

## **Localisation de source acoustique sur une marche montante par formation de voies fréquentielle et temporelle**

J. Fischer, V. Valeau, J. Laumonier et L.-E. Brizzi  
Pprime, Bât B17 - Campus Sud - 6, rue Marcel Doré, 86000 Poitiers, France  
[jeoffrey.fischer@univ-poitiers.fr](mailto:jeoffrey.fischer@univ-poitiers.fr)

La localisation de sources aéroacoustiques sur une marche montante est envisagée ici. La localisation de sources par formation de voies classique a d'abord permis d'identifier, pour différentes gammes de fréquence, les principales régions d'émission acoustique à savoir les zones tourbillonnaires amont et aval de l'arête de la marche. De plus, des tendances similaires dans les mesures de pression pariétale fluctuante et de pression acoustique en champ lointain ont été observées. L'étude s'est ensuite dirigée vers la détection d'intermittences acoustiques afin de déterminer si, à l'instar du bruit de jet, le bruit d'écoulement en présence d'obstacle présente des signatures intermittentes. Le caractère intermittent des signaux acoustiques expérimentaux a ainsi été démontré : les événements énergétiques relevés dans le signal acoustique représentent 65% de l'énergie du signal original et 20% de sa durée. Ce résultat a conduit à l'élaboration d'une méthode de formation de voie instationnaire en lien direct avec la technique de retournement temporel, permettant la détection spatio-temporelle des sources acoustiques intermittentes. Les instants d'émission des sources acoustiques observés sur les cartographies ont pu être reliés aux événements intermittents présents dans les signaux.

## 1 Introduction

La présente étude s'intéresse au bruit généré par une marche montante en écoulement en utilisant des techniques d'imagerie acoustique. De par son importance pratique, le bruit de marche montante est bien documenté dans la littérature (par exemple, [1, 2]). Cependant très peu d'études expérimentales ont proposé d'étudier cette source aéroacoustique par technique d'imagerie. La présente étude montre qu'il est possible de réaliser une imagerie de ce type de sources aéroacoustiques, à la fois dans le domaine fréquentiel afin d'obtenir la source de bruit moyenne, et dans le domaine temporel pour mettre en évidence le caractère intermittent de ce type de source de bruit.

La technique d'imagerie de sources sonores utilisée classiquement en aéroacoustique expérimentale est la formation de voies (FV) [3, 4]. Celle-ci est le plus souvent développée dans sa version fréquentielle, et elle permet, à partir de données issues d'une antenne acoustique, d'aboutir à une description des sources aéroacoustiques par bande de fréquences. Un inconvénient majeur de cette méthode est que la résolution de l'analyse dépend de la fréquence d'observation, ce qui rend l'interprétation des résultats délicats. Pour contourner ce problème, un algorithme de déconvolution de la réponse de l'antenne est utilisé ici. Notre choix s'est porté vers la méthode DAMAS, initiée par Brooks et Humphreys [5], qui fait actuellement partie des algorithmes de déconvolution réputés les plus performants. Il est à noter que la FV fréquentielle repose sur le calcul de la matrice interspectrale des mesures microphoniques de l'antenne acoustique : cette matrice est estimée par moyenne temporelle, et les résultats d'imagerie en découlant représentent donc une estimation des sources moyennes de bruit.

Or des travaux se sont intéressés au caractère intermittent du bruit de jet ([6, 7, 8] par exemple), observant que la plus grande part d'énergie qui contribue au bruit est alors localisée dans de courts événements intermittents. La question est ici de savoir si le bruit aéroacoustique rayonné par la marche présente, à l'instar du bruit de jet, un fort caractère intermittent. Si tel est le cas, les méthodes classiques de localisation (FV fréquentielle et DAMAS) ne seront pas adaptées pour l'étude d'événements très localisés en temps.

