

# Mesure directe de la porosité des matériaux insonorisants par réflexion d'ondes ultrasonores basse fréquence

Damien Parmentier<sup>1</sup>, Bernard Castagnede<sup>2</sup>, Olivier Dazel<sup>2</sup>,  
François Fohr<sup>1</sup>, Bruno Brouard<sup>2</sup>, Nicolas Poulain<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centre de transfert de technologie du Mans, 20 rue Thalès de Milet, 72000 Le Mans

<sup>2</sup>Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, UMR CNRS 6613, Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans Cedex 9

Ce travail a pour but de déterminer la porosité des matériaux poreux à partir de la mesure du coefficient de réflexion en utilisant des signaux ultrasonores basse fréquence. L'objectif est de mettre au point un banc de mesure fiable et simple d'utilisation adapté à une démarche industrielle de R&D. Le modèle théorique utilisé est celui du fluide équivalent et son approximation asymptotique haute fréquence. Une méthode d'inversion simple permet de calculer la porosité à partir du coefficient de réflexion en connaissant au préalable deux autres paramètres physiques : la tortuosité et la longueur caractéristique visqueuse. Ces deux paramètres sont déterminés sur le même banc ultrasonore grâce à la mesure de la vitesse de phase et du coefficient de transmission. Les deux montages expérimentaux, l'un en réflexion, l'autre en transmission permettent finalement de déterminer quatre paramètres du poreux. Les transducteurs ultrasonores fonctionnent dans une bande étroite centrée sur 40 kHz. La méthode d'inversion est valide pour des matériaux de différentes épaisseurs, de quelques mm à plusieurs cm. Les résultats sont présentés pour un grand nombre de matériaux poreux et fibreux. Les incertitudes de mesure ainsi que les limites du banc sont également présentés. Afin de valider les paramètres obtenus, un calcul numérique complémentaire a été implémenté en se basant sur les équations complètes du modèle sans approximation haute fréquence.

## 1 Introduction

Les techniques ultrasonores ont fait l'objet de nombreux travaux pour la détermination des paramètres des matériaux poreux. Le modèle du fluide équivalent et notamment son approximation haute fréquence, a déjà été utilisé pour déterminer la tortuosité et les longueurs caractéristiques visqueuse et thermique [1,2]. Ces derniers paramètres sont particulièrement sensibles dans le cas d'un montage en transmission lorsqu'on mesure le coefficient de transmission et la vitesse de phase dans le matériau. En revanche, la porosité a peu d'influence sur les résultats obtenus dans cette configuration [3]. Dans cette étude, on utilisera plutôt un montage en réflexion, plus sensible aux variations de porosité. Plusieurs auteurs ont proposés des méthodes d'inversion du modèle du fluide équivalent. Les travaux de Z.E.A Fellah notamment, présentent une technique de minimisation de l'erreur entre des signaux temporels expérimentaux et calculés numériquement pour extraire un ou plusieurs paramètres. Également développée au Mans, le principe de démodulation paramétrique utilisant des antennes de transducteurs piézo-électrique pour générer une onde plane basse fréquence a également été validé [4]. Bien que très précises, ces techniques de laboratoire peuvent être lourdes à mettre en place dans le cadre d'une démarche industrielle. Dans notre étude, une méthode de mesure rapide et robuste de la porosité a été mise en place. Le niveau de précision souhaité est de l'ordre de 5 à 10 % souvent suffisant pour les applications industrielles. Le banc de mesure de la porosité vient compléter une gamme de bancs développés et distribués par le CTTM dont le tortuosimètre qui permettent de mesurer les cinq paramètres de couplage entre la structure d'un poreux et le fluide saturant.

Le banc de mesure de la porosité reprend le même dispositif expérimental que le tortuosimètre (transducteurs, module d'acquisition, logiciel). Seul le traitement du signal

et le montage de l'échantillon en réflexion diffèrent par rapport au banc précédemment développé [5].

