



HAL
open science

Un capteur de nouvelle génération pour la mesure d'impédance acoustique en contexte industriel

Jean-Christophe Le Roux, Marc Pachebat, Jean-Pierre Dalmont

► **To cite this version:**

Jean-Christophe Le Roux, Marc Pachebat, Jean-Pierre Dalmont. Un capteur de nouvelle génération pour la mesure d'impédance acoustique en contexte industriel. *Acoustique et Techniques : trimestriel d'information des professionnels de l'acoustique*, 2012, 68, pp.6. hal-00834134

HAL Id: hal-00834134

<https://hal.science/hal-00834134v1>

Submitted on 14 Jun 2013

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.

Un capteur de nouvelle génération pour la mesure d'impédance acoustique en contexte industriel

J.C. Le Roux¹, M. Pachebat², J.P. Dalmont³

1: Centre de Transfert de Technologie du Mans, 20 rue Thalès de Milet, 72000 LE MANS, France

2 : LMA, CNRS, UPR 7051, Aix-Marseille Univ, Centrale Marseille, F-13402 Marseille Cedex 20, France

3: Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Avenue Olivier Messiaen, 72085 LE MANS, France



Le LAUM et le CTTM ont développé il y a quelques années un capteur d'impédance utilisant le principe d'une source de débit acoustique contrôlé, avec de bonnes performances dans la gamme de fréquence 20-5000Hz. Le faible débit acoustique délivré par la source employée limitait alors l'utilisation de ce capteur à des applications en laboratoire, où le bruit de fond est potentiellement faible, ou à des objets de petites dimensions (caractérisation de matériaux poroélastiques, instrument de musique...). Les limitations du capteur étaient surtout sensibles dans les basses fréquences. Afin d'étendre le principe de la mesure à un contexte plus industriel, ou à des objets de plus grandes dimensions, un capteur intégrant une nouvelle technologie de transducteur électrodynamique a été développé. L'intérêt de ce transducteur est qu'il possède une membrane très étanche dont les résonances mécaniques sont rejetées au-delà de la bande de fréquence de mesure tout en délivrant un débit acoustique bien supérieur à celui de la source du capteur précédent. Les performances du nouveau capteur sont ainsi nettement améliorées par rapport à celles du modèle initial. Afin d'illustrer l'intérêt de la mesure d'impédance et la qualité des résultats accessibles avec ce nouveau capteur, la mise au point d'une enceinte acoustique est prise comme exemple d'application. L'impédance présentée par l'enceinte à la face arrière du haut-parleur est mesurée puis comparée aux résultats obtenus avec un modèle électro-acoustique. On montre ainsi comment il est possible d'estimer ou d'ajuster les paramètres du modèle électro-acoustique, ce qui en retour permet de limiter le nombre de prototypes d'enceintes à tester.

1. Introduction

Faisant suite à plusieurs développements menés depuis de nombreuses années au LAUM et au CTTM [1, 2, 3], un capteur d'impédance employant une source de débit acoustique connu est présenté. Ce capteur utilise une nouvelle technologie de transducteur électrodynamique dont les caractéristiques mécaniques et acoustiques requises sont optimales pour le principe de mesure employé, basé sur l'utilisation d'une source de débit acoustique contrôlé. Par rapport à un modèle d'une génération précédente [2], ce nouveau capteur est plus spécifiquement dédié à la caractérisation basses fréquences de systèmes de plus grandes dimensions, pour lesquels il est nécessaire de générer un débit acoustique important. Afin d'illustrer l'intérêt de la mesure d'impédance et la qualité des informations accessibles avec ce nouveau capteur, nous présentons, à titre d'exemple, son application pour la caractérisation et la mise au point d'une enceinte acoustique.

2. Principe de fonctionnement du capteur d'impédance

Le principe du capteur d'impédance est basé sur l'utilisation d'une source de débit acoustique connu. Ce dernier est produit par un piston oscillant le plus rigide possible afin de rejeter les résonances mécaniques au-delà de la bande de fréquence d'analyse. La face arrière du piston est chargée par une cavité fermée, la face avant étant située du côté de l'objet à mesurer. (figure1). Les pressions acoustiques au niveau des faces avant p_2 et arrière p_1 sont mesurées par deux microphones. Au premier ordre, la pression p_1 est reliée au débit acoustique U délivré par le piston rigide via les caractéristiques du volume arrière. L'impédance $Z_{\text{capteur}} = p_2 / U$ est donc directement obtenue à partir du rapport des pressions mesurées :

$$\frac{p_2}{p_1} = -jC\omega Z_{\text{capteur}} \quad (1)$$

où $C = V / \rho c^2$ est la compliance acoustique de la cavité arrière de volume V , ρ désignant la masse volumique de l'air et c la célérité du son.

