

**CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018**  
**14<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique**



**Absorption acoustique de murs végétalisés constitués de feuillages et de substrats**

E. Attal<sup>a</sup>, N. Côté<sup>b</sup>, T. Shimizu<sup>c</sup> et B. Dubus<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Univ. Lille, CNRS, ISEN, UMR 8520 - IEMN, IEMN département ISEN 41 boulevard Vauban, 59046 Lille, France

<sup>b</sup>Wavely, IEMN UMR 8520 Avenue Henri Poincaré, 59652 Villeneuve D'Ascq, France

<sup>c</sup>Daiwa House Industry Co. Ltd., Central Research Laboratory 6-6-2 Sakyo, 631-0801 Nara, Japon

<sup>d</sup>Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, ISEN, Univ. Valenciennes, UMR 8520 - IEMN, F-59000 Lille, France  
bertrand.dubus@isen.fr

De nombreux travaux récents ont montré que les murs végétalisés peuvent absorber efficacement les ondes acoustiques et ainsi contribuer à la réduction du bruit et à l'amélioration du paysage sonore dans des environnements urbains. En particulier, il a été observé que l'absorption acoustique d'une couche de substrat peut être augmentée significativement sur une large bande de fréquences lorsqu'elle est recouverte d'une couche de feuillage. Cet effet est influencé par les paramètres caractéristiques du feuillage (densité surfacique, orientation) mais le mécanisme physique mis en jeu reste inexpliqué. Pour étudier ce problème, des mesures sont réalisées en tube d'impédance sur des échantillons de feuillage et de substrat entre 100 et 1000 Hz. L'utilisation de la méthode à trois microphones et deux cavités permet ainsi de déterminer : i) le coefficient d'absorption acoustique et l'impédance spécifique de surface en condition arrière de mur rigide ; ii) la vitesse du son et l'impédance caractéristique du fluide homogène équivalent. L'absorption acoustique d'échantillons composés par la superposition de couches de feuillage et de substrat est également mesurée en condition arrière de mur rigide. Pour ces échantillons composites, les coefficients d'absorption simulés à partir des propriétés équivalentes des feuillages et des substrats sont en bon accord avec ceux mesurés en tube d'impédance. Plus généralement, les résultats obtenus pour les différents échantillons composites indiquent que la modification de l'absorption apportée par la couche de feuillage résulte d'une part, des résonances en épaisseur de l'échantillon et, d'autre part, de l'adaptation d'impédance acoustique entre l'air et le substrat apportée par le feuillage qui se comporte comme une ligne d'adaptation quart-d'onde.

## 1 Introduction

Les caractérisations acoustiques conduites sur des murs végétalisés in situ [1-5] ou en chambre réverbérante [3, 4] mettent en évidence leur capacité à absorber le son. Les mesures en laboratoire ont également montré que les substrats utilisés pour nourrir les plantes, possèdent un coefficient d'absorption acoustique élevé, fonction de la composition du substrat [6-9] et du taux d'humidité [8, 9]. Par contre, l'absorption acoustique par les plantes est assez faible et généralement négligeable en dessous de 400 Hz [6, 7, 10]. Néanmoins, des résultats récents ont montré que des plantes placées au dessus d'un substrat pouvaient conduire à une augmentation significative de l'absorption acoustique sur une large bande de fréquences [7]. Ce résultat a été corrélé à la densité surfacique et à l'orientation du feuillage mais le phénomène physique sous-jacent reste inexpliqué [7]. Pour aborder cette question, ce travail présente (partie 2) des mesures réalisées en tube d'impédance sur différents échantillons de plantes et de substrats de manière à déterminer leurs propriétés effectives (vitesse du son, impédance caractéristique). Ces résultats sont ensuite combinés pour évaluer le coefficient d'absorption acoustique d'échantillons constitués de couches de plantes et de substrat. La méthode de calcul et la comparaison entre coefficients d'absorption acoustique simulés et mesurés sont présentés dans la partie 3. Finalement, une étude paramétrique de l'influence de l'épaisseur de la couche de plantes sur le coefficient d'absorption acoustique d'échantillons multicouches est proposée dans la partie 4. Le phénomène physique contribuant à l'amélioration de l'absorption acoustique y est analysé.

