

# CFA/VISHNO 2016

## **Caractérisation acoustique et vibratoire d'échantillons inhomogènes de types feuillage ou substrat**

E. Attal, N. Côte, G. Haw, C. Granger et B. Dubus  
IEMN - UMR CNRS 8520 - Département ISEN, 41 Boulevard Vauban, 59046 Lille,  
France  
[emmanuel.atal@isen.fr](mailto:emmanuel.atal@isen.fr)



LE MANS

Outre leur rendu esthétique, les parois végétalisées sont une alternative permettant d'améliorer la qualité de l'air en ville et de réduire les nuisances sonores. Des études acoustiques récentes ont montré le rôle essentiel joué par le substrat dans l'absorption acoustique de parois végétalisées. La contribution du feuillage à l'absorption acoustique a également été caractérisée sans que cet effet soit relié aux nombreux travaux réalisés sur la vibration de feuilles et de plantes. Cet article présente deux expérimentations visant à établir un lien entre les mesures acoustiques globales et les phénomènes acoustiques et vibratoires intrinsèques au feuillage. D'une part, un tube à ondes stationnaires couplant les mesures acoustiques microphoniques classiques (suivant les normes ISO 10534-1 et ISO 10534-2) et vibratoires par vibrométrie laser à balayage à l'intérieur du tube dans la bande 100 Hz-1 kHz. Ce dispositif permet de mesurer simultanément les paramètres acoustiques (absorption, réflexion et transmission) et le champ vibratoire pour des échantillons inhomogènes. D'autre part une caractérisation acoustique en tube d'impédance par la méthode des deux cavités qui permet de déterminer la matrice de transfert de l'échantillon, puis de déduire les constantes acoustiques effectives du milieu et les paramètres acoustiques de la paroi. Ces deux méthodes sont mises en œuvre sur des échantillons de fusain japonais présentant des fractions volumiques variables. Les résultats expérimentaux sont présentés et analysés pour identifier l'apport de chaque méthode.

## 1 Introduction

Les nuisances sonores en ville sont devenues une préoccupation majeure des riverains. Plusieurs études ont démontré que les murs végétalisés contribuent à la réduction du bruit en ville [1, 2]. Un mur végétal est un système composé d'une structure métallique assurant le maintien du système, d'un substrat qui alimente les végétaux, du couvert végétal et d'un système d'arrosage. Une lame d'air sépare le mur porteur et le mur végétal contribuant à l'aération et à la désolidarisation du système. Différents auteurs ont montré que l'atténuation du bruit est principalement due à la composition du substrat qui vient alimenter la plante [3, 4, 6].

La nature de la plante (taille, porosité, nervures, etc...) influe également sur l'absorption acoustique qui peut atteindre 0,6 aux fréquences situées entre 450 Hz et 1000 Hz, mais qui reste relativement faible aux fréquences inférieures (absorption moyenne inférieure à 0,3) [4].

La combinaison du substrat avec le couvert végétal montre bien une réelle contribution du couvert végétal sur l'absorption acoustique [4, 3, 7]. Ces caractérisations acoustiques sont réalisées en salle réverbérante [8, 9], ou en tube de Kundt [10].

La vibration des feuilles a également fait l'objet de caractérisations vibratoires utilisant un vibromètre à effet doppler [11], des accéléromètres [12], ou encore une caméra rapide associée à un traitement par une méthode de flux optique [13]. Ces caractérisations vibratoires sont effectuées soit en salle anéchoïque, soit dans une salle normale. D'autres caractérisations ont été réalisées en tube de Kundt pour mesurer les coefficients d'absorption et réflexion acoustiques à partir de mesures vibratoires par modulation locale de l'indice de réfraction associée à l'onde acoustique [14]. Malgré tous ces résultats, peu de liens ont été établis entre les mesures acoustiques globales (absorption, réflexion, transmission) et les mesures vibratoires locales sur des plantes.

Ce document présente un dispositif expérimental utilisant un tube de Kundt couplé à un vibromètre laser à balayage permettant de réaliser simultanément sur un même échantillon des mesures acoustiques et

vibratoires. Ce dispositif expérimental est décrit dans la seconde partie de cet article. Sa mise en œuvre pour la caractérisation acoustique et vibratoire de feuillage est détaillée dans la troisième partie.