## 2 Modèle théorique

On considère le modèle du fluide équivalent standard à cinq paramètres dans le cas où le squelette du matériau est immobile. En hautes fréquences, lorsque la pulsation  $\omega$  tend vers l'infini, la densité effective  $\rho(\omega)$  et l'incompressibilité effective  $K(\omega)$  s'écrivent sous la forme suivante :

$$\rho(\omega) = \alpha_\infty \rho_0 \left[ 1 + \sqrt{\frac{2\eta}{\rho_0 \omega}} (1-j) \frac{1}{\Lambda} \right] \quad (1)$$

$$K(\omega) = \gamma P \left[ \gamma - \frac{\gamma - 1}{1 + \sqrt{\frac{2\eta}{\rho_0 \omega}} (1-j) \frac{1}{\sqrt{P_r \Lambda'}}}} \right]^{-1} \quad (2)$$

Avec  $\gamma$  rapport des chaleurs massiques de l'air,  $P$  la pression statique,  $\rho$  la masse volumique,  $\eta$  la viscosité dynamique et  $P_r$  le nombre de Prandtl.

Pour la plupart des matériaux poreux usuels, la longueur caractéristique thermique  $\Lambda'$  est égale à la longueur visqueuse  $\Lambda$  multipliée par un facteur compris entre deux et trois. Ce facteur est estimé empiriquement.

Ainsi en hautes fréquences, les paramètres du fluide équivalent dépendent uniquement de la tortuosité et de la longueur caractéristique visqueuse. Les relations usuelles permettent de relier la vitesse de phase et l'impédance à  $\rho(\omega)$  et  $K(\omega)$  :

$$c(\omega) = \sqrt{\frac{K(\omega)}{\rho(\omega)}} \quad (3)$$

$$z_m(\omega) = \frac{1}{\rho_0 c_0} \sqrt{\rho(\omega) K(\omega)} \quad (4)$$

On utilise couramment les développements limités à l'ordre un de ces expressions en considérant qu'en hautes fréquences, la taille des pores (de même dimension que  $\Lambda$  et  $\Lambda'$ ) est très grande devant l'épaisseur de couche limite visqueuse  $\delta$  dans laquelle ont lieu les pertes par frottements à proximité des parois du squelette, soit :

$$\Lambda, \Lambda' \gg \delta = \sqrt{\frac{2\eta}{\rho_0 \omega}} \quad (5)$$

La vitesse de phase et l'impédance s'écrivent alors :

$$c(\omega) = \left[ \frac{c_0}{\sqrt{\alpha_\infty}} \left[ 1 - \frac{\delta}{2} (1-j) \left[ \frac{1}{\Lambda} + \frac{\gamma-1}{\sqrt{P_r \Lambda'}} \right] \right] \right] \quad (6)$$

$$z_m(\omega) = \sqrt{\alpha_\infty} \left[ 1 + \frac{\delta}{2} (1-j) \left[ \frac{1}{\Lambda} - \frac{\gamma-1}{\sqrt{P_r \Lambda'}} \right] \right] \quad (7)$$

Pour écrire ces relations, il convient de s'assurer que l'hypothèse (5) est respectée, c'est-à-dire que l'épaisseur de couche limite est suffisamment faible par rapport à la taille des pores. A 40 kHz, fréquence à laquelle nos mesures sont réalisées,  $\delta$  vaut environ 10 $\mu$ m. Ainsi le modèle asymptotique HF est inadapté pour les matériaux ayant des petites longueurs caractéristiques, inférieures à quelques dizaines de  $\mu$ m.

Le dispositif de mesure consiste à émettre une onde harmonique plane sous incidence normale ou oblique (angle  $\theta$ ) vers une plaque de matériau poreux d'épaisseur L. Dans ces conditions, les coefficients de réflexion et de transmission s'écrivent :

$$R(\omega) = \frac{(\Phi^2 - z_{m\theta}^2) (e^{-jk_{m\theta}L} - e^{+jk_{m\theta}L})}{(\Phi + z_{m\theta})^2 e^{+jk_{m\theta}L} - (\Phi - z_{m\theta})^2 e^{-jk_{m\theta}L}} \quad (8)$$

$$T(\omega) = \frac{4\Phi z_{m\theta}}{(\Phi + z_{m\theta})^2 e^{+jk_{m\theta}L} - (\Phi - z_{m\theta})^2 e^{-jk_{m\theta}L}} \quad (9)$$

Avec  $z_{m\theta} = z_m(\omega) f(\theta)$ ,  $k_{m\theta} = \frac{\omega}{c(\omega)} \frac{\cos \theta}{f(\theta)}$

$$f(\theta) = \cos \theta \left( 1 - \left( \frac{c(\omega)}{c_0} \sin \theta \right)^2 \right)^{-2}$$

La fonction  $f(\theta)$  traduit l'influence de l'angle d'incidence. Sous incidence normale,  $f(\theta) = 1$ ,  $z_{m\theta} = z_m(\omega)$

et  $k_{m\theta} = \frac{\omega}{c(\omega)}$ .

