

CFA/VISHNO 2016

Résonateurs Acoustiques 'Basses Fréquences' pour application en Nacelle Moteur Avion

F. Simon

ONERA, 2 avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse Cedex 4, France
frank.simon@onera.fr



LE MANS

Les matériaux absorbants employés en aéronautique dans les nacelles moteur pour réduire le bruit de fan, ont un comportement en $\frac{1}{4}$ d'onde grâce à des parois perforées collées à un nid d'abeille placé sur un fond réfléchissant. Leurs performances acoustiques sont limitées aux moyennes et hautes fréquences en raison de la contrainte d'épaisseur du nid d'abeille. De plus, le rapport "épaisseur de paroi/ rayon des trous" situé généralement autour de 1 rend les impédances dépendantes du niveau sonore et des vitesses d'écoulement rasants. Il apparaît que le type de configuration employé généralement ne permet pas une absorption en deçà de 500 Hz, nécessaire pourtant pour les moteurs type UHBR présentant des nacelles plus minces. Une possible approche pourrait être de relier la paroi perforée à des tubes débouchant dans la cavité. Cet article décrit le modèle mathématique pouvant être employé pour simuler l'absorption acoustique de matériaux de type LONAR ("LONg Neck Acoustic Resonator) comportant une ou plusieurs longueurs de tubes au sein d'une cavité. Différentes configurations sont ensuite simulées et testées. L'impédance d'un matériau de ce type est également déterminé en conduit sous écoulement rasant rapide (Mach 0.3), pour comparaison avec son impédance en l'absence d'écoulement.

1 Introduction

Les "liners" aéronautiques disposés le long des nacelles moteurs comportent généralement une paroi perforée, un ensemble de cavités produit par un nid d'abeille et un fond réfléchissant.

Le faible diamètre des trous (entre 0.4 et 2 mm selon les besoins industrielles) absorbe l'énergie (grâce à la couche limite acoustique appliquée aux parois internes) quand une onde se propage à travers la cavité résonante [1-2]. L'impédance peut dépendre de façon linéaire au niveau de vitesse particulière incident (ou du niveau de pression) [1]. Ainsi, les tourbillons acoustiques de vitesse particulière peuvent être générés à la surface du résonateur modifiant par la même l'impédance.

De nombreuses études, depuis Ingard dans les années 50 [3], se sont intéressées à déterminer l'influence de divers paramètres sur l'impédance et l'absorption procurée par les trous. Gaeta & Ahuja [4] montrent en particulier qu'augmenter le périmètre des trous pour la même surface permet d'augmenter l'absorption pour de faibles amplitudes de vitesse particulière (< 1 m/s) mais n'a que peu d'effet pour des amplitudes élevées. Au dessus d'un seuil du rapport " v_0 / v^* " (vitesse acoustique / vitesse de friction de la couche limite acoustique) le comportement du trou devient non-linéaire [5]. Il apparaît que le mécanisme de dissipation non-linéaire du détachement tourbillonnaire est crucial pour des niveaux de pression plus élevés que 120 dB [6], valeur bien plus faible que dans un moteur d'avion. Chandrasekharan et al. [7] réalisent des mesures d'impédance en tube et comparent les résultats avec des lois classiques de Hersh, Kraft et Candrall & Melling. Il est montré que augmenter le rapport " l_p/d " (épaisseur de paroi / diamètre des trous) agrandit la bande de fréquence sur laquelle le comportement de la paroi est linéaire en fonction du niveau de pression (entre 100 et 150 dB jusqu'à 6.4 kHz).

Enfin, dans le but d'élargir la bande de fréquence d'absorption, différents types de liners à « Single Degree Of Freedom » (SDOF) peuvent être empilés pour constituer des liners de types 2DOF ou 3DOF. Comme pour les SDOF, une élévation du niveau de SPL produit une augmentation de leur résistance et une diminution de leur réactance [8]. Néanmoins, les phénomènes physiques mis en jeu ne leur permettent pas d'absorber en basses fréquences, comme nécessaire pour les futurs moteurs « Ultra High Bypass Ratio » (UHBR) dont les nacelles sont plus courtes et plus minces (fréquences minimales autour de 500 Hz). Une possible approche pourrait être de relier la paroi perforée à des tubes flexibles longs (comme proposé par Lu et al. [9] débouchant dans la cavité de façon à

réduire les fréquences d'absorption par une augmentation de longueur de propagation des ondes acoustiques au sein des tubes.

