

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

Alexis Billon

Université de Liège  
B28  
B-4000 Liège  
Belgique  
E-mail : abillon@ulg.ac.be

Judicaël Picaut

Laboratoire Central des Ponts et  
Chaussées  
Département Infrastructures et Mobilité  
Route de Bouaye  
BP 4129  
44341 Bouguenais CEDEX  
E-mail : Judicael.Picaut@lcpcc.fr

## Résumé

La connaissance des propriétés acoustiques des surfaces urbaines (coefficients d'absorption, de réflexion et de diffusion) est fondamentale dans le contexte de la cartographie sonore urbaine. En effet, la plupart des outils de prévision utilisés classiquement, repose sur l'utilisation de l'une ou plusieurs de ces caractéristiques acoustiques comme conditions aux limites des modèles de propagation considérés. Une méthode indirecte associant simulations numériques et mesures in situ est ainsi proposée pour obtenir des coefficients d'absorption et de diffusion réalistes au sein d'une rue. Dans un premier temps, une loi empirique liant la variation du coefficient de diffusion à une variation d'absorption est recherchée. Cette loi permet alors de transformer un problème normalement à deux variables (absorption, diffusion) en un problème à une seule variable (absorption) pour une valeur référence de diffusion. Dans un second temps, la valeur d'absorption est variée afin de minimiser l'écart sur la distribution spatiale du niveau sonore entre les simulations et les mesures. La valeur obtenue associée à la loi empirique permet alors de tester différentes paires absorption/diffusion présentant la même distribution du niveau sonore. Dans un troisième temps, une paire «optimale», minimisant l'erreur à la fois sur la distribution spatiale du niveau sonore et le temps de réverbération, est alors obtenue. Cette méthode est appliquée ici à une rue de type haussmannien. Les résultats montrent que les coefficients obtenus sont faibles pour l'absorption et relativement élevés pour la diffusion, ce qui cohérent pour des façades principalement composées de pierre et de verre (matériaux peu absorbants) avec de nombreux reliefs et décrochement (diffusion importante).

## Abstract

The knowledge of acoustic properties of urban surface (absorption, reflection and diffusion coefficients) is very important in the framework of the noise mapping in urban areas. Indeed, most of noise prediction tools require the use of such coefficients in the boundary equations of the sound propagation models. An indirect method combining experimental data and numerical simulations is then proposed in order to obtain the absorption and scattering coefficients of an urban street. An empirical relationship is first established, linking the scattering variation to an absorption variation. This relation transforms a problem with two variables (absorption and scattering) into a single variable problem (absorption) for a reference scattering coefficient. Secondly, the absorption coefficient is adjusted in order that the numerical results match the experimental data in terms of sound pressure level distribution. Lastly, the obtained value of absorption, associated with the empirical relation, allows to test different absorption and diffusion pairs presenting the same sound level distribution against the experimental reverberation times. Following this procedure, a coefficients pair minimising the discrepancies both on the sound level distribution and the reverberation time is obtained. This method is here applied to a Haussmaniann street. Results show that the obtained absorption coefficients are weak whereas the scattering is quite high, which is physically consistent as the façades are composed of weakly absorbent materials (stone and glass) and fitted with a lot of recesses and protuberances creating scattering.

**E**n 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 menés se sont en particulier intéressés à déterminer les propriétés d'absorption et de diffusion des parois. En revanche, ces propriétés sont encore mal connues en acoustique urbaine. Néanmoins, de nombreux auteurs [3-11] ont 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 [12] et de diffusion [13] des façades est difficile à mettre en œuvre en raison de la taille des surfaces considérées. De plus, la mesure in situ est limitée en terme fréquentiel et sensible au bruit de l'environnement [14]. 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 [10] 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 [11] ont montré quant à eux, pour des rues ayant un rapport hauteur sur largeur inférieur à 1, que le temps de réverbération peut être évalué au travers de la relation d'Eyring [15] 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 [16] et *in situ* [17], Onaga et Rindel [11] ont ainsi 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 suivant 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 à une valeur de référence). Cette méthode est appliquée la rue de Kervégan, une rue de type haussmannien du centre de Nantes (44) [18].

La section «*Configuration étudiée*» 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 «*Procédure*». Les résultats obtenus pour la rue de Kervégan sont ensuite discutés en section «*Résultats et discussions*». Enfin, la section «*Conclusions*» termine cet article.

