

# Caractérisation acoustique d'éléments constitutifs de murs végétalisés

**Emmanuel Attal, Nicolas Côté, Bertrand Dubus, Geoffrey Pot,**  
Institut d'Électronique, de Microélectronique  
et de Nanotechnologie, UMR CNRS 8520  
Département ISEN  
41, boulevard Vauban  
59046 Lille  
France  
E-mail : emmanuel.attal@isen.fr

**Takafumi Shimizu**  
Central Research Laboratory  
Daiwa House Industry Co., Ltd.  
6-6-2 Sakyo  
Nara 631-0801  
Japan

## Résumé

La demande accrue des riverains pour une ville durable et plus respectueuse de l'environnement a conduit les gestionnaires à intégrer des murs végétalisés sur les bâtiments et ouvrage d'arts. Ceux-ci présentent également des apports acoustiques intéressants en particulier en termes d'absorption et d'isolation. Cette étude est basée sur un banc de mesure conçu pour déterminer les propriétés effectives des éléments constitutifs d'un mur végétalisé (feuillage, substrat) comme l'impédance caractéristique et la vitesse du son. Pour cela, le banc de mesure utilise la méthode à trois microphones et deux cavités. Les résultats montrent que la propagation du son à travers le feuillage est non dispersive et caractérisée par un effet de masse ajoutée. Des coefficients d'absorption de 0,3 peuvent être obtenus sur la bande fréquence 300-1 000 Hz. Le substrat est au contraire un milieu très dispersif permettant d'obtenir des coefficients d'absorption bien plus élevés, de l'ordre de 0,7 sur la même bande de fréquences. Les propriétés effectives des éléments constitutifs des murs végétalisés permettent d'estimer les coefficients d'absorption et de réflexion d'une structure composite et ainsi d'adapter ses éléments constitutifs à un objectif acoustique spécifique.

**M**

is en place dans les villes ou les bâtiments pour des raisons initialement esthétiques, les murs végétalisés contribuent également à améliorer la qualité de l'air, à réguler la température et l'humidité, à renforcer la biodiversité et à réduire les nuisances sonores [1]. Le mur végétalisé est une structure complexe (Figure 1) constitué généralement d'un couvert végétal, d'un substrat nutritif, d'une structure support et d'un système d'irrigation. Il peut être auto-porteur ou monté sur un mur existant. Dans le deuxième cas, il est séparé du mur porteur par une couche d'air pour permettre une circulation d'air et assurer un découplage structural.

L'étude des propriétés acoustiques des murs végétalisés et de leurs éléments constitutifs (couvert végétal, substrat) s'est particulièrement développée ces dernières années. Dans le cadre du projet européen HOSANNA [2-4], les coefficients d'absorption et de diffusion acoustiques en condition arrière de mur rigide ont été caractérisés par des mesures en tube d'impédance [5] et en chambre réverbérante [6] : Horoshenkov *et al* [7] ont utilisé un modèle de milieu poreux pour prédire le coefficient d'absorption de différents feuillages et substrats ; Yang *et al* [8] ont caractérisé expérimentalement l'effet de l'humidité sur les coefficients d'absorption et de diffusion des feuillages et des substrats. L'effet d'un mur végétalisé sur la transmission du

son a également été étudié expérimentalement : Azkorra *et al* [9] ont caractérisé l'amélioration apportée par un mur végétalisé à l'isolement acoustique d'un bâtiment en utilisant la norme ISO 10140-2 [10] ; Shimizu *et al* [11] ont mesuré la transmission du son à travers des échantillons constitués de mélanges de substrats organiques et inorganiques couverts de feuillage.

L'identification des propriétés acoustiques effectives (masse volumique, coefficient de compressibilité...) a été abordée plus récemment par Chabriac *et al* [12] pour des agrégats de produits d'origine végétale.

Dans ce travail, les propriétés acoustiques effectives d'un couvert végétal (fusain japonais) et d'un substrat (perlite) sont caractérisées à partir de la méthode à trois microphones et à deux cavités développée par Salissou *et al* [13, 14]. Le dispositif expérimental et la méthode de mesure sont décrits dans le paragraphe suivant. Les propriétés acoustiques effectives mesurées sur des échantillons de feuillage et de substrat sont présentées dans la troisième partie. Elles sont utilisées pour simuler le coefficient d'absorption acoustique d'échantillons composés d'une couche de feuillage, d'une couche substrat ou de la superposition de couches de feuillage et de substrat. Ces résultats sont comparés aux coefficients d'absorption mesurés suivant la norme ISO 10534-2 [5] sur ces mêmes échantillons.