Récemment, des techniques d'imagerie opérant dans le domaine temporel, basées sur la technique de retournement temporel, ont été proposées pour la détection de sources aéroacoustiques [9, 10]. Dans le même esprit, la présente étude propose une méthode d'imagerie temporelle permettant de détecter les positions spatiales des éventuels événements intermittents présents dans la zone d'émission. Celle-ci est basée sur la technique de FV temporelle, ainsi que sur une technique de détection originale permettant de localiser temporellement et spatialement les événements dans l'écoulement qui contribuent au rayonnement aéroacoustique de la marche montante. L'étude est alors composée de la façon suivante.

Le dispositif expérimental est d'abord présenté dans la partie 2. La méthodologie de détection des sources intermittentes est ensuite présentée dans la partie 3. Enfin, des résultats obtenus aussi bien en termes de FV fréquentielle (sources de bruit moyennes) que temporelle (sources intermittentes) sont présentées dans la partie 4.

## 2 Configuration expérimentale étudiée

Les mesures ont été effectuées dans la soufflerie anéchoïque ÉOLE de l'Institut PPRIME à Poitiers [11]. Le convergent en amont a une section carrée de 460 mm x 460 mm et la longueur de la soufflerie est de 1,32 m. Un plancher en contre-plaqué est disposé le long de la soufflerie, depuis le convergent jusqu'au collecteur (voir Figure 1). La marche montante, d'une hauteur  $h = 30$  mm, est fixée sur ce dernier (représentée en blanc sur la Figure 1). L'arête de la marche est localisée à 285 mm du convergent. Le coefficient de blocage de la marche est de 6%. Les mesures ont été effectuées à la vitesse d'écoulement  $U_\infty = 50$  m/s qui est la vitesse maximale autorisée par la soufflerie et correspond à un nombre de Mach de 0.15. Le nombre de Reynolds  $Re_h$  basé sur la hauteur de la marche est alors de  $10^5$ .

Des microphones acoustiques ont été utilisés pour mesurer le rayonnement acoustique en champ lointain du bruit produit par l'écoulement sur la marche. Les mesures ont été effectuées avec une antenne acoustique composée de 31 microphones 1/4 de pouce B&K modèle

