

CFA/VISHNO 2016

Propriétés mécaniques des mousses acoustiquesS. Sahraoui^a et E. Mariez^b^aLaboratoire d'acoustique, Université du Maine Avenue O. Messiaen, 72085 Le Mans,
France^bIUT d'Egletons Université de Limoges, 17 boulevard Jacques Derche, 19300 Egletons,
France

sohbi.sahraoui@univ-lemans.fr



LE MANS

La plupart des matériaux poreux sont anisotropes en particulier en raison des méthodes de fabrication. Cette anisotropie est très souvent négligée dans les modèles à des fins de simplification ce qui a pour conséquence directe que le recalage de modèles isotropes aboutit souvent à des valeurs de paramètres non physiques ou aberrants. Pour ce qui est des paramètres mécaniques, les premières expériences montrent clairement que même pour des matériaux isotropes transverses, la caractérisation des rigidités dans les différentes directions n'est pas triviale. Des travaux ont déjà été menés au Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine sur ce sujet il y a plusieurs années et d'autres sont actuellement en cours. Cette présentation a pour objectif de rappeler les principaux travaux réalisés et l'évolution de ces derniers pendant ces deux dernières décennies.

1 Introduction

Historiquement, les poreux naturels tels que les lièges ou les éponges ont suscité très tôt la curiosité des scientifiques : donnons l'exemple des observations microscopiques de R. Hooke réunies dans sa monographie de 1664 (voir Gibson [1]). D'autres disciplines comme la mécanique des sols sont également concernées par les divers comportements mécaniques des matériaux poreux. La caractérisation des sous-sols et notamment les prospections d'hydrocarbures ont motivé des recherches en mécanique et acoustique sur les propagations dans les milieux poreux [2]. Dans ce domaine les contributions de Biot [3] ont permis le développement rapide de la mécanique des matériaux poreux [4]. Enfin, l'avènement récent des matériaux plastiques ont permis la production de matériaux poreux artificiels tels que les mousses plastiques (ou les fibreux) qui sont couramment utilisées dans les applications industrielles comme absorbants acoustiques [5]. Dans les années 90, le LAUM a initié des travaux sur la caractérisation mécanique des mousses acoustiques [6-13] qui ont mis en évidence l'anisotropie des mousses et proposé une méthode de mesures pour les matériaux isotropes [6,7].

En ce qui concerne les mousses flexibles à porosité ouverte, nous sommes confrontés à des problèmes qui se résument comme suit :

- l'échantillon ne peut avoir que des formes géométriques simples (parallélépipède, cylindre), ce qui limite les configurations de chargement.
- sa nature diphase nécessite la prise en compte du fluide saturant dont les effets de couplage peuvent être prépondérants.
- le mode de fabrication de ces mousses introduit souvent, comme nous le verrons plus loin, une anisotropie.

2 Essais quasi-statiques de compression

Dans un essai de compression, on distingue trois zones : la zone élastique linéaire, un plateau qui correspond au flambement des cellules suivi d'un régime de densification comme le montre la figure 1. En acoustique, c'est la première zone qui nous préoccupe pour comprendre les mécanismes de propagations dans la phase solide.

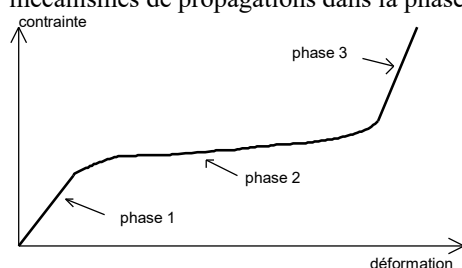


Fig. 1: Courbe contrainte - déformation en compression

2-1 Essais quasi-statiques (méthode 1)[7]

Nous allons nous intéresser dans un premier temps aux propriétés des mousses à porosité ouverte sans tenir compte du fluide saturant (l'air dans le cas présent).

Les figures 2 présentent le banc expérimental de compression axiale d'échantillons cubiques de mousses flexibles. Les éléments sont repérés sur les figures et dans le texte.

L'échantillon est placé au milieu du dispositif, légèrement précontraint entre deux plaques horizontales revêtues d'un papier de verre très fin ; l'une des plaques est fixée au bâti, l'autre est fixée sur la table d'un pot vibrant dont la base est elle-même fixée au bâti. Ainsi, l'échantillon forme une chaîne cinématique dans laquelle il reçoit l'intégralité des vibrations axiales du pot vibrant.