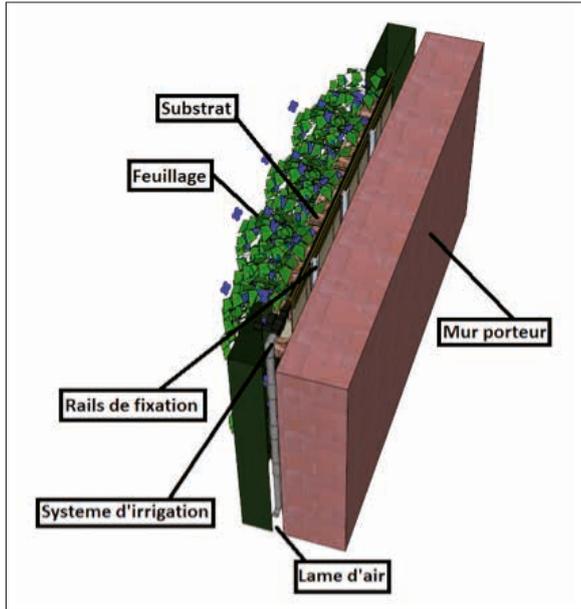


Fig. 1 : Représentation schématique d'un mur végétalisé

## Méthodes

### Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est présenté aux figures 2 et 3. Le tube d'impédance de section circulaire (longueur 1,90 m, diamètre intérieur 192 mm, épaisseur radiale 15 mm) est réalisé en acier inoxydable. Quatre haut-parleurs (Visaton FRS) sont montés dans un disque en PVC situé à l'extrémité avant du tube. Un disque mobile en Téflon (épaisseur axiale 61 mm) est situé à l'autre extrémité. L'échantillon, composé de feuillage et/ou de substrat, est inséré dans un porte-échantillon (épaisseur 80 mm et 160 mm), en Ertalon, où il est maintenu par deux filets.

Les mesures de pression acoustique sont réalisées par trois microphones (Sennheiser MKE 2P, diamètre 3,8 mm). Deux microphones sont situés devant l'échantillon et séparés de 100 mm. Ils sont utilisés pour mesurer le coefficient d'absorption acoustique suivant la norme ISO 10534-2 [5]. Le troisième microphone est positionné derrière l'échantillon, au centre du disque mobile. Les trois microphones sont utilisés pour déterminer la matrice de transfert  $[T]$  de l'échantillon suivant la méthode à trois microphones et deux cavités [13, 14] décrite brièvement dans le paragraphe suivant. Entrées et sorties du dispositif sont contrôlées par une carte son (RME Fireface 802). Le signal d'excitation est un sinus pas à pas.



Fig. 2 : Tube d'impédance utilisé pour la caractérisation acoustique d'échantillons de feuillage et de substrat

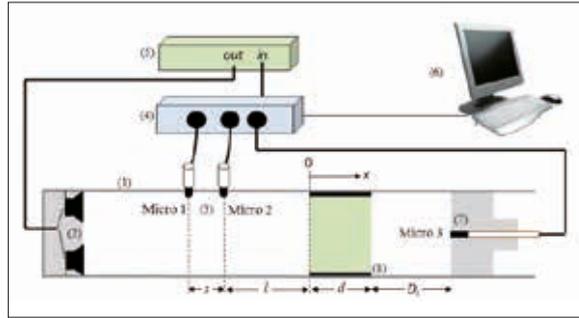


Fig. 3 : Schéma du dispositif expérimental : (1) tube en acier ; (2) disque en PVC intégrant 4 haut-parleurs ; (3) 2 microphones fixes ; (4) carte son ; (5) amplificateur ; (6) ordinateur ; (7) microphone monté sur une terminaison mobile ; (8) porte-échantillon

