



## Instabilités de l'écoulement produisant le bruit de fente

Alexis Billon, Vincent Valeau, Anas Sakout \*

Laboratoire d'études des phénomènes de transfert appliqués aux bâtiments, avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle cedex 1, France

Reçu le 20 février 2004 ; accepté le 25 février 2004

Disponible sur Internet le 14 mai 2004

Présenté par Patrick Huerre

---

### Résumé

La nature des instabilités de l'écoulement régissant les sons auto-entretenus produits par l'impact d'un jet plan à faible nombre de Mach sur une plaque fendue, configuration dénommée bruit de fente, est identifiées expérimentalement. Pour un même nombre de Reynolds, les fréquences de l'instabilité naturelle de la couche de cisaillement et du mode de battement du jet libre délimitent les valeurs des fréquences d'émission mesurées. Les oscillations aux plus basses fréquences sont le résultat de l'amplification du mode de battement du jet et celles de plus hautes fréquences celui de l'amplification de l'instabilité de la couche de cisaillement. *Pour citer cet article : A. Billon et al., C. R. Mecanique 332 (2004).*

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

### Abstract

**Flow instabilities producing the slot-tone.** The nature of the instability governing the self-sustained tones produced by a low Mach number plane jet impinging on a slotted plate, known as slot-tone, is identified experimentally. For a given Reynolds number, the natural shear-layer and the jet column mode frequencies of the free jet delimit the values of the measured slot-tone operating frequencies. The oscillations at lower frequencies are the result of the amplification of the jet column mode, and those at higher frequencies correspond to the shear layer instabilities. *To cite this article: A. Billon et al., C. R. Mecanique 332 (2004).*

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

*Mots-clés :* Instabilité ; Acoustique ; Sons auto-entretenus ; Jet ; Bruit de fente

*Keywords:* Instability; Acoustics; Self-sustained tones; Jet; Slot-tone

---

### Abridged English version

The impingement of a free jet on a slotted plate can produce a class of self-sustained tones, known as slot-tone [1]. According to the Reynolds number, these tones can be produced via a direct (hydrodynamic) feedback path or via the resonances of a resonator placed close to the aeroacoustic source (indirect feedback path) [5]. Ziada

---

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [asakout@univ-lr.fr](mailto:asakout@univ-lr.fr) (A. Sakout).

made the assumption that the instability governing the slot-tone is the shear-layer natural instability [6], as opposed to the edge-tone, result of the amplification of the column mode of the jet [7].

In the present article, the nature of the jet instability governing the slot-tone is identified experimentally. The experimental apparatus permits to control the Reynolds number and the distance from the jet outlet to the plate (Fig. 1). For a range of Reynolds numbers, the shear-layer natural frequency and the jet column mode frequency of the free jet without the obstacle are calculated [8,10] and compared to the minimal and maximal frequencies of the tones, obtained for any position of the plate at the same Reynolds number (Fig. 3). The frequency of both instabilities defines the frequency domain of the self-sustained tones. The lowest frequencies of the tones, obtained when the plate is placed downstream the end of the potential core [9], are the result of the amplification of the column mode frequency. Tones with a frequency lower than the jet column mode frequency are rarely observed. On the other hand, the maximum frequency of the tones, obtained when the plate is situated upstream of the end of the potential core, is close to the natural shear-layer frequency. These observations can be made whatever the type of feedback path governing the self-sustained tones generation. Moreover, when the tone frequency is higher than the natural shear-layer frequency, the sound pressure level produced is about 20 dB below the maximum sound pressure level measured at the same Reynolds number (Fig. 4). These results are similar to the observations made by Blevins for cylinders in a flow [11] and confirm the prominent role of the shear-layer instability in the self-sustained tone process for the highest frequencies.

## 1. Introduction

Lorsqu'un écoulement fluide heurte un obstacle solide, il peut se créer des sons de forte intensité dont l'énergie est répartie sur quelques fréquences; ces sifflements sont appelés sons auto-entretenus. Dans cet article, la configuration étudiée est constituée d'un jet rectangulaire à grand rapport d'aspect heurtant une plaque munie d'une fente de même dimension que la section du jet et alignée sur celui-ci. Ce dispositif produit un type de sons auto-entretenus appelé bruit de fente.