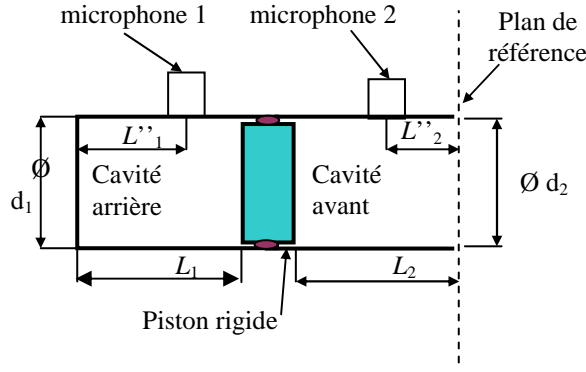


Fig.1 Schéma de principe du capteur d'impédance et notations

En pratique la validité de l'équation (1) est limitée aux très basses fréquences et suppose des microphones parfaitement appariés. Il est ainsi nécessaire de tenir compte des différences de sensibilité entre les deux microphones, grandeurs susceptibles de varier avec la fréquence. En effet la quantité fournie par le capteur (avant post-traitements) est la fonction de transfert entre les deux microphones $H_{21} = p_2 s_2 / p_1 s_1$, où s_1 et s_2 désignent les sensibilités des microphones 1 and 2. Par ailleurs, pour optimiser les performances du capteur aux hautes fréquences, il faut intégrer les caractéristiques géométriques des cavités supposées cylindriques dans l'expression de l'impédance Z_{capteur} , qui devient alors [2] :

$$Z_{\text{capteur}} = \frac{H_{21} / K - \beta}{1 - \delta H_{21} / K}, \quad (2)$$

où

$$K = -j \frac{1}{Z_{c1}} \frac{s_2}{s_1} \frac{\sin(kL_1) \cos(kL_2^*)}{\cos(kL_1^*) \cos(kL_2)}, \quad (3)$$

$$\beta = j Z_{c2} \tan(kL_2^*) \quad (4)$$

$$\delta = j \tan(kL_2) / Z_{c2} \quad (5)$$

Les longueurs L_1 , L_2 , L_1^* et L_2^* décrivent la géométrie des cavités et la position des microphones (figure (1)). Les impédances $Z_{c1} = \rho c / S_1$ et $Z_{c2} = \rho c / S_2$ sont les impédances caractéristiques des cavités arrière et avant ($S_1 = \pi d_1^2 / 4$ est la surface de la cavité arrière et d_1 son diamètre, qui est identique à celui de la cavité avant).

Au premier abord, on peut considérer que les caractéristiques géométriques des cavités sont bien connues et que seules les sensibilités des microphones doivent être identifiées pour étalonner le capteur d'impédance. En pratique, il convient de s'affranchir des dispersions géométriques issues de la fabrication du capteur en procédant à un étalonnage après fabrication. Celui-ci utilise une procédure basée sur la mesure de charges acoustiques non-résonantes [4-6]. Cet étalonnage « d'usine » permet alors de figer les caractéristiques géométriques du capteur. En usage courant, une calibration partielle à partir d'une procédure simplifiée (mesure de l'impédance d'une paroi parfaitement rigide) est suffisante [2].

Dans le cas d'une application « basses fréquences », la procédure décrite ci-dessus peut être simplifiée. En fermant la cavité avant du capteur par une paroi rigide, l'expression de la fonction de transfert se réduit à $H_{21}^\infty = K / \delta$, et l'équation (2) s'écrit alors :

$$Z_{\text{capteur}} = \frac{1}{\delta} \frac{H_{21} / H_{21}^\infty - \delta \beta}{1 - H_{21} / H_{21}^\infty} \quad (6)$$

Connaissant les longueurs L_2 and L_2^* (qui peuvent être estimées par une mesure directe) l'impédance acoustique est ainsi obtenue uniquement à partir des deux fonctions de transfert H_{21}^∞ et H_{21} , cette dernière étant mesurée en chargeant le capteur par l'objet à caractériser.

3. Description du capteur d'impédance

Dans la structure du capteur d'impédance, le composant critique est la source de débit. Celle-ci doit présenter les caractéristiques suivantes :

- Membrane se comportant comme un piston parfaitement rigide jusqu'à des fréquences élevées,
- Absence de fuites entre les faces avant et arrière de la membrane.

