

# Influence du confinement sur la génération du champ acoustique d'un jet impactant une plaque fendue

Marwan ALKHEIR<sup>a</sup>, Jana HAMDI<sup>a</sup>, Kamel ABED-MERAÏM<sup>a</sup>, Hassan ASSOUM<sup>b</sup>, Tarek MRACH<sup>a</sup>, Anas SAKOUT<sup>a</sup>, Laurent Rambault<sup>c</sup>, Eric Etien<sup>c</sup>

a. Laboratory of Engineering Sciences for the Environment LaSIE, Université de La Rochelle, La Rochelle 17000, France. [marwan.alkheir@univ-lr.fr](mailto:marwan.alkheir@univ-lr.fr), [jana.hamdi@univ-lr.fr](mailto:jana.hamdi@univ-lr.fr), [kamel.abed-meraim@univ-lr.fr](mailto:kamel.abed-meraim@univ-lr.fr), [tarek.mrach@univ-lr.fr](mailto:tarek.mrach@univ-lr.fr), [anas.sakout@univ-lr.fr](mailto:anas.sakout@univ-lr.fr)

b. Beirut Arab University-Tripoli Campus, Corniche El Meena, next to the Olympic Stadium, Tripoli, Lebanon. [h.assoum@bau.edu.lb](mailto:h.assoum@bau.edu.lb)

c. Lias - Ensip, Université de Poitiers, 2 rue Pierre Brousse, TSA 41105, 86073 Poitiers Cedex 9 - France. [laurent.rambault@univ-poitiers.fr](mailto:laurent.rambault@univ-poitiers.fr), [erik.etien@univ-poitiers.fr](mailto:erik.etien@univ-poitiers.fr)

## Résumé :

*Lorsqu'un jet impacte une plaque fendue, des bruits peuvent être générés. Pour certaines configurations, au niveau de la fente, l'écoulement interagit avec l'obstacle, pour venir contrôler la dynamique tourbillonnaire de l'écoulement et peut maîtriser le détachement tourbillonnaire dès sa naissance. Ces perturbations dynamiques soulignent le transfert énergétique du champ aérodynamique vers le champ acoustique ainsi généré. Dans le but de visualiser la dynamique tourbillonnaire de l'écoulement et de mettre en évidence les mécanismes responsables des bruits acoustiques, une métrologie laser spécifique a été utilisée : la PIV (vélocimétrie par images de particules). Cette technique de mesures est basée sur l'ensemencement de l'écoulement avec des traceurs adéquats, et à la génération de plans lumineux, à l'aide d'un laser pulsé à deux têtes, afin d'accomplir les plans étudiés. Une caméra rapide phantom V711 est utilisée pour enregistrer les paires d'images ainsi réalisées. Les champs cinématiques en fonction du temps sont calculés par le logiciel « DaVis » de LaVision qui est dédié à la PIV. Dans cette étude, on met en relief les corrélations qui existent entre les pics acoustiques observés pour certaines configurations et la dynamique tourbillonnaire de l'écoulement. Pour ces mesures, des microphones Brüel & Kjaer et une centrale d'acquisition équipée d'une carte NI PXI – 4472 ont été utilisés pour la partie acoustique, et un suivi spécifique des structures tourbillonnaires a été réalisé, avec les critères de détections  $Q$  et  $\lambda_2$ .*

## Abstract :

*When a jet impacts a split plate, noises can be generated. For certain configurations, at the slit, the flow interacts with the obstacle, to come to control the vortex dynamics of the flow and can control the whirling detachment from its birth. These dynamic disturbances emphasize the energy transfer from the aerodynamic field to the acoustic field thus generated. In order to visualize the vortex dynamics of the flow and to highlight the mechanisms responsible for acoustic noises, a specific laser metrology was used: PIV (Particle image velocimetry). This measurement technique is based on the seeding of the flow with suitable tracers, and the generation of light planes, using a pulsed laser with two heads, in order to accomplish the plans studied. A phantom V711 fast camera is used to record the pairs of images thus*

produced. The kinematic fields as a function of time are calculated by the software "DaVis" of LaVision which is dedicated to the PIV. In this study, we highlight the correlations that exist between the acoustic peaks observed for certain configurations and the swirling dynamics of the flow. For these measurements, Brüel & Kjør microphones and an acquisition unit equipped with a NI PXI-4472 board were used for the acoustic part, and a specific follow-up of the vortex structures was carried out, with the detection criteria  $Q$  and  $\lambda_2$ .

