

CFA/VISHNO 2016

**Optimisation de la mesure d'impédance de surface de
traitements aéronautiques**

E. Portier^a, G. Riou^b, J. Mardjono^b, L. Moreau^c et Y. Aurégan^d

^aCTTM, 20, rue Thales de Milet, 72000 Le Mans, France

^bSNECMA MOTEURS, Site de Villaroche, 77550 Moissy Cramayel, France

^cAIRCELLE, Route du pont VIII, 76700 Gonfreville L'Orcher, France

^dLAUM UMR CNRS 6613, Université du Maine, Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le
Mans, France

eportier@cttm-lemans.com



LE MANS

Cet article traite de la caractérisation acoustique de parois traitées pour des applications de type aéronautique ; la spécificité de cette application réside dans les nombres de Mach d'écoulement et les niveaux sonores très élevés rencontrés sur ces parois. Quand la veine d'essai est de taille réduite (pour limiter la taille du compresseur d'alimentation en air mais permet en contrepartie de reproduire l'environnement sonore d'un turboréacteur) des études récentes ont montré que l'application de conditions aux limites conventionnelles de type Ingard-Myers à la frontière des traitements ne parvient pas à prédire correctement le comportement acoustique et l'impédance de la paroi traitée et en particulier avec une direction d'écoulement opposée à la propagation acoustique. Une version modifiée de la condition Ingard-Myers a dès lors été proposée et montre une meilleure prédiction de l'impédance de surface sous écoulement rasant et ce quelle que soit sa direction. De fait, le comportement acoustique des éléments traités est mieux prédit. La méthode expérimentale présentée dans cet article repose sur l'utilisation d'un réseau de microphones faisant face au traitement afin d'extraire les nombres d'onde axiaux dans les deux directions de propagation acoustique. Ceux-ci sont ensuite utilisés avec la condition aux limites modifiée pour déduire l'impédance de surface. Une veine d'essai a été conçue spécialement de façon à atteindre un nombre de Mach de l'ordre de 0,5 proche de l'application visée et des sources acoustiques de fort niveau ont également été mises en œuvre afin de simuler l'excitation non linéaire de l'application industrielle. Enfin, ces résultats sont comparés avec les premiers résultats issus de la méthode directe récemment mise en œuvre qui consiste en l'utilisation d'une cavité fermée équipée de deux microphones.

1 Introduction

Alors que l'utilisation de traitements acoustiques (de type "liners") sont couramment utilisés dans des applications de réduction de bruit des réacteurs, le comportement acoustique de tels systèmes en présence d'écoulement rasant reste un sujet d'actualité en raison de l'interaction complexe entre la propagation acoustique et l'écoulement au niveau de la couche limite près de la paroi traitée.

Il a été d'usage de considérer un écoulement potentiel dans cette zone et d'admettre une continuité du déplacement et de la pression acoustique, ce qui conduit à une condition aux limites de type Ingard [1] – Myers [2]. Cette condition a été couramment employée pour calculer l'impédance de surface du traitement à partir de mesures acoustiques [3,4,5,6,7]. Aurégan *et al.* [8] puis Brambley [9] ont montré plus récemment que les effets turbulents et visqueux près de la paroi modifient cette condition aux limites. L'étude expérimentale de Renou et Aurégan [10] en 2011 montre que l'utilisation de la condition aux limites conventionnelle ne permet pas de prédire correctement le comportement acoustique et l'impédance de la paroi traitée et en particulier lorsque la direction d'écoulement est opposée à la propagation acoustique.

Une version modifiée de la condition Ingard-Myers a été proposée [8,10] par l'introduction d'un terme supplémentaire

nommé β_v qui permet de rendre compte des effets visco-thermiques dans la couche limite de la paroi traitée. Ce terme est compris entre 0 et 1 : lorsque $\beta_v=0$, il s'agit de la condition aux limites classique d'Ingard-Myers (continuité du déplacement acoustique) et lorsque $\beta_v=1$, il s'agit d'une continuité de débit acoustique. L'introduction de ce terme supplémentaire permet alors de mieux rendre compte de la propagation acoustique des éléments traités et mieux prédire l'impédance de surface sous écoulement rasant et ce, quel que soit la direction de l'écoulement.

Dans le cadre de cette étude, des mesures en conduit avec écoulement sont réalisées avec un traitement acoustique classique à réaction localisée. La première partie de cet article décrit la méthode expérimentale mise en œuvre (méthode dite "K") qui consiste dans un premier temps à déterminer les nombres d'onde axiaux face au traitement, puis, dans un deuxième temps, à déterminer l'impédance de surface du traitement en utilisant la condition aux limites modifiée.