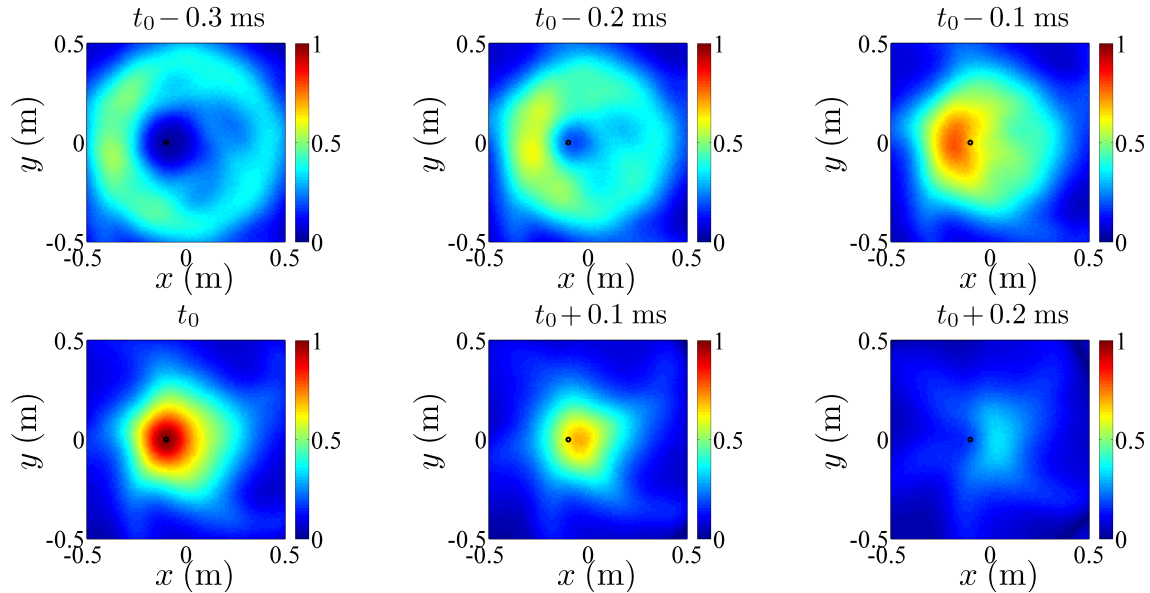


FIGURE 2 – Localisation d’une source simulée par FV temporelle : la fonction de l’Eq. (1) est représentée en valeur absolue dans le plan de focalisation à divers instants entourant l’instant d’émission  $t_0$ . La source est située en  $(x; y) = (-0,1; 0)$  m et à 0,75 m de l’antenne. La barre de couleur est adimensionnée par le maximum de pression en valeur absolue.

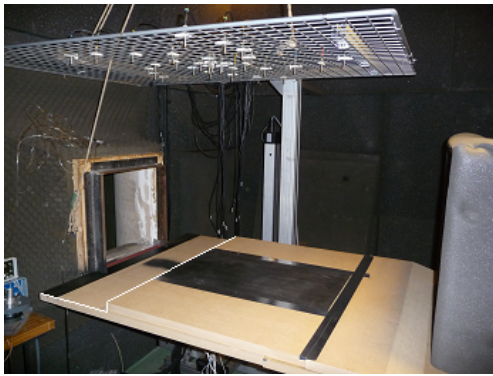


FIGURE 1 – Photographie du banc expérimental. La marche montante est surlignée en blanc.

4957. Le système d’acquisition ETEP permet la mesure synchrone des signaux sur 32 voies à une fréquence d’échantillonnage de 50 kHz. La bande de fréquence des microphones est [50 Hz-10 kHz] et leur calibration a été effectuée avec un pistonphone délivrant un signal sinusoïdal à 1 kHz avec un niveau de 94 dB. La géométrie de l’antenne en spirale est composée de 5 branches logarithmiques de 6 microphones chacune plus un microphone central (31 microphones), et est inspirée des travaux de Underbrink [12]. Cette géométrie permet d’optimiser les bandes de fréquence observables lors du calcul par FV fréquentielle [3, 11]. L’antenne est disposée horizontalement au-dessus de la marche et à 885 mm de la partie supérieure de celle-ci. Les microphones acoustiques ne sont alors plus perturbés par les fluctuations hydrodynamiques de l’écoulement.

### 3 Méthodologie pour la détection de sources intermittentes

Dans cette partie, la méthodologie visant à détecter et localiser des événements acoustiques intermittents est présentée. En désignant par  $p'_a(\mathbf{r}_m, t)$  la mesure de la pression acoustique à l’instant  $t$  d’un microphone localisé en  $\mathbf{r}_m$ , la réponse de l’antenne par FV temporelle focalisée sur un point  $\mathbf{r}_F$  peut s’exprimer par [4] :

$$z(\mathbf{r}_F, t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_F) p'_a(\mathbf{r}_m, t + \tau_{m,F}). \quad (1)$$

Les termes  $w(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_F)$  et  $\tau_{m,F}$  correspondent respectivement aux corrections en amplitude et en retard des  $M$  signaux microphoniques de l’antenne. En particulier, les termes  $\tau_{m,F}$  sont calculés après correction des effets de l’écoulement sur la propagation de l’onde acoustique en utilisant le modèle développé initialement par Amiet [13, 14].