**Mots clefs : jet impactant ; aéroacoustique ; dynamique tourbillonnaire ; PIV (vélocimétrie par images de particules).**

## 1 Introduction

Dans certaines configurations de confinement et de dynamique tourbillonnaire, les conditions sont réunies pour donner naissance à des nuisances sonores intense qu'on appelle sifflements. Ce sifflement se produit à cause de la naissance et de l'installation d'une boucle de son auto-entretenu qui peut être parfois inconfortable. Dans le cas d'un jet impactant une plaque fendue, pour un nombre de Reynolds donné, pour certains rapports de confinement, il y a un transfert énergétique du champ dynamique vers le champ acoustique d'où la naissance de ce type de sifflement. Des études relatives à ce sujet ont fait l'objet de nombreuses publications [4], [5].

D'abord, dans cette étude on a fait évoluer le rapport de confinement pour un nombre de Reynolds donnée et enregistré les niveaux acoustiques ainsi générés. Après la mise en exergue des pics acoustiques, on a appliqué la technique PIV pour comprendre ce qui se passe au niveau de la dynamique de l'écoulement lors de ces pics. Suite à l'analyse de la dynamique de l'écoulement et à la comparaison des pics acoustiques avec les structures tourbillonnaires de l'écoulement, on peut établir les corrélations qui peuvent exister.

Ainsi, on a analysé les corrélations entre les boucles de sons auto-entretenu et les variations des structures tourbillonnaires de l'écoulement établis. Pour cela, on a utilisé un dispositif expérimental qui permet de générer les écoulements à étudier pour des mesures par imagerie de particules (PIV). Dans cette présentation, des rapports de confinements  $\frac{L}{H}$  compris entre 1 et 11 ont été utilisées et un nombre de Reynolds  $Re = 5684$  a été expérimenté.

## 2 Dispositif Expérimental

Le dispositif expérimental qui permet de générer l'écoulement et de contrôler ses différentes paramètres  $(Re, \frac{L}{H}, \dots)$  est représenté sur la Figure 1. Ce dispositif est constitué d'un compresseur (3) situé à l'extérieur du bâtiment qui sert à comprimer l'air qui sera stabiliser dans la chambre de stabilisation (2) de volume  $1m^3$ . L'air passe dans un tube équipé d'un nid d'abeilles qui sert à ajuster la colinéarité les lignes de courant de l'écoulement. Par suite les flux d'air sortent du jet par l'intermédiaire d'une fente rectangulaire ( $H = 1\text{ cm}$ ,  $l = 19\text{ cm}$ ), située à l'aval d'un convergent de longueur 20 cm avec un rapport de forme de  $\frac{1}{9}$ . Ce jet heurte une plaque fendue (13) placée à une distance  $L$  juste en face de la sortie de la buse et de même dimensions que celle-ci. Cette distance  $L$  est contrôlée par le système de déplacement horizontal (18), par suite on peut gérer le rapport de confinement entre  $0 < \frac{L}{H} < 42$ .

Pour les mesures PIV, le dispositif expérimental est constitué d'un laser Nd : YLF LDY 304-PIV fabriqué par Litron à deux têtes de 30 mJ/pulse à la fréquence 1 KHz, et de longueur d'onde  $\lambda = 527\text{ nm}$ . Les fréquences des pulses laser peuvent aller jusqu'à 20 KHz avec une énergie décroissante. Une caméra

Phantom V711 de résolution  $1280 \times 800$  pixels à  $7.5 \text{ KHz}$  est placée perpendiculairement à la nappe laser (8) créée par le générateur de nappe (9). Les traceurs utilisés lors de l'ensemencement sont des gouttelettes d'huile d'olive générées par un appareil spécifique à air comprimé et injectées dans la chambre de stabilisation (2), ces gouttelettes ont des diamètres de  $1.5 \mu\text{m}$  environ. Ces mesures nous permettent d'obtenir deux composantes ( $V_x$  et  $V_y$ ) du champ cinématique de l'écoulement à tout instant avec la fréquence de  $1 \text{ KHz}$  qu'on a choisi selon la fréquence de passage des tourbillons. Pour chaque couple d'images de l'acquisition réalisée, le champ cinématique est calculé à partir du  $\Delta t$ , choisi par l'opérateur de sorte que le déplacement des particules entre deux captures successives ne dépasse pas les 10 pixels dans n'importe quel point du champ de vision de la caméra. Par l'intermédiaire du logiciel Davis de LaVision, on peut accéder à la synchronisation entre les pulses du laser et celle de la caméra pour l'obtention de la lumière dans les deux captures de la caméra. Pour le traitement des images, on a utilisé la version Davis 8.3.0. On a appliqué l'algorithme de corrélation multifenêtres adaptative. La taille final des fenêtres d'interrogation est de  $64 \times 64$  pixels avec une superposition entre ces fenêtres de 50%. Pour les mesures du champs acoustiques, le dispositif expérimental comporte un microphone *B&K 4189 – A – 021* dont la sensibilité est compris entre  $6 \text{ Hz}$  et  $20 \text{ KHz}$ . Le microphone est mis derrière la plaque fendue mais loin du champ de l'écoulement pour empêcher les vibrations de la paroi du microphone par l'air éjecté. La fréquence d'acquisition des pressions acoustiques est de  $15 \text{ KHz}$ . Les mesures dynamiques et acoustiques sont réalisées simultanément en utilisant respectivement le logiciel Davis 8.3.0 de LaVision et le logiciel LabVIEW avec la carte dynamique d'acquisition de données : NI PXI – 4472 de National Instruments.

