



**HAL**  
open science

## Méthode LSE appliquée à la résonance acoustique d'un tuyau corrugué sous écoulement

Gaëtan Galeron, Muriel Amielh, Pierre-Olivier Mattei, Daniel Mazzoni,  
Fabien Anselmet

► **To cite this version:**

Gaëtan Galeron, Muriel Amielh, Pierre-Olivier Mattei, Daniel Mazzoni, Fabien Anselmet. Méthode LSE appliquée à la résonance acoustique d'un tuyau corrugué sous écoulement. CFTL (Congrès Français sur les Techniques Laser), Sep 2016, Toulouse, France. hal-01386455

**HAL Id: hal-01386455**

**<https://hal.science/hal-01386455>**

Submitted on 24 Oct 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Méthode LSE appliquée à la résonance acoustique d'un tuyau corrugué sous écoulement

Gaëtan Galeron<sup>1</sup>, Muriel Amielh<sup>2</sup>, Pierre-Olivier Mattei<sup>1</sup>, Daniel Mazzone<sup>2</sup>, Fabien Anselmet<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CNRS - UPR 7051, F-13453, Marseille, France

<sup>2</sup>Aix Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, IRPHE UMR 7342, Marseille, France  
galeron@irphe.univ-mrs.fr

La dynamique de l'écoulement dans un tuyau corrugué est étudiée par des mesures par PIV couplées à des mesures de niveau de pression acoustique par microphones et de vitesse par fils chauds. L'objectif est d'utiliser la méthode LSE (Linear Stochastic Estimation) pour combiner la haute résolution spatiale des mesures par PIV à la haute résolution temporelle des mesures ponctuelles de vitesse et de pression par capteurs. On caractérise ainsi le lien entre l'aérodynamique et l'acoustique qui conduit à un sifflement intense sous certaines conditions d'écoulement dans le tuyau corrugué.

## 1 Introduction

Les recherches présentées ici visent à mieux comprendre le phénomène aéroacoustique de « singing riser ». En raison de leurs propriétés de flexibilité globale et rigidité locale, les tuyaux corrugués sont utilisés dans de nombreuses applications de transport de fluides. Sous certaines conditions de géométries et d'écoulements, ces tuyaux peuvent se mettre à siffler, générant ainsi des vibrations nuisibles aux installations industrielles attenantes.

Ce sifflement intense est provoqué par la cohérence entre les structures turbulentes qui se développent dans la couche cisailée affleurant chaque cavité, le vortex qui s'établit dans la cavité et la propagation sonore liée aux modes acoustiques longitudinaux du tuyau [1]. La turbulence de l'écoulement, l'interaction entre les cavités constituant la corrugation et enfin le feedback du sifflement sur l'écoulement sont liés à la géométrie du tuyau. La corrélation entre l'écoulement et les modes propres acoustiques du tuyau est ici étudiée.

Focalisée sur l'application de transport gazier, l'objet de l'étude se limite à des tuyaux de grande longueur devant les dimensions caractéristiques des cavités. La vitesse de l'écoulement au centre du tuyau s'effectue à un nombre de Mach inférieur à 0.1.

Une expérience représentant ce phénomène a été mise en place à l'IRPHÉ [2]. Les mesures dans la veine d'essai sont menées via trois dispositifs : la PIV, fournissant des champs de vitesse de haute résolution spatiale, mais limitée à une cadence de 10Hz, associée à des microphones et fils chauds pour des mesures de pression et vitesse résolues en temps. L'objectif du présent travail est de synchroniser les données relevées par ces trois systèmes, afin de mettre en évidence le couplage entre l'aérodynamique et l'acoustique et de reconstituer ainsi le champ de vitesse spatio-temporel sur une période du sifflement dont la fréquence est de l'ordre de 600 Hz pour une vitesse de 20 m/s. On utilise la simultanéité des mesures fournies par les capteurs ponctuels et de la PIV en un même point pour estimer les champs de vitesse à une fréquence d'acquisition plus élevée que celle de la PIV. Le principe est une méthode de reconstruction de type LSE (Linear Stochastic Estimation) au sens des moindres carrés [4].

## 2 Installation expérimentale

### 2.1 Le tuyau corrugué

Le tuyau corrugué est connecté à une soufflerie dont le moto-ventilateur dispense une vitesse jusqu'à 30 m/s. La section droite du tuyau corrugué est rectangulaire pour faciliter les accès optiques, avec une envergure  $B=100\text{mm}$  et un cœur de veine  $D=20\text{mm}$ . Le tuyau en plexiglas est corrugué latéralement sur toute sa longueur  $L=2\text{ m}$  par l'intermédiaire de 100 cavités placées en vis-à-vis. Les parois supérieure et inférieure sont lisses.

Chaque cavité est caractérisée par sa profondeur  $H=10\text{mm}$  et son ouverture  $w=10\text{mm}$  (Figure 1). Le bord amont de chaque cavité est arrondi avec un rayon de courbure  $r=3\text{mm}$ . Cette géométrie génère un motif dont le pas est  $P_t=20\text{mm}$ .

