

Estimation expérimentale des propriétés acoustiques de surfaces végétalisées : influences de la variabilité spatiale et de la configuration de mesure

Gwenaél Guillaume,
 Benoît Gauvreau
 et Philippe L'Hermite
 LUNAM Université – IFSTTAR
 Route de Bouaye
 CS4
 44344 Bouguenais
 E-mail : gwenael.guillaume@ifsttar.fr
 benoit.gauvreau@ifsttar.fr
 philippe.lhermitte@ifsttar.fr

Résumé

La part du végétal en milieu urbain constitue une voie de réflexion à part entière puisqu'elle peut, a priori, répondre conjointement aux problématiques sociétale et environnementale associées aux conséquences de l'étalement urbain. Le projet VegDUD (2010-2014), supporté par l'Agence nationale de la recherche (ANR), porte précisément sur l'évaluation du rôle du végétal dans le développement urbain durable. Ce projet pluridisciplinaire présente un volet expérimental dans lequel des techniques de mesure adaptées à la compréhension des phénomènes physiques induits par la présence du végétal sont mises en place. Ainsi, des mesures in situ d'impédance acoustique ont été réalisées et ont permis d'estimer les paramètres nécessaires en entrée des modèles de propagation acoustique. L'étude proposée ici présente les influences de la variabilité spatiale et de la configuration du dispositif expérimental sur l'estimation des propriétés acoustiques de telles infrastructures (résistance spécifique au passage de l'air, épaisseur et impédance) et, par la suite, de leurs effets sur les niveaux sonores.

De nombreuses méthodes ont été développées pour modéliser la propagation du son en milieu extérieur. Ces méthodes sont de plus en plus précises [1,2,3] et la validité des données d'entrée de ces modèles (e.g. paramètres de sol, conditions météorologiques...) constitue un enjeu majeur.

Le travail expérimental présenté dans ce papier a été réalisé dans le cadre du projet pluridisciplinaire VegDUD (2010-2014) portant sur l'évaluation du rôle du végétal dans le développement urbain durable. L'évaluation de l'impact de surfaces végétales en façades et/ou en toitures de bâtiments requiert de caractériser les propriétés acoustiques de tels revêtements. Ainsi, une méthode de mesure *in situ* de l'impédance acoustique, développée à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR) pour caractériser des revêtements de chaussée [4,5], a été adaptée pour déterminer l'impédance acoustique d'une façade et d'une toiture végétales. La présente étude se focalise sur la variabilité spatiale des mesures (sans considérer leur variabilité temporelle, e.g. saisonnière) et leur influence sur les prévisions acoustiques.

Dans un premier temps, le principe du dispositif expérimental permettant d'estimer, *in situ*, l'impédance acoustique de surfaces artificielles ou naturelles est décrit. Dans un second temps, les valeurs de la résistance spécifique au passage de l'air et celles de l'épaisseur équivalente obtenues pour trois types de surfaces (green de terrain de golf, façade et toiture végétalisées) sont données et analysées. Dans un dernier temps, des simulations numériques visant à quantifier l'effet de la dispersion des paramètres de surface sur les niveaux sonores sont présentées à travers une application en espace ouvert et une configuration urbaine.

Principe du dispositif expérimental

Le dispositif (figure 1) est constitué d'une source sonore¹ S, proche d'une surface dont l'impédance acoustique est à caractériser, et de deux microphones² R₁ et R₂ (sur une même normale à la surface), l'un sur la surface (R₁), l'autre à proximité de cette surface (R₂), tous deux à une distance horizontale d_{SR} = 4 m de la source.