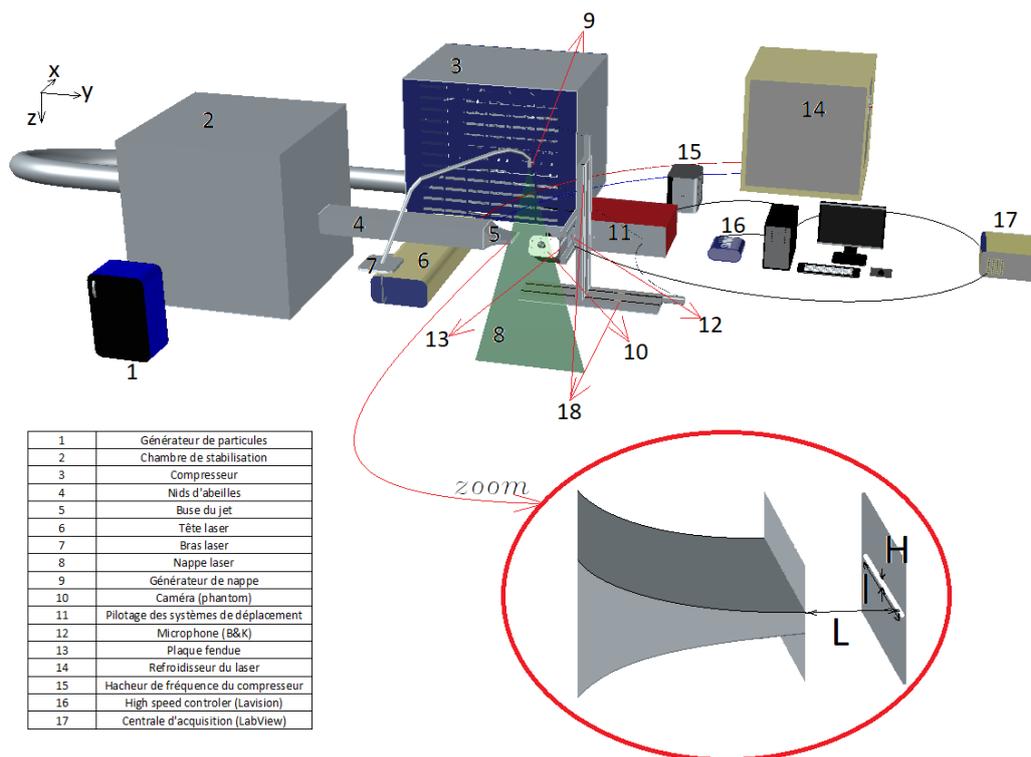


Figure 1 : Dispositif expérimental.

### 3 Résultats

La Figure 2 représente les variations des niveaux acoustiques pour un nombre de Reynolds  $Re = 5684$  et pour des rapport de confinement  $\frac{L}{h}$  allant de 1 à 11. Cette figure met en relief des pics acoustiques qui s'impose, ce qui nous a poussé à étudier les structures tourbillonnaires de l'écoulement dans les mêmes

conditions. Pour cela, on a choisi sur la Figure 2 trois points, les points (A et B) qui ont le même niveau acoustique à peu près et le points C qui représente une pic acoustique, pour analyser les différences entre les structures tourbillonnaires dans le but de comprendre l'origine de ces pics acoustiques.

