

# TRANSFERTS ENERGETIQUES ENTRE LE CHAMP TURBULENT D'UN JET IMPACTANT DE VENTILATION ET LE CHAMP ACOUSTIQUE GENERE

Kamel ABED-MERAÏM<sup>1</sup>, Hassan ASSOUM<sup>2</sup>, Anas SAKOUT<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE), Université de La Rochelle,  
kamel.abed-meraim@univ-lr.fr

<sup>2</sup>Beirut Arab University, Tripoli Branch, Lebanon, hassan.assoum@gmail.com

<sup>3</sup>Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE), Université de La Rochelle,  
anas.sakout@univ-lr.fr

## RÉSUMÉ

Dans certaines configurations, un jet plan heurtant une plaque fendue produit des nuisances sonores. En effet, en fonction du rapport de confinement, il arrive que des sons auto-entretenus se produisent, s'installent dans l'écoulement et favorisent les transferts d'énergie du champ aérodynamique vers le champ acoustique. Créant ainsi une source de bruit aéroacoustique qui peut atteindre des niveaux sonores élevés et que les utilisateurs cherchent à réduire ou à supprimer. Lorsque ces dispositifs équipent des enceintes habitables, le confort acoustique peut être impacté. Cette étude a été initiée pour comprendre ces phénomènes et apporter des solutions afin de réduire ces nuisances sonores. Un intérêt particulier est porté sur les interactions entre les structures tourbillonnaires qui se développent dans cet écoulement et le champ acoustique produit. Un dispositif expérimental reposant sur de la vélocimétrie par images de particules (TR-SPIV) est utilisé. L'exploitation des images obtenues par cette métrologie Laser plein champ, permet de détecter et de suivre ces structures tourbillonnaires dans le temps. Les corrélations entre la production de bruits et les déformations de ces structures tourbillonnaires au passage de la fente sont analysées.

**Mots Clés:** *Acoustique, Jets turbulents impactants, PIV, Métrologie Laser.*

---

## NOMENCLATURE

### Symboles :

Re	nombre de Reynolds
H	hauteur du jet, m
L	largeur du jet, m
Mo	nombre de Mach
U <sub>o</sub>	vitesse de soufflage
Ti	trajectoire i des tourbillons
t	le temps

### Lettres grecques :

$\nu$	viscosité cinématique
$\lambda_2$	valeur propre du tenseur $S^2 + \Omega^2$

### Abréviations :

PIV	Vélocimétrie par Images de Particules
SPIV	Stéréo-PIV
TR-SPIV	SPIV résolue en temps
2D-2C	en 2 dimensions et à 2 composantes

---

## 1. INTRODUCTION

Les jets confinés heurtant des surfaces fendues se retrouvent dans l'industrie, le transport, l'habitat, ... Parmi les applications relatives au bâtiment, ces jets impactants sont utilisés dans les systèmes de renouvellement d'air, afin d'améliorer le mélange et la diffusion des flux d'air. Ainsi, ils permettent d'assurer le renouvellement d'air nécessaire au confort dans les enceintes habitables, tout en évitant les zones de stagnation et les sensations de courants d'air. Ils permettent aussi de minimiser les consommations d'énergie.

Ces jets peuvent dans certains cas devenir des sources de nuisances sonores par l'apparition de sons auto-entretenus qu'ils peuvent générer [1-10]. Ces sons auto-entretenus se produisent quand l'écoulement interagit avec un obstacle muni de trous ou de fentes placés sur sa trajectoire. Ils sont recherchés dans le cas des instruments de musique, mais sont considérés comme source de gêne auditive dans la plupart des applications techniques ou dans l'habitat.

Les sons auto-entretenus se produisent quand une boucle de rétroaction s'installe entre la zone de contact d'un jet avec une surface fendue et la bouche de soufflage. Le mécanisme de production de ces sons résulte de l'interaction d'une couche de cisaillement de l'écoulement avec les singularités que présente l'obstacle. Ainsi, une onde acoustique est générée dans la zone où les structures tourbillonnaires du jet heurtent la plaque fendue, se propage vers l'amont et produit une modulation de la couche de cisaillement près de la sortie du jet et une amplification des instabilités. Cette boucle de rétroaction maximise le transfert d'énergie du champ aérodynamique vers le champ acoustique et crée une source de bruit aéroacoustique qui peut atteindre des niveaux sonores élevés que les utilisateurs cherchent à réduire ou à supprimer.

