

Méthodes de mesure optique appliquées à la caractérisation d'absorbants acoustiques en écoulement

Estelle Piot, Francis Micheli, Frank Simon¹

¹ONERA - DMAE, 2 av Edouard Belin, F-31055 Toulouse Cedex 4, {estelle.piot, francis.micheli, frank.simon}@onera.fr

L'Onera/DMAE développe depuis 2004 une méthode de mesure optique pour caractériser des matériaux absorbants, adaptée à la présence d'écoulement. Les matériaux sont placés en paroi de la veine d'essai du banc aéro-thermo-acoustique B2A, et sont soumis à des ondes planes en incidence rasante. La méthode est basée sur une mesure par vélocimétrie laser Doppler à franges (LDV), associée à une procédure de traitement du signal pour extraire la composante de vitesse particulière acoustique. Cette communication présente les trois types d'applications associées à cette méthode de mesure, ainsi qu'une synthèse des résultats obtenus depuis sa mise en place. La première application consiste à mesurer la vitesse particulière sur un plan longitudinal couvrant toute la longueur de l'échantillon de matériau. À l'aide d'une formulation de propagation acoustique en écoulement de type Euler ou Galbrun, on en déduit les champs de pression et d'intensité active. L'intégration de ce dernier sur les frontières amont et aval du domaine de mesure permet d'effectuer un bilan de puissance acoustique, et de caractériser ainsi les capacités absorbantes du matériau testé. Les deuxièmes et troisièmes applications consistent à étudier le champ de vitesse acoustique au plus près de la paroi du matériau, sur des domaines de mesures de quelques mm². On peut alors soit en déduire le champ de pression à partir des formulations d'Euler ou de Galbrun, soit le mesurer à l'aide d'un microphone inséré dans le matériau et monté affleurant à sa paroi. Dans les deux cas, le rapport pression sur vitesse normale permet d'obtenir la valeur locale de l'impédance acoustique. Ces types de méthode permettent ainsi notamment d'évaluer l'homogénéité de l'impédance le long du matériau.

1 Introduction

Les industriels aéronautiques utilisent des traitements acoustiques absorbants sur une surface importante de leurs systèmes propulsifs de façon à réduire les bruits de soufflante, de combustion, de turbine et de jet. Le type de traitement optimal à employer est défini par son impédance acoustique et son épaisseur maximale, variant en fonction de sa position (manche, cône, carter, nacelle...). Les valeurs d'impédance optimales résultent, en partie, de simulations de la propagation de modes acoustiques le long et en sortie de conduits traités.

Il apparaît que l'étude et la mesure des performances des traitements acoustiques soumis à des écoulements rasants est indispensable pour prédire précisément le bruit rayonné par des conduits traités et concevoir des traitements optimisés. La présence d'un écoulement rasant rend les modèles d'impédances imprécis et les mesures délicates à effectuer (mesures de perte par transmission [1] qui peuvent être couplées à une méthode inverse [2,3] ou mesures avec un microphone placé à l'intérieur du matériau [4,5]).

L'Onera a développé depuis 2004 un moyen d'essai (banc aéro-thermo-acoustique B2A) propre à mesurer de manière non-intrusive l'impédance de matériau en présence d'écoulement [6,7]. Pour cela, la vitesse particulière acoustique est mesurée par vélocimétrie laser Doppler à franges (LDV), puis un post-traitement permet d'obtenir la puissance acoustique absorbée par le matériau ou bien son impédance.

La première partie de cet article présentera le banc B2A ainsi que la technique de mesure. Nous détaillerons ensuite le processus d'obtention de la puissance acoustique absorbée puis les techniques permettant de remonter à

l'impédance. Ces méthodologies seront à chaque fois illustrées par des résultats sur divers types de matériaux absorbants.