L'intérêt de ce concept a été prouvé expérimentalement mais les auteurs ont utilisé un modèle mathématique basé sur une paroi perforée fine (par ex. tubes courts) pour décrire le phénomène d'absorption. De plus, le volume important occupé par les tubes longs rend l'influence de la cavité négligeable.

Le but de cet article est par conséquent de mettre en œuvre, dans un premier temps, un modèle mathématique sans hypothèse de conduits courts, pour décrire un concept de paroi couplé à des tubes de longueur variable occupant un volume limité au sein de la cavité (concept LONAR pour "LONg Neck Acoustic Resonator). L'approche théorique est ensuite validée sur des matériaux comportant une ou plusieurs longueurs de tubes, flexibles ou rigides, au sein de cavités diverses.

Différentes configurations sont ainsi simulées et testées de façon à évaluer la pertinence de l'approche théorique et la linéarité du comportement vis-à-vis du niveau de pression. L'impédance d'un matériau de ce type est également déterminé en conduit sous écoulement rasant rapide (Mach 0.3), pour comparaison avec son impédance en l'absence d'écoulement.

2 Description du résonateur Lonar

Le résonateur LONAR est composé d'une paroi perforée dont les trous sont connectés à des tubes, insérés dans une cavité, et ouverts (Figure 1).

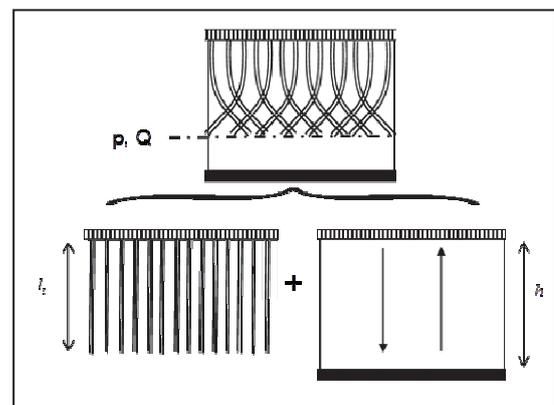


Figure 1 : Illustration d'un résonateur LONAR avec principe physique

Les paramètres décrivant le résonateur sont, respectivement : l'épaisseur l_p et la porosité σ_p de paroi, les rayons interne r_i et externe r_e des tubes, la longueur des tubes l_t , l'épaisseur des cavités h .

Différents exemples de matériaux et configurations sont montrés sur les figures suivantes.



Figure 2 : Echantillon de type 1 de paroi avec tubes de longueur variable à placer au dessus de la cavité.



Figure 3 : Echantillon de type 2 de paroi avec tubes perforés (g) à placer au dessus de la cavité (d).



Figure 4 : Echantillon de type 2 de paroi avec tubes perforés de longueurs différentes, cloisonnés (g) et non cloisonnés (d).

La propagation des ondes le long des tubes étroits (direction x) peut être montrée comme une combinaison linéaire de modes propagatif, thermique et visqueux [11].

On suppose ensuite que la longueur d'onde est bien supérieure au diamètre intérieur d'un tube.

Pour simplifier la description mathématique, la théorie de propagation des ondes est montrée dans des conduits étroits avec parois parallèles planes dont la distance égale $2r_i$ (rayon interne des tubes).

Le champ de pression en présence d'effets visco-thermiques est solution de l'équation classique :

$$\nabla^2 p + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 p = 0 \quad (1)$$

et peut être exprimé comme suit :

$$p(x, r) = A \cos(q_r r) (e^{iqx} + e^{-iqx}) \quad (2)$$

avec q_r la constante de propagation dans la direction transverse d'un canal comportant deux parois rigides parallèles.

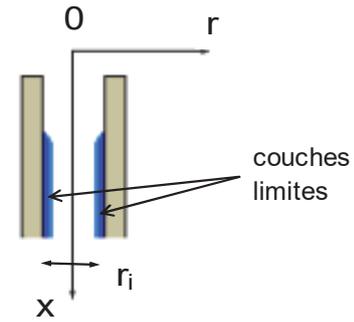


Figure 5 : Illustration de couches limites acoustiques entre deux parois rigides parallèles

Comme la vitesse transverse associée doit être nulle aux parois, la constante de propagation transverse (en supposant que $q_r r_i \ll 1$) est donnée par :

$$q_r^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 = -\frac{(\gamma-1)F(k_h r_i) + F(k_v r_i)}{1 - F(k_v r_i)}$$

$$\text{où } F(X) = \frac{\tan(X)}{X} \quad (3)$$

avec

$$- k_h = \frac{1+i}{\delta_h} \quad \text{où } \delta_h = \sqrt{\frac{2K}{\rho C_p \omega}} \quad (\text{épaisseur de couche limite thermique})$$

$$- k_v = \frac{1+i}{\delta_v} \quad \text{où } \delta_v = \sqrt{\frac{2\mu}{\rho \omega}} \quad (\text{épaisseur de couche limite visqueuse}).$$

