

CFA/VISHNO 2016

**Conception et validation expérimentale d'une antenne
d'accéléromètre pour la localisation de source en
écoulement**

E. Cheron^a, Q. Leclere^a, A. Pereira^b, C. Picard^c et P. Souchotte^b

^aLabCom P3A, Bâtiment St. Exupéry 25 bis av. Jean Capelle, 69621 Villeurbanne,
France

^bLaboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, 36, Avenue Guy de Collongue,
69143 Ecully, France

^cMicro DB, 7B, allée Claude Debussy, Espace Européen, 69130 Ecully, France
elie.cheron.etu@univ-lemans.fr



LE MANS

La caractérisation expérimentale d'un champ de pression pariétale dans un écoulement turbulent nécessite généralement une instrumentation lourde, typiquement constituée d'antennes de microphones affleurants. La complexité spatiale du champ se traduit par un spectre en nombres d'ondes très large, nécessitant une densité de capteurs importante. Une estimation correcte des bas nombres d'ondes, ou part acoustique du champ, nécessite également une forte densité de capteurs pour limiter les effets de repliement. De manière alternative, la part acoustique du champ peut être reconstruite à partir de mesures vibratoires : la structure se comporte alors comme un filtre anti-repliement dans le domaine des nombres d'ondes, et permet d'obtenir un meilleur rapport signal à bruit et de relâcher les contraintes d'échantillonnage spatial. La séparation et l'extraction de la composante acoustique habituellement noyée dans la composante hydrodynamique peuvent ainsi être effectuées et offrent la possibilité d'utiliser directement le champ reconstruit pour, par exemple, faire de la localisation de source. Une mise en œuvre expérimentale d'un système quasi-1D placé dans une veine d'essai est proposée afin de montrer la sensibilité de la méthode aux excitations acoustiques de faibles amplitudes et de mettre en évidence les effets de filtrage spatial du système sur l'excitation turbulente.

1 Introduction

La pression dynamique en champ proche d'une paroi dans un écoulement d'air peut être séparée en deux parties : une première composante, appelée hydrodynamique ou aéroacoustique, résulte des tourbillons générés par la perturbation de l'écoulement par la paroi. Une seconde composante, appelée acoustique, résulte de la propagation d'ondes qui sont générées par les fluctuations de pression en paroi, mais aussi potentiellement d'ondes acoustiques incidentes provenant d'un champ plus lointain.

Les principales motivations sont la réduction de bruit dans les habitacles, la diminution de la fatigue des structures ou encore l'identification des sources de bruit.

La structure étudiée fait alors office d'antenne et l'extraction de la partie acoustique du champ pariétal peut être utilisée à des fins d'imagerie au moyen de méthodes de localisation connues comme la formation de voie [1].

Plusieurs solutions sont envisageables pour effectuer les mesures. L'une d'entre elles est de mesurer le champ de pression pariétale avec une antenne de microphones affleurants ou déportés, avec deux difficultés importantes. D'une part, la structure spatiale du champ hydrodynamique requiert un échantillonnage spatial très important donc une lourde instrumentation [2] et/ou plusieurs hypothèses sur l'homogénéité spatiale des propriétés statistiques du champ [3]. D'autre part, la composante hydrodynamique est généralement bien plus énergétique que la part acoustique, ce qui rend le rapport signal sur bruit de la séparation particulièrement défavorable.

Une alternative est de déterminer la pression pariétale en utilisant des microphones affleurants (typiquement B&K 4948), moyennant la pression pariétale sur une surface relativement grande par rapport aux microphones standards, ou des microphones protégés de l'écoulement par une membrane mince [4].

La seconde alternative est de déterminer la pression pariétale en estimant par méthode inverse la force appliquée par mesure vibratoire [5]. Cette approche apporte une solution aux deux difficultés mentionnées précédemment : la paroi agit comme un filtre passe bas spatial, qui va fortement améliorer le rapport signal sur bruit et relâcher les contraintes d'échantillonnage en espace.

Cet article propose dans un premier temps une méthode de détermination des densités interspectrales de pression pariétale à partir de la mesure des densités interspectrales de déplacement d'une poutre soumise à un écoulement basée sur les méthodes de résolution inverse existantes qui ont

été sujettes récemment à plusieurs études numériques [6] et expérimentales [7]. Celles-ci ont permis de mettre en évidence la possibilité d'identifier les bas nombres d'ondes sur des plaques 2D dans des écoulements turbulents.