2 Technique de mesure

2.1 Le banc aéro-thermo-acoustique B2A

Le banc B2A (voir Figure 1) est un moyen d'essai de 4m de long et de section carrée de 5cm permettant de soumettre des échantillons de matériaux absorbants à des écoulements rasants pouvant atteindre un nombre de Mach débitant de 0.4 (à froid) et une température de 300°C. Deux haut-parleurs situés à l'amont de la cellule d'essai engendrent des ondes progressives planes sur la gamme 300-3400Hz, avec un niveau de pression total (Over All Sound Pressure Level) allant jusqu'à 140dB.

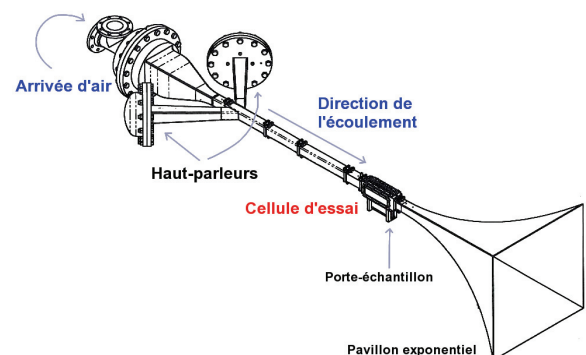


Figure 1 : Schéma du banc aéro-thermo-acoustique

La terminaison du conduit à l'aide d'un pavillon exponentiel permet d'obtenir un taux de réflexion des ondes acoustiques inférieur à 0.2 sur toute la gamme de fréquences.

La cellule d'essai comprend deux hublots latéraux en silice de 200mm de long, 60mm de haut et 20mm d'épaisseur, donnant un accès optique sur toute la section de la cellule. La paroi inférieure comprend un fond amovible de 150mm de long et 30mm de large, pouvant abriter des matériaux absorbants d'épaisseur maximale 100mm. Un schéma de la cellule d'essai et de la surface de l'échantillon absorbant est donné sur la Figure 2. On note x la direction de l'écoulement et de propagation des ondes acoustiques, y la direction transversale et z la verticale.

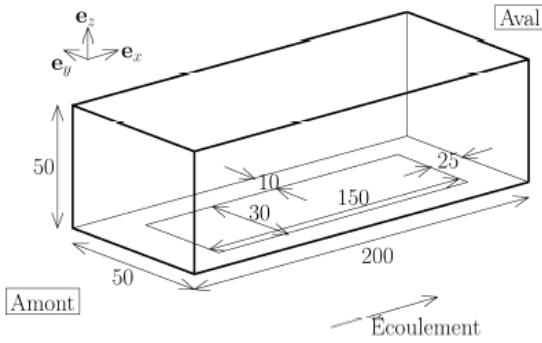


Figure 2 : Schéma de la cellule d'essai. Distances en mm

Des thermocouples sont placés en amont et aval de la cellule d'essai, ainsi que des sondes microphoniques B&K 4182. La paroi supérieure de la cellule d'essai est interchangeable et peut être munie de dix prises de pression statique.

Les mesures LDV sont effectuées à l'aide d'un vélocimètre laser bi-composantes monté en diffusion avant, relié à un processeur de signaux TSI IFA 755. La taille caractéristique du volume de mesure laser est classiquement de 100 μ m. La veine estensemencée par des particules d'Aerosil (SiO₂) ou de MgO (sauf dans les cas sans écoulement où de la fumée d'encens est utilisée). Pour chacune des composantes de vitesse mesurées, on assure une cadence d'au moins 13000 particules par seconde.

2.2 Mesure de la vitesse particulaire acoustique

Les mesures LDV permettent d'obtenir les vitesses aérodynamiques dans les directions x et z . Chacune de ces composante u_i ($i=1,2$) peut-être décomposée comme suit:

$$u_i(\vec{X}, t) = \bar{U}_i(\vec{X}) + u'_i(\vec{X}, t) + u''_i(\vec{X}, t) \quad (1)$$

où $\vec{X}$ est le vecteur de coordonnées spatiales et t est l'instant d'acquisition; $\bar{U}_i$ est la vitesse moyenne de l'écoulement, u'_i la fluctuation acoustique et u''_i est la fluctuation turbulente, que l'on peut considérer ici comme un bruit d'origine aérodynamique. L'objectif du traitement du signal mis en œuvre est d'extraire la composante acoustique du signal mesuré.

