

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Comparaison de trois méthodes de mesure de l'absorption in situ

Gaëlle Benoit¹, Emmanuel Gourdon², Guillaume Dutilleux³

¹ Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois, Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement Normandie-Centre,
11 rue Laplace CS2912, F-41029 Blois Cedex, gaelle.benoit@developpement-durable.gouv.fr

² Laboratoire des Sciences de l'Habitat-Département Génie Civil et Bâtiment FRE CNRS 3237, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat,
rue Maurice Audin F-69518 Vaulx-en-Velin Cedex, gourdon@entpe.fr

³ ERA 32 "Acoustique" LCPC, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg, Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement Est,
11, rue Jean Mentelin F-67035 Strasbourg Cedex 2, guillaume.dutilleux@developpement-durable.gouv.fr

13 avril 2010

Dans le cadre de l'opération de recherche LCPC 11M061 "Prévoir le bruit en milieu urbain", trois méthodes de mesure du coefficient d'absorption in situ ont été comparées : la méthode de type ISO 13472-1, la méthode du doublet microphonique, et la méthode du doublet microphonique sans source. Un matériau de référence, une mousse polymère, a été choisi pour effectuer les premières comparaisons. Ce matériau absorbant et facile à manier a permis d'effectuer des mesures au tube d'impédance. Les résultats des mesures in situ ont donc pu être comparés aux résultats des mesures au tube d'impédance. Des mesures ont ensuite été réalisées sur des matériaux réfléchissants. Enfin, la répétabilité de la méthode du doublet microphonique sans source a été étudiée.

1 Introduction

Dans le cadre de la lutte contre le bruit des infrastructures de transport, nuisance quotidienne ressentie de plus en plus vivement par les populations voisines, les revêtements de chaussée peu bruyants constituent une solution de protection à la source qui peut venir en complément de solutions classiques du type écrans anti-bruit ou isolation phonique des façades, ou les remplacer lorsque celles-ci ne sont pas applicables.

Ces revêtements sont caractérisés par une absorption relativement forte ; malheureusement les performances de certains des revêtements peu bruyants, comme les revêtements drainants, semblent diminuer au bout de quelques années d'utilisation, en raison de leur colmatage progressif.

Des mesures régulières de l'absorption des revêtements pourraient aider à prévoir la diminution des performances acoustiques du revêtement. La méthode de mesure la plus utilisée pour évaluer ces performances est la méthode du tube de Kundt [1], qui nécessite cependant de prélever un échantillon du revêtement, une procédure lourde qui n'est pas toujours possible et qui ne rend pas compte de l'état global du revêtement sur site. Une méthode de mesure de l'absorption in situ est donc nécessaire.

Plusieurs méthodes de ce type existent [2, 3] ; certaines ont été comparées à la méthode du tube de Kundt [4], mais elles n'ont généralement pas été comparées entre elles. Dans ce but, des mesures ont été réalisées visant à comparer deux méthodes de mesure de l'impédance de surface et du coefficient d'absorption in situ avec la méthode du tube de Kundt sur matériaux absorbants et réfléchissants. Ces deux méthodes sont la

méthode du doublet microphonique et la méthode de type ISO 13472-1. Ces méthodes ont été choisies en raison de leur facilité d'utilisation et du matériel limité qu'elles nécessitent.

La première méthode du doublet microphonique a été proposée par Allard et Sieben [5] ; elle a fait l'objet de nombreuses variantes, dont une dédiée aux basses fréquences [6], une autre plus récente utilisant le bruit ambiant comme source [7]. Elle consiste à mesurer la fonction de transfert entre deux microphones situés au dessus de la surface testée et de remonter aux grandeurs acoustiques grâce à un modèle de propagation au dessus d'une surface. Cette méthode peut être réalisée avec un matériel limité, mais l'incertitude de mesure inhérente à chaque méthode peut mener à des erreurs relativement importantes sur les grandeurs recherchées [8].

La technique de soustraction a été proposée par [9] a été adaptée par [10] et est devenue une norme internationale, la norme ISO 13472-1 [11]. Grâce à la mesure de la réponse impulsionnelle en champ libre et de la réponse impulsionnelle globale, on isole par soustraction temporelle la réponse impulsionnelle du matériau, ce qui permet de calculer le coefficient de réflexion du matériau, et ainsi les autres grandeurs acoustiques. Cependant certaines difficultés sont apparues dans l'isolement de la réponse impulsionnelle du matériau grâce à la technique de soustraction.