### Méthode de mesure

La méthode de mesure repose sur une hypothèse d'onde acoustique plane dans toute la bande de fréquences de mesure s'étendant de 100 Hz à 1 000 Hz. Une correction en amplitude et phase des trois microphones est réalisée suivant la norme ISO 10534-2 [5]. La face avant de l'échantillon est positionnée aux distances  $l+s$  et  $l$  des microphones 1 et 2 respectivement. Le troisième microphone est situé à la distance  $D_i$  de la face arrière de l'échantillon.  $D_i$  correspond à la longueur de la cavité arrière qui peut prendre les valeurs  $D_a$  et  $D_b$ . Pour chaque fréquence, les fonctions de transfert complexes  $H_{12a}$ ,  $H_{13a}$ ,  $H_{12b}$  et  $H_{13b}$  sont mesurées entre les microphones 2 et 1 et les microphones 3 et 1, pour les deux tailles de cavités arrière. La pression acoustique  $p_i(x)$  et la vitesse vibratoire  $v_i(x)$  sur les faces avant ( $x = 0$ ) et arrière ( $x = d$ ) de l'échantillon sont ensuite déduites des fonctions de transfert pour chaque taille de cavité ( $i = a$  et  $i = b$ ). Les éléments de la matrice de transfert de l'échantillon sont alors obtenus à partir des équations (1) à (4)

$$T_{11} = \frac{p_a(0)v_b(d) - p_b(0)v_a(d)}{p_a(d)v_b(d) - p_b(d)v_a(d)}, \quad (1)$$

$$T_{12} = \frac{p_b(0)p_a(d) - p_a(0)p_b(d)}{p_a(d)v_b(d) - p_b(d)v_a(d)}, \quad (2)$$

$$T_{21} = \frac{v_a(0)v_b(d) - v_b(0)v_a(d)}{p_a(d)v_b(d) - p_b(d)v_a(d)}, \quad (3)$$

$$T_{22} = \frac{p_a(d)v_b(0) - p_b(d)v_a(0)}{p_a(d)v_b(d) - p_b(d)v_a(d)}, \quad (4)$$

La matrice de transfert d'un échantillon d'épaisseur  $d$  supposé symétrique et homogène s'écrit :

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_{eff}d) & jZ_{eff}\sin(k_{eff}d) \\ \frac{j\sin(k_{eff}d)}{Z_{eff}} & \cos(k_{eff}d) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

où  $k_{eff}$  et  $Z_{eff}$  sont respectivement le nombre d'onde effectif et l'impédance caractéristique effective du milieu. Ces paramètres effectifs ne dépendent pas de l'épaisseur de l'échantillon et peuvent être obtenus par inversion des paramètres  $T_{11}$  and  $T_{12}$  :

$$k_{eff} = \frac{\arccos(T_{11})}{d}, \quad (6)$$

$$Z_{eff} = \sqrt{\frac{T_{12}}{T_{11}}}, \quad (7)$$

La vitesse effective du son  $c_{eff}$  dans le milieu est déduite de :

$$c_{eff} = \frac{2\pi f}{k_{eff}} \quad (8)$$

L'absorption acoustique en condition arrière de mur rigide peut également être calculée sous la forme :

$$\alpha = 1 - \left| \frac{T_{11} - Z_0 T_{21}}{T_{11} + Z_0 T_{21}} \right|^2 \quad (9)$$

où  $Z_0$  désigne l'impédance caractéristique de l'air. La compressibilité effective  $\chi_{eff}$  et la masse volumique effective  $\rho_{eff}$  sont déduites des valeurs effectives de l'impédance caractéristique et de la célérité par les relations :

$$\chi_{eff} = \frac{1}{Z_{eff} c_{eff}} \quad (10)$$

$$\rho_{eff} = \frac{Z_{eff}}{c_{eff}} \quad (11)$$

### Préparation des échantillons

Les résultats expérimentaux sont présentés pour six échantillons (Figure 4) :

- un feuillage de fusain japonais d'épaisseur 80 mm et de fraction volumique (rapport du volume de feuillage au volume total de l'échantillon) 3%,
- trois échantillons de fusain japonais d'épaisseur 160 mm et de fractions volumiques respectives 1%, 3% et 5%,
- un substrat de perlite d'épaisseur 80 mm,
- un échantillon d'épaisseur 160 mm constitué de la superposition du 80 mm de perlite à 80 mm de fusain à 3% de fraction volumique.

Chaque mesure est réalisée pour quatre arrangements aléatoires du feuillage et/ou du substrat.