Notre étude se situe dans ce contexte et concerne les interactions entre les structures tourbillonnaires générées par l'écoulement du jet venant heurter la plaque fendue et cette même plaque. La détection et le suivi de ces structures tourbillonnaires, permettent l'analyse des corrélations entre leurs déformations et la production sonore générée, et une meilleure compréhension des phénomènes responsables de ces nuisances sonores. Cette étude peut être réalisée grâce à une plate-forme expérimentale utilisant une métrologie spécifique intégrant de la tomographie laser et de la vélocimétrie par images de particules résolue en temps (TR-PIV).

## 2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Un dispositif expérimental, dont le schéma est présenté sur la Figure 1, a été développé pour cette étude. Un compresseur (1) crée en amont un flux d'air dans l'installation. Ce compresseur se trouve dans une autre pièce isolée de la salle expérimentale et il est commandé par un hacheur de fréquence (2) qui permet de contrôler la puissance du moteur afin de régler le débit d'air (et donc la vitesse de soufflage). La vitesse maximale atteinte par le jet à la sortie du convergent est de 33 m/s, ce qui correspond à un nombre de Mach de l'ordre de  $M_0 \approx 0.1$ , donc à une vitesse largement subsonique.

Les flux d'air générés traversent un volume d'amortissement (3) de 1 m<sup>3</sup> qui comprend trois tissus métalliques grossiers, puis un tube (4) de 1250 mm de longueur et de section rectangulaire (190 × 90 mm<sup>2</sup>) équipé de nids d'abeilles et prolongé par un convergent (5). Ce qui permet d'obtenir un jet libre plan de hauteur  $H = 10$  mm et de largeur 190 mm. Le jet ainsi créé débouche dans la salle d'expérimentation et heurte une plaque en aluminium (6) de 4 mm d'épaisseur, munie d'une fente (7) biseautée à 45° de mêmes dimensions que la sortie du convergent et alignée avec celui-ci. La plaque installée pour ces expériences est carrée, de 250 mm de côté. La partie biseautée de la fente est dirigée vers l'aval.

Le confinement de cet écoulement est paramétré par le rapport adimensionnel  $L/H$  (Figure 2) où  $L$  est la distance entre la sortie du jet et l'obstacle et  $H$  la hauteur de la fente ( $H = 10$  mm). On utilisera dans la suite de l'exposé ce rapport de confinement ainsi que des distances rendues adimensionnelles par  $H$ .

La fréquence de coupure du premier mode du conduit formé par le tube et le convergent est évaluée à 900 Hz. La plate-forme expérimentale est équipée d'un système de TR-SPIV (LaVision). Il est composé de caméras rapides : PCO dimax HS2 (capteurs de 1400 x 1050 pixels et de fréquence 7 KHz à 1 Mégapixels), ou Phantom Speed Sense V711 (capteurs de 1280 x 800 pixels et de fréquence 7,5 KHz à 1 Mégapixels), d'un laser Nd : YLF LDY 300 Litron, avec une longueur d'onde de 527 nm et une énergie de 30 mJ par pulse et par cavité, et d'un bras laser de 1800 mm. L'ensemencement de l'écoulement est réalisé grâce à un générateur de particules (particules d'huile d'olive de dimensions 2 à 3 µm). Le dispositif est piloté et synchronisé à l'aide du logiciel Davis 8.2 de LaVision. Pour cette étude, une TR-PIV 2D-2C a été utilisée. Pour chaque configuration étudiée (Reynolds, Confinement), 1000 doublets d'images sont réalisés avec une fréquence d'échantillonnage de 2,5 KHz. La gamme des nombres de Reynolds expérimentés s'étend de 2000 à 23000.