À titre d’exemple, une source numérique ponctuelle est générée en un point de coordonnées  $(-0,1; 0)$  dans le plan  $(x, y)$ . La source est une impulsion temporelle gaussienne, de largeur à mi-hauteur égale à 0,264 ms, et est émise à un instant noté  $t_0$ . La géométrie de l’antenne correspond à celle de l’antenne expérimentale. Nous définissons un plan de focalisation pour l’antenne situé à 0,75 m et parallèle à celle-ci, de dimensions  $(1 \times 1)\text{m}^2$ . La Figure 2 représente la valeur absolue de la fonction définie par l’Eq. (1), calculée pour un ensemble de points  $\mathbf{r}_F$  décrivant le plan de focalisation, pour plusieurs instants entourant l’instant d’émission de l’impulsion  $t_0$ . Le centre du plan de focalisation de coordonnées  $(0; 0)$  est situé au droit du microphone central de l’antenne. On constate une convergence d’un front circulaire d’énergie vers le point d’émission

situé en  $(-0,1;0)$ . Ceci peut s'expliquer par le fait que la FV temporelle est équivalente à une opération de retournement temporel de la portion de front d'onde interceptée par l'antenne. Un maximum d'énergie est ainsi obtenu à  $t_0$  au point d'émission. Le calcul de la fonction de l'Eq. (1) permet donc de localiser spatialement le lieu et l'instant d'émission d'une source intermittente par recherche de maximum spatio-temporel.

Il est ainsi possible de développer une technique de détection de source intermittentes dans une zone de focalisation donnée, permettant d'aboutir aux lieux et instants d'émission des sources intermittentes [11]. Cette procédure est décomposée en quatre étapes brièvement résumées ci-dessous :

- étape 1 : le calcul de la FV fréquentielle associée à l'algorithme de déconvolution DAMAS [5] permet d'estimer la position moyenne des sources aéroacoustiques. Ceci permet d'identifier une zone source dans laquelle seront recherchées les sources intermittentes ;
- étape 2 : la valeur absolue de la fonction définie par l'Eq. (1) est calculée dans un plan de focalisation limité à la zone source à chaque pas de temps de l'échantillon de signal disponible. Nous faisons l'hypothèse qu'à un instant donné une seule source intermittente peut être présente dans la zone source. Une fonction  $z_{\max}(t)$  est ainsi calculée, décrivant l'évolution temporelle du maximum de pression instantané (en valeur absolue) sur chaque cartographie.
- étape 3 : la détection des instants des extrema sur  $z_{\max}(t)$  est ensuite effectuée. Afin de sélectionner les événements les plus énergétiques, la méthode classiquement utilisée [7] est de fixer un seuil pour la détection. Le choix du seuil n'est pas détaillé ici ; il correspond à celui pour lequel le meilleur compromis est trouvé entre l'énergie des événements intermittents et leur durée. Les instants d'émission  $t_i$  des événements intermittents les plus énergétiques générés par la source sont ainsi estimés ;
- étape 4 : La position  $(x_i; y_i)$  de chaque événement intermittent est obtenue en appliquant l'algorithme de FV temporelle à chacun des instants  $t_i$  relevés lors de l'étape 3.

Cette méthode de détection d'événements intermittents est appliquée expérimentalement au cas de la marche montante en écoulement dans la partie suivante.

## 4 Résultats expérimentaux

Tout d'abord, les résultats de localisation de la source moyenne via l'algorithme DAMAS sont

présentés sur la Figure 3 pour les fréquences 2 et 4 kHz. Les résultats sont fournis pour une vitesse d'écoulement de 50 m/s. Dans les deux cas, la source acoustique moyenne sur la marche est alignée le long de l'arête. En revanche, il faut remarquer que pour la fréquence de 2 kHz, elle est située légèrement en amont de l'arête. Cette région correspond à celle où se développe la structure de tourbillon de pied, qui possède un caractère bidimensionnel mais est gouvernée par des fluctuations instationnaires [15] susceptibles de générer des sources aéroacoustiques. Pour 4 kHz en revanche, la source acoustique est située légèrement en aval, au niveau du décollement de l'écoulement au passage de l'arête. Cette région est connue pour être le siège de forts niveaux d'énergie cinétique turbulente [1]. Une étude plus détaillée a montré que le passage des sources de l'amont vers l'aval s'effectue autour de 3,5 kHz, soit pour un nombre de Strouhal (basé sur la hauteur de la marche) de 2,1.

