

Identification d'un champ de pression pariétale induit par un écoulement turbulent à partir de mesures vibratoires

Fabien Chevillotte¹, Quentin Leclerc¹, Nicolas Totaro¹, Charles Pezarat², Pascal Souchotte³, Gilles Robert³

¹Laboratoire Vibrations Acoustique, Bâtiment St. Exupéry, Insa Lyon, 25 Bis, Avenue Jean Capelle F-69621 Villeurbanne Cedex.

²Laboratoire d'acoustique de l'université du Maine, Université du Maine, CNRS, avenue Olivier Messiaen 72085 Le Mans Cedex 9

³Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, 36 Av Guy De Collongue 69134 Ecully Cedex

quentin.leclerc@insa-lyon.fr

La mesure directe du champ de pression pariétale généré par une couche limite turbulente (CLT) sur une structure requiert l'utilisation de microphones affleurants ou déportés, nécessitant une paroi instrumentée spécifique. Une estimation indirecte de ce type d'excitation pourrait permettre de s'affranchir de l'instrumentation de la paroi. La méthode RIFF (pour Résolution Inverse Filtrée Fenêtrée) est une méthode de mesure permettant d'estimer la pression appliquée localement à une structure de type plaque à partir de mesures de sa réponse vibratoire. Cette méthode est basée sur une approximation par différences finies de l'équation du mouvement et nécessite uniquement la mesure en 13 points rapprochés de la réponse de la structure pour obtenir la pression en 1 point central. Une mise en oeuvre expérimentale dans un tunnel aérodynamique a été réalisée pour évaluer l'applicabilité de la méthode RIFF aux structures sollicitées par une CLT. La pression pariétale générée à l'arrière d'un obstacle situé dans le flux a été mesurée directement par une antenne de microphones et indirectement par RIFF à l'aide d'une antenne de 13 capteurs de vitesse acoustique positionnés très proches de la plaque vibrante à l'extérieur du tunnel. Les résultats obtenus mettent en évidence un effet de filtrage spatial de la méthode RIFF où la question de la possibilité d'identifier la part acoustique du champ exciteur est discutée.

1. Introduction

Pour identifier un champ de pression pariétale généré par un écoulement turbulent dû à la couche limite [1] ou à la présence d'un obstacle dans l'écoulement, plusieurs approches sont possibles :

- soit une mesure directe du champ de pression sur une paroi rigide instrumentée qui nécessite un grand nombre de capteurs (microphones affleurant ou pin-holes)
- soit une identification expérimentale de paramètres tels que les longueurs de corrélation qui sont les données d'entrées de modèles (Corcos, Efimtsov, Chase) [2,3].

Le présent article propose une méthode d'identification indirecte du champ de pression réel agissant sur des structures vibrantes telles que des plaques. La méthode utilisée, appelée RIFF (Résolution Inverse Filtrée Fenêtrée) [4-6], utilise l'équation de mouvement d'une plaque pour identifier le champ de pression exciteur appliqué.

Cette méthode a été appliquée dans le cas d'un champ de pression pariétal généré dans le sillage d'un cube sur la surface d'une plaque vibrante. Les résultats obtenus sont présentés et discutés.

2. Méthodes

2.1. Microphones sous « pin-hole »

Les pressions pariétales sont mesurées avec une antenne de 45 microphones montés sous « pin-hole », c.à.d. en aval d'orifices submillimétriques (cf. Figure 1). Ce montage nécessite une fonction de correction dépendante de la fréquence pour chaque capteur. Chaque cartographie comporte 405 points (soit 9 positions d'antenne). Cette

technique a l'avantage d'être plus facile à mettre en oeuvre que des microphones affleurant.