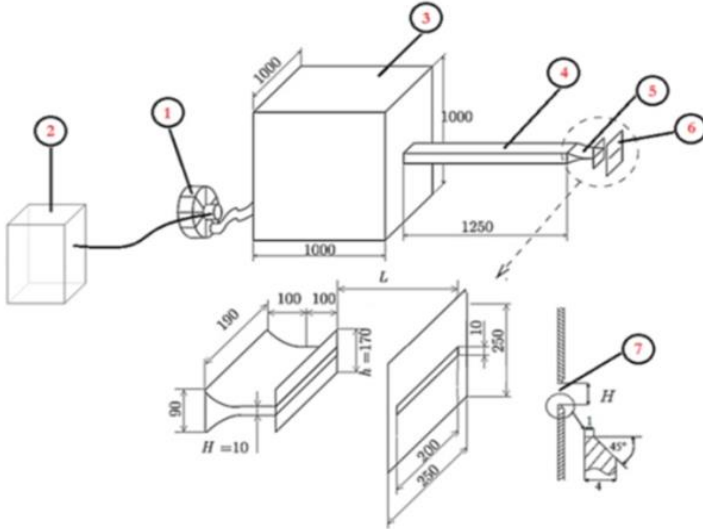


Figure 1 : Dispositif expérimental

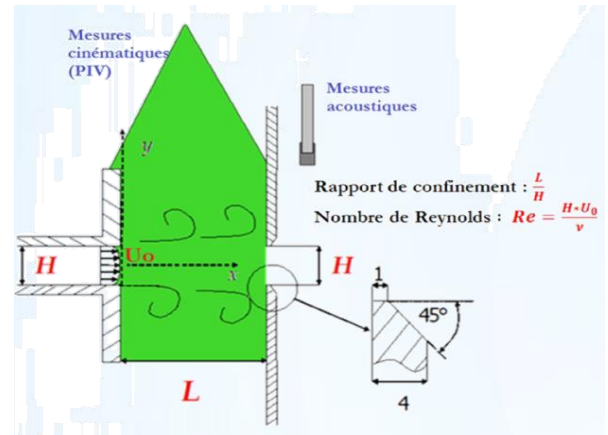


Figure 2 : Rapport de confinement

### 3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Sur la Figure 3, des iso-valeurs sont utilisées pour représenter la vitesse moyenne longitudinale  $V_x$  pour une configuration relative à un  $Re = 4415$  et  $L/H = 4$ . Les profils de vitesses moyennes longitudinales sont extraits pour quatre plans : à la sortie du jet ( $X = 1$  mm), au milieu ( $X = 15$  mm et  $25$  mm) et à proximité de la plaque fendue ( $X = 35$  mm). La forme de ces profils de vitesses moyennes est plate dans la région du noyau potentiel, puis s'arrondie plus loin de la sortie du jet. Pour mettre en évidence la production de sons auto-entretenus d'un jet heurtant une plaque fendue, le champ acoustique rayonné dans la configuration expérimentale étudiée ici est mesuré dans le cas d'une plaque fendue et une plaque pleine au même nombre de Reynolds. Ainsi, les spectres des signaux acoustiques mesurés dans les deux cas sont présentés sur la Figure 4 pour un nombre de Reynolds ( $Re=5435$ ) et un rapport de confinement  $L/H = 4$ .

