

## Sifflements produits par un jet plan accordé heurtant une plaque fendue

Alexis Billon, Martin Glessler, Vincent Valeau & Anas Sakout

Université de La Rochelle  
Laboratoire d'Etude des Phénomènes de Transfert Appliqués au Bâtiment  
av. M. Crépeau 17042 La Rochelle Cedex  
abillon@univ-lr.fr

### Résumé :

*Sous certaines conditions défavorables, les bouches de soufflage des circuits de ventilation peuvent émettre des sifflements désagréables. Ce phénomène, modélisé par l'impact d'un jet plan sur une plaque fendue, est étudié expérimentalement. Les fréquences des deux instabilités principales, l'instabilité de la couche de cisaillement et le mode de battement du jet, de l'écoulement sans obstacle permettent de définir le domaine d'existence de la fréquence la plus énergétique des sons auto-entretenus produits. Le cas particulier d'un jet accordé est étudié. Cette donnée permet d'anticiper la stratégie de réduction la plus adaptée.*

### Abstract :

*Under unfavorable conditions, ventilation outlets can emit disturbing whistlings. This phenomenon, modeled by the impact of a free plan jet on a slotted plate, is experimentally studied. The two main instabilities, the shear layer instability and the jet column mode, of the free without obstacle delimits the maximal and minimal values of the most energetic frequency of the produced self-sustained tones. The particular case of a tuned jet is studied. This allows to anticipate the most suitable noise reduction strategy.*

**Mots-clefs :** turbulence, aéroacoustique, jet accordé, sons auto-entretenus, bruit de fente

### 1 Introduction

Dans certaines conditions défavorables, les bouches de soufflage des circuits de ventilation ou de climatisation peuvent émettre des sifflements gênants pour les usagers. Cette production sonore, résultant de l'impact d'un écoulement cisailé sur un obstacle, appartient à la famille des sons auto-entretenus (SAE) [1]. Cette production sonore est caractérisée par une boucle d'auto-entretien robuste : la source aéroacoustique contrôle le détachement tourbillonnaire de l'écoulement.

Si l'écoulement est plan, l'instabilité de l'écoulement responsable de la production sonore peut être, soit le mode de battement du jet [2], soit l'instabilité de la couche de cisaillement [3]. Celle-ci est dominante en amont de l'extrémité du cône potentiel (mesurant entre 4 et 8 hauteurs de jet [4]). Sa fréquence, notée  $f_n$ , peut être évaluée, pour un profil de vitesse de la couche de cisaillement de type tangente hyperbolique par le nombre de Strouhal suivant [5] :

$$St = \frac{f_n \cdot \theta}{U_0 \max} \approx 0,017 \quad (1)$$

où  $U_0 \max$  est la vitesse maximale de l'écoulement.  $\theta$ , l'épaisseur de couche de quantité de mouvement, est définie par :

$$\theta = \int_0^\delta \frac{U_0(z)}{U_0} \left(1 - \frac{U_0(z)}{U_0 \max}\right) dz \quad (2)$$

où  $\delta$  est l'épaisseur de la couche de cisaillement et  $U_0(z)$ , la vitesse de l'écoulement selon  $z$ , l'axe vertical. La fréquence du mode de battement du jet,  $f_j$ , dominant en aval du cône potentiel, peut être évaluée par la relation suivante [6] :