1. haut-parleur de type NAVSOUND HPF 1922 émettant un bruit blanc
 2. microphones Brüel & Kjaer 1=2 pouce de type 4190 L-001

Cette configuration de mesure a été optimisée de manière à obtenir une figure interférentielle marquée (*ground dip*) et permettre ainsi la détermination des propriétés de la surface. En effet, le choix d'une distance d_{SR} entre source et récepteurs impose l'angle d'incidence. Pour les mesures en toitures (figure 1a), la source et le microphone R₂ sont placés à une hauteur h_S = h_{R2} = 0,60 m du sol. Dans le cas de la caractérisation d'une façade (figure 1b), l'ensemble est placé à une hauteur h_S = h_{R1} = h_{R2} du sol suffisamment grande pour pouvoir supprimer toutes les contributions du sol (réflexion acoustique) par un fenêtrage temporel adapté lors du post-traitement des mesures ; la source et le microphone R₂ sont situés à une distance D_{R2} = 0,60 m de la façade. Ces deux géométries induisent un angle d'incidence en réflexion spéculaire de 81,5°.

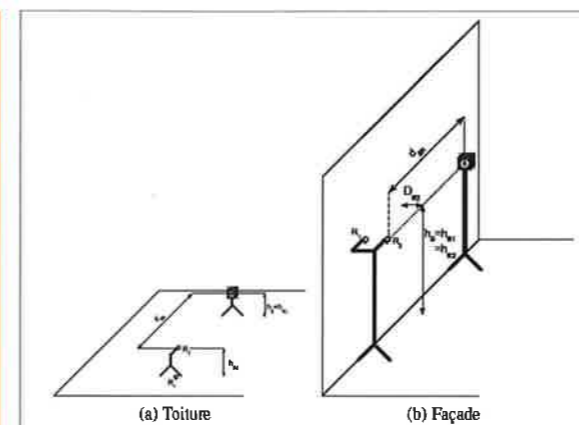


Fig. 1 : Configurations des mesures d'impédance (a) de toitures et (b) de façades

Globalement, la méthode est basée sur celle développée par Bérengier et al. [4] et Carpinello et al. [5], qui consiste à mesurer le rapport des énergies acoustiques mesurées en chacun des microphones (i.e. le rapport des modules des spectres au carré). Compte tenu de la configuration géométrique, l'énergie acoustique mesurée au point R₁ est constituée uniquement du champ direct, tandis que l'énergie acoustique mesurée au point R₂ correspond à la somme du champ direct et du champ réfléchi par la surface, qui se traduit par des figures interférentielles. Ce rapport est ensuite comparé à la courbe d'atténuation théorique sur la base du modèle de propagation d'Ingard-Rudnick [6], en utilisant par exemple le modèle d'impédance de Delany-Bazley [7]. Le « calage » du modèle d'impédance – en jouant sur les valeurs de la résistance au passage de l'air σ et de l'épaisseur e – permet de déterminer, au final, l'absorption acoustique de la surface active (i.e. la surface comprise dans le plan de réflexion) du matériau.

Le haut-parleur et les deux microphones sont connectés à un système Pulse Bruël & Kjaer de type LAN-XI 3160-A-4/2 (figure 2) configuré pour la mesure de réponses impulsionnelles (RI), avec un moyennage d'environ 40 échantillons afin de réduire l'impact des bruits ambiants. Les deux RI obtenues sont ensuite exportées dans une routine en langage de programmation Scilab (version 4.1) pour la réalisation du fenêtrage temporel. Une fenêtre temporelle (droite-cosinus) de 10 ms est donc appliquée sur les deux RI afin de ne conserver que la partie « utile » du signal (champ direct

et champ réfléchi). Les spectres H_{R1} et H_{R2} des RI mesurées en chacun des microphones sont ensuite calculés en appliquant des transformées de Fourier (pour une largeur de bande [100-6400] Hz), afin de calculer la transmissibilité, à savoir le rapport des énergies |H_{R2}|²/|H_{R1}|².

Ce rapport des énergies – fonction de la fréquence – est ensuite exporté dans un fichier pour être utilisé dans la procédure de calage du modèle d'impédance sous HP Basic. Cette procédure de calage est réalisée manuellement par un opérateur (ou automatiquement), en agissant sur les valeurs de la résistance spécifique au passage de l'air σ et de l'épaisseur e .