La vitesse axiale moyenne prend la forme suivante :

$$u_x = \frac{Aq}{\omega \rho} (1 - F(k_v r_i)) (e^{iqx} - e^{-iqx}) \quad (4)$$

Comme $q^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - q_r^2$, la constante de

propagation complexe suivant la direction axiale du canal, q , est déterminée simplement par :

$$q = \left(\frac{\omega}{c}\right) \sqrt{\frac{1 + (\gamma-1)F(k_h r_i)}{1 - F(k_v r_i)}} \quad (5)$$

Pour des tubes circulaires, il convient de remplacer r_i par $r_i/2$ dans les équations (3), (4) et (5). Néanmoins, des expressions utilisant des fonctions de Bessel peuvent être employées à la place de la fonction $F(X)$ et les simplifications relatives aux tubes minces ou aux parois perforées conduisent par exemple à la formulation de Melling [12].

On suppose ensuite que :

- la continuité de pression et de débit entre tubes et la cavité environnante est assurée;
- les ondes sont transmises dans la cavité sans perte dans la direction de l'épaisseur;
- la longueur totale de propagation est la somme de la longueur d'un tube et de la longueur de la cavité.

Nous nous intéressons à l'impédance spécifique de la structure faisant intervenir la porosité de la plaque :

$$\frac{Z_s}{\rho c} = x_s + ir_s = -\frac{Z_t}{\rho c \sigma_p} \quad (6)$$

avec Z_t l'impédance à l'entrée des canaux, puis au coefficient d'absorption en incidence normale.

3 Validation

La validation est conduite sur un ensemble de résonateurs de nature (tubes flexibles ou non) et de dimensions variées (avec 1 ou 2 longueurs de tubes en parallèle).

1.1 Résonateurs de type 1

L'impédance est mesurée dans un tube à impédance équipé de trois microphones et d'un haut-parleur générant un bruit blanc propagé en ondes planes entre 100 et 5000 Hz de 100 à 145 dB.

La méthode de mesure utilisée est décrite dans [13-15]. Les trois microphones pris par paire permettent de couvrir la totalité de la bande de fréquence d'intérêt.

Les premiers tests ont été conduits pour les échantillons de type 1 (Tableau 1).

Tableau 1 : Caractéristiques fabriquant des résonateurs LONAR de type 1

l_p (mm)	s_p (%)	r_i (mm)	r_e (mm)	l_t (mm)	h (mm)
1	1.92	0.35	0.55	10,20, 30,60, 90	35.9

Il apparaît que ces matériaux ont un comportement linéaire quel que soit le niveau de pression acoustique incident, soit une impédance constante et un coefficient d'absorption (ex. pour un échantillon avec $l_t = 20$ mm en Figure 5), alors qu'un échantillon ne comportant que la paroi perforée (sans tubes) produit une absorption variable (Figure 6). Comme la non-linéarité est due aux tourbillons acoustiques autour des trous pour une valeur élevée du rayon des trous par rapport à l'épaisseur de paroi [6, 7], augmenter artificiellement l'épaisseur de la paroi par une extension des tubes empêche la présence des tourbillons.

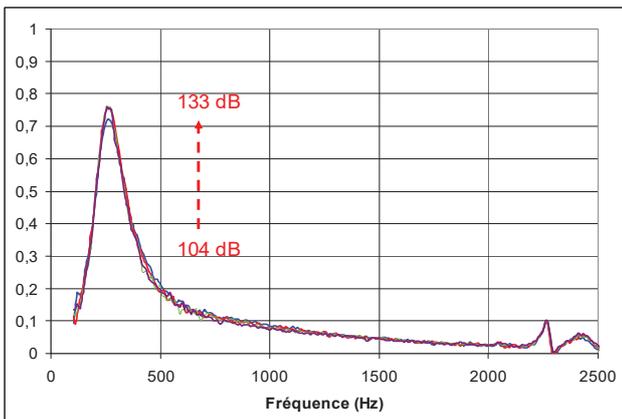


Figure 5 : Effet du SPL (dB) pour un échantillon de type 1 avec $l_t = 20$ mm.