Le mécanisme de production des sons auto-entretenus peut être décrit de la manière suivante [1]; de petites perturbations des couches de cisaillement sont amplifiées lors de leur convection par l'écoulement jusqu'à former des structures tourbillonnaires. Au niveau de l'obstacle, une perturbation secondaire (appelée rétroaction directe) prend naissance et remonte l'écoulement jusqu'à son point de séparation, qui est sa partie la plus sensible. A la naissance du jet, la différence de phase entre la perturbation primaire et secondaire doit être telle qu'un renforcement des oscillations se produit plutôt que leur amortissement. Si ces conditions sont respectées, une boucle de rétroaction s'installe et un sifflement indésirable prend alors naissance (atteignant plus de 110 dB au voisinage de la plaque dans la configuration étudiée), utilisant l'écoulement comme source d'énergie. Un résonateur situé à proximité de la source aéroacoustique peut, si un de ses modes propres est excité, renforcer la production sonore et contrôler la fréquence des sons auto-entretenus [2]; on parle alors de rétroaction indirecte [3].

Les études du bruit de fente et du bruit de trou, version à symétrie de révolution du bruit de fente, sont très liées dans la littérature traitant du sujet. Ainsi, Sondhauss [4] note la dépendance de la fréquence des sons émis au nombre de Strouhal construit sur la distance de la plaque et la fréquence fondamentale des oscillations. Par ailleurs, le couplage d'un bruit de fente avec les résonances longitudinales du conduit d'où débouche le jet a été étudié expérimentalement [5]. Deux modes de rétroaction sont alors mis en évidence; un premier direct est dominant entre  $Re = 2,4 \times 10^3$  et  $1,0 \times 10^4$ , alors que la rétroaction indirecte via l'excitation d'une des résonances longitudinales du conduit devient prédominante pour  $Re > 1,0 \times 10^4$  (soit une vitesse de l'écoulement supérieure à 15,3 m/s). Ziada [6] émet l'hypothèse que les oscillations du bruit de fente seraient le résultat de l'amplification des instabilités de la couche de cisaillement en opposition au bruit de biseau, résultat de l'amplification du mode de battement du jet [7].

En effet, un jet plan possède deux types d'instabilités dominantes. La première est l'instabilité naturelle de la couche de cisaillement. Celle-ci est dominante en amont de l'extrémité du cône potentiel (qui mesure entre 4 et 6

fois la hauteur du jet [8]), et sa fréquence est notée  $f_n$  dans cette étude. Une étude théorique [9] montre, pour un profil de vitesse de la couche de cisaillement de type tangente hyperbolique (qui est une bonne approximation des profils mesurés de la couche de cisaillement des jets), que  $f_n$  peut être calculée par la relation suivante :

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

où  $U_{0\max}$  est la vitesse maximale de l'écoulement et  $\theta$  l'épaisseur de la couche de quantité de mouvement. Cette quantité est définie par :

$$\theta = \int_0^\delta \frac{U_0(z)}{U_{0\max}} \left(1 - \frac{U_0(z)}{U_{0\max}}\right) dz \quad (2)$$

où  $\delta$  est l'épaisseur de la couche de cisaillement (telle que  $U_0(\delta) = 0,99U_{0\max}$ ) et  $U_0(z)$ , la vitesse de l'écoulement avec  $z$  l'axe verticale. La seconde instabilité est le mode de battement du jet et régit le comportement global de celui-ci. Cette instabilité est dominante en aval du cône potentiel. Sa fréquence, notée ici  $f_j$ , peut être évaluée par la relation suivante [10] :

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

où  $H$  est la hauteur du jet.

## 2. Installation expérimentale

Une soufflante crée un flux d'air qui traverse un volume d'amortissement puis un tube (190 cm × 90 mm) et un convergent. Le jet libre d'une hauteur  $H = 10$  mm et de 190 mm de largeur ainsi créé heurte une plaque fendue. L'installation expérimentale est schématisée en Fig. 1.