## 2 Procédure expérimentale

### 2.1 Dispositif expérimental

Un banc expérimental permettant d'effectuer à la fois des mesures acoustiques et vibratoires sur des feuillages a été mis en place. La photo correspondant à ce montage est représentée à la Figure 1. La particularité de ce dispositif est de coupler un tube à impédance et un vibromètre laser à balayage. Le tube à impédance est en acier inoxydable et de section circulaire (1,90 m de long et de 15 mm d'épaisseur). Le diamètre interne est de 192 mm.

Une des extrémités du tube contient un élément cylindrique en PVC où sont répartis sur un même plan quatre hauts-parleurs large-bande identique (de type Visaton FRS) de 50 mm de diamètre. Cette extrémité est également munie d'un trou central fermé par un monocle en verre blanc de 10 mm d'épaisseur qui permet le passage du faisceau laser pour cartographier la vitesse vibratoire de l'échantillon.

L'autre extrémité contient un piston rigide en Téflon de 61 mm d'épaisseur et de même section que le tube. Il peut être déplacé le long du tube. La Figure 2 présente le porte échantillon en Ertalon de 160 mm contenant le feuillage qui est ensuite introduit dans le tube pour les expérimentations acoustiques.

Les mesures de la pression acoustique sont réalisées avec trois microphones électrostatiques de marque Sennheiser de type MKE 2P de 3,8 mm de diamètre. Deux de ces microphones situés respectivement à 80 et 90 cm du bout du tube (côté piston), permettent d'obtenir les coefficients de réflexion et d'absorption, l'impédance de surface, ainsi que les pressions incidentes et réfléchies, suivant la norme ISO 10534-2 [10]. Le troisième microphone, localisé au centre du piston est utilisé pour obtenir les paramètres de la matrice de transfert  $[T]$  dont est déduite la transmission acoustique, suivant la méthode mise en place par

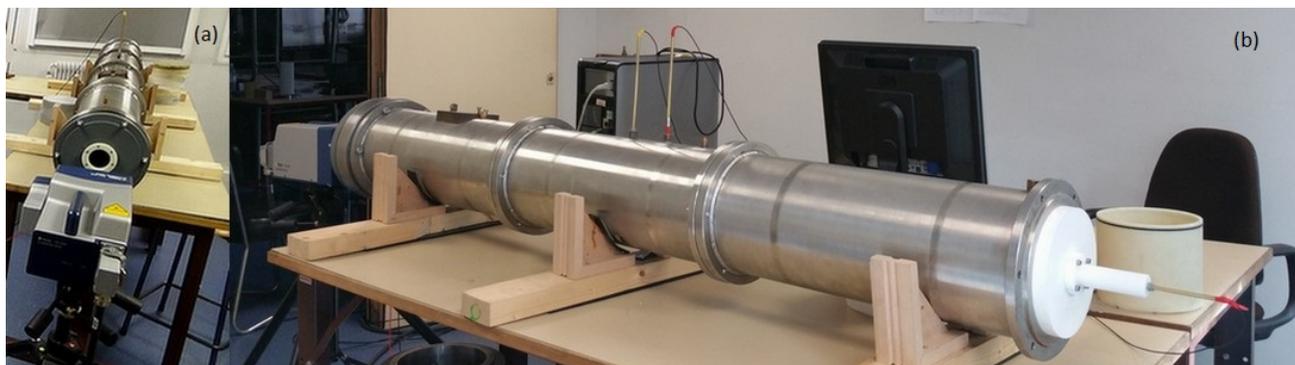


FIGURE 1 – Tube de Kundt couplé au vibromètre laser à balayage pour les caractérisations acoustiques et vibratoires

Salissou *et al* [15, 16]. Il permet également de mesurer le champ de pression à la surface de l'échantillon. Les trois microphones sont reliés à trois entrées d'une carte son (RME-Fireface 802). Ce dernier est connecté à un ordinateur qui contrôle les entrées/sorties du système. Le signal d'excitation est envoyé depuis le générateur qui commande le vibromètre laser à balayage vers un amplificateur (Bruel et Kjaer de type 2706). Les mesures acoustiques sont effectuées en utilisant l'hypothèse d'onde plane, ce qui limite la plage fréquentielle de mesure à la bande [100 – 1000] Hz. Ces limites dépendent essentiellement des dimensions du tube et des espacements entre les différents éléments du tube.