Dans cette étude, la comparaison a d'abord été effectuée sur un matériau absorbant, une mousse polymère, choisie pour sa maniabilité. Par la suite, les méthodes ont également été appliquées à deux matériaux réfléchissants, un béton lisse et un revêtement de chaussée. Par ailleurs, les revêtements de chaussée

dans tous les états de leur cycle de vie étant la cible pour laquelle les méthodes sont expérimentées, cette étude s'est particulièrement intéressée à la mise au point d'une méthode optimale donnant des résultats satisfaisants à la fois sur matériaux absorbants et sur matériaux réfléchissants.

Une variante de la méthode de la fonction de transfert, le doublet microphonique sans source, proposée par Takahashi *et al.* [7], a également été testée; en effet cette méthode pourrait se révéler très utile en situation de mesure en circulation routière et donne des résultats tout à fait positifs au vu de sa simplicité.

2 Protocole expérimental

2.1 Méthode ISO 13472-1

On considère la propagation d'ondes sphériques en régime transitoire. Le système de mesure est présenté sur le schéma 1. Deux mesures sont réalisées; l'une avec le système haut-parleur-microphone tourné vers le ciel pour la mesure de la réponse impulsionnelle en champ libre, et une autre avec le système tourné vers le matériau testé pour la mesure de la réponse impulsionnelle globale. Une soustraction temporelle permet d'isoler la réponse impulsionnelle du matériau et de calculer le coefficient de réflexion après passage au domaine fréquentiel, puis l'impédance et l'absorption. Cette méthode permet d'obtenir des mesures valides sur la gamme de fréquences 250-4000Hz. Une mesure réalisée sur un matériau parfaitement réfléchissant sert de référence.

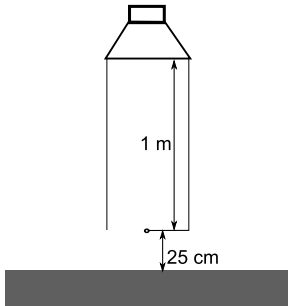


FIGURE 1 – Système de mesure de la méthode ISO 13472-1

Le système micro-haut-parleur est fixé par des tiges fines de fibre de carbone; le haut-parleur est disposé sur une échelle articulée permettant de régler les distances sol-microphone à la valeur de 25cm prescrite par la norme. La mesure de référence a été réalisée sur un béton lisse dans un hangar à très haut plafond, permettant d'identifier facilement la réponse en champ libre par rapport aux réflexions parasites.

2.2 Méthode du doublet microphonique

On considère que le régime est stationnaire; la source a été placée à incidence normale. Pour obtenir la fonction de transfert au dessus du matériau, deux mesures sont réalisées avec un seul microphone déplacé aux deux positions de mesure, pour éviter les problèmes de calibrage. Un modèle de propagation d'ondes sphériques au

dessus d'une surface plane [12] est inversé pour obtenir le coefficient d'absorption.

