



Évaluation des performances d'une chambre d'isolation acoustique destinée à la validation expérimentale de validation de parole

Yo Fujiso, Annemie van Hirtum

► To cite this version:

Yo Fujiso, Annemie van Hirtum. Évaluation des performances d'une chambre d'isolation acoustique destinée à la validation expérimentale de validation de parole. RJCP 2011 - 9ème Rencontres des Jeunes Chercheurs en Parole, May 2011, Grenoble, France. pp.43. hal-00596957v2

HAL Id: hal-00596957

<https://hal.science/hal-00596957v2>

Submitted on 30 May 2011

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.

Évaluation des performances d'une chambre d'isolation acoustique destinée à la validation expérimentale de production de parole

Y. Fujiso, A. Van Hirtum

GIPSA-Lab, UMR 5216 CNRS, INPG
961 rue de la Houille Blanche BP 46 - 38402 Grenoble Cedex, FRANCE
+33 (0)4 76 57 48 48 / yo.fujiso@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

ABSTRACT

A non expensive sound insulation box used for aero-acoustic experiments at moderate Reynolds numbers ($Re < 2.10^4$) and low Mach numbers ($M < 0.2$) relevant to the study of speech production is presented. Its performance is evaluated with particular attention to unwanted noise sources inherent to the flow facility. Objective acoustic parameters of the insulation box are assessed.

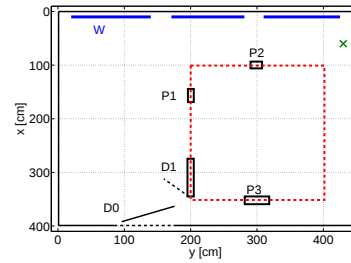
Keywords: aeroacoustics, sound insulation, room acoustics, instrumentation, speech production

1. Introduction

Le présent article résulte de la nécessité d'effectuer des expériences aéroacoustiques pour étudier les mécanismes physiques de la production de parole. Dans une salle rectangulaire d'expérimentation ($4.45 \times 4 \times 2.80\text{m}$, volume 49.8m^3) non traitée acoustiquement, de l'air comprimé provenant d'un compresseur situé dans une autre salle circule dans une conduite uniforme de diamètre 1cm pour laquelle le débit volumique peut être imposé au moyen d'un régulateur de pression et d'une valve manuelle. Les géométries et débits volumiques d'intérêt sont tels que les écoulements étudiés sont caractérisés par des nombres de Reynolds modérés ($Re < 2.10^4$) et des nombres de Mach faibles ($M < 0.2$), typiques des signaux de parole. Les fréquences acoustiques d'intérêt sont inférieures à 10kHz. Le régulateur de pression et le circuit d'air génèrent un bruit de fond large bande constant, qui ne peut pas être facilement filtré car il affecte toutes les fréquences. D'autres sources de bruit constant telles que le PC de mesure sont également présentes. Enfin, plusieurs sources de bruit ponctuelles et aléatoires sont dues à l'intérieur aux activités de collègues et à l'extérieur au passage de personnes et de véhicules.

En raison de la grande diversité des sources de bruit, au lieu de les isoler séparément chacune, il a été choisi d'intégrer dans la salle d'expérimentation une chambre d'isolation acoustique peu coûteuse qui soit adaptée aux expérimentations aéroacoustiques pour des écoulements dans les gammes de Reynolds et Mach considérées. Le dimensionnement de la chambre est considéré comme réussi si le bruit produit durant les expériences aéroacoustiques par les écoulements à nombres de Reynolds modérés et faibles nombres de Mach peut être étudié dans des conditions acoustiques acceptables, c'est à dire si la chambre possède

un coefficient d'absorption élevé (et donc un temps de réverbération très faible) et une isolation acoustique des sources de bruit extérieures à la chambre suffisante pour que ces dernières ne perturbent pas les mesures.



(a) Vue de dessus



(b) P2 et P1



(c) P1, D1 et P3

Figure 1: (a) Vue 2D de la salle d'expérimentation et de la chambre d'isolation (pointillés) - (b),(c) photographies de la chambre

2. Dimensionnement

En raison de contraintes de place et de fabrication, les dimensions externes de la chambre d'isolation sont réduites à $2.07 \times 2.10 \times 2.14\text{m}$. Un schéma de la salle d'expérimentation et de la chambre est représenté sur la figure 1. La chambre, entièrement démontable, est formée d'un assemblage de panneaux rigides en fibre de bois d'épaisseur 2.5cm recouverts de mousse acoustique (SE50-AL-ML, Elastomeres Solutions) d'épaisseur 5cm. 3 trappes permettent le passage des câbles d'instrumentation et l'insertion de la géométrie à étudier. La mousse acoustique absorbe les fréquences entre 100Hz et 10kHz ce qui est *a priori* adapté aux sources de bruit large bande telles que le régulateur de pression, le PC de mesure, etc. Les basses fréquences ($\leq 1000\text{Hz}$) sont mieux absorbées grâce à l'insertion d'une couche de base de PVC (5kg/m^2) à laquelle de

la mousse en polyuréthane est ajoutée. Ainsi, les panneaux d'isolation de la chambre sont composés de 3 couches - bois, PVC, mousse - avec une épaisseur totale de 7.5cm.