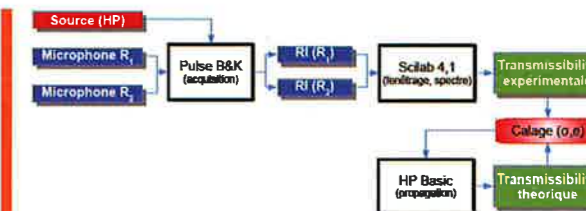


Fig. 2 : Principe de la procédure de mesures d'impédance acoustique d'une surface : acquisition, traitement du signal, calage du modèle d'impédance

Sites expérimentaux

Le protocole expérimental a été appliqué sur trois sites : un green de terrain de golf (figures 3a et 3b), une façade végétale (figure 3d) et une toiture végétalisée (figure 3c). Le choix d'un terrain tel qu'un green de golf a été motivé par l'homogénéité *a priori* de ce type de surface (voir discussion *infra*). La toiture végétale consiste en un lit de pouzzolane planté de sedum, tandis que la façade, très hétérogène, est constituée de végétaux variés (bergenias, campanules, géraniums vivaces, érigeron, coquelourdes, lamiers, graminées, heuchères...) disposés en patchwork.



Fig. 3 : Sites expérimentaux : (a)-(b) green du terrain de golf, (c) toiture végétalisée et (d) façade végétale

Pour chacune de ces surfaces (i.e. sol, toit et façade), plusieurs mesures ont été réalisées en déplaçant le système expérimental (i.e. la source et le mât microphonique), au-dessus ou le long de la surface (respectivement pour le green de golf et la toiture ou pour la façade), afin d'en caractériser différentes zones et d'estimer ainsi la variabilité spatiale des résultats. Dans le cadre des séries de mesures sur le green de golf, plusieurs géométries du système de mesure ont été testées, en prenant soin de conserver un point d'incidence au sol en réflexion spéculaire identique pour chaque géométrie.

Résultats expérimentaux

Milieu ouvert

Les résultats du traitement des mesures au-dessus du green de golf sont présentés au tableau 1 pour quatre géométries de mesure. Pour chaque géométrie, cinq mesures ont été effectuées. La lecture horizontale du tableau 1 permet de considérer la dispersion des résultats en fonction de la géométrie de mesure. Les écarts observés peuvent être attribués aux « empreintes » de mesure qui diffèrent entre chaque géométrie. Ils peuvent cependant être également associés à des hétérogénéités du sol. Cette variabilité spatiale des résultats peut être analysée par une lecture verticale du tableau 1. Les valeurs moyennes et les écarts-types (également présentés sous forme de pourcentage par rapport à la valeur moyenne) illustrent la forte dispersion spatiale des paramètres de sol, même pour un sol de ce type, *a priori* parfaitement homogène. La valeur particulièrement élevée de certains écarts-types pour ce terrain peut être expliquée par une hygrométrie hétérogène due au système d'arrosage.

Milieu urbain

Le tableau 2 donne les valeurs de la résistance spécifique au passage de l'air σ et de l'épaisseur équivalente e estimées pour chacune des surfaces végétales urbaines.

Géométrie	$d_{SR}=4,0\text{ m}$ $h_S=h_R=0,6\text{ m}$		$d_{SR}=1,5\text{ m}$ $h_S=h_R=0,4\text{ m}$		$d_{SR}=1,5\text{ m}$ $h_S=h_R=0,5\text{ m}$		$d_{SR}=2,0\text{ m}$ $h_S=h_R=0,5\text{ m}$	
	σ	e	σ	e	σ	e	σ	e
Mes. 1	650	0,007	450	0,006	290	0,008	570	0,007
Mes. 2	670	0,007	570	0,006	260	0,009	710	0,006
Mes. 3	960	0,006	570	0,006	280	0,009	700	0,006
Mes. 4	1020	0,006	430	0,006	300	0,008	700	0,006
Mes. 5	1000	0,005	360	0,007	290	0,009	610	0,006
Moyenne	860	0,0062	476	0,0062	284	0,0086	658	0,0062
Écart-type	184 (21,0%)	0,0008 (12,9%)	92 (19,0%)	0,0004 (6,5%)	15 (5%)	0,0005 (5,8%)	64 (9,0%)	0,0004 (6,5%)

