

## Performances et stabilité d'un système d'antibruit utilisant un contrôleur à réponse impulsionnelle infinie

Guy BILLOUD et Marie-Annick GALLAND

**Résumé** — Cette étude concerne la suppression par contrôle actif des ondes acoustiques planes dans un conduit de longueur finie avec un détecteur omnidirectionnel. On montre que dans ce cas, le contrôleur doit être un filtre à réponse impulsionnelle infinie [loi d'entrée sortie autorégressive à moyenne mobile (ARMA)]. Cette technique permet d'obtenir une atténuation de bruits large bande dès les plus basses fréquences jusqu'à la fréquence de coupure du conduit.

### Performance and stability of an active noise attenuator with an infinite impulse response controller

**Abstract** — This paper discusses a technique for the active cancellation of plane acoustic waves in a finite-length duct. It is shown that a noise-cancellation system comprised of an omnidirectional detector and loudspeaker sound-generator requires an infinite impulse-response control circuit—i. e., one that obeys an ARMA input-output law. With such a controller, a microphone/loudspeaker system can effect sound cancellation up to the cutoff frequency of the duct.

La plupart des installations étudiées jusqu'à présent ([1], [2] par exemple) concernent des guides d'ondes quasi infinis équipés de détecteurs unidirectionnels. Dans ce cas, un contrôleur à réponse impulsionnelle finie procure une atténuation satisfaisante dans la mesure où le détecteur n'est pas sensible aux ondes rétropropagées par la source secondaire. Ce type de contrôle s'avère insuffisant notamment quand le taux d'ondes stationnaires est important (guides courts, circuits hydrauliques), puisqu'un détecteur unidirectionnel fournirait une mesure inadaptée. Il s'avère donc indispensable d'effectuer un contrôle actif stable avec une détection omnidirectionnelle en dépit du couplage entre la source secondaire et le détecteur.

L'expérience est réalisée dans le conduit déjà utilisé pour l'étude des champs de pression et d'intensité [3] (fig. 1). Il peut être considéré comme parfaitement rigide et présente une fréquence de coupure égale à 850 Hz environ. Les capteurs utilisés sont omnidirectionnels.

**FONCTION DE TRANSFERT OPTIMALE.** — La fonction de transfert que doit réaliser le contrôleur en vue d'une atténuation maximale doit prendre en compte d'une part la réponse du conduit au bruit à éliminer [fonction de transfert entre  $p_2$  et  $p_1$  :  $H_0(f)$ ] et d'autre part la réponse propre de la source secondaire au niveau de chacun des microphones (fonction de transfert entre  $p_1$  et  $s$  :  $H_1$ ; entre  $p_2$  et  $s$  :  $H_2$ ). Son évaluation, préconisée par de nombreux auteurs, en particulier Ffowcs-Williams et Ross [4], conduit à l'expression :

$$H = H_0 / (H_0 H_1 - H_2).$$

Les fonctions  $H_0$ ,  $H_1$ ,  $H_2$  sont mesurées à l'aide d'un analyseur HP 3582 A et fournissent dans nos essais la fonction optimale portée sur la figure 2.

**SYNTHÈSE DU CONTRÔLEUR.** — Il s'agit ici de faire choix d'un type de contrôleur ainsi que de ses coefficients afin d'approcher au mieux la fonction optimale. Cette dernière n'est manifestement pas réalisable par un contrôleur à réponse impulsionnelle finie, comme utilisé dans la quasi-totalité des expériences antérieures. En effet, un calcul de

Note présentée par Robert DAUTRAY.

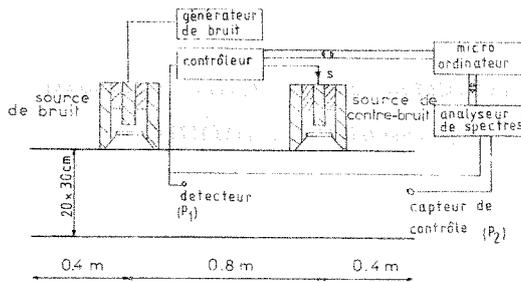


Fig. 1

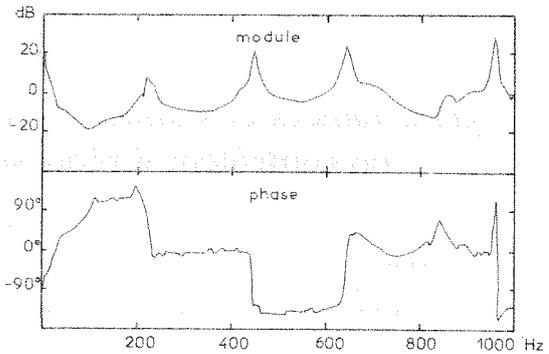


Fig. 2

transformée de Fourier inverse fournit une réponse impulsionnelle acausale qui de plus ne tend pas vers zéro aux bornes de l'intervalle temporel d'étude (fig. 3).