FIGURE 2 – Porte échantillon de 16 cm contenant le fusain (a), puis introduction dans le tube (b)

## 2.2 Méthode de mesure

Le schéma de principe de la mesure acoustique est présenté à la Figure 3. La procédure expérimentale commence par une correction en amplitude et phase des trois microphones, suivant la norme ISO 10534-2 [10]. Ensuite, les mesures des fonctions de transfert  $H_{12}$  entre les microphones 1 et 2 puis  $H_{13}$  entre les microphones 1 et 3 sont réalisées suivant la méthode mise en place par Salissou [15]. Ces fonctions de transfert sont obtenues avec une excitation de type sinus glissant. Les paramètres de la matrice de transfert [T] sont déduits des mesures et servent à identifier la célérité  $c_{mat}$ , la compressibilité  $\chi_{mat}$  et la masse volumique effective  $\rho_{mat}$  ainsi que l'impédance caractéristique du feuillage  $Z_{mat}$ .

Tout d'abord, à partir des fonctions de transfert

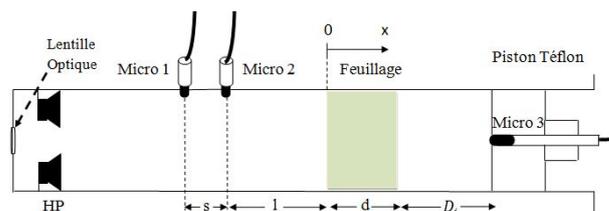


FIGURE 3 – Schéma de principe des mesures des paramètres intrinsèques et extrinsèques acoustiques par la méthode à deux cavités mise en place par Salissou [15]

$H_{12}$  et  $H_{13}$ , les conditions aux limites sont calculées en pression et vitesse ( $p_i(x)$  et  $v_i(x)$  en  $x = 0$  et  $x = d$ ) pour deux épaisseurs de cavités différentes ( $i = 1, 2$ ). De ces valeurs de champs, les éléments de la matrice [T] sont déduits à partir des relations :

$$T_{11} = \frac{p_1(0)v_2(d) - p_2(0)v_1(d)}{p_1(d)v_2(d) - p_2(d)v_1(d)} \quad (1)$$

$$T_{12} = \frac{p_2(0)p_1(d) - p_1(0)p_2(d)}{p_1(d)v_2(d) - p_2(d)v_1(d)} \quad (2)$$

$$T_{21} = \frac{v_1(0)v_2(d) - v_2(0)v_1(d)}{p_1(d)v_2(d) - p_2(d)v_1(d)} \quad (3)$$

$$T_{22} = \frac{p_1(d)v_2(0) - p_2(d)v_1(0)}{p_1(d)v_2(d) - p_2(d)v_1(d)} \quad (4)$$

Enfin, la matrice de transfert d'une couche de matériau homogène et symétrique d'épaisseur  $d$  est donnée par le système (5). Il est supposé que cette matrice de transfert peut être appliquée dans le domaine de fréquence étudié où les longueurs d'ondes sont très supérieures à la taille des éléments constituant du feuillage.

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

où  $d$ ,  $f$ ,  $k_{mat}$  et  $Z_{mat}$  sont respectivement l'épaisseur de l'échantillon, la fréquence, le nombre d'onde effectif, l'impédance caractéristique effective du feuillage. Ces

paramètres effectifs sont donc identifiés à partir des équations suivantes

$$c_{mat} = \frac{2\pi fd}{\arccos(T_{11})} \quad (6)$$

$$Z_{mat} = \sqrt{\frac{T_{12}}{T_{21}}} \quad (7)$$

Ces deux paramètres permettent alors d'obtenir la masse volumique effective  $\rho_{mat}$  et le module de compressibilité effectif  $\chi_{mat}$  via les équations (8) et (9), respectivement :

$$\rho_{mat} = \frac{|Z_{mat}|}{\Re(c_{mat})} \quad (8)$$

$$\chi_{mat} = \frac{1}{|Z_{mat}|\Re(c_{mat})} \quad (9)$$

Le coefficient de réflexion en condition de face arrière rigide  $r_{rigide}$  obtenu depuis les paramètres de la matrice de transfert est obtenu à partir de l'équation (10). L'utilisation de la méthode des deux microphones donne le même coefficient, en appliquant l'équation (11). Le coefficient d'absorption se déduit à partir de l'équation (12).