Tabl. 1 : Valeurs de la résistance spécifique au passage de l'air σ (en kN.s.m^{-4}) et de l'épaisseur équivalente e (en m) estimées pour le green de golf.

La dispersion spatiale des résultats, particulièrement visible dans le cas de la façade végétale, traduit le caractère très hétérogène de ces surfaces.

Surface	Toiture		Façade	
	σ	e	σ	e
Mes. 1	300	0,020	60	0,037
Mes. 2	400	0,020	20	0,040
Mes. 3	420	0,021	30	0,039
Mes. 4	400	0,012	80	0,033
Mes. 5	400	0,022	60	0,039
Mes. 6	500	0,010	80	0,035
Moyenne	403	0,0175	55	0,037
Écart-type	64 (15,9%)	0,0051 (29,1%)	23 (41,6%)	0,002 (5,4%)

Tabl. 2 : Valeurs de la résistance spécifique au passage de l'air σ (en kN.s.m^{-4}) et de l'épaisseur équivalente e (en m) estimées pour la toiture et la façade végétalisées.

Résultats numériques

Milieu ouvert

Le champ de pression acoustique pour une configuration comme celle décrite à la figure 1a peut être déterminé analytiquement par la formule de Weyl-Van der Pol [8]. La figure 4 illustre la dispersion des spectres d'atténuation relatifs à un microphone de référence avec les paramètres de sol donnés au tableau 1. Ces résultats sont obtenus pour une source située à une hauteur de 0,05 m, à un microphone de mesure distant de 100 m de la source, à 2 m du sol. Le microphone de référence est placé à 1 m de la source et à 2 m du sol. Pour chaque géométrie du système expérimental, la valeur moyenne (-) plus ou moins deux fois l'écart-type (·) sont présentés (zones colorisées).

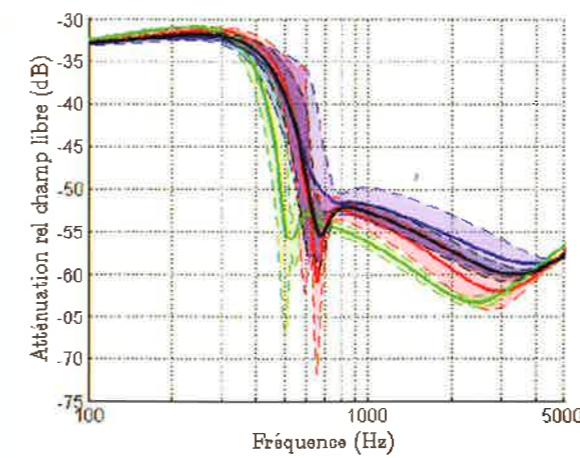


Fig. 4 : Spectres d'atténuation relatifs à un microphone de référence pour une distance de propagation de 100 m avec les paramètres de sol du green de golf estimés à partir des quatre séries de mesure : (-) $d_{SR} = 4,0\text{ m}$ et $h_S = h_R = 0,6\text{ m}$, (·) $d_{SR} = 1,5\text{ m}$ et $h_S = h_R = 0,4\text{ m}$, () $d_{SR} = 1,5\text{ m}$ et $h_S = h_R = 0,5\text{ m}$, (·) $d_{SR} = 2,0\text{ m}$ et $h_S = h_R = 0,5\text{ m}$

Ces résultats montrent que l'incertitude de mesure des paramètres d'impédance peut conduire, dès 100 m, à des écarts significatifs des niveaux sonores (par exemple de l'ordre de 15-20 dB à 600 Hz pour la géométrie S-R considérée).

