



**HAL**  
open science

## Evaluation des caractéristiques acoustiques d'une rue à partir de mesures

Alexis Billon, Judicaël Picaut

► **To cite this version:**

Alexis Billon, Judicaël Picaut. Evaluation des caractéristiques acoustiques d'une rue à partir de mesures. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. hal-00542589

**HAL Id: hal-00542589**

**<https://hal.science/hal-00542589v1>**

Submitted on 3 Dec 2010

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# 10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

## Evaluation des caractéristiques acoustiques d'une rue à partir de mesures

Alexis Billon<sup>1</sup>, Judicaël Picaut<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université de Liège, B28, B-4000 Liège, abillon@ulg.ac.be

<sup>2</sup>LCPC, Centre de Nantes, Division ESAR, Route de Bouaye - BP 4129 44341 Bouguenais Cedex

Les caractéristiques acoustiques des rues, tels que les coefficients d'absorption et de diffusion des façades et du sol, sont encore mal connues. En particulier, les façades sont constituées de nombreux matériaux différents et peuvent présenter des degrés de relief très variés suivant le style architectural rencontré. Dans cette étude, une méthode est proposée pour obtenir les valeurs de ces coefficients à partir de mesures *in situ*. Dans un premier temps, une loi empirique liant la variation du coefficient de diffusion à une variation d'absorption en termes de distribution spatiale de l'énergie est recherchée à l'aide d'un logiciel de tir de rayons. Cette loi permet alors de transformer un problème à deux variables (absorption, diffusion) en un problème à une seule variable (absorption équivalente) en fixant la valeur du coefficient d'absorption. Pour chaque bande de fréquence considérée, la valeur d'absorption équivalente minimisant l'erreur commise sur la distribution spatiale de l'énergie par rapport aux mesures est recherchée. Cette valeur associée à la loi empirique précédemment obtenue permet de tester différents couples de valeurs absorption/diffusion en termes de temps de réverbération mesurés. Suivant ce processus, le couple minimisant l'erreur à la fois sur la distribution spatiale de l'énergie et le temps de réverbération est obtenu. Dans cette étude, cette méthode est appliquée à une rue de type Haussmannienne. L'erreur commise est alors de l'ordre de la précision des mesures. De plus, les valeurs obtenues mettent en avant que, pour ce type de rue, la diffusion se produisant aux parois ne peut être négligée.

## 1 Introduction

En acoustique des salles, les conditions de réflexion aux parois, et leur conséquence sur la propagation acoustique dans le domaine d'étude, ont largement été étudiées [1,2]. Les travaux se sont en particulier intéressés à déterminer les propriétés d'absorption et de diffusion des parois. En revanche, en acoustique urbaine, ces propriétés sont mal connues. Néanmoins, Lyon [3] a montré que la diffusion se produisant aux façades, due aux reliefs et différents matériaux rencontrés, ne peut être négligée. Ainsi, pour permettre des prévisions fiables de la propagation sonore en milieu urbain, une meilleure connaissance des valeurs des coefficients de diffusion et d'absorption pour des rues typiques est nécessaire.

La mesure en laboratoire des coefficients d'absorption [4] et de diffusion [5] des façades est plus difficile à mettre en œuvre en raison de la taille des surfaces considérées. Par ailleurs, la mesure *in situ* est limitée en terme fréquentiel et sensible au bruit de l'environnement [6]. Des méthodes indirectes, mêlant mesures et simulations, ont donc été développées.

En comparant des réponses impulsionnelles mesurées sur des maquettes de façades à un modèle simplifié prenant en compte les réflexions spéculaires et diffuses, Ismail et Oldham [7] ont obtenu des coefficients de diffusion inférieurs à 0,3 pour les différentes configurations étudiées et pour les bandes de fréquence testées. Néanmoins, la méthode développée est limitée à de faibles valeurs du coefficient de diffusion et requiert au préalable la connaissance de l'absorption de façades.