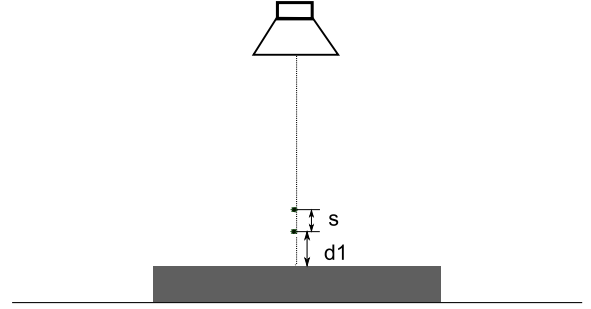


FIGURE 2 – Système de mesure de la méthode du doublet microphonique

Plusieurs configurations (d_1, s) (avec d_1 la hauteur du microphone bas et s l'écartement des microphones) ont été testées en plus de la configuration originale pour laquelle les microphones sont très proches du sol (cf. figure 2), de manière à obtenir des résultats valides à plus basses fréquences; les configurations (50mm,42.5mm), (50mm,68mm) et (50mm,85mm) ont donné des résultats assez proches de ceux du tube de Kundt. La fréquence optimale f_c d'une configuration étant définie par l'écartement des microphones par la relation $f_c = \frac{c}{4s}$, avec c la vitesse du son dans l'air et s l'écartement, et la fréquence d'indétermination $f_i = c/2s$, on peut considérer que la bande de fréquence valide pour une configuration est $[f_c/2; 3f_c/2]$. Il s'agit ensuite de combiner plusieurs configurations pour obtenir une mesure couvrant la gamme de fréquences choisie.

2.3 Méthode du doublet microphonique sans source

La méthode de Takahashi *et al* [7] est basée sur l'hypothèse d'un champ sonore incident diffus; par ailleurs le modèle de propagation considère des ondes planes.

Les auteurs partent de l'impédance de surface dépendant de l'angle d'incidence θ (M_a et M_b étant respectivement les positions des microphones haut et bas, avec d la hauteur du microphone bas et l l'espacement entre les deux microphones, et $H_{ab}(\theta, \omega) = \frac{p_b(\theta, \omega)}{p_a(\theta, \omega)}$ la fonction de transfert entre les microphones à l'angle d'incidence θ) :

$$Z_N(\theta, \omega) = \frac{\rho c}{\cos \theta} \times \dots$$

$$\frac{H_{ab}(\theta, \omega)(1 - e^{2jkl(l+d)\cos\theta}) - e^{jkl\cos\theta}(1 - e^{2jkd\cos\theta})}{H_{ab}(\theta, \omega)(1 + e^{2jkl(l+d)\cos\theta}) - e^{jkl\cos\theta}(1 + e^{2jkd\cos\theta})} \quad (1)$$

avec

$$\begin{cases} k & \text{le nombre d'onde,} \\ \rho & \text{la densité de l'air,} \\ c & \text{la vitesse du son dans l'air.} \end{cases}$$

La méthode consiste à utiliser, lorsque le bruit ambiant remplace une source de bruit contrôlée, des pressions moyennées sur le temps et l'angle d'incidence; le moyennage sur l'angle d'incidence est ramené à la

considération d'une seule incidence majoritaire : l'incidence normale.

L'expression de l'impédance de surface devient donc :

$$Z_{EA}(\omega) = \rho c \frac{H_{abEA}(\omega)(1 - e^{2jk(l+d)}) - e^{jkl}(1 - e^{2jkd})}{H_{abEA}(\omega)(1 + e^{2jk(l+d)}) - e^{jkl}(1 + e^{2jkd})} \quad (2)$$

EA signifiant "Environmental Anonymous" pour signaler le fait que la source utilisée est le bruit ambiant.

Il est donc ici nécessaire de revenir à la méthode classique de mesure avec deux microphones, qu'il faut calibrer entre eux. Une moyenne est effectuée sur 30 mesures d'une seconde.

Les mesures effectuées par les auteurs, qui montrent de bonnes corrélations entre les résultats des mesures réalisées dans des champs sonores différents sur une laine de roche et une laine de verre, ont été effectuées avec des microphones très proches l'un de l'autre (microphones collés) et très proches du sol.

Dans le cadre de cette étude, plusieurs configurations de mesure ont également été testées, mais la configuration donnant des résultats valides sur la bande de fréquences la plus large est la configuration originale.

3 Résultats obtenus

Remarque : les résultats sont présentés par bandes de tiers d'octave pour les méthodes du doublet microphonique et ISO 13472-1 ; pour la méthode du doublet microphonique sans source, ils sont donnés par bandes de fréquence de 100Hz.

3.1 Comparaison des méthodes sur la mousse polymère

On peut constater sur la figure 3 que la méthode ISO 13472-1 semble plus précise que la méthode du doublet microphonique à basses fréquences (configuration (50mm,85mm), plage de fréquences visée [500;1500]Hz), où cette dernière apparaît plus dispersée ; en revanche à moyennes fréquences la méthode du doublet microphonique semble plus proche de la méthode du tube d'impédance. Globalement les tendances des résultats obtenus avec les deux méthodes sont cependant très similaires.

