



**TECHNIQUES**  
**DE L'INGÉNIEUR**

Réf. : **BR3011 V1**

Date de publication :  
**10 avril 2008**

# Contrôle actif des bruits - Conception des systèmes et applications

Cet article est issu de : **Environnement - Sécurité | Bruit et vibrations**

par **Gérard MANGIANTE**

**Résumé** Les développements, dans les années quatre-vingt, de la microélectronique et du traitement numérique du signal, ont permis la réalisation de systèmes de contrôle actif adaptatif capables d'élaborer à chaque instant, et sans action extérieure, la commande optimale des sources secondaires. Ce progrès fut décisif et entraîna, dans les années quatre-vingt-dix, la naissance des premières applications industrielles du contrôle actif. Après avoir décrit l'architecture d'un système moderne de contrôle actif, cet article présente une synthèse sur les applications actuelles du contrôle actif et les études en cours.

**Abstract** The developments in the 80s of microelectronics and digital signal processing allowed for the implementation of adaptative active control systems capable of achieving the optimal command of secondary sources, at each instance and without any exterior action. These advances were decisive and led to the creation of the first active control industrial applications. After having described the architecture of a modern active control modern system, this article presents a synthesis of current active control applications and ongoing research.

**Pour toute question :**  
Service Relation clientèle  
Techniques de l'Ingénieur  
Immeuble Pleyad 1  
39, boulevard Ornano  
93288 Saint-Denis Cedex

**Par mail :**  
infos.clients@teching.com  
**Par téléphone :**  
00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **14/02/2025**

Pour le compte : **7200051982 - universite de bordeaux // 147.210.215.16**

© Techniques de l'Ingénieur | Tous droits réservés

# Contrôle actif des bruits

## Conception des systèmes et applications

par Gérard MANGIANTE

Professeur des universités

Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (CNRS Marseille)

1. Conception des systèmes .....	BR 3 011 - 2
1.1 Signaux .....	— 2
1.2 Systèmes .....	— 2
1.3 Choix des composants .....	— 5
1.4 Contrôleurs .....	— 8
2. Applications .....	— 10
2.1 Casques antibruit .....	— 10
2.2 Silencieux .....	— 11
2.3 Contrôle actif et industrie automobile .....	— 13
2.4 Contrôle actif et industrie aéronautique .....	— 14
2.5 Contrôle actif et protection des habitations .....	— 17
3. Aspects psychoacoustiques du contrôle actif .....	— 18
3.1 Indicateurs perceptifs .....	— 18
3.2 Contrôle actif des sons purs .....	— 19
3.3 Contrôle actif des sons complexes .....	— 20
3.4 Contrôle actif et confort acoustique .....	— 20
3.5 Bilan et perspectives .....	— 21
4. Conclusion .....	— 22
Pour en savoir plus .....	Doc. BR 3 011

*C*omme nous l'avons indiqué dans la première partie de ce travail, les développements, dans les années quatre-vingt, de la microélectronique et du traitement numérique du signal, ont permis la réalisation de systèmes de contrôle actif adaptatif capables d'élaborer à chaque instant, et sans action extérieure, la commande optimale des sources secondaires. Ce progrès fut décisif et entraîna, dans les années quatre-vingt-dix, la naissance des premières applications industrielles du contrôle actif.

Après avoir décrit l'architecture d'un système moderne de contrôle actif, nous allons présenter dans cet article une synthèse sur les applications actuelles du contrôle actif et les études en cours.

# 1. Conception des systèmes

Les premiers systèmes de contrôle actif étaient basés sur des dispositifs purement analogiques. Ils ne pouvaient pas « suivre » les variations du bruit à réduire car leurs réglages ne pouvaient être modifiés que par une action extérieure, par exemple en agissant sur des potentiomètres. Il en résultait que les conditions d'interférence destructive ne pouvaient pas être assurées à long terme, ce qui rendait ces systèmes difficilement utilisables pour des applications pratiques ou industrielles. Le passage à des dispositifs basés sur le traitement numérique du signal allait permettre l'essor du contrôle actif. Les raisons en sont bien connues :

- les systèmes numériques sont peu sensibles aux conditions environnementales et au vieillissement ;
- ils permettent de s'affranchir des erreurs résultant des non-linéarités des composants actifs ou des tolérances des composants passifs ;
- ils bénéficient des progrès toujours croissants de la microélectronique (accroissement des densités d'intégration et des vitesses de fonctionnement, augmentation des puissances de calcul, réduction des surfaces et des coûts) ;
- les seuls bruits de traitement à prendre en compte sont les **bruits de quantification** et les **bruits de calcul**. On peut réduire les premiers en augmentant le nombre de bits utilisé pour coder les données, et rendre les seconds négligeables en utilisant des processeurs à virgule flottante. Ces bruits étant parfaitement connus et stables, les filtres numériques sont très précis. Cette grande précision joue un rôle très important en contrôle actif si on se souvient que l'obtention d'une atténuation importante du bruit primaire nécessite un ajustement très fin de l'amplitude et de la phase du contre-bruit ;
- le contrôle actif peut être rendu **adaptatif** grâce à un algorithme *ad hoc* implémenté dans un processeur. Par cette technique, le système de contrôle actif peut suivre les variations des caractéristiques du bruit à réduire en modifiant, sans action extérieure, la commande des sources secondaires de façon à obtenir en permanence une atténuation optimale.

Le schéma de principe d'un système de contrôle actif est représenté figure 1. Il fait apparaître :

- un ensemble de **capteurs** qui délivrent les signaux de référence et les signaux d'erreur ;
- un **module de conditionnement** de ces signaux ;
- un **contrôleur** qui élabore, en temps réel, les signaux nécessaires au fonctionnement du système ;
- un **étage de puissance** destiné à adapter les signaux de sortie du contrôleur à la charge ;

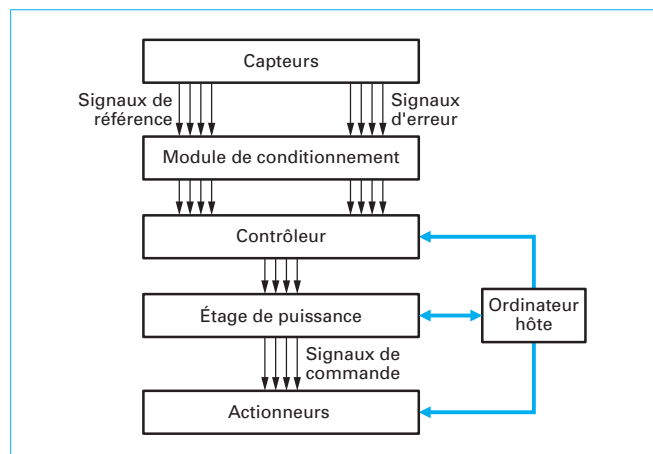


Figure 1 – Schéma fonctionnel d'un système de contrôle actif

- des **actionneurs** utilisés pour la réalisation des sources secondaires ;
- un **ordinateur hôte** qui assure le pilotage du dispositif de contrôle actif.

## 1.1 Signaux

On peut distinguer trois types de signaux :

- les signaux spécifiques au contrôle actif ;
- les signaux utilisés pour l'acquisition, le traitement et la restitution des données ;
- les signaux de communication avec l'ordinateur hôte.