L'élaboration d'un dispositif expérimental constitué d'une antenne de 10 accéléromètres placés en soufflerie et les résultats sont ensuite présentés et discutés.

2 Méthode

Les méthodes de Résolution Inverse (RI) consistent à retrouver la distribution de force $p(x, \omega)$ appliquée sur une poutre à partir de l'estimation expérimentale de l'équation de propagation des ondes de flexion :

$$EI\nabla^4 w(x, \omega) - \rho S \omega^2 w(x, \omega) = p(x, \omega), \quad (1)$$

avec E le module d'Young de la poutre, I le moment quadratique, ρ la masse volumique, S sa section, $w(x, \omega)$ le déplacement et ω la pulsation.

En comparaisons avec une instrumentation à l'aide de microphones affleurants, cette méthode bénéficie d'une instrumentation moins lourde, puisque l'estimation de la force appliquée en un point peut être retrouvée à partir d'une mesure de 5 champs de déplacement suivant un schéma représenté en 1D par la figure 1. Cet avantage est d'autant plus marqué que la présence d'écoulement implique une forte décorrélation spatiale qui impose des mesures synchrones des champs de déplacements et ne permet pas la mise en place de mesures pas à pas avec une seule référence.

Le second avantage est que la plaque agit naturellement comme un filtre passe-bas autour du nombre d'onde de flexion k_f permettant d'éviter le repliement spatial dû à l'excitation turbulente localisée dans les hauts nombres d'ondes. La figure 2 illustre l'intérêt de la correction de la méthode inverse (RIC) puisqu'elle permet de limiter l'effet d'amplification du filtre RI au voisinage du nombre d'onde de flexion afin de minimiser l'erreur d'estimation de l'amplitude acoustique [8].

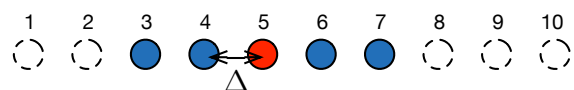


FIGURE 1 – Schéma RI pour une poutre comprenant 10 points de mesures.

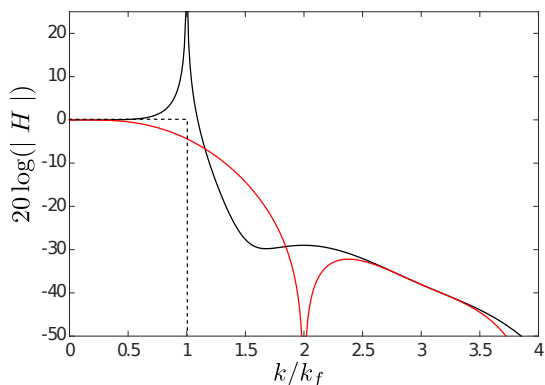


FIGURE 2 – Filtre par la méthode RI (noir) et par la méthode corrigée RIC (rouge) tout deux tracés pour $\Delta = \frac{2\pi}{3k}$. Le filtre idéal est représenté par la courbe pointillée : il coupe avec une pente infinie en $k = k_f$.

L'expression de l'équation aux différences finies corrigées peut-être formulée pour une fréquence à partir d'une matrice globale de taille $(N \times N)$ contenant toutes densités inter-spectrales de déplacement moyennés $S_{ww}(x_n, x_n)$, avec N le nombre de points de mesures.

$$S_{ww} = \begin{bmatrix} S_{ww}(x_1, x_1) & \cdots & S_{ww}(x_1, x_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{ww}(x_N, x_1) & \cdots & S_{ww}(x_N, x_N) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