$$St_j = \frac{f_j \cdot H}{U_{0max}} \approx 0,25 \quad (3)$$

où  $H$  est la hauteur du jet. Dans certains cas, la fréquence du mode de battement du jet est une fraction entière de la fréquence de la couche de cisaillement. Le jet est qualifié d'accordé [7]. Le mode de battement est alors expliqué par un scénario d'appariements successifs des tourbillons [8]. Mais généralement, il n'existe pas de relation simple entre les deux fréquences d'instabilité. Dans cette étude, la configuration d'une bouche de soufflage est approchée par un jet plan heurtant une plaque, configuration appelée bruit de fente [1]. Les SAE émis seraient le résultat de l'amplification de l'instabilité de la couche de cisaillement [9] mais aucune preuve expérimentale n'a été fournie. De plus, cette configuration rend possible l'excitation des résonances du conduit d'où débouche le jet [10] qui contrôle alors la fréquence du détachement tourbillonnaire et renforce le niveau sonore émis de l'ordre de 20 dB. La connaissance de l'instabilité régissant les SAE est importante afin de pouvoir prévoir leur fréquence d'émission et ainsi anticiper la stratégie de réduction la plus adaptée. De plus, elle permet de prévoir aussi la possibilité d'un couplage avec un résonateur acoustique situé à proximité et ainsi la nécessité de le traiter préventivement. Dans un premier temps, l'installation expérimentale est présentée. Les fréquences des deux instabilités de l'écoulement sont ensuite calculées et comparées avec celles des SAE. Enfin, un appariement tourbillonnaire responsable de la fréquence du mode de battement est observé.

## 2 Installation expérimentale

Une soufflante crée un flux d'air qui traverse un volume d'amortissement puis un tube et un convergent. Le jet, possédant un profil de type tangente hyperbolique, d'une hauteur  $H = 10$  mm et de 190 mm de largeur ainsi créé heurte une plaque munie d'une fente, à bords biseautés, de dimensions identiques à la sortie du convergent et alignée avec celui-ci (Fig. 1a).

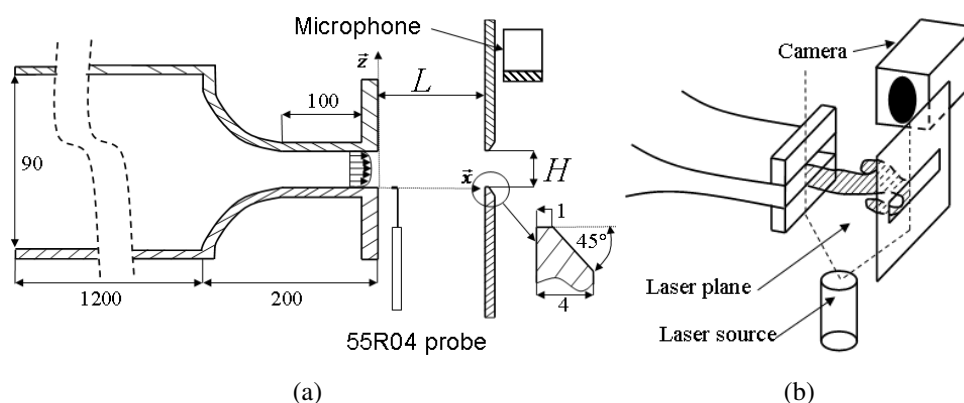


FIG. 1 – Schéma de l'installation expérimentale et du dispositif de visualisation (dimensions en mm)

La distance convergent/plaque, notée  $L$ , varie grâce à un système de déplacement (précis à 0,05 mm). La vitesse du jet est mesurée à l'aide de sondes mobiles à fil chaud DANTEC 55R04.

La vitesse maximale du jet est de 32 m/s et un nombre de Reynolds lié au jet est construit sur  $H$ . La pression acoustique est mesurée avec un microphone ACO Pacific 7013. La fréquence fondamentale  $f_0$  des SAE est définie comme la fréquence la plus énergétique du spectre de pression. Un système de visualisation (Fig. 1b) est constitué d'une caméra Nanosense MKII 5kHz et d'un laser Nanopower 4W/795 nm, l'écoulement étantensemencé avec de l'huile de paraffine chauffée.

### 3 Fréquences des SAE

Dans un premier temps, les fréquences d'instabilité sont évaluées pour le jet libre sans l'obstacle : la plaque est retirée de l'écoulement. La fréquence de l'instabilité naturelle de la couche de cisaillement  $f_n$  est évaluée à l'aide de la relation (1) à l'aide de profils de vitesse expérimentaux. La fréquence du mode de battement du jet  $f_j$  est calculée en utilisant la relation (3).

