

Acoustique/Acoustics

Filtre numérique à réponse impulsionnelle infinie pour protecteurs auditifs actifs

Jean-Christophe BÉRA et Michel SUNYACH

Résumé – Les protecteurs auditifs actifs actuels sont des casques électrodynamiques commandés par des filtres analogiques simples, qui présentent une atténuation active limitée aux basses fréquences. En vue d'améliorer les performances de ces appareils, un filtrage numérique est proposé pour permettre la mise en œuvre de filtres plus complexes et donc susceptibles de mieux s'adapter à différents types de sources de contrebruit. Un tel système de filtrage a été réalisé et son fonctionnement est discuté sur un exemple d'application.

Digital IIR filter applied to active individual hearing protector

Abstract – Current active individual hearing protectors are electrodynamic headsets driven by simple analog filters. The active attenuation of these protectors is limited to low frequency components of noise. This study proposes digital filtering in the development of more complex filters which in particular can accommodate various antinoise sources. Such a filtering system has been constructed and its behaviour is discussed in light of results of a sample application.

I. INTRODUCTION. – *Principe de fonctionnement des protecteurs auditifs actifs.* – Il existe deux grands types de systèmes de contrôle acoustique actif : les systèmes à détection préalable, qui jouent sur la propagation de l'onde acoustique, et les systèmes de contrôle local, basés sur un asservissement des grandeurs acoustiques locales. Des protecteurs auditifs du premier type, utilisant des filtres numériques adaptatifs, ont été expérimentés (Pan *et al.*, 1994), mais ils ne peuvent traiter que des bruits périodiques : en effet, la réduction de bruits large bande nécessite une détection anticipée de l'onde acoustique qui est difficile à mettre en œuvre dans cette application. Par ailleurs, l'atténuation passive du protecteur auditif peut poser un problème de cohérence entre le champ extérieur incident et le champ interne à minimiser.

Ainsi, les systèmes actuellement envisagés reposent sur une minimisation locale de la pression acoustique (Carme, 1988). Le principe de fonctionnement est donc le suivant (cf. fig. 1) :

- l'oreille est isolée au mieux de l'extérieur par une protection acoustique passive,
- un microphone recueille la pression acoustique dans la cavité ainsi formée,
- le signal obtenu est filtré puis envoyé dans une source acoustique.

La boucle de rétroaction alors définie (de fonction de transfert $-HB$) conduit à une atténuation sonore donnée par la formule :

$$\frac{P_i + P_s}{P_i} = \frac{1}{1 - HB}$$

où P_i désigne la pression acoustique du bruit incident (son à atténuer), P_s la pression acoustique générée par la source de contrebruit, H la fonction de transfert du filtre correcteur, et B la fonction de transfert de la source de contrebruit émettant dans la cavité.

Le filtre H sert à compenser au mieux la fonction de transfert B , le principal problème étant de maîtriser l'instabilité correspondant à HB réel et supérieur ou égal à 1.

Note présentée par Geneviève COMTE-BELLOT.

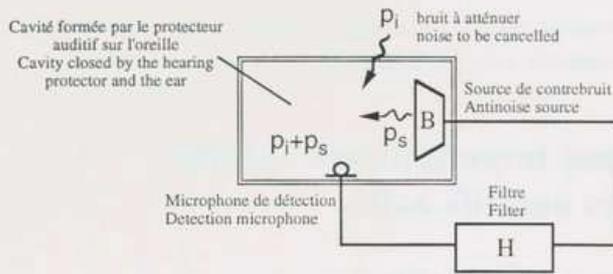


Fig. 1.

Fig. 1. – Principe de fonctionnement des protecteurs auditifs actifs : le microphone détecte la pression acoustique dans la cavité ($P_i + P_s$), le signal électronique obtenu est filtré, puis envoyé dans la source qui émet alors le contrebruit (P_s).