### ■ Signaux spécifiques au contrôle actif

Les signaux spécifiques au contrôle actif sont les **signaux de référence**, les **signaux d'erreur** et les **signaux de commande** des sources secondaires :

- les signaux de **référence**, qui doivent être fortement corrélés avec le bruit primaire à réduire, sont obtenus, dans le cas d'une commande en boucle ouverte, à partir de **capteurs de référence** ou directement à partir de signaux électriques liés à la source de bruit (signal tachymétrique par exemple). Dans le cas d'une commande en boucle fermée, les signaux de référence sont élaborés par le contrôleur à partir d'une **estimation** du bruit à réduire ;
- les signaux **d'erreur** sont délivrés par des **capteurs d'erreur** disposés dans la région où le bruit primaire doit être réduit ;
- les signaux de **commande** des sources secondaires sont élaborés par le **contrôleur** à partir du traitement des signaux de référence et des signaux d'erreur par un algorithme approprié.

### ■ Signaux utilisés pour l'acquisition, le traitement et la restitution des données

L'acquisition, le traitement et la restitution des données sont gérés par un ou plusieurs processeurs. Par souci de souplesse et de simplicité de mise en œuvre, les signaux utilisés pour ces opérations sont généralement véhiculés par un bus standard comme, par exemple, le bus VME (*Versa Module Eurocard*).

### ■ Signaux de communication avec l'ordinateur hôte

Les signaux nécessaires à la communication entre l'ordinateur hôte et le système de contrôle actif sont véhiculés par une ou plusieurs connexions standards (RS232, USB, Centronics...).

## 1.2 Systèmes

### 1.2.1 Capteurs

Selon le type d'application envisagé, on peut utiliser des capteurs **acoustiques**, des capteurs **vibratoires** ou des ensembles combinant ces deux types de capteurs.

Le contrôle actif ne nécessitant pas de capteurs de métrologie à réponse plate et à caractéristiques constantes dans le temps, les **microphones à effet électret** sont les **capteurs acoustiques les plus utilisés** en raison de leur faible encombrement et de leur prix réduit.

Les **capteurs vibratoires** peuvent être des **accéléromètres** ou des **films piézoélectriques** de type PVDF (fluorure de polyvinylidène).

Lorsque le bruit à contrôler est produit par une machine tournante, un signal tachymétrique peut être utilisé comme signal de référence.

### 1.2.2 Module de conditionnement

Le module de conditionnement a pour fonction d'amplifier et de filtrer les signaux délivrés par les capteurs. L'amplification permet d'adapter le niveau des signaux reçus à la tension pleine échelle

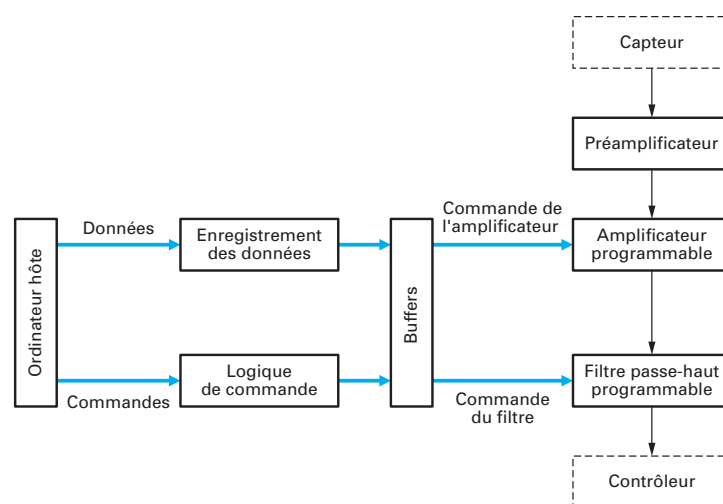


Figure 2 – Conditionnement des signaux

des étages suivants. Le filtrage peut être de type **passé-haut** ou **passé-bande** :

- un filtrage **passé-haut** permet d'améliorer le rapport signal sur bruit et d'éliminer les fréquences trop basses pour être traitées par les actionneurs ;
- un filtrage **passé-bande** permet de travailler dans un domaine de fréquences prédéterminé et rend inutile le filtrage anti-repliement.

Le schéma de principe d'une voie de conditionnement est représenté figure 2. On y trouve un **préamplificateur**, un **amplificateur à gain programmable**, un **filtre passé-haut programmable** et un circuit d'interface avec l'ordinateur hôte :

- le **préamplificateur** est utilisé lorsque le capteur est très éloigné (quelques dizaines de mètres) du contrôleur. Il permet de transporter, sans dégradation notable, le signal issu du capteur (par exemple un microphone à effet électret) jusqu'au module de conditionnement proprement dit.

Le préamplificateur associé au contrôleur Copanac, développé au Laboratoire de mécanique et d'acoustique de Marseille [1] présente les caractéristiques suivantes : niveau d'entrée 2 mV, bande passante de 20 Hz à 10 kHz, gain de 10, 20 ou 40 dB, ondulation inférieure à 0,5 dB dans la bande passante, impédance d'entrée 12 k $\Omega$ , impédance de sortie 90  $\Omega$ . Il est relié au module de conditionnement par des câbles en nappe torsadée blindés sous gaine ronde ;

- le gain de l'**amplificateur** du module de conditionnement et la fréquence de coupure du **filtre passé-haut** sont commandés par l'ordinateur hôte *via* le circuit d'interface qui élabore les mots de programmation.

Pour le module de conditionnement du contrôleur Copanac, l'amplificateur est programmable avec des mots de 3 bits permettant d'obtenir des gains de valeur 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 et 128. Le filtre passé-haut (de type elliptique d'ordre 7) est programmé avec des mots de 6 bits permettant de faire varier sa fréquence de coupure de 50 Hz à 20 kHz. Les échanges entre l'ordinateur hôte et le module de conditionnement se font *via* une liaison Centronics.

### 1.2.3 Contrôleur

Le contrôleur a pour rôle d'élaborer, à partir des signaux issus du module de conditionnement, les signaux de commande qui sont envoyés aux sources secondaires *via* un étage de puissance.

On peut le caractériser par les paramètres suivants :

- le nombre de voies analogiques d'entrée : ces voies sont utilisées pour les signaux de référence, les signaux d'erreur et (pour certains contrôleurs) pour le réglage du coefficient de convergence de l'algorithme. Leur nombre et leur affectation (voie de référence ou voie d'erreur) doivent être modulables en fonction de l'application envisagée ;
- le nombre, modulable lui aussi, de voies analogiques de sortie ;
- la dynamique des signaux d'entrée et de sortie ;
- la bande passante des signaux à traiter ;
- la fréquence d'échantillonnage.

Il se compose de trois sous-ensembles : le **module d'acquisition**, le **module de traitement** et le **module de restitution**.

#### 1.2.3.1 Module d'acquisition

Dans ce module sont effectuées, pour chaque signal d'entrée et simultanément, les opérations classiques de numérisation d'un signal analogique :

- un filtrage anti-repliement pour éliminer les fréquences supérieures à la fréquence maximale  $f_{\max}$  utile du signal ;
- un échantillonnage à la fréquence  $f_e$ , avec  $f_e > 2 f_{\max}$  pour respecter le critère de Shannon. Cet échantillonnage est généralement associé à un blocage pour figer l'échantillon pendant le temps nécessaire à la conversion ;
- une conversion analogique-numérique qui transforme la suite d'échantillons en mots binaires.