En plus de l'isolation des sources de bruit extérieures, la mousse acoustique sert également à atténuer les fréquences de résonance de cavité $f_{n_x}, f_{n_y}, f_{n_z}$ données par [4]

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad (1)$$

avec c la vitesse du son, $n_{x,y,z}$ les indices modaux et $L_{x,y,z}$ les longueurs intérieures (voir table 1).

Table 1: Caractéristiques de la chambre d'isolation

Dimensions intérieures	$L_x=1.92m, L_y=1.95m, L_z=1.99m$	
Volume intérieur V	$7.45m^3$	
Surface intérieure S	$22.9m^2$	
Coefficient d'absorption	2.5-10kHz	98%
mousse absorbante	1-2.5kHz	80%
(SE50-AL-ML)	100Hz-1kHz	$\leq 80\%$ (linéaire)
Épaisseur de paroi	7.5cm	

3. Évaluation des performances acoustiques de la chambre

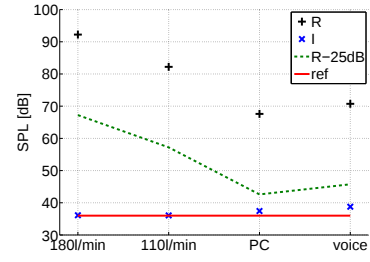
3.1. Atténuation des sources extérieures

Les performances acoustiques sont d'abord évaluées par rapport aux sources de bruit indésirables inhérentes au dispositif de mesure et au circuit d'écoulement d'air. Un microphone omnidirectionnel Brüel & Kjaer (type 4192) est utilisé pour effectuer les mesures acoustiques dans la salle non-traitée et la chambre d'isolation. Tous les niveaux de pression sonore (SPL, *Sound Pressure Levels*) sont exprimés en dB SPL par

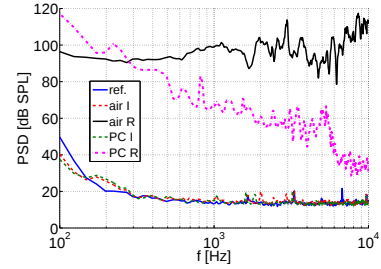
$$SPL = 20 \log_{10} \left(\frac{p_{rms}}{p_{ref}} \right) \quad (2)$$

avec $p_{ref} = 2.10^{-5}Pa$ et $p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i^2}$, p_i étant le $i^{ème}$ échantillon de pression acoustique mesuré. Une source indésirable est considérée ne pas avoir d'influence dans le cas où l'écart entre le SPL de celle-ci et celui de la source d'intérêt est supérieur à 25dB. L'atténuation des bruits de fond à l'intérieur et à l'extérieur de la chambre d'isolation dus à l'alimentation en air (110L/min) et au PC est donnée sur la figure 2(a).

Concernant l'atténuation spectrale de la chambre d'isolation, la figure 2(b) montre l'atténuation par rapport au niveau de référence pour les sources de bruit indésirables inhérentes à la procédure expérimentale, *i.e.* l'alimentation en air (110L/min) et le PC allumé. Les deux sources sont de type large bande dont le spectre couvre le domaine fréquentiel tout entier si mesuré dans la salle non traitée. On observe que les spectres correspondants mesurés à l'intérieur de la chambre d'isolation coïncident avec le niveau de



(a) Niveau de pression sonore (re. $2.10^{-5}Pa$)



(b) Densité spectrale de puissance

Figure 2: Efficacité d'isolation de la chambre pour des bruits de fond typiques (alimentation en air à 110L/min et PC allumé dans la salle d'expérimentation (R) et dans la chambre (I))

référence pour $f \geq 300Hz$, et que pour $f < 300Hz$, l'écart avec le niveau de référence est inférieur à 10dB. En dépit de la forme quasi-carrée de la chambre, l'atténuation est indépendante de ses modes acoustiques. Par conséquent, l'atténuation spectrale de la chambre d'isolation pour les sources de bruit indésirables inhérentes à la procédure de mesure et à l'alimentation en air est jugée satisfaisante.