Fig. 1. – Functioning scheme of active individual hearing protector: the microphone measures the acoustic pressure in the cavity ($P_i + P_s$), the electronic signal obtained is filtered, and then fed to the acoustic actuator, which generates the antinoise (P_s).

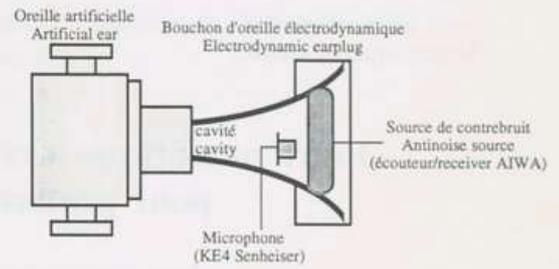


Fig. 2.

Fig. 2. – Représentation schématique du bouchon d'oreille électrodynamique actif, utilisé sur l'oreille artificielle de Zwislocki.

Fig. 2. – Diagram of the active electrodynamic earplug used on the Zwislocki artificial ear.

Limitation des systèmes actuels. – Différents modèles de protecteurs auditifs individuels actifs sont actuellement commercialisés. Il s'agit exclusivement de casques étanches à sources électrodynamiques pilotés par filtres électroniques analogiques. Pour des raisons pratiques de mise en œuvre, cette technique conduit à réaliser un filtrage simple : la fonction de transfert du filtre est de type « biquadratique », c'est-à-dire en variable de Laplace de la forme $T(s) = (s - z)(s - \bar{z}) / (s - p)(s - \bar{p})$, où z et p sont des coefficients complexes et \bar{z} et \bar{p} leurs conjugués. Ce filtrage s'avère bien adapté aux casques électrodynamiques.

Ces systèmes permettent une atténuation active large bande des basses fréquences. Sur les modèles commercialisés, la gamme d'atténuation s'étend classiquement jusqu'à environ 600 Hz, suivie par une zone de régénération plus ou moins marquée jusqu'aux alentours de 2 kHz.

Recherche de nouveaux systèmes pour étendre la gamme d'atténuation active. – La limitation aux basses fréquences de l'atténuation active du casque électrodynamique classique est essentiellement liée à la fonction de transfert de la source dans son montage acoustique, et à un degré moindre au système de filtrage. Il apparaît donc intéressant d'étudier d'autres types d'actuateurs que les sources électrodynamiques (en particulier les systèmes piézo-électriques) et d'autres types de charges acoustiques que celle du casque étanche (notamment le casque ouvert ou le bouchon d'oreille).

Ajoutons que les réponses électroacoustiques de tels systèmes peuvent être théoriquement plus favorables que celles des casques classiques vis-à-vis de l'antibruit, avec notamment un déphasage moindre. En contrepartie, elles peuvent être plus difficiles à compenser, de par leur plus grande irrégularité liée à la présence de modes et de couplages acoustiques. Des filtres plus complexes sont alors requis. Un système de filtrage numérique est alors nécessaire en pratique pour mettre en œuvre et optimiser le réglage du protecteur auditif.

II. RÉALISATION. – Un système de filtrage numérique à deux voies a été réalisé pour cette étude. Ce système se compose physiquement d'une carte de traitement du signal spécialement mise au point et basée sur un microprocesseur de traitement du signal associé à deux convertisseurs numérique-analogique et deux convertisseurs analogique-numérique parallèles. Le microprocesseur (ADS2101 d'Analog Devices) travaille au rythme d'une

multi-instruction en 81 ns, tandis que les convertisseurs analogique-numérique (AD7586 d'Analog Devices) effectuent une conversion complète en 1 μ s.

Le logiciel du microprocesseur, conçu pour l'étude, permet de mettre en œuvre deux filtres à réponse impulsionnelle infinie indépendants (un pour chaque oreille) échantillonnés à 100 kHz. Le filtrage est réalisé selon une structure cascade de cellules biquadratiques à phase minimale, qui limite l'impact de l'erreur d'arrondi sur le résultat final du calcul (Bellanger, 1980). Chaque filtre peut comporter jusqu'à cinq cellules biquadratiques.

