utilisés en acoustique. Les matériaux constituant leur structure présentent un comportement viscoélastique. Cela implique que les caractéristiques mécaniques de ces mousses sont complexes et dépendent de la fréquence d'excitation et de la température ambiante. Ainsi le module d'Young d'un matériau poro-viscoélastique s'écrit :

$$E^*(\omega) = E'(\omega) + jE''(\omega) = E'(\omega)[1 + j\eta(\omega)]$$

le coefficient de Poisson reste quant à lui réel et indépendant de la fréquence [6] [4]. Le module de rigidité en flexion dépend du module d'Young et du coefficient de Poisson, il s'écrit :

$$D^*(\omega) = D'(\omega)[1 + j\eta(\omega)]$$

3. PROCÉDÉ EXPÉRIMENTAL

La procédure utilisée pour déterminer le module de rigidité en flexion est basée sur la méthode classique des résonances. Les expériences sont faites à température ambiante, celle-ci étant constante au cours d'une expérience. Le dispositif expérimental est représenté par la figure de la page suivante

- L'échantillon :

L'échantillon est une plaque de poreux (mousse ou fibreuse). Le système de fixation est simple et modulaire, de sorte que des plaques

de différentes dimensions peuvent être testées, la taille maximum étant 50x50x6 cm³.

- les conditions aux limites :

L'une des conditions aux limites la plus simple à mettre en oeuvre avec un poreux est l'encastrement, elle peut être réalisée par simple collage avec une colle spéciale pour matériaux polymères. La configuration retenue est encastree-libre-encastree-libre.

- l'excitation :

Elle est de type mécanique, elle se fait via un pot vibrant B&K 4810. L'interface pot-échantillon est réalisée par une pastille plastique montée sur une rotule, ceci en gage d'adaptation d'impédance.

- le signal d'excitation :

Le signal envoyé est une séquence MLS de degré 14, échantillonnée à 3000 Hz et composée de 10 périodes ce qui assure un signal d'une durée de 54,61s. Cela permet donc de travailler sur une bande de fréquence 1Hz-1500Hz avec une résolution de 0.18Hz. La génération du signal MLS et son traitement sont contrôlés par un PC. Les séquences MLS ont été choisies pour leurs propriétés remarquables : elles peuvent être facilement traitées par la méthode des corrélations et permettent des mesures très rapides (environ 1 minute par point), répétables avec un excellent rapport Signal sur Bruit.

- les mesures :

Les vitesses sont mesurées à l'aide d'un vibromètre laser en différents points de la plaque, le déplacement bidimensionnel de l'appareil étant assuré par un robot. La force est mesurée par une tête d'impédance B&K 8001. Ces deux signaux sont collectés par le PC, celui-ci nous restituant les signaux temporels de force et de vitesse à chaque point de mesure.

Les vitesses sont mesurées suivant 15 points. Les modes de résonance sont mis en évidence par le calcul, en chaque point, de la Fonction de Réponse en Fréquence $V(f)/F(f)$ où $V(f)$ et $F(f)$ sont les transformées de Fourier des signaux temporels $v(t)$ et $f(t)$.

4. L'INVERSION

L'inversion utilisée pour calculer le module de rigidité en flexion $D^*(\omega)$ est basée sur la théorie des plaques minces monophasiques. Dans un premier temps, les effets inertiels et dissipatifs engendrés par la présence de l'air dans le matériau sont supposés négligeables. La plaque poreuse est alors assimilée à une plaque monophasique de masse volumique équivalente ρ_{equiv} définie par la relation : où ϕ est la porosité et ρ_0 et ρ_1 sont les masses volumiques de l'air et de la matrice constituant le squelette.

$$\rho_{equiv} = (1 - \phi)\rho_1 + \phi\rho_0,$$

Dans le cas d'une plaque mince, homogène et isotrope, d'épaisseur h , de module d'Young E et de coefficient de Poisson ν , l'équation du mouvement pour le déplacement transverse $w(x,y,t)$ s'écrit :

$$D^* \nabla^4 w + \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = F \delta(x-a) \delta(y-b) e^{j\omega t},$$

où a et b sont les coordonnées du point d'application de l'excitation et où

$$D^* = \frac{E^* h^3}{12(1 - \nu^2)}$$

représente le module de rigidité en flexion de la plaque et ρ est sa densité surfacique. On montre que les fréquences propres sont données par [7]:

$$f_{mn} = \frac{\pi \lambda_{mn}}{2a^2} \sqrt{\frac{D'(\omega_{mn})}{\rho}}$$

où D' est la partie réelle de $D^*(\omega)$ et où λ_{mn} dépend des conditions aux limites.

Le coefficient d'amortissement structural $\eta(\omega_{mn})$ est calculé à partir de la méthode à -3db.

5. RÉSULTATS-COMMENTAIRES

La plaque de poreux étudiée ici a une épaisseur de 3 cm et des dimensions extérieures de 25 cm suivant l'encastrement et 23 cm suivant le bord libre.

Après inversion les résultats obtenus sont consignés dans le tableau suivant :

Mode	m	n	f _{mn}	D'	η	E'
1	2	0	19.6	0.1106	0.05	44.73
2	2	1	25.2	0.1229	0.04	49.70
3	2	2	36.4	0.0825	0.06	33.36
4	3	0	53.4	0.1081	0.02	43.72
5	3	1	59.0	0.1064	0.04	43.30

Tableau : Résultats obtenus par l'inversion monophasique. f_{mn} est la fréquence modale exprimée en Hz, D' est le module de rigidité en flexion exprimé en N.m, η est le coefficient d'amortissement structural, E' est le module d'Young équivalent calculé à partir de D' exprimé en kPa.