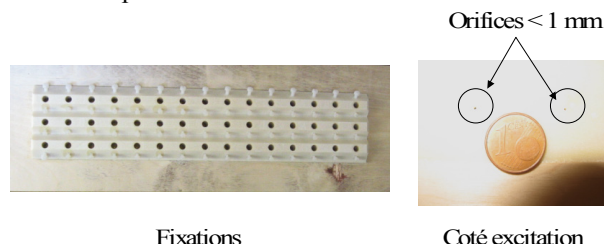


Figure 1 : Antenne de microphones sous « pin-hole »

2.2. Méthode RI (Résolution Inverse)

2.2.1. Principe

La méthode RI utilise un schéma aux différences finies. Connaissant le déplacement et sa dérivée quatrième, on peut écrire l'équation de mouvement localement et déterminer la pression excitatrice. Cette équation de mouvement peut aussi s'écrire en termes de vitesse v :

$$\frac{D}{j\omega} \left(\frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 v}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 v}{\partial x^2 \partial y^2} \right) + j\omega \rho h v = p, \quad (1)$$

avec D la rigidité de la plaque, ρ sa masse volumique, p la pression incidente, ω la pulsation et h son épaisseur.

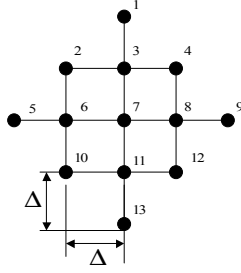


Figure 2: Schéma aux différences finies RI

Le schéma aux différences finies nécessite 13 points pour écrire la dérivée quatrième en 2D. Ce schéma est généralement extrait d'une grille de vitesses mesurées avec un vibromètre laser. Les données ne sont donc pas synchrones et une (ou plusieurs) référence(s) globale(s) permet(tent) d'extraire les 13 points nécessaires. Cette méthode (RI) fonctionne à condition d'avoir au minimum une référence par source corrélée. Malheureusement, les turbulences génèrent une excitation fortement décorrélée spatialement. Il faudrait une infinité de références à moins d'acquérir les données de manière synchrone. Cette deuxième solution a été choisie (RIs). Pour cela, des capteurs Microflown capables de mesurer la vitesse acoustique [7] ont été utilisés. Cette technique a déjà été testée avec une excitation par champ diffus [8]. L'antenne et ses sondes sont illustrées sur la Figure 3. Cette méthode synchrone sera appelée Ris (Résolution Inverse synchrone).

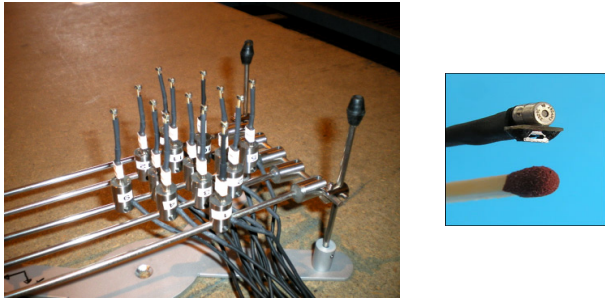


Figure 3: Antenne microflown (gauche) et sonde PU-Match (droite)

2.2.2. Limites

Les méthodes RI et RIs ont une gamme fréquentielle de validité dépendante des caractéristiques locales de la plaque et de l'écartement des sondes (Δ). Les travaux précédents [8] ont permis de constater que la fréquence minimum est donnée par la taille de l'antenne et cette fréquence peut être définie empiriquement. Il est nécessaire d'avoir au minimum une longueur d'onde de flexion sur l'antenne :

$$f_{\min i} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{\mu}{D}} (4\Delta)^2}, \quad (2)$$

avec μ la masse surfacique de la plaque.

La fréquence maximum est donnée par le critère de Shannon $\left(k \leq \frac{\pi}{\Delta}\right)$ avec k nombre d'onde de flexion naturel de la plaque:

$$f_{\max i} = \frac{\pi}{2\sqrt{\frac{\mu}{D}} \Delta^2}. \quad (3)$$

2.2.3. Applications

La méthode RIFF est utilisée depuis 1996 avec différentes excitations (acoustique, solide, ...) sur des poutres et des plaques [4-6]. Le champ vibratoire est généralement mesuré avec des accéléromètres ou avec un vibromètre laser. Une mesure de champ diffus excitant une plaque a déjà été réalisée avec une antenne de microflowns [8].