Un programme informatique implanté sur ordinateur permet par calcul de simuler le filtre numérique afin de régler ses coefficients, c'est-à-dire la valeur et la position fréquentielle de chaque pôle ou zéro de la fonction de transfert. Ces paramètres peuvent alors être optimisés en temps réel par chargement du filtre.

La dynamique interne du filtrage est de 16 bits. Les problèmes de quantification qui en résultent sont pris en compte par la simulation. Le problème de dynamique d'entrée et de sortie du système n'est pas traité ici; des amplificateurs analogiques sont utilisés pour assurer les niveaux de tension nécessaires au bon fonctionnement du système. Le retard lié au caractère numérique du filtre (comprenant les temps de conversion, de calcul et de lissage) est au plus égal à 15 μ s : la pénalisation de phase qui en résulte reste donc toujours inférieure à $6 \cdot 10^{-3}$ degrés par hertz.

III. APPLICATION AU BOUCHON D'OREILLE ÉLECTRODYNAMIQUE. – Afin d'illustrer le fonctionnement de ce filtre numérique, on a considéré ici l'exemple de laboratoire d'un bouchon d'oreille actif à source électrodynamique. Pour la réalisation de nos mesures, ce bouchon est couplé à oreille artificielle (cf. fig. 2). La réponse fréquentielle du système électroacoustique obtenu est accidentée (cf. fig. 3). On observe en particulier entre 3,5 et 5,5 kHz une phase défavorable, voisine de -360° , correspondant à une instabilité potentielle (HB réel positif).

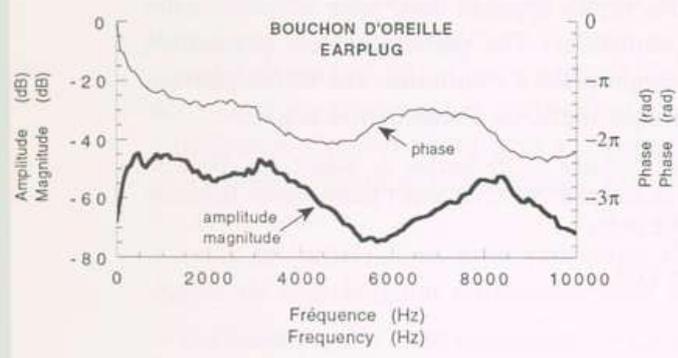


Fig. 3.

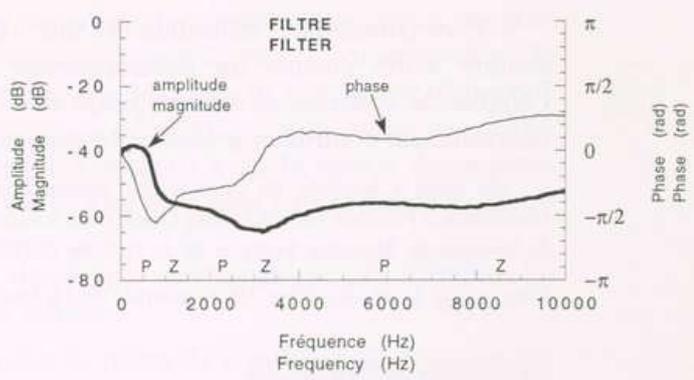


Fig. 4.

Fig. 3. – Réponse électroacoustique du bouchon d'oreille électrodynamique couplé à une oreille artificielle de Zwislocki : réponse fréquentielle source-microphone $B(f)$.

Fig. 3. – Electroacoustic frequency response of the electrodynamic earplug coupled with an Zwislocki artificial ear: source-microphone frequency response $B(f)$.

Fig. 4. – Réponse fréquentielle du filtre numérique de contrôle utilisé pour le bouchon électrodynamique (fonction de transfert H). Les positions des pôles et zéros correspondants sont notées par les lettres P et Z sur l'axe des fréquences.