Malgré les hypothèses faites (plaque équivalente monophasique sans cisaillement) les résultats obtenus montrent une bonne tendance. Les modules d'Young équivalents sont groupés, le matériau présente donc une isotropie transverse dans le plan de la plaque. L'erreur commise sur la mesure est encore mal maîtrisée, cela empêche d'observer la croissance d'environ 5% prédite par Mariez [4] sur le module d'Young. L'ordre de grandeur du coefficient d'amortissement est bon mais ce résultat est à prendre avec précautions car les dissipations par effets visqueux et l'action de l'air environnant sur la plaque ne sont pas pris en compte. La résistivité au passage de l'air est un paramètre prépondérant aux basses fréquences. Ainsi, pour les matériaux à plus forte résistivité, l'air peut avoir une influence sur les vibrations de la plaque. A titre d'exemple, une simulation par éléments finis d'une plaque de poreux Encastree-Libre-Encastree-Libre a été réalisée.

La variation de la résistivité au passage de l'air a pour conséquence de décaler en fréquence les modes de résonance de la plaque de poreux. Ce décalage reste faible pour les deux premiers modes, mais croîtra avec la fréquence. La dissipation par effets visqueux (voir graphique) prend une part importante de la dissipation totale dès que la résistivité au passage de l'air est supérieure à 10000 Nm⁴.s. Elle est maximum à proximité des modes, là où la différence de vitesse entre la phase solide et la phase fluide est maximum.

Cette simulation montre que les résultats obtenus à partir de l'inversion monophasique sont justifiés pour les matériaux testés. Cependant, elle montre aussi la nécessité de créer une inversion tenant compte de la nature diphasique de la plaque pour des matériaux ayant une résistivité au passage de l'air supérieure à 10000 Nm⁴.s.

6. CONCLUSION.

Un processus de mesure des modules de rigidité en flexion $D^*(\omega)$ d'une plaque de poreux a été développé. Dans un premier temps les résultats obtenus par l'inversion monophasique sont cohérents et

donnent une bonne information sur le module d'Young global de la plaque et sur l'isotropie du matériau. Ces résultats ne sont pour le moment exploitables que pour les matériaux peu résistifs. Une inversion plus générale dans laquelle la nature diphasique de la plaque est prise en compte ainsi que l'effet du milieu environnant est en cours de développement.

Références.

- [1] ALLARD, J.F. *Propagation of sound in porous media : modeling sound absorbing materials*. Chapman et Hall, Londres, 1993
- [2] DAUCHEZ, N. *Etude vibroacoustique des matériaux poreux par éléments finis*, PhD Thesis Université du Maine, Le Mans, 1999.
- [3] FERRY, J.D. *Viscoelastic properties of polymers*. John Wiley, N.Y. 1961.
- [4] MARIEZ, M. AND SAHRAOUI, S. *Elastic constants of polyurethane foam's skeleton for Biot model*. Internoise 96 Liverpool, Royaume Uni 1996
- [5] MARIEZ, M. AND SAHRAOUI, S. *Mesurement of mechanical anisotropic properties of acoustic foams* Internoise 96 Liverpool, Royaume Uni 1996
- [6] SAHRAOUI, S. AND MARIEZ, M. *Anisotropic elasticity model for acoustic foams* Internoise 97 Budapest, Hongrie 1997
- [7] WARBURTON, G.B. *The vibration of rectangular plates* Proc. Inst. Mech. Eng., ser. A, 168(12).371-384, 1954.

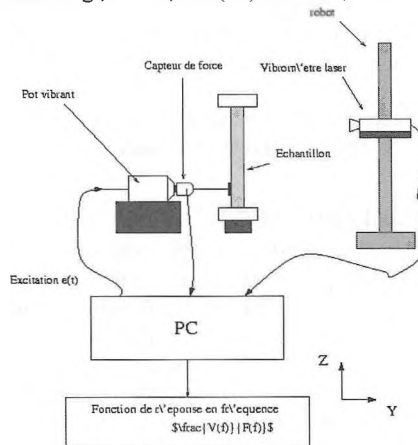
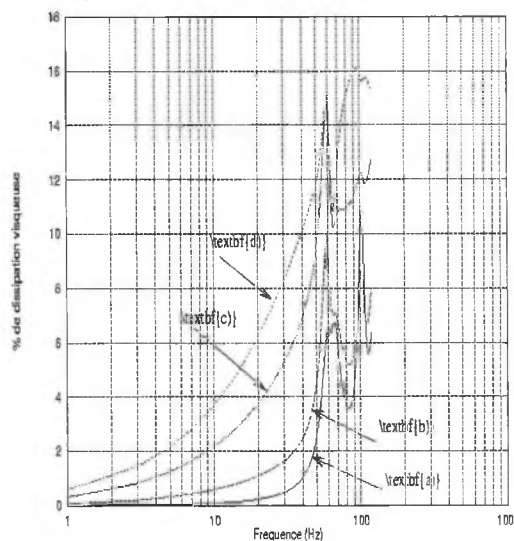


Figure : Vue d'ensemble du banc de mesure



Graphique : Etude numérique du pourcentage de dissipation visqueuse dans une plaque de poreux en fonction de la fréquence pour différentes résistivité au passage de l'air (a) : 1000, (b) : 10000 (c) : 50000 et (d) : 100000 Nm⁴.s