La deuxième partie est consacrée aux réalisations expérimentales, à savoir la mise en œuvre de la méthode "K" et aussi à la mise en œuvre d'une méthode classique dite "In Situ" qui utilise une technique standard à deux microphones.

Enfin, la dernière partie est consacrée aux résultats expérimentaux.

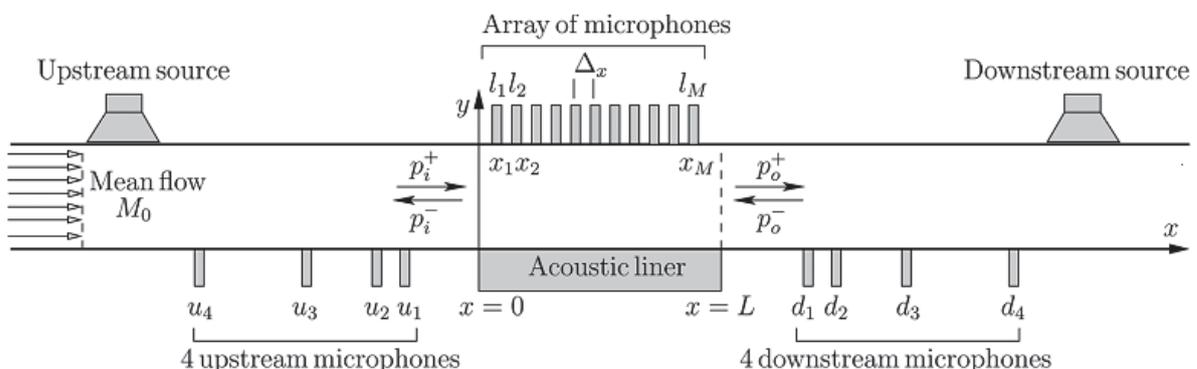


Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental (d'après [10])

2 Méthode "K"

La Figure 1 présente le schéma de principe de l'installation expérimentale : on considère une veine rectangulaire partiellement traitée dans laquelle se propage une onde acoustique à laquelle on superpose un écoulement d'air. Dans la gamme de fréquences étudiée et en raison des dimensions de la veine, seulement deux modes acoustiques sont considérés : l'onde plane et le premier mode transverse lié à la plus grande dimension transversale. Comme les microphones sont montés au centre de cette plus grande dimension, seul le mode plan est mesuré.

En amont et en aval du traitement, des terminaisons anéchoïques (non représentées), des sources acoustiques et des microphones sont disposés. On reconnaît le dispositif classique de mesure de matrice de diffusion avec une méthode deux sources.

En face du traitement un réseau de microphones est également placé de façon à déterminer les nombres d'onde axiaux. Ceux-ci sont obtenus à partir d'une décomposition modale du champ de pression acoustique à la paroi opposée au traitement de type :

$$p_m = \sum_{n=0}^{\infty} b_n^+ e^{-ik_n^+(x_m-x_1)} + \sum_{n=0}^{\infty} b_n^- e^{-ik_n^-(x_m-x_1)}, m = 1 \dots M \quad (1)$$

où k_n^\pm sont les nombres axiaux dans la portion traitée, b_n^\pm sont les amplitudes complexes des ondes acoustiques et M le nombre de microphones du réseau utilisés.

A partir de l'hypothèse d'un traitement à réaction localisée, son impédance Z_w s'exprime par la relation suivante :

$$Z_w = \frac{p}{v_w} \quad (2)$$

où p et v_w désignent respectivement la pression et la vitesse normale à la paroi.

L'utilisation de la condition d'Ingard-Myers (continuité du déplacement acoustique) conduit à la relation de dispersion suivante :

$$k_y^2 = (\omega - M_0 k)^2 - k^2 \quad (3)$$

et l'écriture de la pression acoustique conduit à la relation :

$$k_y \tan(k_y) = \frac{(i\omega - iM_0 k)^2}{i\omega Z_w} \quad (4)$$

où ω , M_0 désignent respectivement la pulsation et le nombre de Mach d'écoulement.

Le système d'équations (3) et (4) permet de déterminer l'impédance de surface Z_w à partir des nombres d'onde axiaux k .

Dans la suite, l'impédance de la paroi traitée est calculée à partir du mode prédominant se propageant dans les deux directions, à savoir le mode plan k_0^\pm .