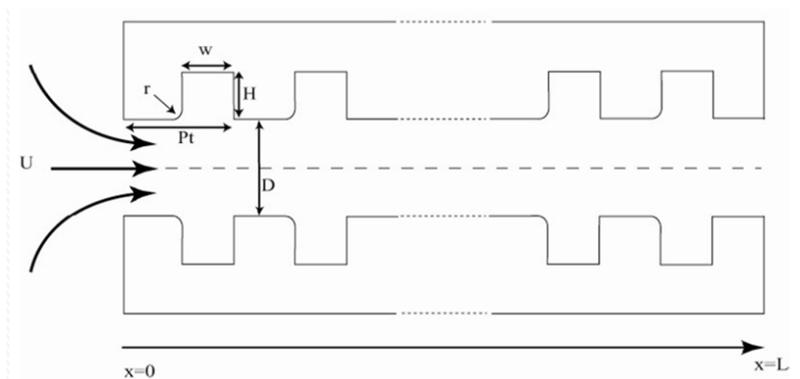


Figure 1 : Géométrie interne du tuyau corrugué (vue de dessus)

L'entrée du tuyau est raccordée à la soufflerie en utilisant une boîte de couplage rectangulaire de grande section droite qui, en simulant une extrémité ouverte, assure notamment une condition acoustique de Dirichlet à l'entrée du tuyau corrugué. Elle permet également d'assurer l'étanchéité à l'air au niveau du raccord entre la soufflerie et le tuyau. Le tuyau corrugué est ouvert en aval pour fournir aussi une condition acoustique de Dirichlet.

### 2.2 Les techniques de mesure

- **Mesures de vitesse par PIV**

La mesure des champs de vitesse par PIV est réalisée par une caméra Kodak ES 1.0 de 1Mpixels, associée à l'éclairage laser d'un Nd : YAG pulsé de haute énergie (200 mJ) à 10 Hz (QuantaRays, Spectra-Physics). Les parois corruguées étant verticales, le plan laser est positionné horizontalement à mi-hauteur de l'envergure (à  $B/2$ ). Le traceur utilisé est un aérosol micronique d'huile d'olive injecté en amont de la boîte de couplage. Le champ d'observation ( $35 \times 35 \text{mm}^2$ ) est centré sur la première cavité à l'entrée du tube (Fig.2). Environ 950 couples d'images sont acquis à une cadence de 10Hz par le logiciel VideoSavant. Le post-traitement est réalisé avec le logiciel DynamicStudio (DANTEC Dynamics) en utilisant la fonction d'« adaptative correlation » sur des boîtes de  $32 \times 32$  pixels avec un recouvrement de 50%. Un vecteur vitesse est ainsi calculé sur chaque cellule de  $0.59 \times 0.59 \text{mm}^2$

- **Mesures de pression acoustique par microphone**

Les mesures de pression acoustiques sont réalisées en paroi avec trois microphones GRAS 40SC, de type IEPE, équipés chacun d'un tube prolongateur en silicone de 320mm permettant de poser le corps des capteurs à l'extérieur de l'écoulement. Les microphones (Micro 2, 3 et 4) ont été préalablement re-calibrés dans un tube de Kundt pour prendre en compte l'influence de ces longueurs de tube sur la sensibilité des capteurs. Dans le repère du tuyau corrugué, les prises de pression sont réalisées aux positions suivantes : Micro 2 sur la première corrugation à

( $X=5\text{mm}, Y=10\text{mm}$ ), Micro 3 dans la première cavité ( $X=15\text{mm}, Y=20\text{mm}$ ) et Micro 4 sur la deuxième corrugation à ( $X=25\text{mm}, Y=10\text{mm}$ ).

- **Mesures de vitesse par fil chaud**

Les mesures de vitesse par fil chaud sont réalisées en deux points sur le champ d'observation PIV. Le fil chaud FC1 est une sonde de type 55P05 (DANTEC Dynamics) avec des broches recourbées, dédiée aux mesures en couche limite. Cette sonde permet de s'approcher de la paroi à l'entrée de la veine. Elle est positionnée en ( $X=-5\text{mm}, Y=10\text{mm}$ ). Des mesures antérieures [2] ont montré qu'en cette position, la sonde se trouve sur un maximum de vitesse acoustique (correspondant à un minimum de pression acoustique, condition de Dirichlet en pression à l'entrée grâce à la boîte d'accouplement) et la capte très bien. Le plan laser intercepte la partie sensible (diamètre  $5\mu\text{m}$ , longueur  $1.25\text{mm}$ ) de ce fil chaud à chaque flash. Ceci entraîne une déstabilisation du signal de vitesse (Fig.3) sur deux pas de temps d'acquisition ( $2 \times 1/25600 = 78\mu\text{s}$ ). On utilise cet événement pour synchroniser la PIV et les signaux capteurs. Lorsque les conditions d'écoulement dans le tuyau corrugué stimulent le sifflement, le signal de vitesse capté par le fil chaud FC1 est sinusoïdal. On utilise cette propriété pour corriger le signal de vitesse perturbé par le flash laser (Fig.3).