Fig. 4 : Échantillons caractérisés (de gauche à droite) : feuillage de fusain japonais ; substrat de perlite ; superposition de fusain japonais et de perlite

## Résultats expérimentaux

### Caractérisation acoustique du feuillage

Les parties réelles et imaginaires effectives de la vitesse du son et de l'impédance caractéristique de l'échantillon de fusain japonais sont présentées en fonction de la fréquence aux figures 5 et 6. Dans chaque cas, le trait plein représente la valeur moyenne des quatre arrangements et la barre d'erreur l'écart-type parmi les arrangements. La partie réelle de la vitesse du son conserve une valeur quasi-constante voisine de 270 m/s entre 200 Hz et 1 000 Hz. Dans cette bande de fréquence, le feuillage se comporte comme un milieu non dispersif ayant une vitesse du son inférieure de 20 % à la vitesse du son dans l'air. Les pertes internes, évaluées à partir du rapport de la partie imaginaire de la vitesse sur la partie réelle, varient entre 2% et 5%. La valeur moyenne de l'impédance caractéristique

effective (partie réelle) est de 560 Rayl dans la bande 250-1 000 Hz. Elle correspond à une augmentation relative de 37% par rapport à l'impédance caractéristique de l'air. Le rapport partie imaginaire sur partie réelle varie entre 0 et 2%. Les variations des compressibilités et masses volumiques effectives du feuillage sont représentées respectivement aux figures 7 et 8. Elles mettent en évidence, par rapport à l'air, une augmentation de la masse volumique de 80% et une stabilité de la compressibilité. L'effet principal du feuillage sur la propagation acoustique est donc un effet de masse ajoutée dû à la vibration des feuilles qui se couple à l'onde aérienne.

La matrice de transfert  $[T]$  peut être utilisée pour calculer le coefficient d'absorption acoustique de l'échantillon de feuillage en condition arrière de mur rigide à partir de l'équation (9). Les valeurs calculées pour des échantillons de 80 mm et de 160 mm montrent que l'augmentation de l'épaisseur se traduit principalement par une augmentation de l'absorption dans la partie basse du spectre (Figure 9). Pour l'épaisseur de 160 mm, la comparaison entre calcul et mesure directe par la méthode standard ISO 10534-2 montre un bon accord, la différence observée étant inférieure à la variation entre les différents arrangements sur toute la bande de fréquence. L'effet de la fraction volumique de feuillage sur l'absorption acoustique en condition arrière de mur rigide est présenté à la figure 10 pour un échantillon d'épaisseur de 160 mm. Ces résultats sont calculés à partir des matrices  $[T]$  déterminées expérimentalement. À épaisseur de feuillage donnée, l'augmentation de la fraction volumique de feuillage entre 1% et 5% accroît de manière importante l'absorption acoustique sur la bande de fréquence 200-1 000 Hz.

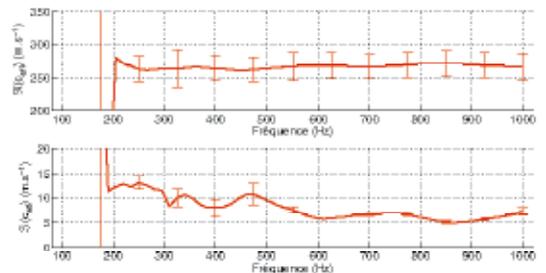


Fig. 5 : Échantillon de fusain japonais d'épaisseur 80 mm et de fraction volumique 3%. Parties réelle et imaginaire de la vitesse du son effective en fonction de la fréquence. Trait plein et barres d'erreur : valeur moyenne et écart-type des mesures sur les quatre arrangements

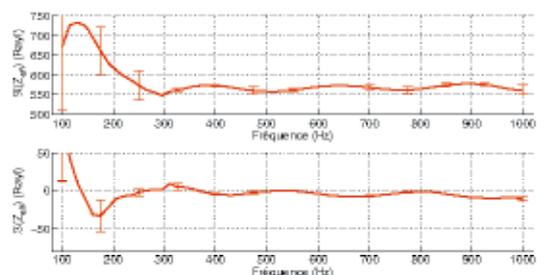


Fig. 6 : Échantillon de fusain japonais d'épaisseur 80 mm et de fraction volumique 3%. Parties réelle et imaginaire de l'impédance caractéristique effective en fonction de la fréquence. Trait plein et barres d'erreur : valeur moyenne et écart-type des mesures sur les quatre arrangements