La plaque est en aluminium de 4 mm d'épaisseur et munie d'une fente dont les bords sont biseautés à 45°, de dimensions identiques à la sortie du convergent et alignée avec celui-ci. 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 à fil chaud DANTEC 55R04 et la pression acoustique avec un microphone ACO Pacific 7013. Les mesures de pression sont effectuées en champ proche, le microphone étant placé en aval de la plaque et suffisamment à l'abri des perturbations hydrodynamiques. La vitesse maximale atteinte par la soufflante est de 32 m/s, ce qui est très nettement subsonique ( $M_0 < 0,1$ ). Le nombre de Reynolds lié au jet est construit sur  $H$  ( $Re < 2,2 \times 10^4$ ) et le

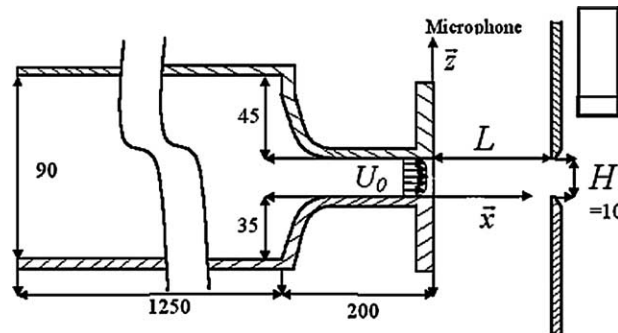


Fig. 1. Schéma de l'installation expérimentale (dimensions en mm).

Fig. 1. Sketch of the experimental apparatus (dimensions in mm).

nombre de Strouhal lié aux sons auto-entretenus est construit sur  $L$  et sur  $f_0$ , la fréquence fondamentale des sons auto-entretenus (définie comme la fréquence la plus énergétique du spectre de pression).

### 3. Résultats et discussion

Dans un premier temps, la fréquence naturelle de la couche de cisaillement  $f_n$  et la fréquence du mode de battement du jet  $f_j$  sont évaluées pour le jet libre créé par l'installation expérimentale de la Fig. 1, c'est-à-dire lorsque la plaque est retirée de l'écoulement.

La relation (1) permet de calculer  $f_n$  à partir de  $\theta$  pour un profil de vitesse de type tangente hyperbolique. Or les profils de vitesse expérimentaux obtenus peuvent être interpolés par des fonctions en tangentes hyperboliques. La Fig. 2 présente un exemple de demi-profil vertical de vitesse adimensionnelle mesurée à  $x = 3,0$  mm en aval de la sortie du convergent ( $Re = 9,9 \times 10^3$ ), représentatif de l'ensemble des profils obtenus et un profil en tangente hyperbolique interpolé à partir des données expérimentales.

Les deux courbes presque superposables montrent que l'hypothèse faite sur les profils de vitesse est cohérente. La valeur de  $\theta$  a été calculée pour les différents nombres de Reynolds à partir des profils de vitesse expérimentaux en utilisant la relation (2). Ensuite, la fréquence naturelle  $f_n$  de la couche de cisaillement a donc été estimée à partir de la relation (1) pour ces mêmes nombres de Reynolds. La fréquence du mode de battement du jet  $f_j$  est calculée en utilisant la relation (3).

Les fréquences fondamentales minimale et maximale des sons auto-entretenus ont été recherchées pour un nombre de Reynolds fixé en faisant varier progressivement la distance  $L$  de l'obstacle. La Fig. 3 présente les évolutions de la fréquence naturelle de la couche de cisaillement  $f_n$  et de la fréquence du mode de battement du jet  $f_j$ , ainsi que les fréquences maximale ( $\Delta$ ) et minimale ( $\square$ ) des sons auto-entretenus en fonction du nombre de Reynolds. Le domaine des basses vitesses (domaine 1 de la Fig. 3) correspond à une rétroaction directe, alors que les plus hautes vitesses (domaine 2,  $Re > 1,0 \times 10^4$  soit  $U_0 = 15,5$  m/s) correspondent à une rétroaction indirecte ; une des résonances longitudinales du conduit d'où débouche le jet est excitée. Cette résonance contrôle la fréquence des sons auto-entretenus et renforce leur niveau.