Sans ces deux caractéristiques essentielles, l'estimation du débit acoustique généré devient imprécise, ce qui limite les performances du capteur. La technologie utilisée pour la source a donc été l'objet d'une attention particulière au cours des

développements des différents prototypes de capteur d'impédance réalisés par le LAUM et le CTTM. La première génération employait un transducteur électrodynamique du commerce [1], qui a été remplacé dans la seconde génération par un transducteur piézo-électrique [2]. La troisième génération de capteur d'impédance fabriqué au CTTM est présentée en figure 2. Elle utilise un transducteur électrodynamique innovant, quasiment exempt de fuites et à membrane légère et rigide. Deux microphones à électret très stables, avec une électronique de conditionnement dédiée, sont utilisés pour mesurer les pressions avant et arrière. Comme la procédure d'étalonnage compense le rapport des sensibilités, il n'est pas nécessaire de recourir à des micros appairés plus onéreux. En outre, l'usage courant du capteur ne nécessite pas de démontage/échange des microphones, ce qui apporte un gain en précision important comparé à une méthode standard à deux microphones [7], dont une application à la mesure d'impédance a été illustrée dans [8].

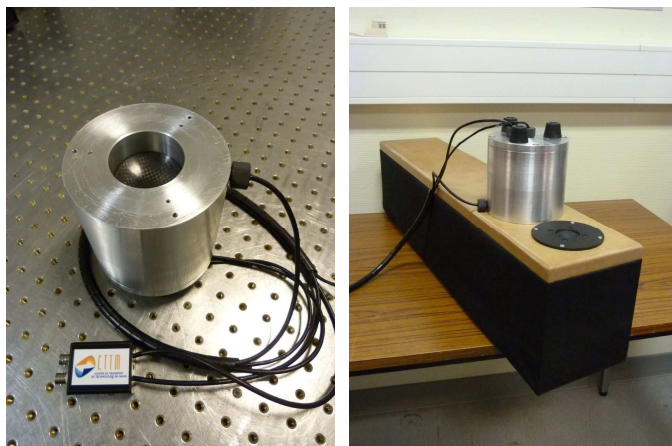


Fig.2 Vue du capteur doté de son électronique (à gauche) et application à la mesure de l'impédance d'une enceinte acoustique (à droite)

4. Exemple d'application : caractérisation d'une enceinte acoustique

Une illustration de l'intérêt de la mesure d'impédance a été présentée il y a quelques années dans le cas d'une charge résonante complexe [1]. Afin d'illustrer l'augmentation de la précision dans la mesure d'impédance acquise au cours de la dernière décennie, la troisième génération de capteur est ici appliquée à la caractérisation d'une enceinte colonne de haut-parleur (son optimisation n'est pas le sujet de cette présentation).

En raison de sa dimension longitudinale importante, une enceinte colonne présente des résonances acoustiques aux fréquences moyennes [9,10]. Ceci a un impact négatif direct sur la réponse en pression du haut-parleur et sur la qualité de la restitution sonore. Une solution courante consiste à diviser le volume de l'enceinte par une paroi perforée, réduisant ainsi les résonances acoustiques dans la cavité. Deux questions pratiques se posent alors :

- Comment concevoir avec précision l'enceinte en tenant compte d'une paroi perforée ?
- L'accord de l'évent (dans le cas d'une enceinte bass-reflex) est-il affecté par l'introduction de la paroi perforée ?

Quatre configurations sont étudiées à partir d'une même enceinte : une enceinte close, une enceinte bass-reflex, une enceinte bass-reflex avec une paroi perforée amortie, ou non amortie (figure 3). Le volume brut est de 10.6L, et l'enceinte bass-reflex est accordée à la fréquence de 70Hz (les corrections de longueurs interne et externe de l'évent sont respectivement de 1.65cm et 2.34cm).

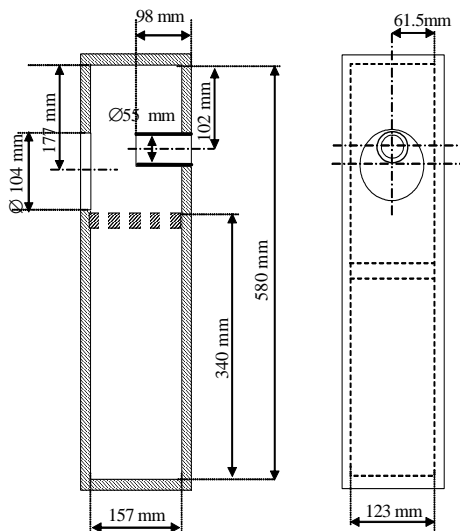


Fig.3 Description des enceintes étudiées

La démarche adoptée dans la suite de ce travail consiste à mesurer et à modéliser l'impédance vue par la face arrière du haut parleur. Cette impédance est liée aux caractéristiques géométriques et mécaniques de l'enceinte. Les charges acoustiques du haut-parleur, et notamment la charge arrière, ne sont pas prises en compte. La figure 4 illustre ce propos et montre le schéma électroacoustique général [11] dans lequel figurent les impédances de rayonnement des faces avant (Z_{ar1}) et arrière (Z_{ar2}) du haut-parleur. L'impédance acoustique que l'on souhaite déterminer est la quantité située à droite du trait pointillé.