3.2. Homogénéité spatiale

L'homogénéité spatiale de la chambre d'isolation est évaluée. Une chambre de compression (SHOW/SKY TU-100) alimentée par des signaux sinusoïdaux est utilisée comme source sonore arbitraire omnidirectionnelle. On fait varier les fréquences des signaux sinusoïdaux entre 100Hz et 10kHz avec des pas de 25Hz. Le SPL émis par la source pour toutes les fréquences est de 91.3dB. Afin d'évaluer l'homogénéité acoustique de la chambre d'isolation, différentes positions de microphone sont utilisées pour une position de source fixe au centre de la chambre à une hauteur de 18cm au dessus de son sol.

Les SPL moyens mesurés en fonction de la fréquence pour des positions de microphone situées à 1.32m de la source sont donnés sur la figure 3 et l'on trouve $41.7 \pm 2.7dB$. Les écart-types correspondants sont également indiqués. L'écart-type maximum est inférieur à 5dB et s'élève en moyenne à 1.7dB ce qui correspond à 4% de la valeur moyenne en dB. Pour les positions de microphone situées à 1.03m, la tendance générale de la courbe est maintenue. La valeur moyenne pour toutes les fréquences atteint $43 \pm 3.8dB$. De plus, l'écart-type moyen pour chaque fréquence

s'élève à 1.5dB ce qui correspond à moins de 4% de sa valeur moyenne. Par conséquent, le coefficient d'absorption varie en fonction de la fréquence tandis que l'homogénéité spatiale pour une fréquence donnée a une précision de 4%. On observe que l'absorption est moins bonne pour les fréquences en-dessous de 2500Hz, ce qui est en accord avec les caractéristiques de la mousse données dans la table 1. On observe également que l'absorption est moins bonne autour de 8100Hz.

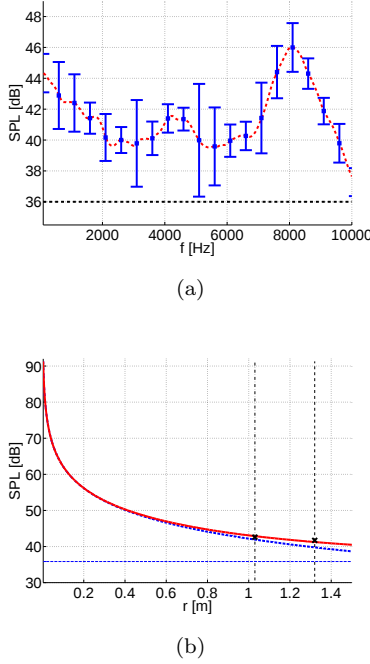


Figure 3: (a) Moyenne et écart-type des SPL mesurés avec 4 positions de microphone à 1.32m de la source en fonction de la fréquence. La ligne horizontale indique le niveau de bruit de fond. (b) Décroissance en fonction de la distance r depuis la source pour une source ponctuelle de 91.3 dB SPL pour $\alpha = 0.9$ (equ. 3). Le champ direct (décroissance en pointillés), le champ diffus (ligne pointillée horizontale) et le champ total (ligne épaisse) sont indiqués. Les lignes verticales pointillées correspondent à une distance de 1.03 et de 1.32m de la source. Les valeurs des dB SPL totaux correspondant aux positions de mesure sont indiquées ($\times$).

La figure 3(b) représente la décroissance modélisée d'une source ponctuelle en fonction de la distance r depuis la source [6, 4]. Comme pour les données mesurées, le niveau de la source est réglé à 91.3 dB SPL. La décroissance est modélisée en supposant une directivité uniforme telle que :

$$p_{rms}^2(W, S, \alpha, r) = \rho c \left(\frac{W}{4\pi r^2} + \frac{4W(1-\alpha)}{\alpha S} \right), \quad (3)$$

avec S la surface totale de paroi, α le coefficient d'absorption moyen, W la puissance de la source et ρ la densité de l'air. Le 1^{er} terme correspond au champ direct dû à la source ponctuelle et le 2nd au champ diffus. Pour $0.8 \leq \alpha \leq 0.95$, les valeurs en dB prédites des SPL fournissent une bonne estimation des valeurs mesurées comme le montre la figure 3(b) pour $\alpha = 0.9$.