$$r_{rigide} = \frac{T_{11} - \rho_0 c_0 T_{21}}{T_{11} + \rho_0 c_0 T_{21}} \quad (10)$$

$$r_{rigide} = e^{2jkl} \frac{H_{12} e^{jks} - 1}{1 - H_{12} e^{-jks}} \quad (11)$$

$$\alpha_{rigide} = 1 - |r_{rigide}|^2 \quad (12)$$

où  $\rho_0$  représente la densité de l'air,  $c_0$ , la célérité du son dans l'air,  $l$ , en [m] représente la distance entre le microphone le plus proche de l'échantillon,  $s$  en [m] l'espacement entre les deux microphones,  $k$  en [ $rad.m^{-1}$ ], le nombre d'onde et  $H_{12}$  la fonction de transfert complexe entre le microphone 2 et le microphone 1.

## 3 Résultats

### 3.1 Caractérisation acoustique et vibratoire du feuillage

Les caractérisations couplées acoustique et vibratoire sont réalisées sur un échantillon de fusain japonais en condition de face arrière rigide. L'épaisseur de l'échantillon est de 38 cm et la fraction volumique de feuillage (rapport du volume de feuillage au volume total de l'échantillon) de 5 %. La Figure 4 présente les variations du coefficient de réflexion (amplitude et phase) et du coefficient d'absorption en fonction de la fréquence pour trois arrangements différents du même échantillon. De manière générale, le coefficient d'absorption augmente sur l'ensemble de la gamme de fréquence, variant de 0,2 à 100 Hz à 0,8-0,9 à 1000 Hz. Ces valeurs sont comparables aux coefficients d'absorption les plus élevés obtenus par Horoshenkov et al [4] pour des échantillons de plantes d'épaisseurs et de volumes relatifs similaires. L'influence de l'arrangement du feuillage sur le coefficient d'absorption est limitée.

La variation de l'amplitude de la vitesse vibratoire normale à la surface avec la fréquence est présentée à la Figure 5 en sept points de la surface. Les pics de résonances régulièrement espacés correspondent aux modes de résonance de la colonne d'air. Deux comportements différents sont observés i) au-dessus de 400 Hz, les amplitudes mesurées aux différents points conservent un rapport de proportionnalité à peu près constant ii) en-dessous de 400 Hz, les amplitudes vibratoires varient indépendamment les unes des autres. Ce résultat suggère que la vibration du feuillage est dominée par

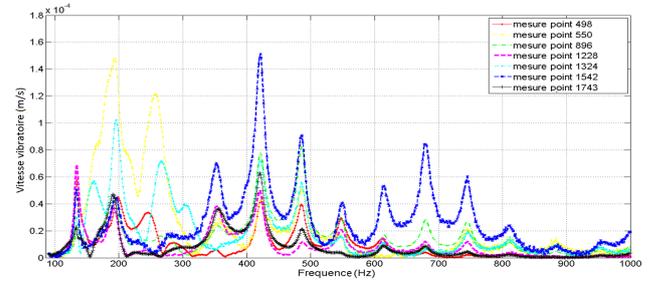


FIGURE 5 – Échantillon de feuilles de fusain japonais de 38 cm d'épaisseur. Module de la vitesse vibratoire en fonction de la fréquence en 7 points de la surface à l'intérieur du tube.

la vibration locale des sous-structures (branches, feuilles) dans la partie basse du spectre et par une vibration globale associée au couplage acousto-mécanique entre l'air et le feuillage dans la partie haute. Le champ de déplacement de la surface mesuré à 200, 421 et 745 Hz (Figure 6) semble confirmer cette interprétation.

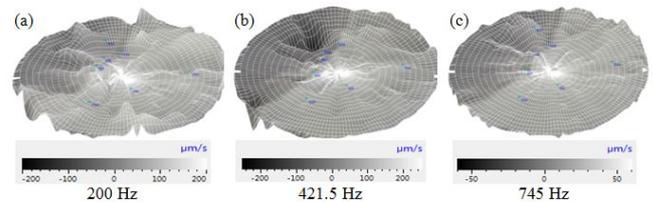


FIGURE 6 – Champ de déplacement associées aux vitesses vibratoires pour 38 cm d'épaisseur de feuilles de fusain japonais à l'intérieur du tube, aux fréquences (a) 200, (b) 421,5 et (c) 745 Hz.

