

Caractérisation en Température de l'Indice d'Affaiblissement Acoustique de Matériaux et Application à un Isolant à Base d'Aérogel

N. Merlette et B. Delmache

Tangent'delta, 50 rue Ettore Bugatti, Technopôle du Madrillet, 76800 Saint Etienne Du Rouvray, France
nicolas.merlette@tgdelta.com

L'indice d'affaiblissement acoustique des matériaux de construction est une donnée nécessaire à la conception des solutions acoustiques pour les secteurs du bâtiment, des transports ou encore de l'industrie. Cette propriété est classiquement mesurée selon des méthodes normalisées en champs diffus ou en incidence normale. Bien que ces matériaux puissent être utilisés dans des environnements chauds ou froids, ils sont généralement caractérisés à la température ambiante d'un laboratoire. Dans ce travail, nous présentons un moyen de mesure en température de l'indice d'affaiblissement acoustique en incidence normale. Après une description de la méthodologie et du moyen d'essai, une application est présentée pour deux matériaux isolants à base d'aérogel : un isolant cryogénique et un isolant hautes températures.

1 Introduction

L'utilisation de produits d'isolation acoustique dans le bâtiment ou dans l'industrie requiert de connaître leurs performances. L'indice d'affaiblissement acoustique est une des propriétés acoustiques permettant de quantifier la capacité d'un produit à isoler du bruit. Différentes méthodes ont été développées pour mesurer cette propriété en fonction de la fréquence. Bien que ces produits d'isolation puissent être utilisés dans des environnements chauds (compartiment moteur d'une voiture) ou froids (fuselage de la cabine d'un avion), ils sont généralement caractérisés à la température ambiante d'un laboratoire.

L'objet de ce travail est de développer un protocole expérimental pour caractériser en température l'indice d'affaiblissement acoustique de matériaux. A partir d'un moyen d'essai ayant permis de caractériser la dépendance en température du coefficient d'absorption acoustique de matériaux poreux [1], une méthodologie et un nouveau moyen d'essai sont proposés.

La première partie décrit la théorie utilisée, la méthodologie mise en œuvre et les choix de construction du moyen d'essai. La seconde partie présente une application à deux matériaux isolants à base d'aérogel : un isolant cryogénique et un isolant hautes températures. L'influence de la température sur les indices d'affaiblissement acoustique des deux matériaux est observée, avant de conclure.

2 Protocole expérimental

L'utilisation d'un tube à impédance a été privilégiée pour développer un protocole expérimental de mesure de l'influence de la température sur l'indice d'affaiblissement acoustique. En effet, la compacité du tube à impédance facilite la mise en œuvre d'un système de régulation thermique, alors que la mesure en double chambre acoustique couplée nécessiterait des moyens beaucoup plus lourds. La méthodologie et le moyen d'essai développés sont présentés dans la suite.

2.1 Méthodologie

Une première méthode a été envisagée. Elle consiste à utiliser un tube d'impédance en incidence normale et quatre microphones : deux microphones de part et d'autre de l'échantillon de matériau à caractériser comme cela est présenté dans la Figure 1.

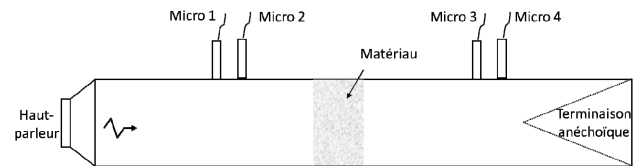


Figure 1 : Tube à impédance en incidence normale pour la mesure de l'indice d'affaiblissement acoustique avec quatre microphones.

Cette méthode normalisée [2] recommande l'utilisation d'une terminaison anéchoïque pour limiter les réflexions des ondes acoustiques sur le fond rigide du tube. L'objectif du protocole étant de mesurer l'influence de la température sur les propriétés acoustiques du matériau testé, l'utilisation d'un matériau absorbant pour réaliser la terminaison anéchoïque ajouterait une incertitude de mesure, à savoir l'influence de la température sur l'efficacité de la terminaison anéchoïque.