### Configuration étudiée

#### 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, 18 m de hauteur, 7,90 m de largeur et dont la section est pratiquement constante sur toute sa longueur.

Le sol est constitué de pavés et les façades, de type haussmannien, de pierre et vitrage. L'absorption et la diffusion sont supposées uniforme le long de la rue.

La source sonore a été positionnée au centre de la rue, à 50 m de son extrémité et à 1,65 m du sol. Les mesures ont été réalisées tous les deux mètres dans l'axe de la rue à une hauteur de 1,2 m entre 6 m et 48 m de la source (soit 22 positions). À chaque position, le temps de réverbération (estimé de -5 à -35 dB et noté  $R_{Texp}$ ) et le niveau de pression sonore normalisé par une référence à 6 m de la source (noté  $SPL_{exp}$ ) ont été mesurés à 5 reprises, et ce, par bande de tiers d'octave de 500 Hz à 5 000 Hz. En complément, de manière à se focaliser uniquement sur l'effet de la morphologie de la rue, les effets de l'absorption atmosphérique ont été compensés en post-traitement. Pour plus de détails sur cette expérimentation, le lecteur pourra se reporter à la référence [18].

#### Paramètres de comparaison

Les simulations numériques ont été réalisées avec un logiciel de tir de rayons large bande Salrev [19]. La configuration expérimentale est simulée avec un ciel et des extrémités ayant une absorption égale à 1 (entièrement absorbant). Pour le sol pavé, assimilé à une surface quasi-spéculaire, le coefficient de diffusion est arbitrairement fixé à  $s_g=0,1$ . Le coefficient de diffusion des façades est noté  $s_f$ . La même valeur d'absorption est appliquée pour les façades (notée  $\alpha_f$ ), et le sol (notée  $\alpha_g$ ), les deux surfaces étant constituées majoritairement de matériaux acoustiquement très réfléchissants. Les paramètres de simulation suivants ont été utilisés :

- 5.107 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 2s 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.

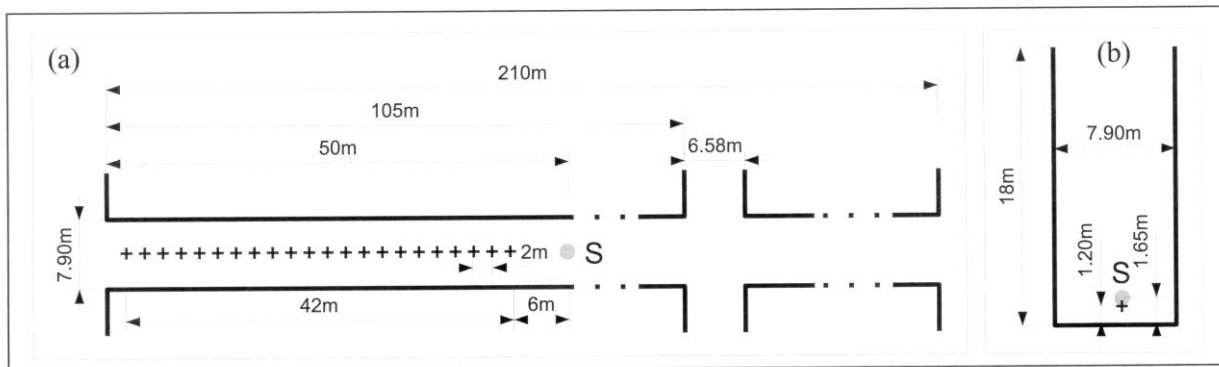


Fig. 1 : Vues en plan (a) et en coupe (b) de la rue étudiée : (●) source sonore et (+) positions des microphones  
Sketches of the studied street: (a) upper view and (b) section view: (●) sound source and (+) microphones locations

