

Calibration in-situ d'une antenne de capteurs de pression acoustique en conduit

A. PEREIRA^{a,b}, Q. LECLÈRE^b, P. SOUCHOTTE^a, A. FINEZ^c

a. Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, École Centrale de Lyon, 36, avenue Guy de Collongue, 69134 Écully cedex - France, antonio.pereira@ec-lyon.fr

b. Laboratoire Vibrations Acoustique, INSA Lyon, 25 bis av. J. Capelle 69621 Villeurbanne cedex - France, quentin.leclere@insa-lyon.fr

c. MicrodB, 28 chemin du petit bois - 69134 Écully cedex - France

Mots clefs : calibration in-situ, décomposition modale, antenne de microphones en paroi, caractérisation de sources en conduit.

La compréhension des différents mécanismes de génération de bruit dans une turbomachine est de grand intérêt pour l'industrie aéronautique, le but principal étant la réduction des émissions sonores. Dans ce contexte, des mesures acoustiques ont été réalisées sur un banc d'essais de ventilateur représentatif d'une configuration de soufflante, situé à l'École Centrale de Lyon [1,4]. Une antenne avec 106 capteurs en paroi est utilisée pour mesurer la pression acoustique rayonnée en aval du ventilateur dans un conduit de diamètre 17 cm. Les microphones sont distribués aléatoirement sur une tranche de conduit de longueur 1m, de façon à maximiser la bande de fréquence d'application d'une méthode de décomposition modale [4].

Les capteurs sont installés par un système type "pinhole", comme le montre la Fig. 1(a), permettant une mesure ponctuelle de la pression acoustique. En outre, une cavité de petites dimensions est créée entre la membrane/grille du microphone et le support du micro. Une courbe de correction ou calibration est donc nécessaire afin de reproduire la pression sur la membrane du capteur comme si celle-ci avait été placée en affleurant à la surface interne du conduit. Une possibilité est de mesurer la réponse en fréquence "micro par micro" à l'aide du système d'étalonnage décrit dans [1] et montré sur la Fig.1(b). L'inconvénient de cette méthode est la nécessité de calibrer chaque micro individuellement, ce qui devient coûteux en temps pour les antennes à grand nombre de microphones et également l'impossibilité d'accéder à tous les micros une fois installés sur le banc d'essais.

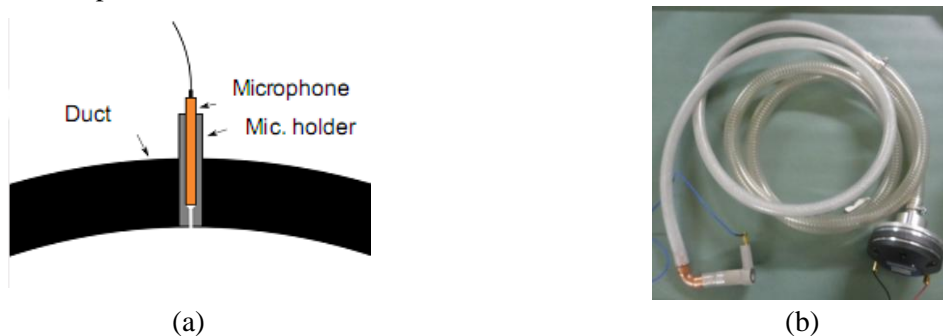


Fig. 1 - (a) système "pinhole" de positionnement du micro en paroi. (b) système de calibration "micro par micro". Un microphone de référence est placé à la sortie de l'étalonneur, alimenté en bruit blanc par une chambre de compression sur l'autre extrémité.

Dans cette contribution nous présentons une méthode alternative de calibration in-situ à partir de mesures acoustiques avec une source artificielle placée à l'intérieur du conduit. Contrairement à la méthode décrite dans le paragraphe précédent, pour laquelle les mesures sont réalisées micro par micro, pour celle-ci les mesures sont faites pour tous les micros en simultanée. Le principe de la méthode se base sur le fait que la pression acoustique à l'intérieur du conduit, à une distance suffisante de sources ou accidents géométriques, peut être écrite par une somme d'un nombre fini de modes [2,3] passants. La connaissance des paramètres géométriques du conduit, des paramètres physiques (célérité acoustique et la vitesse d'écoulement) ainsi que le positionnement des microphones, nous permet de calculer analytiquement une base modale à partir de laquelle nous obtenons un opérateur de projection. La pression acoustique mesurée peut être décomposée comme:

$$\mathbf{p} = \Phi \mathbf{a}, \quad (1)$$

où \mathbf{p} est un vecteur avec les pressions mesurées (en complexe pour une fréquence donnée), \mathbf{a} est un vecteur *inconnu* des coefficients modaux et Φ une matrice contenant les modes propres de propagation dans le conduit. Le vecteur des coefficients modaux peut être calculé selon l'expression suivante:

$$\tilde{\mathbf{a}} = \Phi^\dagger \mathbf{p}, \quad (2)$$

où le symbole \dagger indique la pseudo inverse d'une matrice. En remplaçant l'équation (2) sur l'équation (1) nous obtenons un vecteur de pression *reconstruite* donné par:

$$\mathbf{p}_s = \Phi \Phi^\dagger \mathbf{p} = \Psi \mathbf{p}, \quad (3)$$

où $\Psi = \Phi \Phi^\dagger$ est défini comme l'opérateur de projection et l'indice \cdot_s signifie "signal", dans le sens où \mathbf{p}_s est interprétée ici comme une version débruitée de la pression acoustique mesurée. Nous pouvons donc calculer l'erreur de projection suivante:

$$\mathbf{p}_b = \mathbf{p}_s - \mathbf{p}, \quad (4)$$

où \mathbf{p}_b désigne la partie "bruit" de la pression mesurée. L'indicateur précédant est la base de la méthode de calibration proposée. En effet, la pression acoustique projetée (\mathbf{p}_s) est une version débruitée de la pression acoustique mesurée et on considère que l'erreur de projection (\mathbf{p}_b) est dominée par les erreurs de calibration. Nous pouvons ensuite définir un rapport signal sur bruit donné par:

$$\text{RSB} = 20 \log_{10} \left(\frac{\|\mathbf{p}_s\|}{\|\mathbf{p}_b\|} \right). \quad (5)$$

Ce rapport peut être vu comme un indicateur de l'adéquation entre la mesure et la base modale. Il s'avère très utile pour l'estimation des paramètres physiques *a posteriori*, par exemple la célérité acoustique ou la vitesse d'écoulement. Cette estimation est en effet une étape préliminaire de la méthode de calibration, dans le but de trouver la base modale optimale utilisée pour calculer l'opérateur de projection défini par l'équation (3). A titre d'exemple nous présentons sur la Fig. 2(a) l'indicateur RSB en fonction de la célérité acoustique (c) pour une configuration sans écoulement (avec le ventilateur à l'arrêt), d'où nous obtenons la valeur optimale de c . En pratique, avec le ventilateur en marche, l'expression de la base modale dépend non seulement de la célérité acoustique mais aussi de la vitesse de convection. Dans ce cas, une recherche en 2D est faite afin d'estimer à la fois la célérité et la vitesse d'écoulement, voir Fig. 2(b).

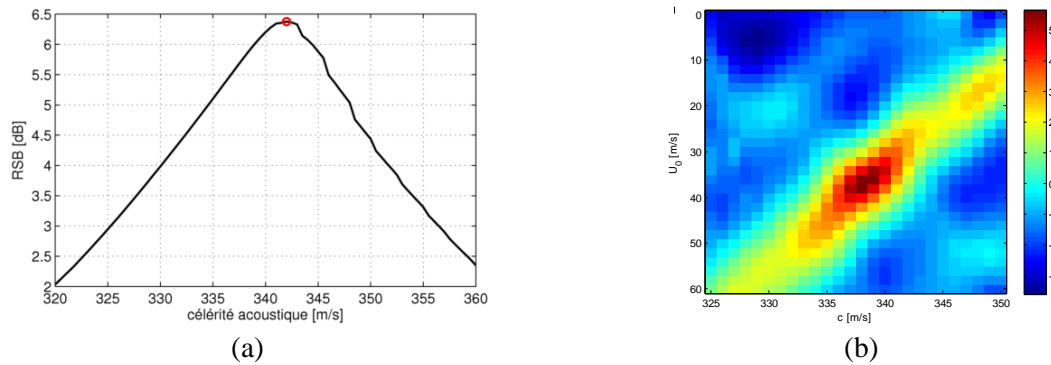


Fig. 2. (a) Estimation de la célérité acoustique par maximisation du critère RSB. (b) Estimation 2D de la vitesse de l'écoulement et de la célérité acoustique par maximisation du rapport signal sur bruit (RSB) sur l'équation (5).

Pour l'estimation des coefficients de réflexion du banc d'essais, nous modifions la base modale afin d'introduire également les modes retour, l'équation (1) devient:

$$\mathbf{p} = [\Phi_a \quad \Phi_r] \begin{Bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{b} \end{Bmatrix}, \quad (6)$$

d'où nous pouvons obtenir les coefficients modaux des modes aller et modes retour, et donc obtenir le coefficient de réflexion pour le n -ième mode par:

$$r_n = a_n/b_n. \quad (7)$$

En pratique, la source acoustique, voir Fig. 3(b), est positionnée à différentes positions radiales, axiales et azimutales et une estimation par moindres carrés est faite sur les N positions de source. Une identification modale avec les coefficients de réflexion imposés est faite à partir de:

$$\mathbf{p} = \Phi_a \mathbf{a} + \Phi_r \text{diag}(\mathbf{r}) \mathbf{a} = \Phi_{ar} \mathbf{a}, \quad (8)$$

et $\Phi_{ar} = [\Phi_a + \Phi_r \text{diag}(\mathbf{r})]$ étant la base modale comprenant les modes aller et retour. Ceci permet de diviser par deux le nombre d'inconnues du système et donc améliorer le conditionnement de la matrice à inverser pour le calcul de l'opérateur de projection Ψ (cf. Eq. (3)).