C'est pourquoi on doit utiliser une technique de filtrage récursif (contrôleur à réponse impulsionnelle infinie). Dans ce cas le passage du domaine fréquentiel au domaine temporel n'est pas numériquement possible par transformée de Fourier discrète, et la détermination des coefficients du contrôleur ne peut plus se faire directement. Nous avons circonvenu ce problème en élaborant un logiciel interactif semi-empirique. Il consiste à ajuster le module et l'argument des pôles et des zéros d'une fonction de transfert exprimée en transformée en Z pour la rendre le plus proche possible de la fonction optimale. Un critère de stabilité (pôles inclus strictement dans le cercle unité) est directement intégré à cette modélisation. Les coefficients ainsi obtenus sont appliqués à un contrôleur électronique temps réel programmable, entièrement conçu et réalisé au laboratoire. Il est équipé d'un microprocesseur spécialisé dans le traitement du signal (ADSP2100 d'Analog Devices) et est piloté par un microordinateur IBM-PC-XT. Le contrôleur ainsi défini réalise alors en temps réel la fonction de transfert qui est indiquée sur la figure 4. On observe un bon accord avec la fonction optimale de la figure 2 rappelée en pointillés sur la figure 4. Les écarts observés proviennent du fait que l'ajustement est effectué de façon empirique dans le cadre de cette première étude de principe.

**PERFORMANCES DU SYSTÈME.** — Un essai dans le conduit en présence d'un bruit aléatoire large bande (0-1 kHz) montre que l'on parvient à une réduction sensible (de 5 à 20 dB) du niveau sonore entre 150 Hz et la fréquence de coupure du conduit.

Le relevé de l'atténuation ainsi obtenue (fig. 5) montre que la qualité de l'approximation est déterminante : dans les zones où la fonction de transfert optimale est bien modélisée, l'atténuation est très satisfaisante.

Les plus basses fréquences (<150 Hz) sont dans cet exemple peu atténuées. D'autres essais, pour lesquels la modélisation dans cette gamme de fréquences est particulièrement soignée, ont permis d'obtenir une atténuation significative.

**STABILITÉ DU SYSTÈME.** — Dans ce type de système, il existe un risque majeur d'instabilité en raison du bouclage électro-acoustique schématisé dans la figure 6. Ce bouclage est essentiellement dû au caractère omnidirectionnel du détecteur et aux réflexions sur chacune des extrémités du conduit. Pour que le système soit stable il faut et il suffit que la fonction de transfert en boucle fermée reste bornée. On peut montrer que la fonction de transfert optimale conduit nécessairement à un système stable : en effet, lorsque  $H = H_0 / (H_0 H_1 - H_2)$  on prouve aisément que la condition d'instabilité du système de la