Onaga et Rindel [8] ont montré quant à eux que, pour des rues ayant un rapport hauteur sur largeur inférieur à 1, le temps de réverbération peut être évalué au travers de la relation d'Eyring [9] pour de faibles valeurs de l'absorption

apparente (celle-ci étant la somme des coefficients de diffusion et d'absorption). En utilisant des mesures de temps de réverbération sur maquette [10] et *in situ* [11], Onaga et Rindel [8] ont obtenu des absorptions apparentes comprises entre 0,15 et 0,2, correspondant donc à des réflexions sur les façades majoritairement spéculaires.

Dans le présent article, nous présentons une méthode permettant de déterminer simultanément les valeurs des coefficients d'absorption et de diffusion. Cette méthode est basée sur une comparaison de résultats de mesures (distribution du niveau sonore et temps de réverbération) avec des simulations numériques réalisées par une approche de tir de rayons. La méthode brute consisterait à tester tous les couples de coefficients (absorption et diffusion) pour un domaine donné, mais serait très coûteuse en termes de temps de calcul. Dans notre approche, une relation empirique est d'abord recherchée afin de transformer le problème à deux variables (absorption et diffusion) en un problème où seule l'absorption est inconnue (la diffusion étant fixée). Cette méthode est appliquée à une rue de type Haussmannienne du centre de Nantes [12].

La section 2 présente les résultats expérimentaux utilisés et les paramètres numériques. La procédure permettant d'obtenir les valeurs des coefficients d'absorption et de diffusion est ensuite décrite au sein de la section 3 ; les résultats obtenus en section 4 sont ensuite discutés en section 5. Enfin, la section 5 conclut cet article.

## 2 Configuration étudiée

### 2.1 Données expérimentales

Les mesures ont été effectuées au sein d'une rue piétonne du centre de Nantes, la rue Kervégan (figure 1) de 105 m de long, 18m de hauteur et 7,90 m de largeur dont la

section est pratiquement constante sur toute sa longueur. Le sol est constitué de pavés et les façades, de type Haussmannienne, de pierre et vitrage. L'absorption et la diffusion sont supposées constantes le long de la rue. La source est située à 1,65 m de hauteur au centre de la rue et 50 m de son extrémité (position S2). Les mesures ont été réalisées tous les deux mètres dans l'axe de la rue à une hauteur de 1,2 m. A chaque position, le temps de réverbération (estimé de -5 à -35 dB et noté  $RT_{exp}$ ), et le niveau de pression sonore normalisé par une référence à 6 m de la source (noté  $SPL_{exp}$ ) ont été mesurés pour cinq répétitions et par bande de tiers d'octave de 500 Hz à 5000 Hz. De plus, de manière à se focaliser uniquement sur l'effet de la morphologie de la rue, les effets de l'absorption atmosphérique sont compensés. Pour plus de détails sur cette expérimentation, le lecteur pourra se reporter à [12].

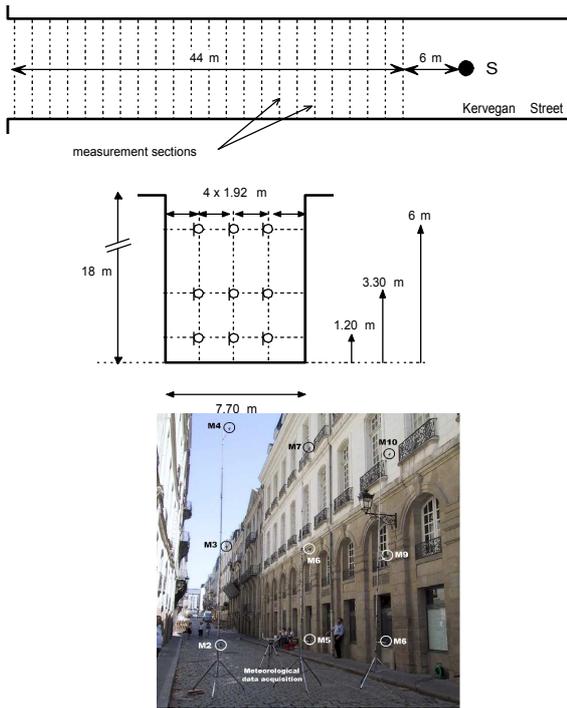


Figure 1 : Schéma (haut) et photographie (bas) de la configuration étudiée.