Cette fluctuation acoustique u'_i résulte de l'excitation engendrée par le signal des haut-parleurs. L'hypothèse à la base de la procédure d'extraction utilisée est que les phénomènes acoustiques sont entièrement décorrélés des phénomènes turbulents. On peut alors mettre en œuvre la technique de rejet de la turbulence introduite par

Chung&Blaser [8] et mise en place dans la thèse de Minotti [6].

Elle consiste à utiliser le signal des haut-parleurs comme signal acoustique de référence et à travailler non plus dans le domaine temporel mais dans le domaine fréquentiel. Le signal des haut-parleurs est classiquement le signal multi-tonal constitué des onze fréquences de tiers d'octave entre 300 et 3500Hz. La composante « acoustique » de la vitesse est donc celle qui est corrélée avec ce signal de référence.

La première étape du post-traitement consiste à rééchantillonner à pas constant (par interpolation linéaire) le signal de vitesse u_i , car du fait de la mesure LDV ce dernier est échantillonné aléatoirement.

Ensuite, on calcule l'autospectre de la vitesse acoustique u'_i par:

$$G_{u'_i} = \frac{|G_{\tilde{u}_i, ref}|^2}{G_{ref}} \quad (2)$$

en notant G_{ref} l'autospectre du signal de référence, et

$G_{\tilde{u}_i, ref}$ l'interspectre entre $\tilde{u}_i = u_i - \bar{U}_i$ (écart à la moyenne de la vitesse totale), et le signal de référence. Le rééchantillonnage par interpolation linéaire induit sur ces spectres un filtrage passe-bas, qui est corrigé pour chaque fréquence d'étude en appliquant un facteur correctif déterminé par vérification du théorème de Parseval sur un signal étalon.

La phase de la vitesse acoustique est définie par rapport à celle du signal de référence :

$$\Phi_{u'_i, ref} = \text{phase}(G_{\tilde{u}_i, ref}) \quad (3)$$

On peut ainsi travailler avec la forme complexe de la vitesse acoustique, exprimée dans le domaine fréquentiel et définie comme :

$$u'_i(\vec{X}, f) = \sqrt{G_{u'_i}} \exp(i\Phi_{u'_i, ref}) \quad (4)$$

en notant f la fréquence étudiée (et ω la pulsation associée).

3 Evaluation de la puissance acoustique

3.1 Calcul des autres grandeurs acoustiques

Les mesures LDV permettent d'obtenir les composantes u'_x et u'_z de la vitesse particulaire acoustique. Comme les fréquences étudiées sont en deçà de la fréquence de coupure du premier mode transverse de la veine, on fait l'hypothèse que la composante selon y de la vitesse acoustique est négligeable si l'on se place loin des parois latérales.

Les grandeurs acoustiques qu'il reste à calculer sont la pression acoustique et l'intensité active, cette dernière permettant d'étudier la puissance acoustique. Dans le formalisme eulérien, on peut aisément calculer la pression à partir de la vitesse acoustique en résolvant les équations d'Euler linéarisées autour d'un écoulement moyen quelconque. Par contre dans ce formalisme, une équation exacte de la conservation de l'énergie acoustique n'existe que pour des écoulements particuliers (voir par exemple [9] pour un écoulement potentiel). Pour obtenir une équation de bilan de l'énergie acoustique sous forme conservative, il faut utiliser le formalisme mixte eulérien-lagrangien, qui considère la fluctuation acoustique comme une perturbation

