

Méthode de mesure d'impédance de petits éléments acoustiques

Dominique Rodrigues¹, Cécile Guianvarc'h², Jean-Noël Durocher¹,
Michel Bruneau³, Anne-Marie Bruneau³

¹ Laboratoire Nationale de métrologie et d'Essais, 78197 Trappes, France.

² Institut National de Métrologie / Conservatoire National des Arts et Métiers, 61 rue du Landy,
93210 La Plaine St-Denis, France.

³ Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, 72085 Le Mans, France.

Courriel : dominique.rodrigues@lne.fr

Résumé :

Le dispositif de mesure d'impédance acoustique proposé dans ce document repose sur la méthode de réciprocité utilisée pour l'étalonnage des microphones électrostatiques. Parce qu'elle fait usage d'un matériel d'une grande sensibilité et d'une grande reproductibilité, cette méthode est particulièrement bien adaptée pour effectuer des mesures précises d'impédances d'entrée de petits éléments acoustiques tels que des tubes ou des fentes annulaires. L'admittance d'entrée de l'élément à caractériser est déduite de mesures électriques et de modèles analytiques de champs acoustiques et est ensuite comparée à l'admittance théorique calculée sur la base des dimensions géométriques de l'élément étudié. La validation de cette méthode de mesure passe par la réalisation de petits éléments acoustiques de dimensions connues avec de faibles incertitudes (de l'ordre du μm pour les dimensions sensibles). Ces faibles incertitudes nécessitent une étude fine de la procédure de fabrication et des techniques d'usinages particulières.

Abstract :

The measurement device suggested in this paper for measuring acoustical impedance of small acoustic components such as small tubes or circular slits is assumed to be optimised because it uses the very well optimised reciprocity calibration method and the corresponding set-up. Electrical measurements and analytical acoustic models lead to the input admittance of the element to be characterized. This result is then compared with the theoretical value of the admittance of the element, obtained from classical model given the shape and the dimension of the element considered. To validate this measurement method, small acoustic components with very well known dimensions and more particularly with small uncertainties (about $1 \mu\text{m}$ for the significant dimensions) are required. These small uncertainties require a fine study of the manufacturing procedure and specific manufacturing techniques.

Mots-clefs : acoustique ; métrologie ; impédance.

1 Introduction

La mesure d'impédance d'entrée d'éléments acoustiques a fait jusqu'à présent l'objet de plusieurs travaux, voir par exemple l'article de revue Dalmont (2001). Néanmoins, ces méthodes ne permettent pas la mesure avec une bonne précision d'impédance d'entrée de petits éléments acoustiques tels que des petits tubes ou fentes annulaires minces dont les dimensions transversales sont de l'ordre du millimètre. Rodrigues *et al.* (2006) proposent une méthode cherchant à répondre à ces nouvelles exigences en utilisant les avancées de la métrologie fine mises en œuvre pour l'étalonnage des microphones en pression par la méthode de réciprocité. Cette étude a montré la faisabilité de la méthode en ce qu'elle conduit à des résultats expérimentaux compatibles avec les résultats théoriques (calculés sur la base des dimensions géométriques des petits éléments) sur une large bande de fréquence (environ 5kHz). Néanmoins,

les imperfections des petits éléments acoustiques utilisés conduisent à des incertitudes importantes sur les résultats théoriques, ce qui limite la précision dans la comparaison avec les résultats de mesures effectuées. L'objet de cet article est de montrer les améliorations apportées au dispositif dans le but d'affiner les comparaisons et d'accéder ainsi à une meilleure connaissance de la précision de la technique de mesure proposée.

2 Méthode de mesure des impédances d'entrée de petits éléments acoustiques

Le dispositif de mesure d'impédance proposé dans cette étude nécessite l'usage de deux microphones, un émetteur (de sensibilité M_{pe}) et l'autre récepteur (de sensibilité M_{pr}), couplés à l'aide d'une cavité acoustique où les petits éléments acoustiques à caractériser sont placés en paroi sur la périphérie (figure 1).