3. Expérience

Une veine de $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ de section est placée en sortie de la soufflerie anéchoïque subsonique KCA de l'ECL. Dans ces conditions, la vitesse d'écoulement maximale au voisinage de l'obstacle est de l'ordre de 60m/s. Cette veine, composée de 3 blocs de 2 m, est découplée de la soufflerie avec un soufflet. Une plaque vibrante d'épaisseur 0.8 mm, permettant d'utiliser les méthodes RI et RIs, est placée en bas du premier bloc. Un écran acoustique permet de limiter le bruit de bouche. Un robot 2 axes est placé sous la plaque vibrante pour déplacer l'antenne de mesure. Un obstacle peut être placé en amont de la plaque à l'intérieur de la veine. L'obstacle est un parallélépipède de $10 \times 10 \times 6 \text{ cm}$ (6 cm étant la hauteur). L'obstacle est centré dans la veine mais la plaque présente un décentrage de 20 mm. La partie vibrante de la plaque délimite la zone d'analyse de $800 \times 480 \text{ mm}$.

Les figures suivantes illustrent le montage.

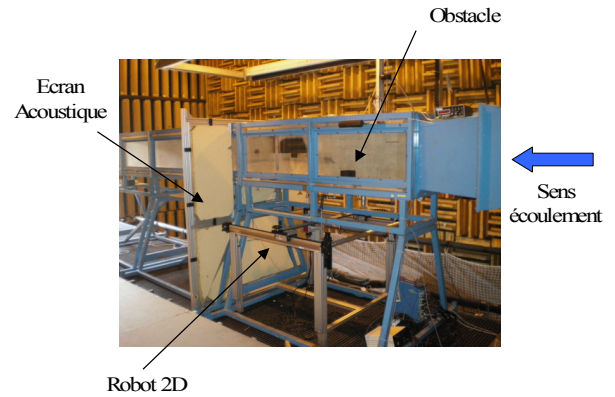


Figure 4 : Montage de la veine

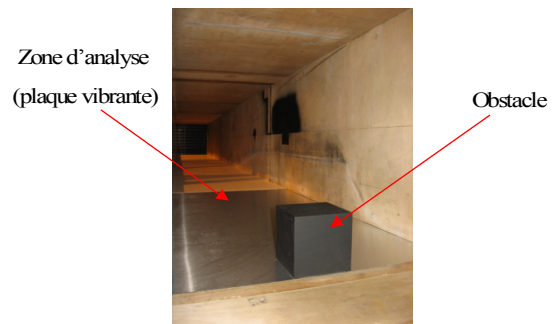


Figure 5 : Montage de l'obstacle et de la plaque

4. Résultats

4.1. Mesures de pressions pariétales

La Figure 6 présente les autospectres de pressions pariétales moyennés sur les 405 points pour trois vitesses d'écoulement (18,5, 25 et 30 m/s) avec et sans obstacle. On peut voir que l'obstacle a un effet significatif quelque soit la vitesse en basses fréquences (<1200 Hz). Les autospectres mesurés avec obstacle rejoignent ceux mesurés sans obstacle en hautes fréquences. La cartographie présentée sur la Figure 7 montre une décroissance significative du niveau de pression en aval de l'obstacle.

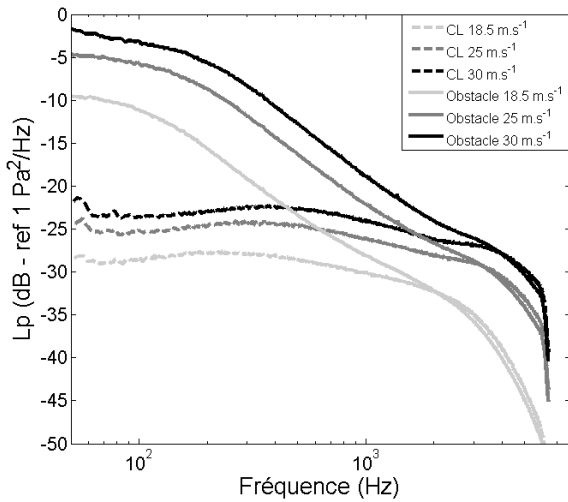


Figure 6 : Pression pariétale moyenne mesurée pour 3 vitesses d'écoulement (18.5, 25 et 30 m.s⁻¹) avec et sans obstacle.