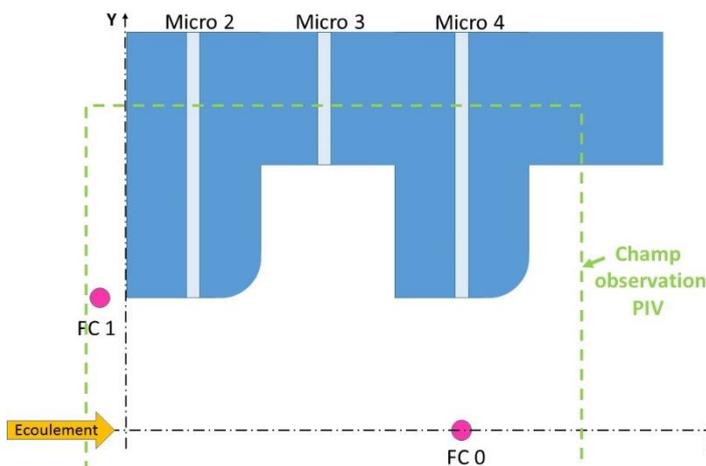


Figure 2 : Champ d'observation PIV et positionnement des 5 capteurs : 3 microphones (Micro 2, 3, 4) et 2 fils chauds (FC0 et FC1).

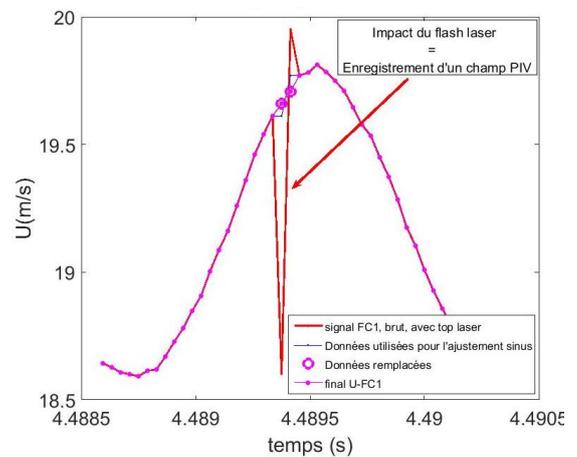


Figure 3 : Impact du flash laser utilisé pour la PIV sur le signal de vitesse capté par le fil chaud FC1.

Le deuxième fil chaud FC0 est placé au milieu de l'écoulement juste au-dessus du plan laser, son signal n'est donc pas perturbé par les flashes laser. Par contre, l'ensemencement par aérosol d'huile d'olive entraîne une dérive du signal de vitesse que l'on corrige par un post-traitement sous matlab. Le fil chaud FC0 est une sonde de type 55P11, positionnée en ( $X=25\text{mm}, Y=0\text{mm}$ ). Comme pour le fil chaud FC1, la surchauffe appliquée est de  $a_w=0.8$ . Les deux fils chauds sont chacun connectés à un pont CTA (Constant Temperature Anemometer) d'un système Streamline, piloté par le logiciel Streamware (DANTEC Dynamics).

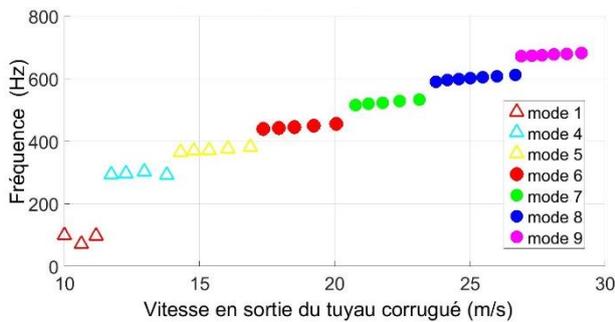
- **Acquisition des 5 signaux capteurs**

L'acquisition des 5 signaux capteurs est réalisée en simultanément sur une centrale d'acquisition National Instruments à une fréquence de  $25600\text{ Hz}$  (Chassis NI cDAQ-9188). Les deux fils chauds sont connectés à un module NI 9215 (16 bits), tandis que les trois microphones de type IEPE sont connectés à un module NI 9234 qui fournit à la fois l'alimentation en courant et enregistre le signal acoustique sur 24 bits. Un programme (Virtual Instruments) conçu sous Labview pilote cette acquisition. Les post-traitements sont réalisés sous matlab. Pour couvrir la durée d'acquisition à  $10\text{Hz}$  de 950 champs PIV, les acquisitions des signaux capteurs durent  $100\text{s}$ ,  $2560000$  échantillons sont donc acquis par voie.