lagrangienne dans une représentation eulérienne. L'équation linéarisée analogue aux équations d'Euler est alors l'équation de Galbrun (voir [10,11,12,13] pour plus de détails à ce sujet), qui est une équation portant sur le déplacement acoustique. En négligeant les composantes verticales et transversales de l'écoulement moyen ainsi que la variation selon x et y de sa composante longitudinale, on peut calculer via la théorie de Galbrun le déplacement acoustique (ξ_x, ξ_z) à partir de la vitesse acoustique, en résolvant le système d'équations suivant:

$$\begin{aligned} \bar{U}_x \frac{\partial \xi_x}{\partial x} + i\omega \xi_x &= u'_x + \frac{d\bar{U}_x}{dz} \xi_z \\ \bar{U}_x \frac{\partial \xi_z}{\partial x} + i\omega \xi_z &= u'_z \end{aligned} \quad (5)$$

La pression acoustique est ensuite obtenue par :

$$p' = -\bar{\rho} c^2 \operatorname{div} \vec{\xi} - \frac{d\bar{P}}{dx} \xi_x \quad (6)$$

où les termes avec une barre se réfèrent à l'écoulement moyen et où c est la vitesse du son.

Enfin, l'intensité acoustique active est la moyenne temporelle de l'intensité instantanée donnée par [11,13] :

$$\bar{I} = p' \frac{\partial \vec{\xi}}{\partial t} + \bar{\rho} \left(\frac{\partial \vec{\xi}}{\partial t} \cdot [\vec{u}' + \nabla \bar{U} \cdot \vec{\xi}] \right) \vec{U} \quad (7)$$

dans laquelle les vitesses, pression, déplacements acoustiques sont les parties réelles des grandeurs mesurées ou calculées par les équations (5) et (6).

Etant donnée l'hypothèse d'invariance en y des champs, les mesures LDV sont effectuées dans le plan $y=0$ situé au centre de la cellule d'essai. Le maillage du domaine de mesure est représenté sur la Figure 3. Le matériau absorbant est situé dans le plan $z=0$, entre les côtes $x=0$ et $x=150$ mm. Le maillage contient 22 points en x et 15 en z . La ligne la plus basse en z peut-être placée selon les applications à quelques centaines de microns de la surface du matériau. L'espacement en x est choisi de manière à minimiser les erreurs numériques effectuées lors du calcul du déplacement acoustique (erreur numérique inférieure à 2% sur l'amplitude et 1% sur la phase).

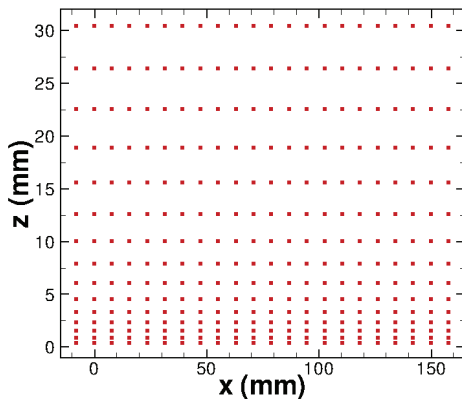


Figure 3 : Maillage pour les mesures globales

Connaissant le champ d'intensité active dans tout le plan (x, z) , on peut alors calculer la puissance acoustique W sur chaque ligne $x=\text{cste}$ en intégrant l'intensité selon z . On peut ainsi faire le bilan entre la puissance à l'amont et à l'aval du matériau, en calculant en particulier la perte de puissance acoustique :

$$Perte = 10 \log \frac{W_{\text{amont}}}{W_{\text{aval}}} \quad (8)$$

Cette grandeur diffère de la perte par transmission classique (Transmission Loss), au sens où la puissance acoustique amont contient ici à la fois les ondes incidentes et les ondes réfléchies. Cette perte caractérise donc les capacités absorbantes du matériau, et non ses capacités réfléchissantes.