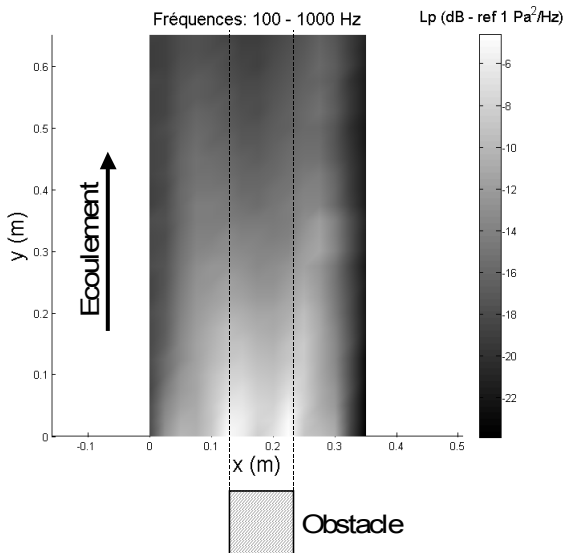


Figure 7 : Cartographie de pression pariétale moyennée de 100 à 1000 Hz avec obstacle (Ecoulement 25 m.s⁻¹).

4.2. Mesures RIs

La première lecture des résultats RIs avec obstacle présentés Figure 8 permet de voir des raies apparaître pour toutes les vitesses d'écoulement. On constate aussi une augmentation du niveau global des pressions RIs avec la vitesse d'écoulement.

L'émergence des raies est identique pour les 3 vitesses et avoisine les 10 dB. Il est important de noter que la fréquence de ces raies ne varie pas avec la vitesse d'écoulement. Il ne s'agit donc pas d'un phénomène aérodynamique. Il s'agit des modes transversaux de la veine. Les fréquences des premiers modes transversaux sont tracées sur la Figure 8. La Figure 9 montre une cartographie du module de pression RIs sur le mode 1080 Hz (mode (1,3) et (3,1)).

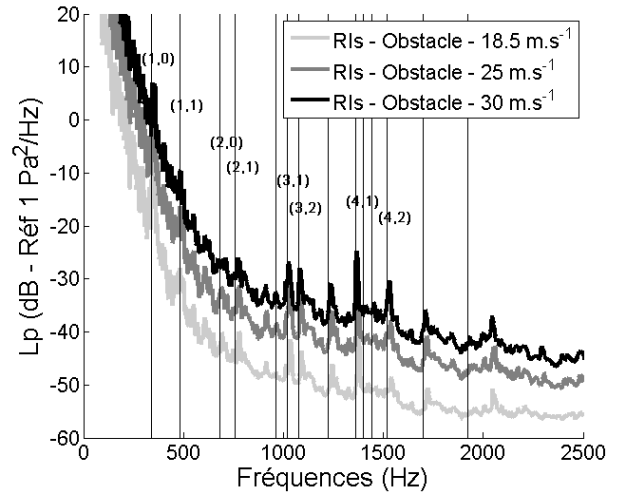


Figure 8 : Mesures de pression RIs avec obstacle pour 3 vitesses d'écoulements (18.5, 25 et 30 m.s.s-1).