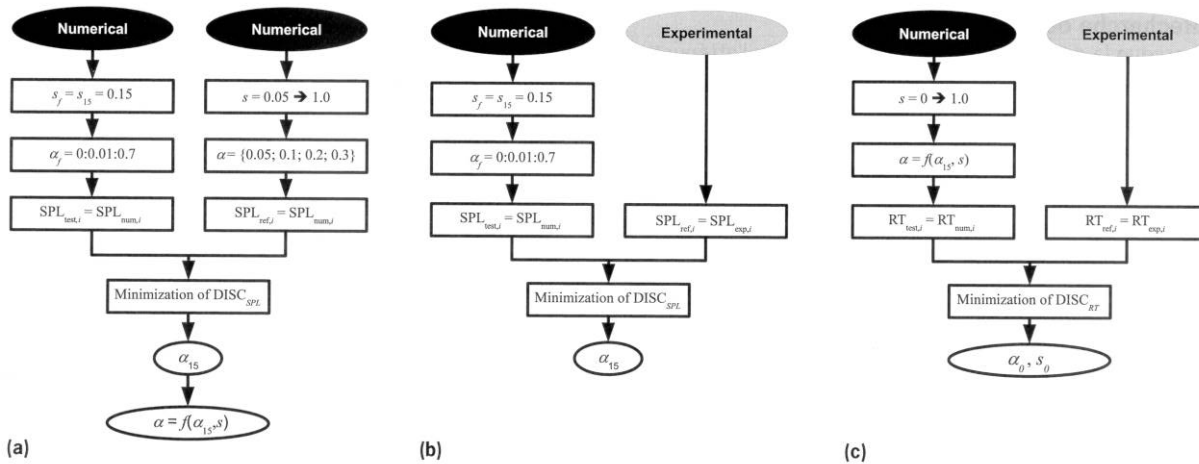


Fig. 2 : Schémas de la procédure proposée. (a) Première étape : détermination d'une loi empirique exprimant un coefficient d'absorption  $\alpha$  en fonction de la valeur de référence  $\alpha_{15}$  (avec  $sf=0,15$ ) et du coefficient de diffusion  $s$ . (b) Seconde étape : détermination du coefficient d'absorption  $\alpha_{15}$  à partir des distributions spatiales de niveau sonore expérimentales. (c) Troisième étape : détermination des valeurs réelles des coefficients d'absorption et de diffusion ( $\alpha_0, s_0$ ) à partir des temps de réverbération expérimentaux et de l'absorption  $\alpha_{15}$  obtenue au cours de la seconde étape. Les deuxième et troisième étapes sont à répéter pour chaque bande de tiers d'octave.

Sketch of the proposed method. (a) First step: Determination of the expression of the absorption coefficient  $\alpha$  as a function of the reference value  $\alpha_{15}$  (with  $sf=0.15$ ) and the scattering coefficient  $s$ . (b) Second step: Determination of the absorption coefficient  $\alpha_{15}$  from the experimental sound pressure level distributions. (c) Third step: Determination of the "real" scattering and absorption coefficients ( $\alpha_0, s_0$ ) from experimental reverberation time and using the value  $\alpha_{15}$  obtained at the second step. The last two steps of the procedure must be repeated for each third octave band.

### 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 :

$$DISC_{SPL} = \frac{\sum_{i=1}^n |SPL_{test,i} - SPL_{ref,i}|}{n} \quad (1)$$

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 d'une mesure, voir section Procédure). Le paramètre  $n=22$  désigne le nombre de points de mesures. Pour le temps de réverbération, la différence moyenne  $DISC_{RT}$  est évaluée de façon suivante :

$$DISC_{RT} = 100 \frac{\sum_{i=1}^n |RT_{test,i} - RT_{ref,i}|}{\sum_{i=1}^n RT_{ref,i}} \quad (2)$$

### Procédure

La méthode proposée pour obtenir les caractéristiques acoustiques d'une rue peut être décomposée en trois étapes détaillées dans la suite et résumées de la manière suivante :

- Une relation empirique (Section *Recherche de la relation empirique*) est établie pour lier la variation du coefficient de diffusion à une variation du coefficient d'absorption (figure 2a). Cette relation transforme le problème à deux variables ( $\alpha, s$ ) en un problème à une seule variable (absorption  $\alpha_{15}$ ) pour un coefficient de diffusion de réfé-

rence  $s_f = s_{15} = 0,15$ . Cette valeur correspond à la valeur moyenne rencontrée dans la littérature [8,10,11]. Ainsi, toutes les paires de coefficients ( $\alpha, s$ ) présentent la même distribution du niveau sonore que la paire de coefficient de référence ( $\alpha_{15}, s_{15}$ ). Enfin une relation empirique  $\alpha = f(s, \alpha_{15})$  est obtenue, exprimant la valeur  $\alpha$  en fonction de  $\alpha_{15}$  et de  $s$ , pour une valeur de diffusion de référence  $s_{15}$ . Au cours de cette étape, uniquement des simulations numériques sont réalisées ;