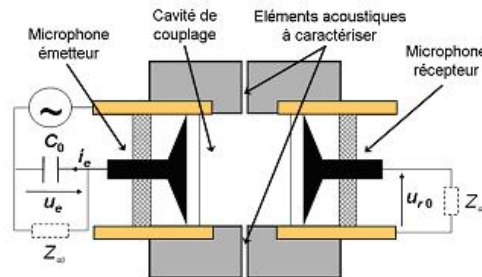


FIG. 1 – Dispositif utilisé pour la mesure des admittances de petits éléments acoustiques.

Le produit des sensibilités M_{pe} et M_{pr} des microphones est défini selon la norme internationale CEI 1094-2 (1992) par la relation :

$$M_{pe} M_{pr} \approx Y_T / Y_E, \quad (1)$$

où

$$Y_E = \frac{i_e}{u_{r0}}, \quad (2)$$

est l'admittance électrique de transfert mesurée à l'aide du dispositif expérimental, définie comme le quotient du courant i_e qui alimente le microphone émetteur par la tension à circuit ouvert u_{r0} aux bornes du microphone récepteur, et où

$$Y_T = \frac{q_e}{p_r}, \quad (3)$$

est l'admittance acoustique de transfert, représentant le quotient du débit q_e de la membrane de l'émetteur en court-circuit acoustique par la pression p_r sur la membrane du récepteur. L'admittance acoustique de transfert Y_T est déterminée à l'aide d'un modèle analytique décrivant les phénomènes acoustiques mis en jeu dans la cavité : elle dépend de l'admittance d'entrée Y des petits éléments acoustiques à caractériser. L'étude du champ acoustique à l'intérieur des cavités de couplage à fait l'objet de plusieurs travaux de modélisation, par exemple Guianvarc'h (2005), Guianvarc'h *et al.* (2006, *J. Sound Vib*), Guianvarc'h *et al.* (2006, *Acta Acustica*), Ballagh (1987) ou Rasmussen (1993). L'étude précédente Rodrigues *et al.* (2006) présente le modèle dit « modèle ondes planes », qui repose sur la propagation d'ondes planes suivant l'axe de la cavité cylindrique et qui constitue un bon compromis entre simplicité d'utilisation et précision. L'amortissement des ondes dû aux effets viscothermiques est pris en compte dans le nombre d'onde et par l'introduction d'impédances de paroi aux extrémités (Bruneau (1987, chap. 2)). L'admittance acoustique de transfert s'écrit alors sous la forme :

$$Y_T = Y_{T0} + \alpha Y, \quad (4)$$

où Y_{T0} représente l'admittance acoustique de transfert du coupleur en l'absence de petits éléments acoustiques en paroi, α un facteur connu fonction de la longueur de la cavité et des impédances des microphones utilisés ($\alpha=1$ pour une modèle petite cavité) et Y représente l'admittance acoustique de l'élément à caractériser.

Le report de l'équation (1) dans l'équation (4) permet de déduire l'expression de l'admittance d'entrée Y du petit élément acoustique sous la forme :

$$Y = \frac{Y_E M_{pe} M_{pr} - Y_{T0}}{\alpha}. \quad (5)$$

L'admittance d'entrée Y est ici exprimée en fonction des sensibilités des microphones M_{pe} et M_{pr} . En pratique, du fait que les sensibilités des microphones dépendent uniquement des microphones et non du coupleur utilisé pour effectuer la mesure, le produit de ces sensibilités (dans l'équation (5)) peut être déterminé très simplement en effectuant une mesure avec un coupleur de référence habituellement utilisé pour effectuer les étalonnages des microphones en pression, coupleur sans élément acoustique en paroi : l'admittance électrique de transfert mesurée Y'_E et l'admittance acoustique de transfert calculée Y'_T sont liées alors par la relation,

$$Y'_T = M_{pe} M_{pr} Y'_E. \quad (6)$$

Le report de cette équation (6) dans l'équation (5) conduit finalement à l'expression de l'admittance d'entrée

$$Y = \frac{Y'_T}{\alpha} \left(\frac{Y_E}{Y'_E} - \frac{Y_{T0}}{Y'_T} \right). \quad (7)$$

L'obtention de l'admittance d'entrée Y nécessite alors le calcul du terme α , des admittances acoustiques de transfert Y_{T0} et Y'_T (sur la base du modèle cité précédemment) et la mesure des admittances électriques de transfert Y_E et Y'_E .