3.2 Exemples de résultats

Des mesures ont été effectuées dans le cadre du projet FRAE/Comatec au dessus d'un matériau fabriqué par la société Ateca, constitué de fibres métalliques recouvertes d'une plaque micro perforée (perforation de 0.3mm de diamètre et taux de perforation de 5%). La Figure 4 illustre le type de champs d'intensité acoustique active que l'on peut obtenir par la méthode présentée précédemment. On a tracé en vert les vecteurs intensité qui ont une direction impactant la surface du matériau et sont dirigés vers l'aval, en bleu ceux qui ne l'impactent pas, et en rouge ceux qui l'impactent et sont dirigés vers l'amont. La zone verte représente donc la zone d'influence du matériau sur les ondes acoustiques.

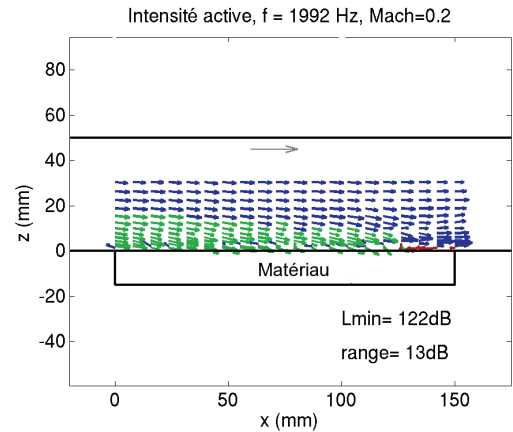


Figure 4: Champ d'intensité acoustique active, pour un écoulement de Mach débitant égal à 0.2

En faisant le calcul de la puissance acoustique à l'amont et à l'aval du matériau, pour chaque fréquence d'excitation et chaque nombre de Mach de l'écoulement, on obtient le bilan de perte acoustique donné par la Figure 5. Celui-ci permet d'établir quelle est la bande de fréquence sur lequel le matériau est le plus absorbant, et de comparer cette capacité absorbante selon les conditions de l'écoulement.

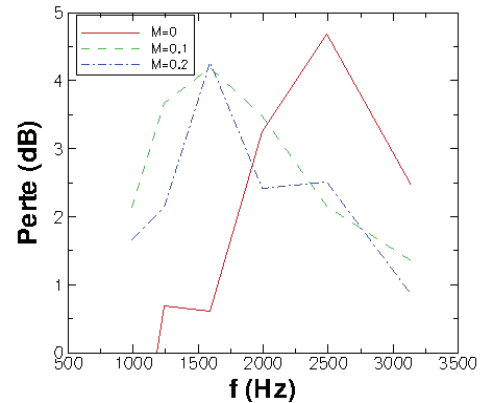


Figure 5: Perte de puissance acoustique pour trois nombres de Mach débitant, selon l'équation (8)

4 Evaluation de l'impédance

4.1 Méthode « tout-LDV »

L'impédance spécifique du matériau peut-être estimée à proximité de la paroi par:

$$Z = \frac{p'}{-i\omega\xi_z} \quad (9)$$

Cette condition repose sur la continuité du déplacement lagrangien à la surface du matériau absorbant (voir par exemple [13]). On peut ainsi calculer l'impédance à différentes hauteurs z et évaluer son évolution selon x , ce qui permet notamment d'évaluer l'homogénéité de l'impédance le long du matériau. Un exemple de résultat pour un matériau testé lors du projet européen Timpan est tracé sur la Figure 6. L'évolution de l'impédance en x est significative, ce qui montre que ce matériau n'est pas à réaction localisée.