3.3. Temps de réverbération

Le temps de réverbération Tr représente la durée requise pour que le niveau sonore diminue de 60dB après une impulsion sonore ou après l'arrêt d'un bruit stationnaire [2, 6]. Sa valeur peut être estimée *ad-hoc* par l'équation de Sabine qui, sous l'hypothèse que chaque paroi a le même coefficient d'absorption α , comme c'est le cas pour la chambre d'isolation, est donnée par [7]

$$Tr_s(V, S, \alpha) = \frac{24V \ln(10)}{c\alpha S}, \quad (4)$$

avec V le volume de la chambre. Cependant, l'équation de Sabine surestime le temps de réverbération dans le cas de coefficients d'absorption α élevés et de petites salles [2]. Sachant que pour la chambre d'isolation $0.8 \leq \alpha \leq 0.95$ et que α est supposé uniforme sur toutes les parois, une meilleure estimation du temps de réverbération s'obtient par la théorie de Norris-Eyring [3] :

$$Tr_{ne}(V, S, \alpha) = -\frac{24V \ln(10)}{cS \ln(1-\alpha)}. \quad (5)$$

Les temps de réverbération estimés avec les équations (4) et (5) sont $Tr_s(0.8 \leq \alpha \leq 0.95) = 61 \pm 5$ ms et $Tr_{ne}(0.8 \leq \alpha \leq 0.95) = 28 \pm 5$ ms. La méthode image-source (MIS, [1, 5]) est également appliquée pour estimer le temps de réverbération et l'on obtient $Tr_{mis}(0.8 \leq \alpha \leq 0.95) = 25 \pm 7$ ms. On remarque que Tr_{mis} et Tr_{ne} sont du même ordre de grandeur tandis que Tr_s est approximativement le double de cette valeur.

Le temps de réverbération de la chambre est expérimentalement estimé à partir de la réponse impulsionnelle d'une explosion de ballon (figure 4), au moyen de l'intégrale de Schroeder [6]

$$E(t) = 10 \log_{10} \left(\int_t^\infty h^2(\tau) d\tau \right) \quad (6)$$

$$Tr_m = 60dB \frac{t_{(-35dB)} - t_{(-5dB)}}{(-5dB) - (-35dB)} \quad (7)$$

où $t_{(-XdB)}$ représente la durée au bout de laquelle la décroissance énergétique $E(t)$ a diminué de XdB en-dessous de sa valeur initiale. À partir de 12 réponses impulsionnelles mesurées, on obtient $Tr_m = 59 \pm 10$ ms. En nommant $\bar{Tr}_m = 59$ ms la valeur moyenne mesurée, l'impulsion peut être modélisée par [6]

$$\hat{h}^2(t) = e^{\frac{-13.8t}{\bar{Tr}_m}}, \quad (8)$$

sachant que $10 \log_{10} (\hat{h}^2(t = Tr_m)) = -60$ dB. Les valeurs mesurées et prédites du temps de réverbération Tr sont dans l'intervalle 20-65ms. Ces valeurs de Tr très basses confirment la forte absorption de la chambre d'isolation. Afin de valider l'influence des coefficients d'absorption $\alpha(f)$ plus faibles pour les basses fréquences, le temps de réverbération est estimé à partir des réponses impulsionnelles filtrées par passe-haut, $f \geq 2000$ Hz, où la fréquence de coupure est choisie de telle sorte que, en se basant sur les caractéristiques acoustiques de la mousse décrites sur la table 1, le coefficient d'absorption dépend moins de la fréquence. $Tr_m(f \geq 2000\text{Hz}) = 31 \pm 2$ ms, ce qui

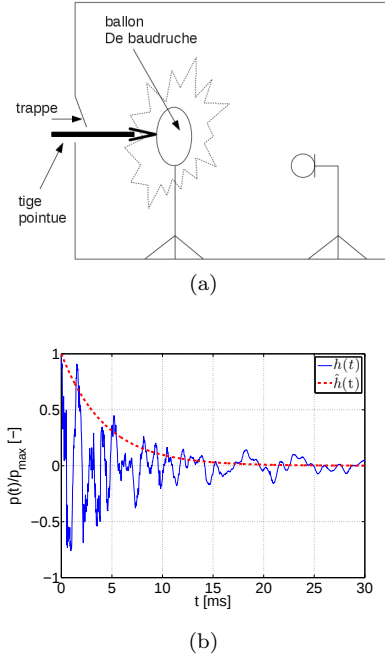


Figure 4: (a) Dispositif utilisé pour générer une impulsion sonore dans la chambre. (b) Exemple de réponse impulsionnelle mesurée normalisée $h(t)$ (ligne pleine fine) et réponse impulsionnelle modélisée $\hat{h}(t) = e^{\frac{-13.8t}{Tr_m}}$ (ligne pointillée).

Table 2: Temps de réverbération prédits et mesurés.