- Dans un second temps (Section *Coefficient d'absorption*), la même procédure est de nouveau employée mais cette fois en comparant des résultats numériques à des données expérimentales (figure 2b). Le coefficient de diffusion des façades  $s_f$  est fixé à  $s_{15}$  alors que l'absorption  $\alpha_f$  est modifiée jusqu'à ce que les résultats numériques soient en accord avec les données expérimentales en termes de distribution spatiale du niveau sonore. Finalement, une valeur  $\alpha_{15}$  de l'absorption  $\alpha_f$  est obtenue, minimisant l'écart entre les résultats numériques et les données expérimentales en termes de niveau sonore pour chacune des bandes de tiers d'octave considérées ;

- En accord avec la première étape, plusieurs paires ( $\alpha, s$ ) (avec  $\alpha = f(s, \alpha_{15})$ ) présentent la même distribution spatiale du niveau sonore mais différentes distributions du temps de réverbération. Au cours de cette dernière étape (Section *Détermination des coefficients*), des simulations sont donc réalisées pour différentes valeurs de diffusion des parois  $s_f$  et d'absorption  $\alpha = f(s, \alpha_{15})$  en considérant la valeur  $\alpha_{15}$  obtenue au cours de la seconde étape (figure 2c). Les temps de réverbération obtenus sont alors comparés à ceux mesurés. La paire ( $\alpha = f(s, \alpha_{15}), s$ ) présentant l'écart le plus faible avec les mesures pour le temps de réverbération est alors la paire recherchée des coefficients acoustiques de la rue, notée ( $\alpha_0, s_0$ ). La paire ( $\alpha_0, s_0$ ), étant optimale pour la bande de tiers d'octave donnée, les deux dernières étapes de la méthode doivent être répétées pour chaque bande de fréquence.

### Recherche de la relation empirique

Lorsque la diffusion des façades augmente, l'atténuation spatiale s'accroît [10,11]. L'augmentation de l'absorption se traduit aussi par le même phénomène [11]. Ainsi, il existe plusieurs couples (absorption, diffusion) donnant la même distribution du niveau sonore. En effet, si la diffusion augmente, l'absorption doit être diminuée pour obtenir une distribution du niveau sonore équivalente.

Dans la présente étude, le coefficient de diffusion  $s_f$  est fixé à la valeur de référence  $s_{15}=0,15$ , tandis que le coefficient d'absorption est varié entre 0 et 0,7 (figure 2a). En minimisant la valeur de  $DISC_{SPL}$ , un coefficient d'absorption  $\alpha_f = \alpha_{15}$  est obtenu pour chaque valeur  $s$  du coefficient de diffusion. La paire  $(\alpha_{15}, s_{15})$  génère ainsi la même distribution spatiale du niveau sonore que la paire  $(\alpha, s)$ .

À titre d'illustration, la figure 3a montre l'évolution de l'écart  $DISC_{SPL}$  en faisant varier le coefficient d'absorption  $\alpha_f$ , pour deux configurations : ( $s=0,1$  et  $\alpha=0,1$ ) et ( $s=0,3$  et  $\alpha=0,1$ ). Dans ces deux exemples, les valeurs d'absorption minimisant l'écart  $DISC_{SPL}$  sont respectivement  $\alpha_{15}=0,09$  et 0,12.

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

$$\alpha = (0,35s^2 - s + 1,13)\alpha_{15} + (0,05s^2 - 0,99s + 0,02) \quad (3)$$

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

### Coefficient d'absorption $\alpha_{15}$

Le coefficient de diffusion est désormais fixé à  $s=s_{15}=0,15$ , tandis que seule l'absorption est  $\alpha_f$  modifiée. Comme précédemment, la valeur du coefficient d'absorption  $\alpha_{15}$

minimisant le critère  $DISC_{SPL}$  est recherchée pour chacune des bandes de tiers d'octave par bande de tiers d'octave (figure 2b). La figure 4a présente un exemple de résultat pour la bande de tiers d'octave 2 500 Hz où un minimum est obtenu pour  $\alpha_{15}=0,11$ .