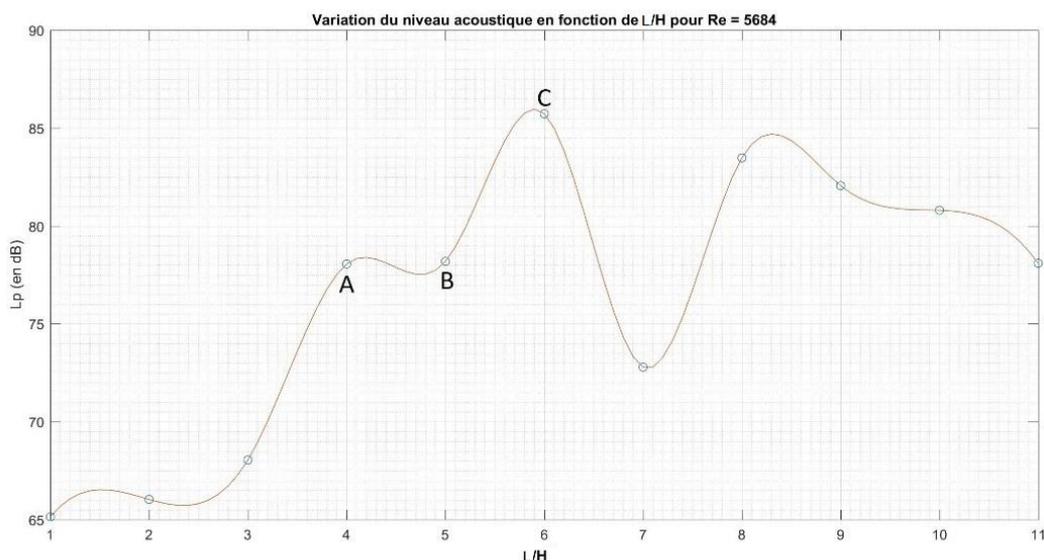


Figure 2 : Variation du niveau acoustique pour différents rapports de confinement  $\frac{L}{H}$  et pour un nombre de Reynolds  $Re = 5684$ .

La Figure 3-a , la Figure 3-b et la Figure 3-c montrent bien la organisation différente des structures tourbillonnaires pour le même nombre de Reynolds  $Re = 5684$  pour trois rapport de confinement  $\frac{L}{H} = 4, 5, 6$ . On remarque que l'arrivée simultanée des structures tourbillonnaires au niveau de la fente les pousse à s'écarter de celle-ci et à s'échapper dans l'écoulement pariétale. Alors que l'arrivée alternée, génère plus de passage par la fente du fait de la place qu'à la structure tourbillonnaire et par conséquent des déformations en bien lors de ce passage, une intensité sonore plus élevée

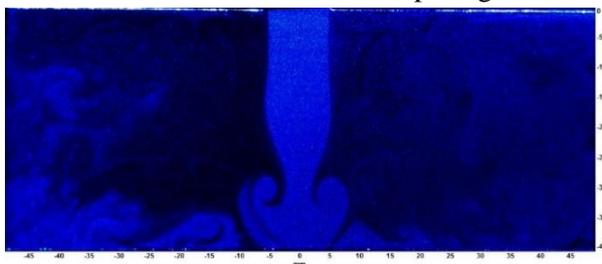


Figure 3-a : Structure tourbillonnaire pour  $\frac{L}{H} = 4$  et  $Re = 5684$

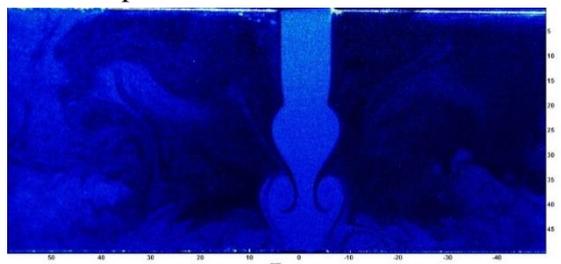


Figure 3-b : Structure tourbillonnaire pour  $\frac{L}{H} = 5$  et  $Re = 5684$

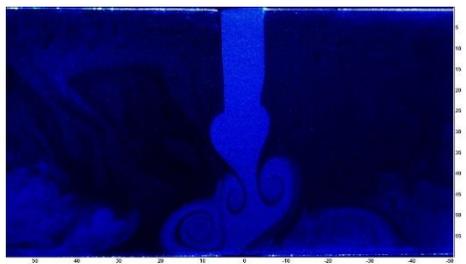


Figure 3-c : Structure tourbillonnaire pour  $\frac{L}{H} = 6$  et  $Re = 5684$

Ainsi, on a décidé de s'intéresser à ces structures tourbillonnaires et à leurs trajectoires afin de déterminer les éventuelles corrélations qui existent entre les structures tourbillonnaires et les pics acoustiques.

Puisque les rapport de confinement  $\frac{L}{H} = 4$  et 5 pour  $Re = 5684$  représentent le même niveau acoustique et les mêmes représentations des structures tourbillonnaires, nous ne comparons que les  $\frac{L}{H} = 4$  et 6 dans la suite de cette étude.

De nombreuses études ont été réalisées en ce qui concerne la détection et le suivi des structures tourbillonnaires [1].