On mesure également le retard de phase des signaux à la traversée de la plaque qui est lié à la vitesse de phase comme suit :

$$\tau(\omega) = L \left( \frac{1}{\text{Re}(c(\omega))} - \frac{1}{c_0} \right) \quad (10)$$

En substituant la vitesse et l'impédance (équations (6) et (7)), dans les expressions précédentes, celles-ci s'écrivent comme des fonctions de la tortuosité, de la longueur caractéristique visqueuse et de la porosité :

$$R(\omega) = F(z_{m\theta}, c(\omega), \Phi) = f(\alpha_\infty, \Lambda, \Phi) \quad (11)$$

$$T(\omega) = G(z_{m\theta}, c(\omega), \Phi) = g(\alpha_\infty, \Lambda, \Phi) \quad (12)$$

$$\tau(\omega) = H(c(\omega)) = h(\alpha_\infty, \Lambda) \quad (13)$$

A ce stade, les fonctions f, g, h sont trop complexes pour qu'on puisse les inverser à la main. Un certain nombre de simplifications sont nécessaires pour pouvoir calculer les paramètres du poreux directement à partir des mesures de  $R(\omega)$ ,  $T(\omega)$  et  $\tau(\omega)$ .

### 3 Méthode d'inversion

#### 3.1 Réflexions multiples dans la plaque poreuse

Les expressions (8) et (9) des coefficients de transmission et de réflexion s'appliquent dans le cas le plus général. Dans la pratique, on peut négliger la contribution des réflexions multiples à l'intérieur du matériau. En effet, les ondes sonores qui traversent deux fois la plaque sont fortement atténuées. De plus, si les signaux ultrasonores ont un support temporel suffisamment court, il n'y a pas d'interférence entre les ondes se propageant en sens opposé à l'intérieur du matériau et l'acquisition ne prend en compte que l'onde directe. Négliger les réflexions multiples revient à considérer que la longueur d'onde est très petite devant l'épaisseur L ou encore que le temps de parcours dans plaque est grand par rapport à la période des signaux. En appliquant la limite  $k_{m\theta}L \rightarrow \infty$ , les expressions (8) et (9) se simplifient :

$$R(\omega) = \frac{z_{m\theta} - \Phi}{z_{m\theta} + \Phi} \quad (14)$$

$$T(\omega) = \frac{4\Phi z_{m\theta}}{(\Phi + z_{m\theta})^2} e^{-jk_{m\theta}L} \quad (15)$$

Il est donc intéressant de comparer les résultats obtenus avant et après le passage à la limite pour un matériau de faible épaisseur comme le feutre de 5mm du Tableau 1.

Épaisseur	$\alpha_\infty$	$\Lambda$ ( $\mu$ m)	$\Lambda'$ ( $\mu$ m)	$\sigma$ (SI)	$\Phi$
5 mm	1.3	14	42	320000	0.77
20 mm	1.04	52	156	29000	0.92

Tableau 1 : Paramètres de feutres utilisés dans l'automobile

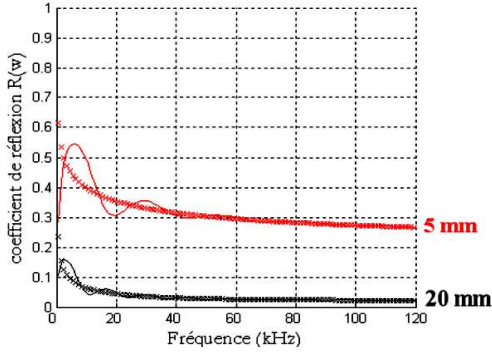


Figure 1 : Coefficients de réflexion des feutres de 5mm et 20 mm: prise en compte des réflexions multiples (**trait plein**), expressions simplifiées (14) et (15) (symbole x).

Le coefficient de réflexion calculé en prenant en compte les réflexions dans la plaque (en trait plein -) présente de légères oscillations autour du coefficient calculé avec l'expression (14) (symbole x).

Par contre, le calcul du coefficient de transmission du feutre de 5 mm n'est pas affecté par la prise en compte des réflexions multiples (cf. Figure 2). On pourra donc utiliser l'expression simplifiée (15).