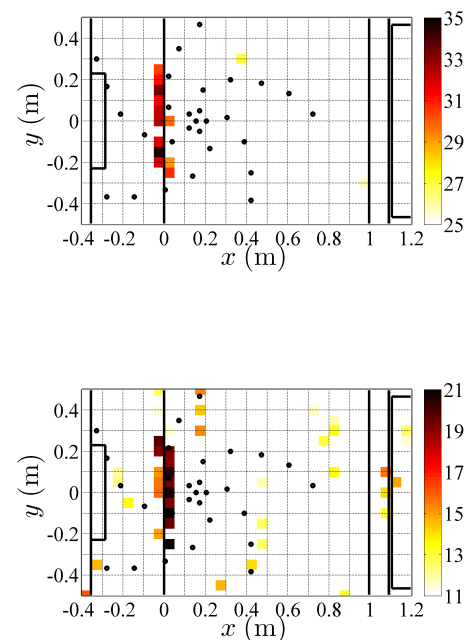


FIGURE 3 – Résultats de la FV fréquentielle (algorithme DAMAS) appliquée à la marche montante aux fréquences  $f = 2$  kHz (en haut) et 4 kHz (en bas). La vitesse d'écoulement est de 50 m/s, la barre de couleur est en dB SPL.

Dans un deuxième temps, la méthodologie de détection d'événements intermittents présentée dans la section précédente a été appliquée au cas de la marche montante. Le seuil pour la détection vaut 1,4 fois l'écart-type de la fonction  $z_{\max}(t)$  définie à la section précédente. Pour ce seuil, les événements intermittents contiennent 65% de l'énergie du signal original et occupent 20% de sa durée. La largeur à mi-hauteur moyenne des événements est  $\overline{\Delta t_d} = 0,264$  ms et l'écart moyen entre événements consécutifs vaut  $\overline{\Delta t_e} = 0,830$  ms. À l'issue de la démarche, les instants d'émission et positions des événements intermittents