### Détermination des coefficients à partir des données expérimentales

Au cours de cette dernière étape (figure 2c), la relation empirique (3) permet d'évaluer une valeur du coefficient d'absorption  $\alpha = f(s, \alpha_{15})$  à partir de la valeur  $\alpha_{15}$  évaluée à l'étape précédente et en imposant un coefficient de diffusion  $s$ . Différents couples  $(\alpha, s)$  sont ainsi évalués, possédant la même distribution spatiale du niveau sonore mais des temps de réverbération différents. Comme attendu, l'écart  $DISC_{SPL}$  reste constant pour les valeurs de diffusion considérées (figure 4b, pour la bande de tiers d'octave 2 500 Hz), alors qu'une valeur de  $s$  minimisant l'écart  $DISC_{RT}$  peut être observée (figure 4c, pour la bande de tiers d'octave 2 500 Hz). Dans cet exemple, cette valeur correspond à  $s=0,4$  associée à une absorption  $\alpha=0,07$ . Ces valeurs correspondent donc à la paire de coefficient recherchée  $(\alpha_0, s_0)$  minimisant l'erreur entre les simulations et les données expérimentales à la fois en termes de distribution du niveau sonore et de temps de réverbération. L'accord obtenu entre les simulations numériques et les données expérimentales est alors très bon, tant en termes de niveau sonore (figure 4d), qu'en termes de temps de réverbération (figure 4e).

## Résultats et discussions

### Précision de la méthode proposée

Durant la campagne de mesures, cinq mesures ont été réalisées successivement à chaque position du microphone [18], permettant ainsi de calculer les écarts types obtenus sur les niveaux sonores et les temps de réverbération. Pour évaluer la précision de la méthode proposée, ces écarts types ont été comparés aux écarts  $DISC_{SPL}$  et

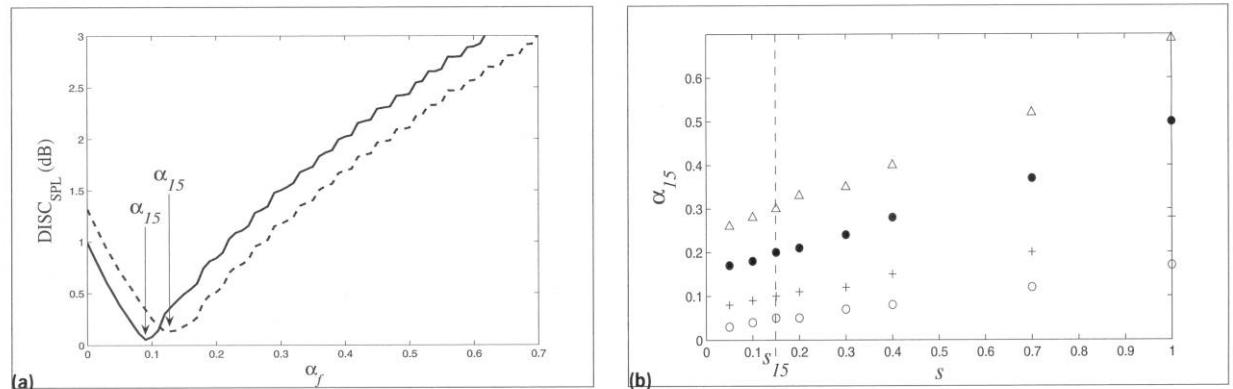


Fig. 3 : (a) Évolution de l'écart  $DISC_{SPL}$  en fonction du coefficient d'absorption  $\alpha_f$  (avec  $s_f=s_{15}=0,15$ ) pour deux configurations (—)  $s=0,1$  et  $\alpha=0,1$  ; (- -)  $s=0,3$  et  $\alpha=0,1$ . (b) Évolution de l'absorption  $\alpha_{15}$  en fonction du coefficient de diffusion  $s$  pour : (o)  $\alpha=0,05$ , (+)  $\alpha=0,1$  (•)  $\alpha=0,2$  et ( $\Delta$ )  $\alpha=0,3$

(a) Evolution of the discrepancy  $DISC_{SPL}$  as a function of the absorption coefficient  $\alpha_f$  for  $s_f=s_{15}=0,15$  for two configurations: (—)  $s=0,1$  and  $\alpha=0,1$ , (- -):  $s=0,3$  and  $\alpha=0,1$ . (b) Evolution of the absorption coefficient  $\alpha_{15}$  as a function of the scattering coefficient  $s$  for: (o)  $\alpha=0,05$ , (+)  $\alpha=0,1$  (•)  $\alpha=0,2$  and ( $\Delta$ )  $\alpha=0,3$