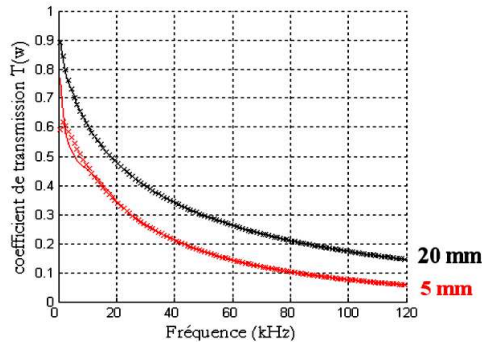


Figure 2 : Coefficients de transmission des feutres de 5mm et 20 mm: prise en compte des réflexions multiples (**trait plein**), expressions simplifiées (14) et (15) (symbole x).

### 3.2 Inversion du modèle asymptotique HF

Pour la majorité des matériaux poreux usuels,  $\Phi \approx 1$  et  $z_{m\theta} \approx 1$ , on peut donc faire la simplification suivante :

$$\frac{4\Phi z_{m\theta}}{(\Phi + z_{m\theta})^2} \approx 1 \quad (16)$$

D'après (15), l'atténuation devient :

$$a = \frac{|\ln|T(\omega)||}{L} = \frac{\omega\delta\sqrt{\alpha_\infty}}{2c_0l} \quad (17)$$

$$\text{Avec : } l = \left[ \frac{1}{\Lambda} + \frac{\gamma-1}{\sqrt{P_r}\Lambda'} \right]^{-1} \quad (18)$$

Grâce à cette simplification, la porosité a été éliminée des inconnus du problème. En effet, La dernière expression (17) permet de relier le coefficient de transmission à la

tortuosité et à la longueur caractéristique visqueuse, soit deux inconnues. Il manque encore une équation pour résoudre. Elle est fournie par la mesure du retard. L'indice de réfraction du milieu poreux vaut :

$$n^2 = \left( \frac{c_0}{\text{Re}(c(\omega))} \right)^2 = \left( 1 + \frac{c_0\tau(\omega)}{L} \right)^2 = \alpha_\infty \left[ 1 + \frac{\delta}{l} \right] \quad (19)$$

Et combinant les relations (17) et (19), il est possible d'écrire une équation du second degré en l :

$$l^2 + \delta l - n^2 \left( \frac{\omega\delta}{2ac_0} \right)^2 = 0 \quad (20)$$

La résolution conduit à l'expression de la tortuosité et de la longueur caractéristique visqueuse en fonction des mesures de  $T(\omega)$  et  $\tau(\omega)$  :

$$\Lambda = -\frac{\delta}{2} \left[ \frac{N\sqrt{P_r} + \gamma - 1}{N\sqrt{P_r}} \right] \left[ 1 - \sqrt{1 + \left( 1 + \frac{c_0\tau}{L} \right)^2 \left( \frac{\omega L}{c_0|\ln(T)|} \right)^2} \right] \quad (21)$$

$$\alpha_\infty = \left[ \left( \frac{|\ln(T)|c_0}{L\omega} \right) - \sqrt{\left( \frac{|\ln(T)|c_0}{L\omega} \right)^2 + \left( 1 + \frac{c_0\tau}{L} \right)^2} \right]^2 \quad (22)$$

Où N est le rapport entre  $\Lambda'$  et  $\Lambda$ . La valeur de N a peu d'influence sur le résultat du calcul. On fixe sa valeur à 3 ce qui est une bonne approximation pour la plupart des poreux.

Le montage en réflexion consiste à positionner deux transducteurs ultrasonores, un émetteur et un récepteur inclinés d'un angle  $\theta$  par rapport à la normale au plan de l'échantillon. En utilisant les valeurs de tortuosité et de longueurs caractéristiques mesurées en transmission, on peut calculer la vitesse de phase, l'impédance  $z_{m\theta}$  et le nombre d'onde  $k_{m\theta}$ . A partir du coefficient de réflexion mesuré et en inversant la relation (8), on obtient la porosité :

$$\Phi = \left( \frac{jRz_{m\theta}}{(R+1)\tan k_{m\theta}L} \right) \left( -1 + \sqrt{1 + \left( 1 - \frac{1}{R^2} \right) \tan^2 k_{m\theta}L} \right) \quad (23)$$