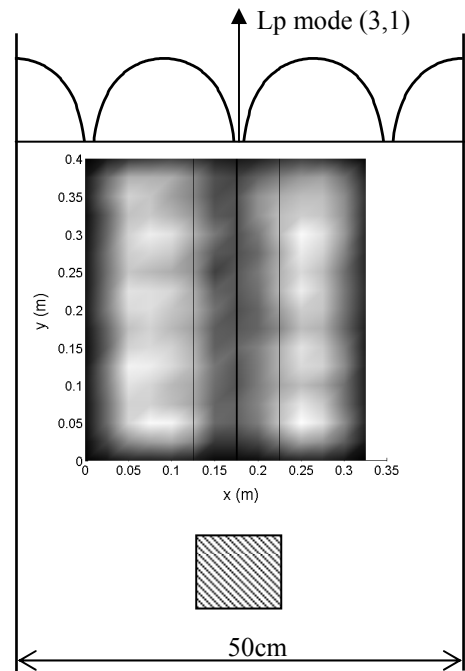


Figure 9 : Cartographie du module de pression RIs à 1080 Hz, géométrie du mode (3,1) (en haut)

4.3. Confrontation des résultats RIs aux pressions pariétales

Le premier résultat important est que la méthode RIs, se basant sur des mesures vibratoires, ne permet pas de remonter à la pression pariétale réelle. L'écart entre la

pression pariétale et le fond de spectre de la pression RIs est de l'ordre de 20 dB.

Pourtant, il est important de noter que la pression pariétale identifiée n'est pas aberrante :

- (i) les pics de résonances identifiés correspondent aux fréquences des modes acoustiques transversaux de la veine (Figure 8).
- (ii) Les cartographies de pressions pariétales identifiées à ces fréquences correspondent bien aux modes acoustiques de veine (Figure 9) et à ceux de la plaque.

Par contre, la méthode d'identification utilisée, censée être locale, n'est pas capable d'identifier des différences de 10 dB observées sur les cartographies de pressions pariétales mesurées directement sur la Figure 7.

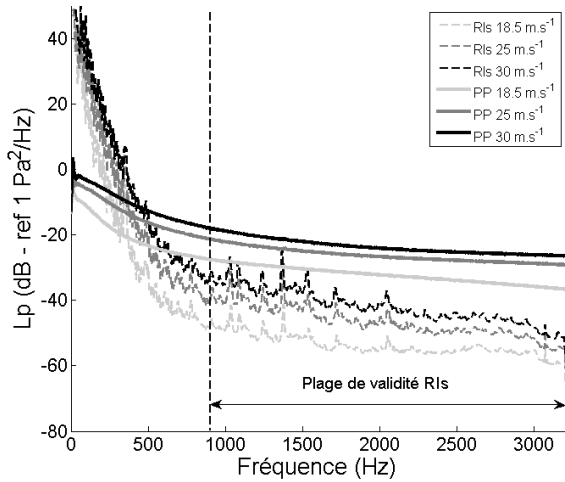


Figure 10 : Comparaison des pressions identifiées par la méthode RIs aux pressions pariétales mesurées avec (Ecoulements de 18.5, 25 et 30 m.s⁻¹).

5. Interprétation

L'expérience semble montrer l'incapacité de la méthode à identifier correctement le champ de pression pariétal, avec un écart conséquent d'environ 20dB. Pourtant, la méthode RI a largement été éprouvée expérimentalement et sa capacité à identifier des sources vibratoires [4] ou acoustiques [8] a été démontrée. La difficulté provient dans le cas présent de la nature du champ incident.

Une étude de l'opérateur RI dans le domaine des nombres d'ondes fait apparaître une erreur systématique générée par l'approximation en différences finies. Cette erreur, définie comme le rapport analytique entre effort identifié par RI ($\tilde{P}$) et effort incident (P) est exprimée par

$$E_{(k_x, k_y)} = \frac{\tilde{P}_{(k_x, k_y)}}{P_{(k_x, k_y)}} = \frac{\kappa_{\Delta}^4 - k_N^4}{k^4 - k_N^4}, \quad (4)$$

avec $k^4 = (k_x^2 + k_y^2)^2$

et $\kappa_{\Delta}^4 = 4 [(1 - \cos(k_x \Delta))^2 + (1 - \cos(k_y \Delta))^2 + 2(1 - \cos(k_x \Delta))(1 - \cos(k_y \Delta))] / \Delta^4$.