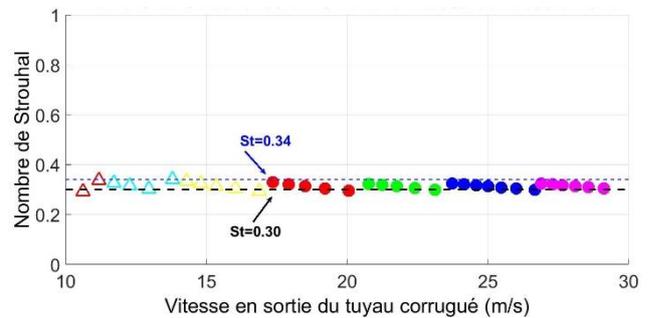
### 3 Caractérisation des modes acoustiques du tuyau corrugué sous écoulement

De premières séries de mesures ont consisté à caractériser l'aéroacoustique du tuyau corrugué en augmentant la vitesse de l'écoulement entre 10 et 30m/s. Il a été déterminé que la présence des corrugations modifie la vitesse du son effective  $c_{eff}$ , qui doit être prise en compte pour prédire les modes propres longitudinaux acoustiques. Les fréquences  $f_n$  des  $n$  modes longitudinaux de ce tuyau sont alors estimées par la relation  $f_n = \frac{n c_{eff}}{2L}$  avec  $c_{eff} \approx 300$  m/s [2]. Les signaux de vitesse ont été mesurés par le fil chaud FC1 positionné comme décrit en 2.2 (Fig.3) et le fil chaud FC0 positionné successivement comme en 2.2 (Fig.3) et ensuite à l'extrémité aval du tuyau corrugué à (X=1981mm, Y=0mm). Un microphone a été positionné aussi en aval à (X=1951mm, Y=10mm).

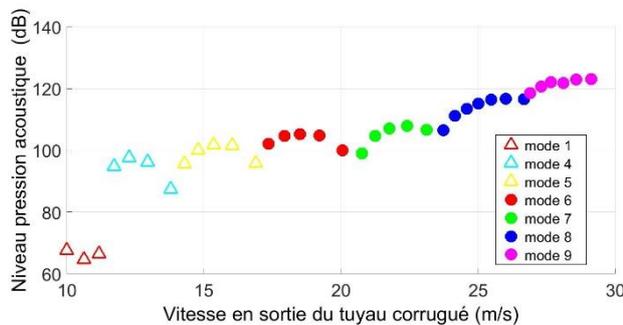
Contrairement à de précédents essais, le mode 1 à 75Hz a été détecté, tandis que les modes 2 et 3 sont restés des modes secondaires lorsque le mode 4 a été prédominant (Fig.4a). Les modes sont associés à un nombre de Strouhal  $St = \frac{f_n(w+r)}{U_{aval}}$  qui varie entre 0.30 et 0.34 (Fig.4b) en accord avec les résultats de la littérature sur les « singing risers »[3]. Le sifflement devient intense (>100dB) lorsque la vitesse en sortie du tuyau  $U_{aval}$  dépasse 17m/s (Fig.4c). Entre 20m/s et 30m/s, le niveau de pression acoustique passe de 100 à 120dB. Ceci s'accompagne d'une nette augmentation de l'écart-type de vitesse dans la partie amont du tuyau corrugué. Dans cette région ( $X \leq 25$ mm), les fils chauds sont sensibles à la vitesse acoustique et la trace des modes est perçue comme sur le signal de pression acoustique. Par contre, lorsque le fil chaud FC0 est placé à l'extrémité aval du tuyau (X=1981mm), la turbulence s'est développée tout le long du tuyau et l'écart-type augmente linéairement en fonction de la vitesse  $U_{aval}$ , masquant ainsi l'effet acoustique. Pour la mise en oeuvre de la méthode LSE décrite ci-après, on choisit une condition d'écoulement à  $U_{aval} = 25$ m/s pour laquelle le mode acoustique 8 est prédominant et est associé à un sifflement intense.



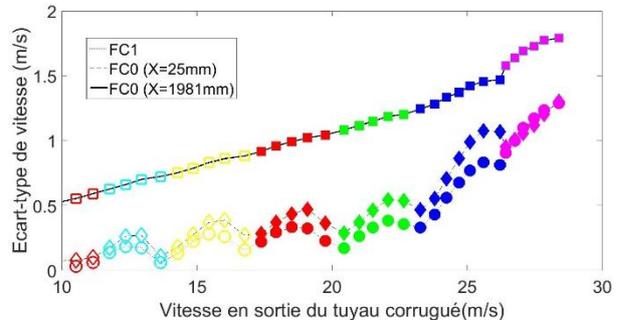
a) Fréquence du mode dominant.



b) Nombre de Strouhal associé au mode dominant.



c) Niveau de pression acoustique pour le mode prédominant.



d) Ecarts-types de vitesse mesurée par fils chauds.

Figure 4 : Caractérisation des modes acoustiques du tuyau corrugué sous écoulement.

## 4 Méthode LSE

La méthode LSE implémentée permet de reconstituer des champs de vitesse résolus spatio-temporellement à partir de deux types de mesure. Un appareil de mesure est résolu spatialement, dans notre cas la PIV, et des sondes sont résolues temporellement, dans notre cas des microphones et des fils chauds ([4], [5], [6]). La méthode de reconstitution est alors basée sur un développement mathématique détaillé ci-dessous :

Pour les présentes mesures, on a des champs PIV résolus spatialement, mais de faible résolution temporelle (10Hz). En pratique, on utilise les champs fluctuants normalisés à l'écart-type.

$$\{u'(x_{pq}, t_i)\}_{i=1..M}$$

avec M le nombre de champs PIV (ici M=949) et  $p \times q$  le nombre de positions dans le champ PIV (ici 62x62).