Les fréquences des deux instabilités,  $f_n$  et  $f_j$ , délimitent le domaine de valeurs prises par les fréquences des sons auto-entretenus. Le mode de battement (dont la fréquence  $f_j$  est égale à environ la moitié de la fréquence naturelle

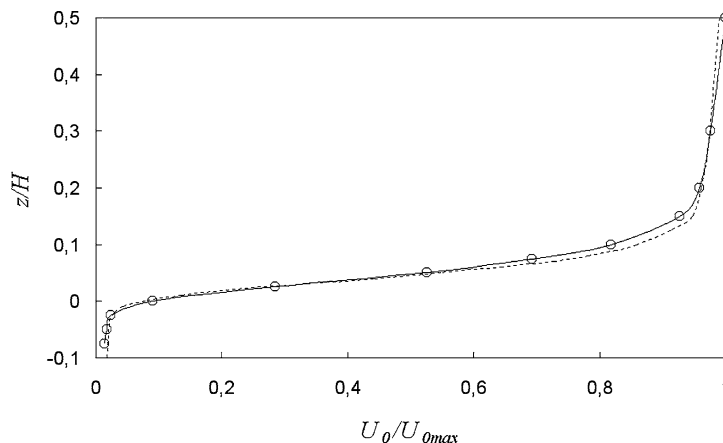


Fig. 2. Demi-profil de vitesse expérimental mesuré en aval du convergent (○) et interpolation par une fonction tangente hyperbolique (- -);  $x = 3,0$  mm et  $Re = 9,9 \times 10^3$ .

Fig. 2. Half experimental velocity profile (○) measured downstream of the nozzle and hyperbolic tangent profile approach (- -);  $x = 3.0$  mm and  $Re = 9.9 \times 10^3$ .

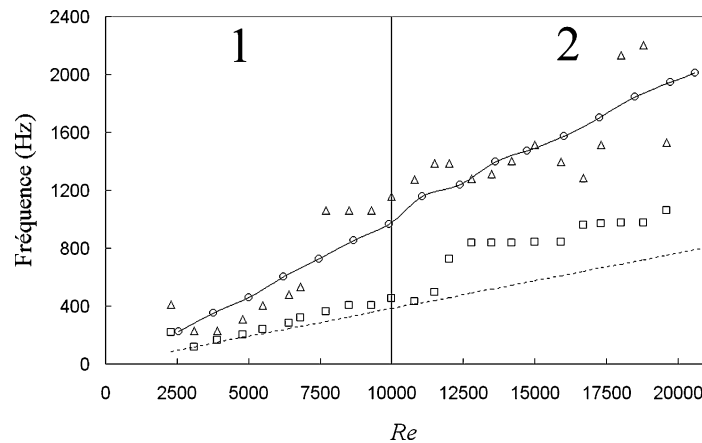


Fig. 3. Evolutions de la fréquence naturelle de la couche de cisaillement ( $\circ$ ), de la fréquence du mode de battement du jet (---), des fréquences maximale ( $\Delta$ ) et minimale ( $\square$ ) des sons auto-entretenus en fonction du nombre de Reynolds ; domaine (1) : rétroaction directe ; domaine (2) : rétroaction indirecte.

Fig. 3. Evolutions of the natural shear-layer frequency ( $\circ$ ), of the jet column mode frequency (---) the lowest ( $\Delta$ ) and the highest ( $\square$ ) frequencies of the self-sustained tone as a function of the Reynolds number; domain (1): direct feedback; domain (2): indirect feedback.

de la couche de cisaillement) est l'instabilité amplificatrice pour les plus basses fréquences. En effet, la fréquence minimale des sons auto-entretenus est proche de  $f_j$ , notamment en rétroaction directe. En rétroaction indirecte, la fréquence des sons auto-entretenus se cale sur un mode longitudinal du conduit résonant proche de  $f_j$ , expliquant l'évolution en palier de la fréquence minimale pour  $Re \geq 1,0 \times 10^4$ . La fréquence minimale est rarement inférieure à  $f_j$ . En revanche, la fréquence maximale des sons auto-entretenus suit en tendance la fréquence naturelle de la couche de cisaillement ce qui laisse penser que l'instabilité naturelle de la couche de cisaillement est amplifiée aux plus hautes fréquences (hypothèse qui sera discutée par la suite).

Par ailleurs, il a été observé que les plus hautes fréquences (de l'ordre de  $f_n$ ) sont obtenues pour de petites valeurs de  $L/H$  ( $< 2$ ), alors que les fréquences les plus basses (de l'ordre de  $f_j$ ) sont obtenues pour de grands  $L/H$  ( $< 4$ ). En effet, pour un jet libre, l'instabilité dominante en amont du cône potentiel du jet est celle de la couche de cisaillement alors qu'en aval du cône potentiel, l'instabilité dominante est le mode de battement du jet. Ainsi, si la plaque est placée à une distance inférieure à la longueur du cône potentiel du jet, l'instabilité amplificatrice dans le processus des sons auto-entretenus est celle de la couche de cisaillement alors que si la fente est placée plus en aval, c'est le mode de battement qui devient dominant. Les propriétés connues des instabilités des jets libres permettent ainsi d'expliquer le domaine observé des fréquences des sons auto-entretenus. Ce comportement est observé quel que soit le type de rétroaction mis en jeu dans la génération des sons (direct ou indirect).