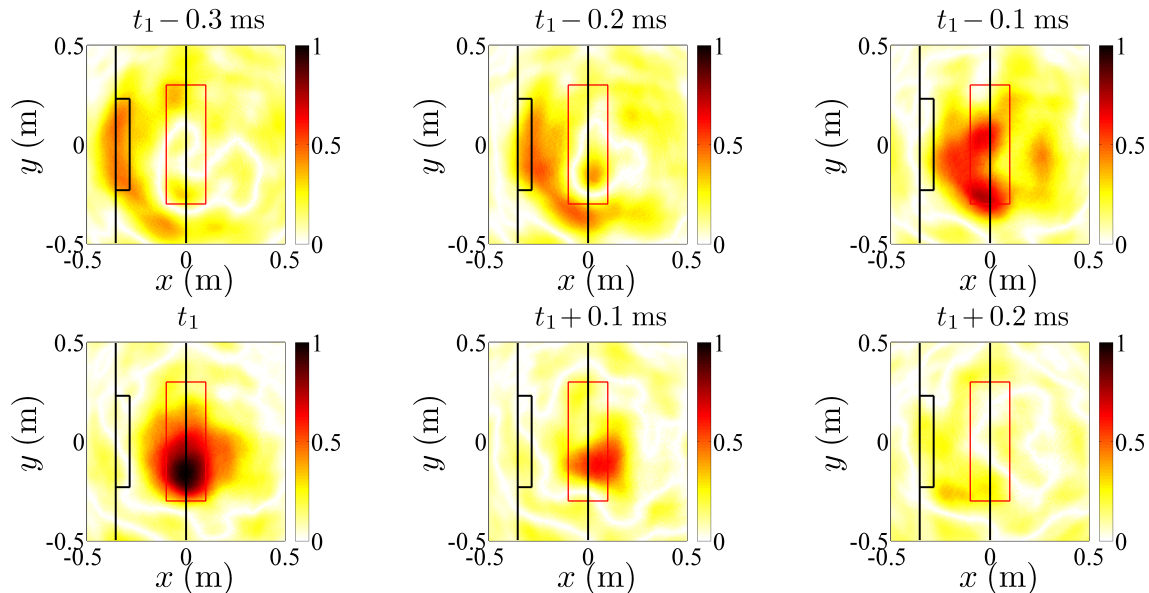


FIGURE 4 – Résultats de la FV temporelle appliquée à la marche montante, vitesse d'écoulement 50 m/s. Le champ reconstitué par FV temporelle dans la zone de focalisation est représenté à divers instants entourant l'instant d'émission  $t_1$ . Le rectangle rouge décrit la zone d'investigation des sources intermittentes. La barre de couleur est adimensionnée par le maximum de pression en valeur absolue.

dépassant le seuil choisi ont pu être relevés. Un exemple de localisation est présenté sur la Figure 4 autour d'un évènement détecté à un instant noté  $t_1$ . Le cadre rouge indique la zone source dans laquelle les sources intermittentes ont été recherchées. Similairement aux résultats simulés de la Figure 2, il apparaît à nouveau le phénomène de convergence de fronts d'onde lié à l'algorithme, visible lors des instants précédant l'instant d'émission. À l'instant du phénomène  $t_1$ , le niveau de pression maximal est situé sur un des bords de l'arête de la marche en face, signifiant que la source intermittente qui rayonne acoustiquement est située à cette position. Ce résultat, typique des évènements intermittents détectés, confirme la nature intermittente du bruit aéroacoustique rayonné.

Le cas d'un évènement acoustique intermittent particulier vient d'être explicité sur la marche montante. On peut alors s'interroger sur la distribution des positions spatiales pour un plus grand nombre d'évènements. La Figure 5 présente la distribution de ces positions pour 200 évènements intermittents. Les positions de évènements décrivent un nuage de points centré autour de l'arête de la marche, avec une majorité de sources légèrement en amont, correspondant à la position du tourbillon de pied de la marche. Ces résultats sont en accord avec la zone source moyenne révélée par la FV fréquentielle. On peut conclure que le bruit aéroacoustique rayonné par la marche est en fait le résultat d'un grand nombre d'évènements intermittents liés à la dynamique instationnaire du fluide, et répartis de manière aléatoire autour de l'arête de la marche. Des résultats complémentaires montrent que ces évènements interviennent à des instants aléatoires indépendants statistiquement entre eux [11].

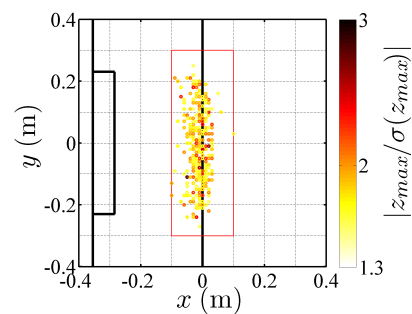


FIGURE 5 – Distribution spatiale de 200 évènements intermittents acoustiques sur la marche montante, vitesse d'écoulement 50 m/s. Le rectangle rouge décrit la zone d'investigation des sources intermittentes. La barre de couleur est adimensionnée par le maximum de pression en valeur absolue.