### 2.2 Paramètres de comparaison

Les simulations numériques ont été réalisées avec un logiciel de tir de rayons large bande Salrev [13]. La configuration expérimentale est simulée avec un ciel et des extrémités ayant une absorption égale à 1 (entièrement absorbant). Pour les autres surfaces, sol et façades, les valeurs d'absorption et de diffusion sont homogènes. Les paramètres de simulation suivants ont été utilisés :

- $10^8$  rayons sont émis depuis une source ponctuelle omnidirectionnelle ;
- les récepteurs sont modélisés par des sphères de 1 m de diamètre ;
- le pas de temps des échogrammes est fixé à 10 ms ;
- le calcul est effectué sur 200 pas de temps (soit 2 s de décroissance énergétique) ;
- le critère d'extinction des rayons est fixé à -50 dB.

Dans un premier temps, il a été vérifié que les décroissances sonores étaient caractérisées par une dynamique supérieure à 40 dB. Le temps de réverbération  $RT_{sim}$  et le niveau de pression normalisé  $SPL_{sim}$  ont été

évalués selon des procédures similaires à celles utilisées expérimentalement.

### 2.3 Critères de comparaison

Pour comparer au mieux les mesures et les simulations, deux critères sont utilisés. Pour la distribution spatiale du niveau sonore, la différence moyenne  $Disc_{SPL}$  est calculée selon la relation suivante :

$$Disc_{SPL} = \frac{\sum_{i=1}^n |SPL_{testi} - SPL_{refi}|}{n} \quad (1)$$

avec  $i$  l'indice de la position considérée ; l'indice « test » indique la valeur testée et l'indice « ref » la valeur de référence (qui peut être le résultat d'une autre simulation ou un résultat de mesures, cf. section 3) ;  $n=22$  est le nombre de points de mesures. Pour le temps de réverbération, la différence moyenne  $Disc_{RT}$  est évaluée de façon suivante :

$$Disc_{RT} = 100 \frac{\sum_{i=1}^n |RT_{testi} - RT_{refi}|}{\sum_{i=1}^n RT_{refi}} \quad (2)$$

## 3 Procédure

Dans un premier temps, une équation empirique liant l'absorption et la diffusion est recherchée à partir de simulations numériques (figure 2). Cette relation permettra de fixer le coefficient de diffusion, tandis que l'absorption sera variée de manière à ajuster les décroissances spatiales du niveau sonore sur celles obtenues expérimentalement (figure 3).

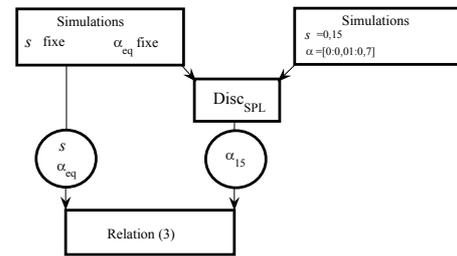


Figure 2 : Première étape de la procédure : évaluation de la relation (3).

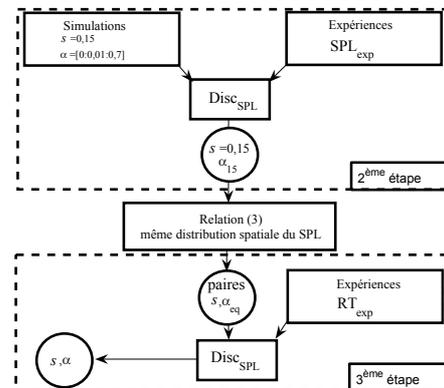


Figure 3 : Deuxième et troisième étapes de la procédure : évaluation de l'absorption et de la diffusion.

Dans un second temps, différents couples (absorption, diffusion) présentant la même décroissance spatiale du niveau sonore seront évalués à partir de la relation obtenue. Ces couples seront ensuite comparés aux temps de

réverbération mesurés (figure 3). Un couple (absorption, diffusion) minimisant l'erreur à la fois sur la décroissance spatiale du niveau sonore et sur le temps de réverbération sera ainsi obtenu par bande de tiers d'octave.