La fonction du papier verre est d'éviter tout glissement dans le plan horizontal des faces inférieures et supérieures de l'échantillon. Ainsi, lorsque le cube de mousse est légèrement précontraint, on obtient un encastrement efficace sans avoir recours à un adhésif. L'échantillon se démonte facilement sans être endommagé ; il peut être utilisé pour une mesure suivant une autre direction.

Pendant l'excitation en sinus glissant on mesure :

- la force f appliquée grâce à un capteur d'effort piézoélectrique.
- le déplacement vertical d_1 de la face inférieure de l'échantillon à l'aide d'un capteur inductif
- les déplacements horizontaux d_2 des milieux des faces latérales à l'aide d'un vibromètre laser.

Cette méthode présente l'avantage d'obtenir E^* et ν^* simultanément lorsque l'isotropie est vérifiée après une mesure dans les trois directions.

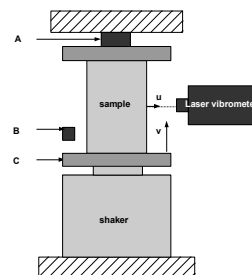


Fig. 2 : Banc d'essai

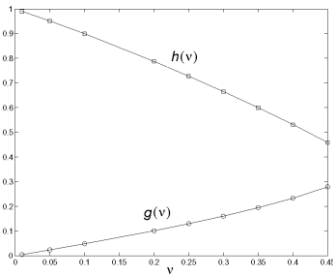


Fig. 3 : Fonctions de transfert

L'extraction des paramètres E^* et ν^* est obtenue par simulation numérique (éléments finis) en nous limitant à une description quasi statique qui est vérifiée dans la bande de fréquences 1Hz -100Hz pour les mousses étudiées. Cette simulation montre que, pour un cube de côté L, la rigidité est de la forme :

$$K = \frac{EL(1-\nu)}{h(\nu)} \quad (1)$$

où la fonction h est représentée par la figure (3). Par ailleurs, la fonction de transfert T ne dépend que de ν :

$$T = g(\nu) \quad (2)$$

où la fonction g est représentée sur la figure (3).

2-2 Essais quasi-statiques (méthode 2)[12]

On teste un échantillon puis 2 échantillons superposés. Les deux raideurs mesurées permettent d'accéder à ν et à E en utilisant les relations ci-dessous schématisées par la figure 4. Pour un parallélépipède de hauteur h et un demi parallélépipède de hauteur h/2, les rigidités sont de la forme :

$$K_s = \frac{EA}{h} k_s(\nu) = \frac{EA}{L/s} k_s(\nu), \quad (3)$$

$$K_{2s} = \frac{EA}{L/2s} k_{2s}(\nu), \quad (4)$$

qui montrent que le rapport normalise des raideurs:

$$\alpha_s(\nu) = \frac{k_s}{k_{2s}} = \frac{2K_s}{K_{2s}}, \quad (5)$$

ne dépend que de ν .

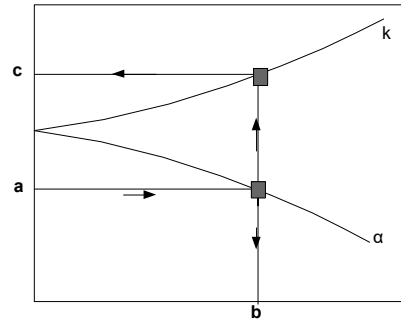


Fig.4 Représentation graphique pour obtenir ν et E (a → b → c)

Comme il a été indiqué précédemment, la méthode utilisée est limitée en fréquence et concerne uniquement les matériaux peu résistifs [21]. Ces limites ont été évaluées à l'aide d'une simulation par éléments finis comme le montre la figure (4).