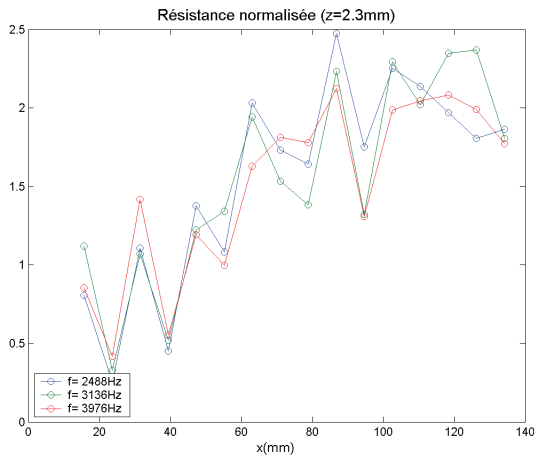


Figure 6: Evolution de la résistance spécifique le long du matériau, pour trois fréquences d'étude

Cette méthode de mesure "tout LDV" apporte de nombreuses informations qualitatives sur le comportement du matériau, mais a cependant tendance à surestimer les valeurs des résistances et réactances. Lorsque cela est techniquement possible, il est donc intéressant d'utiliser aussi une autre méthode d'estimation d'impédance, la méthode mixte.

4.2 Méthode mixte

Cette méthode consiste à insérer dans le matériau une sonde microphonique (par exemple une sonde B&K 4182 ayant une tige de 1.2mm de diamètre), placée affleurante à la surface du matériau. On applique à ce signal de pression le post-traitement de rejet de la turbulence par corrélation au signal de référence. D'autre part, on effectue des mesures LDV dans un micro-champ parallèle au matériau, en proche paroi ($z=0.2$ ou 0.3 mm) et juste au dessus d'une perforation de la tôle. La taille et la position du maillage de mesure sont choisies de manière à mesurer une surface égale à 20 fois la surface d'une perforation et afin d'avoir au niveau de la perforation au moins deux points de mesure dans chaque direction (surface de porosité équivalente à celle de l'échantillon). Un exemple d'un tel maillage est représenté sur la Figure 7, pour le cas d'une tôle avec des perforations de 0.3mm de diamètre et un taux de perforation de 5%.

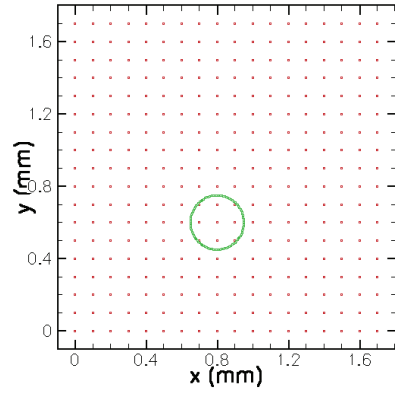


Figure 7: Maillage au dessus d'une perforation représentée par le cercle vert

On obtient ensuite l'impédance à partir de la pression microphonique et de la vitesse normale LDV moyennée sur le maillage de mesure :

$$Z = \frac{p^{micro}}{-mean(u'_z)} \quad (10)$$

Ce type de mesure est adapté aux matériaux à réaction localisée, puisque la pression microphonique est mesurée en un seul point de la surface du matériau.

Une comparaison des résultats de cette méthode avec la méthode « tout-LDV » (impédance donnée par l'équation (9), moyennée selon x et tracée pour différentes valeurs de z) et avec la théorie linéaire de Melling [14] est faite sur les Figure 8 Figure 9, pour un matériau en nid d'abeille avec une plaque micro-perforée. La méthode mixte donne des résultats qui se comparent bien avec la théorie, tandis qu'en comparaison la méthode « tout-LDV » donne les bonnes tendances mais surestime les valeurs d'impédance.

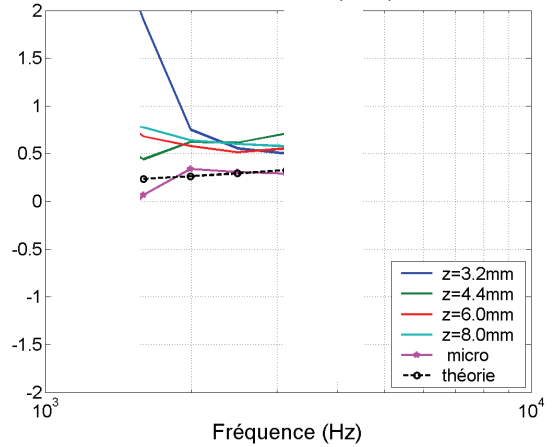


Figure 8 : Comparaison des résistances spécifiques obtenues par la méthode "tout-LDV" à différentes hauteurs (lignes), par la méthode mixte (ligne avec points roses) et par la théorie de Melling (pointillés avec ronds noirs)