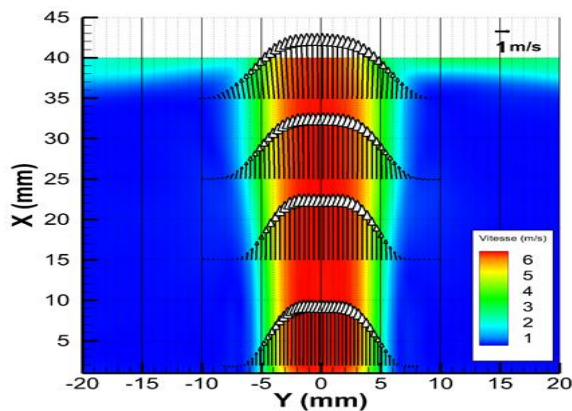


Figure 3 : Profils et Champs moyen :  $V_x$

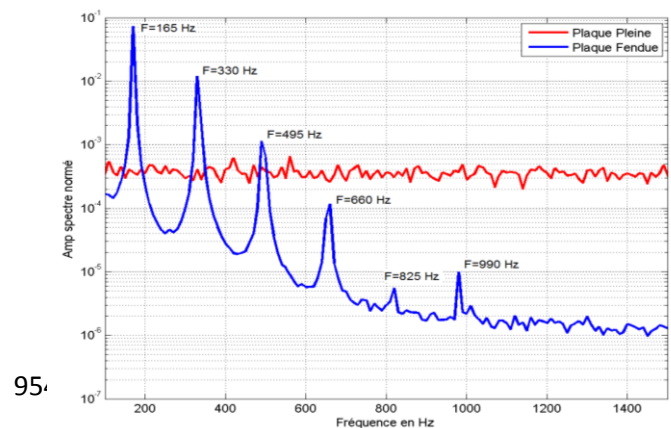


Figure 4 : Spectres des signaux acoustiques pour  $Re=5435$

L'effet de la fente se voit très clairement au niveau des fréquences excitées. Dans le cas d'une plaque pleine, le signal acoustique a un spectre typique d'un bruit blanc ; une fois la fente introduite, le spectre change radicalement et on voit apparaître dans le spectre une fréquence fondamentale  $f_0$  égale à 165 Hz ainsi que ses harmoniques  $2f_0, 3f_0, 4f_0, 5f_0$  et  $6f_0$ . La fréquence fondamentale  $f_0$  la plus énergétique du spectre acoustique est appelée la fréquence du son auto-entretenu. Les sons auto-entretenus générés par l'interaction de l'écoulement avec la fente présente sur la plaque heurtée sont accompagnés de niveaux acoustiques qui peuvent atteindre des valeurs très importantes. Les niveaux de pression acoustique obtenus dans le jet étudié ici sont présentés sur la Figure 5 en fonction du nombre de Reynolds pour un rapport de confinement  $L/H=4$ . Les fréquences des sons auto-entretenus sont également tracées sur cette figure en fonction du nombre de Reynolds.

Ces fréquences fondamentales des sons auto-entretenus présentent des sauts et évoluent linéairement par morceau en fonction du nombre de Reynolds. Quant au niveau acoustique, il augmente quand le nombre de Reynolds augmente avec des pics pour certains nombres de Reynolds. Les pics du niveau acoustique coïncident avec des sauts de fréquences des sons-auto-entretenus. Cette évolution montre une optimisation de la boucle de rétroaction et du transfert d'énergie du champ dynamique au champ acoustique lors d'un saut de fréquence. Dans ce qui suit un confinement expérimental bruyant  $L/H = 4$  est considéré et analysé pour plusieurs nombres de Reynolds présentant des pics du niveau acoustique. Dans le but d'étudier la dynamique tourbillonnaire dans des cas bruyants, on considèrera deux pics du niveau acoustique qui sont accompagnés d'un saut de fréquences des sons auto-entretenus à  $Re=3610$  et  $Re=5435$  comme indiqué sur les figures 5 et 6.

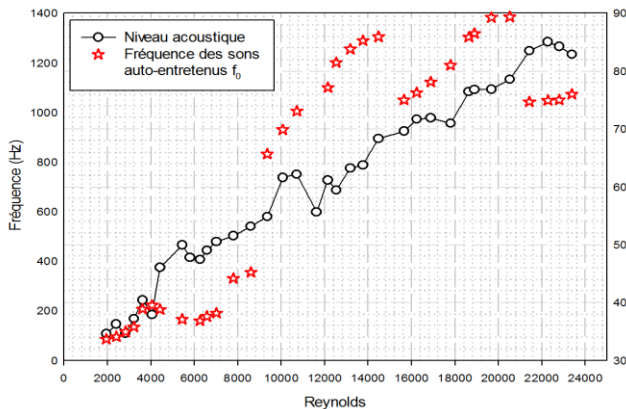


Figure 5 : fréquences et niveaux acoustiques des sons auto-entretenus en fonction du nombre de Reynolds pour  $L/H=4$