## 2 Mesure des propriétés effectives des plantes et des substrats

La caractérisation acoustique des échantillons est réalisée dans un tube d'impédance en utilisant la méthode à trois microphones et deux cavités [11-13]. Pour pouvoir caractériser un milieu effectif, il est nécessaire de disposer d'un échantillon de taille notablement supérieure aux hétérogénéités présentes dans le milieu (feuilles, cailloux...). Par conséquent, un tube de diamètre élevé (192 mm), spécifiquement conçu pour cette caractérisation,

a été utilisé [10]. Les paramètres de la matrice de transfert de l'échantillon sont obtenus dans la bande de fréquences 100-1000 Hz. En supposant que le milieu est symétrique et homogène, la matrice de transfert  $\mathbf{T}$  s'écrit

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_{11}(\omega) & T_{12}(\omega) \\ T_{21}(\omega) & T_{22}(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(kd) & jZ_c \sin(kd) \\ \frac{j \sin(kd)}{Z_c} & \cos(kd) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

où  $k = \omega/c$  et  $Z_c$  sont respectivement le nombre d'onde effectif et l'impédance caractéristique du milieu constituant l'échantillon.  $c$  est la vitesse du son effective dans l'échantillon,  $\omega$  la pulsation et  $d$  l'épaisseur de l'échantillon.  $Z_c$  et  $c$  sont déduits de la matrice  $\mathbf{T}$  mesurée en utilisant les expressions

$$Z_c(\omega) = \sqrt{\frac{T_{12}(\omega)}{T_{21}(\omega)}}, \quad (2)$$

$$c(\omega) = \frac{\omega d}{\arccos(T_{11}(\omega))}. \quad (3)$$

Les mesures sont réalisées sur un feuillage de fusain japonais et sur un substrat de perlite. La Figure 1 présente la partie réelle de la vitesse du son effective et de l'impédance caractéristique en fonction de la fréquence pour un échantillon de fusain de porosité 95% (rapport du volume total de l'échantillon par le volume du feuillage) et d'épaisseur 8 cm. Le feuillage de fusain se comporte comme un milieu non dispersif ayant une vitesse du son quasi-constante de 250 m/s dans la bande de fréquences 250-1000 Hz. La valeur moyenne de l'impédance caractéristique est de 620 Rayl entre 300 et 1000 Hz, une valeur correspondant à une augmentation de 50% par rapport à l'impédance caractéristique de l'air. Dans le cas d'un échantillon de perlite d'épaisseur 8 cm (Fig. 2), la partie réelle de la vitesse du son augmente de façon monotone de 90 à 160 m/s entre 100 et 1000 Hz. Dans cette gamme de fréquences, la perlite se comporte comme un milieu dispersif où la vitesse du son est 3 à 4 fois inférieure à celle de l'air. La partie réelle de l'impédance caractéristique qui atteint des valeurs 3 à 4 fois supérieure celle de l'air, décroît de façon monotone avec la fréquence.

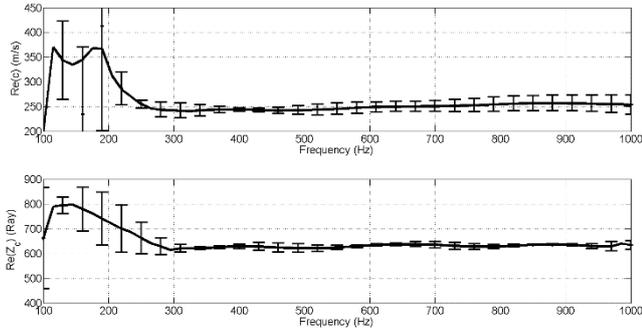


Figure 1: échantillon de fusain japonais de porosité 95% et d'épaisseur 8 cm. Spectre de la partie réelle de la vitesse du son (haut) et de l'impédance caractéristique (bas). Trait plein : valeur moyenne pour 4 arrangements. Barres d'erreur : valeurs maximale et minimale parmi les arrangements.

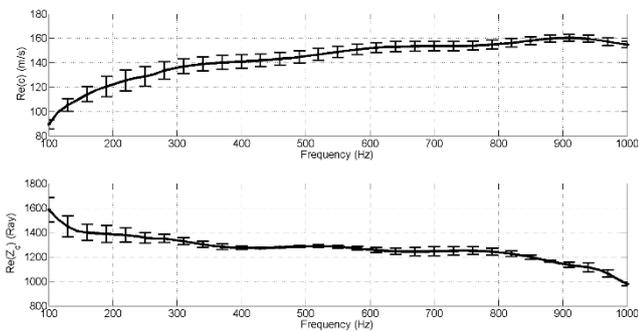


Figure 2: échantillon de perlite d'épaisseur 8 cm. Spectre de la partie réelle de la vitesse du son (haut) et de l'impédance caractéristique (bas). Trait plein : valeur moyenne pour 4 arrangements. Barres d'erreur : valeurs maximale et minimale parmi les arrangements.