Ces résultats ont été obtenus sans écoulement moyen pour permettre une comparaison avec la théorie, mais la méthode peut bien sûr être utilisée avec écoulement. Un exemple de résultat est tracé sur les Figure 10 Figure 11. On observe une augmentation de la résistance avec le Mach, et quasiment pas de changement sur la réactance.

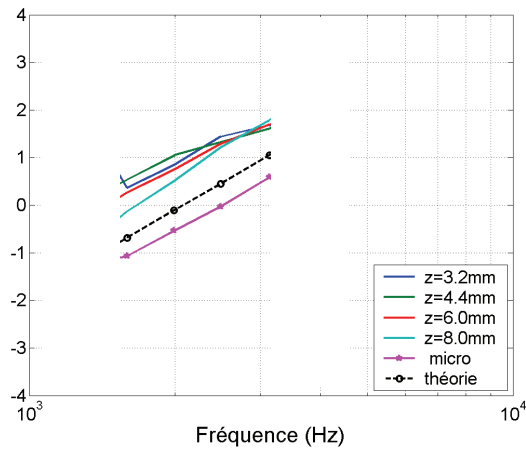


Figure 9 : Comparaison des réactances spécifiques obtenues par la méthode "tout-LDV" à différentes hauteurs (lignes), par la méthode mixte (ligne avec points roses) et par la théorie de Melling (pointillés avec ronds noirs)

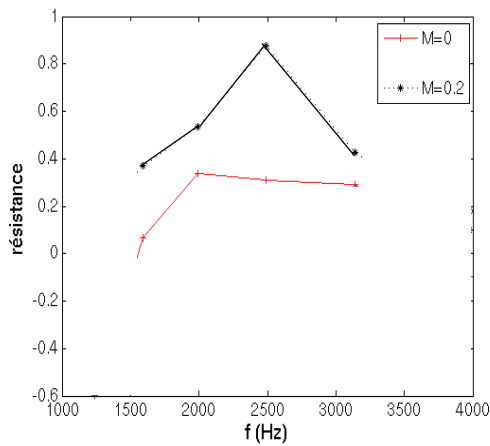


Figure 10 : Résistance spécifique obtenue par la méthode mixte sans écoulement et pour M=0.2

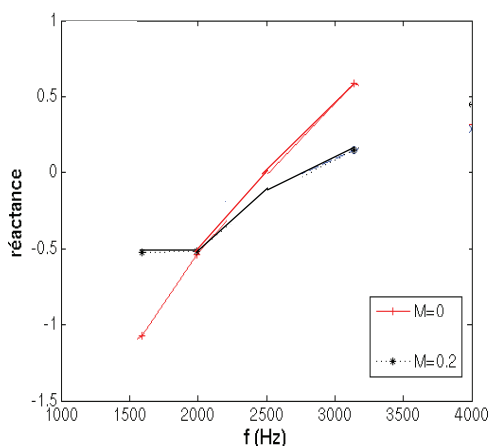


Figure 11 : Réactance spécifique obtenue par la méthode mixte sans écoulement et pour M=0.2

Il faut noter que lorsque le comportement du matériau n'est plus linéaire du fait d'un niveau d'excitation acoustique trop important, des phénomènes de détachement tourbillonnaire (tourbillons de vitesse acoustique) apparaissent à proximité de la surface du matériau (au

niveau des perforations). Ces tourbillons sont clairement identifiables sur les champs de vitesse acoustique. Leur présence rend alors l'évaluation de l'impédance locale plus délicate.