Dans un second temps, pour un nombre de Reynolds fixé, les fréquences fondamentales minimale et maximale des SAE ont été recherchées en variant progressivement la distance  $L$  de la plaque. Les évolutions de  $f_n$  et de  $f_j$ , ainsi que les fréquences maximale ( $\triangle$ ) et minimale ( $\square$ ) des SAE en fonction du nombre de Reynolds sont présentés en Fig. 2.

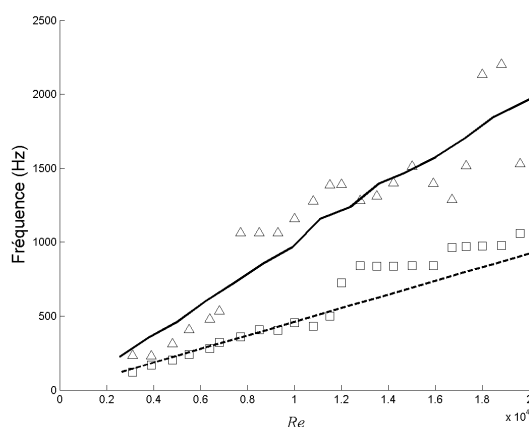


FIG. 2 – Evolutions de la fréquence naturelle de la couche de cisaillement (-), du mode de battement du jet (-), maximale ( $\triangle$ ) et minimale ( $\square$ ) des SAE en fonction de  $Re$

Le domaine fréquentiel des SAE est délimité par les fréquences des deux instabilités,  $f_n$  et  $f_j$ , principales du jet. De plus, les plus basses fréquences des SAE, proche de  $f_j$ , sont mesurées pour  $L > 4H$  (soit une distance supérieure à la longueur du cône potentiel), distance pour laquelle l'instabilité dominante le mode de battement. De même, la fréquence maximale des SAE, proche de  $f_n$ , est obtenue pour lorsque  $L < 2H$ , distance pour laquelle l'instabilité dominante de l'écoulement est celle de la couche de cisaillement. La connaissance la dynamique de l'écoulement sans obstacle permet ainsi de prévoir le domaine d'existence de la fréquence fondamentale des SAE produits par la présence de la plaque fendue.

### 4 Appariement tourbillonnaire

La fréquence  $f_j$  du mode de jet est environ deux fois inférieure à la fréquence  $f_n$  de la couche de cisaillement (Fig. 2) et serait donc le résultat d'un appariement tourbillonnaire. L'amplitude

des fluctuations de vitesse est mesurée entre la sortie du jet et la plaque fendue le long de l'axe  $x$  (Fig. 1). La Fig. 3 présente un résultat typique, obtenu pour  $L/H = 4,4$  et  $Re = 1,18 \times 10^4$ . Les fréquences observées sont 956 Hz et 480 Hz (fréquence fondamentale des SAE).

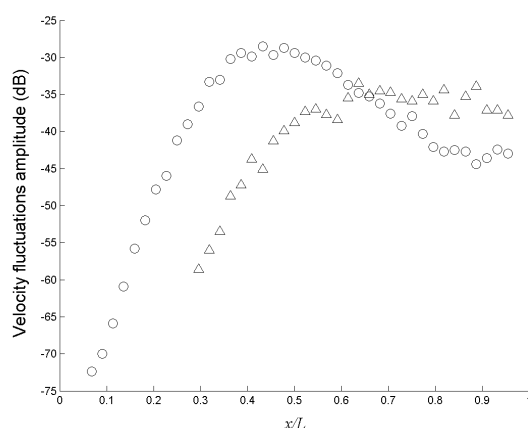


FIG. 3 – Evolutions de l'amplitude des fluctuations de vitesse à 956 Hz ( $\Delta$ ) et 480 Hz ( $O$ ) en fonction de  $x/L$

L'amplitude des fluctuations à 956 Hz augmente jusqu'à  $x/L = 0,4$  puis diminue progressivement alors que celle mesurée à 480 Hz apparaît plus en aval ( $x/L = 0,3$ ), devient plus énergétique à  $x/L = 0,6$  et croît jusqu'à sa saturation vers  $x/L = 0,8$ . Ces résultats sont en bon agrément avec ceux de [8]. La croissance de l'amplitude de la sousharmonique (ici 480 Hz) est associée avec une décroissance de celle de la fréquence fondamentale (ici 956 Hz), montrant le transfert d'énergie de la fréquence fondamentale vers la sousharmonique.