Ces opérations sont contrôlées par un processeur qui peut être le processeur gérant le module de traitement ou un processeur spécialement affecté à la commande des opérations d'entrée-sortie.

Le schéma de principe du module d'acquisition est représenté figure 3. L'acquisition peut se faire en parallèle (figure 4a) ou par multiplexage (figure 4b).

#### 1.2.3.2 Module de traitement

Lorsque l'algorithme FXLMS est utilisé pour réaliser le contrôle actif, le module de traitement doit effectuer les opérations suivantes :

- identification et stockage des réponses impulsionnelles de chaque source secondaire vers chaque capteur d'erreur ;
- lecture des signaux de référence et d'erreur ;
- calcul des références filtrées ;

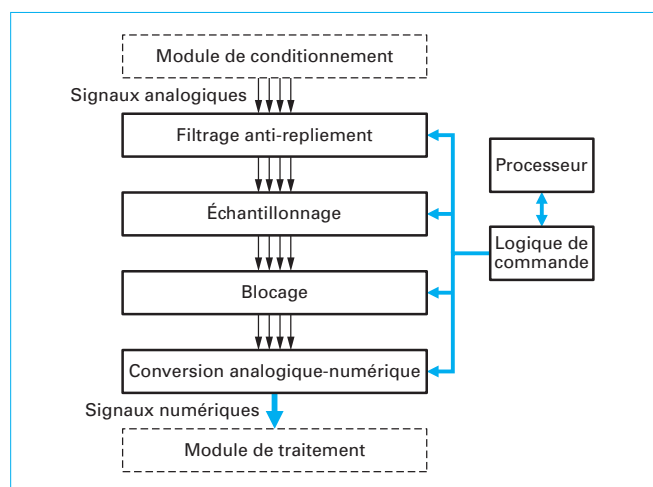


Figure 3 - Acquisition des signaux

- calcul des coefficients des filtres de commande ;
- calcul des signaux de commande ;
- envoi des signaux de commande.

L'identification doit être effectuée préalablement à la séquence de contrôle actif, alors que les autres opérations se font en temps réel.

Il existe trois méthodes d'identification :

- on peut envoyer des impulsions brèves à chaque source secondaire puis mesurer la réponse correspondante de chaque capteur. Les mesures utilisent généralement une méthode de moyenne temporelle afin d'améliorer le rapport signal sur bruit. Les impulsions doivent être séparées par une durée supérieure au plus long temps de réponse du système et leur amplitude ne doit pas être trop forte pour ne pas entraîner de phénomène de saturation ou des non-linéarités ;

- on peut aussi envoyer un signal de référence ou un bruit blanc à chaque source secondaire puis identifier les réponses par un algorithme de moindres carrés.

Les limites de fonctionnement du module de traitement sont liées au temps de cycle du processeur et à la taille de la mémoire disponible.

La performance théorique de ce module peut être évaluée par l'inégalité :

$$N_{op} \times f_e \times t_{cyc} \leq 1 \quad (1)$$

où  $t_{cyc}$  est la durée du cycle machine du processeur utilisé et  $N_{op}$  le nombre d'opérations arithmétiques que doit effectuer le contrôleur [2]. Le premier paramètre ne dépend que du type de processeur utilisé et ne peut être modifié. Le second est une fonction croissante du nombre de voies d'entrée et de sortie du contrôleur, et du nombre de coefficients des filtres numériques utilisés.

Par **exemple**, si on utilise le processeur de signal TMS320C25 de Texas Instruments ( $t_{cyc} = 100$  ns) pour réaliser un contrôle actif avec 5 microphones d'erreur et 5 sources secondaires, la fréquence maximale d'échantillonnage sera seulement de 1 kHz dans le cas de réponses impulsionnelles modélisées avec 60 coefficients et d'un filtre de contrôle à 15 coefficients.

Nous verrons plus loin comment on peut améliorer les performances du module de traitement en utilisant des structures parallèles multiprocesseurs.

Le schéma de principe de ce module est représenté figure 5.

### 1.2.3.3 Module de restitution

Ce module élabore, à partir des données numériques fournies par le module de traitement, les signaux destinés à commander les sources secondaires. Il effectue les opérations de conversion numérique-analogique, de filtrage et de lissage. Comme pour le module d'acquisition, la restitution peut se faire en parallèle ou par multiplexage.

### 1.2.4 Étage de puissance

L'étage de puissance permet d'adapter les signaux de sortie du contrôleur à la charge. Il peut éventuellement être programmé via l'ordinateur.

### 1.2.5 Actionneurs

En contrôle actif acoustique, le haut-parleur reste le principal type d'actionneur utilisé, à cause de sa souplesse d'emploi, de sa linéarité et de son faible coût. Son emploi devient toutefois

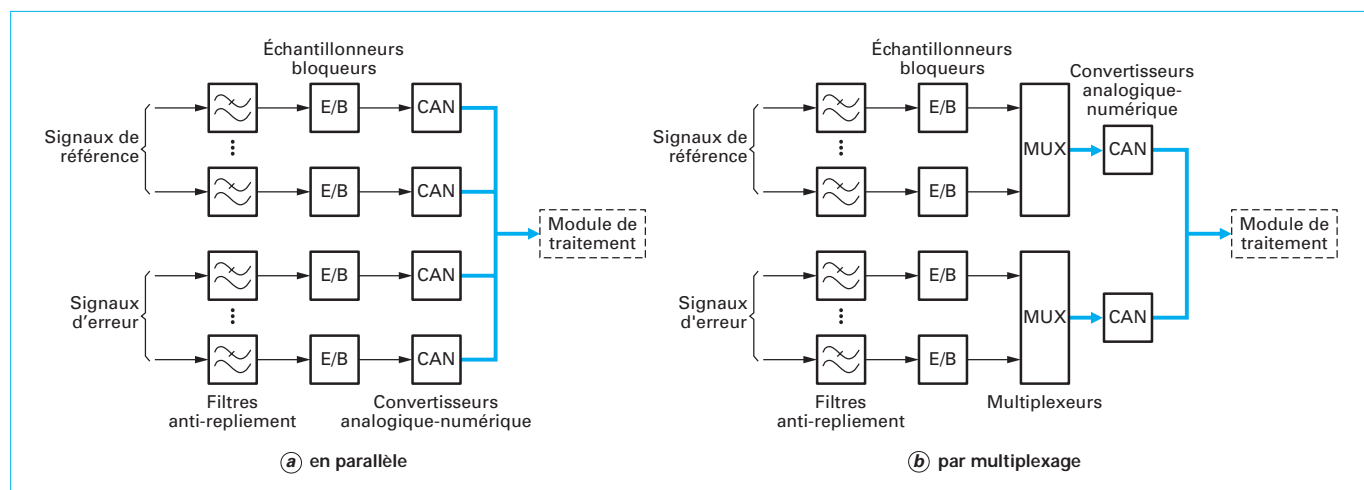


Figure 4 - Les deux modes d'acquisition

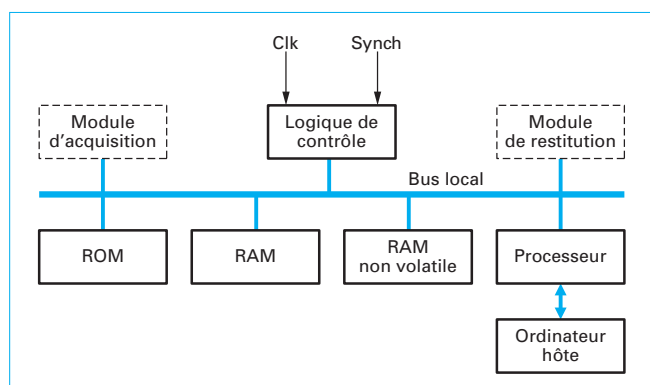


Figure 5 – Module de traitement

problématique lorsque les bruits à traiter sont de très fort niveau ou lorsque leur spectre se situe dans la gamme des très basses fréquences. Selon les applications visées, les haut-parleurs sont montés de façon à obtenir des sources monopolaires, dipolaires [3] ou tripolaires [4] [5].