En conséquence, le choix s'est orienté vers une méthode complémentaire proposée par Salissou [3]. Cette méthode utilise trois microphones pour mesurer l'indice d'affaiblissement acoustique, sans traitement anéchoïque du tube. L'échantillon de matériau est placé à une distance D du fond rigide. Le troisième microphone mesure la pression acoustique au niveau du fond rigide, perpendiculairement aux ondes acoustiques planes incidentes, comme cela est illustré dans la Figure 2.

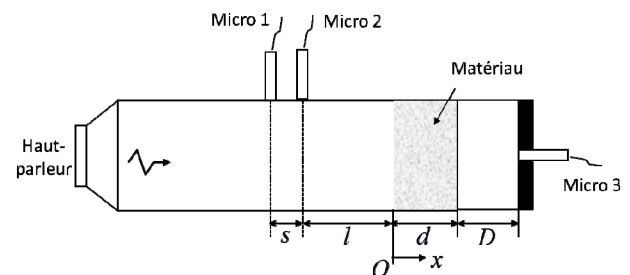


Figure 2 : Tube à impédance en incidence normale pour la mesure de l'indice d'affaiblissement acoustique avec trois microphones.

On considère, ici, que l'échantillon de matériau testé est homogène, symétrique, d'épaisseur d et que son comportement acoustique est isotrope. La distance entre le microphone 1 et le microphone 2 est notée s . Celle entre le microphone 2 et l'échantillon est notée l . A partir des fonctions de transfert en pression H_{12} et H_{13} , mesurées respectivement entre les microphones 1 et 2 et entre les microphones 1 et 3, on peut déterminer la matrice de transfert $[T]$ reliant la pression acoustique et la vitesse particulière entre les deux faces de l'échantillon (à $x = 0$

et à $x = d$ conformément au schéma de la Figure 2). D'après la norme ASTM E2611-09 [2], son expression est dans le cas d'un échantillon géométriquement symétrique :

$$[T] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

telle que

$$[T] = \frac{1}{p(0)u(d) + p(d)u(0)} \begin{bmatrix} p(d)u(d) + p(0)u(0) & p(0)^2 - p(d)^2 \\ u(0)^2 - u(d)^2 & p(d)u(d) + p(0)u(0) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

où les pressions et les vitesses sont données, d'après Salissou et al. [4], par les équations (3) à (6) :

$$p(0) = -2je^{jkl} \frac{H_{12} \sin(k(l+s)) - \sin(kl)}{H_{12}e^{-jks} - 1}, \quad (3)$$

$$p(d) = -2je^{jkl} \frac{H_{13} \sin(ks) \cos(kD)}{H_{12}e^{-jks} - 1}, \quad (4)$$

$$u(0) = \frac{2e^{jkl} H_{12} \cos(k(l+s)) - \cos(kl)}{Z_s H_{12}e^{-jks} - 1}, \quad (5)$$

$$u(d) = \frac{2e^{jkl} H_{13} \sin(ks) \sin(kD)}{Z_s H_{12}e^{-jks} - 1}. \quad (6)$$

Dans les équations (3) à (6), k et Z_s désignent respectivement le nombre d'ondes et l'impédance acoustique spécifique. Leurs expressions sont

$$k = \frac{2\pi f}{c} \quad (7)$$

et

$$Z_s = \rho c, \quad (8)$$

où f désigne la fréquence, ρ la masse volumique de l'air et c la célérité des ondes acoustiques. Ces deux expressions étant réelles, on néglige ici les effets thermiques et visqueux de dissipation de l'énergie acoustique dans le tube d'impédance. La démonstration présentée dans la suite peut être généralisée en prenant en compte des quantités complexes pour le nombre d'ondes et l'impédance acoustique spécifique.