### 3.2 Caractérisation intrinsèque d'échantillons de feuillage

Les échantillons de fusain japonais étudiés dans cette partie présentent trois fraction volumiques de feuillage, 1 %, 3 % et 5 %, et une épaisseur unique de 16 cm. Les coefficients de réflexion et d'amortissement sont caractérisés en condition de face arrière rigide par la méthode ISO 10534-2 à deux microphones [10]. La mesure est réalisée sur 5 arrangements différents du même échantillon. Les valeurs moyennes et écart-types des coefficients de réflexion (amplitude et phase) et d'amortissement mesurés en fonction de la fréquence pour les trois fractions volumiques de feuillage sont présentés à la figure 7. L'augmentation de la fraction volumique de feuillage se traduit par une augmentation de l'amortissement sur l'ensemble de la gamme de fréquence.

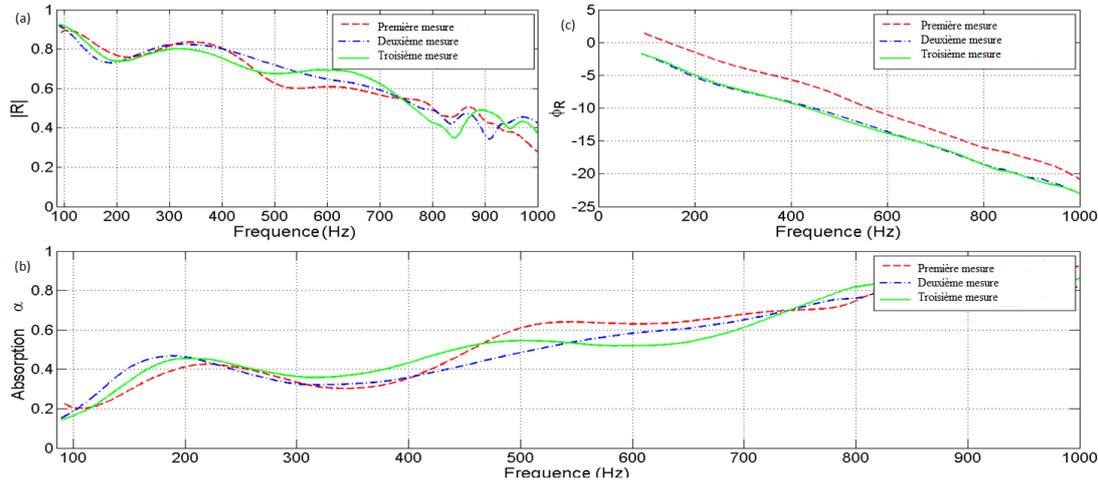


FIGURE 4 – Échantillon de feuilles de fusain de 38 cm d'épaisseur. Module du coefficient de réflexion (a), phase du coefficient de réflexion (b) coefficient d'absorption (c) en fonction de la fréquence.

La mesure de la matrice  $[T]$  des échantillons est réalisée par la méthode à trois microphones [18] avec deux cavités arrières de valeurs respectives 6,8 et 10,8 cm. Les paramètres effectifs du milieu ( $c_{mat}$ ,  $Z_{mat}$ ,  $\rho_{mat}$  et  $\chi_{mat}$ ) sont déduits à partir des équations (6) à (9). Les valeurs de ces paramètres à la fréquence de 300 Hz sont données dans le Tableau 1. L'augmentation de la fraction volumique de feuillage se traduit par une diminution importante de la vitesse de phase (de 334,7 à 225  $m.s^{-1}$ ) et par une augmentation de l'atténuation et de l'impédance acoustique. L'échantillon ayant une fraction volumique de feuillage de 5 % présente une masse volumique effective 2,4 fois plus importante que celle de l'air ( $2,97 kg.m^{-3}$  au lieu de  $1,2 kg.m^{-3}$ ) et une compressibilité adiabatique légèrement plus faible ( $6,94.10^{-6} Pa^{-1}$  au lieu de  $7,75.10^{-6} Pa^{-1}$ ). En basse fréquence, la présence du feuillage se manifeste donc principalement sous la forme d'une masse ajoutée correspondant à la mise en vibration des feuilles par l'onde acoustique durant sa propagation, et les pertes d'énergie associées à ces vibrations contribuent au coefficient d'amortissement de l'onde acoustique. De plus la vitesse de phase de 225  $m.s^{-1}$  implique l'existence d'un mode guidé d'ordre supérieur au dessus de 700 Hz. Ce mode pourrait expliquer l'augmentation apparente de l'amortissement observé sur la Figure 7. La Figure 8 présente la variation de l'absorption acoustique (moyenne et écart-type) en terminaison rigide calculée à partir des paramètres de la matrice  $[T]$ . Un accord satisfaisant est observé sur toute la bande de fréquence et pour toutes les fractions volumiques avec les résultats de la mesure directe (Figure. 7). Ce résultat confirme l'intérêt de la méthode de mesure à deux cavités qui permet à la fois de caractériser des propriétés acoustiques effectives de l'échantillon et de déduire avec une précision satisfaisante les coefficients de réflexion et l'amortissement. De plus, la connaissance des propriétés effectives apporte des informations utiles pour identifier plus précisément les phénomènes physiques à l'origine des paramètres acoustiques mesurés.