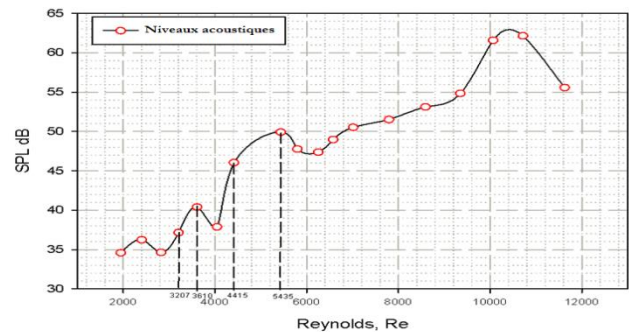


Figure 6 : Niveaux acoustiques des pics étudiés

Ainsi, les deux nombres de Reynolds  $Re=3207$  et  $Re=4415$  qui précèdent les deux nombres de Reynolds bruyants  $Re=3610$  et  $5435$  sont étudiés, afin de comprendre les organisations structurales dans l'écoulement qui optimisent les échanges d'énergie cinétique et acoustiques, et qui maintiennent les boucles des sons auto-entretenus. Donc, nous avons cherché à appréhender la dynamique tourbillonnaire et l'apparition de ces phénomènes. Pour ce faire, pour chaque nombre de Reynolds, nous avons considéré l'évolution des trajectoires des tourbillons ainsi que leur dynamique.

Le post-traitement des mesures PIV (séries de couples d'images PIV) nous permet d'accéder à l'évolution temporelle des champs de vitesses. A l'aide d'un critère de détection et de suivi des structures tourbillonnaires ( $\lambda_2$ ), les trajectoires des tourbillons sont ensuite analysées pour repérer celles qui sont déviées et celles qui sont aspirées par la fente (Figure 7). Sur la figure 7, les champs de  $\lambda_2$ , pour les 4 nombres de Reynolds analysés et présentés sur la figure 6, sont superposés à des instants successifs, ce qui permet de voir les trajectoires des tourbillons (visualisées que sur la moitié du jet vue la symétrie de l'écoulement). Pour les Reynolds



correspondants aux pics du niveau acoustique, les tourbillons empruntent deux trajectoires T1 et T2. Une première qui présente une légère pente et qui s'écarte de l'axe du jet (nommée T1) et une deuxième qui est verticale et serrée vers l'axe du jet (nommée T2). Pour les Reynolds précédents les pics du niveau acoustique, les tourbillons n'empruntent qu'une seule trajectoire, déviée de l'axe du jet (de type T1). Cette analyse montre une nette corrélation entre l'apparition des pics des sons auto-entretenus et la dynamique tourbillonnaire. En effet, c'est bien la déformation et l'aplatissement des structures tourbillonnaires au passage de la fente qui génère un accroissement du bruit. Dès lors, que cette organisation disparaît, on remarque à nouveau une baisse du niveau acoustique.

Cette corrélation entre dynamique tourbillonnaire et apparition de pics de bruits générés par ce type d'écoulement a été confirmé par d'autres analyses. On peut voir sur la figure 8, une confrontation entre la visualisation des centres des tourbillons par le critère  $\lambda_2$  et le signal acoustique. Ainsi, le signal acoustique mesuré à l'aide d'un microphone est présenté sur la Figure 9 (a), pour une durée qui correspond à une période de ses oscillations à  $Re=5435$  et  $L/H=4$ . Les instants reportés en noir sur cette courbe correspondent à des instants de mesures PIV dont les images sont visualisées sur la Figure 9 (b). Le signal acoustique présente une période à deux pics successifs ayant des amplitudes différentes. En observant les instants  $t=3.6$  ms ( $t=3.5$  ms en PIV) sur les Figures a et b, on constate que le premier pic qui a l'amplitude la plus importante se produit quand deux tourbillons arrivent à la plaque de part et d'autre de la fente. Ces deux tourbillons rétrécissent la veine de l'écoulement avant de dévier transversalement tout en provoquant une accélération du jet au niveau de la fente par les effets de rotation. À cet instant ( $t=3.5$  ms), les deux tourbillons dévient dans la direction transversale suivant la trajectoire T1.