Les sondes de fortes résolutions temporelles (25600Hz), mais ponctuelles (absence de résolution spatiale) prennent les valeurs :

$$\{s'(x_j, t)\}_{j=1..n} \text{ (avec } n \text{ le nombre de sondes, ici } n=5\text{)}$$

En pratique, on utilise les signaux fluctuants normalisés à l'écart-type.

A partir de ces deux types de mesures, on peut appliquer la méthode LSE afin de reconstituer de manière stochastique les champs de vitesse avec une bien meilleure résolution temporelle. Il est alors possible de connaître la vitesse avec une très bonne résolution spatio-temporelle.

Pour cela on utilise les matrices  $A$  et  $B$ . Leurs coefficients sont respectivement issus des corrélations entre les sondes et des corrélations entre les sondes et champs PIV à l'instant initial ( $\tau=0$ ).

$$\begin{cases} A_{ij} = \overline{s'(y_j, t)s'(y_i, t)} \\ B_{pqj} = \overline{u'(x_{pq}, t_i)s'(y_j, t_i)} \end{cases} \quad (1)$$

De ces deux matrices on déduit la matrice  $\Lambda$  qui vérifie l'équation  $A\Lambda = B$ . Cette dernière définit les coefficients stochastiques  $\alpha_j(x_{pq}) = \Lambda_{pqj}$ . A partir de ces coefficients, une estimation linéaire du champ fluctuant est proposée:

$$\tilde{u}'(x_{pq}, t) = \sum_{j=1}^n \alpha_j(x_{pq})s'(x_j, t) \quad (2)$$

## 5 Résultats

### 5.1 Signaux capteurs et champs PIV

Pour la condition d'écoulement choisie ( $U_{\text{aval}}=25\text{m/s}$ ), la figure 5 présente l'évolution temporelle de la vitesse mesurée par les fils chauds et la pression mesurée par les microphones autour d'un flash laser associé à la mesure d'un champ instantané PIV (Fig.6). Le caractère oscillatoire des signaux des microphones est significatif du sifflement intense à la fréquence d'environ 600Hz (mode 8). Les signaux fils chauds sont également sensibles à l'acoustique : le signal FC1 capte la vitesse acoustique, tandis que la turbulence de l'écoulement est, en plus, captée par FC0 qui est situé à l'intérieur de la veine. Le champ instantané PIV présenté sur la figure 6 illustre le comportement de l'écoulement autour de la première cavité d'entrée. On notera la présence d'une accélération de l'écoulement sur l'axe ( $Y=0\text{mm}$ ) liée à la présence d'une veina contracta à l'entrée du tuyau corrugué. Un tourbillon s'installe dans la cavité. La position de son cœur est instable et dépend de l'alimentation fluctuante en fluide de la cavité.

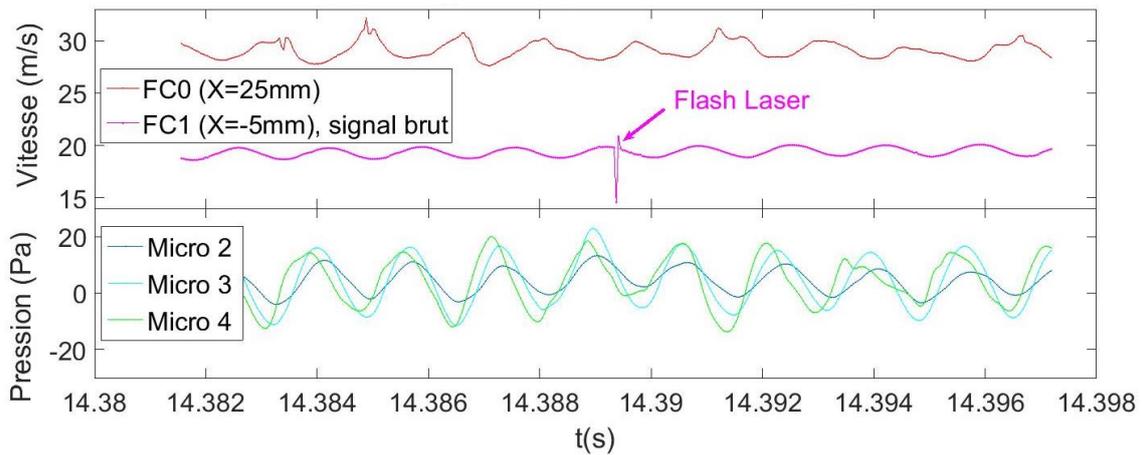


Figure 5 : Exemple de signaux capteurs autour d'un flash laser correspondant à l'acquisition d'un champ PIV.