La reconstruction de la matrice de densités inter-spectrales de pression est ensuite exprimée pour une fréquence donnée par :

$$D_{pp}^{FAT} = \Psi S_{ww} \Psi^t. \quad (3)$$

Elle est de taille $(N - 4 \times N - 4)$ où Ψ et Ψ^t représentent respectivement l'opérateur CFAT et son transposé. Elle se décompose en deux sous matrice :

$$\Psi = \mu^4 \frac{EI}{\Delta^4} \Psi_k - \rho h \Psi_m \quad (4)$$

avec Ψ_k l'opérateur de raideur et Ψ_m l'opérateur de masse issus de l'estimation des dérivées quatrième de l'équation 1 aux différences finies :

$$\Psi_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ -4 & 1 & \cdots & 0 \\ 6 & -4 & \ddots & \vdots \\ -4 & 6 & \ddots & 1 \\ 1 & -4 & \ddots & -4 \\ 0 & 1 & \ddots & 6 \\ \vdots & \vdots & \ddots & -4 \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}, \Psi_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 1 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

avec μ le terme correctif lié à la méthode RIC :

$$\mu^4 = \frac{k_f^4}{4[1 - \cos(k_f \Delta)]^2}. \quad (6)$$

3 Expérience

La figure 3 montre le dispositif constitué de 10 accéléromètres IMI - TO-5 espacés respectivement de 2cm, fixés et connectés grâce à un circuit imprimé sur une plaque d'Epoxy (FR14) 0.29m x 0.02m d'épaisseur 1.5mm.

Un microphone affleurant mesurant la pression $p^{mic}(x_m)$ en paroi est placé au niveau d'un accéléromètre dans le but d'être comparé avec la pression pariétale reconstruite $p^{RIC}(x_m)$. Considérant l'évolution du filtre en fonction de l'espacement des points de mesures et en évitant le repliement spatial, la bande fréquentielle d'étude dépend des propriétés du matériau et de Δ . Deux pas spatiaux sont envisageables pour estimer la pression au centre du capteur [9] : $\Delta = 0.02m$ ou $\Delta = 0.04m$ correspondant à deux bandes fréquentielles d'étude : [400Hz - 1600Hz] - [750Hz - 3000Hz].

Ce capteur est ensuite bafflé et positionné affleurant à la buse. La difficulté du montage est de garder les bords de la poutre libres et sans contact tout en minimisant les éventuelles discontinuités afin d'éviter la génération de turbulences importantes.

La buse convergente de section rectangulaire utilisée permet d'atteindre des vitesses d'écoulement variables jusqu'à 32m/s (figure 4 et 5). Une source acoustique excitée par un bruit large bande est placée au dessus du dispositif à une distance de 42cm, formant un angle de -0.35 radians par rapport au centre du capteur.

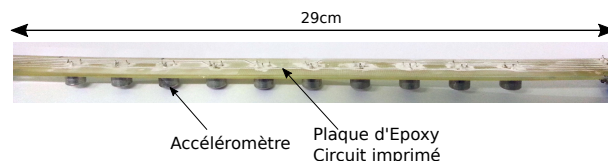


FIGURE 3 – Photo de l'antenne accélérométrique utilisée

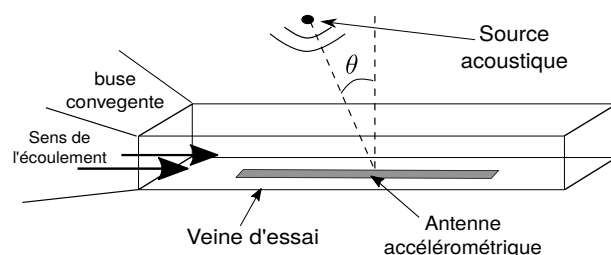


FIGURE 4 – Schéma du montage expérimental

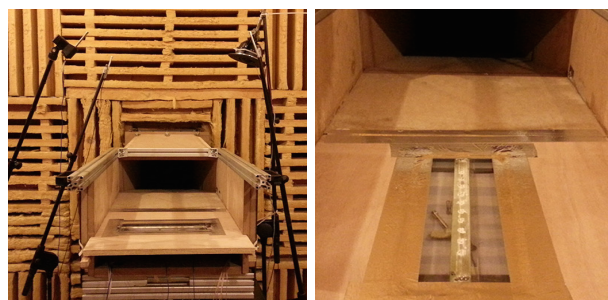


FIGURE 5 – Vue d'ensemble du banc de mesure (gauche). Montage de l'antenne accélérométrique (droite)

4 Résultats

Les quelques résultats présentés par les figures 6 et 7 montrent que sans écoulement, la pression identifiée par le capteur est en accord avec la pression mesurée par le microphone affleurant pour toute la gamme de fréquence associée. Notons que l'augmentation du pas entre deux points de mesures permet d'affiner l'estimation de la part acoustique en basse fréquence mais subit les effets de repliements à partir de 1700Hz. Ce qui montre que la méthode RIC, basée sur des mesures vibratoires et appliquée sur ce dispositif permet de remonter à la pression pariétale réelle sans écoulement.