### 3.1 Recherche de la relation

Lorsque la diffusion, notée  $s$ , des façades augmente, l'atténuation spatiale s'accroît [8]. L'augmentation de l'absorption, notée  $\alpha$ , se traduit aussi par le même phénomène. Ainsi, pour une distribution du niveau sonore donnée, il existe plusieurs couples (absorption, diffusion) donnant quasiment la même distribution. En effet, si on augmente la diffusion, il suffit de diminuer l'absorption pour avoir une distribution équivalente des niveaux sonores. Cette valeur d'absorption peut être identifiée au travers du minimum de la relation (1) (figure 4).

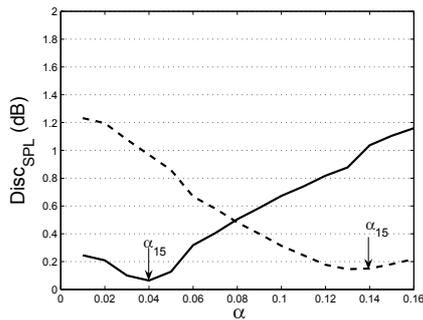


Figure 4 : Evolution de l'erreur  $Disc_{SPL}$  en fonction de l'absorption pour une diffusion fixée à 0,15 : (—)  $s=0,10$  et  $\alpha_{eq}=0,10$ , (---)  $s=0,30$  et  $\alpha_{eq}=0,10$ .

Dans un premier temps (figure 2), la valeur du coefficient de diffusion est fixée à  $s=0,15$  (valeur moyenne obtenue dans la littérature), tandis que la valeur du coefficient d'absorption est variée entre 0 et 0,7. La figure 4 présente par exemple l'erreur  $Disc_{SPL}$  commise en variant l'absorption (pour  $s=0,15$ ) par rapport au cas où  $s=0,30$  et  $s=0,10$  pour une valeur du coefficient d'absorption fixée  $\alpha_{eq}=0,10$ . La valeur minimisant  $Disc_{SPL}$  est appelée  $\alpha_{15}$  dans la suite (ici  $\alpha_{15}=0,04$  et  $0,14$  pour  $s=0,10$  et  $s=0,30$ , respectivement). Les valeurs d'absorption pour  $s=0,10$  et  $0,30$  sont appelées  $\alpha_{eq}$  ( $0,10$  dans notre exemple) car les distributions obtenues sont équivalentes à celles obtenues par les couples  $s=0,15$  et  $\alpha_{15}$ . Il est évident que plus le coefficient de diffusion testé est éloigné de  $s=0,15$ , plus l'erreur  $Disc_{SPL}$  est grande pour la valeur  $\alpha_{15}$  obtenue. Néanmoins, l'erreur  $Disc_{SPL}$  reste inférieure à 1 dB.

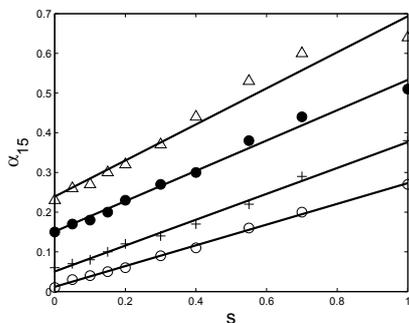


Figure 5 : Evolution de l'absorption  $\alpha_{15}$  en fonction du coefficient de diffusion des parois : (o)  $\alpha_{eq}=0,05$ , (+)  $\alpha_{eq}=0,10$ , (●)  $\alpha_{eq}=0,20$ , ( $\Delta$ )  $\alpha_{eq}=0,30$ .

La démarche intuitive pour obtenir  $\alpha_{eq}$  pour un coefficient de diffusion donné, consisterait à faire varier l'absorption pour cette valeur de diffusion et de comparer les résultats obtenus avec  $s=0,15$ . La manière de procéder choisie permet de minimiser le nombre de simulations en ne variant l'absorption que pour  $s=0,15$ .

