Synthèse de champ pour la mesure de l'absorption acoustique de matériaux

Samuel Dupont, Maryna Sanalatii, Manuel Melon, Olivier Robin, Alain Berry, Jean-Christophe Le Roux

▶ **To cite this version:**

Samuel Dupont, Maryna Sanalatii, Manuel Melon, Olivier Robin, Alain Berry, et al.. Synthèse de champ pour la mesure de l'absorption acoustique de matériaux. 16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022, Société Française d'Acoustique; Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Apr 2022, Marseille, France. hal-03847979

HAL Id: hal-03847979
https://hal.science/hal-03847979

Submitted on 10 Nov 2022

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.

16ème Congrès Français d'Acoustique
11-15 Avril 2022, Marseille

Synthèse de champ pour la mesure de l'absorption acoustique de matériaux

S. Dupont [a], M. Sanalatii [b], M. Melon [a], O. Robin [c], A. Berry [c], J.-C. Le Roux [b]

[a] LAUM, Av. Olivier Messiaen, 72085 Le Mans, France

[b] CTTM, 20 Rue de Thalès de Milet, 72000 Le Mans Cedex 09, France

[c] Centre de Recherche Acoustique - Signal - Humain, Université de Sherbrooke, 2500 Bd de l'Université, Sherbrooke, QC, Canada,

Les méthodes normalisées de mesure de l'absorption acoustique sont limitées à une incidence normale ou diffuse. Elles sont également connues pour leur manque de flexibilité, de précision aux basses fréquences et pour leur tendance à produire des résultats non physiques (valeur du coefficient d'absorption supérieure à 1). Alors qu'une partie des méthodes développées récemment se concentrent sur la captation multipoints en utilisant un réseau de microphones au-dessus d'un matériau, il est également possible de se concentrer sur le champ incident lui-même. Par exemple, un champ se rapprochant d'une onde plane "idéale" peut être généré à l'aide d'un réseau de haut-parleurs dont les signaux d'entrée ont été optimisés. Il est alors possible de qualifier le matériau testé à l'aide d'un simple doublet microphonique. Cet article décrit les résultats issus de simulations numériques d'une méthode de synthèse de champs sonores, permettant de générer des ondes planes en incidence quelconque sur la surface d'un matériau absorbant à caractériser. L'étude inclut l'observation du champ acoustique reconstruit au-dessus d'un matériau absorbant en analysant la partie incidente et la partie réfléchie. Enfin, l'effet des paramètres du réseau de haut-parleurs (nombre de sources, séparation des sources et hauteur au-dessus du matériau) sur l'absorption acoustique estimée est analysé.

1 Introduction

L'environnement acoustique est un aspect important des normes de constructions et du confort d'un local, l'installation de matériaux absorbants est un moyen efficace de réduire le bruit et ainsi d'améliorer la qualité sonore de l'environnement intérieur. Afin de répondre au cahier des charges acoustique lors de la conception de plans de construction (salles, bâtiments...), deux propriétés acoustiques des matériaux absorbants sont normalement requises : le coefficient d'absorption et l'impédance acoustique. Pour mesurer ces quantités, il existe deux méthodes normalisées : la méthode du tube d'impédance [1] et la méthode de la chambre réverbérante [2]. Cependant, plusieurs limitations bien documentées sont associées à ces deux méthodes. Concernant le tube d'impédance, celui-ci ne fournit premièrement que des résultats pour une incidence normale. Deuxièmement, les résultats sont obtenus sur de petits échantillons et sont donc peu représentatifs du comportement global du matériau. Troisièmement, la largeur de la bande de fréquence de mesure est limitée par le diamètre du tube.
La méthode de la chambre réverbérante fournit un coefficient d'absorption en champ diffus, qui correspond à une valeur moyenne sur tous les angles d'incidence. Cependant, cette méthode est connue pour ses résultats non physiques tels que des valeurs du coefficient d'absorption supérieures à 1 en haute fréquence [3] ou négatives en basse fréquence. L'absence de spécification exacte concernant les dimensions de la chambre réverbérante dans la norme entraîne également des problèmes de reproductibilité d'un laboratoire à l'autre [4]. Les exigences de ces deux méthodes en termes d'équipement, d'environnement et de manque de flexibilité ont conduit au développement de méthodes de mesure alternatives en champ libre. Les plus connues utilisent deux microphones [5] ou une sonde de pression − vitesse (P-U) [6]. D'autres approches ont également été suggérées ces dernières années [7, 8]. La mesure en basse fréquence et la prise en compte des effet de bords restent cependant des enjeux à surmonter [9, 10, 11, 12, 13].