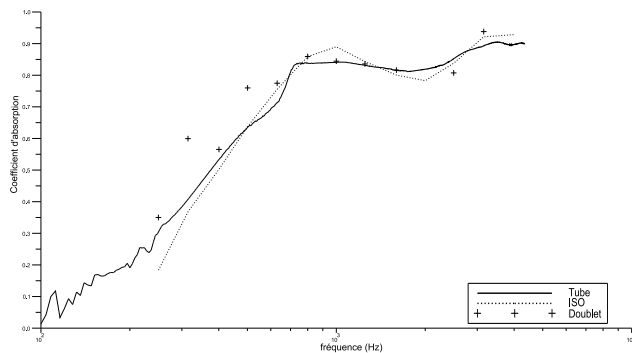


FIGURE 3 – Comparaison des méthodes ISO 13472-1, du doublet microphonique et du tube d'impédance sur mousse polymère

La figure 4 présente les résultats obtenus avec la méthode ISO 13472-1 et la méthode du doublet microphonique sans source ; la méthode du doublet microphonique sans source est ici plus proche de la mesure ISO à basses fréquences, jusqu'au premier pic, mais elle ne suit pas ensuite la tendance de la courbe ISO. On peut noter que malgré la simplicité de la méthode, le doublet microphonique sans source donne des résultats tout à fait cohérents et proches de ceux obtenus avec les autres méthodes, bien qu'un peu supérieurs. Par ailleurs, la répétabilité de la méthode a été étudiée ; l'écart-type calculé sur 30 mesures est inférieur à 0.03 (4.5% de la moyenne des mesures) dès 500Hz.

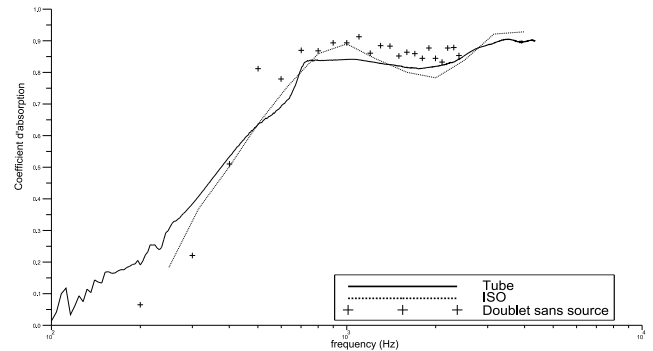


FIGURE 4 – Comparaison des méthodes ISO 13472-1, du doublet microphonique sans source et du tube d'impédance sur mousse polymère

3.2 Mesures sur matériau réfléchissant

3.2.1 Méthode ISO 13472-1

La méthode a été testée sur un revêtement réfléchissant ; les résultats obtenus sont présentés sur la figure 5. On observe plusieurs valeurs négatives, bien que assez faibles. Si on ramène à 0 les valeurs négatives, on obtient des résultats correspondant à ceux attendus pour un tel matériau.

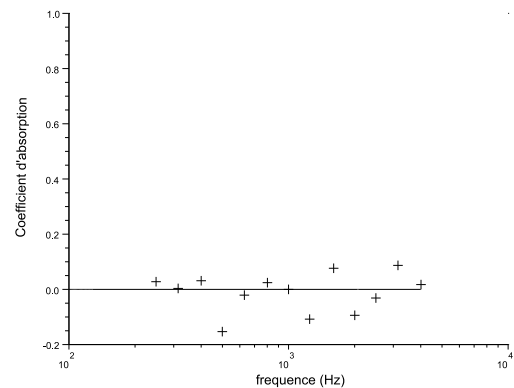


FIGURE 5 – Absorption d'un revêtement réfléchissant avec la méthode ISO 13472-1

3.2.2 Doublet microphonique

A nouveau plusieurs configurations ont été testées sur un linoléum peu absorbant ; à l'inverse des mesures sur matériau absorbant, il semble que les configurations donnant les résultats les plus cohérents (c'est-à-dire les

plus faibles) sont celles où le premier microphone est placé très près du sol.