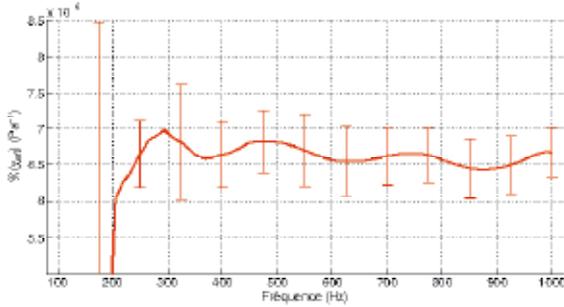


Fig. 7 : Échantillon de fusain japonais d'épaisseur 80 mm et de fraction volumique 3%. Partie réelle de la compressibilité effective en fonction de la fréquence. Trait plein et barres d'erreur : valeur moyenne et écart-type des mesures sur les quatre arrangements

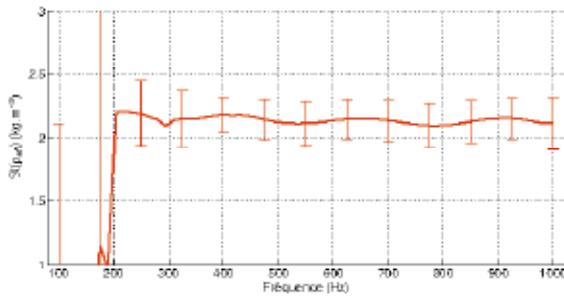


Fig. 8 : Échantillon de fusain japonais d'épaisseur 80 mm et de fraction volumique 3%. Masse volumique effective en fonction de la fréquence. Trait plein et barres d'erreur : valeur moyenne et écart-type des mesures sur les quatre arrangements

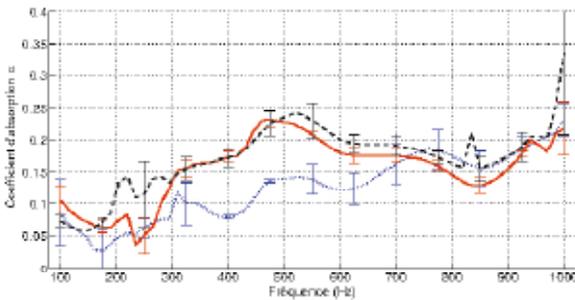


Fig. 9 : Coefficient d'absorption acoustique d'échantillons de fusain japonais de fraction volumique 3% en condition arrière de mur rigide. Échantillon de 160 mm d'épaisseur : valeurs mesurées suivant la méthode standard ISO 10534-2 (trait plein orange) et calculée à partir de la matrice de transfert [T] (tirets noirs). Échantillon de 80 mm d'épaisseur : valeur calculée (pointillés bleus). Traits et barres d'erreur : valeur moyenne et écart-type des mesures sur les quatre arrangements

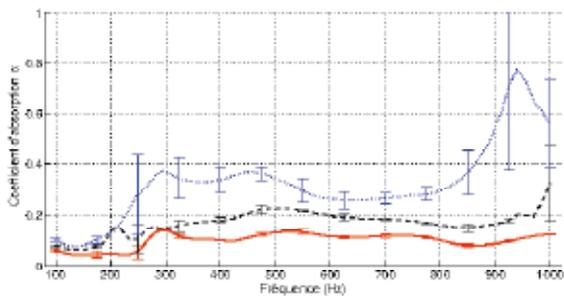


Fig. 10 : Coefficient d'absorption acoustique d'échantillons de fusain japonais de 160 mm d'épaisseur en condition arrière de mur rigide pour différentes fractions volumiques de feuillage : 1% (trait plein orange), 3% (tirets noirs) et 5% (pointillés bleus). Traits et barres d'erreur : valeur moyenne et écart-type des mesures sur les quatre arrangements

### Caractérisation acoustique du substrat

Les figures 11 et 12 présentent l'évolution des valeurs effectives de la vitesse du son et de l'impédance caractéristique du substrat de perlite avec la fréquence. La partie réelle de la vitesse du son effective augmente de façon monotone de 80 m/s à 135 m/s dans la bande de fréquence 100-1 000 Hz. Le substrat se comporte comme un milieu dispersif présentant une vitesse du son 3 à 4 fois inférieure à la vitesse du son dans l'air. Le substrat présente des pertes internes élevées caractérisées par un rapport partie imaginaire de la vitesse du son sur partie réelle variant entre 33% et 75%. L'écart-type est beaucoup plus faible pour les mesures réalisées sur les échantillons de substrat que pour celles effectuées sur les échantillons de feuillage. Le coefficient d'absorption acoustique en condition arrière de mur rigide est présenté à la figure 13 pour deux échantillons de perlite d'épaisseur 80 mm et 160 mm. Il présente des résonances à 430 Hz (resp. 200 Hz) pour l'échantillon d'épaisseur 80 mm (resp. 160 mm) qui correspondent approximativement à des résonances d'épaisseur en quart de longueur d'onde de l'échantillon.

