

Suppression des oscillations auto-entretenues dans un résonateur de Helmholtz par contrôle actif auto-adaptatif

Marie-Annick GALLAND, Guy BILLOUD et Mohamed SEBBANI

Résumé — On présente une étude expérimentale portant sur la suppression par contrôle actif d'oscillations auto-entretenues dans une cavité excitée par un écoulement affleurant. On étudie plus spécialement le mécanisme du contrôle, et on montre en particulier l'adaptivité du contrôleur dans le cas d'un régime variable.

Reduction of self-sustained oscillations in a Helmholtz resonator by adaptive active control

Abstract — This paper describes an experimental study concerned with adaptive active control of natural instabilities occurring in a flow-excited cavity. Attention is drawn to the control principle in particular. The controller adaptivity is specifically examined while operating under varying conditions.

Abridged English Version — Recent studies have shown that active control techniques are appropriate to flow stabilization ([1]-[5]). For example, the self-sustained oscillations of a flow-excited resonator have been successfully cancelled in stationary conditions with a fixed phase shift system ([1], [2]). Such a system simply increases the damping of the self-sustained oscillator. However, inherent closed loop instabilities may occur, particularly when the flow is varied in time.

The present work describes a novel form of adaptive control system. Its ability to manage closed-loop instabilities and its potential to accommodate flow changes are presented. The experimental set-up is shown in Figure 1. The coupling mechanism between the natural instabilities of the shear layer and the cavity modes is a complex phenomenon, not completely understood ([6], [7]). This coupling results in a strong sound radiation at a frequency near the Helmholtz resonance, depending however on the flow velocity. The adaptive controller used in the experiment applies a gradient descent algorithm minimizing the energy of an error signal ε . This time domain algorithm had previously been developed for anti-noise experiments (see Fig. 2) [8]). However, its implementation in the present situation is slightly different. Here, the pressure signal measured inside the cavity is simultaneously used as the reference signal (signal x in Figure 2) and as the signal to be minimized ε .

The experimental results may be summarized as follows:

STATIONARY FLOW CONDITIONS. — The disappearance of the peaks in the pressure spectrum (Fig. 3) shows clearly that the instability is totally cancelled by the active control system. In order to have a better understanding of the system behaviour during the experiment, we track the weights (A1 and A2) of the two-tap digital controller during its adaptation phase: (i) in the case of active control of a sinusoidal sound (Fig. 4), (ii) in the case of active control of self-sustained oscillations (Fig. 5). On each figure we display these tracks for different initial taps (starting point marked with a circle). The figures are plotted on a grey-scale background representing the achieved attenuation. The major difference between Figures 4 and 5 lies in the pattern of the attenuation. A single minimum appears in the case of antinoise (Fig. 4) which corresponds to the best fit between the sound and anti-sound waves for optimal destructive interference. Whatever starting point is chosen, all the trajec-

Note présentée par Geneviève COMTE-BELLOT.

jectories converge to this focal point; in the case of active control of flow instabilities no single focal point exists. A wide region of minimum values is observed. This suggests that the controller modifies the cavity response rather than simply creating an interference as in the previous case of active noise control. The trajectories in this case appear to converge to the closest minimum to the starting point. It is important to note that the lightest grey region in the map corresponds always to closed-loop instabilities in the control system. Thus, the trajectory shapes show that these artificial instabilities are managed by this control technique.

TIME-VARYING FLOW VELOCITY. — The effectiveness of the control system has been evaluated during an increase in flow velocity. A time-frequency plot of the pressure energy without control (left picture in Figure 6) shows the corresponding shift in the excited frequency. Comparisons of the same event with a fixed controlled (Fig. 6, centre) and our adaptive controller (Fig. 6, right) show how closed-loop instabilities (around 220 Hz) which are created by the fixed controlled are avoided by an adaptive strategy.

Des travaux récents ont été consacrés à la mise en œuvre de techniques de contrôle actif pour la suppression d'instabilités liées à un écoulement. Nombre d'entre elles peuvent être analysées en terme d'oscillations auto-entretenues. Le système de contrôle est alors une contre-réaction dont le rôle est de changer les caractéristiques de l'oscillateur, en particulier d'augmenter son amortissement. En général, le système fonctionne en boucle fermée et des risques d'instabilité en résultent; ceux-ci sont évidemment accentués dans le cas d'un régime variable.