La technologie EMFi™ (pour *ElectroMechanical Film*), développée au Centre de recherches techniques de Finlande, a permis la réalisation d'actionneurs plats spécialement dédiés au contrôle actif [6].

En contrôle actif vibratoire les céramiques piézoélectriques ou électrostrictives (PZT : titano-zirconate de plomb, PMN-PT : niobate de magnésium et de plomb) remplacent de plus en plus, quand le niveau vibratoire le permet, les traditionnels excitateurs électrodynamiques.

Pour le contrôle actif des fortes vibrations ou pour réaliser des suspensions actives, on utilise des pots vibrants ou des actionneurs spécialisés, associant un élément actif à des supports passifs.

### 1.2.6 Ordinateur hôte

L'ordinateur hôte, généralement de type PC, assure le pilotage du système de contrôle actif. Il contient les programmes de gestion du système, les programmes spécifiques à l'algorithme utilisé et une interface utilisateur permettant la sélection des paramètres et la visualisation, dans le domaine temporel ou le domaine fréquentiel, des fonctions de transfert et des signaux.

## 1.3 Choix des composants

### 1.3.1 Filtres anti-repliement

L'ordre  $M$  d'un filtre anti-repliement est un paramètre important en contrôle actif et ceci pour deux raisons :

– le retard de groupe introduit par le filtre est une fonction croissante de  $M$  selon la formule approchée [7] :

$$\tau_g \approx \frac{M}{8f_c} \quad (2)$$

où  $f_c$  est la fréquence de coupure du filtre.

Ce retard, ajouté à ceux introduits par les convertisseurs (convertisseurs analogique-numérique et numérique-analogique), le traitement numérique et le filtre de lissage, limite les performances du contrôleur car, à cause de la **contrainte de causalité**, il faut que la somme  $\tau_{\text{cont}}$  de ces retards reste toujours inférieure au retard acoustique (résultant du temps que met une onde pour aller du microphone de référence aux sources secondaires). On peut aussi montrer qu'une valeur trop grande de  $\tau_{\text{cont}}$  peut entraîner une instabilité de l'algorithme adaptatif [8] [9] ;

– la réalisation d'un filtre analogique d'ordre élevé (disons supérieur à 10) est difficile [10].

L'ordre d'un filtre est lié à sa dynamique  $DR$ , en dB, et à sa fréquence de coupure  $f_c$  par la relation approchée :

$$M \approx \frac{DR}{6 \log_2(f_e / 2f_c)} \quad (3)$$

Par **exemple**, avec une bande passante de 3 kHz, une fréquence d'échantillonnage de 12 kHz et une dynamique de 60 dB, le filtre anti-repliement doit être d'ordre 10.

Pour réduire l'ordre du filtre anti-repliement on utilise fréquemment en contrôle actif une technique basée sur un **sur-échantillonnage**, suivi d'une **décimation** (figure 6). On opère de la façon suivante :

– dans un premier temps, le signal est échantillonné à une fréquence  $K$  fois plus élevée que la fréquence d'échantillonnage  $f_e$  souhaitée afin de réduire l'ordre du filtre analogique anti-repliement ;

– après numérisation, la fréquence d'échantillonnage est réduite en ne conservant qu'un échantillon sur  $K$ . Cette opération, appelée **décimation**, est équivalente à un nouvel échantillonnage. Elle doit donc être précédée d'un filtrage anti-repliement afin de respecter le critère de Shannon. La décimation et le second filtrage anti-repliement sont obtenus par un traitement numérique sous le contrôle d'un processeur. Ce processeur peut être le processeur utilisé pour le traitement numérique ou un processeur dédié à cette opération. En agissant sur les coefficients du filtre on peut faire varier sa fréquence de coupure pour l'adapter à la largeur de la bande du bruit à contrôler.

L'augmentation de la fréquence d'échantillonnage se traduisant, d'après la relation (1), par une diminution des performances du processeur, le choix du coefficient de sur-échantillonnage  $K$  résulte le plus souvent d'un compromis.

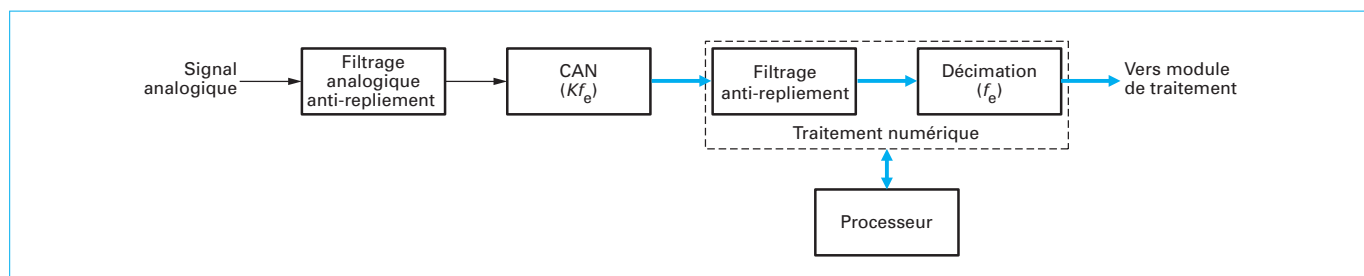


Figure 6 – Sur-échantillonnage et décimation



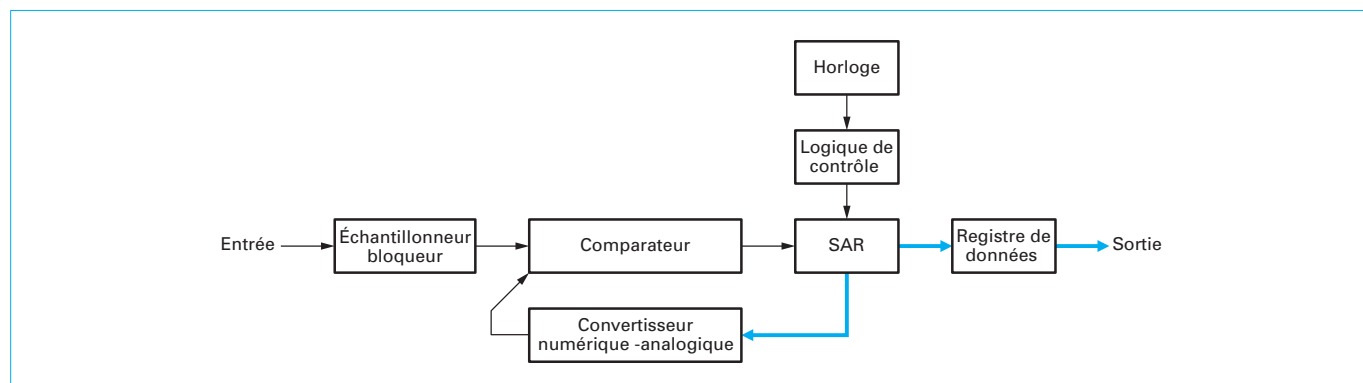


Figure 7 – Convertisseur analogique-numérique à approximations successives

### 1.3.2 Convertisseurs analogique-numérique

Les convertisseurs analogique-numérique (CAN) utilisés en contrôle actif doivent posséder une bonne dynamique, afin que des niveaux d'atténuation importants puissent être obtenus, et être suffisamment rapides pour ne pas générer des retards trop grands qui pénaliseraient le traitement des signaux.