	Symbole	Méthode	Valeur [ms]
Modèle	Tr_s	Sabine	61 ± 5
	Tr_{ne}	Norris-Eyring	28 ± 5
	Tr_{mis}	Image Source (MIS)	25 ± 5
Mesure	Tr_m	Rép. impulsionnelle	59 ± 10
		Rép. impuls. filtrée	31 ± 2
Total	Tr		$30 \leq Tr \leq 60$

est dans la gamme des $Tr_{ne,mis}$ prédits. Ceci confirme la sous-estimation de $Tr_{ne,mis}$ due à la surestimation du coefficient d'absorption moyen α . Également, le filtrage passe-haut réduit l'écart-type des Tr mesurés de 17% (± 10 ms) à 6% (± 2 ms) ce qui indique une perte de précision des Tr_m mesurés pour les basses fréquences ($f < 2000$ Hz) due à un biais basse-fréquence des réponses impulsionnelles mesurées.

Afin de considérer plus en détail le temps de réverbération Tr_m , la figure 5 représente le Tr_m estimé pour chaque bande d'octave entre 89Hz et 22.5kHz. La région basses fréquences ($f \leq 355$ Hz), correspondant aux deux 1^{ères} bandes d'octave, est caractérisée par des temps de réverbération $Tr > 60$ ms avec un écart-type élevé de 17%. Pour les bandes d'octave au-dessus de 355Hz, le Tr_m moyen décroît graduellement pour atteindre $Tr_m(f \geq 1400\text{Hz}) = 31 \pm 2$ ms et son écart-type se réduit à 6%. Pour les fréquences intermédiaires ($355 < f < 1400$ Hz), le temps de réverbération varie entre 30 et 60ms. Les valeurs relevées sont en accord avec les estimations pour les Tr_m et $Tr_m(f \geq 2000\text{Hz})$ listés sur la table 2.

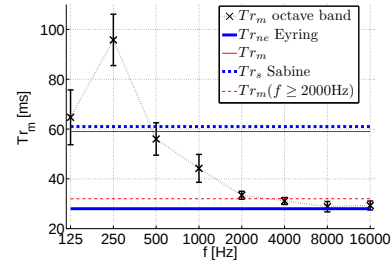


Figure 5: Moyenne (x) et écart-type estimés (barres d'erreur verticales) du temps de réverbération Tr_m pour chaque bande d'octave entre 89Hz et 22.5kHz. Le Tr_m moyen mesuré (ligne pleine fine), le $Tr_m(f \geq 2000)$ filtré passe-haut (ligne pointillée fine), le Tr_s modélisé (ligne pointillée épaisse) et le Tr_{ne} modélisé (ligne pleine épaisse) sont indiqués pour comparaison.

4. Conclusion

Une chambre d'isolation acoustique peu coûteuse destinée à des expériences aéroacoustiques à faibles nombres de Mach ($M < 0.2$) et nombres de Reynolds modérés ($Re < 2 \cdot 10^4$) pour l'étude de la production de parole est intégrée dans une salle d'expérimentation ordinaire équipée d'une alimentation en air comprimé. Sa conception est un compromis entre des besoins expérimentaux aéroacoustiques et des limitations pratiques. La chambre isole les bruits large bande inhérents au dispositif expérimental. L'homogénéité spatiale des SPL mesurés a une précision de 4% entre 100Hz et 10kHz. Le coefficient d'absorption moyen est estimé à $0.8 \leq \alpha \leq 0.95$, ce qui est dans la gamme caractéristique de la mousse recouvrant les parois de la chambre. Le temps de réverbération de la chambre est compris entre 30 et 60ms. Ainsi, la chambre d'isolation présentée permet d'effectuer des expériences aéroacoustiques pour l'étude de la production de parole dans des conditions acoustiques acceptables.

Références

- [1] J.B. Allen and D.A. Berkley. Image method for efficiently simulating small-room acoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 65(4) :943–950, 1979.
- [2] D. Davis and E. Patronis. *Sound system engineering*. Focal Press, 2006.
- [3] C.F. Eyring. Reverberation time in 'dead' rooms. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1 :168, 1930.
- [4] L.E. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens, and J.V. Sanders. *Fundamentals of Acoustics*. 1999.
- [5] E.A. Lehmann and A.M. Johansson. Prediction of energy decay in room impulse responses simulated with an image-source model. *Journal of the Acoustical Society of America*, 124 :269, 2008.
- [6] T.D. Rossing. *Springer Handbook of Acoustics*. Springer Verlag, 2007.
- [7] W.C. Sabine. *Collected papers on acoustics*. Harvard university press, 1922.