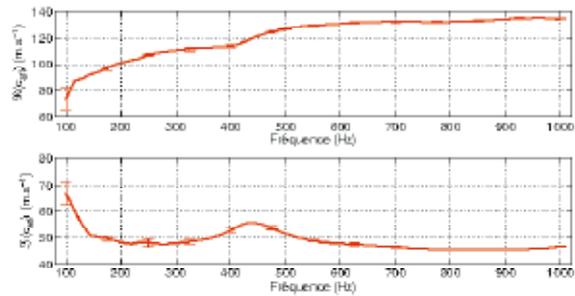


Fig. 11 : Échantillon de perlite d'épaisseur 80 mm. Parties réelle et imaginaire de la vitesse du son effective en fonction de la fréquence. Trait plein et barres d'erreur : valeur moyenne et écart-type des mesures sur les quatre arrangements

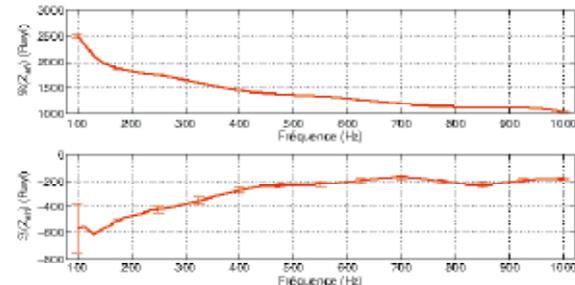


Fig. 12 : Échantillon de perlite d'épaisseur 80 mm. Parties réelle et imaginaire de l'impédance caractéristique effective en fonction de la fréquence. Trait plein et barres d'erreur : valeur moyenne et écart-type des mesures sur les quatre arrangements

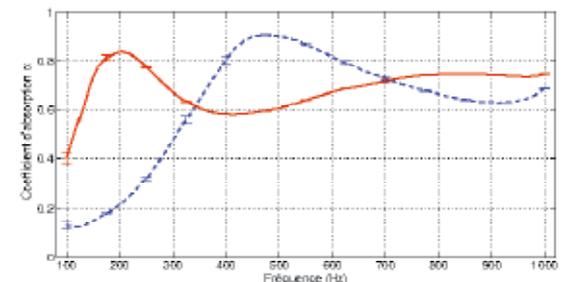


Fig. 13 : Coefficient d'absorption acoustique d'échantillons de perlite en condition arrière de mur rigide. Tirets bleu : échantillon d'épaisseur 80 mm ; trait plein rouge : échantillon d'épaisseur 80 mm. Traits et barres d'erreur : valeur moyenne et écart-type des mesures sur les quatre arrangements

## Caractérisation acoustique de la superposition de feuillage et de substrat

Le cas d'un échantillon de 160 mm d'épaisseur constitué par la superposition de 80 mm de feuillage (fusain japonais de fraction volumique 3%) et de 80 mm de substrat (perlite) est à présent considéré. La figure 14 compare les valeurs du coefficient d'absorption acoustique en condition arrière de mur rigide obtenues par deux méthodes : 1) la mesure de la matrice  $[T]$  de l'échantillon, superposant feuillage et substrat ; 2) la multiplication des matrices  $[T]$  correspondant à chaque échantillon de feuillage isolé et de substrat. Dans les deux cas, le coefficient d'absorption est calculé à l'aide de l'équation (9).

Un bon accord est obtenu sur l'ensemble de la gamme de fréquences. Ce résultat montre que la caractérisation séparée des propriétés effectives des éléments d'un mur végétalisé peut être utilisée pour prédire et optimiser les propriétés acoustiques de la structure globale.