La dynamique d'un CAN est liée à sa résolution  $N$  par la relation :

$$DR = 6,02 \times N \quad (4)$$

Par **exemple**, pour un convertisseur travaillant sur 16 bits on trouve  $DR = 96,3$  dB.

En pratique, la **dynamique effective**  $DR_{\text{effective}}$  est toujours inférieure à la valeur calculée par la relation (4) car la résolution d'un CAN est limitée par le rapport signal sur bruit. Le calcul de la **résolution effective** du convertisseur ou **ENOB** (pour *Effective Number of Bits*) permet d'évaluer la valeur de  $DR_{\text{effective}}$ . On a :

$$ENOB = \frac{SNR_{\text{effectif}} - 1,76}{6,02} \quad (5)$$

où  $SNR_{\text{effectif}}$  est le rapport signal sur bruit mesuré. Pour un convertisseur 16 bits, la dynamique effective est généralement de l'ordre de 90 dB.

La rapidité d'un CAN dépend de la technologie utilisée pour réaliser la conversion. Si l'on tient compte de la nécessité d'une

bonne résolution associée à un faible temps de conversion, seuls deux types de CAN du marché peuvent être utilisés actuellement en contrôle actif : les CAN à **approximations successives** et les convertisseurs **sigma-delta**.

#### 1.3.2.1 CAN à approximations successives

Les CAN à approximations successives réalisent des conversions en quelques microsecondes en comparant la valeur déterminée par une logique de commande avec la valeur d'entrée (figure 7). Pour cela, un séquenceur ou SAR (pour *Successive Approximation Register*), associé à un convertisseur numérique-analogique, génère une tension qui est comparée au signal à convertir. Le résultat de cette comparaison est envoyé au SAR dont le contenu est modifié bit par bit jusqu'à ce que la donnée qui s'y trouve soit l'équivalent numérique de la donnée analogique d'entrée.

Le temps de conversion croît avec la fréquence d'horloge et la résolution mais reste acceptable pour les applications de contrôle actif.

Par **exemple**, pour le circuit LTC1605-2 développé par Linear Technology, le retard entre l'instant d'échantillonnage et l'instant où la donnée convertie est valide est de 8  $\mu$ s pour une fréquence d'échantillonnage de quelques dizaines de kilohertz.

#### 1.3.2.2 CAN sigma-delta

Les convertisseurs sigma-delta utilisent le sur-échantillonnage et la décimation. Le CAN comporte une partie analogique, ou modulateur, et une partie numérique, localisées dans le même circuit intégré (figure 8).

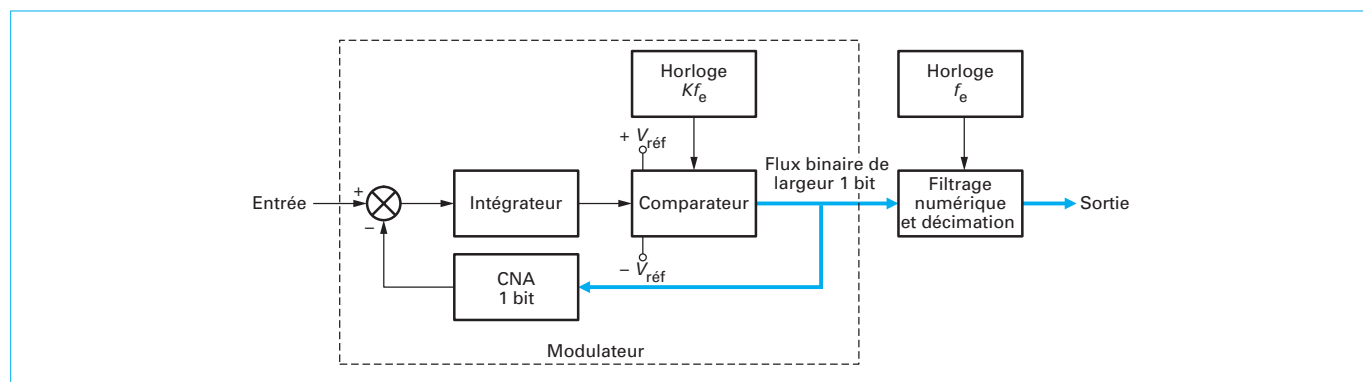


Figure 8 – Convertisseur analogique-numérique sigma-delta du premier ordre

• **Le modulateur** : dans un modulateur du premier ordre on trouve un sommateur, un intégrateur et un comparateur. Le comparateur, dont la sortie peut prendre les valeurs  $+V_{\text{réf}}$  et  $-V_{\text{réf}}$ , est cadencé à une fréquence de sur-échantillonnage  $Kf_e$  et se comporte comme un CAN de résolution 1 bit. La sortie du comparateur alimente un convertisseur numérique-analogique de résolution 1 bit qui ferme la boucle de contre-réaction du modulateur. Si le gain de boucle est suffisant, le modulateur fournit un flux binaire de 1 bit qui est une représentation du signal d'entrée. En pratique, l'ordre du modulateur (nombre de sommateurs et d'intégrateurs) peut être égal à 2 ou 3 pour améliorer le rapport signal sur bruit.

• **La partie numérique** : la fréquence d'échantillonnage est ensuite ramenée à la valeur  $f_e$  par une décimation précédée d'un filtrage numérique passe-bas pour augmenter la résolution du CAN qui peut ainsi atteindre jusqu'à 24 bits.

La valeur élevée de la fréquence de sur-échantillonnage permet de diminuer très fortement l'ordre du filtre anti-repliement à placer avant un convertisseur sigma-delta : un filtre RC du premier ordre suffit généralement.

Les convertisseurs sigma-delta sont utilisés dans de nombreuses applications de contrôle actif, mais leur usage est limité par le retard (ou temps de latence) entre l'instant de l'échantillonnage et le moment où la donnée numérique convertie est disponible. Ce retard, de l'ordre de 30 à 40 périodes d'échantillonnage, est introduit par le filtre numérique (le plus souvent de type FIR) associé à la décimation. Ce filtre est malheureusement d'ordre très élevé, avec un faible taux d'ondulation et une réponse en phase très plate, car il est optimisé pour des applications en audio et non pas en contrôle actif [11].

### 1.3.3 Processeurs

En théorie, cinq types de processeurs peuvent être utilisés en contrôle actif [12] [13] : les **circuits intégrés spécifiques** ou ASIC (pour *Application Specific Integrated Circuit*), les **circuits pré-diffusés programmables** ou FPGA (pour *Field Programmable Gate Arrays*), les **microcontrôleurs**, les **microprocesseurs à usage général** et les **processeurs de traitement de signal** ou DSP (pour *Digital Signal Processor*).