La vorticité est un bon outil mathématique pour le suivi des structures tourbillonnaires, mais cet outil peut confondre les phénomènes de cisaillement et les tourbillons ce qui perturbe l'identification des tourbillons. Ainsi, d'autres études ont été réalisées ([6], [7][8], [9]) qui montre que la vorticité n'est pas le meilleur outil pour l'identification des tourbillons, et la distinction entre la couche de cisaillement et les structures tourbillonnaires. D'autres outils ont été inspirés pour suppléer à cette problématique, notamment les critère Q ([10]) et le critère  $\lambda_2$  [8].

Pour identifier les vortex, les analyses mathématiques sont basées sur l'exploration du tenseur de gradient de vitesses  $\nabla u = S + X$ . Où la partie des déformations est représentée par la partie symétrique  $S$  du tenseur de vitesse, tandis que le tenseur de vorticité est représenté par la partie antisymétrique  $X$  du tenseur de gradient de vitesses, où  $S_{ij} = \frac{(u_{i,j} + u_{j,i})}{2}$  et  $\Omega_{ij} = \frac{(u_{i,j} - u_{j,i})}{2}$ , la structure tourbillonnaire sera définie comme la zone de fluide associée aux deux valeurs propres négative de  $S^2 + \Omega^2$ . Puisque le tenseur  $S^2 + \Omega^2$  est symétrique, alors les valeurs propres associées sont des réels, si on considère qu'elles sont classées comme suit  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ , cela nous donne que  $\lambda_2 \leq 0$  dans la structure tourbillonnaire, c'est pour cela la critère  $\lambda_2$  est utilisée pour l'identification des tourbillons par un minimum de pression local [8]. La description de ce critère a été fait par [11].

Ainsi, la Figure 4-a et la Figure 4-b montrent la parité et la disparité des tourbillons tout en utilisant la vorticité, en plus la Figure 4-a vérifie que le passage des tourbillons se fait d'une façon parallèle tandis que la Figure 4-b fait apparaître le passage d'un tourbillon par la fente et que son dual passe le long de la paroi de la plaque. Le suivi des tourbillons par la vorticité est bruité par le cisaillement et par l'écoulement pariétal comme on peut le voir sur les figures ci-dessous.

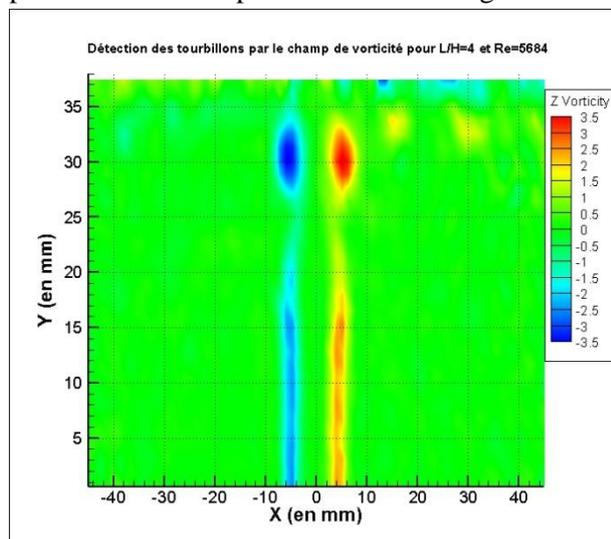


Figure 4-a : Suivi des structures tourbillonnaires par le champ de la vorticité pour  $\frac{L}{H} = 4$  et  $Re = 5684$

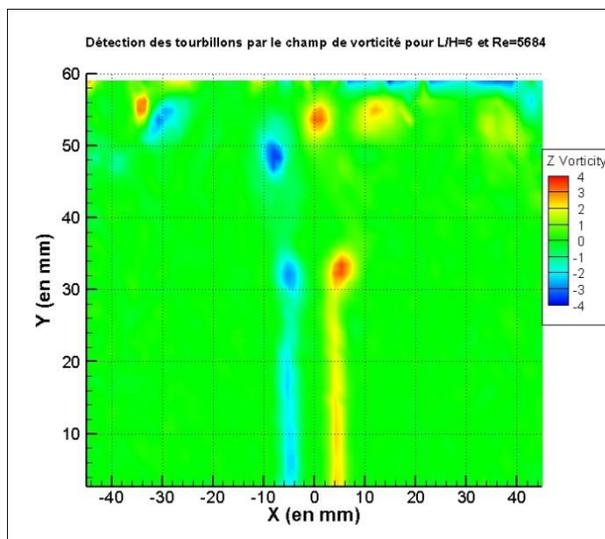


Figure 4-b : Suivi des structures tourbillonnaires par le champ de la vorticité pour  $\frac{L}{H} = 6$  et  $Re = 5684$

Par suite, on utilise le critère Q et le critère  $\lambda_2$  pour la détection des tourbillons. La Figure 5-a et la Figure 5-b permettent l'identification des tourbillons tout en utilisant le critère  $\lambda_2$ .