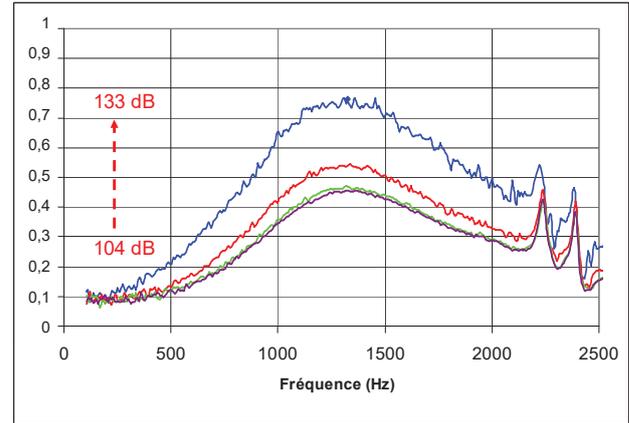


Figure 6 : Effet du SPL (dB) pour un résonateur classique (paroi perforée avec $s_p = 4.7\%$, $r_e = 0.55$ mm, $l_p = 1$ mm et $h = 35.9$ mm).

On peut remarquer aussi que la bande de fréquence est très différente : autour de 260 Hz, pour le résonateur avec tubes, vs. 1300 Hz pour le résonateur classique.

La comparaison du coefficient d'absorption pour tous les échantillons (Figure 7) confirme que la longueur de tube permet de déplacer la bande de fréquence d'absorption de façon significative par rapport à un résonateur classique de même épaisseur (facteur de l'ordre de 1/5). Néanmoins, une augmentation trop importante de la longueur (par ex. si $l_t > l_p$) est associée à une réduction du coefficient d'absorption, essentiellement en raison de la réduction du volume de la cavité générée par l'introduction des tubes.

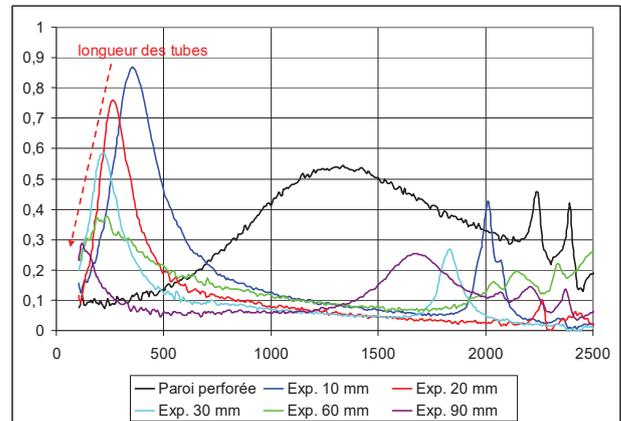


Figure 7 : Effet de la longueur de tube pour les échantillons de type 1, vs. un résonateur classique (cf. figure 6).

Les simulations de réactance x_s (cf. (6)) sont conduites avec le précédent modèle pour différents types d'échantillons (Figure 8). Malgré l'approche basée sur des parois parallèles avec des couches limites et une porosité équivalentes, la comparaison avec les résultats expérimentaux est satisfaisante, ce qui permet la détermination de la fréquence centrale d'absorption, relative à une réactance nulle (Figure 10).

La simulation de la réactance pour des tubes de type 1 mais fermés en fond de tubes (Figure 9), soit sans cavité

arrière, montre que le maximum d'absorption est obtenu en haute fréquence, soit à partir de 2760 Hz.

Il apparaît ainsi que le couplage avec la cavité environnante est prédominant pour générer une absorption en basse fréquence.

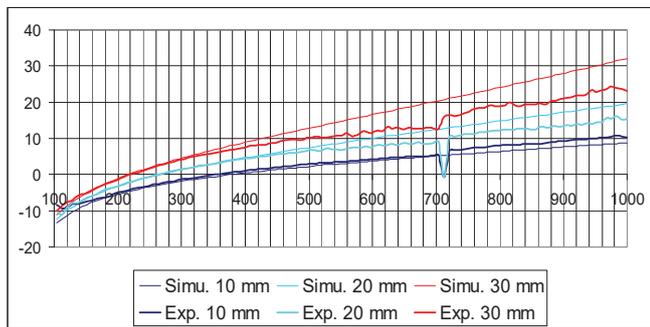


Figure 8 : Réactance simulée / expérimentale pour différents échantillons de type 1.