Une étude de l'erreur (4) dans le plan des nombres d'ondes fait apparaître un filtre passe bas atténuant les composantes supérieures à k_N . La méthode RI ne permet donc pas a priori d'identifier la totalité d'un champ incident, mais uniquement l'énergie contenue dans le cercle défini par $k < k_N$. On a tracé pour l'exemple en figure 11 la répartition énergétique d'une Couche Limite Turbulente (CLT) type Corcos, et son estimation RI à travers une plaque d'aluminium d'épaisseur 0.8mm et un pas RI de 22mm. Il est clair sur cette figure que la majeure partie de l'énergie de la CLT (dont le pic convectif sur cet exemple) n'est pas identifiable par RI.

L'erreur observée entre pression pariétale et pression identifiée par la méthode RI peut être calculée dans le cas de modèles simples de CLT, elle correspond au rapport énergétique entre les deux représentations dans le domaine des nombres d'ondes données en figure 11.

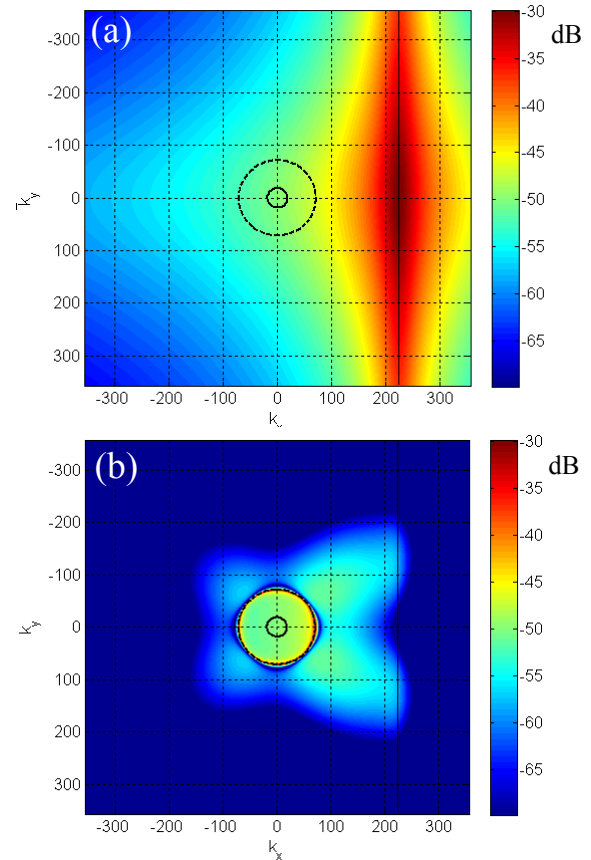


Figure 11 : (a) : énergie d'une CLT type Corcos ($U_{\infty}=40\text{m/s}$, $f=1\text{kHz}$) dans le domaine des nombres d'ondes.

(b) : identification RI (plaque aluminium ep 0.8mm, $\Delta=22\text{mm}$). Cercle trait plein : nombre d'onde acoustique. Cercle tirets : nombre d'onde naturel de la plaque. Trait plein vertical : nombre d'onde de convection.

Ce rapport est calculé en fonction de la fréquence pour deux vitesses d'écoulement (18 et 40m/s) pour lesquelles une mesure sans obstacle a été effectuée. Le modèle de couche limite utilisé est un modèle de Corcos. Les rapports issus de l'expérience et du calcul sont tracés sur la figure 12. Les données expérimentales et théoriques correspondent relativement bien, sachant que le champ incident n'est en réalité pas une CLT pure, comme on l'a vu précédemment (cf. § 4.2).