La recherche de  $\alpha_{15}$  est ainsi effectuée pour dix valeurs de diffusion, de 0 à 1, et pour quatre valeurs d'absorption ( $\alpha_{eq}=0,05, 0,1, 0,2$  et  $0,3$ ). Les valeurs de  $\alpha_{15}$  obtenues sont présentées figure 5. À partir de ces données, il est possible d'interpoler une relation empirique permettant d'obtenir l'absorption équivalente  $\alpha_{eq}$  à partir d'une valeur d'absorption  $\alpha_{15}$  (pour  $s=0,15$ ) et de la valeur de diffusion  $s$  considérée :

$$\alpha_{eq}(\alpha_{15}, s) = (0,18s^2 - 1,07s + 1,15)\alpha_{15} + (0,11s^2 - 0,22s + 0,03) \quad (3)$$

Il est à noter que cette relation est liée à la géométrie considérée et ne peut être étendue à d'autres morphologies de rue.

### 3.2 Coefficient d'absorption

La diffusion est désormais fixée à  $s=0,15$ , tandis que seule l'absorption est variée. La valeur présentant le meilleur accord avec les distributions spatiales du niveau sonore mesurées expérimentalement (minimisant le critère  $Disc_{SPL}$ ) va être recherchée par bande de tiers d'octave (figure 3). La relation (3) permet ensuite d'évaluer un ensemble de couples (absorption, diffusion) potentiels présentant la même distribution du niveau sonore.

Le problème à deux variables (absorption et diffusion) est donc ramené à un problème avec une seule variable (absorption pour une valeur de diffusion fixe).

### 3.3 Coefficient de diffusion

Des simulations ont été réalisées avec les couples (absorption, diffusion) obtenus lors de l'étape précédente. Les temps de réverbération sont ensuite comparés à ceux obtenus expérimentalement, au travers du critère  $Disc_{RT}$  (figure 3). Un couple minimisant à la fois l'erreur sur la distribution spatiale du niveau sonore et sur le temps de réverbération est ainsi obtenu.

## 4 Résultats

La valeur du coefficient de diffusion est fixée à  $s=0,15$ , tandis que l'absorption est variée entre 0 et 0,7. Les distributions spatiales obtenues sont comparées aux données expérimentales. On observe que pour chaque bande de tiers d'octave, le minimum de l'erreur  $Disc_{SPL}$  est inférieur à 1 dB. La figure 6 présente les valeurs de  $\alpha_{15}$  obtenue. La plage de variation des valeurs d'absorption est grande, entre 0,03 et 0,25, mais ces valeurs rendent compte aussi de la variation du coefficient de diffusion.

À partir des valeurs d'absorption  $\alpha_{15}$  et de la relation (3), des couples (absorption, diffusion) présentant la même valeur de l'erreur  $Disc_{SPL}$  sont obtenues. À titre d'exemple, la figure 7 présente l'évolution de  $Disc_{SPL}$  en fonction du coefficient de diffusion ( $\alpha_{15}=0,11$ ) pour la bande de fréquence 2500 Hz. La figure 8 présente l'erreur  $Disc_{RT}$  commise sur les temps de réverbération en fonction du coefficient de diffusion pour cette même bande de tiers d'octave. Cette paire présente donc les caractéristiques acoustiques permettant de minimiser les erreurs simultanément sur la distribution du niveau sonore et sur le

temps de réverbération. Cette paire approche donc au mieux les caractéristiques acoustiques réelles de la rue étudiée pour la bande de fréquence considérée.

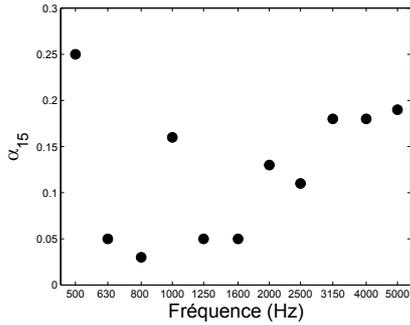


Figure 6 : Valeurs de l'absorption pour  $s=0,15$  minimisant l'erreur  $Disc_{SPL}$  (par bande de tiers d'octave).

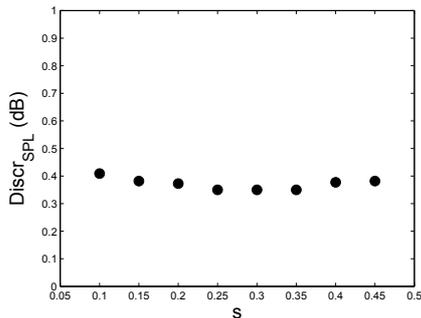


Figure 7 : Evolution de l'erreur  $Disc_{SPL}$  en fonction de la diffusion pour la bande de tiers d'octave 2500 Hz.