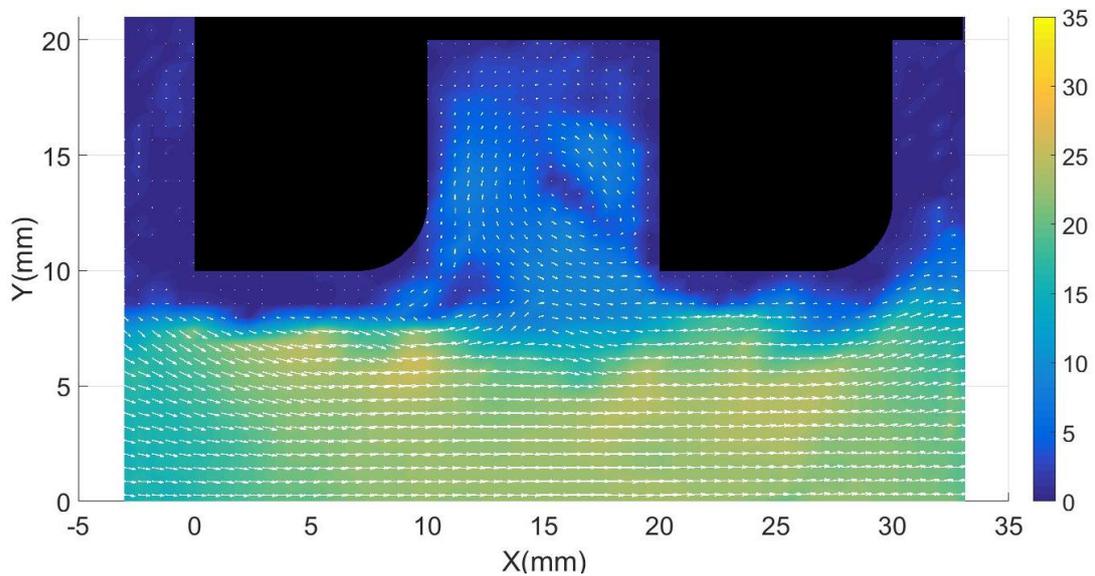


Figure 6 : Champ PIV instantané enregistré au moment du flash laser de la figure 5. Cartographie de la norme de vitesse  $(u^2+v^2)^{1/2}$  en m/s et vecteurs vitesses instantanés.

## 5.2 Coefficients LSE

On calcule les coefficients de la matrice de corrélation A entre les sondes (Figure 7a) sur l'ensemble des points de mesure. De même, on calcule les coefficients de la matrice de corrélation B entre les sondes et les points du champs PIV. Pour cela, il a été nécessaire de réaliser une extraction temporelle des valeurs des sondes aux instants des prises de champs PIV. De plus, on distingue deux matrices  $B_x$  et  $B_y$  correspondant aux composantes des vitesses (u,v) des champs PIV. La formule utilisée est donnée ci-dessous :

$$\begin{cases} B_{xpqj} = \overline{u'(x_{pq}, t_i) s'(y_j, t_i)} \\ B_{ypqj} = \overline{v'(x_{pq}, t_i) s'(y_j, t_i)} \end{cases} \quad (3)$$

Quelques illustrations des coefficients  $B_x$  et  $B_y$  sont données sur les figures Fig.7 b-c-d. On peut constater de fortes corrélations supérieures à 0.5 en valeur absolue entre les signaux capteurs et certaines régions du champ PIV. Ceci augure de bonnes conditions pour l'application de la LSE.