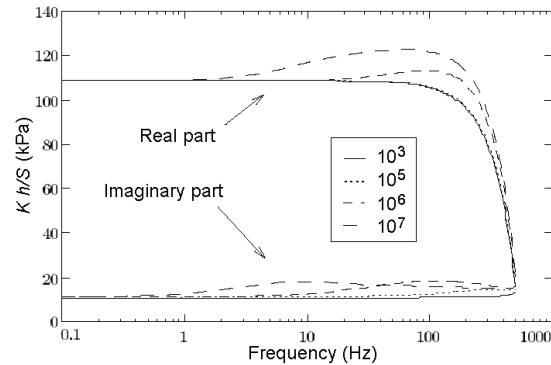


Fig. 4 : Rigidité en fonction de la fréquence pour différentes résistivités au passage de l'air
a) Partie réelle b) Partie imaginaire

3- Mesure de rigidités de plaques poreuses [10]

Les matériaux poreux utilisés comme matériaux absorbants se présentent généralement sous forme de plaques plus ou moins épaisses dans lesquelles il n'est pas toujours possible de découper un échantillon cubique de dimensions raisonnables pour utiliser le banc d'essai décrit plus haut. Nous avons mis au point une méthode de mesure des rigidités de flexion d'une plaque en déterminant ses pulsations propres et ses modes de vibrations.

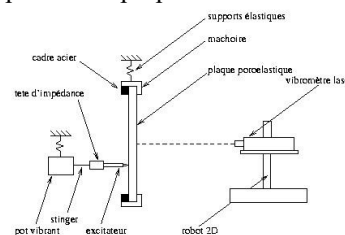


Fig. 5: Dispositif de mesure des rigidités de flexion d'une plaque poreuse

Le dispositif est représenté par la figure (5). L'échantillon est une plaque de poreux (mousse ou fibreux) dans la configuration encastrée - libre - encastrée - libre. Le système de fixation est simple et modulaire, de sorte que les plaques de différentes dimensions peuvent être testées. L'excitation est de type mécanique et se fait via un pot vibrant. Le signal d'excitation est une séquence MLS de degré 14, échantillonnée à 3000 Hz et composée de 10 périodes. La génération du signal et son traitement sont contrôlés par un PC. Les vitesses sont mesurées à l'aide d'un vibromètre laser en différents points de la plaque par le balayage d'un robot.

Les résultats obtenus par inversion monophasique sont cohérents et donnent une bonne information de la rigidité de la plaque et sur l'isotropie du matériau.

4- Problèmes relatifs à l'anisotropie

Les mousses de polymères présentent souvent une anisotropie transverse qui s'explique par leur mode de fabrication. La direction longitudinale correspond à la direction (verticale) de gonflement pendant le moussage qui a lieu après l'extrusion du polymère. C'est ainsi que les cellules présentent une forme allongée dans cette direction qui accroît la rigidité par rapport aux deux autres directions [9]. Il est bien évident que d'autres phénomènes interviennent pendant ce processus (effets thermiques, effets de bord, pesanteur,..) et sont à l'origine des écarts observés par rapport à l'isotropie transverse : hétérogénéité et gradient de propriétés géométrique (porosité), mécanique ou acoustique, orthotropie voire absence de correspondance entre les axes principaux et les axes supposés de symétrie du pain de mousses.

Généralement, les mousses que nous avons étudiées, possèdent une isotropie transverse dans le plan horizontal. On notera L , T et T' les directions longitudinale et transverses. Dans ce cas on doit déterminer les 5 constantes élastiques E_L , E_T , G_{TT} , G_{LT} et ν_{LT} .

Avec le banc d'essai décrit plus haut (Fig. 2) on procède à des mesures de rigidités F/u en compression et en cisaillement sur des échantillons suffisamment longs ou minces (Fig. 7) pour obtenir les 2 modules d'Young ($E=FL/ua^2$) et les 2 modules de rigidité ($G=Fh/ub^2$). Enfin, un 5eme test de compression sur un échantillon cubique permet d'extraire ν_{LT} à partir de la courbe $K(\nu_{LT})$ obtenue par éléments finis et de la raideur mesurée sur le cube. Cette méthode de calcul a été récemment améliorée en optimisant le processus de calcul [23,24].