Pour une configuration similaire ( $L/H = 4,6$  et  $Re = 1,18 \times 10^4$ ), des visualisations (Fig. 4) ont été réalisées à différentes phases d'un même cycle acoustique  $T = 2,1$  m/s ( $f_0 = 480$  Hz).

De part et d'autre du jet, deux tourbillons sont reconnaissables (Fig. 4a et 4). Pour  $x/L = 0,6$ , les structures se rapprochent l'une de l'autre (Fig. 4c) et commencent à fusionner (Fig. 4d). Les visualisations sont en accord avec les mesures anémométriques,  $x/L = 0,6$  correspondant au passage de la fondamentale à la sousharmonique comme instabilité la plus énergétique. Entre  $x/L = 0,6$  et  $0,8$ , les deux tourbillons fusionnent. Pour  $x/L > 0,8$ , une seule grosse structure peut être observée (Fig. 4e) qui va heurter sur la plaque fendue (Fig. 4f). La fréquence à l'impact est divisée par deux par rapport à la fréquence de détachement ; le jet produit par l'installation expérimentale est donc bien de type accordé.

Un spectre de pression mesuré en aval de la plaque montre que la fréquence fondamentale des SAE est aussi de 480 Hz (Fig. 5).

Ce champ sonore pilotant le détachement tourbillonnaire, une fréquence dominante de 480 Hz serait attendue à la séparation du jet. Or, la fréquence d'instabilité la plus énergétique est de 956 Hz (Fig. 3). Si la composante à 480 Hz ne peut forcer un détachement tourbillonnaire car cette fréquence est trop éloignée de la fréquence naturelle de détachement tourbillonnaire ( $f_n$ ), celle à 956 Hz en est capable.

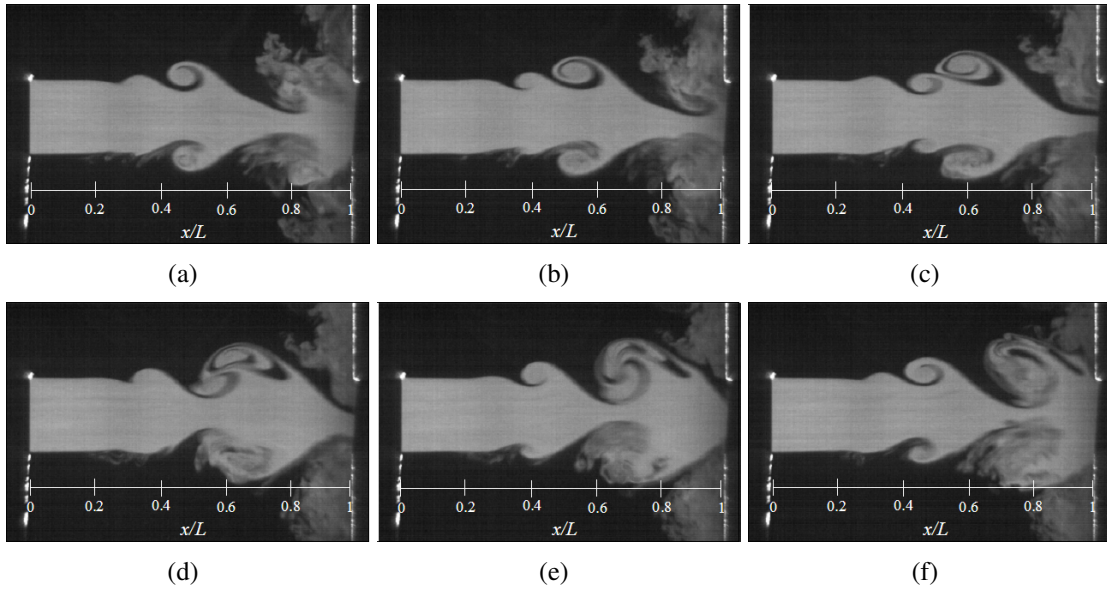


FIG. 4 – Visualisations de l'appariement tourbillonnaire à  $Re = 1,18 \times 10^4$  et  $L/H = 4,6$  : (a)  $t = 0$ ; (b)  $t = T/5,5$ ; (c)  $t = 2T/5,5$ ; (d)  $t = 3T/5,5$ ; (e)  $t = 4T/5,5$ ; (f)  $t = 5T/5,5$ .