Le coefficient de transmission en incidence normale τ est déterminé à partir des termes de la matrice de transfert, du nombre d'ondes et de l'impédance acoustique spécifique, comme

$$\tau = \frac{2e^{jkd}}{T_{11} + T_{12}/Z_s + T_{21}Z_s + T_{22}}. \quad (9)$$

L'indice d'affaiblissement acoustique est alors obtenu par la relation

$$STL = 20 \log_{10} \left| \frac{1}{\tau} \right|. \quad (10)$$

Pour déterminer l'influence de la température sur l'indice d'affaiblissement du matériau testé, il est nécessaire d'examiner l'expression (9). Si l'on suppose qu'une modification de la température d'essai change le comportement acoustique de l'échantillon, ce changement sera mesuré par les fonctions de transfert H_{12} et H_{13} . Dès lors, les termes de la matrice de transfert dépendent de la température, puisqu'ils sont calculés à partir de H_{12} et de H_{13} dans les équations (3) à (6). De plus, en remplaçant dans les équations (3) à (6), le nombre d'ondes et l'impédance acoustique spécifique par les relations (7) et (8), on observe qu'elles dépendent de la célérité des ondes acoustiques et de la masse volumique de l'air. D'après les équations (4) et (5) de la norme ASTM E2611-09 [2], ces deux propriétés sont des fonctions de la température. Ainsi, on montre que l'expression (9) dépend bien de la température d'essai.

En conséquence, la méthode proposée consiste à mesurer les fonctions de transfert H_{12} et H_{13} à la température d'essai T , à calculer la célérité des ondes acoustiques et la masse volumique de l'air à cette température T et à déterminer l'indice d'affaiblissement acoustique à l'aide des équations (2) à (10). Les fonctions de transfert H_{12} et H_{13} sont corrigées (en amplitude et en phase) pour chaque température d'essai, par la technique d'inversion des microphones détaillée dans la norme ASTM E2611-09 [2].

Cette méthode peut être étendue à des échantillons de matériaux dont les géométries ne sont pas symétriques. Pour cela, on remplace les équations (2) à (6) par les équations (5) et (6) proposées par Salissou et al. [4], dans le cas d'une méthode dite à trois microphones et deux chargements (3M2L). Les deux chargements correspondent à deux distances différentes D_a et D_b entre l'échantillon et le fond rigide, telles que

$$D_a - D_b < |\pi/k| \approx 172/f_u, \quad (11)$$

où f_u est la fréquence utile supérieure du tube d'impédance pour assurer la propagation en ondes planes.

2.2 Moyen d'essai

Le tube (ses dimensions et son matériau), les microphones et le haut-parleur ont été choisis dans le respect des requis de la norme ASTM E2611-09 [2], mais aussi pour leurs propriétés thermiques. Par exemple, les trois microphones possèdent des membranes en alliage de titane, lesquelles sont plus stables en température que les membranes en polymère.

L'objectif du système de régulation thermique est d'amener l'échantillon testé à une température T , d'assurer l'homogénéité de la température dans le tube d'impédance (colonne d'air, membranes des microphones et du haut-parleur) et de maintenir la stabilité en température, le temps de mesurer les fonctions de transfert de pression acoustique et de permettre leur correction par la technique d'inversion des microphones. Il a été décidé d'utiliser un système thermoélectrique par effet Peltier. Ce système a pour avantage de pouvoir chauffer ou refroidir, simplement en inversant le courant. Il est également très réactif, ce qui permet une régulation précise. Une enceinte climatique a été réalisée spécifiquement autour du tube d'impédance. Les microphones et la membrane du haut-parleur sont à l'intérieur de l'enceinte comme le montre la Figure 3, afin de limiter les gradients de température entre les différents appareils participant à la mesure acoustique.

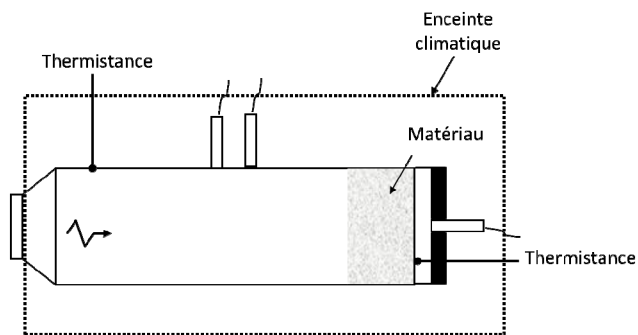


Figure 3 : Système de régulation thermique du tube d'impédance.

La température est contrôlée à l'aide de deux thermistances. La première est placée à proximité de l'échantillon, à travers le fond rigide du tube. La seconde est placée à l'autre extrémité du tube, dans le but de vérifier l'homogénéité du champ de température. La régulation se fait sur la température à proximité de l'échantillon.