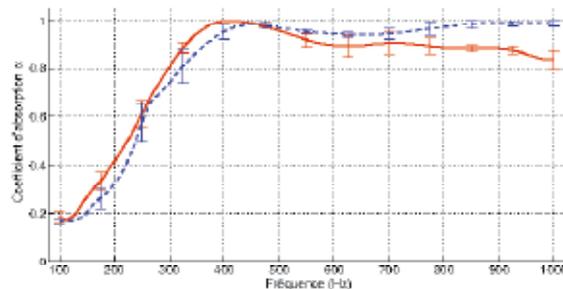


Fig. 14 : Coefficient d'absorption acoustique d'une superposition de feuillage et de substrat en condition arrière de mur rigide. Tirets bleus : mesure de la matrice  $[T]$  de l'échantillon; trait plein rouge : multiplication des matrices  $[T]$  correspondant à chaque élément. Traits et barres d'erreur : valeur moyenne et écart-type des mesures sur les quatre arrangements

## Conclusions

Un dispositif expérimental utilisant un tube d'impédance a été conçu et développé pour caractériser les propriétés effectives (vitesse du son, impédance caractéristique) d'échantillons de feuillage et de substrat. Entre 200 Hz et 1 000 Hz, le feuillage de fusain japonais se comporte comme un milieu non dispersif avec, par rapport à l'air, une vitesse du son réduite et une impédance caractéristique augmentée. Le substrat de perlite est dispersif avec une vitesse du son (resp. impédance caractéristique) effective 3 à 5 fois plus faible (resp. plus élevée) que celle de l'air. Les pertes internes atteignent quelques % dans le feuillage et quelques dizaines de % dans le substrat. Un bon accord est obtenu entre mesures et calculs à partir des matrices de transfert sur toute la bande de fréquence étudiée pour les échantillons de feuillage, les échantillons de substrat et les échantillons superposant feuillage et substrat. Ainsi, la caractérisation des propriétés effectives d'échantillons isolés de feuillage et de substrat peut être utilisée pour prédire et optimiser les propriétés d'absorption acoustique de mur végétalisés.

## Remerciements

Ce travail a été soutenu par l'ADEME, le Groupe HEI-ISA-ISEN et la Région Hauts de France (Nord Pas-de-Calais).

\*Les auteurs remercient Christian Granger, Gérard Haw, Charles Croëne de l'EMN/ISEN et Nicolas Dauchez de l'UTC pour leurs apports dans la réalisation de ces travaux.

## Références bibliographiques

- [1] M. Manso, J. Castro-Gomes, Green wall systems: A review of their characteristics, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 41, 863-871 (2015)
- [2] J. Y. Jeon, P. J. Lee, Y. H. Kim, Technical Report on Identification of acoustic properties of ground and vegetation, HOSANNA project report (2011)
- [3] T. V. Renterghem, B. Altreuther, J. Defrance, K. Attenborough, S. Taherzadeh, I. Bashir, Y. Smyrnova, C. Cheal, H. Yang, J. Kang, K. Horoshenkov, A. Khan, Technical Report on Acoustical shielding by edges and shrubs; HOSANNA project report (2012)
- [4] K. Horoshenkov, H. Benkreira, A. Khan, S. Taherzadeh, J. Kang, T. V. Renterghem, H. Yang, Y. Smyrnova, C. Cheal, D. Botteldooren, L. Ding, Technical Report on Theoretical models and/or empirical formulae for predicting acoustic performance of vegetation relating to application in an urban context, HOSANNA project report (2013)
- [5] International Standard ISO 10534-2: Determination of sound absorption coefficient and impedance in Impedance tube, Part 2: Transfer-function method, (1998)
- [6] International Standard ISO 354: Measurement of sound absorption in a reverberation room, (2003)
- [7] K.V. Horoshenkov, A. Khan, H. Benkreira, Acoustics properties of low growing plants, *J. Acoust. Soc. Am.* 133, 2554-2565 (2013)
- [8] H. Seok, J. Yang, C. Cheal, Random-incidence absorption and scattering coefficients of vegetation, *Acta Acust. United Acust.* 99, 379-388 (2013)
- [9] Z. Azkora, 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)
- [10] International Standard ISO 10140-2: Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 2: Measurement of airborne sound insulation, (2010)
- [11] 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)
- [12] P. A. Chabriac, E. Gourdon, P. Gle, A. Fabbri, H. Lenormand, Agricultural by-products for building insulation: Acoustical characterization and modeling to predict micro-structural parameters, *Construct. Build. Mater.* 112, 158-167 (2016)
- [13] 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)
- [14] 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)