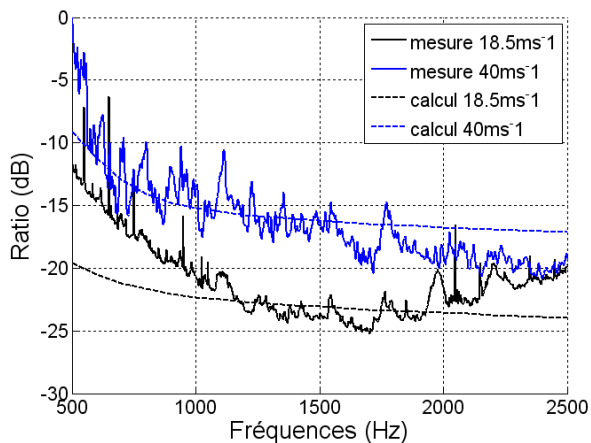


Figure 12 : rapports des pressions pariétales identifiées RI et incidentes, comparaison théorie – expérience. CLT sans obstacle, 18,5m/s et 40 m/s.

Il est flagrant à la fois sur les résultats théoriques et expérimentaux que l'identification RI sous estime moins (différence de 6-7dB) la pression pariétale à 40m/s qu'à 18,5 m/s. Cela s'explique par le fait que le nombre d'onde de convection est plus faible à 40m/s qu'à 18,5m/s, il se rapproche donc du nombre d'onde de la plaque, qui est également le nombre d'onde de coupure du filtre passe bas RI exprimé par l'équation (4).

6. Conclusion

La méthode RIFF (Résolution Inverse Filtrée Fenêtrée) est une méthode d'identification des efforts appliquées à une structure de type plaque qui a été utilisée avec succès dans le cas d'efforts ponctuels ou de champs diffus par exemple.

Dans la présente communication, cette méthode a été appliquée pour identifier un champ de pression généré par des écoulements turbulents. La particularité de ce champ de pression nécessite des mesures synchrones de la vitesse de la plaque en 13 points de mesure pour identifier 1 point d'effort. C'est pourquoi une antenne de capteur pression-vitesse a été utilisée.

Les résultats présentés montrent un écart important entre le champ moyen identifié et celui directement mesuré : un écart d'environ 20dB apparait entre les deux mesures et le champ identifié présente des pics non observables sur les mesures directes.

Ces écarts sont explicables par le filtrage des nombres d'ondes inhérent à la discrétisation de la dérivée quatrième du déplacement utilisée dans la méthode RIFF. Ainsi, la méthode n'est pas capable d'identifier le champ de pression pariétal réel.

Par contre, elle permet d'identifier la part du champ de pression qui traverse la plaque et qui est responsable du bruit rayonné.

Références

- [1] Blake W. K., "Mechanics of flow induced sound and vibration" Academic Press, (1986), 974p.
- [2] Durant C, Robert G., Filippi P. J. T., Mattei P.-O "Vibro-acoustic response of a thin cylindrical shell excited by a turbulent internal flow : comparison between numerical prediction and experimentation",

Journal of sound and vibration. 229 (5), 1115-1155 (2000).

- [3] Totaro N., Robert G., Guyader J.L. "Frequency averaged injected power under boundary layer excitation : an experimental validation", *Acta Acustica.* 94, 534-547 (2008).
- [4] Pézerat C. "Méthode d'identification des efforts appliqués sur une structure vibrante par résolution et régularisation du problème inverse.", *Thèse de doctorat – INSA Lyon* (1996).
- [5] Pézerat C and Guyader J.-L. "Two inverse methods for localization of external sources exciting a beam," *Acta Acustica*, 3:1–10, 1995.
- [6] Pézerat C and Guyader J.-L. "Force analysis technique: Reconstruction of force distribution on plates," *Acustica united with Acta Acustica*, 86:322–332, 2000.
- [7] De Bree H-E, Leussink P., Korthorst T., Jansen H., Lammerink T., and Elwenspoek M. "The microflow; a novel device measuring acoustical flows. Sensors and Actuators: A, Physical," *SNA054/1-3:552–557*, 1996.
- [8] Leclère, Q., Pézerat, C. "Time domain identification of loads on plate-like structure using an array of acoustic velocity sensors", *Conférence Acoustic'08*, Paris (2008).