5 Conclusion

La méthode optique développée par l'Onera au sein du banc B2A permet de mesurer de manière non-intrusive les vitesses acoustiques au dessus d'un matériau absorbant. Un post-traitement basé sur une formulation mixte lagrangienne-eulérienne permet de calculer la pression, le déplacement ainsi que l'intensité acoustique. A partir de ces données, on peut soit étudier le comportement du matériau de manière globale, en effectuant un bilan de puissance acoustique entre l'amont et l'aval, soit obtenir des informations locales, et en particulier l'impédance acoustique. Cette dernière peut-être obtenue directement à partir des mesures LDV, ou bien en utilisant une méthode mixte, couplant le champ de vitesse acoustique mesuré par LDV et une mesure de pression par une sonde microphonique affleurant la surface du matériau.

Remerciements

Les résultats présentés dans cet article ont été obtenus grâce au soutien financier de la FRAE et de la communauté européenne lors des projets Comatec et Timpan. Les auteurs souhaitent aussi remercier Maud Lavieille pour sa contribution aux mesures effectuées dans le cadre de ces projets.

Références

- [1] Rademaker E., Idzenga S., Huisman H., Nijboer R., "A new facility for hot stream acoustic liners", *10th International Congress on sound and Vibration* (2003).
- [2] Jones M.G., Watson W.R., Nark D.M., "Optimization of acoustic pressure measurements for impedance reduction", *13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA Paper 2007-3531* (2007).
- [3] Leroux M., "Propagation acoustique en conduit traité: influence de l'écoulement sur la propagation avec impédance de paroi", *Doctorat en Acoustique, Université du Maine* (2005).
- [4] Simonich J., Morin B., Naranaya S., Patrick W., "Development and qualification of an in-situ grazing flow impedance measurement facility", *12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA Paper 2006-2640* (2006).
- [5] Gaeta R.J.Jr., Mendoza J.M., Jones M.G., "Implementation of in-situ impedance techniques on a full scale aero-engine system", *13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA Paper 2007-3441* (2007).
- [6] Minotti A., "Contribution à la mesure aéroacoustique par Vélocimétrie Laser Doppler", *Doctorat en Energétique et Dynamique des Fluides, ENSAE* (2004).

- [7] Lavieille M., "Développement d'une méthode de mesure aéro-acoustique dans un écoulement non uniforme rapide et chaud", *Doctorat en Energétique et Dynamique des Fluides, ENSAE*, (2008).
- [8] Chung J.Y., Blaser D.A., "Transfer Function Method of Measuring in-Duct Acoustic Properties. I. Theory", *J. Acoust. Soc. Am.* 68 (1980).
- [9] Eversman W., "Acoustic power in non-uniform lined ducts", *J. Sound. Vib.* 313, 723-737 (2008).
- [10] Galbrun H., "Propagation d'une onde sonore dans l'atmosphère terrestre et théorie des zones de silence", *Gauthier-Villars* (1931).
- [11] Poirée B., "Les équations de l'acoustique linéaire et non linéaire dans un écoulement de fluide parfait", *Acustica*, 57 (5), 5-25 (1985).
- [11] Peyret C., Elias G., "Finite-element method to study harmonic aeroacoustics problems", *J. Acoust. Soc. Am.*, 110 (2), 661-668 (2001).
- [12] Bonnet-Ben Dhia A.S., Duclairoir E.M., Legendre G., Mercier J.F., "Time-harmonic acoustic propagation in the presence of a shear flow", *J. Comput. Appl. Math.*, 204 (2), 428-439 (2007).
- [13] Godin O.A., "Reciprocity and energy theorems for waves in a compressible inhomogeneous moving fluid", *Wave motion*, 25 (2), 143-167 (1997).
- [14] Melling T., "The acoustic impedance of perforates at medium and high sound pressure level", *J. Sound. Vib.* 29(1), 1-65 (1973).