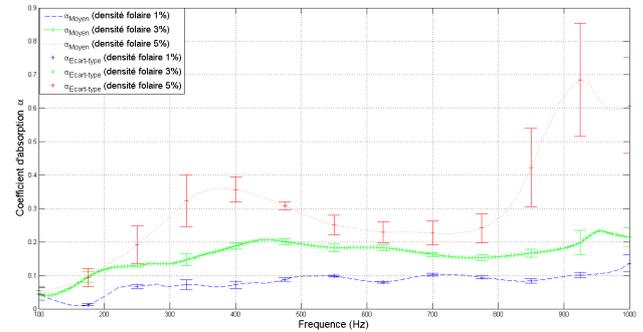


FIGURE 7 – Moyenne et écart type du coefficient de l'absorption acoustique en fonction de la fréquence mesurées en terminaison rigide par la méthode des deux microphones [10] pour différentes fractions volumiques de feuillage

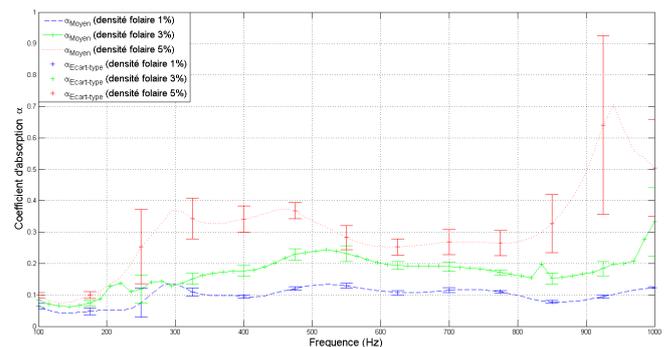


FIGURE 8 – Moyenne et écart type du coefficient de l'absorption acoustique en terminaison rigide déduit des paramètres  $[T]$

$d_{foliaire}$	0%	1%	3%	5%
$\Re(c_{mat})$ (m/s)	334,7	[265,6-274,6]	[238,7-251,1]	[212,8-234,1]
$\Im(c_{mat})$ (m/s)	0,024	[6,118-7,299]	[6,569-9,882]	[6,735-10,16]
$ Z_{mat} $ (rayl)	405,4	[472,2-493,1]	[551,6,2-582,1]	[607,2-676,7]
$\rho_{mat}$	1,21	[1,77-1,79]	[2,31-2,32]	[2,85-2,89]
$\chi_{mat}$ ( $Pa^{-1}$ )	$7,3610^{-6}$	$[7,4-8]10^{-6}$	$[6,8-7,6]10^{-6}$	$[6,3-7,7]10^{-6}$

TABLEAU 1 – Paramètres acoustiques effectifs du feuillage pour différentes fractions volumiques à 300 Hz

## 4 Conclusion

Deux méthodes de caractérisation ont été développées avec l'objectif de mieux comprendre les phénomènes physiques à l'origine des propriétés acoustiques des végétaux. La mesure de la vibration de la surface de l'échantillon par vibrométrie laser à balayage montre une augmentation de la cohérence spatiale de la vibration du feuillage au delà de 400 Hz qui ne se traduit pas de manière évidente dans les paramètres acoustiques. Pour mieux exploiter ces données, il conviendra de normaliser les vitesses mesurées à la pression incidente pour éliminer la contribution des modes de résonances de la colonne d'air qui parasitent la mesure. La méthode à trois microphones et deux cavités permet la détermination des constantes acoustiques effectives du feuillage (vitesse de phase complexe, impédance complexe, masse volumique, compressibilité adiabatique) dont peuvent être déduits les paramètres acoustiques de la paroi. Elle fournit ainsi des informations supplémentaires permettant de mieux appréhender les phénomènes physiques au sein du feuillage qui déterminent les propriétés acoustiques des parois végétalisées.