Cet article présente une méthode de mesure *in situ* de l'impédance acoustique et du coefficient d'absorption de matériaux absorbants, qui a l'ambition d'être plus précise dans la gamme des basses fréquences. Ici, une onde plane est synthétisée par la somme des signaux pondérés d'un réseau plan de haut-parleurs situé au dessus d'un matériau. Le coefficient de réflexion du matériau est ensuite estimé par la méthode du doublet microphonique. L'étude porte sur une méthode inverse par moindre carré [14] pour déterminer les pondérations des hauts-parleurs afin d'insonifier un matériau acoustique par une onde plane, ainsi que sur l'effet de l'angle d'incidence de l'onde plane générée.

2 Théorie

2.1 Configuration

Une onde plane théorique est reproduite à partir d'un réseau carré de côté a centré en $x = y = 0$ et comprenant L haut-parleurs. Le champ de pression cible est défini sur un réseau carré de côté b de M microphones parallèle au réseau de sources. Son centre est également en $x = y = 0$ et il est situé à une distance h du réseau de sources, comme représenté sur la figure 1. Les espacements inter-microphone et inter-source sont égaux à $\Delta_m = \frac{b}{\sqrt{M}-1}$ et $\Delta_p = \frac{a}{\sqrt{L}-1}$ respectivement.

La pression mesurée par le microphone m provenant du haut parleur l est définie par :

$$p_m(f) = g_{ml}(f)u_l(f) \tag{1}$$

où g_{ml} est la fonction de transfert entre le microphone m et le haut-parleur l, u_l est la tension d'entrée en Volt du haut-parleur l et f est la fréquence.
La pression acoustique mesurée par l'antenne de microphones lorsque toutes les sources sont actives peut ensuite être notée sous forme matricielle :

$$\mathbf{P} = \mathbf{G}\mathbf{u} \tag{2}$$

avec :

$$\mathbf{P} = [p_1(f), p_2(f), \ldots, p_M(f)]^T \tag{3}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{11}(f) & \cdots & g_{1L}(f) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ g_{M1}(f) & \cdots & g_{ML}(f) \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\mathbf{U} = [u_1(f), u_2(f), \ldots, u_L(f)]^T \tag{5}$$

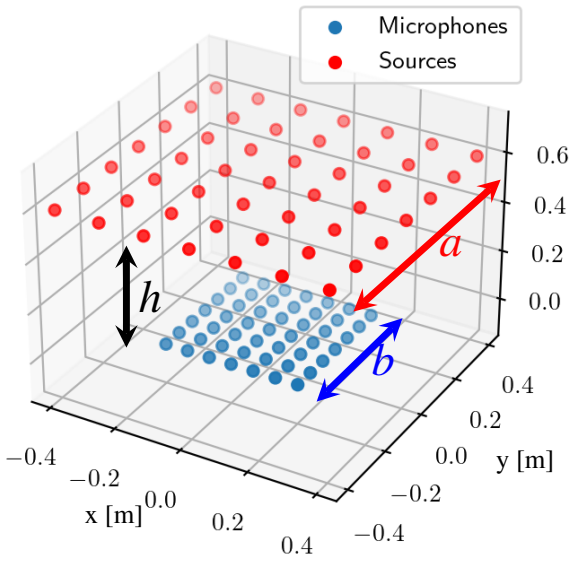

FIGURE 1 – Exemple de configuration de système : 49 sources, a = 80 cm et 81 microphones, b = 40 cm, h = 60 cm