L'admittance expérimentale Y ainsi obtenue est ensuite comparée à l'admittance théorique calculée sur la base des dimensions géométriques des éléments acoustiques à l'aide des modèles analytiques présentés dans le rapport Bruneau *et al.* (2002), modèles prenant en compte les effets viscothermiques.

3 Discussions et améliorations du dispositif expérimental

L'étude présentée dans la référence Rodrigues *et al.* (2006) illustrée par la figure 2 pour une fente annulaire ouverte permet de comparer les résultats de mesures d'impédances d'entrée (trait continu, zone d'incertitude hachurée) aux résultats théoriques (trait discontinu, zone d'incertitude grisée). Elle met en évidence la faisabilité de la méthode de mesure sur une large bande de fréquence (environ 100Hz -5kHz), faisabilité vérifiée pour une fente annulaire mince, 4 tubes ouverts et 4 tubes chargés par un volume à leurs extrémités. Néanmoins, cette étude ne permet pas de conclure quant à la précision accessible à la mesure en raison des incertitudes importantes sur les admittances théoriques : l'incertitude relative peut atteindre 28% sur le module pour les fentes et 90% sur le module pour les 4 tubes en raison de la mauvaise qualité des tubes utilisés.

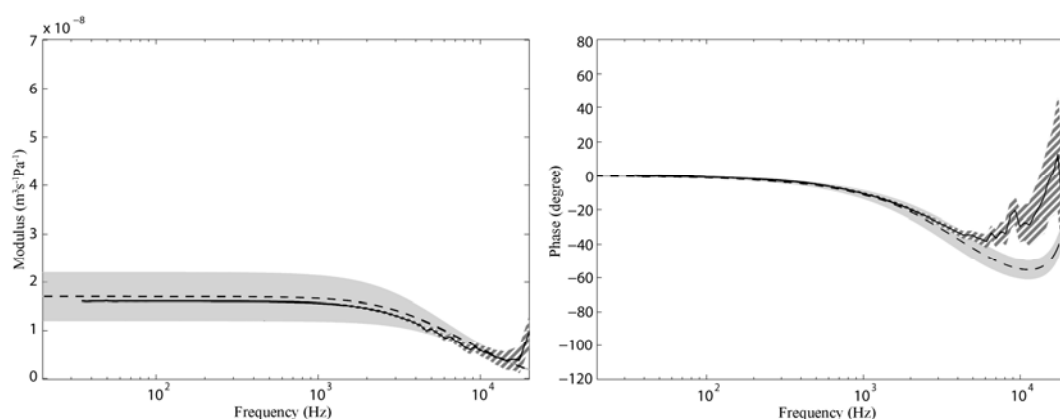


FIG. 2 : Modules et phases de l'admittance d'entrée d'une fente ouverte à l'extrémité ; courbes théoriques (trait discontinu) et expérimentales (trait continu), et intervalles d'incertitudes (respectivement zone grisée et zone hachurée).

Afin de mieux connaître la précision accessible à la mesure il est nécessaire d'utiliser des coupleurs (fentes et tubes) dont la précision des cotes est meilleure que celle en usage à l'heure actuelle en précision des besoins qui se font jour sur les systèmes micro usinés. Les modèles analytiques montrent en effet que les admittances théoriques d'une fente ouverte et de 4 tubes ouverts sont particulièrement sensibles respectivement à l'épaisseur de la fente et au diamètre des tubes. Les nouveaux coupleurs réalisés par des techniques adaptées pour la circonstance présenteront des incertitudes plus faibles que les précédents. Le tableau 1 présente les dimensions et les incertitudes des anciens éléments utilisés et celles des nouveaux éléments devant permettre d'accéder à une incertitude relative inférieure à 5% pour le module et à 2° pour la phase sur les admittances d'entrée théoriques des éléments en question.