Suivant la direction de propagation considérée, deux impédances de paroi peuvent être dès lors calculées, qui d'après Renou et Aurégan [10] sont égales sans écoulement mais ne le sont plus avec écoulement, ce qui montre que la condition classique de condition aux limite n'est pas appropriée. De ce fait, une version modifiée de la condition aux limites d'Ingard-Myers est proposée qui conduit à modifier la relation (4) par :

$$k_y \tan(k_y) = \frac{(i\omega - i(1-\beta_v)M_0 k)(i\omega - iM_0 k)}{i\omega Z_w} \quad (5)$$

Le paramètre β_v est obtenu en contraignant le modèle ainsi construit pour donner une unique impédance de paroi dite effective Z_{eff} quelle que soit la direction de propagation acoustique.

On se reportera à l'article de Renou et Aurégan [10] qui présente en détail la modélisation.

3 Mises en œuvre expérimentales

3.1 Méthode "K"

La Figure 2 présente le plan de conception de la veine mise en œuvre dans sa partie centrale : il s'agit d'une veine rectangulaire de section 20 mm x 50 mm équipée d'un porte-échantillon permettant d'accueillir le traitement à tester de dimensions 100 mm x 200 mm (dont seule une surface 50 mm x 200 mm est utile). En face de ce dernier, 11 microphones Brüel & Kjaer de type 1/4" pression sont montés et espacés de 20 mm de façon à mesurer les nombres d'onde axiaux.

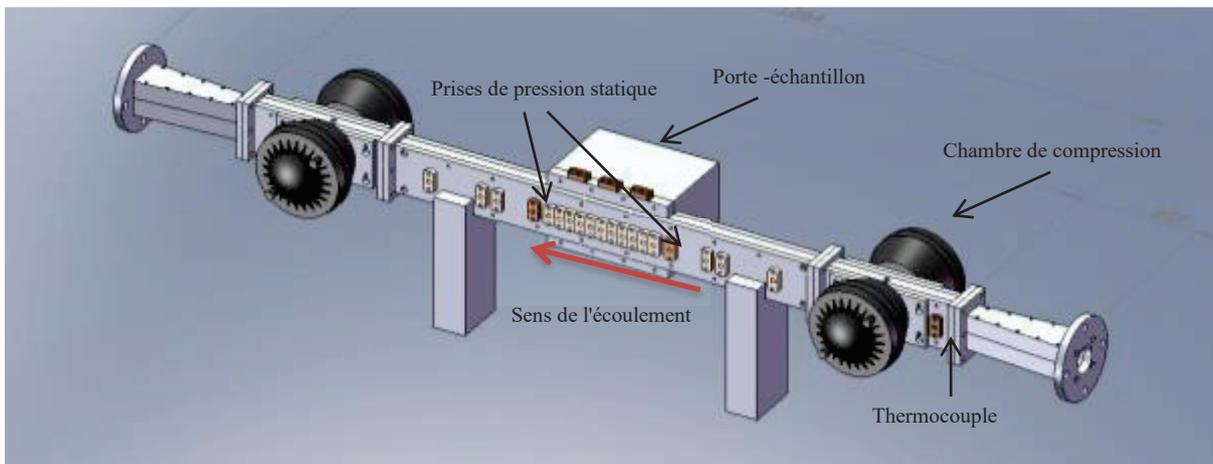


Figure 2 : Conception de la veine d'essai

Trois microphones de même type peuvent être montés de part et d'autre du porte-échantillon, ils permettent la mesure de la matrice de diffusion de l'élément testé. On trouve une paire de chambres de compression en amont et en aval afin d'obtenir des niveaux d'excitation acoustiques élevés sur la bande de fréquences 800 à 5000 Hz. Enfin, des adaptations de section sont pourvues de chaque côté qui permettent le raccordement à une veine cylindrique existante de diamètre 50 mm. Une portion de veine de longueur d'un mètre a ensuite été rajoutée entre l'adaptation de section et la première paire de chambres de compression afin de favoriser le rétablissement de l'écoulement en sortie de l'adaptation de section.

L'écoulement est réalisé en amont au moyen d'un compresseur de type roots, d'un refroidisseur et d'un volume de tranquillisation. Dans la configuration de veine décrite ci-dessus un nombre de Mach de 0,5 peut être obtenu, proche de l'application visée.

La Figure 3 présente une vue de l'installation et la Figure 4 la vue de dessus de la partie traitée.