3 Reproduction d'ondes planes par la méthode des moindres carrés.

Pour une incidence quelconque, le champ de pression cible est noté :

$$\mathbf{P_t} = [p_{t1}, p_{t2}, \ldots, p_{tM}]^T. \tag{6}$$

On cherche alors à trouver les poids $\mathbf{u}_{opt}$ qui minimisent l'erreur entre la pression cible et la pression rayonnée par le réseau de haut-parleurs :

$$\min |\mathbf{P_t} - \mathbf{Gu}|^2 . \tag{7}$$

Lorsque le système est surdéterminé ($M > L$), une solution approximée peut être obtenue par la méthode des moindres carrés :

$$\mathbf{u_{opt}} = \left[\mathbf{G^H G} + \lambda \mathbf{I}\right]^{-1} \mathbf{G^H}, \tag{8}$$

où ^{H} désigne la transposée conjuguée. Un paramètre de régularisation λ est introduit limitant l'apport de l'énergie dans le réseau de haut-parleurs et réduisant le conditionnement de la matrice $\mathbf{G^H G}$.
L'erreur ϵ entre les champs cible et reproduit peut être calculée suivant la relation :

$$\epsilon^2 = \frac{|\mathbf{P_t} - \mathbf{Gu}|^2}{\mathbf{P_t}^H \mathbf{P_t}}. \tag{9}$$

3.1 Simulation acoustique

Les sections suivantes introduisent la modélisation du matériau poreux puis la simulation du champ de pression créé par une source monopolaire située au dessus de ce matériau et enfin la méthode de mesure du coefficient d'absorption α et de l'impédance de surface Z_s.

3.1.1 Simulation du matériau poreux

Les paramètres acoustiques sont calculés en utilisant le modèle de Johnson − Champoux − Allard (JCA) [15] pour le matériau dont les paramètres sont listés dans le tableau. 1.

σ	10000	[N.s.m^{-4}] Résistivité
h_p	0.05	[m] Épaisseur du matériau
ϕ	0.93	Porosité
Λ	60	[μm] Longueur visqueuse
Λ'	100	[μm] Longueur thermique
α_∞	1.1	Tortuosité

TABLEAU 1 – Paramètres du modèle JCA d'une mousse de mélamine caractérisée au CTTM.

3.1.2 Simulation du champ acoustique

Le champ acoustique créé par une source monopolaire située au dessus d'une couche de matériau poreux est calculé en utilisant une formulation intégrale proposée par Allard *et al.* [16] :

$$P(r,z) = \frac{e^{-ik_0R_1}}{R_1} - \frac{e^{-ik_0R_2}}{R_2} - \int_0^\infty \frac{2\rho_m e^{-\nu_0(z_s+z_r)}}{\rho_1\nu_0 + \rho_0\nu_1 \tanh \nu_1 d} k J_0(kr)\, \mathrm{d}k, \tag{10}$$

avec $\nu_{i=0,1}^2 = k^2 + k_{i=0,1}^2$, où k_0 et k_1 sont le nombre d'onde de l'air et du matériau poreux respectivement, ρ_0 et ρ_1 la densité de l'air et du matériau poreux respectivement, R_1 la distance source-microphone, R_2 la distance source image-microphone, J_0 est la fonction de Bessel cylindrique d'ordre 0, z_s la hauteur de la source, z_r la hauteur du microphone, r la distance xy source-microphone.
Dans la configuration étudiée ici, les poids des haut-parleurs sont d'abord déterminés, puis la pression totale sur chaque microphone est ensuite calculée par la sommation du champ pondéré de tous les haut-parleurs.

3.1.3 Mesure au doublet microphonique

La technique du doublet microphonique [17] est utilisée (*cf.* figure 2) pour calculer le coefficient de réflexion R à partir du rapport $H = \frac{p_1}{p_2}$:

$$R = \frac{H - e^{jk_0 z_a \cos\phi_m}}{e^{jk_0 z_a \cos\phi_m} - H} e^{2jk_0 h_p \cos\phi_m}, \tag{11}$$

avec ϕ_m l'angle de l'onde plane par rapport à la normale au matériau, d l'écart microphonique et z_a la hauteur du microphone le plus proche par rapport au matériau.

L'impédance de surface et l'absorption peuvent ensuite être déduites par :

$$Z_s = \frac{\rho_0 c_0}{\cos\phi_m} \frac{1+R}{1-R}, \tag{12}$$

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_s - \frac{\rho_0 c_0}{\cos\phi_m}}{Z_s + \frac{\rho_0 c_0}{\cos\phi_m}} \right|^2 . \tag{13}$$

avec ρ_0 et c_0 la densité de l'air et la célérité du son dans l'air, respectivement.