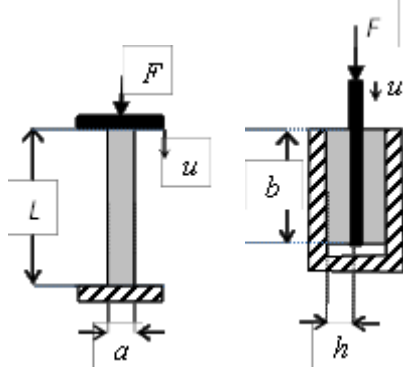


Fig. 6 : Essais de compression et cisaillement

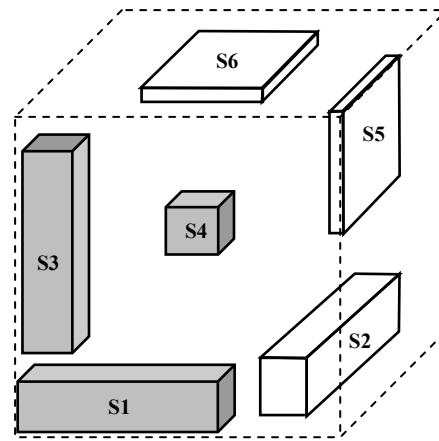


Fig. 7 : Echantillons dans un bloc de mousse

Pour les mousses iso-transverses, les directions T et T' sont équivalentes ; les neuf mesures se réduisent à cinq paramètres indépendants qui sont utilisés dans l'inversion numérique pour déterminer les modules d'Young E_L et E_T , le module de cisaillement G_{LT} et les coefficients de Poisson ν_{TT} et ν_{LT} .

5- Dépendance fréquentielle des constantes élastiques

Le dispositif quasi-statique (Fig. 2) étant limité à 100 Hz, l'évolution fréquentielle a été étudiée grâce au principe d'équivalence fréquence-température [11]. Plus récemment, l'introduction du modèle fractionnaire de Zener nous a permis de proposer une méthode originale pour obtenir la dépendance fréquentielle (Fig. 9) à partir d'une courbe de relaxation (Fig. 8) [22,25].

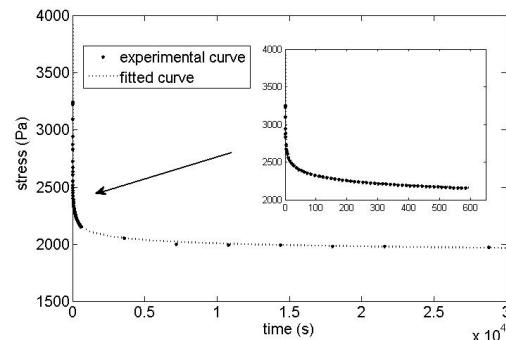


Fig. 8: Relaxation (courbes expérimentales et lissées)

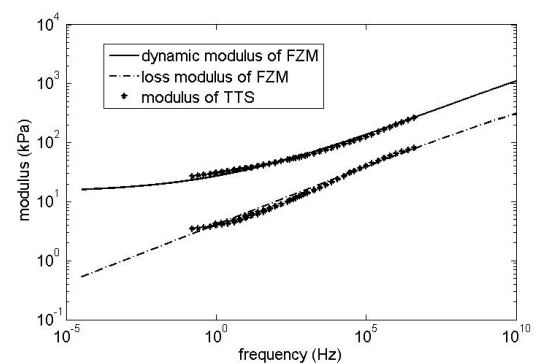


Fig. 9: Comparaison des modules réel et imaginaire

6 – Conclusion

La méthode quasi statique initialement utilisée (méthode 1) pour les mousses isotropes et nécessitant un vibromètre Laser a été adaptée (méthode 2) et transférée au CTTM pour répondre à la demande industrielle pour déterminer les constantes élastiques à partir de mesures de raideurs. Le caractère diphasique des mousses a limité les mesures aux basses fréquences pour éviter les couplages avec l'air ambiant ; le principe d'équivalence fréquence-température a permis de prédire le comportement aux hautes fréquences. Cette prédiction a été récemment étudiée avec succès à partir de modèles rhéologiques à dérivées fractionnaires. Enfin une méthode basée sur la mesure de raideurs a été proposée pour la caractérisation des mousses orthotropes. Il est utile de rappeler que le choix qu'un échantillon cubique utilisé initialement pour mesurer la raideur suivant les trois directions a été inspiré des travaux de Gorog [26] et de Plantier [27] qui ont obtenu un coefficient de Poisson anormalement supérieur à 0,5 pour une mousse supposée isotrope.