## Remerciements

Ce travail a été soutenu par l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise d'Énergie (ADEME), le Groupe HEI-ISA-ISEN et l'Institut du Développement Durable et Responsable (IDDR) de l'université catholique de Lille ainsi que la région Nord Pas de Calais-Picardie. Les auteurs remercient également Charles Croëgne, Clément Vasseur et Nicolas Dauchez pour leurs conseils avisés.

## Références

- [1] J. Kang, H. Yang, Y. Smyrnova, C. Cheal, K. Attenborough, S. Taherzadeh, T.V. Renterghem, D. Botteldooren, L. Ding, K.V. Horoshenkov, H. Benkreira and A. Khan, Theoretical models and / or empirical formulae for predicting acoustic performance of vegetation relating to application in an urban context, *rapport HOSANNA - Holistic and sustainable abatement of noise by optimized combinations of natural and artificial means*, (2013).
- [2] D. Lunain, J.C. Caspal et E. Consolen, Synthèse et bilan d'activité 2010-2013, ORSI RP3-S10006 PLUME CETE Méditerranée, (2013).
- [3] H. Seok, J. Yang et C. Cheal, Random-incidence absorption and scattering coefficients of vegetation, *Acustica/acta acustica* **99(3)**, 379-388 (2013).
- [4] K.V. Horoshenkov, A. Khan, H. Benkreira Acoustics properties of low growing plants, *J. Acoust. Soc. Am* **133(5)**, 2554-2565 (2013).
- [5] C. Cheal, H. Seok Yang, J. Kang, Y. Smyrnova, Experimental Study on the Effects of Vegetation Coverage and Soil Depth and Water Content on Sound Absorption, *6th Forum Acusticum, Aalborg, Danemark*, 875-879 (2011).
- [6] H. Benkreira, K.V. Horoshenkov, A. Khan, A. Mandon et R. Rohr, The effect of drying on the acoustic absorption of novel, *European Drying Conference - EuroDrying* (2011).
- [7] J.Y. Jeon and P.J. Lee and Y.H. Kim, Identification of acoustic properties of ground and vegetation, *rapport HOSANNA - Holistic and sustainable abatement of noise by optimized combinations of natural and artificial means* (2011).
- [8] International Standard ISO 354 : Measurement of sound absorption in a reverberation room, (2003)
- [9] International Standard ISO 17497-1 : Sound scattering properties of surfaces, Part 1 : Measurement of the random incidence scattering coefficient in a reverberation room, (2012)
- [10] International Standard ISO 10534-2 : Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tube, Part 2 : Transfer-function method (1998).
- [11] M.J.M. Martens, Physical methods in plant science, Laser doppler vibrometer measurements of leaves, *Springer-Verlag*, H.F. Linskens and J.F. Jackson (1990)
- [12] S.H. Tang, P.P. Ong et H.S. Woon, Monte Carlo simulation of sound propagation through leafy foliage using experimentally obtained leaf resonance parameters, *J. Acoust. Soc. Jpn* **80(6)**, 1740-1744 (1986).
- [13] C.D. Loughian, J.M. Allain, E.D. Langre et B. Moulia Caractérisation vibratoire d'une plante : Expériences et calculs, *20ème Congrès de Mécanique, Besançon, France* (2011).
- [14] S. Vanlanduit, J. Vanherzeele, P. Guillaume et G.D. Sitter, Absorption measurement of acoustic materials using a scanning laser doppler vibrometer, *J. Acoust. Soc. Am* **117(3)**, 1168-1172, March (2005).
- [15] Y. Salissou, R. Panneton et O. Doutres, Complement to standard method for measuring normal incidence sound transmission loss with three microphones *J. Acoust. Soc. Am* **131(3)**, 216-222, March (2012).
- [16] O. Doutres, Y. Salissou, N. Atalla et R. Panneton, Evaluation of the acoustic and non-acoustic properties of sound absorbing materials using a three-microphone impedance tube, *Applied Acoustics* **71(6)**, 506-509 (2010).