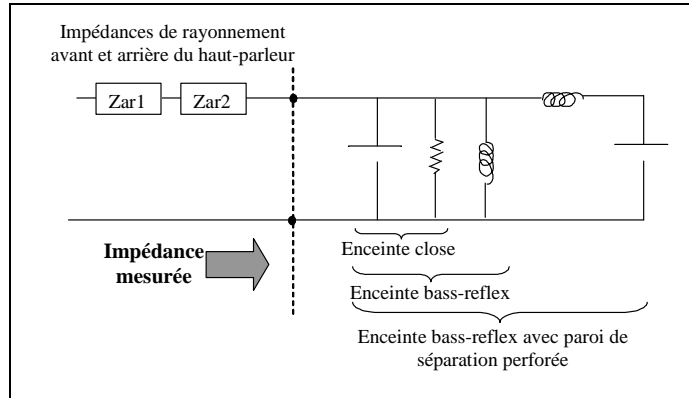


Fig.4 Modélisation électroacoustique simplifiée de l'enceinte mesurée

5. Modélisation électroacoustique

Dans cette étude, nous cherchons à confronter les résultats fournis par le nouveau capteur à des données simulées. Pour ce faire, nous présentons ici rapidement un modèle classiquement utilisé au LMA et qui a été validé lors de l'étude de nombreux cas de haut-parleurs et d'enceintes. Ce modèle utilise une approche à constantes localisées associée à un schéma de discrétisation spatiale simple visant à décrire les effets de propagation à l'intérieur de la cavité, et notamment les premières résonances longitudinales de l'enceinte. Nous aurions également pu employer un modèle de ligne de transmission [10], mais celui décrit ci-dessous est intéressant en raison de sa flexibilité.

Dans notre approche, la configuration présentée sur la figure 3 est simulée par l'assemblage d'un nombre suffisant de cellules élémentaires (du type de celle présenté en figure 5) le long de la dimension verticale de l'enceinte (voir figure 6). Chaque cellule élémentaire est décrite comme un assemblage de dipôles qui sont : le volume de la cellule (d'indice i), sa face rayonnante (d'indice j) et la limite avec ses voisins supérieur et inférieur (d'indice k , et $k-1$) comme indiqué sur la figure 6.

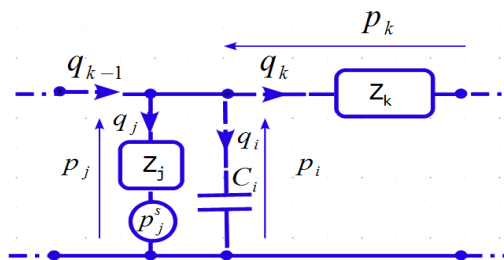


Fig.5 : Circuit équivalent (analogie impédance) d'une cellule élémentaire de la figure 6, telle qu'utilisée pour discrétiser spatialement l'enceinte colonne suivant sa dimension verticale

Pour un nombre arbitraire de haut-parleurs (sources de pression) situées à l'avant P_j^s et à l'intérieur de l'enceinte P_k^s , on peut obtenir les inconnues acoustiques du système (pressions P_i , P_j et P_k , et débits q_i , q_j et q_k) par l'inversion du système algébrique suivant, obtenus directement à partir du circuit équivalent de la fig.5 :

$$\begin{cases} 0 = -Z_i q_i + p_i \\ p_j^s = -Z_j q_j + p_j \\ p_k^s = -Z_k q_k + p_i - p_{i+1} \\ 0 = q_i + q_j + q_k - q_{k-1} \end{cases} \quad (7)$$

Dans le cas présent, la dimension verticale de l'enceinte est séparée en 24 cellules élémentaires, ce qui conduit à l'inversion d'une matrice numérique 95x95. Ce degré de discrétisation est capable de prédire correctement les deux premières résonances de l'impédance de l'enceinte, situées vers 300 et 600 Hz, comme le montrent plus loin les figures 11 et 12.