Avec écoulement, la pression mesurée par le microphone en paroi est très largement dominée par contribution aero-acoustique d'environ 10 à 15 dB au dessus de la contribution acoustique sur toute la bande fréquentielle. La pression reconstruite correspond quant à elle à la pression mesurée par le microphone sans écoulement. L'expérience semble donc montrer la capacité de la méthode corrigée à filtrer spatialement la contribution aérodynamique en parois et à identifier correctement la part acoustique du champ de pression pariétal.

Ce résultat important permet d'utiliser ce champ identifié comme donnée d'entrée pour la formation de voie classique et la localisation de source. Le résultat présenté sur la figure 8 montre un pic de localisation autour de -0.35 radians correspondant à la position de la source acoustique ajoutée. Cette source est donc correctement localisée pour différentes vitesses d'écoulement et ce pour un faible nombre de points d'estimation. Il est important de noter que l'absence de prise en compte des effets de convection dans l'algorithme se traduit par un léger décalage du maximum de localisation lors de l'ajout d'écoulement.

Malgré une antenne courte (10 accéléromètres pour 6 points estimés), la localisation de sources acoustiques en écoulement en utilisant directement le champ de déplacement d'une poutre est possible. L'expérience montre qu'il est par conséquent réaliste d'imaginer des dispositifs plus conséquents adaptés aux parois permettant d'affiner la localisation en écoulement et de l'étendre à des système 2D.

5 Conclusion

La méthode RIC (Résolution Inverse Corrigée) est une méthode d'identification des efforts appliquées à une structure apportant une solutions aux problématiques liées à l'estimation de la part acoustique de la pression pariétale en écoulement. L'élaboration d'une méthode adaptée aux estimations des densités inter-spectrales de pression à partir de mesures vibratoires est proposée et un dispositif expérimental constitué d'une antenne de 10 accéléromètres est présenté. Les résultats montrent une très bonne concordance entre le champ identifié expérimentalement et le champ de pression mesuré par microphone en paroi dans le cas sans écoulement. L'ajout d'écoulement montre un écart de 10 à 15dB sur toute la bande fréquentielle pour l'estimation avec microphone mais l'estimation du champ acoustique par mesure vibratoire reste inchangée. Cela montre que la RIC permet de filtrer spatialement la partie hydrodynamique de l'excitation et améliore le rapport signal à bruit.

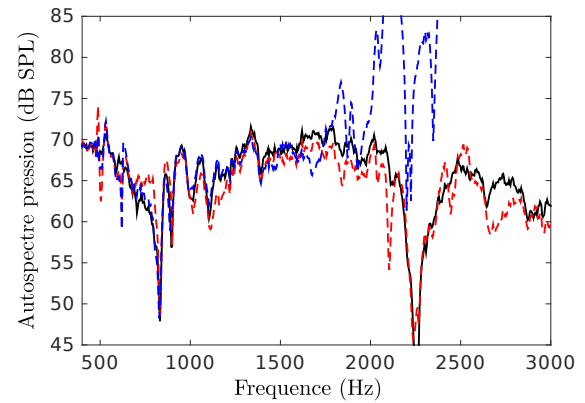


FIGURE 6 – Résultats expérimentaux : Autospectre de pression au centre du capteur estimé par le capteur avec un pas de 2 et 4 cm (rouge - bleu) et par le microphone affleurant (noir) sans écoulement