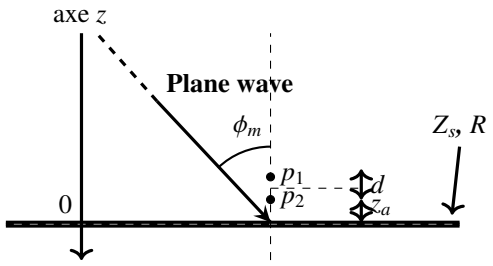

FIGURE 2 – Schéma du doublet microphonique avec une source placée au-dessus d'un plan d'impédance Z_s.

4 Simulation : synthèse de champ

Dans un premier temps, l'étude du système de synthèse de champ est réalisée sans le matériau. Un réseau carré plan de côté $a = 80$ cm de 49 sources, $\Delta_s = 13.3$ cm, séparé d'une distance $h = 60$ cm d'un réseau carré plan de côté $b = 40$ cm de 49 microphones, $\Delta_m = 6.6$ cm, est représenté sur la figure 1.

4.1 Champs de pressions acoustique

La figure 3 montre la reproduction d'une onde plane à une fréquence de 1500 Hz dans les plans xy et xz. On remarque que l'onde est bien reproduite sur le plan de contrainte ($z = 0$) et dans le plan xz jusqu'à une quinzaine de cm du plan de contrainte.

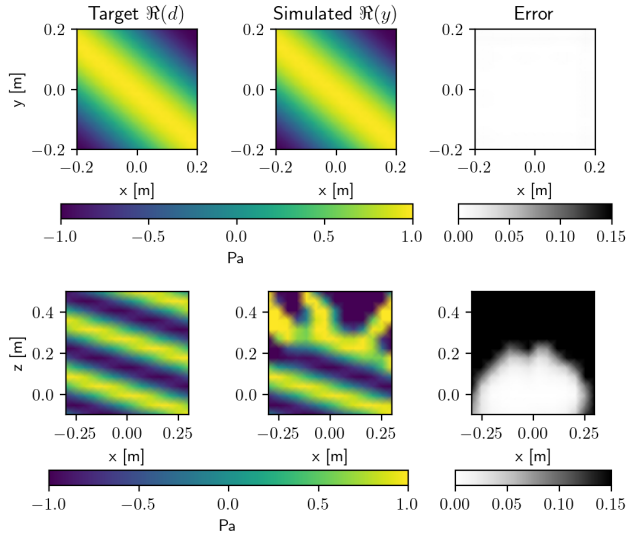

FIGURE 3 – Champs de pression dans les plans (xy en $z = 0$ cm) et (xz en $y = 0$ cm) cible et simulé à 1500 Hz ainsi que l'erreur entre les deux. Le champ cible est une onde plane d'incidence $\phi_m = 10°$ et d'angle azimutal $\theta_m = 45°$, ici $\lambda = 1 \times 10^{-5}$.

L'erreur dans le plan xy pour $z = 0$ est moyennée et représentée en fonction de la fréquence avec le conditionnement et l'amplitude moyenne des sources sur la figure 4. On y voit que malgré un conditionnement élevé, avec une faible valeur de $\lambda = 1 \times 10^{-5}$, l'erreur reste faible et l'amplitude des signaux sources ne présente pas d'augmentation subite. En hautes fréquences (HF), quand la longueur d'onde reproduite est plus grande que les longueurs caractéristiques du système, on observe que le l'erreur augmente énormément jusqu'à atteindre un palier supérieur à 100 %. L'étude de ces quantités permet de dimensionner le système de manière à réaliser une mesure dans la gamme de fréquence visée.

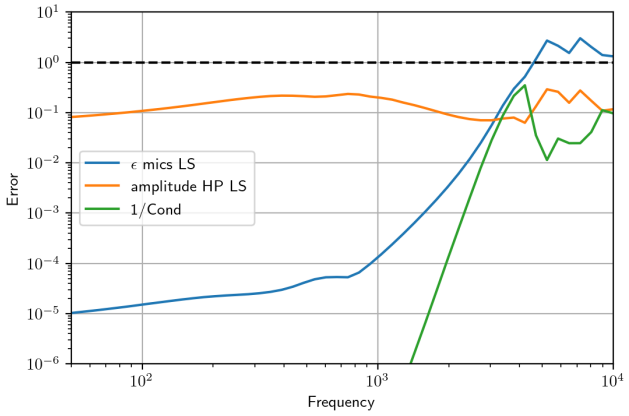

FIGURE 4 – Erreur ϵ, conditionnement de la matrice $\mathbf{G}^{\mathbf{H}}\mathbf{G}$ et amplitude moyenne des sources pour la configuration de la figure 3

.