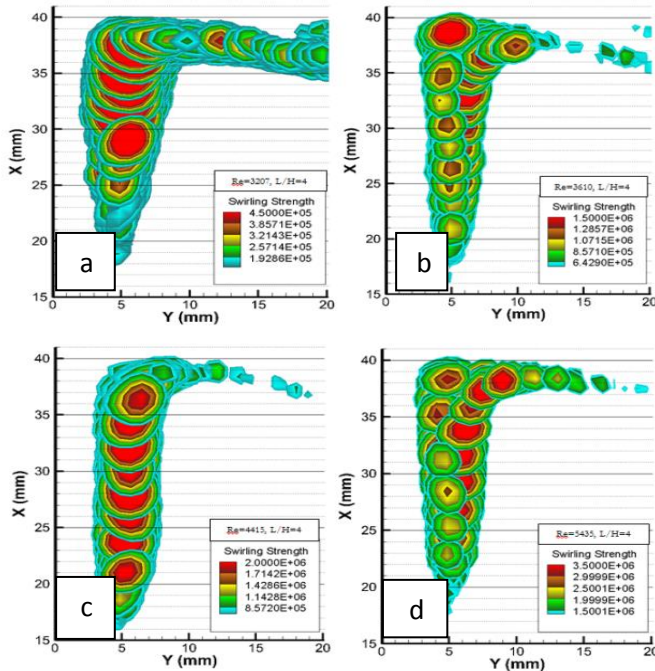


Figure 7 : Champs de  $\lambda_2$  montrant les trajectoires des tourbillons sur  $Y>0$  et pour (a) :  $Re=3207$ , (b) :  $Re=3610$ , (c) :  $Re=4415$  et (d) :  $Re=5435$

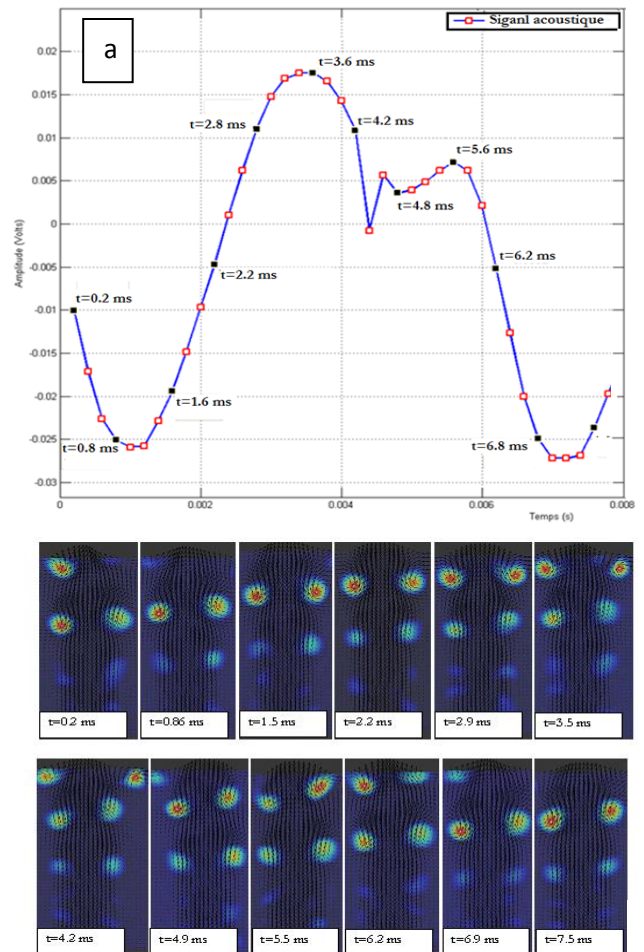


Figure 8 : (a) Signal acoustique.  $Re=5435$  et  $L/H=4$ . (b) Tourbillons identifiés grâce au critère  $\lambda_2$ .  $Re=5435$  et  $L/H=4$