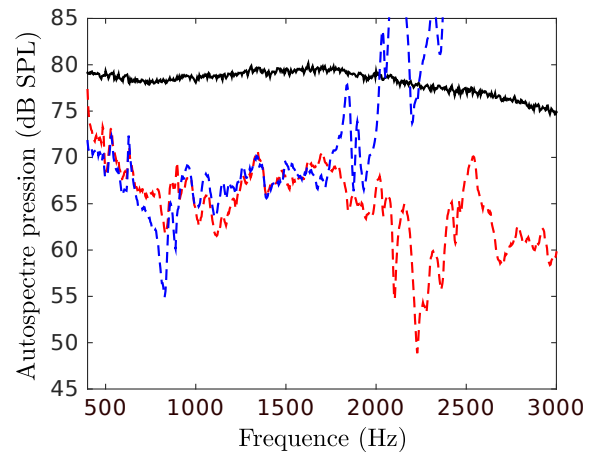


FIGURE 7 – Résultats expérimentaux : Autospectre de pression au centre du capteur estimé par le capteur avec un pas de 2 et 4 cm (rouge - bleu) et par le microphone affleurant (noir). La vitesse d'écoulement est de 22m/s.

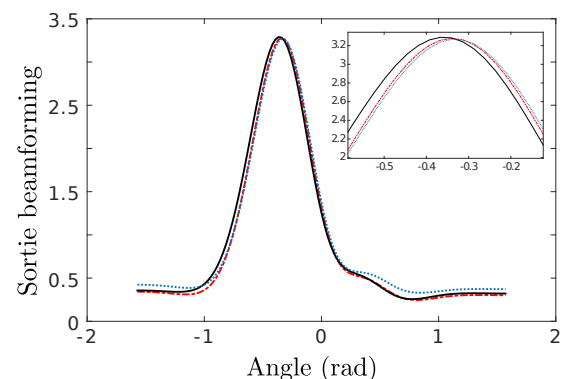


FIGURE 8 – Résultat du beamforming moyenné entre 1 et 3 kHz, pour une vitesse d'écoulement de 0m/s, 22m/s et 32m/s (noir-rouge-bleu). La source est placée à -0.35 rad.

Enfin, le champ identifié est utilisé pour la formation de voie et montre un pic de localisation correspondant à la source acoustique placée pour l'expérience. Malgré une antenne courte, ce résultat permet de conclure sur la faisabilité d'élaboration d'antennes conséquentes et adaptées à la localisation de sources en écoulement par mesures du champ de déplacement de paroi.

Références

- [1] Q. Leclère & C. Picard, Acoustic beamforming through a thin plate using vibration measurements. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **137**, 3385-3392 (2015).
- [2] B. Arguillat, D. Ricot, C. Bailly et G. Robert, Measured wavenumber : Frequency spectrum associated with acoustic and aerodynamic wall pressure fluctuations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **128**, 1647-1655 (2010).
- [3] C. Gabriel, S. Müller, F. Ullrich et R. Lerch, A new kind of sensor array for measuring spatial coherence of surface pressure on a car's side window *Journal of Sound and Vibration*, **333**, 901 - 915 (2014)
- [4] V. Fleury, L. Coste, R. Davy, A. Mignosi, J-M. Prosper et C. Cariou, Optimization of Microphone Array Wall-Mountings in Closed-Section Wind Tunnels, *16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, (2010)
- [5] F. Chevillotte, Q. Leclère, N. Totaro, C. Pézerat, P. Souchotte et G. Robert, Identification d'un champ de pression pariétale induit par un écoulement turbulent à partir de mesures vibratoires. *Actes du 10ième Congrès Français d'Acoustique*, Lyon, France, (2010).
- [6] D. Lecoq, C. Pézerat, J.-H. Thomas et W. Bi, Extraction of the acoustic component of a turbulent flow exciting a plate by inverting the vibration problem *Journal of Sound and Vibration*, **333**, 2505 - 2519, (2014)
- [7] D. Lecoq, C. Pezerat et J.-H. Thomas, Mesure des bas nombres d'onde dans un champ de pressions parietales turbulentes par une methode inverse basee sur l'acquisition en 13 points des vibrations induites par l'écoulement, *Actes du 12ième Congrès Français d'Acoustique*, Poitier, France, (2014).
- [8] Q. Leclère et C. Pézerat, Vibration source identification using corrected finite difference schemes. *Journal of Sound and Vibration*, **331**, 1366-1377, (2012).
- [9] Q. Leclère, F.Ablitzer et C. Pezerat, Identification of loads of thin structures with the corrected Force Analysis technique : An alternative to spatial filtering regularization, *ISMA*, (2014).