### 3 Calcul du coefficient d'absorption acoustique d'échantillons composés de plantes et de substrat

L'absorption acoustique d'échantillons composés de couches de fusain et de perlite est évaluée par calcul matriciel. Sachant que le fusain se comporte comme un milieu homogène non dispersif, sa matrice de transfert  $\mathbf{T}_s(d, \omega)$  pour une épaisseur  $d$  est calculée à partir des vitesses du son et impédances caractéristiques effectives (cf. équation (1)). La matrice de transfert de l'échantillon complet  $\mathbf{T}_{tot}(\omega)$  est ensuite en cascader les matrices de transferts des différents éléments

$$\mathbf{T}_{tot}(\omega) = \mathbf{T}_s(d, \omega) \mathbf{T}_p(\omega), \quad (4)$$

où  $\mathbf{T}_p(\omega)$  est matrice de transfert mesurée de l'échantillon de perlite seul. Finalement, le coefficient d'absorption  $\alpha$  et l'impédance spécifique  $Z_s$  de l'échantillon complet en condition arrière rigide sont obtenus à partir de

$$\alpha = 1 - \left| \frac{T_{tot11} - Z_0 T_{tot21}}{T_{tot11} + Z_0 T_{tot21}} \right|^2, \quad (5)$$

$$Z_s = \frac{T_{tot11}}{T_{tot21}}. \quad (6)$$

Pour valider la méthode, les résultats calculés et mesurés sont comparés pour un échantillon composé d'une couche de fusain d'épaisseur 8 cm placée au dessus d'une couche de perlite d'épaisseur 8 cm. Un bon accord est obtenu entre 100 et 1000 Hz pour le coefficient d'absorption acoustique (Fig. 3) et le module de l'impédance spécifique (Fig. 4). Comme dans la référence [7], un coefficient d'absorption élevé est obtenu entre 400 et 1000 Hz. Il résulte d'une bonne adaptation de l'impédance spécifique de l'échantillon à l'impédance caractéristique de l'air ( $Z_0 \approx 410$  Rayl).

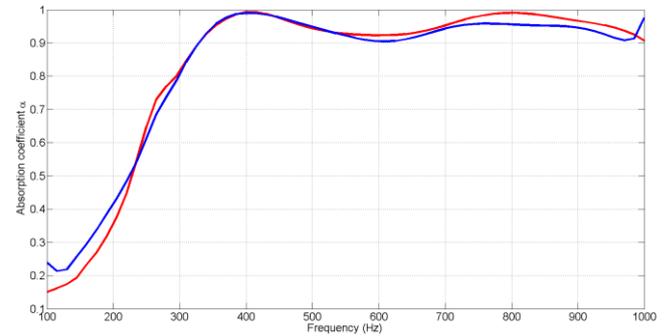


Figure 3: spectre du coefficient d'absorption acoustique d'un échantillon de fusain d'épaisseur 8 cm placé au dessus d'un échantillon de perlite d'épaisseur 8 cm en condition arrière rigide : calcul (trait bleu) ; mesure (trait rouge).

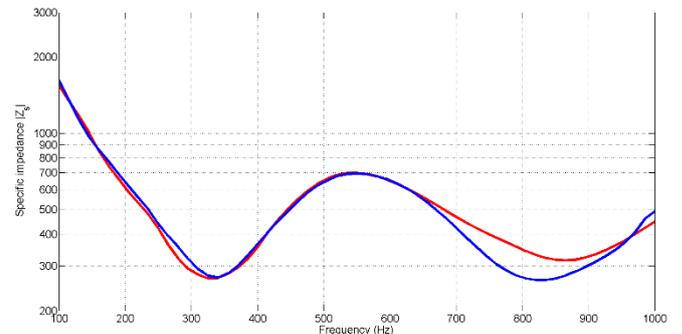


Figure 4: spectre du module de l'impédance spécifique d'un échantillon de fusain d'épaisseur 8 cm placé au dessus d'un échantillon de perlite d'épaisseur 8 cm en condition arrière rigide : calcul (trait bleu) ; mesure (trait rouge).

