

Réduction semi-active du battement de volume généré par une cavité profonde soumise à un écoulement aérodynamique

Xavier Amandolese^a, Pascal Hemon^a, Françoise Santi^b, Jan Wojciechowski^c

^a Institut Aérotechnique/CNAM, 15, rue Marat, 78210 Saint-Cyr l'École, France

^b CNAM, Département de mathématiques, Paris, France

^c École Polytechnique de Varsovie, Pologne

Reçu le 11 octobre 2001 ; accepté après révision le 10 décembre 2001

Note présentée par Pierre Perrier.

Résumé

On présente les résultats expérimentaux obtenus sur une cavité profonde, proche d'un résonateur de Helmholtz, soumise à un écoulement aérodynamique. La mise en résonance par les tourbillons générés dans la couche de cisaillement est bien observée et quantifiée. L'implantation de petits actionneurs basés sur des éléments piézo-électriques permet de générer une série de tourbillons bidimensionnels forcés à une fréquence différente de la résonance naturelle. Le niveau de bruit dans la cavité s'en trouve considérablement diminué et noyé dans le bruit large bande de la turbulence. *Pour citer cet article : X. Amandolese et al., C. R. Mécanique 330 (2002) 101–106.* © 2002 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

acoustique / aéroacoustique / résonateur / couche de cisaillement / instabilité / contrôle

Semi-active reduction of the sound generated by a deep cavity under an airflow

Abstract

We present experimental results obtained with a deep cavity, such as a Helmholtz resonator, excited by an airflow. The resonance under the action of the vortices generated in the shear layer is well described and quantified. The mounting of actuators, based on a few piezo-electric elements, allows us to generate a series of two-dimensional vortices forced at a frequency which is different than the natural resonance frequency. The sound level in the cavity is strongly decreased and only the broadband noise of the turbulence remains. *To cite this article: X. Amandolese et al., C. R. Mécanique 330 (2002) 101–106.* © 2002 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

acoustics / aeroacoustics / resonator / shear layer / instability / control

Abridged English version

In many areas and especially in the transportation domain, one can find cavities buried within an airflow. The resulting noise and its reduction is an interesting challenge. Usually, cavities are separated into two

Adresses e-mail : amando@iat.cnam.fr (X. Amandolese); pascal@ladhyx.polytechnique.fr (P. Hemon).

kinds, shallow ones and deep ones. The latter are close to the so-called Helmholtz resonator and a typical application is a car vehicle with an opened roof.

The problem can be simplified as in Fig. 1 where the cavity has a volume V , the neck a length L and a height Hg . The wind has a reference velocity U_0 . The acoustic pressure in the cavity is Pv . The flow produces in the neck a shear layer, the instability of which leads to the periodic shedding of vortices [1–3]. When the frequency is close to one of the acoustic modes of the cavity, the acoustic pressure level becomes very high due to the resonance.

A model of a cavity has been mounted in a small acoustic wind tunnel of the Institut Aérotechnique which generates a very low-noise airflow. Details on the facility and the measurement system are available in [9]. Dimensions of the model are $Hg = 5$ mm, $L = 20$ mm, $V = 0.0039$ m³ with a spanwise dimension of 200 mm.

Hot wire anemometry was used to measure the incoming boundary layer as given in Fig. 2. The profile can be approximated by the logarithmic function:

$$U(Z) = \frac{U^*}{K} \log\left(\frac{Z}{Z_0}\right) \quad (1)$$

where $K = 0.41$ is the Von Karman constant, $U^* = 1.49$ m/s the shear velocity and $Z_0 = 1.89 \times 10^{-6}$ m the shear thickness.

From a test without wind it was identified that the resonant frequency of the cavity is close to 263 Hz. The reduced resonance frequency is then plotted in Fig. 3 versus wind velocity.

The acoustic pressure level in the cavity is given in Fig. 7. Two resonance peaks appear. The second one is due to an acoustic interaction between the cavity and the transverse mode of the test section. The first peak is the classical resonance between the shear layer and the cavity, at a reduced frequency (Strouhal number) of 0.32.

A few piezo-electric actuators are then used in order to reduce the sound in the cavity. These actuators are small cantilever plates, as illustrated in Fig. 4. They are excited all together with a sine wave signal at a frequency of 310 Hz, for which the resulting motion at their tips is around ± 0.25 mm. Eight actuators are mounted and separated by a spanwise distance of 20 mm.

The resulting acoustic levels are given in Table 1, for the two peaks of resonance. For all the actuators being active, the resulting sound is almost within the turbulent noise.