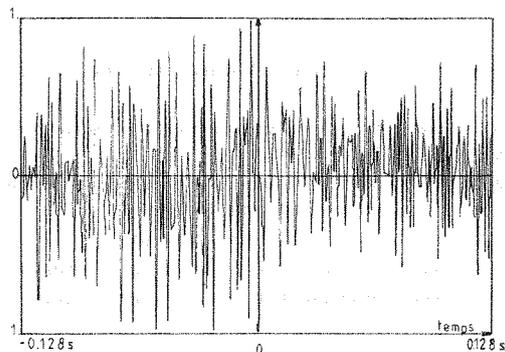


Fig. 3

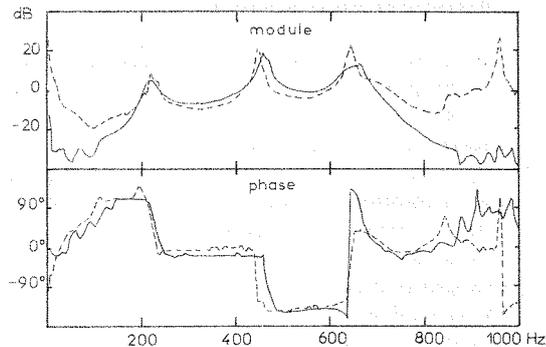


Fig. 4

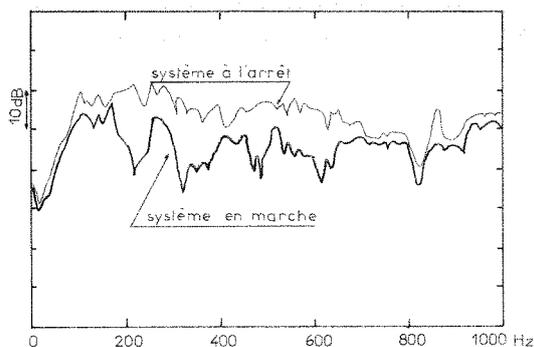


Fig. 5

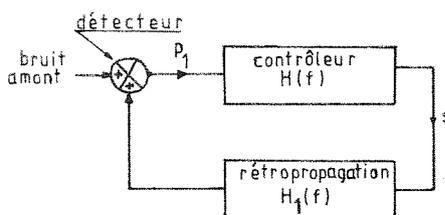


Fig. 6

figure 6, à savoir  $HH_1 = 1$ , conduit à  $HH_2 = 0$ . Cette dernière égalité n'est vraie que s'il existe une fréquence de coupure pour le contrôleur ou pour la propagation entre la source secondaire et le capteur de contrôle, ce qui dans la bande étudiée n'est pas le cas. La condition d'instabilité  $HH_1 = 1$  n'est donc jamais vérifiée.

Avec un contrôleur à réponse impulsionnelle finie utilisant une détection omnidirectionnelle, une étude antérieure [5] a montré qu'il est impossible de réaliser un système stable dans un conduit court. Avec cette technique de filtrage en effet, la phase du contrôleur ne peut approcher la valeur à atteindre sans rotations intempestives de  $2\pi$ , ce qui est un facteur d'instabilité.

En revanche, avec un contrôleur à réponse impulsionnelle infinie, la phase de la fonction réalisée (fig. 4) reproduit la phase de la fonction optimale sans les singularités évoquées plus haut. Le système présente donc un fonctionnement stable.

*En conclusion*, cette étude montre qu'il est possible de mettre en œuvre un système d'absorption acoustique active stable et efficace dans un conduit court ouvert avec un détecteur acoustique omnidirectionnel et un contrôleur à réponse impulsionnelle infinie.

La démonstration expérimentale de ces propriétés vient justifier et encourager les nombreux efforts actuellement fournis dans l'identification temporelle de filtres récurrents ([4], [6]). L'extension de ces principes au cas du contrôle actif d'ondes stationnaires de nature différente (vibratoire par exemple) semble pouvoir être raisonnablement envisagée.

Note reçue le 22 janvier 1988, acceptée le 8 février 1988.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. ROURE, Self Adaptive broadband active sound control system, *Journal of Sound and Vibration*, 101, (3), 1985, p. 429-441.
- [2] R. F. LA FONTAINE et I. C. SHEPHERD, An experimental study of broadband active attenuator for cancellation of random noise in ducts, *J.S.V.*, 91, (3), 1983, p. 351-362.
- [3] M. A. GALLAND et M. SUNYACH, Étude expérimentale des champs de pression et d'intensité acoustique dans un absorbeur actif de type monopolaire, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 302, série II, 1986, p. 931-933.
- [4] J. E. FROWCS WILLIAMS et C. F. ROSS, *Anti sound*, Oxford University press, 1986 (à paraître).
- [5] G. BILLOUD, M. A. GALLAND et M. SUNYACH, Anti Sound Systems in short ducts: An experimental investigation of causality and stability effects, *Journal de Mécanique Théorique et Appliquée*, numéro spécial de 1987 (à paraître).
- [6] P. M. CLARKSON et P. R. WHITE, Simplified Analysis of the LMS Adaptive Filter using a transfer function approximation, *I.E.E.E. Trans. on acoustics, speech and signal processing*, vol. ASSP 35, n° 7, juillet 1987.

École centrale de Lyon, Laboratoire de Mécanique des Fluides et Acoustique,  
Unité Associée au C.N.R.S. n° 263, 36, avenue Guy-de-Collongue, 69130 Ecully.