### 3.3 Inversion du modèle complet

L'approximation HF, et la simplification (16) conduisent à un calcul simple de  $\alpha_\infty$  et  $\Lambda$  (équation (21) et (22)). En revanche, le calcul de la porosité d'après (23) ne requiert aucune simplification du modèle. La précision sur la porosité dépend de la mesure de la tortuosité et de la longueur visqueuse. Afin de valider la méthode, un calcul numérique de  $\alpha_\infty$  et  $\Lambda$  a donc été implémenté. Les mesures du retard et du coefficient de transmission sont liées au nombre d'onde mesuré  $k_{mes}$  par :

$$\text{Im}(k_{mes}) = a = \frac{|\ln|T||}{L} \quad (24)$$

$$\text{Re}(k_{mes}) = \omega \left( \frac{1}{c_0} + \frac{\tau}{L} \right) \quad (25)$$

Grâce aux équations du modèle complet (1), (2), (3), (4), (9) et (10), on calcule numériquement un nombre d'onde  $k_{calc}$  puis une fonction de coût dont on cherche le minimum par la méthode de Newton-Raphson:

$$F_{cout}(\alpha_{\infty}, \Lambda) = \sqrt{(\text{Re}(k_{calc}) - \text{Re}(k_{mes}))^2 + (\text{Im}(k_{calc}) - \text{Im}(k_{mes}))^2}$$

Les fonctions obtenues sont très régulières (cf. Figure 3). La méthode conduit à un couple de valeurs  $(\alpha_{\infty}, \Lambda)$  optimale qui minimise l'écart entre  $k_{mes}$  et  $k_{calc}$ . La porosité est ensuite calculée d'après (23).

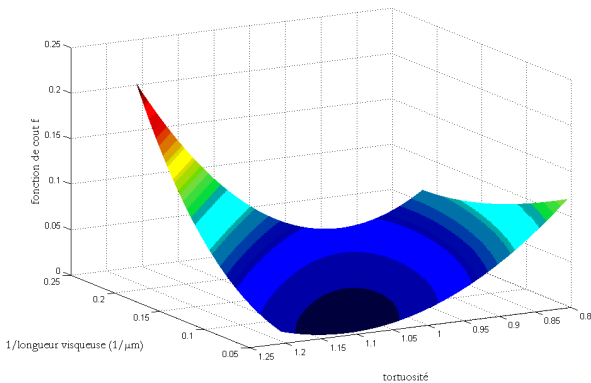


Figure 3 : fonction de coût à minimiser pour le calcul de la tortuosité et de la longueur caractéristique visqueuse.

## 4 Montage expérimental

Le banc de mesure est constitué des éléments suivants : quatre transducteurs ultrasonores Parsonics à bande étroite centrée sur 40 kHz, un amplificateur pour les signaux de réception, une carte d'acquisition et un PC de traitement, un bâti comprenant les fixations pour les capteurs et le porte-échantillon.

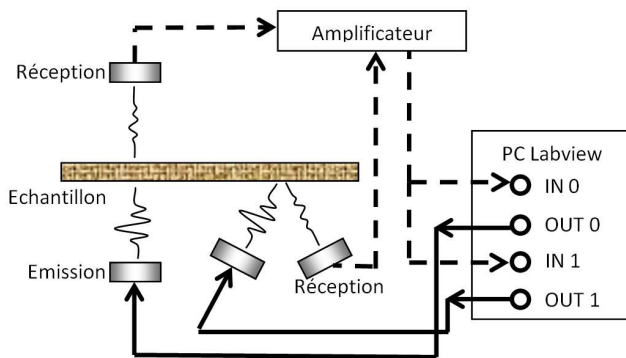


Figure 4 : Schéma du banc de mesure ultrasonore

Les signaux émis par la carte d'acquisition sont des signaux courts (environ 1 ms) de type burst et de fréquence 40 kHz. Pour le montage en transmission, on procède dans un premier temps à un essai de référence sans matériau afin de mesurer l'onde incidente. Puis on place l'échantillon entre les capteurs et on mesure l'onde transmise. Etant donné la forte absorption de certains matériaux, le signal transmis doit être amplifié afin d'améliorer le rapport signal sur bruit. Le traitement des signaux avec et sans matériau permet de calculer le coefficient de transmission et le retard de phase (cf. Figure 5).