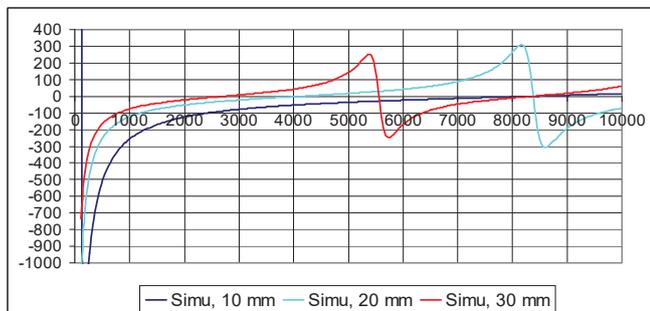


Figure 9 : Réactance simulée pour différents échantillons de type 1 en supposant l'absence de cavité.

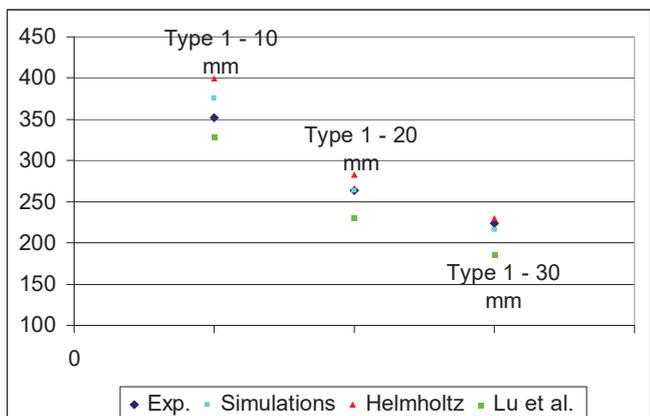


Figure 10 : Fréquence centrale d'absorption obtenue expérimentalement, par simulation avec le présent modèle, par modèle d'Helmholtz et par l'approche simplifiée de Lu et al. [9].

1.2 Résonateurs de type 2

1.2.1 Tests en tube à impédance

Les figures 11 et 12 montrent une comparaison portant sur le coefficient d'absorption simulé et mesuré en tube à impédance pour 2 configurations de résonateurs définis par les caractéristiques suivantes :

- Configuration "mono tubes" : tubes dits longs ("tube 1") ou tubes dits courts ("tubes 2" cf. figure 3) avec rapport de longueur égal à 3.

Les autres caractéristiques sont identiques pour ces 2 résonateurs : épaisseur l_p , porosité σ_p de paroi, rayons interne r_i et externe r_e des tubes, épaisseur de cavité h .

Les tubes dits longs ont une longueur inférieure à l'épaisseur de la cavité de façon à bénéficier de l'effet de volume de la cavité.

- Configuration "double tubes" : tubes dits longs et courts introduits simultanément dans la paroi (Figure 4).

La porosité totale est par conséquent doublée.

Deux éprouvettes sont testées, soit sans partition (tubes "1" et "2" dans la même cavité) et avec partition (tubes "1" et "2" dans 2 cavités différentes).

En présence de plusieurs longueurs de tubes, les configurations de tubes, introduites par matrices de transfert, sont simplement parallélisées.

On peut noter, pour les résonateurs de configuration "mono tubes" (Figure 11), une absorption élevée de niveau équivalent quelle que soit la fréquence centrale visée. Par contre, la largeur de bande diminue avec cette dernière.

L'utilisation simultanée des deux longueurs de tubes (configuration "double tubes") dans une même cavité (soit sans partition) augmente la fréquence centrale d'absorption (Figure 12), sans pour autant élargir la bande de fréquence, ce qui ne présente pas d'intérêt pour les applications visées. Par contre, si les tubes sont insérés dans deux cavités différentes (soit avec partition), subsistent 2 zones d'absorption élevées qui encadrent la bande de fréquence associée à la configuration sans partition. Une distribution de différentes longueurs de tubes au sein de cavités différentes peut ainsi permettre d'élargir une bande de fréquence, au même titre qu'un empilement de résonateurs - liners de types 2DOF ou 3DOF.

On peut remarquer que les simulations sont représentatives des phénomènes physiques, quelles que soient les configurations testées.

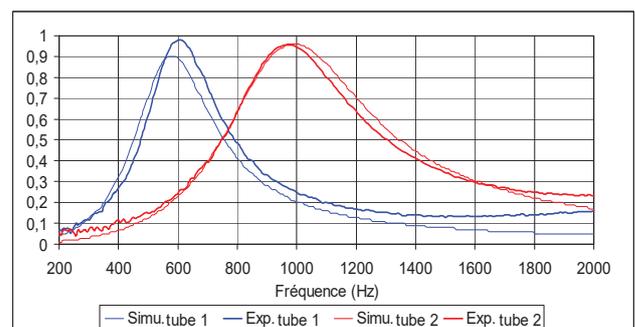


Figure 11 : Coefficient d'absorption simulé / expérimental pour les échantillons de type 2 - "mono tubes".