Les courbes résultantes sont généralement en forme de cuvette, avec les résultats les plus faibles correspondant relativement à la plage de fréquences visée par l'écartement des microphones choisi, voire un peu décalés vers les basses fréquences (voir par exemple la configuration (5mm,57mm) sur la figure 6; la partie grisée signale la plage de fréquences visée par la configuration). Il est à nouveau nécessaire de faire les mesures avec plusieurs configurations et de combiner les résultats sur une gamme de fréquences plus large; on obtient ainsi un coefficient d'absorption compris entre 0.05 et 0.1.

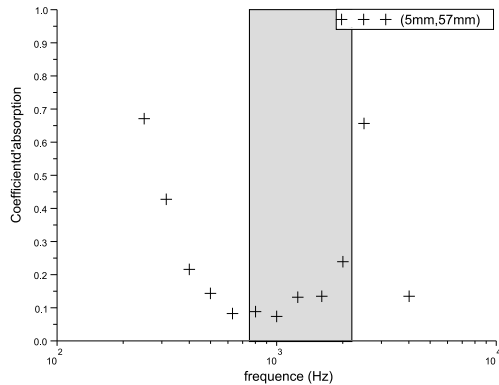


FIGURE 6 – Absorption d'un linoleum peu absorbant avec la méthode du doublet microphonique

Une mesure au tube d'impédance a été réalisée sur ce même matériau, donnant des résultats proches de 0.02 en moyenne. Il apparaît donc que bien que les résultats obtenus avec la méthode du doublet microphonique soient cohérents, ils surestiment à nouveau légèrement les résultats obtenus avec la méthode du tube d'impédance.

3.2.3 Doublet microphonique sans source

Trente mesures ont été réalisées avec la méthode du doublet microphonique sans source sur le même linoleum que pour la méthode du doublet microphonique classique. La moyenne des résultats est présentée sur la figure 7. Des mesures préliminaires ayant confirmé que comme dans le cas du matériau absorbant, un bruit de fond minimal était nécessaire à des mesures valides, une source de bruit rose a été utilisée, positionnée à distance des microphones.

Les résultats obtenus sont compris entre 0 et 0.1, assez proches de ceux obtenus avec la méthode du doublet microphonique classique, surestimant également ceux du tube d'impédance. L'écart-type est compris entre 0.09 à 900Hz et 0.22 à 1400Hz; il est en moyenne proche de 0.12; ces résultats, moins bons que sur la mousse polymère, montrent à nouveau la difficulté de réaliser des mesures précises sur un matériau peu absorbant.

4 Conclusion

Trois méthodes de mesures de l'absorption in situ ont été testées et comparées entre elles et avec la méthode

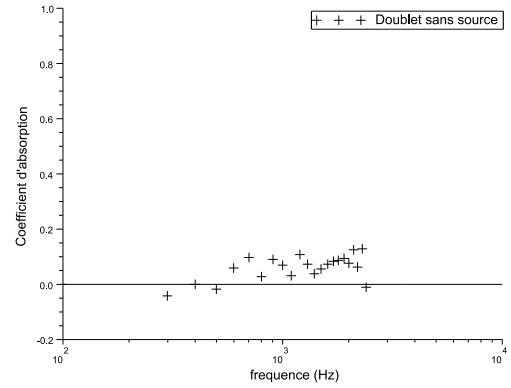


FIGURE 7 – Absorption d'un linoleum peu absorbant avec la méthode du doublet microphonique sans source

du tube d'impédance, sur une mousse polymère et sur des matériaux peu absorbants.

Sur la mousse polymère, les méthodes testées, la méthode ISO 13472-1 et la méthode du doublet microphonique avec et sans source donnent des résultats dont la tendance est très proche, et proche également de celle du tube d'impédance. La méthode ISO 13472-1 semble donner des résultats moins dispersés à basses fréquences; la méthode du doublet microphonique classique, en fonction des configurations de mesure utilisée, s'approche quant à elle plus de la méthode du tube d'impédance à moyennes fréquences. On pourrait obtenir d'encore meilleurs résultats, en particulier à basses fréquences, en effectuant un traitement des valeurs aberrantes, c'est-à-dire trop éloignées des autres et qui du fait "faussent" la moyenne obtenue.