Afin d'obtenir les fonctions de calibration, une estimation par moindres carrés est faite pour chaque microphone sur les N positions de source. Pendant la campagne de mesures, 11 capteurs parmi les 106 ont été étalonnés par la méthode spécifique ("micro par micro") et on donc servi pour la validation de la méthode de calibration globale. Sur la Fig. 4 nous avons l'erreur entre les courbes de calibration obtenues par les deux méthodes. Les résultats montrent un bon accord entre les deux méthodes pour une large bande de fréquences, permettant de valider ainsi la méthode de calibration globale proposée.

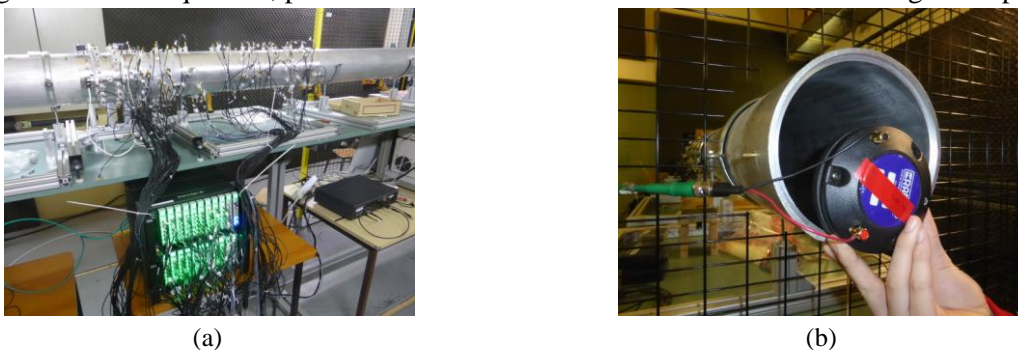


Fig. 3 – Protocole expérimental. (a) Antenne de microphones et système d'acquisition. (b) Positionnement de la source acoustique artificielle à l'extrémité du conduit, à une distance d'environ 3 m du premier capteur de l'antenne.

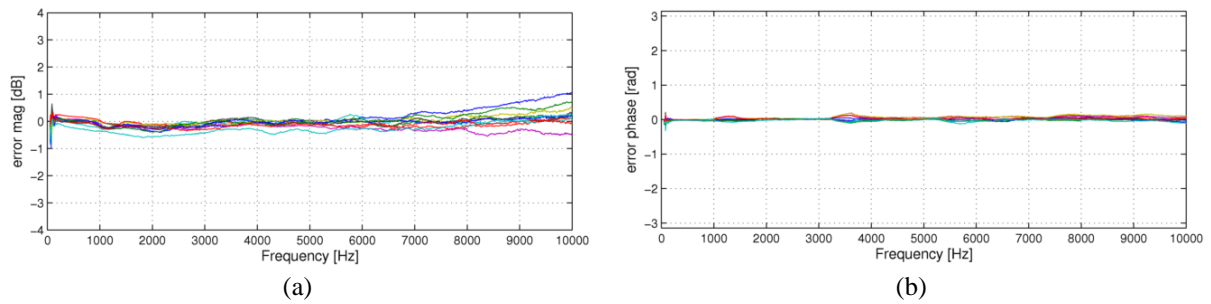


Fig. 4. Erreur entre les courbes de correction obtenues par la méthode spécifique (micro par micro) et la méthode globale pour 11 des 106 microphones. (a) Magnitude en dB et (b) phase en radians.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet SEMAFOR, financé par la FRAE (Fondation de Recherche pour l'Aéronautique et l'Espace), et du labcom P3A (ANR-13-LAB2-0011-01), au sein du Labex CeLyA de l'Université de Lyon (ANR-10-LABX-0060/ ANR-11-IDEX-0007) .

Références

- [1] A. Finez, R. Leneveu, C. Picard, and P. Souchotte. In-Duct Acoustic Source Detection Using Acoustic Imaging Techniques, in AIAA, Berlin, 2013-2254, 2013.
- [2] E.J. Kerschen, J.P. Johnston, A modal separation measurement technique for broadband noise propagating inside circular ducts, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 76, Issue 4, pp. 499-515, 1981.
- [3] M. Åbom, Modal decomposition in ducts based on transfer function measurements between microphone pairs, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 135, Issue 1, pp. 95-114, 1989.
- [4] A. Finez, A. Pereira, Q. Leclère. Broadband noise decomposition of ducted fan noise using spectral-matrix denoising. *Proceedings of FAN 2015, Lyon, France*.