Figure 3 Vue d'ensemble de la partie centrale

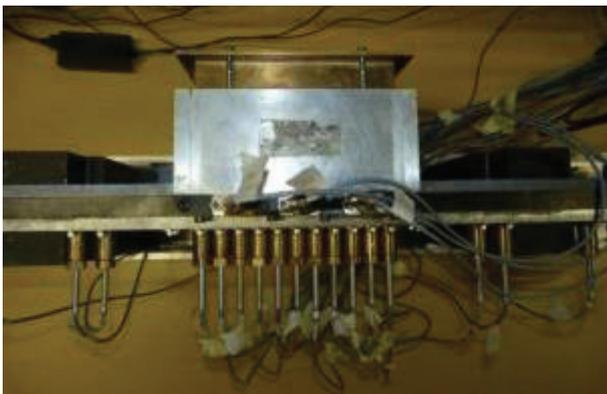


Figure 4 Vue de dessus de la partie traitée et équipée

3.2 Méthode In-Situ

En complément de la mesure décrite ci-dessus, une mesure directe de l'impédance de surface a été mise en œuvre dont le schéma de principe est décrit sur la Figure 5. Il s'agit d'une méthode historique [11] utilisant deux microphones, l'un affleurant en surface permettant de mesurer la pression et l'autre en fond de cavité dont la pression mesurée est proportionnelle au débit acoustique. Un des buts principaux de la mise en œuvre de cette méthode est de s'affranchir de la limitation fréquentielle haute 5000Hz de la méthode précédente, cette extension étant requise pour l'étude des traitements sur maquettes et petits moteurs.

Dans cette configuration simple, l'impédance normalisée se déduit directement de la fonction de transfert entre les deux microphones [12] :

$$z = \frac{P_{face-sheet}}{u_{face-sheet}} = -i \left| \frac{P_{face-sheet}}{P_{back-wall}} \right| e^{i\varphi} \sin^{-1}(kh) \quad (6)$$

où h est la hauteur de la cavité et φ la phase de l'interspectre des deux microphones.

La partie servant à faire la mesure directe est conçue pour être montée en lieu et place d'une des chambres de compression. On utilise deux microphones de type 1/8" (Bruel & Kjaer 4138) dont un est monté avec sa grille de manière affleurante à travers la tôle perforée testée et l'autre est placé en fond de cavité. La hauteur de cavité fait 19 mm pour un diamètre de 29 mm.

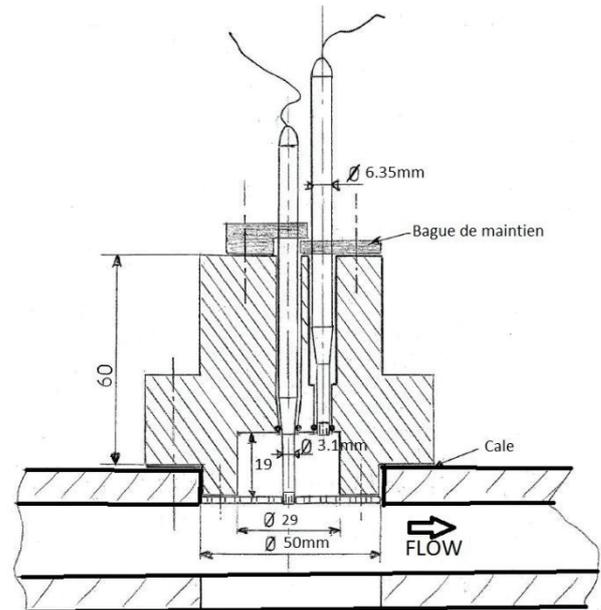


Figure 5 Schéma de la mesure à deux microphones



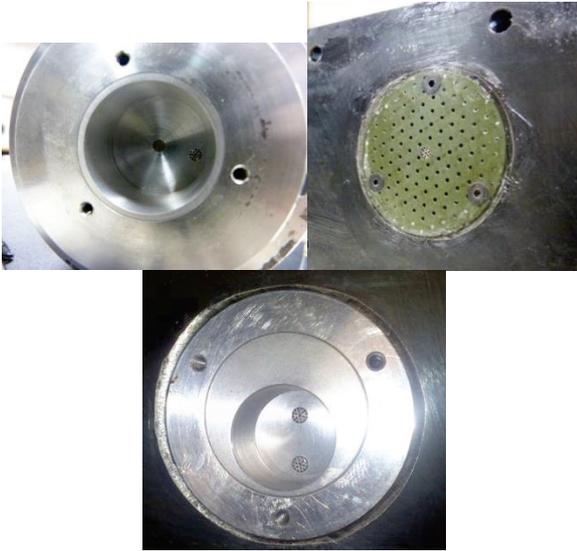


Figure 6 Réalisation du dispositif

La Figure 6 présente plusieurs vues de la réalisation du dispositif de mesure dit « inSitu ». La vue (la plus à gauche) où les deux microphones sont montés affleurants en fond de cavité correspond au montage de calibration relative des deux microphones lorsque ceux-ci sont placés à l'extrémité d'un tube de Kundt de même diamètre (29mm). La vue d'en bas montre une adaptation du montage avec insert d'une bague réduisant le diamètre de cavité pour accroître notablement si besoin la plage de mesure vers les hautes fréquences.