Des résultats très cohérents ont également été obtenus sur des matériaux peu absorbants, si l'on excepte les valeurs négatives obtenues avec la méthode ISO 13472-1; en ce qui concerne la méthode du doublet microphonique, pour ces matériaux il semble que les meilleures configurations soient celles où le microphone bas reste proche du sol, avec à nouveau différents écartements pour élargir la gamme de fréquences utilisée. On a par ailleurs constaté qu'en augmentant la hauteur du premier microphone, la gamme de fréquences visée, à écartement constant, semble se décaler vers les basses fréquences. Enfin, pour cette méthode et sur un sol réfléchissant, des réflexions parasites non négligeables se produisent sur la source, ce qui ne permet pas d'obtenir des résultats précis.

Cet inconvénient est contourné avec la méthode du doublet microphonique sans source (variante de Takahashi [7]); plusieurs mesures ont été réalisées avec cette méthode, qui donne des résultats cohérents aussi bien sur matériaux absorbants que sur matériaux réfléchissants, malgré sa simplicité.

La meilleure configuration est celle où les microphones restent très proches l'un de l'autre et très proches du sol, ce qui peut être expliqué par la nature du champ sonore diffus utilisé comme source: si les microphones ne sont pas situés assez proches l'un de l'autre des caractéristiques différentes du champ incident peuvent devenir prédominantes, et donc ne plus convenir à une mesure de fonction de transfert. Par ailleurs un bruit de fond minimal semble nécessaire à de bonnes mesures.

Les mesures donnant cependant des résultats assez

variables, la répétabilité de cette méthode a été étudiée ; sur un matériau absorbant la répétabilité est très bonne, hormis à basses fréquences ; pour les matériaux plutôt réfléchissants, elle est moins bonne, bien que l'écart-type reste relativement faible. On retrouve ainsi la difficulté d'obtenir des mesures stables sur des matériaux pour lesquels l'absorption est très faible.

Remerciements

Les auteurs remercient l'opération de recherche LCPC 11M061 "Prévoir le bruit en milieu urbain" pour le financement de cette étude.

Références

- [1] T. Iwase, Y. Izumi, and R. Kawabata. A new measuring method for sound propagation constant by using sound tube without any air spaces back of a test material. In *Proc. Internoise 98*, Christchurch, New Zealand, 1998.
- [2] A.A. Syed. Acoustic impedance measurement system. In *Proc. Noise Con85.*, pages 93–98. Columbus (USA), 1985.
- [3] R. Lanoye, H.-E. de Bree, W. Lauriks, and G. Vermeir. A practical device to determine the reflection coefficient of acoustic materials in-situ based on a microflown and microphone sensor, 2004.
- [4] A.R. Barnard and M.D. Rao. A comparison of acoustics absorption coefficient measurements from the in-situ method with traditional methods. In *Noise-Con*, 2004.
- [5] J.F. Allard and B. Sieben. Measurements of acoustic impedance in a free field with 2 microphones and a spectrum analyser. *Journal of the Acoustical Society of America*, 77(4) :1617–1618, 1985.
- [6] J.-F. Allard. *Propagation of Sound in Porous Media*. Elsevier Science Publishers Ltd., Essex, 1993.
- [7] Y. Takahashi, T. Otsuru, and R. Tomiku. In situ measurements of surface impedance and absorption coefficients of porous materials using two microphones and ambient noise. *Applied Acoustics*, 66 :845–865, 2005.
- [8] R. Kruse. Effect and minimization of errors in in situ ground impedance measurements. *Applied Acoustics*, 69(10) :884–890, 2008.
- [9] E. Mommertz. Angle-dependent in situ measurement of reflection coefficients using a subtraction technique. *Applied Acoustics*, 46 :251–263, 1995.
- [10] M. Garai, M. Bérengier, P. Guidorzi, and P. L'Hermite. Procedure for measuring the sound absorption of road surfaces in situ. In *Internoise'98*, 1998.
- [11] ISO 13472-1. Acoustique - mesurage in situ des propriétés d'absorption acoustique des revêtements de chaussée. *Norme internationale*, Partie 1- Méthode de la surface étendue, 2002.
- [12] M. A. Nobile and S. I. Hayek. Acoustic propagation over an impedance plane. *Journal of the Acoustical Society of America*, 78(4) :1325–1336, 1985.