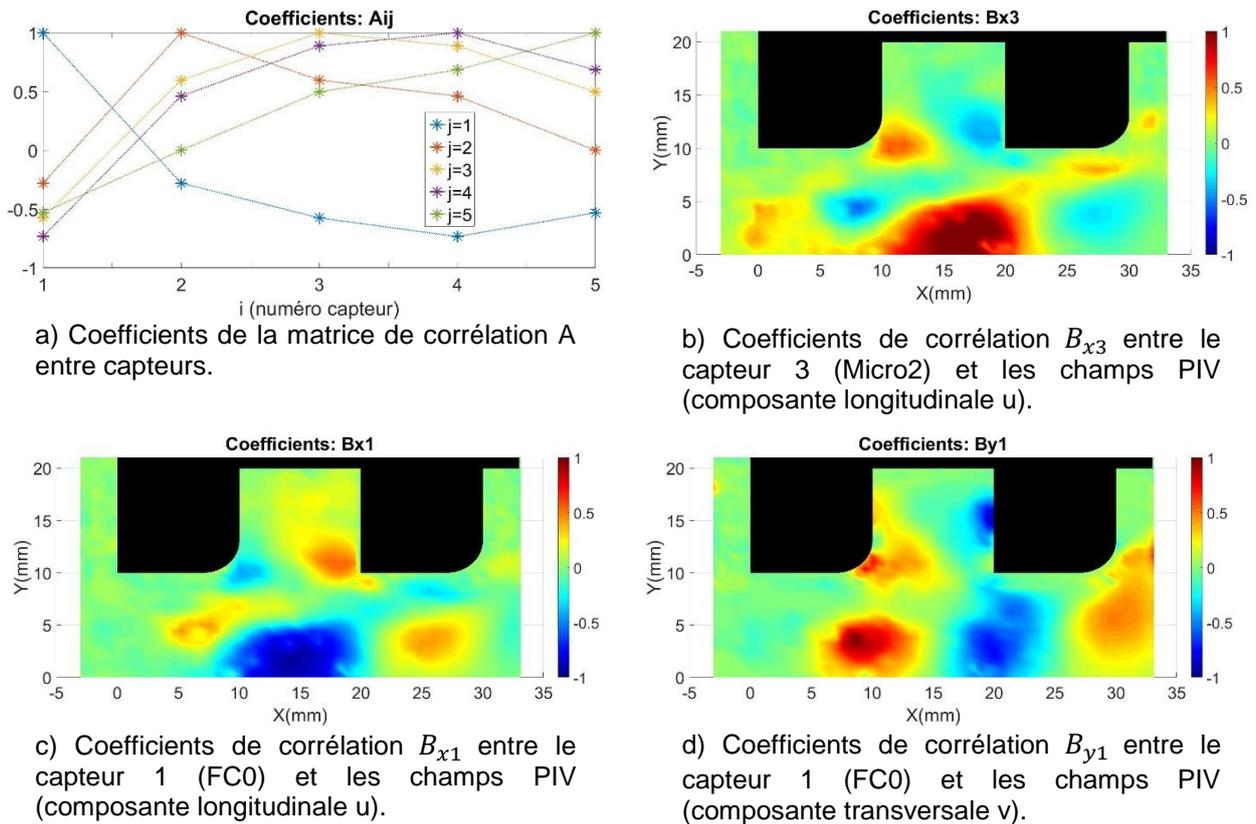


Figure 7 : Corrélations entre les champs PIV et les capteurs n°1 à 5 (capteur 1 = FC0, capteur 2 = FC1, capteur 3= Micro2, capteur 4 = Micro3, capteur 5 = Micro4).

### 5.3 Reconstitution du champ de vitesse à « haute fréquence » par la LSE

La détermination des matrices  $A$ ,  $B_x$  et  $B_y$  permet de calculer les matrices  $\Lambda_x$  et  $\Lambda_y$ . Leurs coefficients sont utilisés (éq. (2)) pour reconstruire des champs de vitesse à des temps intermédiaires entre deux champs instantanés PIV. La figure 8 donne un exemple de reconstitution des séries temporelles des composantes  $u$  et  $v$  vitesse à la position ( $X=18\text{mm}$ ,  $Y=9\text{mm}$ ) située près de l'angle aval, acéré, de la cavité. On retrouve une oscillation à 600Hz environ des composantes  $u$  et  $v$  de vitesse. On sélectionne quatre temps  $t_{1,\dots,4}$  correspondant à des phases particulières sur le signal de  $u$  reconstitué (voir points rouges sur figure 8) pour lesquels on représente le champ de vitesse zoomé sur le bord aval de la cavité. On visualise ainsi le battement de l'écoulement qui alimente la cavité (Fig.9). Grâce à la reconstitution par LSE, cette région va pouvoir être explorée en détail, car des simulations numériques menées en parallèle montrent qu'elle est une source acoustique principale.

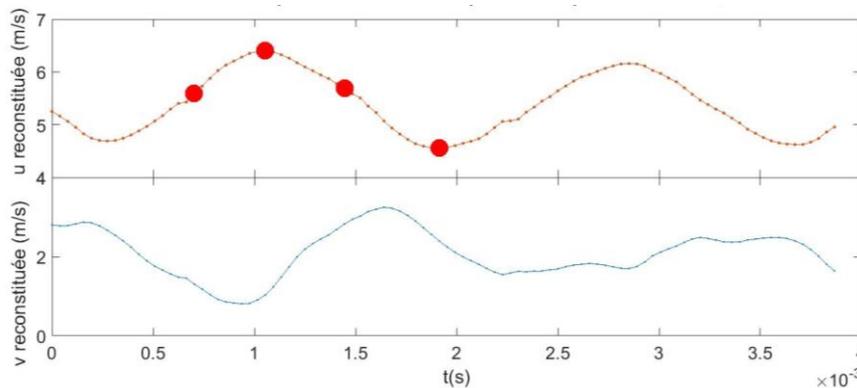


Figure 8 : Composantes de vitesse  $u$  et  $v$  reconstituées à haute fréquence ( $F_s=25600\text{Hz}$ ) par LSE à la position ( $X=18\text{mm}$ ,  $Y=9\text{mm}$ ) localisée sur les figures 9. Les points rouges pointent les temps  $t_{1,\dots,4}$  pour lesquels les champs de vitesse complets sont reconstitués sur les figures 9.