Grandeurs	Anciens éléments		Nouveaux éléments	
	Dimensions	Incertitudes	Dimensions	Incertitudes
Fente annulaire mince				
Epaisseur	71,20 μm	6 μm	100 μm	1 μm
Longueur	3,833 mm	6 μm	1,32 mm	10 μm
4 tubes				
Rayons				
Dimensions du fabricant	225 μm	10 μm	225 μm	1 μm
Dimensions mesurées à une des extrémités des tubes	190 ; 185 ; 180 ; 150 μm	8 ; 23 ; 20 ; 30 μm		
Longueurs	3,80 mm	50 μm	3,80 mm	10 μm

Tableau 1 : Dimensions des petits éléments acoustiques et incertitudes sur leurs dimensions.

La figure 3.a montre une esquisse en 3 dimensions (vue en coupe) du coupleur étudié pour obtenir la fente annulaire mince souhaitée. La conception de ce coupleur cherche à respecter deux objectifs : l'incertitude sur l'épaisseur de la fente (1 μm) et l'incertitude sur sa longueur (10 μm). Afin d'y parvenir, le coupleur est constitué de deux pièces principales identiques pourvues de trois bras de support en périphérie. La particularité de chacune de ces pièces est que la surface délimitant la fente annulaire et les trois surfaces d'appuis des supports sont confondues dans le même plan. Cette opération est obtenue en rectifiant ces surfaces en même temps par rodage avec une finition miroir. La fente est alors créée en plaçant entre chaque

support des cales étalons mesurées par interférométrie avec une incertitude de l'ordre du centième de μm . Cette solution présente également l'avantage de pouvoir faire varier l'épaisseur de la fente en utilisant des jeux de cales d'épaisseurs différentes. Enfin, la procédure de fabrication prévoit de percer les trous de fixations et de centrage dans un bloc cylindrique unique qui sera ensuite scié en deux à mi-hauteur. Après repérage de chaque trou, les deux blocs ainsi obtenus seront usinés afin d'obtenir les pièces principales du coupleur. Le centrage des deux pièces principales sera alors garanti à $10\ \mu\text{m}$ en appariant les deux pièces convenablement et en utilisant des goupilles de précision adaptées.

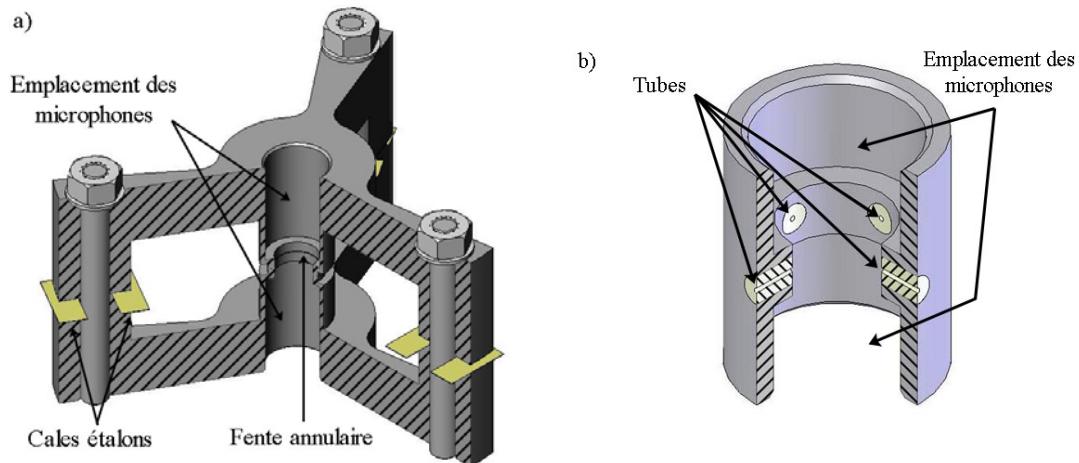


FIG 3 : Esquisses en 3 dimensions (vue en coupe) des projets de coupleurs pour la mesure de l'impédance acoustique de la fente annulaire ouverte (a) et des 4 tubes ouverts (b) (les échelles sont différentes).