4.2 Étude paramétrique

4.2.1 Effet de la taille des antennes

Les figures 5 et 6 représentent l'erreur au niveau du plan de reproduction en faisant varier respectivement les tailles de l'antenne de haut-parleurs et de microphones. Pour les sources, plus la taille de l'antenne est grande plus l'erreur est faible en basses fréquences (BF) tandis que le seuil de décrochement en HF arrive plus rapidement. Pour les microphones, plus la taille de l'antenne est petite plus l'erreur est faible en BF tandis que le seuil de décrochement arrive pour des fréquences plus élevées. Il est à noter que lorsque les deux tailles sont équivalentes, ceci augmente sensiblement les amplitudes des poids optimaux. Il est en effet plus difficile pour le système de contrôler une grande surface avec une petite surface de haut-parleurs.

4.2.2 Effet de l'angle d'incidence

La figure 7 montre l'erreur au niveau du plan de reproduction lorsque l'angle d'incidence de l'onde plane reproduite varie. On observe que plus l'angle d'incidence augmente, plus l'erreur du champ reproduit et l'amplitude des sources augmentent. Il est facile pour le système de reproduire une onde normale puisqu'il s'agit de sa configuration "naturelle" (le réseau de sources étant parallèle

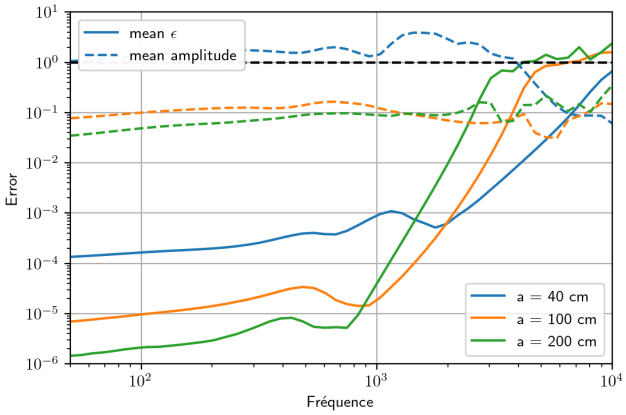

FIGURE 5 – Erreur ϵ (Eq. (9)) et amplitude moyenne des sources en faisant varier a. Les autres paramètres restent constants et égaux à $b = 40$ cm, $\theta_m = 45°$, $\phi_m = 10°$, $\lambda = 1 \times 10^{-5}$

.

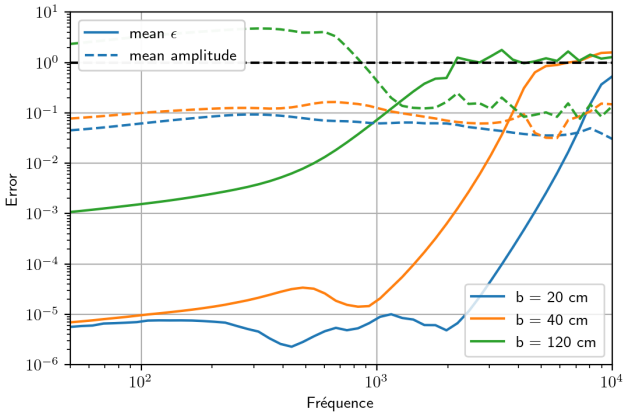

FIGURE 6 – Erreur ϵ et amplitude moyenne des sources en faisant varier b. Les autres paramètres restent constants et égaux à $a = 100$ cm, $\theta_m = 45°$, $\phi_m = 10°$, $\lambda = 1 \times 10^{-5}$

.

au plan du matériau) tandis que les angles d'incidence plus élevés nécessitent plus de compensation entre les différents haut-parleurs.