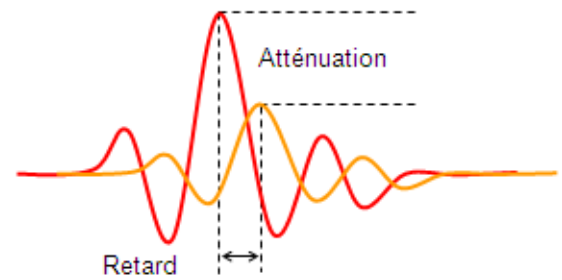


Figure 5 : signaux mesurés en transmission

Pour mesurer l'onde incidente dans le montage en réflexion, on positionne une plaque d'acier rigide à la place de l'échantillon. L'émetteur est incliné d'environ 20 degrés par rapport à la normale et le récepteur selon la direction spéculaire. L'énergie réfléchiée par la plaque d'acier correspond à l'énergie incidente. Puis, sans modifier le montage, on place le matériau sur le porte-échantillon et on mesure l'énergie réfléchiée par le poreux ce qui permet de calculer un coefficient de réflexion.

Les transducteurs ultrasonores fonctionnent sur une bande fréquentielle étroite centrée autour de 40 kHz. Le choix de la fréquence de travail résulte d'un compromis. En effet, elle doit être suffisamment élevée pour que le modèle asymptotique soit valide mais suffisamment basse pour que l'absorption des ondes par le matériau poreux ne soit pas trop forte. Plusieurs essais préalables ont été effectués avec des capteurs travaillant à 80 puis 160 kHz mais les signaux mesurés se sont révélés inexploitable car leur niveau était trop faible. Le banc est piloté par un logiciel développé sous l'environnement Labview. Il s'agit d'une interface dédiée et simple d'utilisation qui permet la visualisation des résultats et l'enregistrement. Le logiciel est commercialisé avec le banc de manière à ce que les clients du CTTM disposent d'un outil clé en main.



Figure 6 : Banc ultrasons du CTTM et logiciel Labview

## 5 Résultats et validation du banc

Pour valider le banc, une trentaine de matériaux poreux ont été mesurés. Leurs caractéristiques (épaisseur, type poreux ou fibreux, résistivité, longueurs caractéristiques...) sont très hétéroclites. La Figure 7 montre quelques uns des 30 plaques de matériaux sélectionnés.



Figure 7 : Matériaux de références

Parmi ces matériaux, dix sont présentés ici pour illustrer le propos (cf. Tableau 2). On remarque que certains retards mesurés sont de l'ordre de la microseconde. Pour ces faibles valeurs, l'incertitude est grande car on approche des limites du matériel de mesure notamment de la résolution temporelle de la carte d'acquisition qui est cadencé à 10 MHz soit un pas d'échantillonnage de 0,1  $\mu$ s.

N°	Description du matériau	Epaisseur (mm)	Retard ( $\mu$ s)
1	mousse PU 30 kg/m <sup>2</sup>	15	1,1
2	fibreux 20 kg/m <sup>2</sup>	41	2,2
3	mousse de mélamine	10	0,8
4	mousse PU dense	13	2,5
5	feutre vert épais	19	6,3
6	fibreux compressé	7,5	8,5
7	laine de verre fine	26	4,4
8	mélamine 45mm	45	3,4
9	feutre 45 kg/m <sup>2</sup>	53	18,1
10	mousse métallique	14,4	3,6

Tableau 2 : Description des matériaux testés

La tortuosité et la longueur caractéristique visqueuse sont calculées par inversion du modèle asymptotique HF. Certaines valeurs de tortuosité sont inférieures à un ce qui physiquement n'a pas de sens (cf. Figure 8, barres noires). Pour ces matériaux, les valeurs réelles de la tortuosité sont probablement égales à l'unité. Cela donne un ordre de grandeur des incertitudes du banc de mesure qui sont de l'ordre de 5% à 10% sur la tortuosité.

On compare ces résultats aux valeurs obtenues par résolution numérique du modèle complet comme indiqué au paragraphe 3.3. Elles sont toujours légèrement inférieures à celles calculées à la main (cf. Figure 8, barres grises). Dans l'ensemble, les écarts entre le modèle complet et le modèle HF sont faibles ce qui valide la méthode d'inversion proposée. Les valeurs de tortuosité inférieures à l'unité sont probablement dues à des incertitudes liées à l'acquisition ou à la mesure du retard. Les longueurs visqueuses calculées avec l'estimation numérique sont également légèrement inférieures (cf. Figure 9). En revanche, Les deux méthodes fournissent des valeurs de porosité très proches (cf. Figure 10).