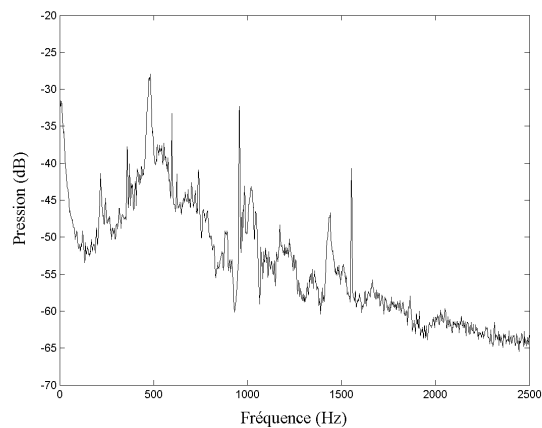


FIG. 5 – Spectre de pression pour  $Re = 1,18 \times 10^4$  et  $L/H = 4,6$ .

## 5 Conclusion

Sous certaines conditions défavorables, les bouches de soufflage des circuits de ventilation ou de climatisation peuvent émettre des sifflements désagréables. Ce phénomène, modélisé par l'impact d'un jet plan sur une plaque fendue, est étudié expérimentalement. La fréquence naturelle de la couche de cisaillement  $f_n$  et la fréquence du mode de battement  $f_j$  du jet libre sans obstacle ont été calculées sur une plage de nombres de Reynolds. Ces deux fréquences définissent le domaine d'existence de la fréquence la plus énergétique des sons auto-entretenus :  $f_n$  définissant la fréquence fondamentale maximale et  $f_j$  la fréquence fondamentale minimale. De plus,  $f_j$  est égale à la moitié de  $f_n$ , résultat typique des jets accordés. L'appariement tourbillonnaire responsable de cette division de fréquences est mis en évidence par des mesures vélocimétriques et des visualisations. La connaissance *a priori* du domaine de fréquence des sifflements produits à l'aide de la dynamique du jet libre sans obstacle permet d'anticiper la stratégie de réduction la plus adaptée.

## Références

- [1] W.K. Blake and A. Powell. The development of contemporary views of flow-tone generation. In *Recent advances in aeroacoustics*, pages 247–325. Springer Verlag, New-York, 1986.
- [2] A. Powell. On the edge tone. *J. Acoust. Soc. Am.*, 33 :395–409, 1961.
- [3] A.K.M.F. Hussain and K.B.M.Q. Zaman. The shear tone phenomenon and probe interference. *J. Fluid Mech.*, 87 :349–383, 1978.
- [4] A.E. Weir, D.H. Wood, and P. Bradshaw. Interacting turbulent shear layers in a plane jet. *J. Fluid Mech.*, 107 :237–260, 1981.
- [5] A. Michalke. Vortex formation in a free boundary layer according to stability theory. *J. Fluid Mech.*, 22(2) :371–383, 1965.
- [6] C-M. Ho and P. Huerre. Perturbated free shear layers. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 16 :365–424, 1984.
- [7] F.O. Thomas and M.K. Prakash. An experimental investigation of the natural transition of an untuned planar jet. *Phys. of Fluids A3*, 1 :90–105, 1991 A3.
- [8] C. Ho and J. Huang. Subharmonics and vortex merging in mixing layers. *J. Fluid Mech.*, 119 :443–473, 1982.
- [9] S. Ziada. Feedback control of globally unstable flows : Impinging shear flows. *J. Fluids Struct.*, 9(8) :907–923, 1995.
- [10] A. Billon, V. Valeau, and A. Sakout. Two feedback paths for a jet-slot oscillator. *J. Fluids Struct.*, 21 :121–132, 2005.