La Figure 7 montre l'implantation du montage sur la veine d'essai : en aval de l'adaptation de section (partie grise), on trouve le tronçon d'1 m de rétablissement d'écoulement de section rectangulaire, le tronçon contenant les deux chambres de compression servant à l'excitation acoustique, le tronçon contenant le montage In-Situ et une terminaison anéchoïque.

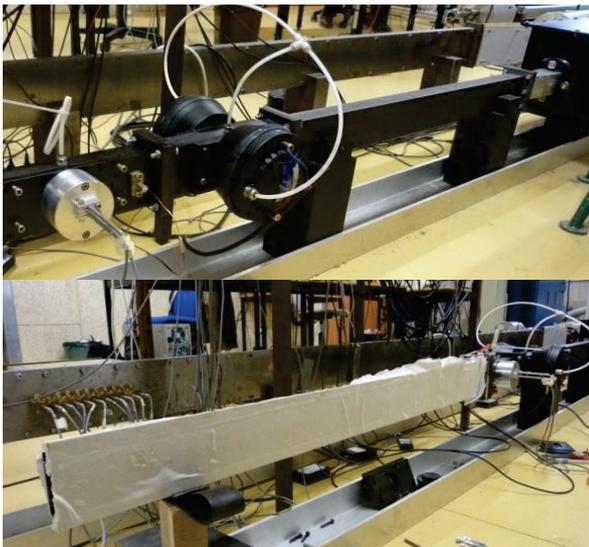


Figure 7 Montage sur la veine d'essai

3.3 Panneau de traitement testé

Le panneau, dont les résultats sont présentés dans cet article, est un traitement standard sandwich composé d'une âme en nid d'abeille et recouverte d'une tôle perforée.

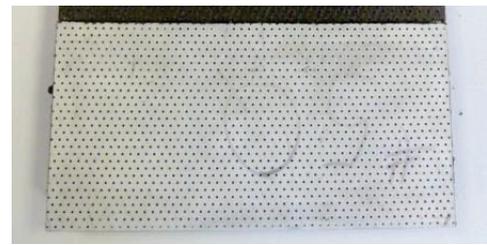


Figure 8 Panneau testé

Le panneau de dimension 200 mm par 100 mm et tel que présenté sur la figure précédente est monté dans le porte-échantillon (Figure 4) pour la mesure avec la méthode "K" et une rondelle de diamètre 50 mm de plaque perforée est découpée pour être montée dans le dispositif de mesure 'In Situ' (Figure 6).

4 Résultats

Dans un premier temps, on présente les niveaux de pression mesuré le long du traitement avec la paire de chambres de compression amont en fonctionnement lors de la mesure utilisant la méthode K (Figure 9). L'acquisition est faite en sinus incrémenté par pas de 10 Hz entre 800 et 5000 Hz dont le niveau n'est pas asservi.

Trois niveaux d'excitation sont visés :

- Niveau faible : environ 120 dB (courbes vertes)
- Niveau intermédiaire : environ 140 dB (courbes bleues)
- Niveau maximum : environ 160 dB (courbes mauves)

Par ailleurs, pour chaque niveau on représente trois courbes correspondantes aux microphones placés au début, au milieu et à la fin du traitement.

On constate que, logiquement, l'excitation diminue le long du traitement dans la plage de fréquences où ce dernier absorbe le plus. Ainsi, de manière à ce que l'échantillon soit soumis à un niveau acoustique global constant, on a superposé des sources basses fréquences fonctionnant en dehors de la plage d'étude à 791 Hz et de part et d'autre de la veine rectangulaire.