De bons résultats ont été obtenus par exemple dans les cas suivants : cavité excitée par un écoulement ([1], [2]), pompage de turbomachine [3], instabilités de combustion ([4], [5])... Pour tous ces exemples, le contrôle a été effectué en régime stationnaire au moyen d'une ligne à retard et d'un amplificateur. Ce type de contrôleur est bien sûr insuffisant dès que les conditions de fonctionnement sont évolutives. Nous nous sommes intéressés au problème de la cavité excitée par un écoulement à vitesse variable et nous présentons les résultats obtenus au moyen d'un contrôleur auto-adaptatif.

1. DESCRIPTION DU PHÉNOMÈNE DE COUPLAGE. — Lorsqu'un écoulement vient affleurer une cavité (fig. 1), il se produit, sous certaines conditions une excitation acoustique intense. C'est le cas pour la flûte par exemple. Dans d'autres situations, cette excitation peut devenir très gênante et même causer des dommages importants. On citera les cas des voitures à toit ouvrant, des cavités contenant les trains d'atterrissage d'un avion lors de leur ouverture et des ballasts de sous-marin.

Les mécanismes mis en jeu sont très complexes et dépendent essentiellement des caractéristiques de l'écoulement au voisinage de l'ouverture. Il se développe jusqu'à saturation une excitation mutuelle entre les instabilités naturelles de la couche de cisaillement et les modes acoustiques de la cavité. Cette oscillation auto-entretenue se produit à des fréquences proches des résonances de la cavité, la plus basse correspondant à la fréquence de résonance de Helmholtz.

Quelques modèles de l'interaction ont été élaborés ([6], [7]). Ils ont fourni des relations partiellement vérifiées par l'expérience entre la vitesse moyenne U de l'écoulement et la fréquence d'excitation. En particulier, pour un résonateur de Helmholtz de fréquence f_0 , l'excitation maximale se produit pour une vitesse moyenne U telle que $U/2 f_0 h = 1,33$ et pour une fréquence voisine de f_0 dont la valeur dépend des caractéristiques acoustiques de la cavité.

2. PRÉSENTATION DE L'ALGORITHME AUTO-ADAPTATIF DE CONTRÔLE ACTIF. — Nous avons choisi pour cette expérience d'utiliser un algorithme temporel de minimisation reposant sur une méthode de gradient estimé. Cette méthode temporelle s'est révélée très performante dans les applications d'antibruit que nous avons précédemment réalisées [8]. L'algorithme est schématisé en figure 2 : la moyenne quadratique de l'erreur ε (pression au microphone de contrôle) est minimisée par rapport aux coefficients variables du filtre A qui sont réactualisés suivant le schéma :

$$A^{(n+1)} = A^{(n)} + 2k \varepsilon_n U_n$$

avec $u_n = {}^t B X_n$.

B représente un filtre fixe modélisant le chemin secondaire (haut-parleur de contrôle-microphone de contrôle). Il est nécessaire de l'introduire dans l'algorithme pour en garantir la convergence. Le filtre principal A peut être selon les besoins à réponse impulsionnelle finie (FIR) ou infinie (IIR). Cet algorithme est implanté en temps réel sur un contrôleur électronique équipé d'un microprocesseur spécialement réalisé pour cet usage.

Dans le cas du contrôle des oscillations auto-entretenues de la cavité, l'utilisation de cet algorithme est sensiblement différente. En effet, il n'est pas possible de différencier un signal de détection du phénomène (noté x en figure 2) d'un signal quantifiant l'effet du contrôle (ε). Le système fonctionne donc en boucle fermée, avec tous les risques d'instabilité que cela comporte. De plus la formulation précédente suppose une indépendance du signal d'entrée du filtre A vis-à-vis de ses coefficients. En boucle fermée, une telle condition n'est bien sûr pas vérifiée et il est intéressant d'étudier la convergence de l'algorithme dans ce cas.

3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX. — 3.1. *Régime stationnaire.* — Dans un premier temps, les résultats concernent le cas d'un régime stationnaire. Les mesures sont de plusieurs types. Les plus immédiates concernent le spectre RMS de la pression à l'intérieur de la cavité avec et sans contrôle (fig. 3). On note une réduction totale jusqu'au fond du spectre des harmoniques excitées par l'écoulement.