#### 1.3.3.1 ASIC

Les ASIC sont des circuits intégrés conçus pour réaliser une application donnée. Ils permettent d'obtenir un très haut niveau de performance car leur architecture est optimisée en fonction de cette application. En contrôle actif ils ne sont pas utilisés à cause de leur coût élevé (qui ne se justifie que dans le cas de très grandes séries), de leur temps de développement important et de leur manque de flexibilité.

#### 1.3.3.2 FPGA

Les FPGA sont des ensembles de cellules pouvant être interconnectées par programmation pour réaliser des fonctions complexes et en particulier des fonctions de traitement du signal. Les fonctions de ces cellules vont des fonctions de base (addition, multiplication, décalage...) aux fonctions les plus complexes (opérations en virgule flottante, filtrage...). Certains gros FPGA peuvent inclure des unités arithmétiques et logiques et des modules de logiciel appelés « cœurs » permettant de programmer des fonctions spécifiques (cœurs de microprocesseurs ou même cœurs de DSP). La programmation des FPGA se fait en langage VHDL (pour *Very High speed Hardware Description Language*) à l'aide d'environnements de programmation intégrés fournis par les constructeurs comme, par exemple, ISE, proposé par Xilinx.

En contrôle actif, on les retrouve :

- dans les modules d'acquisition en aval des convertisseurs analogique-numérique, afin de réduire, par un prétraitement, le flux de données envoyé au module de traitement ;
- dans le module de traitement où ils sont quelquefois utilisés comme coprocesseurs d'un DSP.

Leur coût, qui reste élevé, limite toutefois leur utilisation.

#### 1.3.3.3 Microcontrôleurs

Les microcontrôleurs sont rarement utilisés en contrôle actif car leurs performances en traitement du signal sont très limitées : faible précision, délai important pour les calculs d'adresse ou la gestion des boucles, mémoire limitée. L'apparition récente de microcontrôleurs possédant des ressources utiles en traitement du signal (multiplicateur, décaleur barillet) comme l'ARM7TDMI de Acorn RISC Machines ne devrait pas modifier la situation dans un proche avenir.

#### 1.3.3.4 Microprocesseurs à usage général

• Les microprocesseurs d'entrée de gamme sont peu adaptés au traitement du signal au contrôle actif. Les raisons en sont nombreuses :

- leur bande passante mémoire, très limitée, ne leur permet pas de traiter en temps réel d'importants flux de données ;
- les opérateurs arithmétiques dont ils disposent sont peu performants pour réaliser une opération fondamentale en filtrage numérique, la multiplication ;
- le calcul des adresses et la gestion des boucles sont à l'origine d'importants retards.

• Les microprocesseurs équipant les ordinateurs personnels ou les stations de travail commencent à apparaître dans la réalisation de certains contrôleurs à cause de leurs très bonnes performances en traitement numérique du signal. À l'origine de ces performances on trouve un certain nombre de caractéristiques possédées par ces processeurs :

- des fréquences de fonctionnement très élevées ;
- des unités fonctionnelles arithmétiques équivalentes à celles des processeurs de signal ;
- une architecture superscalaire qui leur permet d'exécuter plusieurs instructions en parallèle ;
- des mécanismes de prédiction de branchement dynamique ;
- des caches multiniveaux qui permettent de réduire la latence d'accès entre l'unité centrale et la mémoire ;
- des instructions spécialisées ;
- des extensions SIMD (pour *Single Instruction Multiple Data*) qui permettent de traiter les données par paquets.

On distingue deux types de processeurs :

- les processeurs CISC (pour *Complex Instruction Set Computer*), qui sont dotés d'un grand nombre d'instructions, comme le Pentium de Intel ;
- les processeurs RISC (pour *Reduced Instruction Set Computer*) plus rapides, mais aussi plus chers, que les précédents (PowerPc de IBM-Motorola, UltraSparc de Sun Microsystems, MICS Rxxx de Silicon Graphics ou DEC de Digital Equipment Corp.).

Ces processeurs sont programmés en langage C. Leur utilisation en contrôle actif est actuellement limitée par les facteurs suivants :

- l'absence d'outils de développement orientés vers le traitement du signal rend difficile l'implantation des algorithmes de contrôle ;
- un comportement temporel non déterministe lié aux mécanismes de prédiction de branchement dynamique ;
- un encombrement, une consommation et un rapport coût/performance élevés.

#### 1.3.3.5 DSP

Les DSP sont les processeurs les plus employés actuellement en contrôle actif, en particulier ceux développés par Texas Instruments et Analog Devices. Ils possèdent les caractéristiques suivantes :

- une architecture de type Harvard (bus adresse et bus de données dédoublés pour permettre un accès simultané aux données et aux instructions, mémoire multiport ou divisée en mémoire de données et mémoire de programme avec accès simultané) ;
- une unité de calcul permettant de réaliser les opérations arithmétiques en un seul cycle (instruction MAC, pour *Multiply And Accumulate*) ;
- un jeu d'instructions spécialisé (par exemple des instructions pour l'exécution rapide des boucles) permettant de tirer le meilleur parti de l'architecture ;



- une ou plusieurs unités de calcul d'adresse qui permettent d'effectuer simultanément le traitement d'une donnée et le calcul de l'adresse de la donnée suivante ;
- une unité de contrôle optimisée pour la gestion rapide des interruptions et des boucles ;
- des périphériques (ROM, ports série, ports parallèle, générateurs d'horloge, contrôleurs DMA...) ;
- des périphériques spécialisés (interfaces ISA, PCI...) ;
- un excellent rapport coût/performance.

La mise en œuvre des DSP est facilitée par l'existence d'environnements de développement intégrés ou IDE (pour *Integrated Development Environment*) dédiés à la programmation du DSP comme *Code Composer Studio* de Texas Instruments ou *VisualDSP++* pour Analog Devices. Ces environnements comprennent :

- des compilateurs C et C++ spécifiques aux instructions de la famille du DSP ;
- des simulateurs permettant de programmer et de déboguer sans la présence physique du DSP ;
- des émulateurs permettant de télécharger le code compilé sur le DSP et de déboguer sur le matériel ;
- des *profilers* pour la caractérisation des temps d'exécution du code ;
- des bibliothèques de fonction.

Les DSP peuvent être à **virgule fixe** ou à **virgule flottante**. Les premiers sont rapides, leur coût est peu élevé et leur consommation faible. Ils sont plus difficiles à programmer que les seconds car une attention particulière doit être portée au cadrage des données : il faut éviter des débordements tout en conservant un maximum de précision. Les processeurs à virgule flottante permettent de développer rapidement des applications mais ils sont plus chers et consomment plus que les DSP à virgule fixe.

Les propriétés de ces deux types de processeurs sont comparées dans le tableau 1.

Des renseignements complémentaires peuvent être trouvés dans le fascicule [E 3 565] « Processeurs de traitement numériques du signal (DSP) ».