### 4 Etude paramétrique du coefficient d'absorption acoustique d'échantillons composés de plantes et de substrat

Pour clarifier l'origine physique de l'absorption large bande mentionnée précédemment, l'effet de l'épaisseur de la couche de plantes sur l'absorption acoustique d'un échantillon composé d'une couche de fusain superposée à une couche de perlite est étudié. Les Figures 5 et 6

présentent respectivement le coefficient d'absorption et le module de l'impédance spécifique de trois échantillons : un échantillon de perlite d'épaisseur 16 cm, deux échantillons composés d'une couche de fusain d'épaisseur 8 ou 16 cm placée au dessus d'une couche de perlite d'épaisseur 16 cm. Pour la couche de perlite isolée, un pic d'absorption est observé au voisinage de 190 Hz (Fig. 5). Cette fréquence correspond approximativement à une résonance en quart de longueur d'onde de l'onde acoustique se propageant dans l'échantillon à la vitesse de  $120 \text{ m.s}^{-1}$  (Fig. 2). Au voisinage de cette résonance, l'amplitude de l'impédance spécifique décroît et devient proche de l'impédance caractéristique de l'air (Fig. 6). Cette adaptation d'impédance permet d'augmenter la quantité d'énergie acoustique incidente qui entre dans l'échantillon et est ensuite absorbée partiellement. Les modes d'épaisseur d'ordres supérieurs ne sont pas observés sur le spectre d'absorption en raison de l'augmentation de l'atténuation avec la fréquence [10]. Quand une couche de fusain est ajoutée, l'épaisseur de l'échantillon augmente et entraîne un décalage des résonances des modes d'épaisseur vers les basses fréquences. L'absorption acoustique augmente au voisinage de la première résonance car la couche de fusain apporte une meilleure adaptation de l'impédance spécifique (Fig. 6). Des pics supplémentaires du coefficient d'absorption et des minima du module de l'impédance spécifique sont observés vers 730 Hz et 365 Hz pour des épaisseurs de fusain de 8 et 16 cm respectivement. A ces fréquences, l'épaisseur de la couche de fusain est très proche du quart de la longueur d'onde. De plus, l'impédance caractéristique idéale de la ligne d'adaptation quart-d'onde entre l'air ( $Z_0 \approx 410 \text{ Rayl}$ ) et la perlite ( $Z_c \approx 1250 \text{ Rayl}$ ) est égale à  $\sqrt{Z_0 Z_c} \approx 716 \text{ Rayl}$ , une valeur proche de l'impédance caractéristique du fusain. De ce fait, les pics supplémentaires du coefficient d'absorption acoustique peuvent être attribués à l'adaptation d'impédance entre l'air et la perlite apportée par la couche de fusain qui se comporte comme une ligne d'adaptation quart-d'onde.

## 5 Conclusion

Les propriétés acoustiques effectives des plantes et substrats fournissent des informations utiles pour analyser l'absorption du son par des murs végétalisés. Les résultats obtenus par la méthode des matrices de transfert sur des échantillons composés de couches de plantes et de substrats révèlent que le spectre du coefficient d'absorption est principalement déterminé par l'adaptation entre l'impédance spécifique de l'échantillon et l'impédance caractéristique de l'air via deux phénomènes physiques : les résonances en épaisseur de l'échantillon ; l'adaptation d'impédance apportée par la couche de plantes qui peut agir comme une ligne d'adaptation quart-d'onde entre l'air et le substrat.

## Remerciements

Ce travail a été soutenu par l'ADEME, le groupe Yncrea et la région "Hauts-de-France".

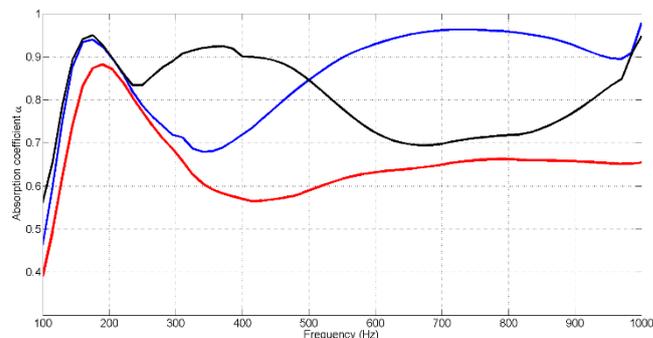


Figure 5: spectre calculé du coefficient d'absorption acoustique en condition arrière rigide : couche de perlite d'épaisseur 16 cm (trait rouge) ; couche de fusain d'épaisseur 8 cm superposée à la couche de perlite d'épaisseur 16 cm (trait bleu) ; couche de fusain d'épaisseur 16 cm superposée à la couche de perlite d'épaisseur 16 cm (trait noir).