Dans un deuxième temps, une analyse comparative de surfaces d'erreur mesurées nous a permis de préciser la manière dont le contrôleur fonctionne. On a représenté pour un filtre principal A à deux coefficients a_1 et a_2 l'atténuation obtenue selon les valeurs de ces coefficients. Dans le cas de *l'absorption acoustique active* d'une onde sinusoïdale

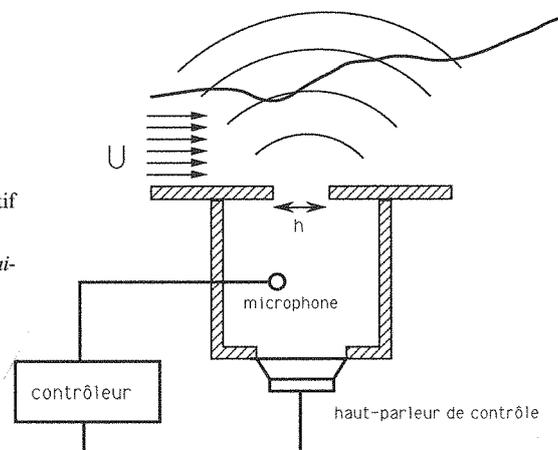


Fig. 1. — Schéma de l'installation du contrôle actif d'oscillations auto-entretenues.

Fig. 1. — Active control arrangement for self-sustained pressure oscillations in a flow-excited cavity.

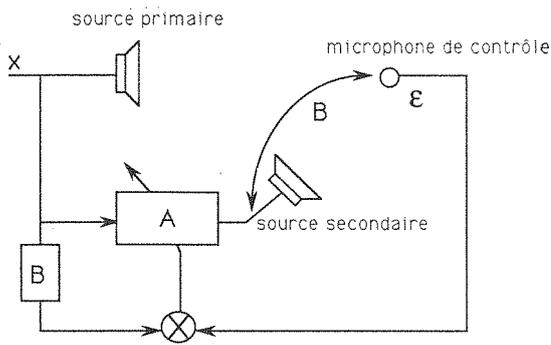


Fig. 2

Fig. 2. — Schéma de la mise en œuvre de l'algorithme de gradient dans le cas de contrôle actif de bruit.

Fig. 2. — Gradient-descent algorithm implementation in the case of anti-noise.

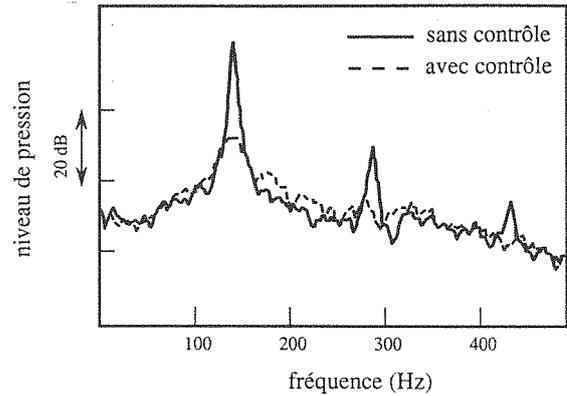


Fig. 3

Fig. 3. — Spectres de fluctuations de pression à l'intérieur de la cavité.

Fig. 3. — Inside-cavity pressure spectra.

(fig. 4), on constate qu'il existe un jeu unique de coefficients pour lequel l'atténuation est optimale. Sur ce même schéma, on a tracé les trajectoires suivies par les coefficients dans leur phase d'adaptation. Les points de départ sont représentés par des cercles. On constate que les chemins mènent tous vers le point optimal, selon des trajectoires voisines des lignes de plus grande pente.