4.2.3 Conclusion de l'étude paramétrique

Différents paramètres importants du système ont été étudiés. Il a été montré qu'un certain nombre de leviers peuvent être ajustés pour dimensionner le système de synthèse du champ sonore. Suivant les incidences désirées et les bandes de fréquences visées, les dimensions des réseaux de sources et de microphones peuvent être optimisés afin d'obtenir les résultats de mesure les plus précis possibles.

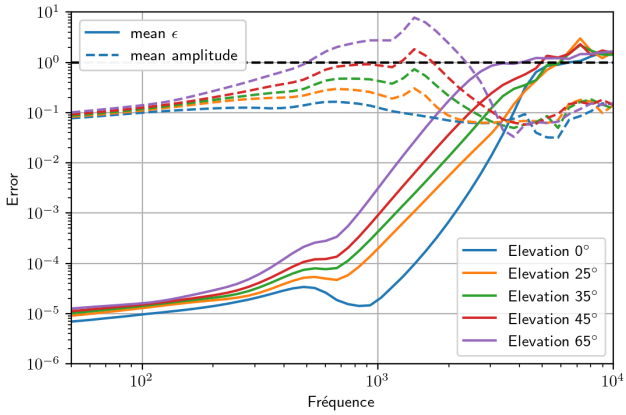

FIGURE 7 – Erreur ϵ et amplitude moyenne des sources pour différents angles d'incidence. Les autres paramètres sont égaux à $a = 100$ cm, $b = 40$ cm $\theta_m = 45°$, $\lambda = 1 \times 10^{-5}$

.

5 Simulation : synthèse de champ au dessus d'un matériau poreux

Le système présenté en figure 1 est simulé (placé au dessus d'un matériau absorbant, voir 3.1.1), les figures 8 et 9 représentent respectivement l'absorption acoustique α et l'impédance Z_s, et ce pour trois angles d'incidence différents. L'absorption est correctement retrouvée en BF bien que quelques divergences soient observées. On les retrouve de manière plus marquées sur la partie réelle de l'impédance, suggérant soit un problème numérique ou un effet résiduel des ondes évanescentes généré en champ proche. Pour le domaine des HF, on observe que plus l'angle d'incidence est grand plus la limite de validité HF arrive tôt en fréquence. Ceci peut être mis en lien direct avec l'erreur du champ reproduit (voir figure 7).

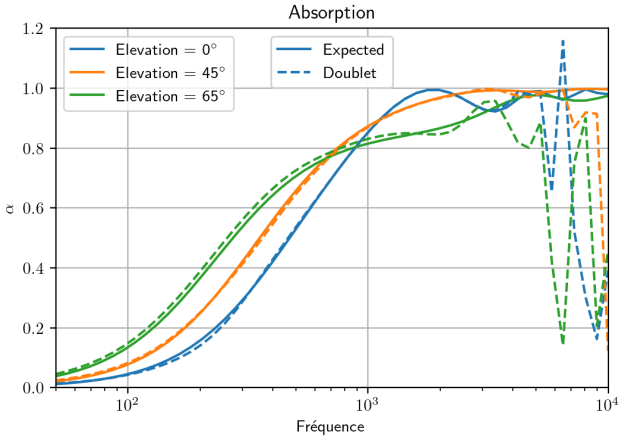

FIGURE 8 – Coefficient d'absorption α pour la configuration Fig. 1 en faisant varier l'élévation. $a = 100$ cm, $b = 40$ cm, $\theta_m = 45°$, $\lambda = 1 \times 10^{-5}$, $d = 2$ cm, $z_a = 0.5$ cm

Dans un second temps, la même configuration est

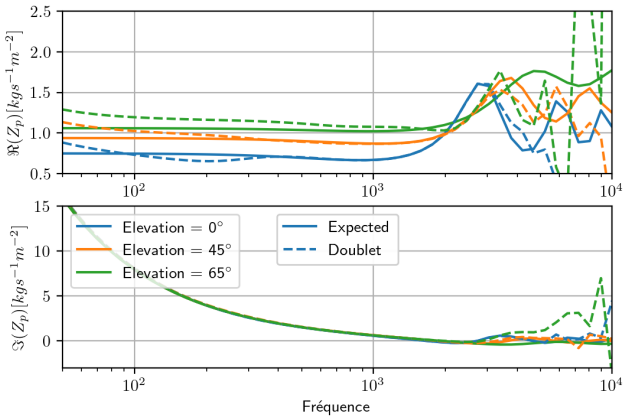

FIGURE 9 – Impédance Z_s pour la configuration Fig. 1 en faisant varier l'élévation. $a = 100$ cm, $b = 40$ cm, $\theta_m = 45°$, $\lambda = 1 \times 10^{-5}$, $d = 2$ cm, $z_a = 0.5$ cm.