Le moyen d'essai développé est présenté dans la Figure 4.

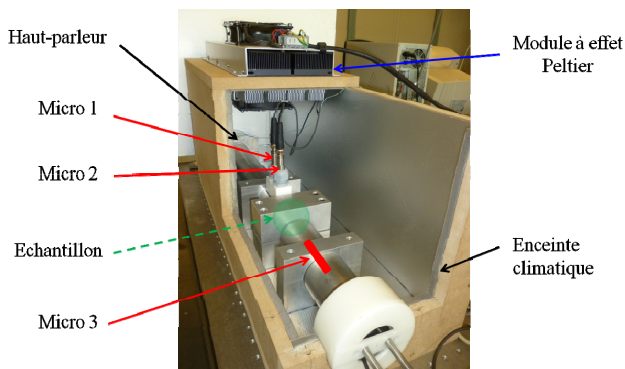


Figure 4 : Moyen d'essai développé pour la caractérisation en température de l'indice d'affaiblissement acoustique en incidence normale.

Il permet la caractérisation de l'indice d'affaiblissement acoustique pour des températures comprises entre -10°C et $+60^{\circ}\text{C}$. D'après l'équation (2) de la norme ASTM E2611-09 [2], la fréquence utile supérieure f_u est définie par la relation

$$f_u < \frac{Kc}{h} \quad (12)$$

où K est une constante égale à 0,586 pour un tube à section circulaire et h est le diamètre intérieur du tube. Considérant que la célérité des ondes acoustiques dépend de la température, la fréquence utile supérieure change donc en fonction de la température d'essai. Utilisant un tube de section circulaire de diamètre intérieur 44 mm et un espacement s de 30 mm entre les microphones 1 et 2, le domaine utile des fréquences est entre 250 Hz et 4250 Hz, quelque soit la température.

3 Application à deux matériaux à base d'aérogel

Deux matériaux à base d'aérogel ont été caractérisés selon le protocole expérimental proposé. Pour chaque matériau, un seul échantillon a été testé pour sept valeurs de température (0°C , $+10^{\circ}\text{C}$, $+20^{\circ}\text{C}$, $+30^{\circ}\text{C}$, $+40^{\circ}\text{C}$, $+50^{\circ}\text{C}$, $+60^{\circ}\text{C}$). Un temps de stabilisation de dix minutes a été respecté pour chaque palier. Les deux échantillons ayant des géométries symétriques, une méthode à trois microphones et un seul chargement (3MIL) a été mise en œuvre. Une distance D de 5 mm a été utilisée entre les échantillons et le fond rigide du tube. Une distance l de 110 mm a été utilisée entre les échantillons et le deuxième microphone (cf. Figure 2).

3.1 Isolant cryogénique

Le matériau est un isolant de protection thermique aux températures cryogéniques. Il est fabriqué à partir d'aérogel de silice et de fibres de renforcement. L'échantillon testé a une épaisseur de 8 mm pour une masse de 2,1 g. Une photo est donnée dans la Figure 5.



Figure 5 : Échantillon de l'isolant cryogénique à base d'aérogel.

L'indice d'affaiblissement acoustique déterminé entre 250 Hz et 4250 Hz pour les sept températures est donné en bande fine de fréquences dans la Figure 6.

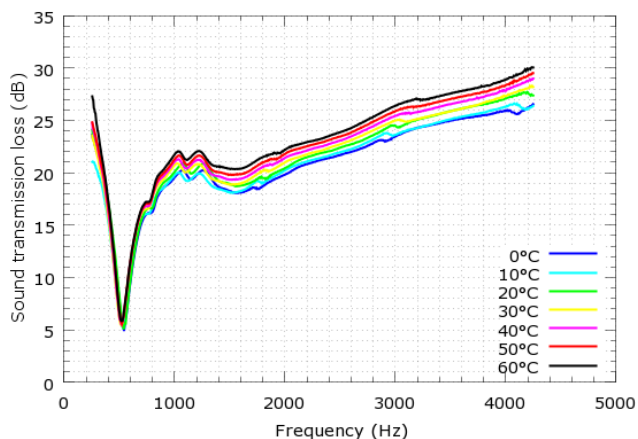


Figure 6 : Indice d'affaiblissement acoustique de l'isolant cryogénique.