Milieu urbain

Des simulations (2D) TLM [3,9] ont été réalisées avec le domaine de calcul illustré à la figure 5. Cette configuration représente un axe routier de type 2 x 2 voies enclavé entre deux écrans anti-bruit. Quatre sources, situées à une hauteur de 0,5 m du sol, sont placées entre deux écrans et émettent des impulsions gaussiennes asynchroniquement. Quatre microphones enregistrent le champ de pression tous les 5 m au-delà d'un des écrans. Le sol est considéré parfaitement réfléchissant. La figure 6 présente les spectres d'atténuation relatifs au champ libre obtenus aux microphones avec un écran rigide ou un écran végétalisé pour lequel la valeur de la résistance spécifique au passage de l'air est égale aux deux valeurs extrêmes estimées pour une façade végétalisée (tableau 2), i.e. $\sigma = 20\text{ kN.s.m}^{-4}$ et $\sigma = 80\text{ kN.s.m}^{-4}$. Ces prévisions numériques permettent de quantifier les écarts en termes de niveaux sonores en fonction du type de matériau et de la distance à la source. Les écarts entre des surfaces absorbantes (végétales) et des surfaces réfléchissantes (minérales) sont, comme attendu, faibles en basse fréquence et augmentent avec la fréquence. Ils deviennent significatifs à partir de 400 Hz, y compris entre les deux types de surfaces végétales. Ces résultats sont présentés jusqu'à 700 Hz. Des prévisions complémentaires seront présentées lors de la communication orale.