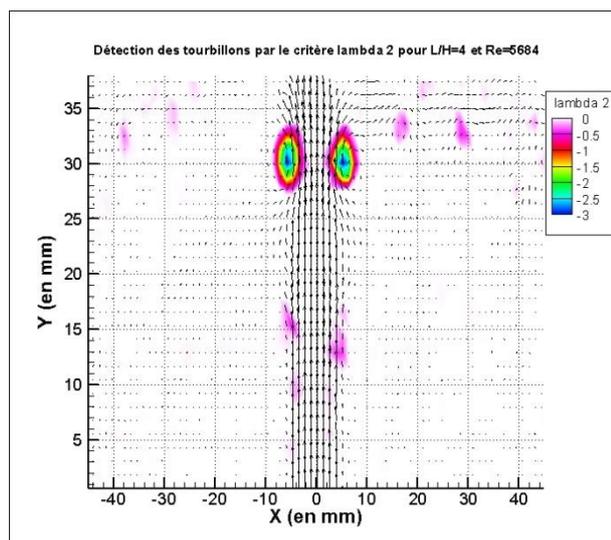


Figure 5-a : Identification des structures tourbillonnaires par le critère  $\lambda_2$  pour  $\frac{L}{H} = 4$  et  $Re = 5684$ .

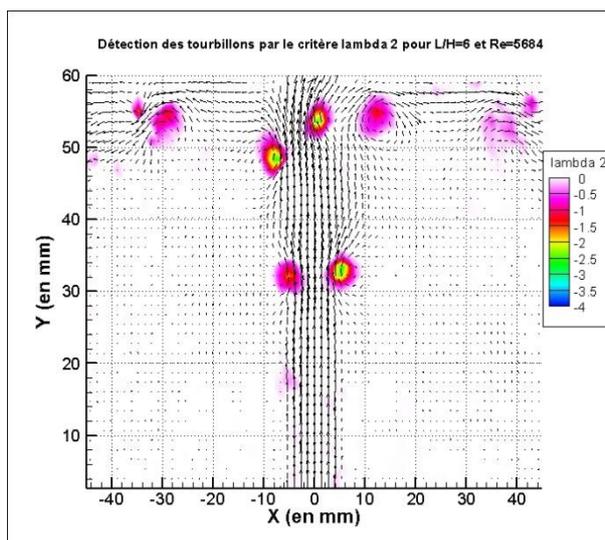


Figure 5-b : Identification des structures tourbillonnaires par le critère  $\lambda_2$  pour  $\frac{L}{H} = 6$  et  $Re = 5684$ .

La Figure 5-a représente les structures tourbillonnaires dont la parité des tourbillons est bien visible, par contre la Figure 5-b montre la disparité des structures de Kelvin-Helmholtz qui avance vers la plaque et une fois que les structures tourbillonnaires sont au niveau de la plaque, il y a un tourbillon qui se dévie vers la paroi de la plaque et l'autre passe par la fente de la plaque et chaque fois la déviation sera d'un côté d'une façon alternative. Les vecteurs représentés dans les deux figures représentent le champ cinématique instantané de l'écoulement.

L'analyse des structures tourbillonnaires avec le critère Q dans la Figure 6-a et la Figure 6-b nous donne exactement les mêmes phénomènes mais les valeurs négatives représentées lors du critère  $\lambda_2$  deviennent des valeurs positives pour le critère Q. Donc on peut distinguer que en 2 dimension (2D) les critères Q et  $\lambda_2$  donnent les mêmes résultats de point de vue compréhension de la dynamique des structures tourbillonnaires.

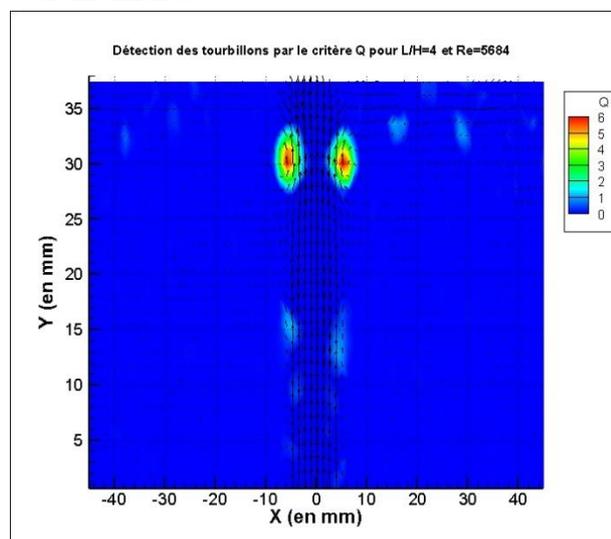


Figure 6-a : Identification des structures tourbillonnaires par le critère Q pour  $\frac{L}{H} = 4$  et  $Re = 5684$ .