A partir de 700 Hz, on observe une influence significative de la température sur l'indice d'affaiblissement acoustique. Plus la température est élevée, plus la valeur de l'indice d'affaiblissement acoustique est grande. Les écarts entre températures augmentent avec la fréquence pour atteindre un maximum de 4 dB à 4250 Hz entre la valeur à 0°C et celle à +60°C.

3.2 Isolant hautes températures

Le matériau est un isolant de protection thermique pour les hautes températures. Il est fabriqué à partir d'aérogel de silice et de fibres de verre de renforcement. L'échantillon testé a une épaisseur de 7 mm pour une masse de 2,9 g. Une photo est donnée dans la Figure 7.



Figure 7 : Echantillon de l'isolant hautes températures à base d'aérogel.

L'indice d'affaiblissement acoustique déterminé entre 250 Hz et 4250 Hz pour les sept températures est donné en bande fine de fréquences dans la Figure 8.

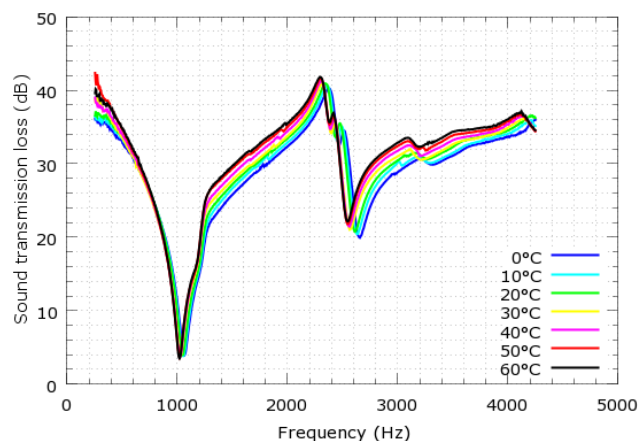


Figure 8 : Indice d'affaiblissement acoustique de l'isolant hautes températures.

On observe une influence significative de la température sur l'indice d'affaiblissement acoustique. Plus la température est élevée, plus la valeur de l'indice d'affaiblissement acoustique est grande. Les écarts entre les températures extrêmes (0°C et +60°C) sont compris entre 2 et 4 dB sur l'ensemble de la bande de fréquences, à l'exception de la chute d'isolation vers 1000 Hz. On observe également un décalage en fréquence du pic et de la chute d'isolation entre 2300 Hz et 2700 Hz. Plus la température est élevée, plus les fréquences du pic et de la chute d'isolation diminuent. Ce phénomène peut s'expliquer par un effet élastique de l'échantillon et un assouplissement de ce dernier lorsque la température augmente.

4 Conclusion

Une méthodologie et un moyen d'essai sont présentés pour caractériser en température l'indice d'affaiblissement acoustique de matériaux. A partir d'une méthode en incidence normale à trois microphones, complémentaire à la norme ASTM E2611-09, un tube d'impédance régulé en température a été développé. Il est utilisé pour tester deux matériaux isolants à base d'aérogel et mettre en évidence l'influence de la température sur leurs indices d'affaiblissement acoustique déterminés pour des températures comprises entre 0°C et +60°C. Les tendances observées pour les deux matériaux sont différentes, ce qui montre que le protocole expérimental proposé permet de mettre en évidence la dépendance en température du comportement acoustique du matériau testé.

Références

- [1] N. Merlette, C. Gautrelet, E. Pagnacco, Methodology Using a Heat Regulated Impedance Tube for the Temperature Dependent Sound Absorption Property of Materials, Medyna 2013, Marrakech (2013).
- [2] ASTM E2611-09: Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method, American Society for Testing and Materials, New York (2009).

- [3] Salissou Y. Caractérisation des propriétés acoustiques des matériaux poreux à cellules ouvertes et à matrice rigide ou souple, Thèse de Doctorat. Université de Sherbrooke, Québec (2009).
- [4] Salissou Y., Panneton R., Doutres O., Complement to standard method for measuring normal incidence sound transmission loss with three microphones, *Journal of the Acoustical Society of America* **131** (3) (2012).