La figure 3.b montre une esquisse en 3 dimensions (vue en coupe) du coupleur étudié pour la mesure de l'impédance acoustique des 4 tubes. Ce coupleur est d'une conception plus simple que le précédent, la seule difficulté qui reste néanmoins importante est la réalisation des tubes avec la précision requise. Les techniques de perçages usuels (foret, laser ou électroérosion) ne permettent pas de percer des trous avec un rapport rayon/longueur aussi petit avec une telle précision. La solution retenue consiste à mouler des petits cylindres en alumine autour d'un fil de diamètre connu au μm près. Après démoulage, les petits cylindres obtenus sont ensuite adaptés et encastrés dans le coupleur. La forme concave à l'intérieur du coupleur est reproduite sur une extrémité des cylindres afin d'exclure toute discontinuité importante. Des piges de précision permettront alors le contrôle des diamètres des tubes au μm près.

Enfin, la méthode de mesure impose que les deux microphones soient isolés électriquement. Le matériau choisi pour l'usinage de ces deux coupleurs est donc l'alumine, connu pour ses propriétés d'isolant électrique et qui de plus, offre des propriétés mécaniques intéressantes notamment en terme de résistance à la flexion, propriété importante pour le coupleur « fente ouverte » puisque l'absence de matière au centre du coupleur pourrait entraîner une compression de la fente provoquée par le système de fixation des microphones (un simple ressort). L'épaisseur des bras des supports a été dimensionnée de manière à limiter cet effet (évalué à moins de $2/100$ de μm pour une force de 5N).

4 Conclusions

La validation de la méthode de mesure proposée dans ce document par comparaison directe avec les admittances d'entrée théoriques (calculées sur la base des données géométriques) passe par la réalisation de petits composants (fente mince et tubes) à l'aide de procédures spécifiques permettant une grande précision sur les dimensions de ces éléments. Les deux coupleurs décrits dans ce document sont conçus de manière à satisfaire à ces exigences. Ils permettront d'affiner les comparaisons et par conséquent conduiront à une meilleure connaissance de la précision de la technique de mesure proposée et de son domaine de validité en fréquence. La nécessité d'utiliser un modèle acoustique plus précis, prenant en compte les modes supérieurs, tel celui décrit dans la référence Guianvarc'h (2006, *Acta Acustica*) sera ainsi mise en évidence.

Références

- Ballagh, K. O. 1987 Acoustical admittance of cylindrical cavities. *J. Sound Vib.* **112**, 567-569.
- Bruneau, M. 1987 Manuel d'acoustique fondamentale. Hermès, Paris.
- Bruneau, M., Bruneau, A.-M., Durocher, J.-N. 2002 Etude théorique de l'impédance acoustique de transfert d'une cavité fermée par deux microphones et munie d'impédances localisées sur la paroi ; application à la caractérisation de l'oreille artificielle. Contrat BNM n° 01 3010 rapport final, Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine.
- Dalmont, J.-P. 2001 Acoustic impedance measurement, part I : A review. *J. Sound Vib.* **243(3)**, 427-439.
- Guianvarc'h, C. 2005 La cavité de couplage acoustique dans la méthode de réciprocité ; modèles analytiques pour l'étalonnage des microphones et la mesure d'impédances de petits composants. Thèse de doctorat de l'Université du Maine.
- Guianvarc'h, C., Durocher, J.-N., Bruneau, M., Bruneau, A.-M. 2006 Acoustic transfer admittance of cylindrical cavities. *J. Sound Vib.* **292**, 595-603.
- Guianvarc'h, C., Durocher, J.-N., Bruneau, M., Bruneau, A.-M. 2006 Improved Formulation of the Acoustic Transfer Admittance of Cylindrical Cavities. *Acta Acustica* **92**, 345-354.
- Norme internationale, CEI 1094-2 1992 Microphone de mesure, Partie 2 : Méthode primaire pour l'étalonnage en pression des microphones étalons de laboratoire par la méthode de réciprocité.
- Rodrigues, D., Guianvarc'h, C., Durocher, J.-N., Bruneau, M., Bruneau, A.-M. 2006 Méthode de mesure d'impédance de petits éléments acoustiques. Congrès Français d'Acoustique, Tours, 1029-1032.
- Rasmussen, K. 1993 Radial wave-motion in cylindrical plane wave couplers. *Acta Acustica* **1**, 145-151.