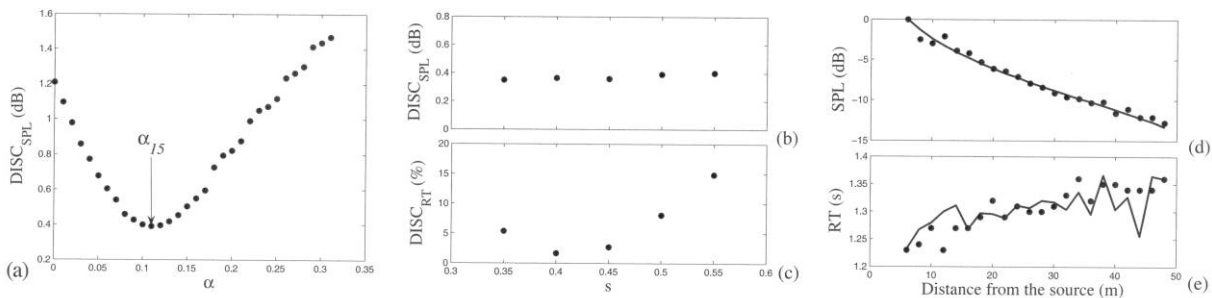


Fig. 4 : (a) Évolution de l'écart  $DISC_{SPL}$  en fonction du coefficient d'absorption  $\alpha$  (avec  $s_f=s_{15}=0,15$ ) pour la bande tiers d'octave 2 500 Hz. Évolutions des écarts  $DISC_{SPL}$  (b) et  $DISC_{RT}$  (c) en fonction du coefficient de diffusion  $s$  pour la bande tiers d'octave 2 500 Hz. Niveau sonore normalisé (d) et temps de réverbération (e) le long de la rue pour la bande de tiers d'octave 2 500 Hz : (•) données expérimentales et (—) simulations réalisées avec  $\alpha_0=0,07$  et  $s_0=0,4$ .

(a) Evolution of the discrepancy  $DISC_{SPL}$  as a function of the absorption coefficient  $\alpha$  (for  $s_f=s_{15}=0,15$ ) for the 2 500 Hz third octave band. Evolutions of the discrepancies  $DISC_{SPL}$  (b) and  $DISC_{RT}$  (c) as a function of the scattering coefficient  $s$  for the 2 500 Hz third octave band. Normalized sound level (d) and reverberation time (e) along the street for the 2 500 Hz third octave band: (•) experimental data and (—) simulations carried out with  $\alpha_0=0,07$  and  $s_0=0,4$ .

$DISC_{RT}$  évalués avec les coefficients ( $\alpha_0, s_0$ ) obtenus pour chaque bande tiers d'octave (figure 5). On observe ainsi que l'erreur commise est du même ordre de grandeur que la précision des mesures et suit la même évolution en fonction de la fréquence, ce qui montre la pertinence de la méthode proposée.

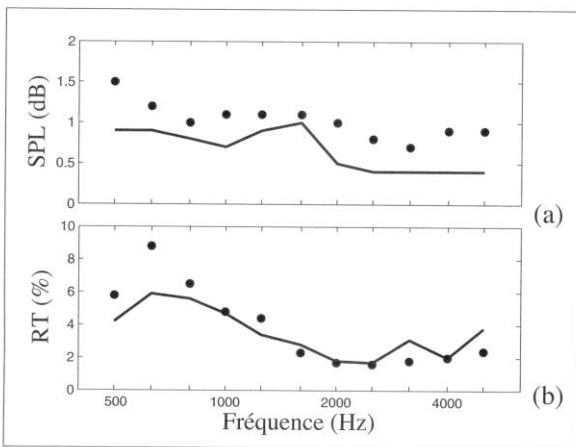


Fig. 5 : Précision de la méthode proposée pour le niveau sonore (a) et le temps de réverbération (b) en fonction de la fréquence : (•) écarts types des données expérimentales et (—) erreurs commises par les simulations effectuées avec ( $\alpha_0, s_0$ ).

Accuracy of the proposed method on the sound level (a) and on reverberation time (b) as a function of the frequency: (•) standard deviation of the experimental data and (—) discrepancies between the experimental results and the simulations carried out with ( $\alpha_0, s_0$ ).