Fig. 4. – Frequency response of the digital control filter applied to the electrodynamic earplug (H). Corresponding pole and zero positions are noted by P and Z on the frequency axis.

La figure 4 représente la fonction de transfert du filtre numérique de correction, qui comprend trois cellules biquadratiques. La première cellule correspond au système classiquement utilisé dans les casques électrodynamiques actifs étanches, pour une action en basses fréquences. Les deux cellules supplémentaires permettent d'améliorer la condition de stabilité en plus hautes fréquences, sur la gamme de 2 à 8 kHz.

L'atténuation active alors obtenue est représentée sur la figure 5 : on note une action positive importante jusqu'à 1 kHz. Corrélativement l'inévitable régénération parasite se trouve limitée en amplitude et repoussée au delà de 1,5 kHz.

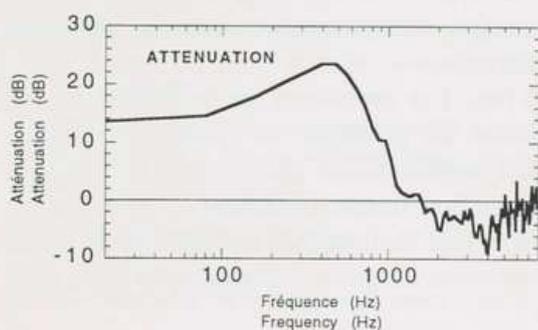


Fig. 5. – Atténuation active du bruit par le bouchon d'oreille électrodynamique : différence entre les niveaux acoustiques enregistrés sans et avec antibruit actif, dans une ambiance sonore large bande (10-10 000 Hz).

Fig. 5. – Noise active attenuation of the electrodynamic earplug: difference between the acoustic pressure levels measured without and with antinoise by the earplug control microphone in an external 10-10,000 Hz broad-band noise.

IV. DISCUSSION. – Tout d'abord on constate l'efficacité du filtrage numérique dans le cas particulier du bouchon d'oreille électrodynamique. La pénalisation de phase liée aux temps de calculs et de conversions a en particulier été maîtrisée. De plus, les progrès technologiques rapides et réguliers en matière de composants électroniques laissent prévoir l'apparition sur le marché de microprocesseurs et convertisseurs de plus en plus rapides et performants. Ainsi, les problèmes liés à la numérisation des filtres de contrôle sont très vraisemblablement appelés à céder le pas aux problèmes électroacoustiques de génération du champ de contrebruit.

V. CONCLUSIONS. – L'utilisation des filtres numériques apparaît donc pour les protecteurs auditifs actifs comme un développement prometteur. En particulier, en permettant l'emploi de systèmes de sources jusqu'alors inappropriés à l'antibruit, ces filtres peuvent indirectement contribuer à étendre la gamme fréquentielle de l'atténuation active.

Cette étude a bénéficié du soutien de l'Institut Franco-Allemand de Recherches de Saint-Louis (Deutsch-französisches Forschungsinstitut Saint-Louis) dans le cadre du contrat n° 90.02108 avec l'Établissement Technique de Bourges du Ministère Français de la Défense (ETBS/CETAM).

Note remise le 10 décembre 1994, acceptée le 13 février 1995.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- M. BELLANGER, *Traitement numérique du signal*, Masson, Paris, 1980, p. 235-257.
 C. CARME, Absorption acoustique active dans les cavités auditives, *Acustica*, 66, 1988, p. 233-246.
 G. C. PAN, A. J. BRAMMER, J. RYAN, J. ZERA et R. GOUBRAN, Active noise reduction for circumaural hearing protectors by digital feedforward control, 128th Meeting of ASA, Austin, 1994, *J. Acoust. Soc. Am.*, 96, p. 3274.

Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, URA CNRS 263,
 36, avenue de Collongue, BP n° 163, 69131 Ecully Cedex, France.