Tableau 1 – Comparaison des DSP

Caractéristique	Virgule fixe	Virgule flottante
Nombre de bits	16, 20, 24	32 (24 bits pour la mantisse et 8 bits pour l'exposant)
Dynamique	Moyenne	Très importante
Précision	Plus faible que pour DSP à virgule flottante	Plus grande que pour DSP à virgule fixe
Programmation	Plus difficile que pour DSP à virgule flottante	Plus simple que pour DSP à virgule fixe
Hardware	Simple	Complexe
Coût	Plus faible que pour DSP à virgule flottante	Plus élevé que pour DSP à virgule fixe

### 1.3.4 Convertisseurs numérique-analogique

En contrôle actif, les contraintes portant sur le convertisseur numérique-analogique sont identiques à celles évoquées pour le convertisseur analogique-numérique. Le CNA doit posséder une grande dynamique et ne doit pas introduire un retard trop important dans la chaîne de traitement. Les deux types de CNA utilisés sont les convertisseurs sigma-delta, qui présentent les inconvénients déjà évoqués au paragraphe 1.3.2.2, et les convertisseurs multiplieurs à structure R-2R.

### 1.3.5 Filtres de lissage

Le choix du filtre de lissage et de la technique de filtrage suit les règles données au paragraphe 1.3.1. Le sur-échantillonnage suivi d'une décimation est la technique la plus fréquemment employée. On trouvera une discussion détaillée concernant le filtrage de lissage dans la référence [7].

## 1.4 Contrôleurs

Lorsque le contrôle actif ne nécessite qu'un nombre réduit de voies, les fonctions du contrôleur peuvent être assurées par des cartes du commerce (principalement basées sur des processeurs de signal) implantées dans un ordinateur de type PC. Pour des applications nécessitant un grand nombre de voies, des architectures spécialisées doivent être développées.

Par **exemple**, Darbyshire et Kerry [14] décrivent un système de contrôle actif utilisant 96 actionneurs, 500 capteurs, 160 DSP et pouvant effectuer  $9,6 \times 10^9$  opérations flottantes par seconde. Entre ces deux extrêmes il existe des contrôleurs à usage général commercialisés par des sociétés ou développés par des laboratoires. Parmi les premiers, on peut citer le NoVACS™ [15] [16] proposé par TechnoFirst, le EZ-ANC™ de Causal Systems Limited [17] ou le ZEN™ de Soft-dB [18]. Le Copanac, déjà cité, à architecture parallèle, a été développé au Laboratoire de mécanique et d'acoustique de Marseille.

Une comparaison de ces contrôleurs est donnée dans le tableau 2. Les faces avant de trois contrôleurs du commerce sont représentées figure 9 et un exemple de visualisation des signaux est montré figure 10.

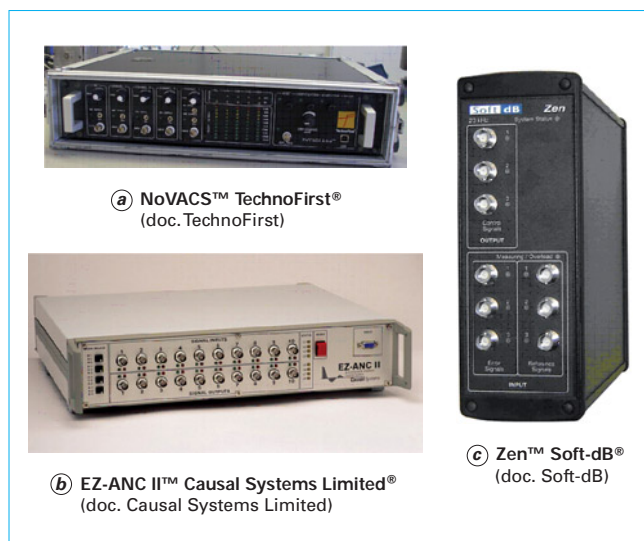


Figure 9 – Faces avant des contrôleurs

Tableau 2 – Comparaison de quatre contrôleurs (données fournies par les constructeurs)

Caractéristique	NoVACS™	EZ-ANC II™	ZEN™	Copanac
Entrées	11	10	6	19
Sorties	8	10	3	16
Résolution des CAN et des CNA	12 bits	32 bits	16 bits	12 bits
Processeurs	DSP TMS320C25 (Texas Instruments) virgule fixe	DSP ADSP21062 (Analog Devices) virgule flottante	DSP TMS320C5502 (Texas Instruments) virgule fixe	DSP TMS320C50 (Texas Instruments) virgule fixe
Nombre de DSP	1	1	1	17
Fréquence d'horloge du DSP	40 MHz	33 MHz	300 Hz	57 MHz
Fréquence d'échantillonnage	Ajustable jusqu'à 10 KHz	5,2 kHz à 32 kHz Possibilité de division par 8 ou 64 par programme	78 kHz Ajustable par décimation	20 kHz Ajustable par décimation
Communication avec l'ordinateur hôte	RS-232	RS-232	USB 2.0	RS-232
Constructeur	TechnoFirst® (France)	Causal Systems Limited® (Australie)	Soft-dB® (Canada)	LMA, CNRS (France)

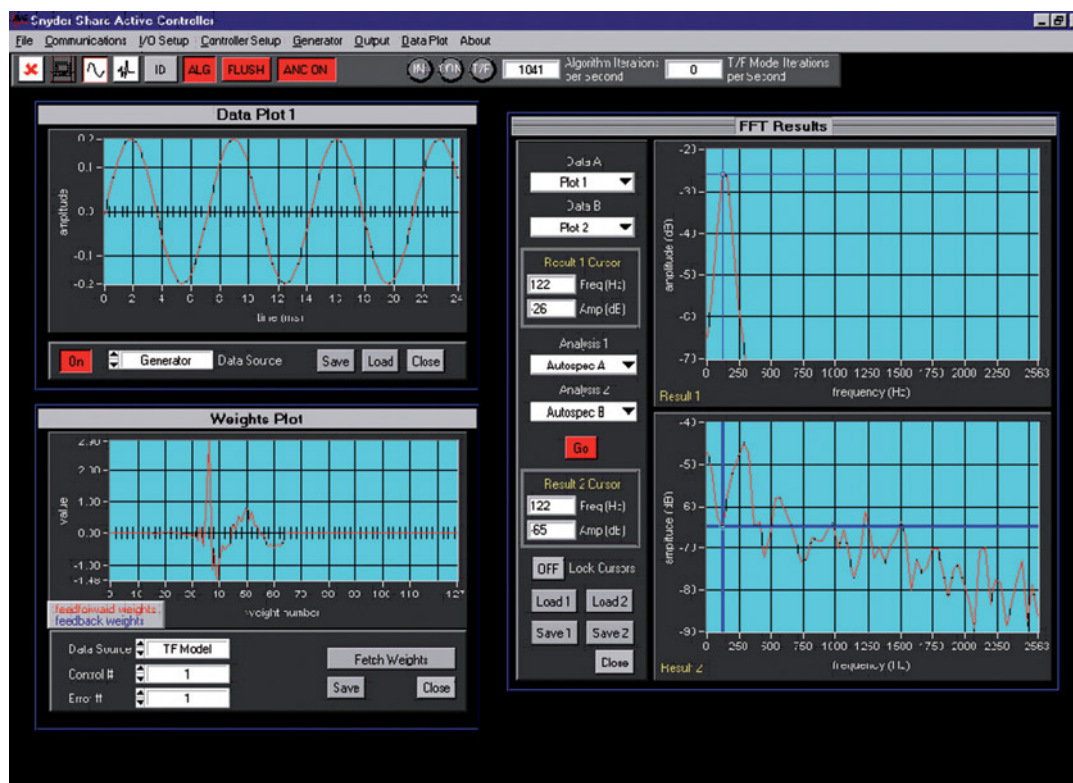


Figure 10 – Visualisation des signaux du contrôleur EZ-ANC II™ Causal Systems Limited® (doc. Causal Systems Limited)



Figure 11 – Casque antibruit actif analogique

## 2. Applications

Le nombre de publications relatives aux applications du contrôle actif étant de plusieurs milliers, la bibliographie relative au paragraphe 2 ne peut être que sélective. Le lecteur désireux de compléter son information pourra consulter les recueils de conférences cités dans les références [19] [20] [21] [22] [23] [24] [25] [26] [27] ainsi que les bases de données sur cédérom GORBI [28] et GOPI [29] constituées par D. Guicking et régulièrement mises à jour par l'auteur. GORBI recense la quasi-totalité des publications sur le contrôle actif et GOPI donne la liste des brevets basés sur cette technique.