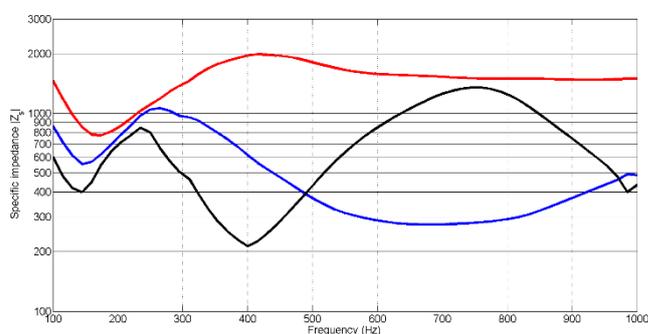


Figure 6: spectre calculé du module de l'impédance spécifique en condition arrière rigide : couche de perlite d'épaisseur 16 cm (trait rouge) ; couche de fusain d'épaisseur 8 cm superposée à la couche de perlite d'épaisseur 16 cm (trait bleu) ; couche de fusain d'épaisseur 16 cm superposée à la couche de perlite d'épaisseur 16 cm (trait noir).

## Références

- [1] D.I. Cook, D.F. van Haverbeke, Suburban noise control with plant materials and solid barriers, *Proceedings of the conference on metropolitan physical environment*, Upper Darby PA: USA, 234-241, (1977).
- [2] T. van Renterghem, K. Attenborough, M. Maennel, J. Defrance, K.V. Horoshenkov, J. Kiang, I. Bashir, S. Taherzadeh, B. Altreuther, A. Khan, Y. Smirnova, H-S. Yang, Measured light vehicle noise reduction by hedges, *Appl. Acoust.*, **78**, 19-27, (2013).
- [3] N. H. Wong, A. Y. K. Tan, P. Y. Tan, K. Chiang, N. C. Wong, Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls, *Build. Environ.*, **45**, 411-20, (2010).
- [4] T. Shimizu, T. Matsuda, Y. Nishibe, M. Tempo, K. Yoshitani, Y. Azumi, Suppression of diffracted sounds by green walls, *Noise Control Engr. J.*, **64**, 142-152 (2016).
- [5] Z. Azkorra, G. Pérez, J. Coma, L. F. Cabeza, S. Bures, J. E. Álvaro, A. Erkoreka, M. Urrestarazu, Evaluation

- of green walls as a passive acoustic insulation system for buildings, *Appl. Acoust.*, **89**, 46-56, (2015).
- [6] H.-S. Yang, J. Kang, C. Cheal, Random-incidence absorption and scattering coefficients of vegetation, *Acta Acust. Acust.*, **99**, 379–388, (2013).
- [7] K.V. Horoshenkov, A. Khan, H. Benkreira, Acoustics properties of low growing plants, *J. Acoust. Soc. Am.*, **133**, 2554–2565, (2013).
- [8] H. Benkreira, K. V. Horoshenkov, A. Khan, A. Mandon, R. Rohr, The effect of drying on the acoustic absorption of novel, *Proceedings of European Drying Conference - EuroDrying, 2011*, Palma de Majorque, Spain, (2011).
- [9] M. R. Ekman, B. Vincent, C. Anselme, A. Mandon, R. Rohr, J. Defrance, D. van Maercke, D. Botteldooren, M. E. Nilsson, Case-study evaluation of a low and vegetated noise barrier in an urban public space, *Proceedings of INTER-NOISE 2011*, Osaka, Japan, (2011).
- [10] E. Attal, N. Côté, G. Haw, G. Pot, C. Vasseur, T. Shimizu, C. Granger, C. Croëne, B. Dubus, Experimental characterization of foliage and substrate samples by the three-microphone two-load method, *Proceedings of INTER-NOISE 2016*, Hamburg, Germany, (2016).
- [11] H. Utsuno, T. Tanaka, T. Fujikawa, A. F. Seybert, Transfer function method for measuring characteristic impedance and propagation constant of porous materials, *J. Acoust. Soc. Am.*, **86**, 637-643, (1989).
- [12] O. Doutres, Y. Salissou, N. Atalla R. Panneton, Evaluation of the acoustic and non-acoustic properties of sound absorbing materials using a three-microphone impedance tube, *Appl. Acoust.* **71**, 506-509 (2010).
- [13] Y. Salissou, R. Panneton, O. Doutres, Complement to standard method for measuring normal incidence sound transmission loss with three microphones, *J. Acoust. Soc. Am.*, **131**, 216-222, (2012).