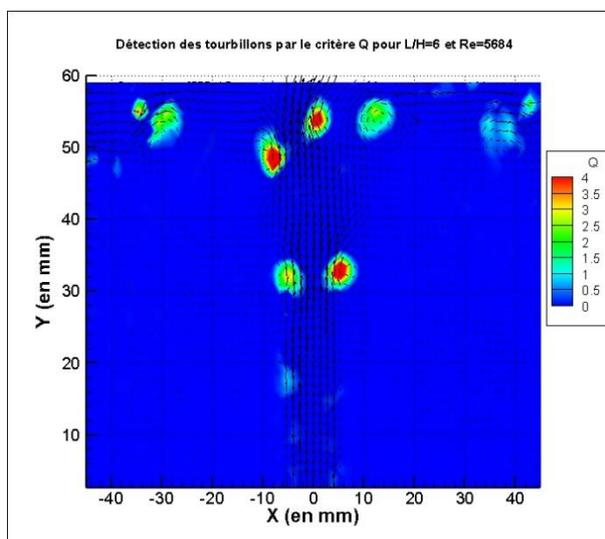


Figure 6-b : Identification des structures tourbillonnaires par le critère Q pour  $\frac{L}{H} = 6$  et  $Re = 5684$ .

Puisque le suivi des structures tourbillonnaires est bien représenté par les critères Q et  $\lambda_2$ , on a utilisé le critère Q pour le suivi des trajectoires des tourbillons.

La Figure 7-a et la Figure 7-b montrent la différence entre les deux trajectoires des tourbillons pour le même nombre de Reynolds  $Re = 5684$  pour les rapports de confinement  $\frac{L}{h} = 4$  et  $\frac{L}{H} = 6$ . La Figure 7-a vérifie que les tourbillons suivent une seule trajectoire celle qui passe parallèlement aux parois de la plaque

fendue, tandis que la Figure 7-b montre deux trajectoires différentes, une qui passe par la fente et l'autre se dévie parallèlement à la paroi de la plaque, où chaque pair de tourbillons lorsqu'il arrive au niveau de la fente, l'un d'eux passe par la fente par contre le suivant est dévié le long de la paroi de la plaque et ainsi de suite ce phénomène est appelé « battement ».

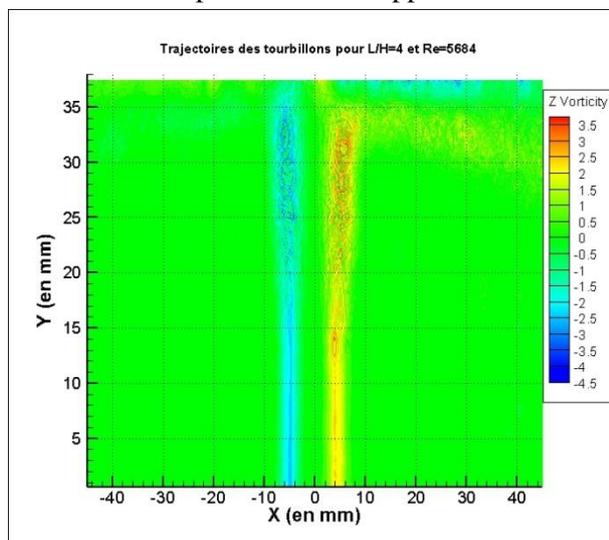


Figure 7-a : Représentation de la trajectoire des structures tourbillonnaires pour  $\frac{L}{H} = 4$  et  $Re = 5684$  par le critère  $Q$ .

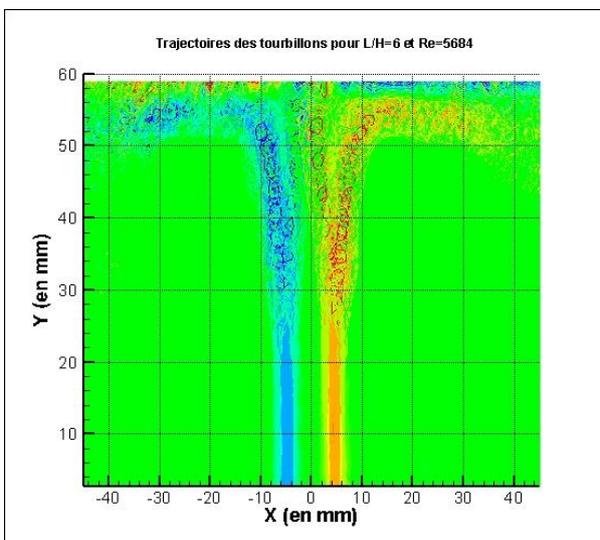


Figure 7-b : Représentation de la trajectoire des structures tourbillonnaires pour  $\frac{L}{H} = 6$  et  $Re = 5684$  par le critère  $Q$ .