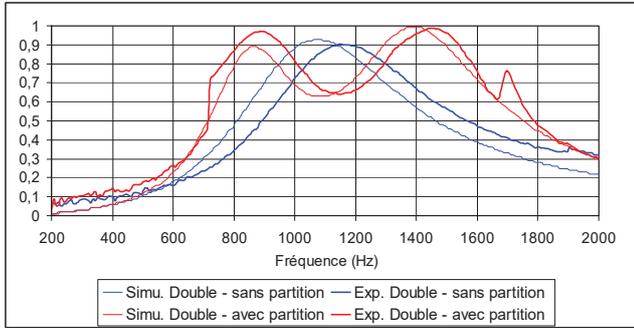


Figure 12 : Coefficient d'absorption simulé / expérimental pour les échantillons de type 2 - "double tubes".

1.2.2 Tests sur banc aéroacoustique

Enfin, une éprouvette de type "mono tubes" avec tubes longs a été réalisée pour être testée en écoulement rasant dans le banc aéroacoustique B2A (Figures 13 et 14).

Le banc B2A [16] peut accueillir des échantillons de matériaux absorbants de longueur 150 mm, susceptibles d'être soumis à des écoulements rasants de Mach débitant 0.4. D'une longueur totale de 4 m, la conduite a une section interne carrée de 50 mm × 50 mm. Deux haut-parleurs délivrent, sous forme multi-sinusoïdale, des ondes planes progressives sur la gamme de fréquence [300 - 3450] Hz, la limite haute fréquence choisie étant la fréquence de coupure du conduit.

Dans le cas présent, le champ de pression acoustique est acquis en amont, au dessus et en aval de l'éprouvette, sur la paroi opposée (Figure 15).

Un calcul direct du champ de pression est également mené avec le code ELVIN, basé sur une formulation Galerkin Discontinue des équations d'Euler 2D harmoniques linéarisées [17]. Le schéma Galerkin Discontinu, très peu dispersif, présente entre autres propriétés intéressantes l'introduction de conditions aux limites en termes de flux, représentation bien adaptée à l'étude de matériaux absorbants.

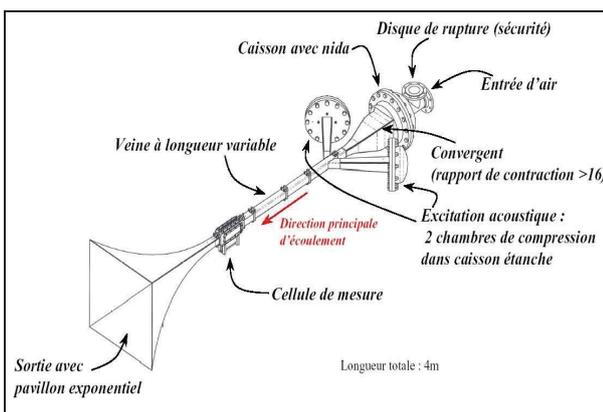


Figure 13 : Schéma du banc aéro-acoustique B2A avec cellule de mesure.

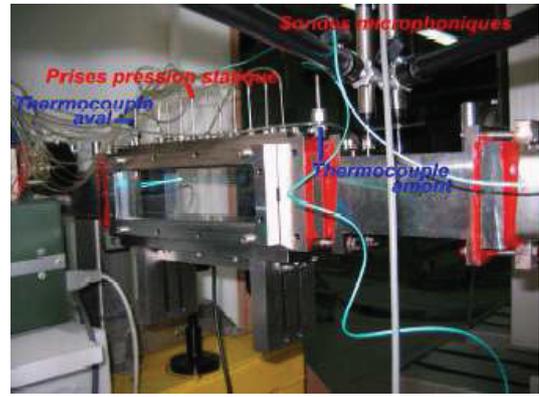


Figure 14 : Vue de la cellule de mesure de B2A.

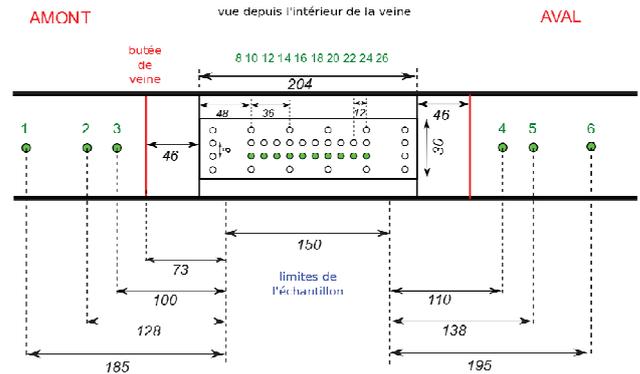


Figure 15 : Positionnement des microphones sur la paroi supérieure du banc B2A (ronds verts).