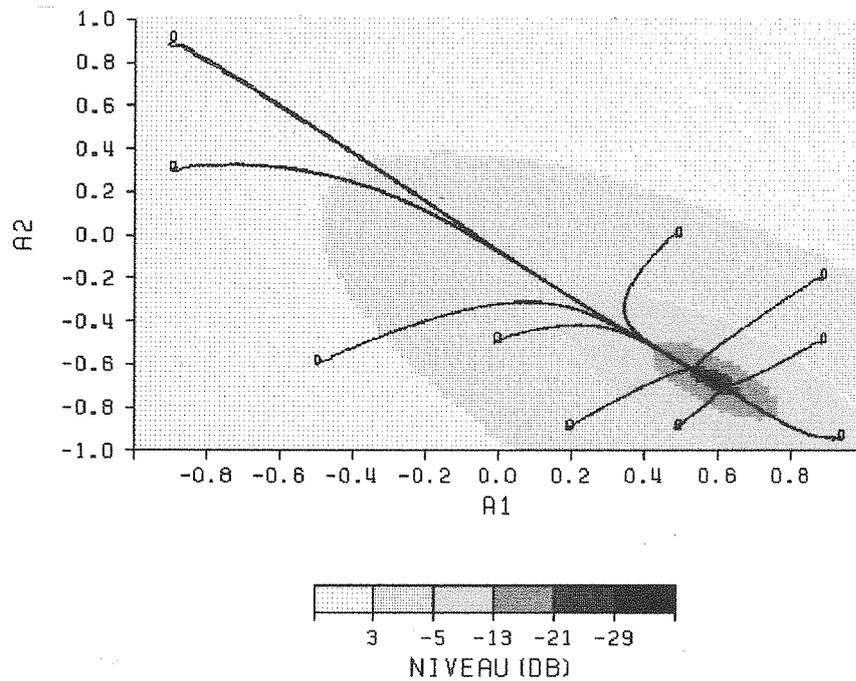


Fig. 4. — Trajectoires du jeu de coefficients (A_1 , A_2) pendant la convergence de l'algorithme pour différentes valeurs initiales. Cas du contrôle actif d'un bruit sinusoïdal.

Fig. 4. — Weight (A_1 , A_2) trajectories for different initial conditions. Case of anti-noise.

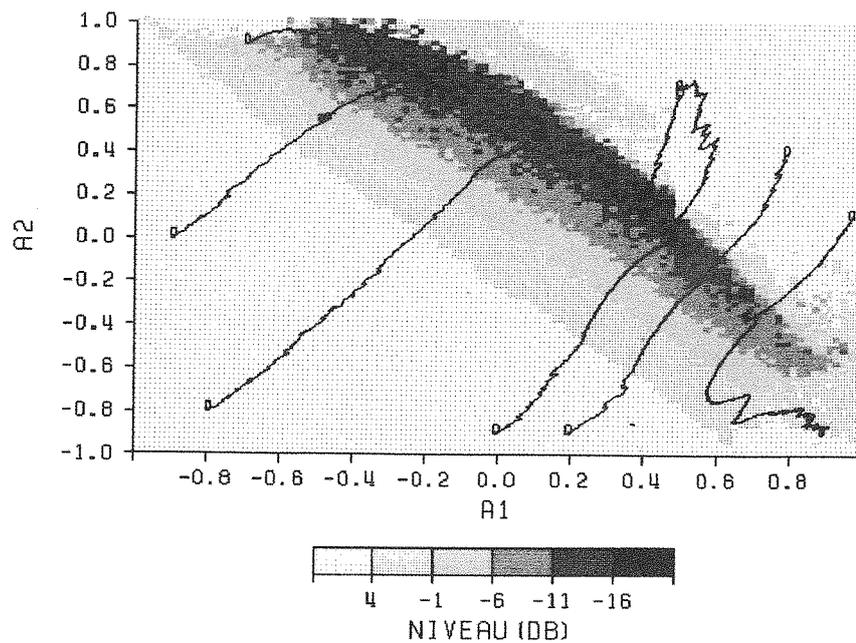


Fig. 5. — Trajectoires du jeu de coefficients (A_1 , A_2) pendant la convergence de l'algorithme pour différentes valeurs initiales. Cas du contrôle actif d'oscillations auto-entretenues.

Fig. 5. — Weight (A_1 , A_2) trajectories for different initial conditions. Case of self-sustained pressure oscillations.

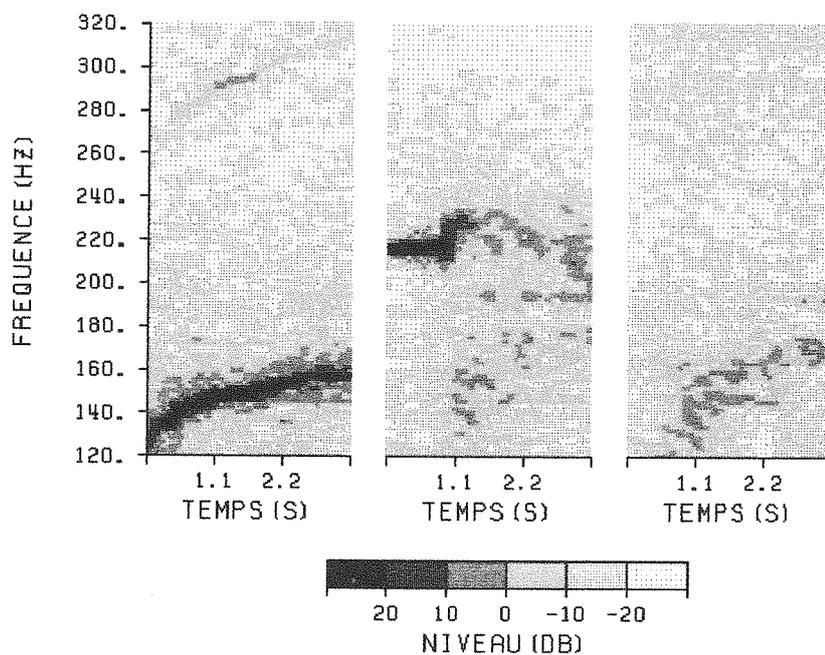


Fig. 6. — Représentation temps fréquence de l'énergie des fluctuations de pression dans la cavité. Sans contrôle (à gauche). Avec un contrôleur fixé (au centre). Avec le contrôleur adaptatif (à droite).