Finalement, les coefficients d'absorption des matériaux ont été mesurés au tube de Kundt. Les courbes obtenues

sont comparées à des courbes calculées avec le logiciel Maine 3A (cf. Figures 11 et 12).

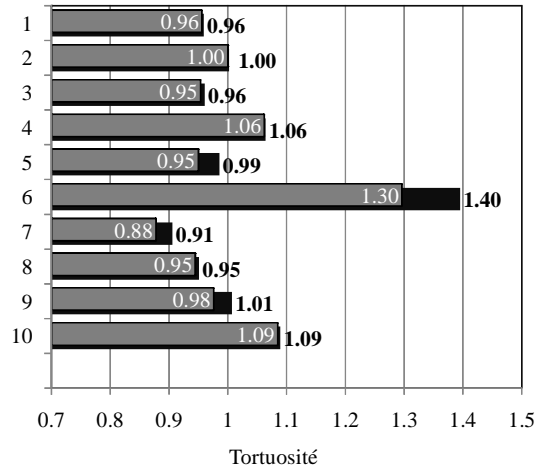


Figure 8 : Tortuosité des dix matériaux de référence : **calculées avec la méthode d'inversion asymptotique HF**, calculées par inversion numérique du modèle complet.

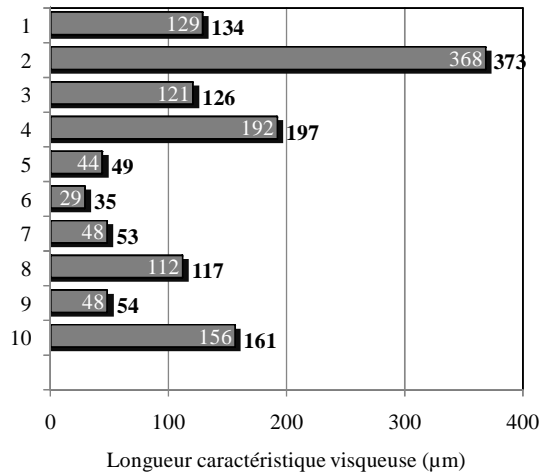


Figure 9 : Longueur caractéristique visqueuse des dix matériaux de référence : **calculées avec la méthode d'inversion asymptotique HF**, calculées par inversion numérique du modèle complet.

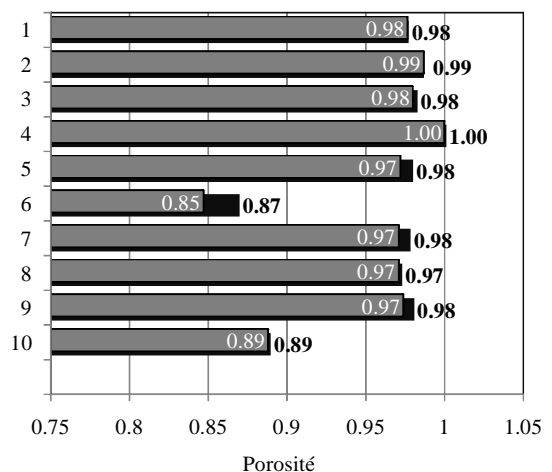


Figure 10 : Porosité des dix matériaux de référence : **calculées avec la méthode d'inversion asymptotique HF**, calculées par inversion numérique du modèle complet.

Les paramètres utilisés pour le calcul Maine 3A sont ceux mesurés sur le banc ultrasonore. La résistivité a également été mesurée à l'aide d'un resistivimètre à écoulement. Les coefficients mesurés au tube de Kundt et calculés avec Maine 3A sont similaires pour tous les matériaux testés hormis ceux présentant des comportements résonnant faisant intervenir des mouvements du squelette. On présente ici trois exemples donnant un aperçu des comparaisons obtenues. Les matériaux N°5, 6 et 10 ont été simulés avec les paramètres du tableau 3. Seules les longueurs caractéristiques thermiques ont été ajustées par rapport aux mesures.

N°	$\alpha_\infty$	$\Lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Lambda'$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma$ (SI)	$\Phi$
5	1.0	50	150	33000	0.98
6	1.40	35	100	60000	0.87
10	1.09	161	322	9000	0.89

Tableau 3 : Paramètres utilisés pour le calcul Maine 3A.