Une mesure de perte par transmission en fréquence est dans un premier temps conduite par tri d'ondes à l'aide des microphones amont et aval (Figure 16), dans une configuration sans écoulement rasant.

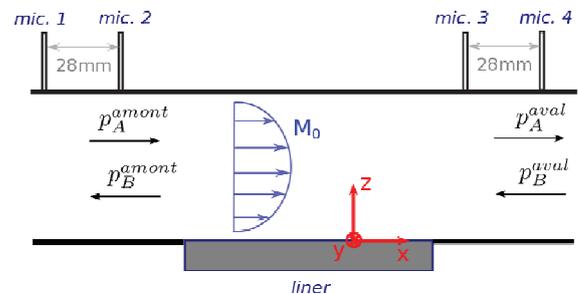


Figure 16 : Schéma du montage des microphones amont et aval pour le tri d'ondes (ondes aller "A" et ondes retour "B").

Il apparaît sur la figure 17 que le maximum de perte par transmission est atteint autour de 1000 Hz, fréquence d'absorption maximale constatée en tube à impédance (cf. figure 11).

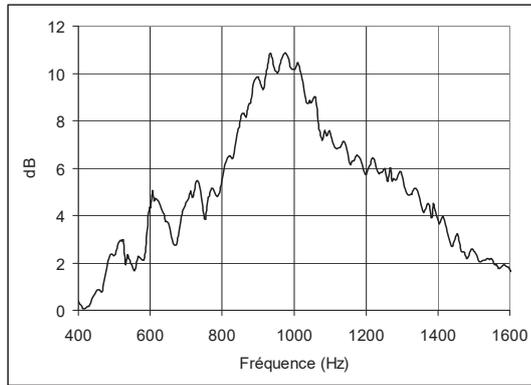


Figure 17 : Perte par transmission (dB) pour une éprouvette de type "mono tubes" avec tubes longs, sans écoulement.

La figure 18 montre le champ de pression simulé et mesuré pour une excitation à 1000 Hz, cette fois-ci avec un écoulement rasant à Mach 0.3 débitant.

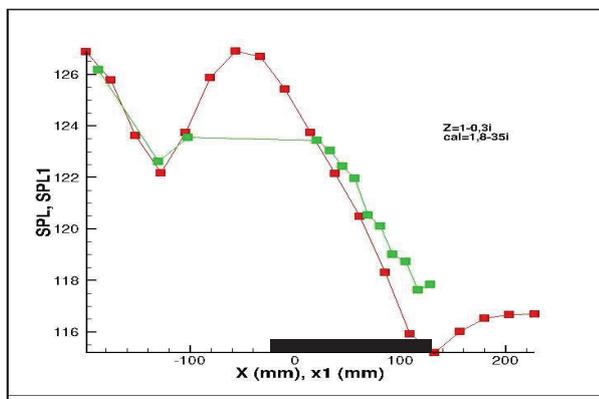


Figure 18 : Champ de pression (dB) le long de la veine d'essai, simulé (symboles rouges) et mesuré (symboles verts), pour une éprouvette de type "mono tubes" avec tubes longs (rectangle noir) à 1000 Hz et Mach 0.3.

L'impédance déduite par simulation directe et comparaison avec les données mesurées est très proche de celle mesurée en tube à impédance, soit sans écoulement (Figure 19).

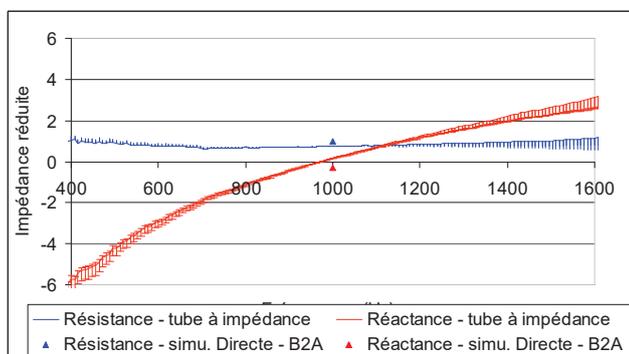


Figure 19 : Réactance simulée à partir des essais B2A à Mach 0.3 / expérimentale à partir des essais en tube à impédance, pour des éprouvettes de type "mono tubes" avec tubes longs.