Références

- [1] L.J. Gibson and M.F. Ashby : *Cellular solids : structure and properties*, Pergamon Press, Oxford, (1988)
- [2] J.E. Gordon : *Structures et matériaux*, Pour la Science, Diffusion Belin, (1994)
- [3] M.A. Biot : General theory of three dimensional consolidation J. Appl. Phys., **12**, 155-64, (1941)
- [4] O. Coussy : *Mécanique des milieux poreux*, Technip, Paris, (1991)
- [5] J.F. Allard : *Propagation of sound in porous media : modeling sound absorbing materials*, Elsevier Applied Science, (1993)
- [6] E. Mariez, S. Sahraoui and J.F. Allard : Elastic constants of polyurethane foam's skeleton for Biot model, Proceed. Internoise 96, Liverpool, Vol. 96, pp. 951-954 (1996)
- [7] S. Sahraoui, E. Mariez, and M. Etchessahar, Mechanical testing of polymeric foams at low frequency. Polym. Test. **20**, 93-96, (2001).
- [8] E. Mariez and S. Sahraoui : Measurement of mechanical anisotropic properties of acoustic foams for the Biot model, Proceedings of Internoise 97, Budapest, 1683-6 (1997).
- [9] M. Melon, M. Mariez, C. Ayrault and S. Sahraoui: Anisotropic elasticity model for acoustic foams J. Acoust. Soc. Am., **104**(5), 2622-7, (1998)
- [10] M. Etchessahar, S. Sahraoui and B. Brouard: Vibrations of poroelastic plates : mixed displacement-pressure modelisation and experiments, Acta Acustica united with Acustica, **95**, 857-865, (2009)
- [11] M. Etchessahar, S. Sahraoui, L. Benyahia and J-F. Tassin: Frequency dependence of elastic properties of acoustic foams. Journal of the Acoustical Society of America, **117**, 1114-1121, (2005).
- [12] V. Gareton, D. Lafarge and S. Sahraoui: The measurement of the shear modulus of a porous polymer layer with two microphones, Polym. Test. **28**, 508-510, (2009).
- [13] S. Sahraoui, B. Brouard, L. Benyahia and A. Geslain: Normalized stiffness ratios for mechanical characterization of isotropic acoustic foams, Journal of the Acoustical Society of America, **134**, 4624-4629, (2013).
- [14] J.D. Ferry : *Viscoelastic properties of polymers*, John Wiley & Sons, (1980)
- [15] A.N. Gent and A.G. Thomas : Deformation of foamed elastic materials J. Appl. Polymer Sci., **1**, 107-13, (1959)
- [16] A.N. Gent and A.G. Thomas : Mechanics of foamed elastic materials Rubber Chem. Tech., **36**, 597-610, (1963)
- [17] A.N. Gent and K.C. Rusch : Viscoelastic behavior of open cell foams Chem. Tech., **39**, 389-96, (1966)
- [18] W.L. Ko : Deformation of foamed elastomers J. Cellular Plastics, **1**, 45-50, (1965)
- [19] W.E. Warren and A.M. Kraynick : The linear elastic behavior of low-density Kelvin foam with open-cells J. Appl. Mech., **64**, 787-94, (1997)
- [20] T. Pritz : Transfer function method for investigating the complex modulus of acoustic materials : rod-like specimen. J. Sound Vib., **81**(3), 359-76, (1982)
- [21] M. Etchessahar, N. Dauchez and S. Sahraoui : Comportement des mousses acoustiques aux basses fréquences. 14^{ème} Congrès Français de Mécanique, Toulouse, (1999)
- [22] X. Guo, G. Yan, L. Benyahia, S. Sahraoui: "Fitting stress relaxation experiments with fractional Zener model to predict high frequency moduli of polymeric acoustic foams", à paraître dans Mech. Time Dependent Material
- [23] G. Yan, X. Guo, B. Brouard, S. Sahraoui : Stiffness method for elastic constants determination of orthotropic porous materials, en cours de rédaction
- [24] G. Yan, X. Guo, B. Brouard, S. Sahraoui: « Estimation Directe et Inverse des Constantes Élastiques des Matériaux Poreux Orthotropes ». CFA 2016
- [25] X. Guo, G. Yan, L. Benyahia, S. Sahraoui: « Etude de la Relaxation des Mousses Acoustiques par un modèle à dérivées fractionnaires » CFA 2016
- [26] S. Gorog, J.C. Eytard, M.P. Luong : « Essais sur mousses acoustiques », Rapport interne du LMS, école polytechnique de Paris, LAUM Novembre 1992.
- [27] G. Plantier : « Etude et réalisation expérimentale d'un montage expérimental pour mesurer les modules de Young et de cisaillement des mousses acoustiques », Projet Young-Poisson, rapport post-doctoral, septembre 1992-Août 1993