Le tableau 1 synthétise, pour chaque bande de tiers d'octave, les valeurs des coefficients d'absorption et de diffusion obtenues, les valeurs des erreurs  $Disc_{SPL}$  et  $Disc_{RT}$ , les écart-types des résultats expérimentaux ( $\Delta RT_{exp}$  et  $\Delta SPL_{exp}$ ) pour les cinq répétitions effectuées. Sont également présentés la moyenne spatiale des temps de réverbération ( $Mean RT_{exp}$ ) de la rue et l'atténuation maximale au long de la rue ( $SPL_{min}$ ), différence entre les niveaux sonores maximal et minimal mesurés.

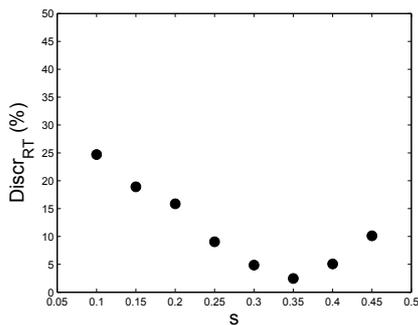


Figure 8 : Evolution de l'erreur  $Disc_{RT}$  en fonction de la diffusion pour la bande de tiers d'octave 2500 Hz.

## 5 Discussion

Pour chaque bande de fréquence, l'erreur entre les simulations et les mesures est de l'ordre de la précision des mesures. De plus, elles suivent la même évolution, en diminuant fortement au-dessus de 1250 Hz. L'accord entre les simulations et les mesures est donc bon, ce qui confirme que la méthode proposée pour obtenir les caractéristiques acoustiques d'une rue semble fiable. Les résultats obtenus,

à la fois numériques et expérimentaux, permettent ainsi d'établir des données de référence, à destination des chercheurs en acoustique urbaine, pour la validation de modèles de prévision acoustique.

La valeur d'absorption obtenue est faible, entre 0,03 et 0,09, et varie peu en fonction de la fréquence. Ce résultat semble cohérent avec la nature des matériaux utilisés pour les façades et le sol (pierre et verre) et sont aussi en accord avec les résultats de [8].

Les valeurs du coefficient de diffusion sont assez élevées, entre 0,15 et 0,80, et varient beaucoup selon la bande de fréquence considérée. En particulier, la valeur pour la bande 500 Hz semble très grande. Mais, cette bande présente à la fois l'atténuation la plus élevée (-14,7 dB) et un des temps de réverbération moyen les plus grand (1,48 s). Pour réaliser ces deux conditions, l'absorption doit être faible et la diffusion élevée [8].

Les valeurs du coefficient de diffusion semblent réalistes car les façades étudiées présentent de nombreuses aspérités créant ainsi de la diffusion. Par ailleurs, les valeurs obtenues sont plus élevées que celles rapportées par [7,8]. Toutefois, les façades considérées possèdent beaucoup plus d'aspérités que dans le cadre des études citées.

Ces résultats montrent donc, d'une part, l'impact important de la diffusion sur les prévisions en acoustique urbaine, et d'autre part, que cette diffusion ne peut être négligée pour l'obtention de prévisions acoustiques fiables en milieu urbain.

## 6 Conclusions

Une méthode indirecte permettant d'obtenir les caractéristiques acoustiques d'une rue a été proposée, combinant mesures et simulations par une méthode de tir de rayons. A partir des distributions spatiales du niveau sonore et du temps de réverbération, les valeurs des coefficients d'absorption et de diffusion sont ainsi obtenues. La précision des résultats est de l'ordre de l'écart type des mesures.

Pour la rue Haussmannienne étudiée, les valeurs du coefficient d'absorption sont faibles et sont en accord avec l'absorption des matériaux constituant le sol et les façades (pierre et verre). En revanche, la diffusion est assez élevée mais semble réaliste compte tenu des nombreux reliefs composant les façades.