Ces résultats confirment le comportement linéaire d'un résonateur de type LONAR vis à vis de l'écoulement rasant, contrairement à un résonateur classique de même porosité.

5 Conclusion

L'étude expérimentale et théorique a montré que l'introduction de tubes dans une cavité d'un résonateur conventionnel génère une réduction significative de la bande de fréquence d'absorption (facteur de l'ordre de 1/5). Malgré la simplicité de l'approche théorique, l'impédance peut être déterminée précisément avec les seuls paramètres dimensionnels.

Le comportement des LONAR testés est indépendant du niveau de pression incident (mesures en tube à impédance) et de l'écoulement rasant jusqu'à Mach 0.3 (mesure dans le banc B2A), ce qui est un atout pour une application aéronautique.

Ces premiers résultats permettent de considérer que ces résonateurs avec comportement linéaire pourraient être une alternative à un résonateur classique de type aéronautique, conservant les pré-requis de robustesse et de drainage.

Remerciements

Les travaux présentés dans cet article ont été menés en partie dans le cadre du projet ANR MANSART (Matériaux SANDwicheS ARchiTecturés).

Merci à Ateca pour la fabrication des éprouvettes.

Références

- [1] A. Cummings, Acoustic Nonlinearities And Power Losses At Orifices, *AIAA Journal* **22**, 786-792 (1984).
- [2] C.K.W Tam., K.A. Kurbatskii, K.K Ahuja and R.J. Gaeta, A Numerical and Experimental Investigation of the Dissipation Mechanisms of Resonant Acoustic Liners, *7th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Maastricht (2001).
- [3] U. Ingard and S. Labate, Acoustic Circulation Effects and the Nonlinear Impedance of Orifices, *J. Acoust. Soc. Am.* **22**, 211-219 (1950).
- [4] R.J. Gaeta and K.K. Ahuja, Effect of Orifice Shape on Acoustic Impedance, *39th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, Reno (2001).
- [5] A.L. Goldman and R.L. Panton, Measurement of the acoustic impedance of an orifice under a turbulent boundary layer, *J. Acoust. Soc. Am.* **60**, 1397-1404 (1976).
- [6] J-M. Roche, L. Lylekian and F. Vuillot, 2D-axisymmetric and 3D computational study of the acoustic absorption of resonant liners, *Meeting of Internoise 2008*, Shanghai (2008).
- [7] V. Chandrasekharan, M. Sheplak and L. Cattafesta, Experimental Study of Acoustic Impedance of MEMS-Based Micro-Perforated Liners, *12th Meeting of the Acoustical Society of America /CEAS Aeroacoustics Conference*, Cambridge (2006).
- [8] A.S. Hersh, B. Walker and J.W. Celano, Effect Of Grazing Flow and SPL On Impedance Of 2-Dof Resonators, *Meeting of 8th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference And Exhibit*, Breckenridge (2002).
- [9] Y. Lu, H. Tang, J. Tian, H. Li and J. Yang, The Perforated Panel Resonator with Flexible Tube Bundles

- and Its Sound Absorption Measurements, *Meeting of Internoise 2007*, Istanbul (2007).
- [10] F. Simon, Low frequency sound absorption of resonators with flexible tubes, *Meeting of ICA 2013*, Montréal, (2013).
- [11] U. Ingard, *Notes on "Sound absorption technology"*, Version 94-02, ISBN 0-931784-28-X (1994).
- [12] T.H. Melling, The acoustic impedance of perforates at medium and high sound pressure level, *J. Sound Vib.* **29(1)**, 1-65 (1973).
- [13] Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones, and a Digital Frequency Analysis System, *American Society for Testing and Materials Designation*, E 1050 – 90.
- [14] J.Y. Chung and D.A. Blaser, Transfer function method of measuring in duct acoustic properties - I Theory II Experiment, *J. Acoust. Soc. Am.* **68(3)**, 907-921 (1980).
- [15] H. Boden and M. Abom, Influence of errors on the two microphones method for measuring acoustics properties in ducts, *J. Acoust. Soc. Am.* **79(2)**, 541-549 (1986).
- [16] A. Minotti, F. Simon, F. Gantié, Characterization of an acoustic liner by means of Laser Doppler Velocimetry in a subsonic flow, *Aerospace Science and Technology*, doi:10.1016/j.ast.2007.09.007 (2007).
- [17] J. Primus, Détermination de l'impédance acoustique de matériaux absorbants en écoulement par méthode inverse et mesures LDV, *Thèse de Docteur en Mécanique, Énergétique, Génie Civil, Procédés, INSA*, (2012).