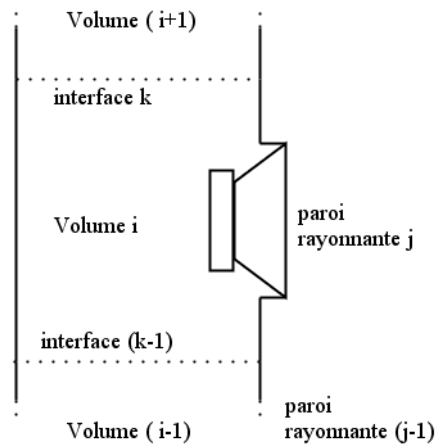


Fig.6 Vue schématique d'une cellule élémentaire utilisée pour discrétiser l'enceinte colonne suivant sa dimension verticale

L'impédance de la fraction de volume Z_i est décrite par une compliance en parallèle avec une résistance associée aux pertes thermique, dont la valeur est estimée à partir de la mesure sur l'enceinte close (figure 10). L'impédance de la paroi rayonnante Z_j est décrite :

- soit par un modèle classique type Thiele-Small si un haut parleur est présent dans la cellule élémentaire,
- soit par une très petite compliance (cas des parois rigides),
- soit par une masse acoustique équivalente à l'évent (incluant les corrections de longueur) dans le cas d'une enceinte bass-reflex.

Enfin, l'impédance Z_k décrivant la frontière de la cellule « i » avec sa voisine est une masse acoustique (propagation) en série avec une résistance visqueuse acoustique (modèle de tube cylindrique [12]) dont la valeur est estimée à la première fréquence de résonance de l'enceinte close (autour de 300 Hz). Lorsqu'un écran perforé est présent entre le volume « i » et son voisin, on ajoute en série avec Z_k , l'expression de l'impédance d'un écran perforé proposée par Allard ([13] chap.9).

6. Résultats

a. Compensation de la discontinuité à l'interface capteur/enceinte

La première étape de la mesure consiste à compenser l'impédance de rayonnement propre au capteur ($Z_{\text{rayonnement}}$). Ce terme résulte de la différence de surface entre le conduit de sortie du capteur et l'ouverture dans l'enceinte (prévue pour le montage du haut-parleur). La discontinuité à l'interface crée une pression locale, correspondant aux modes évanescent d'ordre supérieurs, qui est ajoutée à l'impédance 1D attendue dans l'hypothèse onde plane [14]. Une analyse précise des propriétés de l'enceinte implique donc de soustraire cette impédance de discontinuité aux données mesurées. Comme cette grandeur est dominée par la géométrie du capteur, elle est approchée par la partie imaginaire d'une impédance de rayonnement dans un écran :

$$Z_{\text{enceinte}} = Z_{\text{capteur}} - j \text{Im}(Z_{\text{rayonnement}}) \quad (8)$$

L'impédance de rayonnement du capteur doit être évaluée pour des conditions de montage aussi proches que possible de celles qui existent sur l'enceinte testée. Nous avons pour cela choisi de fixer le capteur sur un écran présentant une ouverture circulaire identique à la découpe de l'enceinte accueillant le haut-parleur (voir figure 7).

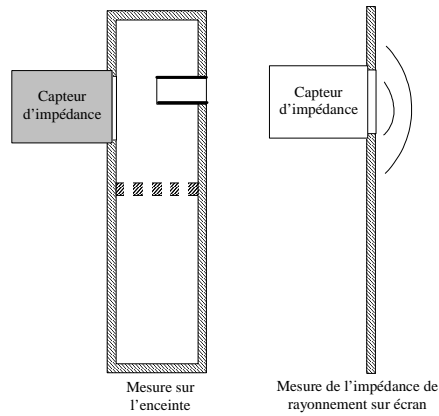


Fig.7 Description du montage employé pour l'estimation de $Z_{\text{rayonnement}}$

La figure 8 présente l'impédance de rayonnement mesurée avec le montage décrit en figure 7. On remarque que la grandeur obtenue est très proche de l'impédance de rayonnement théorique d'un piston rigide de 57mm de diamètre (correspondant à l'ouverture du capteur) monté sur un écran infini. Dans ce qui suit, nous utiliserons donc cette impédance théorique pour compenser l'effet de discontinuité entre le capteur et l'enceinte.

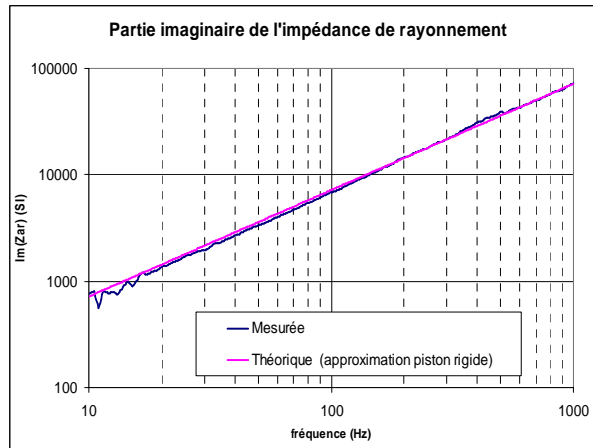


Fig. 8 : Partie imaginaire de l'impédance de rayonnement du capteur

b. Enceinte close et enceinte à évent

La figure 9 montre le module des impédances mesurées pour les enceintes close et bass-reflex. Les comportements asymptotiques aux basses fréquences sont ajoutés dans les deux configurations (représentées par des droites). Dans le cas de l'enceinte close, on considère à ce stade un volume sans pertes.