Afin de corroborer l'hypothèse de l'amplification de  $f_n$  pour les fréquences les plus hautes, l'évolution du niveau de pression acoustique à la fréquence maximale (trait plein) et du niveau maximal atteint par les sons auto-entretenus (pour toute position de la plaque, en traits pointillés) ont été représentés sur la Fig. 4(b) en fonction du nombre de Reynolds, sur la plage pour laquelle la rétroaction est acoustique. La Fig. 4(a) indique, pour la même plage de nombre de Reynolds, les variations de la fréquence  $f_n$  et de la fréquence maximale des sons auto-entretenus (données reprises de la Fig. 3).

Dans le domaine où la rétroaction indirecte est dominante ( $Re \geq 1,0 \times 10^4$ ), la fréquence maximale des sons auto-entretenus fluctue autour de la fréquence naturelle de la couche de cisaillement. Lorsque la fréquence des sons auto-entretenus est inférieure, le niveau de pression est proche (environ 10 dB) du niveau maximal obtenu au même nombre de Reynolds; les conditions de couplage entre le champ acoustique produit et les instabilités du jet sont presque optimales. En revanche, lorsque la fréquence des sons auto-entretenus est supérieure à la

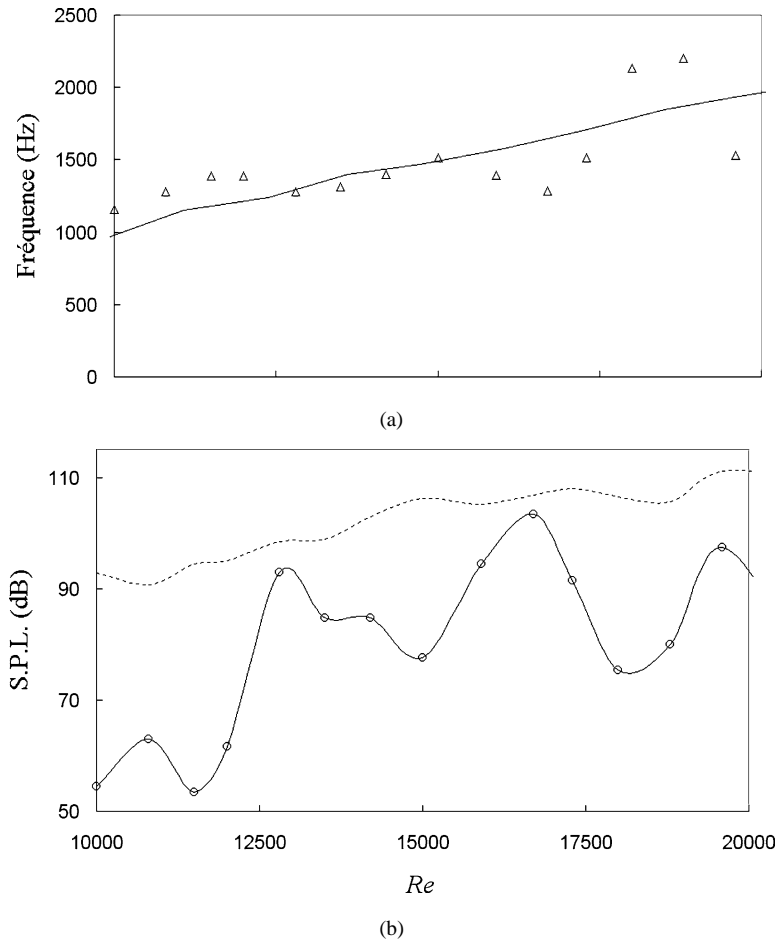


Fig. 4. (a) Evolutions de la fréquence naturelle de la couche de cisaillement (—) et de la fréquence maximale ( $\Delta$ ) des sons auto-entretenus ; (b) évolutions du niveau de pression à la fréquence maximale (—) et du niveau de pression maximal (- -) en fonction du nombre de Reynolds.