The velocity profile in the middle of the neck, between two actuators, is given in Fig. 5 without and with the control activated. The corresponding square velocity level at the resonance frequency normalised with respect to the cavity sound level:

$$Rdsp = \frac{[DSP(U)]^2}{DSP(Pv)} \quad (2)$$

is given in Fig. 6. It can be seen that the action of the actuator is spread laterally so that all the shear layer is excited in a two-dimensional way.

It has been demonstrated that a series of discrete actuators can control the shear layer organization in open loop mode and reduce cavity sound with a forced oscillation which is detuned in frequency with respect to the natural resonance. Extension to shallow cavities might be a future application.

1. Introduction

Dans beaucoup de secteurs industriels et plus particulièrement dans le domaine des transports, on rencontre des cavités soumises à un écoulement : le bruit qui en résulte constitue un problème important et sa réduction un enjeu scientifique intéressant.

On distingue généralement deux sortes de cavités, les cavités peu profondes qui possèdent une ouverture large par rapport à leur profondeur, et les cavités profondes qui s'apparentent à un résonateur de Helmholtz. On s'intéresse ici à ces dernières avec comme application type le battement de volume des habitacles d'automobiles munies d'un toit ouvrant.

Le problème se présente schématiquement comme sur la Fig. 1 où la cavité a un volume V et le col une longueur L pour une hauteur Hg . Le vent a une vitesse de référence U_0 . La pression acoustique dans la cavité est Pv . L'écoulement produit au niveau du col une couche de cisaillement caractérisée par une instabilité aérodynamique se traduisant par un lâcher périodique de tourbillons [1–3]. Lorsque leur fréquence correspond à une fréquence propre de la cavité, une résonance s'établit qui génère un niveau de pression très élevé à cette fréquence. De nombreux travaux ont été menés par le passé, notamment les synthèses [4–6] et plus récemment [7,8].

On emploie actuellement des techniques passives pour limiter cette résonance, basées sur l'ajout d'un déflecteur en amont du col qui va modifier localement la vitesse incidente. L'inconvénient des déflecteurs est une efficacité toute relative et un aspect peu esthétique.

Dans ce contexte, nous étudions expérimentalement une cavité résonante puis nous mettons en œuvre un dispositif de réduction du battement basé sur des actionneurs piézo-électriques.

2. Présentation du dispositif expérimental

Un modèle de cavité est placé dans le conduit d'un banc d'essais spécialisé de l'Institut Aérotechnique dont la caractéristique essentielle est un écoulement silencieux. Des détails sur ce banc et la mesure associée peuvent être trouvés dans [9].

La cavité est placée au-dessous d'un morceau de conduite droite de section rectangulaire de 260 mm de hauteur pour 300 mm de largeur. Les dimensions selon les notations de la Fig. 1 sont $Hg = 5$ mm, $L = 20$ mm, $V = 0,0039$ m³ et la largeur du col est de 200 mm. Il s'agit d'une cavité profonde car la hauteur du volume V est pratiquement 10 fois plus élevée que la longueur L du col. La fréquence propre, sans vent, déterminée expérimentalement est de 263 Hz. Le point de référence du repère (X, Z) est le coin supérieur amont du col.

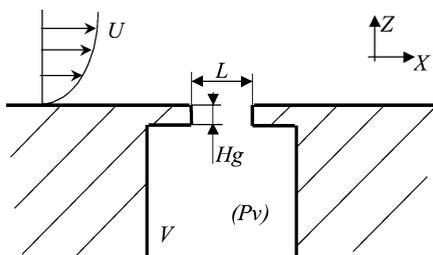


Figure 1. Configuration étudiée.
Figure 1. Configuration under study.

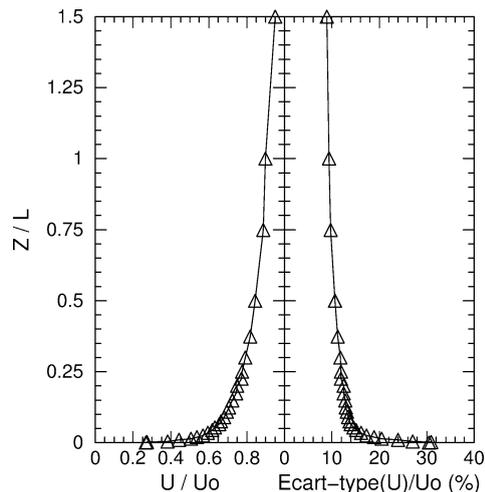


Figure 2. Profil de la couche limite amont à $X = -2L$.

Figure 2. Upstream boundary layer profile at $X = -2L$.

On dispose d'un microphone placé au fond de la cavité qui mesure Pv . Des mesures de vitesses instationnaires ont également été effectuées. On donne ainsi Fig. 2 le profil de vitesse moyenne et d'intensité de turbulence de la couche limite à une distance $2L$ en amont du col. La vitesse moyenne peut être interpolée à l'aide du modèle logarithmique (1) où $K = 0,41$ est la constante de Von Karman, la vitesse de cisaillement $U^* = 1,49$ m/s et l'épaisseur de cisaillement $Z_0 = 1,89 \times 10^{-6}$ m.