Le nouveau capteur donne une bonne qualité de mesure, y compris aux très basses fréquences, ce qui représente une nette amélioration par rapport aux générations précédentes. Il apparaît clairement que les impédances mesurées sont conformes au comportement prévu pour les enceintes testées. Ceci est particulièrement vrai aux basses fréquences. Dans le cas de l'enceinte close, en dessous de 25Hz, l'écart constaté avec la courbe asymptotique révèle l'existence de pertes. En considérant un modèle de volume avec fuites (compliance et résistance en parallèle), il est alors possible d'estimer les valeurs des composants. Ainsi, la figure 10 présente les parties imaginaire et réelle de l'admittance mesurée, qui correspondent respectivement au volume et aux pertes liées aux fuites. On remarque un bon accord sur la valeur obtenue pour le volume de l'enceinte. La fréquence de coupure est elle estimée à $f_c = 6.6\text{Hz}$. Concernant l'enceinte bass-reflex, le comportement aux basses fréquences est dicté par l'évent. La mesure est en accord avec le calcul théorique de l'impédance de l'évent (incluant les corrections de longueurs) et la fréquence de résonance du Helmholtz apparaît comme prévu à 70Hz.

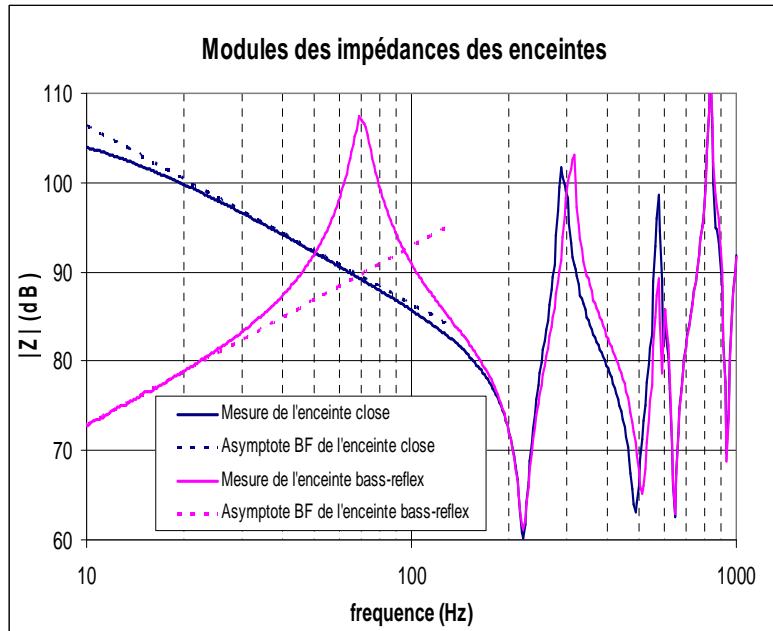


Fig.9 Impédances acoustiques des enceintes close et bass-reflex

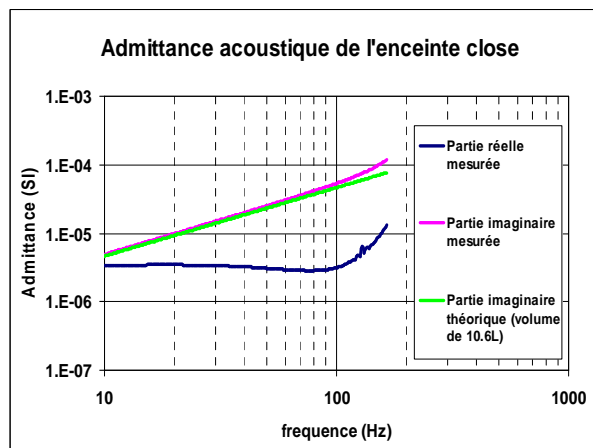


Fig.10 Valeurs des composants pour un modèle d'enceinte close intégrant des pertes

Des simulations sont ensuite effectuées suivant le modèle décrit au § 5. Les résultats sont présentés en figure 11 pour l'enceinte close et en figure 12 pour l'enceinte bass-reflex. Les comportements de l'enceinte sont bien reproduits par le modèle et les résonances de la cavité sont en conformité avec les données mesurées jusqu'à environ 600 Hz. On peut remarquer que la valeur de la résistance estimée à la limite basse fréquence ($1/R = 3,21 \times 10^{-6}$ (SI) voir figure 10) permet au modèle de donner une bonne estimation des pertes à l'intérieur de la cavité fermée. En effet, sur les figures 11 et 12, le comportement aux basses fréquences du modèle de l'enceinte close est très proche des résultats expérimentaux.