utilisée, mais un signal aléatoire est ajouté de façon à obtenir un rapport signal sur bruit (SNR) de 50 dB. L'absorption correspondante est représentée sur la figure 10, où l'on observe des résultats plus bruités en BF, ce phénomène est encore plus marqué pour les forts angles d'incidence pour lesquels la direction de propagation de l'onde ne concorde pas avec la normale au matériau. Les quantités sont donc projetées sur la normale augmentant artificiellement le SNR.

Ce problème peut être réduit par l'utilisation d'un doublet avec un écartement plus grand entre microphones comme illustré sur la figure 11. On retrouve bien l'absorption attendue en BF pour un doublet de 6 cm au détriment des résultats en HF, sans souffrir des problèmes liés au champ proche d'une source ponctuelle classiquement observés lorsque de le doublet est trop grand en BF.

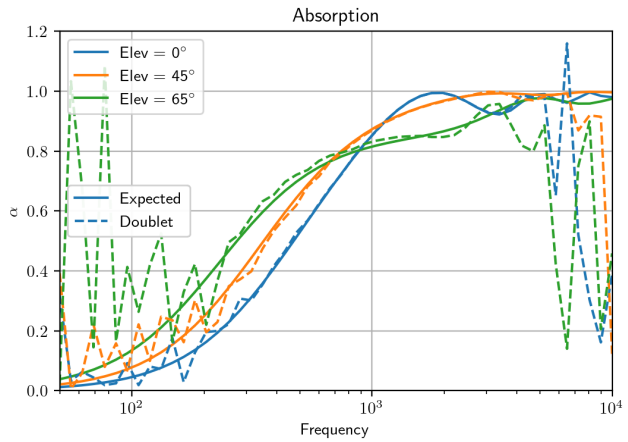

FIGURE 10 – Coefficient d'absorption α pour la configuration Fig. 1 en faisant varier l'élévation avec un SNR de 50 dB. $a = 100$ cm, $b = 40$ cm, $\theta_m = 45°$, $\lambda = 1 \times 10^{-5}$, $d = 2$ cm, $z_a = 0.5$ cm.

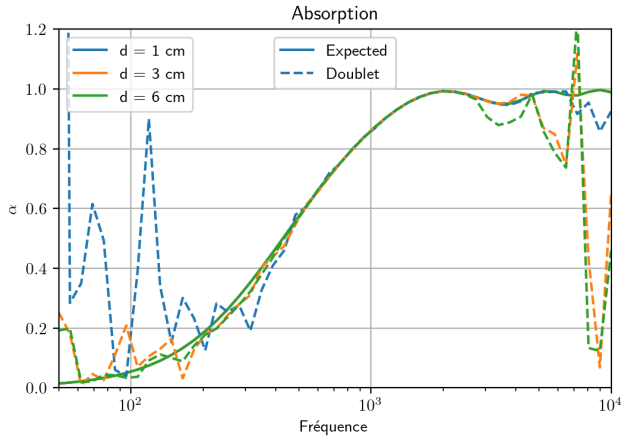

FIGURE 11 – Coefficient d'absorption α pour la configuration Fig. 1 en faisant varier la taille du doublet avec un SNR de 50 dB. $a = 100$ cm, $b = 40$ cm, $\theta_m = 45°$, $\phi_m = 25°$, $\lambda = 1 \times 10^{-5}$, $z_a = 0.5$ cm

6 Conclusion

Dans cette étude, une méthode de synthèse de champs sonores permettant de générer des ondes planes en incidence quelconque sur la surface d'un matériau à caractériser à été analysée. Dans une première partie, l'observation du champ reconstruit au-dessus d'un matériau poreux en analysant la partie incidente montre qu'il est possible de reconstruire le champ désiré. De plus, l'analyse des métriques met en évidence plusieurs paramètres afin de dimensionner le système. Finalement, le système est étudié au dessus d'un matériau poreux. Les résultats de simulation montrent qu'il est possible d'identifier les valeurs de l'absorption acoustique α et de l'impédance Z_s sur une large bande de fréquence, malgré le fait que plus l'élévation augmente plus cette bande se retrouve réduite. En BF, l'utilisation d'un doublet avec un espacement plus grand permet d'augmenter le rapport signal sur bruit sans les problèmes liés au champ proche d'une source ponctuelle classiquement observés.