Cette étude confirme que si les méthodes de prévision considèrent uniquement des réflexions spéculaires, alors les résultats obtenus seront erronés. Enfin, les valeurs obtenues des coefficients d'absorption et de diffusion, associées aux résultats expérimentaux, permettent d'établir des données de référence en vue de la validation d'autres méthodes de prévision en acoustique urbaine.

## Remerciements

Les auteurs remercient l'ADEME (Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Energie) pour son soutien financier (convention n°06.04.C.0070) au projet OPALHA. Un des auteurs remercie aussi le FNRS (Fonds de la Recherche Scientifique) pour son soutien financier (convention 2.4.534.09 .F).

Fréquence	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz
$\alpha$	0,06	0,03	0,03	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,08	0,08	0,09
s	0,80	0,25	0,15	0,50	0,15	0,15	0,40	0,35	0,50	0,50	0,50
Discr <sub>SPL</sub> (dB)	0,8	0,9	0,8	0,7	0,8	0,9	0,5	0,4	0,3	0,4	0,4
Discr <sub>RT</sub> (%)	4,7	5,4	7,0	4,8	2,1	4,6	2,2	2,5	2,2	2,4	3,7
$\Delta$ SPL <sub>exp</sub> (dB)	1,5	1,2	1,0	1,1	1,1	1,1	1,0	0,8	0,7	0,9	0,9
$\Delta$ RT <sub>exp</sub> (%)	5,8	8,8	6,5	4,8	4,4	2,3	1,7	1,6	1,8	2,0	2,4
SPL <sub>min</sub> (dB)	-14,7	-12,2	-11,9	-13,6	-12,2	-12,3	-12,9	-12,8	-13,5	-13,9	-13,5
Mean RT <sub>exp</sub> (s)	1,48	1,49	1,46	1,41	1,37	1,32	1,30	1,31	1,28	1,25	1,24

Tableau 1 : Récapitulatif des valeurs des coefficients d'absorption et de diffusion des parois, erreurs sur l'atténuation spatiale et le temps de réverbération, écart-types des mesures, atténuation maximale et temps de réverbération moyen dans la rue.

## Références

- [1] Cox T.J., Dalenback B.-I.L., D'Antonio P., Embrechts J.-J., Jeon J.Y., Mommertz E., Vorländer M. "A tutorial on scattering and diffusion coefficients for room acoustic surfaces", *Acta Acustica united with Acustica* 92(1), 1-15 (2006).
- [2] Hodgson M. "Evidence of diffuse surface reflections in rooms", *J. Acoust. Soc. Am.* 89(2), 765-771 (1991).
- [3] Lyon R.H. "Role of multiple reflections and reverberation in urban noise propagation", *J. Acoust. Soc. Am.* 55(3), 493-503 (1974).
- [4] ISO 354:2003, Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room, International Organization for Standardization (2003).
- [5] ISO 17497-1:2004, Acoustics - Sound-scattering properties of surfaces - Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room, International Organization for Standardization (2004).
- [6] Nocke C., Mellert V. "Brief review on in situ measurement techniques of impedance or absorption", *Forum Acusticum*, Sevilla (2002).
- [7] Ismail M.R., Oldham D.J. "A scale model investigation of sound reflection from building façades", *Appl. Acoustics* 66(2), 123-147 (2005).
- [8] Onaga H., Rindel J.H. "Acoustic characteristics of urban streets in relation to scattering caused by building facades", *Appl. Acoustics* 68(3), 310-325 (2007).
- [9] Eyring C.F. "Reverberation in dead rooms", *J. Acoust. Soc. Am.* 1(2), 217-241 (1930).
- [10] Picaut J, Simon L. "A scale model experiment for the study of sound propagation in urban areas", *Appl. Acoustics* 62(3), 327-340 (2001).
- [11] Schröder E. "Nachhall in geschlossen bebauten Straßen", *Lärmbekämpfung* 17, 11-15 (1973).
- [12] Picaut J, Le Pollès T., L'Hermite P., Gary V. "Experimental study of sound propagation in a street", *Appl. Acoustics* 66(2), 149-173 (2005).
- [13] Embrechts J.-J. "Broad spectrum diffusion model for room acoustics ray-tracing algorithms", *J. Acoust. Soc. Am.* 107(4), 2068-2081 (2000).