Fig. 4. (a) Evolutions of the natural shear-layer frequency (—) and of the highest self-sustained tone frequency ( $\Delta$ ); (b) evolution of the sound pressure level at the highest frequency (—) and the highest sound pressure level (- -) as a function of the Reynolds number.

fréquence naturelle de la couche de cisaillement, le niveau sonore produit est nettement inférieur au niveau maximal mesuré au même nombre de Reynolds, de l'ordre de 20 dB. De façon similaire, Blevins [11] a montré pour le détachement tourbillonnaire d'un cylindre que le couplage entre la fréquence de la couche de cisaillement et une excitation acoustique externe est beaucoup plus performant lorsque la fréquence d'excitation est inférieure à la fréquence naturelle de l'instabilité de la couche de cisaillement que lorsque qu'elle lui est supérieure. Le même type d'observation est fait ici, le niveau produit chutant dès que le mode excité du résonateur se situe au-dessus de la fréquence naturelle de la couche de cisaillement. Ceci confirme le rôle prépondérant de l'instabilité de la couche de cisaillement aux plus hautes fréquences pour le bruit de fente.

#### 4. Conclusion

Les instabilités régissant les sons auto-entretenus produits par l'impact d'un jet plan sur une plaque fendue ont été identifiées expérimentalement. La fréquence naturelle de la couche de cisaillement et la fréquence du mode de

battement du jet libre sans obstacle ont été calculées sur une plage de nombres de Reynolds. Ces fréquences ont été comparées aux fréquences maximale et minimale des sons auto-entretenus produits au même nombre de Reynolds par le bruit de fente. Ainsi, les fréquences des deux instabilités délimitent les valeurs des fréquences des sons auto-entretenus émis. Le mode de battement du jet est l'instabilité amplificatrice pour les plus basses fréquences obtenues, lorsque l'obstacle est situé en aval du cône potentiel ( $L/H > 4$ ). Des sons auto-entretenus ayant une fréquence inférieure à celle du mode de battement du jet sont rarement observés. En revanche, la fréquence maximale des sons auto-entretenus (produite pour  $L/H < 2$ ) est proche de la fréquence naturelle de la couche de cisaillement. De plus, lorsqu'elle lui est supérieure, le niveau acoustique produit est sensiblement inférieur (d'environ 20 dB) au niveau maximal mesuré au même nombre de Reynolds. Ces résultats, similaires à certaines observations faites par Blevins [11], mettent en avant le rôle prépondérant de l'instabilité naturelle de la couche de cisaillement dans le phénomène de bruit de fente aux plus hautes fréquences.

## Références

- [1] W.K. Blake, A. Powell, The development of contemporary views of flow-tone generation, in: W.K. Blake (Ed.), *Mechanics of Flow-Induced Noise and Vibration*, Springer-Verlag, 1986.
- [2] R.C. Chanaud, A. Powell, Some experiments concerning the hole and ring tone, *J. Acoust. Soc. Am.* 37 (5) (1965) 902–911.
- [3] D. Rockwell, E. Naudasher, Self-sustained oscillations of impinging free shear layers, *Ann. Rev. Fluid Mech.* 11 (1979) 67–94.
- [4] C. Sondhauss, Über die beim Ausstromen der Luft entstehenden Tone, *Ann. Phys.* 91 (1854) 26–147.
- [5] A. Billon, V. Valeau, A. Sakout, Interaction of a slot-tone with a pipe, *J. Acoust. Soc. Am.* 112 (2002) 2373.
- [6] S. Ziada, Feedback control of globally unstable flows: impinging shear flows, *J. Fluids Struct.* 9 (1995) 907–923.
- [7] A. Powell, Aspects of edge tone experiment and theory, *J. Acoust. Soc. Am.* 37 (1965) 535–536.
- [8] A.E. Weir, D.H. Wood, P. Bradshaw, Interacting turbulent shear layers in a plane jet, *J. Fluid Mech.* 107 (1981) 237–260.
- [9] A. Michalke, On spatially growing disturbances in an inviscid shear layer, *J. Fluid Mech.* 23 (1965) 521–544.
- [10] C.M. Ho, P. Huerre, Perturbed free shear layers, *Ann. Rev. Fluid Mech.* 16 (1984) 365–424.
- [11] R.D. Blevins, The effect of sound on vortex shedding from cylinders, *J. Sound Vib.* 161 (1985) 217–237.