### Coefficients obtenus pour la rue de Kervégan

La figure 6 présente les valeurs des coefficients d'absorption et de diffusion par bande de tiers d'octave pour la rue de Kervégan, obtenues au moyen de la méthode proposée. L'absorption (figure 6a) augmente avec la fréquence mais reste assez faible, comprise entre 0,03 et 0,1. Les résultats obtenus sont en très bon accord avec des mesures d'absorption réalisées in situ pour des façades en pierre [20,21].

Concernant la diffusion, les valeurs rencontrées dans la littérature peuvent atteindre 0,3 avec une moyenne proche de 0,15 [8,10,11] alors que les valeurs obtenues (figure 6b) sont plus élevées, comprises entre 0,15 et 0,65 (sauf pour la bande de tiers d'octave 500 Hz). Néanmoins, ces valeurs semblent cohérentes car les façades composant la rue de Kervégan sont constituées de nombreux reliefs et décrochements, diffusant ainsi les ondes acoustiques. Pour la bande de fréquence 500 Hz, le coefficient de diffusion atteint la valeur extrêmement élevée de 0,95. Néanmoins, cette bande de fréquence est caractérisée expérimentalement par une forte atténuation spatiale du niveau sonore et des temps de réverbération relativement longs. Ces caractéristiques impliquent nécessairement une absorption faible et une diffusion importante [11], en accord avec les valeurs obtenues. Par ailleurs, les fluctuations des mesures à cette fréquence sont relativement importantes, limitant la précision des coefficients obtenus. De plus, la longueur d'onde étant de l'ordre de grandeur de la rue, des effets modaux peuvent également se produire [22].

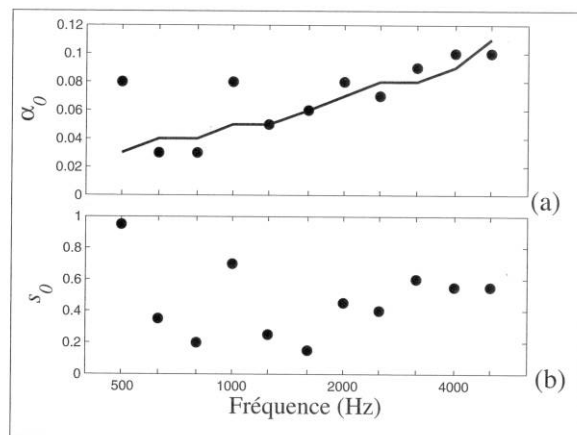


Fig. 6 : Coefficients d'absorption  $\alpha_0$  (a) et de diffusion  $s_0$  (b) obtenus pour la rue de Kervégan en fonction de la fréquence : (•) données expérimentales et (—) résultats de Li et Lai [20]

Absorption  $\alpha_0$  (a) and scattering  $s_0$  (b) Coefficients obtained for the Kervégan street as a function of the frequency: (•) experimental data and (—) Li and Lai results [20]

### Généralisation de la méthode

La procédure présentée ici est applicable à d'autres géométries de rue, la première étape étant de déterminer une relation empirique du même type que la relation (3), celle présentée dans cet article n'étant valable que pour la rue de Kervégan.

Dans cette étude, la valeur de référence du coefficient de diffusion a été fixée à 0,15, à savoir une valeur de l'ordre de grandeur de celles observées dans la littérature. Le choix d'une autre valeur de référence modifierait nécessairement les coefficients de la relation (3), mais ne changerait pas les valeurs des paires  $(\alpha_0, s_0)$  obtenues au final.

### 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. La méthode est basée sur l'établissement d'une relation empirique réduisant le problème avec deux variables (absorption et diffusion) en un problème à une seule variable, l'absorption, pour un coefficient de diffusion de référence. À partir de la mesure des distributions spatiales du niveau sonore et du temps de réverbération dans une rue, les valeurs optimales des coefficients d'absorption et de diffusion peuvent ainsi être ainsi obtenues. La précision observée des résultats est très bonne, de l'ordre de l'écart type même des mesures.

Pour la rue haussmannienne étudiée, les valeurs du coefficient d'absorption sont faibles (entre 0,03 et 0,1) 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 (entre 0,15 et 0,65) mais semble réaliste compte tenu des nombreux reliefs et décrochements composant les façades.