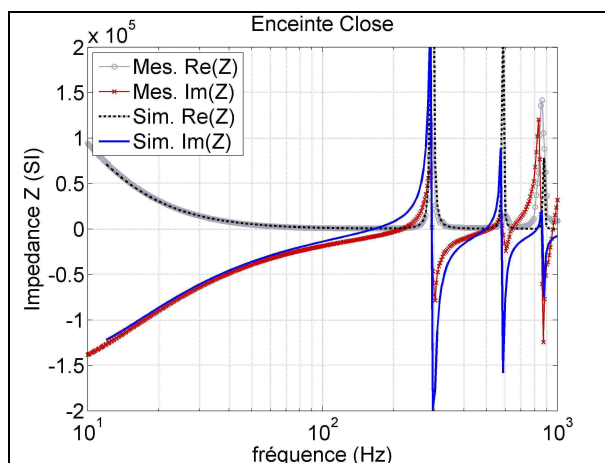


Fig.11 Impédance de l'enceinte close

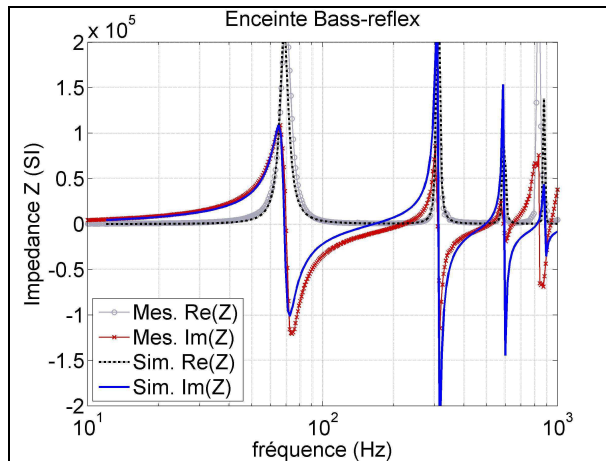


Fig.12 Impédance de l'enceinte bass-reflex

c. Enceinte bass-reflex avec paroi de séparation perforée

Après la validation du modèle sur les configurations d'enceintes close et bass-reflex, l'outil de simulation a été utilisé pour donner une première conception de paroi de séparation perforée à installer dans l'enceinte bass-reflex (voir figure 3). Ceci revient à préciser ses paramètres géométriques (épaisseur, taux de perforation, diamètre des trous) et sa position dans l'enceinte. Les figures 13 et 14 illustrent les résultats obtenus en confrontant les données mesurées par le capteur d'impédance avec celles fournies par le modèle. Deux parois différentes sont considérées. La première est une plaque de bois de 4cm d'épaisseur, possédant une porosité de 20% avec des trous cylindriques de 1 cm de diamètre. La seconde paroi reprend la structure de la première et comprend, pour ajouter des pertes, une couche de matériau poreux appliquée sur une des faces.

Après un léger ajustement des paramètres de la paroi perforée (correction de longueur des trous et pertes), un bon accord est trouvé entre les données mesurées et celles simulées. On constate que la valeur de la fréquence de résonance principale de l'enceinte bass-reflex, à environ 70 Hz, n'est pas sensiblement affectée par la présence de la paroi perforée, même si son amplitude est amortie. Par ailleurs, l'ajout de la paroi perforée permet bien de réduire l'importance des résonances supérieures, surtout dans la configuration avec le matériau poreux.