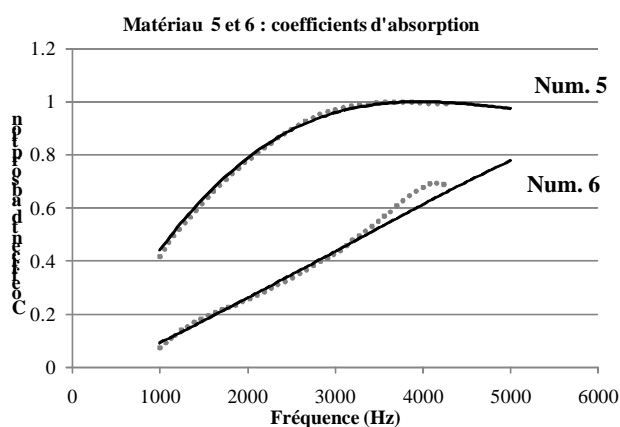


Figure 11 : Coefficient d'absorption mesuré (-----) et calculé avec Maine 3A (.....) pour les matériaux N°5 et N°6.

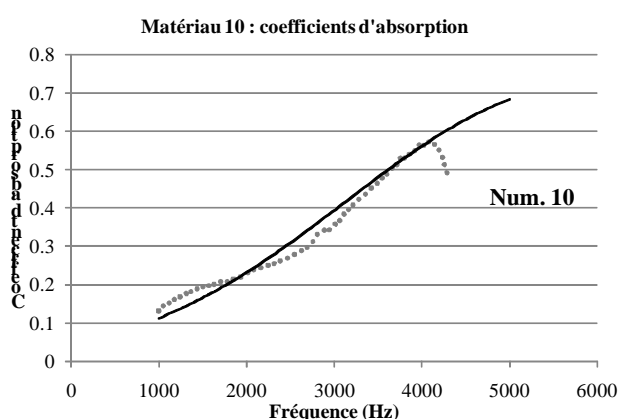


Figure 12 : Coefficient d'absorption mesuré (-----) et calculé avec Maine 3A (.....) pour le matériau N°10.

## Conclusion

Ce travail a permis de poursuivre les développements précédemment effectués au Laboratoire d'acoustique de l'université du Maine. Il confirme notamment la validité du modèle asymptotique haute fréquence à 40 kHz pour les

matériaux dont les longueurs caractéristiques sont suffisamment élevées (supérieures à 40  $\mu\text{m}$ ). Il semble que les montages expérimentaux réalisés sont particulièrement adaptés à la détermination de la tortuosité, des longueurs caractéristiques et de la porosité.

Les améliorations possibles portent essentiellement sur les aspects métrologiques et notamment l'évaluation de la vitesse de phase. Actuellement, les nouvelles méthodes développées au Laboratoire d'acoustique du Mans (traitement direct des signaux temporels par convolution, mesures à plusieurs fréquences dans le domaine audible avec les antennes paramétriques) semblent apporter des solutions à ces problèmes.

Le CTTM dispose aujourd'hui d'un banc de mesure ultrasonore permettant la détermination des paramètres de couplage d'une large gamme de matériaux poreux. Les outils métrologiques et le logiciel mis en places permettront aux utilisateurs de caractériser leurs matériaux avec une précision de l'ordre de 5 à 10%.

## Références

- [1] J.F. Allard, B. Castagnède, M. Henry, W. Lauriks, Evaluation of tortuosity in acoustic porous materials saturated by air, *Rev. Sci. Instrum.*, **65**, 754-55 (1994).
- [2] P. Leclaire, L. Kelders, W. Lauriks, M. Melon, N. Brown, B. Castagnède, Determination of the viscous and thermal characteristic lengths of plastic foams by ultrasonic measurements in helium and air, *J. Appl. Phys.*, **80**, 2009-12 (1996).
- [3] B. Castagnède, D. Parmentier, O. Dazel, F. Fohr, B. Brouard, N. Poulain, Direct and robust determination of fibrous and cellular materials based on retrodiffusion measurements performed at low ultrasonic frequencies, submitted to *Ultrasonics*, (2009).
- [4] B. Castagnède, M. Saeid, A. Moussatov, V. Gusev, V. Tournat, Reflection and transmission at normal incidence onto air-saturated porous materials and direct measurements based on parametric demodulated ultrasonic waves, *Ultrasonics*, **44**, 221-229 (2006).
- [5] F. Fohr, D. Parmentier, B. Castagnède, M. Henry, An alternative and industrial method using low frequency ultrasound enabling to measure quickly tortuosity and viscous characteristic length, *Proceedings of Acoustics 08 Paris*.