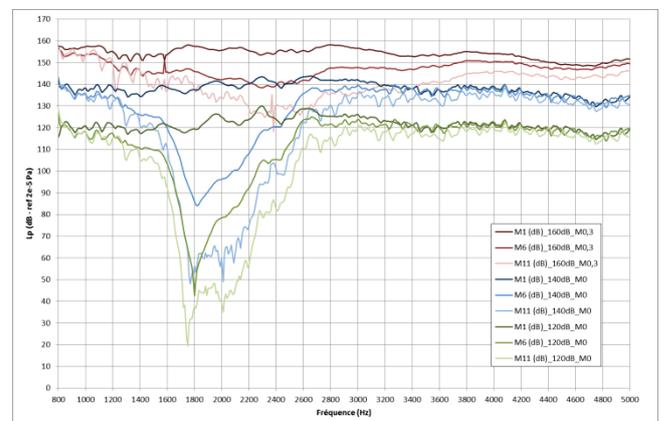


Figure 9 Niveaux de pression – Méthode K

La Figure 10 présente les résistances obtenues par la méthode K sur quatre niveaux d'écoulement (Mach = 0 – 0,2 – 0,3 – 0,45) et sur deux ou trois niveaux d'excitation acoustique (120 dB – 140 dB – 160 dB).

De façon générale, on observe une augmentation de la résistance avec le niveau d'écoulement et/ou le niveau d'excitation acoustique. La mesure est dégradée pour les fréquences inférieures à 1300 Hz environ, ce qui est attribué au rapport entre les longueurs d'onde mises en jeu et la taille de l'échantillon dans sa plus grande dimension (200 mm). Par ailleurs, dans certains cas le rapport signal sur bruit se dégrade dans certaines situations où le niveau de pression mesuré le long du traitement devient du même ordre de grandeur, voire inférieur au niveau de pression de turbulence de l'écoulement.

L'impact de l'écoulement et de l'excitation acoustique sur la réactance est plus modérée (Figure 11) : peu ou pas d'impact du niveau de pression et une tendance à la baisse quand le débit d'écoulement augmente.