## 5 Conclusion

Cette étude s'est intéressée à l'identification de phénomènes intermittents dans le bruit rayonné par un écoulement sur une marche montante. Une méthodologie originale de détection spatio-temporelle d'évènements intermittents, basée sur la méthode de formation de voies temporelle, a d'abord été présentée. L'utilisation de cette méthodologie sur des mesures expérimentales en soufflerie du rayonnement aéroacoustique d'une marche montante a permis de dresser plusieurs conclusions. Le caractère intermittent du rayonnement acoustique sur cette maquette a été mis en avant. Les sources de bruit moyennes classiquement identifiées par formation de voies fréquentielle sont le fruits d'évènements acoustiquement efficaces de courte durée (ici, de l'ordre de 0,3 ms en moyenne) émis en des points distribués sur la zone source moyenne.

Ces résultats ouvrent donc la voie à des études qui devraient permettre à terme de mieux comprendre le rayonnement acoustique de corps en écoulement, en identifiant les événements locaux de l'écoulement qui génèrent les intermittences acoustiques que nous sommes à présent en mesure d'identifier.

## Remerciements

Les auteurs remercient Pascal Biais, Laurent Philippon et Philippe Szeger pour leur investissement lors des expérimentations et de l'instrumentation.

## Références

- [1] M. Ji et M. Wang, Sound generation by turbulent boundary-layer flow over small steps, *J. Fluid Mech.*, **654**, 161-193 (2010).
- [2] C. Hahn, S. Becker, I. Ali, M. Escobar et M. Kaltenbacher, Investigation of flow induced sound radiated by a forward facing step, *New Res. in Num. and Exp. Fluid Mech.*, **96**, 438-445 (2007).
- [3] T.J. Mueller, *Aeroacoustic measurements*, Springer (2002).
- [4] L. Koop, Beamforming methods in microphone array measurements : Theory, practice and limitations, *Von Karman Institute* (2007).
- [5] T.F. Brooks et W.M. Humphreys, A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (DAMAS) determined from phased microphone arrays, *J. Sound Vib.*, **294**, 856-879 (2006).
- [6] D. Juvé, Sunyach M. et G. Comte-Bellot G., Intermittency of the noise emission in subsonic cold jets, *J. Sound Vib.*, **71** (3), 319-332 (1980).
- [7] M.Kearney-Fischer, A. Sinha et M. Samimy, Intermittent nature of subsonic jet noise, *AIAA Journal*, **51** (5), 1142-1155 (2013).
- [8] M. Koenig, A.V.G. Cavalieri, P. Jordan, J. Delville et Y. Gervais, Farfield filtering of subsonic jet noise : Mach and temperature effects, *17th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Portland, Oregon (2011).
- [9] A. Deneuve, P. Druault, R. Marchiano et P. Sagaut, A coupled time-reversal/complex differentiation method for aeroacoustic sensitivity analysis : towards a source detection procedure, *J. Fluid Mech.*, **642**, 181-212 (2010).
- [10] T. Padois, C. Prax, V. Valeau et D. Marx, Experimental localization of an acoustic sound source in a wind-tunnel flow by using a numerical time-reversal technique, *J. Acoust. Soc. Am.*, **132**, 2397-2407 (2012).
- [11] J. Fischer, Identification de sources aéroacoustiques au voisinage de corps non profilés par formation de voies fréquentielle et temporelle, *Thèse de doctorat*, Université de Poitiers (2014).
- [12] J.R.Underbrink, *Circularly symmetric, zero redundancy, planar array having broad frequency range applications*, U.S. Patent No. 6,205,224 (2001).
- [13] R.K. Amiet, Refraction of sound by a shear layer, *J. Sound Vib.*, **58**, 467-482 (1978).
- [14] C. Bahr, N.S. Zawodny, T. Yardibi, F. Liu, D. Wetzel, B. Bertolucci et L. Cattafestan Shear layer time-delay correction using a non-intrusive acoustic point source, *Int. J. of Aeroacoustics*, **10** (5-6), 597-530 (2011).
- [15] G.J. Poitras, Étude de l'écoulement autour de modèles de bâtiments, *Thèse de doctorat*, Université de Poitiers (2002).