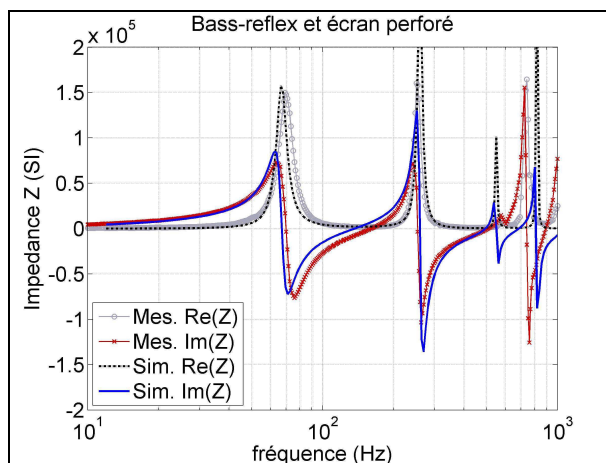


Fig.13 Impédance de l'enceinte bass-reflex avec paroi perforée

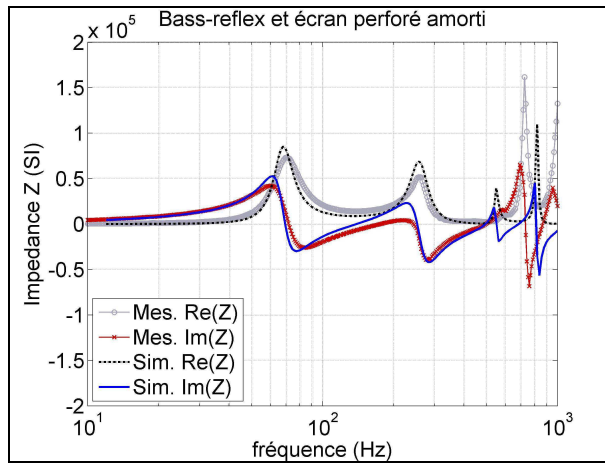


Fig.14 Impédance de l'enceinte bass-reflex avec paroi perforée et matériau poreux

7. Conclusion

Le capteur d'impédance de nouvelle génération présenté ici paraît particulièrement bien adapté à la mesure de systèmes de dimensions moyennes comme le montre l'application à la caractérisation d'enceintes acoustiques. En particulier, on observe une très bonne qualité de mesure aux basses fréquences. Dans l'exemple étudié, le capteur apporte une évaluation fiable des paramètres électroacoustiques des composants de l'enceinte : volume et résistance de perte pour l'enceinte close, longueur de l'évent et fréquence de résonance de Helmholtz pour l'enceinte bass-reflex. Il est ensuite utilisé conjointement avec un modèle électroacoustique en constantes localisées pour optimiser une configuration de paroi de séparation perforée à intégrer dans l'enceinte. La mesure permet ainsi la détermination précise de la longueur ajoutée et de la résistance de l'écran perforé à prendre en compte dans le modèle. Le capteur d'impédance peut donc être employé pour améliorer la modélisation de la paroi perforée, facilitant ainsi la conception de telles enceintes et limitant par conséquent le nombre de configurations à construire et à tester.

Le capteur d'impédance de nouvelle génération proposé ici présente des caractéristiques technologiques, une qualité de mesure et une procédure d'étalonnage qui sont adaptées à une utilisation hors d'un contexte de laboratoire. Nous avons montré comment son utilisation peut aider à la compréhension physique et la modélisation d'un système électro-acoustique. Ceci ouvre la voie à de nombreuses autres applications potentielles.

8. Remerciements

Les auteurs remercient Philippe HERZOG² pour sa contribution à la rédaction du présent article, dont le sujet est dans la continuité de certains de ses travaux de recherche.

References

- [1] P. Herzog, L. Desmons, E. Parizet, "Comportement électroacoustique d'un haut-parleur monté dans une portière", Congrès Français d'Acoustique (1997)
- [2] J.P. Dalmont, J.C. Le Roux, "A new impedance sensor", Congrès Français d'Acoustique, (2008)
- [3] Brevet FR2933186A1
- [4] J.P. Dalmont, Ph. Herzog, "Improved analysis of input impedance measurements", Proc. Institute Of Acoustics, 15(3) : 681-688, Southampton, 1993
- [5] J.P. Dalmont: "Acoustic Impedance Measurement, Part I: a review", J. Sound Vib. 243 (3), 427-439 (2001)
- [6] P. Dickens, J. Smith and J. Wolfe: "Improved Precision in Measurements of Acoustic Impedance Spectra Using Resonance-free Calibration Loads and Controlled Error Distribution", J. Acoust. Soc. Am., 121 (3), 1471-1481 (2007)
- [7] J.Y. Chung, D.A. Blaser : "Transfer function method of measurement in-duct acoustic properties - I Theory", JASA 68 (3), 907-9013 (1980)
- [8] P. Herzog, "Perturbations de l'impédance de rayonnement d'une source compacte", 5e Congrès Français d'Acoustique, pages 664-667, Lausanne, 2000
- [9] J. Backman, "A Computational Model of Transmission Line Loudspeakers", 92nd AES Convention, preprint 3326 (1992)
- [10] J. Backman, "A One-Dimensional Model of Loudspeaker Enclosures", 96th AES Convention, paper 3827, (1994)
- [11] M. Rossi : "Electroacoustique, Traité d'Electricité de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne", Volume XXI, Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, 1986
- [12] M. Bruneau : "Manuel d'acoustique fondamentale ", Hermès Ed., 1998.
- [13] Allard, J.-F., and N. Atalla : "Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials", John Wiley and Sons, 2009.
- [14] J. Kergomard, A. Garcia, "Simple discontinuities in acoustic waveguides at low frequencies : critical analysis and formulae", J. Sound Vib. 114(3):465-479 (1987)