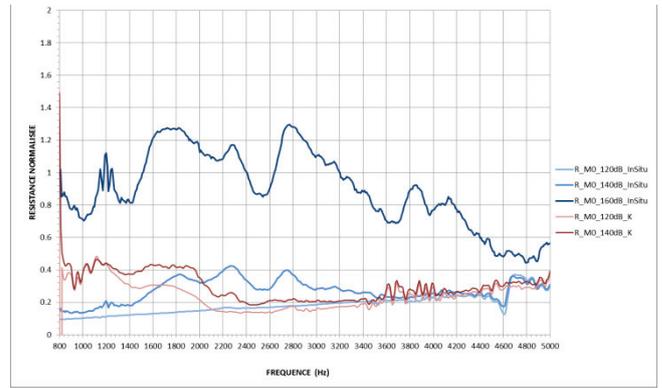


Figure 12 Résistances – Mach0 – Méthodes K + InSitu

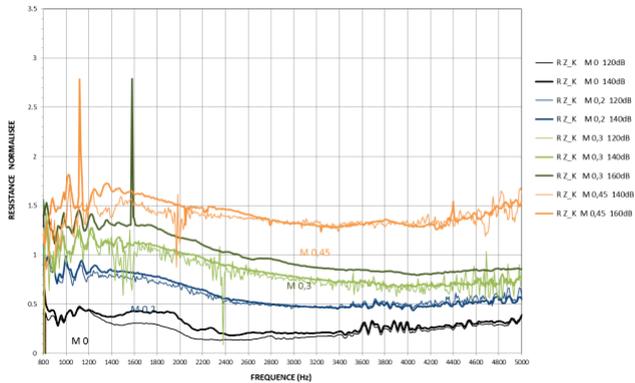


Figure 10 Résistances – Méthode K

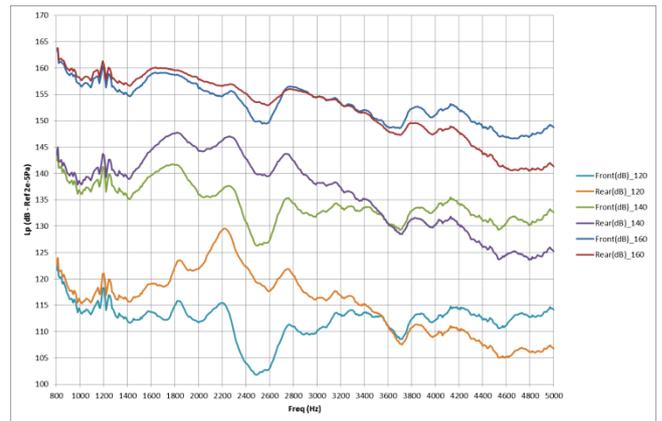


Figure 13 Niveaux d'excitations – Mach0 – InSitu

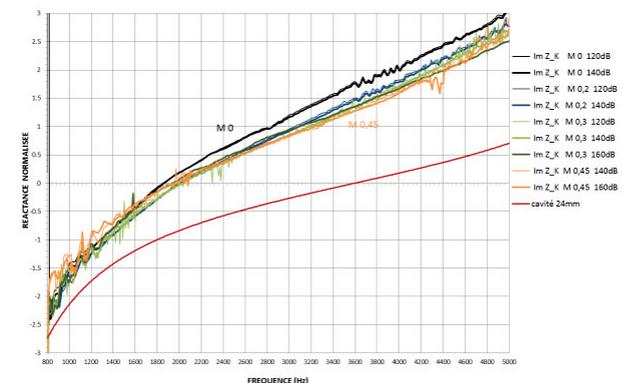


Figure 11 Réactances – Méthode K

La figure suivante présente les résistances mesurées avec la méthode In Situ sur trois niveaux d'excitation et sans écoulement (courbes bleues) et comparées aux résistances obtenues par la méthode K sur deux niveaux d'excitation (courbes mauves). On constate que les mesures obtenues avec la méthode In Situ sont très oscillantes et difficilement comparables à celles de la méthode K. Les oscillations observées sont à mettre en rapport avec la variation des niveaux d'excitation subie lors des mesures avec la méthode In Situ (Figure 13 « courbes Front (dB) »). Par exemple, pour le niveau d'excitation le plus fort, la résistance devient très sensible au niveau de pression : l'allure de la courbe de résistance suit l'allure de celle du niveau d'excitation.

Les comparaisons sur la réactance (Figure 14) s'effectuent sur la tôle perforée seule en soustrayant la contribution des cavités résonnantes (cotan(kH)) en raison des différences de hauteur de cavité (24 mm sur le panneau sandwich et 19 mm sur le montage In Situ). Des écarts non négligeables sont observés et contrairement aux résistances, la variation du niveau d'excitation impacte peu les réactances.

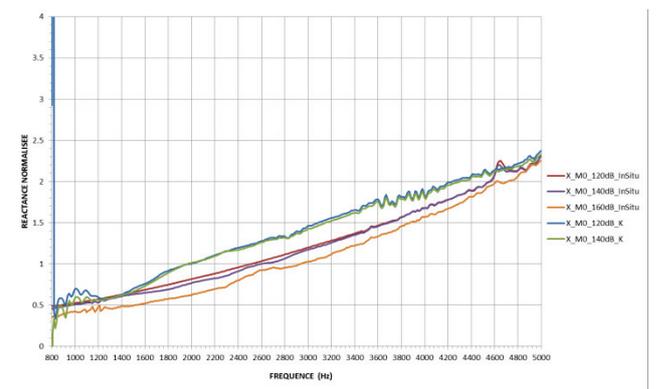


Figure 14 Réactances - Mach0 – Méthodes K + InSitu

Les figures suivantes illustrent les résultats récemment obtenus en mettant en œuvre une procédure d'asservissement en niveau et en concevant une terminaison anéchoïque dédiée. La Figure 15 présente les impédances normalisées mesurées jusqu'à 6400 Hz en utilisant les signaux des deux microphones pour 4 niveaux d'excitation stabilisés (100 – 120 – 140 et 150 dB) et sans écoulement. On constate alors

des résultats nettement meilleurs avec la nouvelle procédure mise en œuvre. Ceux-ci se dégradent néanmoins en hautes fréquences et se révèlent être très certainement liés au champ acoustique perturbé à ces fréquences dans la cavité en raison de la traversée du microphone central. La Figure 16 présente les résultats obtenus en utilisant uniquement le microphone central qui est déplacé lors d'une deuxième mesure lorsque celui-ci est placé au fond de la cavité. Ces résultats semblent moins perturbés en hautes fréquences malgré une sensibilité certaine observée à bas niveau d'excitation.