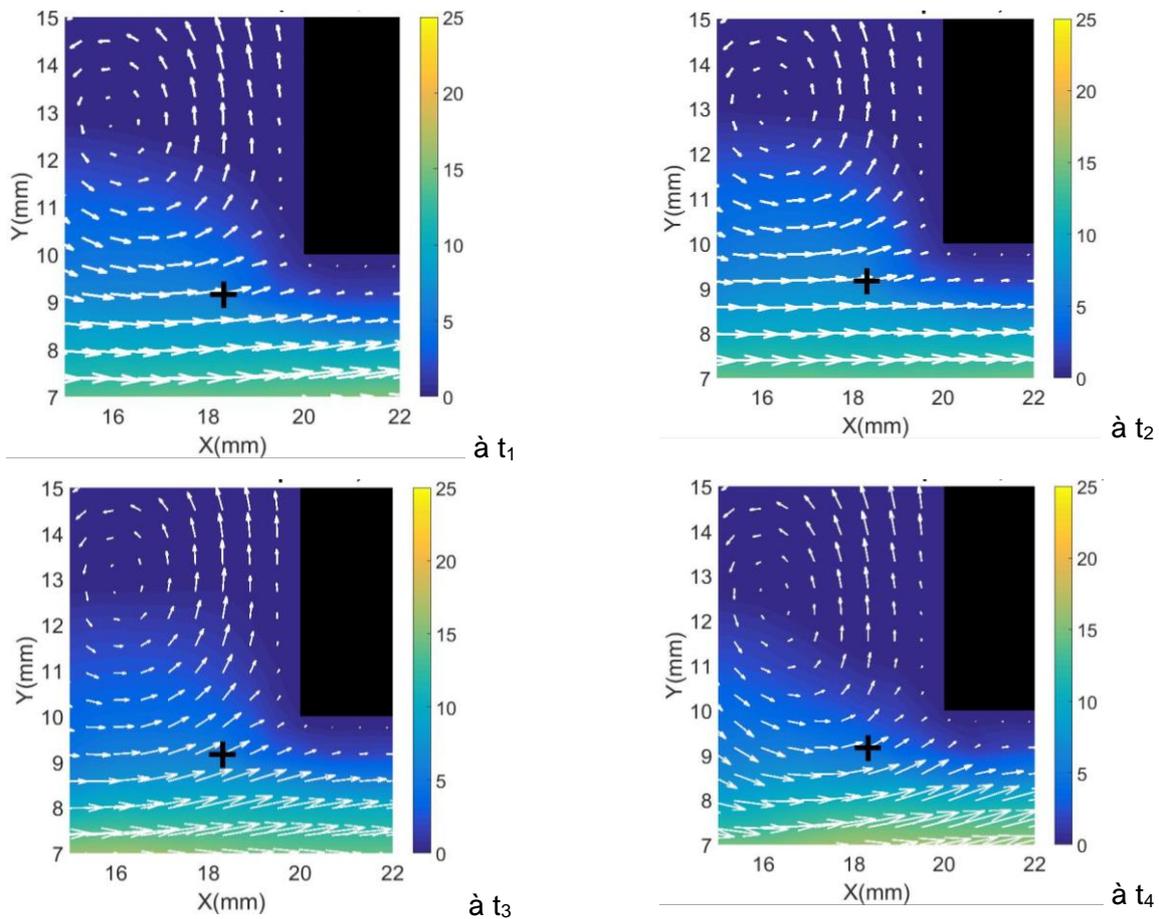


Figure 9 : Champs de vitesse reconstitués à haute fréquence aux temps  $t_1, \dots, t_4$  localisés sur la figure 8. Zoom sur le coin aval de la cavité.

## 6 Conclusion

Les résultats obtenus à haute fréquence grâce à la mise en œuvre de la technique LSE à partir de champs PIV et de signaux capteurs doivent maintenant être exploités pour la caractérisation aéroacoustique de l'écoulement dans le tuyau corrugué. Des comparaisons avec des simulations numériques menées avec un modèle de type Lattice Boltzmann sont en cours.

## 7 Références

- [1] G. Nakiboglu, Aeroacoustics of corrugated pipes, Ph.D. thesis, 2012.
- [2] M. Amielh, Y. Jiang, F. Anselmet, U. Kristiansen, P.O. Mattei, D. Mazzone, C. Pinède, Aeroacoustic source analysis in a corrugated flow pipe using low-frequency mitigation: Journal of Turbulence, 2014.
- [3] G. Nakiboglu, S.P.C. Belfroid, J.F.H. Willems, and A. Hirschberg, Whistling behavior of periodic systems: Corrugated pipes and multiple side branch system, Int. J. Mech. Sci. 52, pp. 1458–1470, 2010.
- [4] Y. Y. Pey, L. P. Chua, and W. L. Siauw, Stochastic Estimation of Cavity Flowfield, World Academy of Science, Engineering and Technology, 6: 11-26, 2012.
- [5] S. Piponniau, E. Collin, P. Dupont, J.-F. Debiève, Estimation stochastique linéaire d'une interaction onde de choc-couche limite turbulente, 14<sup>ème</sup> Congrès Francophone de Techniques Laser (CFTL2014), Marseille, France, 15-19 septembre 2014.
- [6] A. Graziani, F. Fadla, M. Lippert, F. Kerhervé, R. Mathis, D. Uystepuyst, L. Keirsbulck, Estimation stochastique d'un écoulement décollé en aval d'une bosse par méthode électrochimique, 22<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, Lyon, 24-28 Août 2015.