L'étude des trajectoires est représentée ci-dessus dans la Figure 7 qui était confirmé par le suivi des centres des structures tourbillonnaires au cours du temps. Ainsi, la Figure 7-a visualise les déplacements des structures tourbillonnaires au cours du temps pour un rapports de confinement  $\frac{L}{H} = 4$  et pour le nombre de Reynolds  $Re = 5684$ .

Par contre, la Figure 7-b représente le suivi temporel des centres des tourbillons pour un rapport de confinement  $\frac{L}{H} = 6$  et  $Re = 5684$ , les résultats montrent que pour ces paramètres, il y a deux trajectoires indépendantes la première qui passe par la fente et la deuxième qui passe sur la paroi.

## 4 Conclusion et perspectives

On a étudié le couplage aéroacoustique d'un jet plan impactant une plaque fendue, pour  $\frac{L}{h} = 4, 5$  et  $6$  pour  $Re = 5684$ . Pour cela, on a utilisé les critères  $Q$ ,  $\lambda_2$  et la vorticité, pour identifier les structures tourbillonnaires. Le suivi des structures tourbillonnaires a permis de connaître la cause du pic acoustique. En perspectives, on envisage dans le but de la réduction des nuisances sonores des jets impactant une plaque fendue, l'instauration d'un contrôle permettant d'agir sur l'origine du bruit qui peut être très gênant pour les utilisateurs.

## 5 Remerciement

Les auteurs souhaitent remercier la communauté européenne et la région nouvelle Aquitaine pour leur soutien financier à travers les Fonds européen de développement régional (FEDR).

## Références

- 
- [1] M. Alkheir, H. Assoum, K. Abed-Meraïm, T. Mrach, J. Hamdi, L. Elsoufi, H. Skaf, A. Sakout, Experimental investigation of the correlation between the dynamics of an impinging jet on a slotted plate and the acoustic field generated, MATEC Web Conf. Volume 261, (2019) 03003.
  - [2] H.H. Assoum, M. El Hassan, K. Abed-Meraïm, R. Martinuzzi, A. Sakout, Experimental analysis of the aero-acoustic coupling in a plane impinging jet on a slotted plate, Fluid Dynamics Research 45 (4), (2013) 045503.
  - [3] H. H. Assoum, A. Sakout, K. Abed-Meraïm, A. Alia, M. El Hassan, J. Vetel, Experimental investigation of the vibration of a slotted and a non-slotted plates and the acoustic field in a plane impinging jet, EURONOISE 2012 - Ninth European Conference on Noise Control, Prague, Czech Republic, ( 2012) pp. 801-806 .
  - [4] D. Rockwell, J.-C. Lin, P. Oshkai, M. Reiss and M. Pollack: Shallow cavity flow tone experiments : Onset of locked-on states. Journal of Fluids and Structures, (2003), 17(3):381–414.
  - [5] W.K. Blake and A. Powell: The development of contemporary views of flow-tone generation. In Recent advances in aeroacoustics. Springer Verlag, New York, (1986) 247–325.
  - [6] Cucitore, R., Quadrio, M., Baron, A. On the effectiveness and limitations of local criteria for the identification of a vortex. Eur. J. Mech. B/Fluids 18. (1999) 261–282.
  - [7] Kida, S., Miura, H. Identification and analysis of vertical structures. Eur. J. Mech. B/Fluids 17. (1998) 471– 488.
  - [8] Jeong, J., Hussain, F. On the identification of a vortex. J. Fluid Mech. 285. (1995) 69–94.
  - [9] R.C. Strawn, D. N. Kenwright, and J., Ahmad (1999). Computer Visualisation of Vortex, wake Systems. AIAA Journal, 37(4), (1999) 511-512.
  - [10] J.C.R. Hunt, A. Wray, and P. Moin, « Eddies, stream and convergence zones in turbulent flows », Center for Turbulence Research Report, (1998) CTR-S88.
  - [11] Zhou, J., Adrian, R.J., Balachandar, S., Kendall, T.M. Mechanisms for generating coherent packets of hairpin vortices in channel flow. J. Fluid Mech. 387. (1999) 353–396.
  - [12] A. Koched, M. Pavageau, F. Aloui, Détection expérimentale de structures tourbillonnaires au sein d'un jet plan en impact, 19<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, Marseille (2009).