Cette étude confirme que si les méthodes de prévision considèrent uniquement des réflexions spéculaires, alors les résultats obtenus seront erronés : la prise en compte des réflexions diffuses est donc indispensable pour obtenir des prévisions fiables en acoustique urbaine. Néanmoins, dans le cas d'architectures plus récentes, composées de grandes surfaces planes et uniformes, la diffusion est sans doute plus faible ; la prise en compte de réflexions uniquement spéculaires pourrait alors être suffisante.

D'un point de vue plus opérationnel, la méthode proposée pourrait être appliquée à un échantillon représentatif de rues, ce qui permettrait de constituer une base de données de coefficients d'absorption et de diffusion dépendants du style architectural des façades et la nature du sol.

En parallèle, les valeurs obtenues dans cette étude pour les coefficients d'absorption et de diffusion, associées aux résultats expérimentaux de la rue de Kervégan, peuvent constituer également des données référence à destination de la communauté scientifique, en vue de la validation de 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. Alexis Billon remercie aussi le FNRS (Fonds de la Recherche Scientifique) pour son soutien financier (convention 2.4.534.09 .F).

### Références bibliographiques

- [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), pp 1-15 (2006).
- [2] Hodgson M. «Evidence of diffuse surface reflections in rooms», *J. Acoust. Soc. Am.* 89(2), pp 765-771 (1991).
- [3] Lyon R.H. «Role of multiple reflections and reverberation in urban noise propagation», *J. Acoust. Soc. Am.* 55(3), pp 493-503 (1974).
- [4] Kuttruff H. «Zur berechnung von Pegelmittelwerten und Schwankungsgrößen bei Strasslärm», *Acustica* 32(1), pp 57-69 (1975).
- [5] Bullen R., Fricke F. «Sound propagation in streets», *J. Sound Vib.* 46(31), pp 33-42 (1976).
- [6] Steenackers P., Mycnke H., Cops A. «Reverberation in town streets», *Acustica* 40(2), pp 115-119 (1978).
- [7] Davies H.G. «Role Multiple-reflections diffuse-scattering model for noise propagation in streets», *J. Acoust. Soc. Am.* 64(2), pp 517-521 (1978).
- [8] Heutschi K. «A simple method to evaluate the increase of traffic noise emission level due to buildings, for a long straight street», *Appl. Acoust.* 44(3), pp 259-274 (1995).
- [9] Kang J. «Acoustics of long spaces: Theory, design and practice», Thomas Telford Ltd, Londres (2002).
- [10] Ismail M.R., Oldham D.J. «A scale model investigation of sound reflection from buildings», *Appl. Acoust.* 89(2), pp 123-147 (2005).
- [11] Onaga H., Rindel J.H. «Acoustic characteristics of urban streets in relation to scattering caused by building facades», *Appl. Acoustics* 68(3), pp 310-325 (2007).
- [12] ISO 354:2003, *Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room*, International Organization for Standardization (2003).
- [13] 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).
- [14] Nocke C., Mellert V. «Brief review on in situ measurement techniques of impedance or absorption», *Forum Acusticum*, Sevilla (2002).
- [15] Eyring C.F. «Reverberation in dead rooms», *J. Acoust. Soc. Am.* 1(2), pp 217-241 (1930).
- [16] Picaut J., Simon L. «A scale model experiment for the study of sound propagation in urban areas», *Appl. Acoustics* 62(3), pp 327-340 (2001).
- [17] Schröder E. «Nachhall in geschlossen bebauten Straßen», *Lärmbekämpfung* 17, pp 11-15 (1973).
- [18] Picaut J., Le Pollès T., L'Hermite P., Gary V. «Experimental study of sound propagation in a street», *Appl. Acoustics* 66(2), pp 149-173 (2005).
- [19] Embrechts J.-J. «Broad spectrum diffusion model for room acoustics ray-tracing algorithms», *J. Acoust. Soc. Am.* 107(4), pp 2068-2081 (2000).
- [20] Li K.M., Lai C.Y.C. «A note on noise propagation in street canyons», *J. Acoust. Soc. Am.* 126(2), pp 644-655 (2009).
- [21] Evans E.J., Parkin P.H. «Sound absorption of a stone wall», *Acustica* 8(2), pp 117-118 (1958).
- [22] Lu K.K., Li K.M. «The propagation of sound in narrow street canyons», *J. Acoust. Soc. Am.* 122(2), pp 537-550 (2002).