Remerciements

Ce travail a été en partie financé par l'Agence Nationale de Recherche (projet VIRTECH, ANR-17-CE10- 0012). Il a également été réalisé dans le cadre du Centre Acoustique Jacques Cartier, un IRP (International Research Project) labellisé par le CNRS.

Références

[1] ASTM, Standard test method for sound absorption et sound absorption coefficients by the reverberation room method, *American Society for Testing Material International* **C423-09a** (2009).

[2] ASTM, Standard test method for impedance et absorption

of acoustical materials using a tube, two microphones et a digital frequency analysis system, *American Society for Testing Material International* **E150-12** (2012).

[3] M. Vercammen, Improving the accuracy of sound absorption measurement according to iso 354, *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics*, Melbourne, Australia (2010).

[4] C.-H. Jeong et J.-H. Chang, Reproducibility of the random incidence absorption coefficient converted from the sabine absorption coefficient, *Acta Acust. United Acust.* **101**, 99–112 (2015).

[5] J. F. Allard et Y. Champoux, *in situ* two-microphone technique for the measurement of the acoustic surface impedance of materials, Noise Control Engineering Journal **32**, (1989).

[6] R. Lanoye, G. Vermeir, W. Lauriks, R. Kruse, et V. Mellert, Measuring the free field acoustic impedance and absorption coefficient of sound absorbing materials with a combined particle velocity-pressure sensor, *The Journal of the Acoustical Society of America* **119**, 2826-2831 (2006).

[7] J. Ducourneau, V. Planeau, J. Chatillon, et A. Nejade, Measurement of sound absorption coefficients of flat surfaces in a workshop, *Applied Acoust.* **70**, 710-721 (2009).

[8] W.-L. Lin, C.-X. Bi, M. Vorländer, Y.-B. Zhang, et R. Opdam, *in situ* measurement of the absorption coefficient based on a time-domain subtraction technique with a particle velocity transducer, *Acta Acust. United Acust.* **102**, 945-954 (2016).

[9] K. Hirosawa , K. Takashima, H. Nakagawa , M. Kon, , A. Yamamoto, et W. Lauriks, Comparison of three measurement techniques for the normal absorption coefficient of sound absorbing materials in the free field, *The journal of the acoustical society of America*, **126**, 3020–3027 (2009)

[10] T. Otsuru, R.Tomiku, N. B. C. Din, N.Okamoto et M. Murakami, Ensemble averaged surface normal impedance of material using an in-situ technique : Preliminary study using boundary element method, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **125**, 3784–3791 (2009),

[11] E. Brandão, A. Lenzi, et J. Cordioli, Estimation and minimization of errors caused by sample size effect in the measurement of the normal absorption coefficient of a locally reactive surface, *Applied Acoustics*, **73**,543–556 (2012),

[12] A. Richard et E. Fernandez-Grande, Comparison of two microphone array geometries for surface impedance estimation, *The Journal of the Acoustical Society of America* **146**, 4115-4125 (2019).

[13] S. Dupont, M. Melon et A. Berry, Characterization of acoustic material at oblique incidence using a spherical microphone array, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **147**, 3613–3625 (2020)

[14] Y. Zhang, Z. Kuang, M. Wu et J. Yang, In-situ measurement of sound absorbing properties using plane-wave sound field reproduced by virtual loudspeaker array, *Building and Environment*, **94**, 883–890 (2015)

[15] J. F. Allard et N. Atalla, Propagation of sound in porous media : modelling sound absorbing materials, *Wiley*, 2009,

[16] J.F. Allard, W. Lauriks et C. Verhaegen, , The acoustic sound field above a porous layer and the estimation of the acoustic surface impedance from free-field measurements, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **91**, 3057–3060 (1992)

[17] J.F. Allard et B. Sieben, Measurements of acoustic impedance in a free field with two microphones and a spectrum analyzer, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **77**, 1617–1618 (1985)