Fig. 6. — Time-frequency plot of inside-cavity fluctuating pressure energy. Without control (left). With a fixed-response controller (center). With the adaptive controller (right).

Dans le cas du contrôle actif de l'écoulement (*fig. 5*), la surface d'erreur mesurée présente un « fond plat »; cela signifie qu'il y a une multitude de jeux de coefficients pour lesquels l'atténuation est optimale. Selon le point de départ, la convergence se fera vers l'un ou l'autre de ces points optimaux. On ne crée donc pas une onde en opposition de phase avec l'onde acoustique primaire, mais on agit sur les caractéristiques du système pour en modifier le comportement.

On observe sur les trajectoires des coefficients des boucles fermées. Elles représentent les instabilités électroacoustiques inhérentes au système de contrôle. On constate qu'à l'encontre des prévisions l'algorithme est capable de les gérer. La trajectoire se poursuit ainsi en direction de la zone optimale, toujours en suivant approximativement une ligne de plus grande pente.

3.2. *Régime variable.* — Jusqu'à présent, le caractère auto-adaptatif du filtre n'est apparu qu'en phase statique : le filtre est capable de trouver automatiquement un jeu de coefficients qui garantit le contrôle de l'instabilité. Il peut en outre s'adapter à un changement de conditions comme une variation rapide de la vitesse moyenne de l'écoulement. Une acquisition temporelle du signal du microphone avec et sans contrôle a été effectuée et des FFT successives permettent d'observer l'évolution temporelle du spectre de pression (*fig. 6*). Sur la figure de gauche, le contrôle n'est pas activé. On observe la croissance de la fréquence fondamentale avec le temps, c'est-à-dire avec la vitesse. On note aussi l'évolution du premier harmonique. Sur la figure du centre, le contrôle est réalisé par une simple ligne à retard. Des instabilités à 200 Hz sont générées pour certains modes de fonctionnement. Un filtre figé se révèle donc incapable de traiter ce genre de phénomènes non stationnaires. Sur la ligne de droite, on voit l'effet du filtre autoadaptatif. Celui-ci s'adapte aux changements de conditions et fournit un contrôle stable pour toute la gamme de fréquences excitées. On voit donc ici toute la puissance de ce type de filtres : il est capable d'ajuster automatiquement ses coefficients dans la phase de démarrage, de maîtriser les instabilités naissantes du système en boucle fermée et de suivre une évolution rapide des conditions expérimentales.

Note remise le 8 novembre 1990, acceptée le 11 février 1991.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. SUNYACH et J. E. FFWCS WILLIAMS, Contrôle actif des oscillations dans les cavités excitées par un écoulement, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 303, série II, 1986, p. 1085-1088.
- [2] M. MÖSER, Aktive Kontroller einfacher, selbsterregter Resonatoren, *Acustica*, 69, 1989, p. 175-184.
- [3] J. E. FFWCS WILLIAMS et X. Y. HUANG, Active stabilisation of compressor surge, *J. Fluid. Mech.*, 204, 1989, p. 245-262.
- [4] G. J. BLOXSIDGE, A. P. DOWLING, N. HOOPER et P. J. LANGHORNE, *Active control of Reheat Buzz*, A.I.A.A. Paper 87-0433, 1987.
- [5] W. LANG, T. POINSOT et S. CANDEL, Active Control of Combustion Instability, *Combustion and flame*, 70, 1987, p. 281-290.
- [6] S. A. ELDER, Self-excited depth-mode resonance for a wall-mounted cavity in turbulent flow, *J.A.S.A.*, 64, 1978, p. 877-890.
- [7] M. S. HOWE, The influence of mean shear on unsteady aperture flow, with application to acoustical diffraction and self-sustained cavity oscillations, *J. Fluid. Mech.*, 109, 1981, p. 125-146.
- [8] G. BILLOUD, Développement d'un filtre numérique adaptatif contrôlant les phénomènes de bouclage. Application à l'absorption acoustique active, *Thèse*, U.C.B., Lyon-I, n° 192-88, 1988.

Laboratoire d'Acoustique, École centrale de Lyon,
B.P. n° 163, 69131 Ecully Cedex.