3. Résultats du battement de volume sans contrôle

On présente Fig. 3 la courbe de fréquence réduite du battement $f_u L / U_0$ en fonction de la vitesse. Le niveau de pression acoustique dans la cavité à la fréquence du battement est donné Fig. 7 (les niveaux en $\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ sont issus des densités spectrales de puissance). La résonance pure, c'est-à-dire lorsque le battement de volume est à la fréquence de résonance sans vent, se produit à la vitesse de 16 m/s ce qui donne une fréquence réduite de 0,32. La seconde série de points aux vitesses de 18 à 24 m/s correspond à un artefact expérimental lié à un couplage du premier harmonique de la cavité avec le mode acoustique transversal de la section du conduit.

4. Mise en œuvre de la réduction du battement

La mise en œuvre du dispositif de réduction de bruit s'effectue à la surface du bord amont du col. Les actionneurs sont des éléments piézoélectriques (type PZT) montés de manière à agir comme une poutre console, comme schématisé Fig. 4. Leur longueur active est de 20 mm pour 6 mm de large. Huit actionneurs sont implantés dans l'envergure, avec un entre-axe de 20 mm, soit 1 fois la longueur L du col. Les actionneurs sont excités électriquement à l'aide d'un signal sinusoïdal à la fréquence de 310 Hz pour laquelle le déplacement à leur extrémité est proche de $\pm 0,25$ mm.

Les résultats obtenus en appliquant ce dispositif sont synthétisés dans le Tableau 1 pour les deux pics de résonance observés. Lorsque tous les actionneurs sont utilisés, le bruit résiduel est noyé dans le bruit de fond de la turbulence. En utilisant un actionneur sur deux, la réduction est significative mais insuffisante.

Des profils verticaux de vitesse au milieu du col (à $L/2$) pour une position en envergure située entre 2 actionneurs ont également été mesurés. Ils sont donnés Fig. 5 pour les deux cas avec et sans contrôle. En complément, la Fig. 6 présente le niveau (densité spectrale de puissance) de la vitesse quadratique réduit par la pression dans la cavité pour la fréquence d'amplitude maximale, selon la définition (2).

Sans contrôle, la fréquence est celle pilotée par le volume de la cavité et le maximum est concentré autour de la position $Z = 0$. Avec contrôle, la fréquence correspond à celle de l'excitation des actionneurs et le sillage forcé est positionné légèrement plus au-dessus du col.

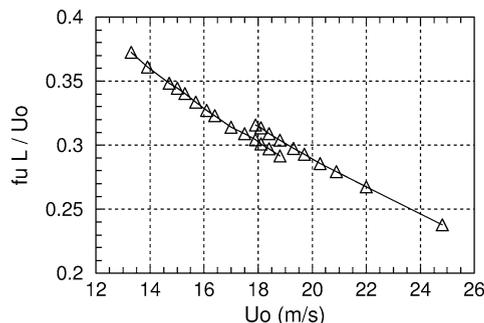


Figure 3. Fréquence réduite de résonance en fonction de la vitesse.

Figure 3. Reduced resonant frequency versus wind velocity.

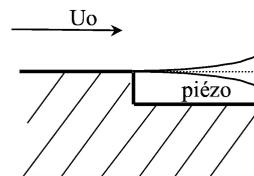


Figure 4. Implantation des actionneurs.

Figure 4. Actuator mounting.

Tableau 1. Résultats principaux de la réduction du battement.

Table 1. Main results of the noise reduction scheme.

Nombre d'actionneurs	Résonance 1 ($U_0 = 16$ m/s)	Résonance 2 ($U_0 = 20$ m/s)
	(Pa/ $\sqrt{\text{Hz}}$)	(Pa/ $\sqrt{\text{Hz}}$)
0	24,5	28,3
4 (1 sur 2)	6,0 à 10,8	–
8 (tous)	1,4	2,1

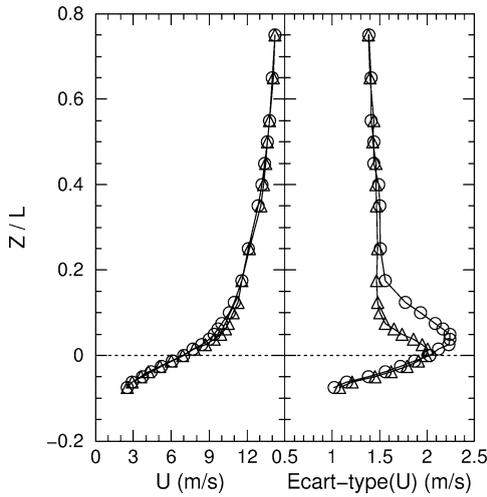


Figure 5. Profils de vitesse au milieu du col (triangles : sans contrôle, cercles : avec contrôle).