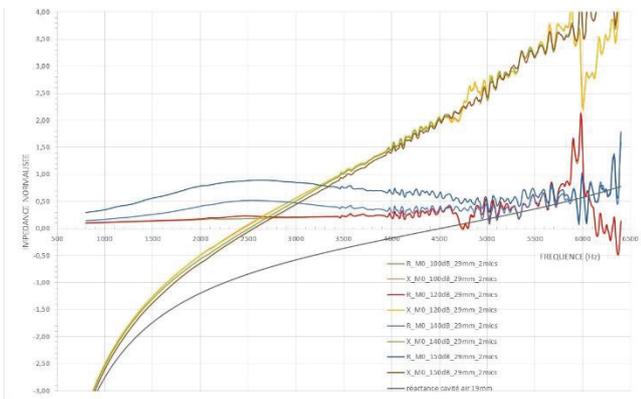


Figure 15 Impédances - Mach0 -InSitu
Traitement deux microphones

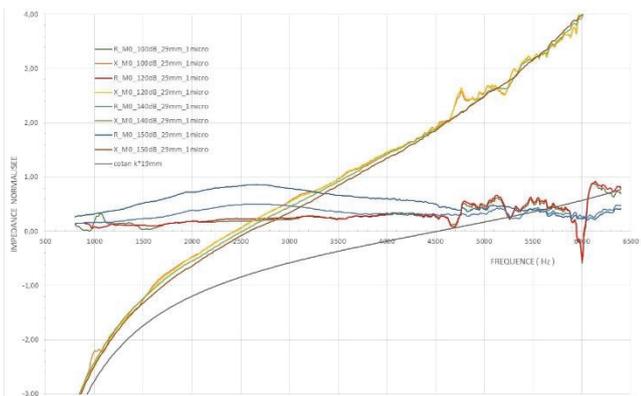


Figure 16 Impédances - Mach0 -InSitu
Microphone mobile

5 Conclusion

Ce papier traite de la mesure d'impédance de panneaux aéronautiques sous écoulement rasant. Une veine d'essai dédiée est conçue permettant d'atteindre des niveaux d'excitation acoustique et des débits d'écoulement importants proches de l'application visée. Une méthode innovante optimisée par le LAUM est présentée et mise en œuvre (méthode K). Les résultats obtenus par cette méthode sont très satisfaisants. Une méthode complémentaire à deux microphones permettant de caractériser les traitements au-delà de 5000hz est testée (méthode In Situ). Les premiers résultats obtenus n'ont pas donné pas entière satisfaction en raison de la forte sensibilité de cette méthode à la variation de niveau d'excitation acoustique lorsque le taux d'ondes stationnaires est important dans la zone de mesure. Pour traiter ce problème, une terminaison anéchoïque dédiée et un asservissement en niveau ont récemment été mis en œuvre. Les premiers résultats obtenus sont très encourageants et

permettent d'envisager d'étendre la mesure aux fréquences plus élevées.

Remerciements

Le CTTM remercie le LAUM pour le transfert de technologie effectué et les sociétés Snecma Moteurs et Aircelle pour le financement de ce projet.

Références

- [1] U. Ingard, Influence of fluid motion past a plane boundary on sound reflection, absorption and transmission, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **31**, 1035 (1959)
- [2] M. K. Myers, On the acoustic boundary condition in the presence of flow, *Journal of Sound and Vibration* **71**, 429-434 (1980).
- [3] W. Watson, M. Jones, and T. Parrott, Validation of an impedance education method in flow," *The American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal* **37**, 818-824 (1999).
- [4] Y. Aurégan, M. Leroux, and V. Pagneux, Measurement of liner impedance with flow by an inverse method, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Paper No. 2004-2838* (2004)
- [5] T. Elnady and H. Boden, An inverse analytical method for extracting liner impedance from pressure measurements *American Institute of Aeronautics and Astronautics Paper No. 2004-2836* (2004).
- [6] M. Taktak, J.-M. Ville, M. Haddar, G. Gabard, and F. Foucart, A 3D multiport scattering matrix based-method for educing wall impedance of cylindrical lined duct section: Simulation and error evaluation, *Advanced Applications in Acoustics, Noise and Vibration 928367* (2009).
- [7] W. Eversman and J. Gallman, Impedance eduction with an extended search Procedure, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Paper No. 2009-3235* (2009)
- [8] Y. Aurégan, R. Starobinski, and V. Pagneux, Influence of grazing flow and dissipation effects on the acoustic boundary conditions at a lined wall, *The Journal of the Acoustical Society of America* **109**, 59-64 (2001)
- [9] E. J. Brambley, Viscous boundary layer effects on the Myers impedance boundary condition," *American Institute of Aeronautics and Astronautics Paper No. 2009-3241* (2009)
- [10] Y. Renou et Y. Aurégan, Failure of the Ingard-Myers boundary condition for a lined duct: an experimental investigation, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **130**, 52-60, (2011)
- [11] P.D. Dean, An In-Situ Method of Wall Acoustic Impedance Measurement in Flow Duct, *Journal of Sound and Vibration*, No. 34 (1), 1974.
- [12] R.J. Gaeta, J.M. Mendoza, M.G. Jones, Implementation of In-Situ Impedance Techniques on a Full Scale Aero-Engine System, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Paper No. 2007-3441* (2007)