En observant le deuxième pic à l'instant  $t=5.6$  ms du signal acoustique sur la Figure 9a ( $t=5.5$  ms en visualisation PIV sur la Figure 9b), il est possible de voir qu'il s'agit du moment où le tourbillon de droite arrive au niveau du bord de la fente en générant un effet d'accélération sur un seul côté avant d'être aplati puis entraîné par l'écoulement à travers la fente. Ensuite le deuxième tourbillon du côté gauche arrive au niveau de la paroi en retard par rapport au tourbillon de droite et s'éclate sur le bord de la fente pour être disloqué puis entraîné en partie par cette dernière. Les tourbillons à l'instant  $t=5.5$  ms suivent la trajectoire T2 pour s'échapper à travers la fente de la paroi. Ainsi, le minimum du signal acoustique (instants  $t=0.8$  ms et  $t=6.8$  ms) est atteint quand les tourbillons principaux sont loin de la paroi de la plaque. Et les pics du signal acoustique sont atteints quand les tourbillons arrivent au niveau de la fente où ils se déforment pour passer à travers cette dernière et créent un étranglement de l'écoulement.

#### 4. CONCLUSION

Dans cette étude les sons auto-entretenus ont été analysés pour un confinement  $L/H=4$  et différents nombres de Reynolds. L'évolution des fréquences des sons auto-entretenus présente des sauts qui sont accompagnés pour la plupart des cas d'un changement de mode aérodynamique et d'un pic du niveau acoustique. Les trajectoires des tourbillons ont également été étudiées pour des configurations bruyantes et non bruyantes. Ainsi, une corrélation entre la dynamique tourbillonnaire de l'écoulement et les pics acoustiques des sons auto-entretenus a été établie.

#### REFERENCES

- [1] H Assoum, A Sakout, K Abed-Meraïm, Etude de sons auto-entretenus : transferts énergétiques entre l'énergie cinétique turbulente et le champ acoustique, CFA 2014. 22-25 Avril 2014, Poitiers-France.
- [2] H Assoum, A Sakout, K Abed-Meraïm, Etude de la dynamique tourbillonnaire d'un jet plan heurtant une plaque fendue et le champ acoustique généré, CFA 2014. 22-25 Avril 2014, Poitiers-France.
- [3] Assoum H.H., El Hassan M., Abed-Meraïm K., Martinuzzi R. , Sakout A., Experimental analysis of the aero-acoustic coupling in a plane impinging jet on a slotted plate, Fluid Dynamics Research, 45:45503-18 (2013)
- [4] Assoum, H. H., Sakout, a., El Hassan, M., Vetel, J., Alia, A., Abed-Meraïm, K., et al., 2012. Experimental investigation of the vibration of a slotted plate and the acoustic field in a plane impinging jet. Acoustics 2012. 23-27 Avril 2012, Nantes -France.
- [5] El Hassan, M., Assoum, H. H., Sobolik, V., V'etel, J., Abed-Meraïm, K., Garon, A., Sakout, A., Experimental investigation of the wall shear stress and the vortex dynamics in a circular impinging jet. Experiments in fluids, 2012, 52 (6), 1475–1489
- [6] El Hassan, M., Assoum, H., Martinuzzi, R., Sobolik, V., Abed-Meraïm, K., Sakout, A., Experimental investigation of the wall shear stress in a circular impinging jet. Physics of Fluids, 2013, 25, 077101.
- [7] Assoum H.H., Abed-Meraïm K., Sakout A., El Hassan M., Contribution expérimentale à l'étude des interactions entre les structures tourbillonnaires et les vibrations d'une plaque fendue heurtée par un jet plan rectangulaire, *Activités Universitaires en Mécanique de l'Association Française de Mécanique*, 29-31 Août., Rouen, France, 2012.
- [8] Billon A, Valeau V., Sakout A., Two feedback paths for a jet-slot oscillator, Journal of Fluids and Structures, 21 : 121-132 (2005).
- [9] Billon, A., Valeau, V., Sakout, A., Instabilités de l'écoulement produisant le bruit de fente. C. R. Mécanique 332, 557–563 (2004).
- [10] H.H. Assoum, M. El Hassan, K. Abed-Meraïm, A. Sakout, The vortex dynamics and the self sustained tones in a plane jet impinging on a slotted plate, *European Journal of Mechanics B/Fluids* 48 (2014), pp. 231-235