Figure 5. Velocity profiles at the middle of the neck (triangles: without control, circles: with control).

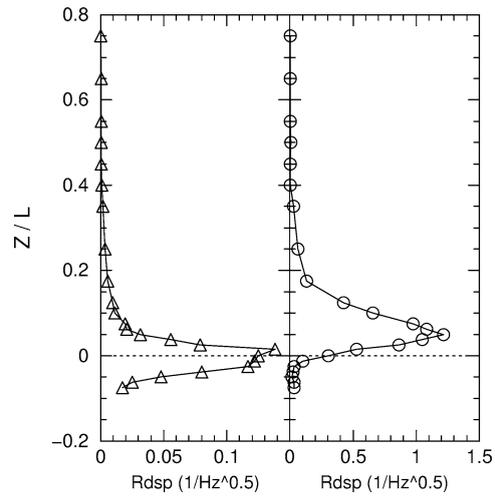
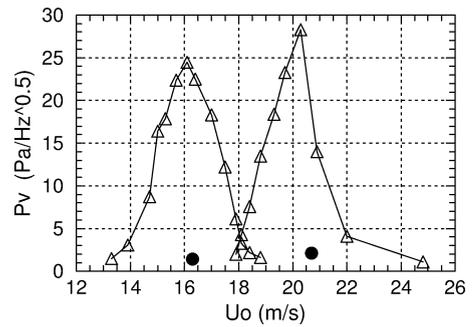


Figure 6. Profils de Rdsp au milieu du col (triangles : sans contrôle, cercles : avec contrôle).

Figure 6. Profiles of Rdsp at the middle of the neck (triangles: without control, circles: with control).

Figure 7. Niveau de pression en fonction de la vitesse (triangles : sans contrôle, cercles pleins : avec contrôle).

Figure 7. Acoustic pressure level versus wind velocity (triangles: without control, solid circles: with control).



Aussi, la réduction du bruit de battement est obtenue ici à l'aide d'un contrôle bidimensionnel de la couche de cisaillement à une fréquence différente de celle de la résonance de la cavité.

5. Perspectives

Nous avons montré expérimentalement la faisabilité d'un système semi-actif de réduction du bruit lié au battement de volume d'une cavité profonde. L'intérêt du dispositif réside dans sa simplicité puisqu'il s'agit d'un système en boucle ouverte. Un test en vraie grandeur sur un véhicule réel reste à effectuer.

En outre, l'extension aux cavités peu profondes est envisagée en liaison avec l'étude de l'influence de la hauteur de couche limite incidente.

Remerciements. Ce travail rentre dans le cadre d'une coopération franco-polonaise soutenue par le Ministère des Affaires Etrangères, dossier Polonium N°01582QG. Le soutien financier du CNAM au titre du Bonus Qualité Recherche 2000 a été fortement apprécié.

Références bibliographiques

- [1] C.-M. Ho, P. Huerre, Perturbed free shear layers, *Ann. Rev. Fluid Mech.* 16 (1984) 365–425.
- [2] D. Rockwell, Oscillations of impinging shear layers, *AIAA Journal* 21 (5) (1983) 645–664.
- [3] S. Ziada, D. Rockwell, Oscillations of an unstable mixing layer impinging upon an edge, *J. Fluid Mech.* 124 (1982) 307–334.
- [4] E. Naudascher, D. Rockwell, *Flow-Induced Vibrations*, Balkema, Rotterdam, 1994.
- [5] M. Sunyach, J.C. Bera, Active control of flow instabilities generated by cavities, VKI Lecture Series in Aeroacoustics and Active Noise Control, LS 1997-07, 1997.
- [6] M.J. Luca et al., The acoustic characteristics of turbomachinery cavities, NASA CR 4671, 1995.
- [7] M. Massenzio, Caractérisation des sources aéroacoustiques sur trains grande vitesse en vue de la prévision de la pression acoustique interne, Thèse de l'INSA de Lyon, 1997.
- [8] C. Noger, Contribution à l'étude des phénomènes aéroacoustiques se développant dans la baignoire et autour des pantographes du TGV, Thèse de l'Université de Poitiers, 1999.
- [9] P. Hemon, Mesure des caractéristiques acoustiques de singularités aérauliques en présence de l'écoulement, Colloque de la SIA sur le « Confort automobile et ferroviaire », Le Mans, 15–16 novembre 2000, Papier No CAF/00-28.