Fig. 5 : Configuration des simulations TLM avec double écran

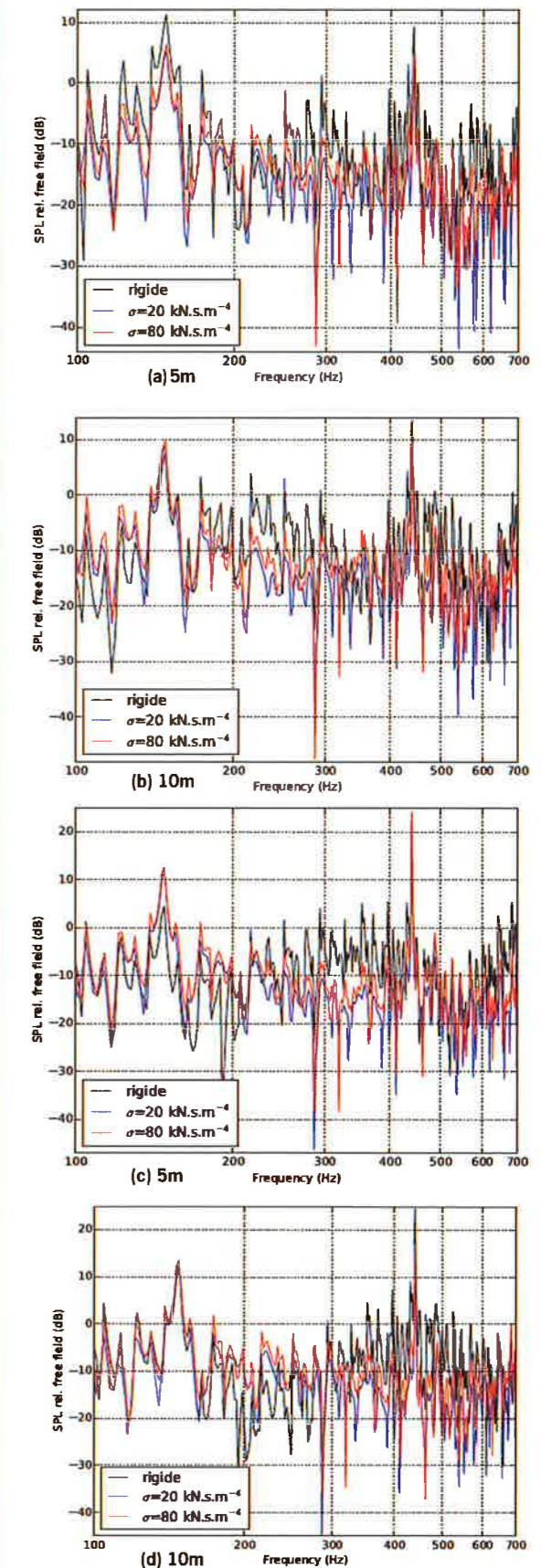


Fig. 6 = Spectres d'atténuation relatifs au champ libre à une distance de (a) 5 m, (b) 10 m, (c) 15 m et (d) 20 m (-) pour un écran rigide, ainsi que pour des écrans avec une résistance spécifique au passage de l'air (-) $\sigma = 20\text{ kN.s.m}^{-4}$ et (·) $\sigma = 80\text{ kN.s.m}^{-4}$.

Conclusion

Ce papier décrit une procédure d'estimation des paramètres acoustiques de surfaces (e.g. sol, façade, toiture...) à partir d'une mesure à deux microphones.

Cette procédure a été employée pour évaluer la résistance spécifique au passage de l'air et l'épaisseur équivalente d'un green de terrain de golf, d'une façade végétale ainsi que d'une toiture végétalisée. Les résultats expérimentaux montrent l'effet de la géométrie du système expérimental et de la variabilité spatiale des paramètres estimés. Par suite, des prévisions de niveaux sonores en espaces ouverts (méthode analytique) et urbains (méthode TLM) illustrent la dispersion obtenue en fonction des paramètres des matériaux à relativement courte distance. Cette étude montre l'importance de limiter l'incertitude des données d'entrée des modèles numériques employés pour la prévision des niveaux sonores.

Remerciements

Ce travail a bénéficié d'un support financier de l'Agence nationale de la recherche (ANR) sous la référence ANR-09-VILL-0007-02.

Références bibliographiques

- [1] C. Spa, J. Escolano, A. Garriga, *Semiempirical boundary conditions for the linearized acoustic Euler equations using Pseudo-Spectral Time-Domain methods*, *Applied Acoustics*, 72 :226–230, 2011
- [2] D. Dragna, P. Blanc-Benon, and F. Poisson, *Impulse propagation over a complex site : A comparison of experimental results and numerical predictions*. *Journal of the Acoustical Society of America*, 135(3) :1096–1105, March 2014
- [3] G. Guillaume, J. Picaut, G. Dutilleul, and B. Gauvreau, *Time-domain impedance formulation for transmission line matrix modelling of outdoor sound propagation*. *Journal of Sound and Vibration*, 330(26) :6467–6481, 2011
- [4] M. Bérengier and M. Garai, *A state-of-the-art of insitu measurement of the sound absorption coefficient of road pavements*. In *International Congress of Acoustics, Rome, Italia, 2001*
- [5] S. Carpinello, P. L'hermite, M. Bérengier, and G. Licitra, *A new method to measure the acoustic surface impedance outdoors*. *Radiation Protection Dosimetry*, 111(4) :363–367, 2004
- [6] U. Ingard, *On the reflection of a spherical sound wave from an infinite plane*, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 23(3) :329–335, 1951
- [7] M. E. Delany and E. N. Bazley, *Acoustical properties of fibrous absorbent materials*, *Applied Acoustics*, 3(2) :105–116, 1970
- [8] K. Attenborough, K.M. Li, and K.I. Horoshenkov, *Predicting Outdoor Sound*, Taylor & Francis, ISBN 9780419235101, UK, 2006
- [9] G. Guillaume and N. Fortin, *Optimized transmission line matrix model implementation for graphics processing units computing in built-up environment*, *Journal of Building Performance Simulation*, 7(6) :445–456, 2014