### 2.1 Casques antibruit

Les casques antibruit classiques, efficaces aux fréquences moyennes ou élevées, protègent mal leur porteur des bruits à basse fréquence car, dans ce cas, l'épaisseur des coquilles devient trop petite devant la longueur d'onde. Pour améliorer leur efficacité dans les basses fréquences, on a pensé très tôt à utiliser le contrôle actif puisque dans ce domaine un point sourd dans la coquille du casque suffit à réduire le bruit dans le conduit auditif. Dès les années cinquante, on vit apparaître les premières tentatives de réalisation de casques antibruit actifs [30] [31] [32] [33] mais ces tentatives restèrent sans suite à cause des limitations imposées par l'électronique de l'époque et faute de bases théoriques et pratiques suffisantes concernant les mécanismes du contrôle actif dans les cavités. Ces bases allaient être fournies, à la fin des années quatre-vingt, par les études de Wheeler [34] et de Carme [35], et de nombreux produits industriels allaient voir le jour.

On peut classer les casques actuellement disponibles selon plusieurs critères : la stratégie de contrôle actif utilisée, leur destination ou la forme de leurs oreillettes.

#### 2.1.1 Stratégies de contrôle actif

Les casques utilisant le contrôle actif analogique en boucle fermée sont très populaires à cause de leur simplicité et de leur excellent rapport coût/performance. L'électronique miniaturisée, placée dans la coquille, se réduit à un microphone, un filtre *ad hoc* et un haut-parleur (figure 11). Les effets combinés de l'atténuation passive et de l'atténuation active permettent d'obtenir un contrôle

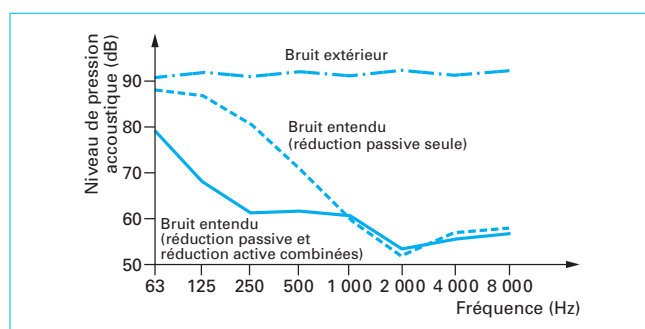


Figure 12 – Réduction du bruit par casque NoiseMaster™ (doc. TechnoFirst)

actif efficace dans une bande s'étendant de quelques dizaines de hertz (30 à 50 Hz) à quelques centaines de hertz (de 500 à 800 Hz environ). La figure 12 montre les performances du casque NoiseMaster™ commercialisé par TechnoFirst.

La réalisation de casques basée sur le contrôle actif adaptatif reste problématique à ce jour :

- le contrôle adaptatif en boucle fermée introduit des retards, liés au temps de cycle des processeurs et aux réponses des convertisseurs et des filtres, qui limitent les performances du casque lorsque le bruit à réduire est à large bande ;
- des casques expérimentaux utilisant le contrôle actif adaptatif en boucle ouverte ont été étudiés [36] [37], mais leur usage est pénalisé par la nécessité de placer un microphone de référence hors du casque.

Des travaux de laboratoire étudient actuellement la possibilité de réaliser des casques combinant le contrôle actif en boucle ouverte et le contrôle actif en boucle fermée [38] [39].

#### 2.1.2 Utilisation

Les casques antibruit actifs ont d'abord été développés pour améliorer la communication en milieu bruyant. Parmi les principaux secteurs d'utilisation concernés, on peut citer, mais la liste n'est pas exhaustive, les cimenteries, les verreries, les forges, les opérations



(a) casque de pilote d'hélicoptère



(b) casque de chantier

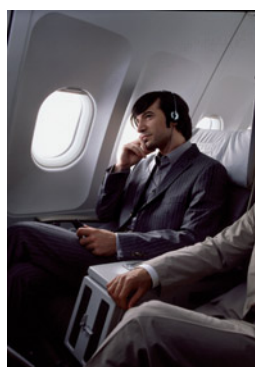


(c) casque avec câble de communication

Figure 13 – Casques à usage professionnel (doc. TechnoFirst)



(a) Sennheiser® PXC 450®  
tour d'oreille, connexion minijack 3,5 mm,  
adaptateurs avion et 6,5 mm, alimentation  
par une pile LR03, poids 240 g  
(doc. Sennheiser)



(b) Sennheiser® PXC 250®  
supra-auriculaire, connexion minijack 3,5 mm,  
adaptateurs avion et 6,5 mm, alimentation  
par deux piles LR03, poids 65 g hors câble  
(doc. Sennheiser)



(c) Bose® QuietComfort 3®  
supra-auriculaire, connexion minijack 3,5 mm,  
adaptateurs avion et 6,5 mm, alimentation  
par batterie, poids 159 g  
(doc. Bose)

Figure 14 – Exemples de casques antibruit grand public

de maintenance de machines en opération (générateurs, turbines...), les opérations au sol dans les aéroports et les cabines d'engins de travaux publics, d'hélicoptères ou de chars d'assaut (figure 13).

Devenus abordables, les casques antibruit actifs sont maintenant très utilisés par le grand public, essentiellement pendant les déplacements. Leur efficacité dans les basses fréquences leur permet d'éliminer les bruits de réacteur dans un avion, ou les bruits de roulement dans un train ou dans un métro, tout en permettant les conversations avec son voisin. Les modèles grand public possèdent aussi un câble audio ou une fiche minijack destinés à la connexion d'un équipement audio de type baladeur, lecteur de CD ou de DVD ou MP3 pour une écoute de la musique avec des performances bien supérieures à celles des casques audio classiques. Ils sont le plus souvent livrés avec un adaptateur multistandard permettant leur raccordement aux prises incorporées dans les accoudoirs des sièges d'avion pour permettre l'écoute des films et de la musique diffusés en cabine (figure 14).

### 2.1.3 Types de casques

Selon la forme de leur oreillette, on distingue trois types de casques antibruit actifs : les casques **tour d'oreille**, les casques **supra-auriculaires** et les casques **intra-auriculaires** :

- les oreillettes des casques **tour d'oreille** entourent entièrement le pavillon et possèdent une bonne étanchéité car ils s'appuient directement sur la boîte crânienne. Les dimensions importantes des oreillettes permettent d'utiliser des actionneurs de grand diamètre, ce qui assure à ces casques d'excellentes performances. Le prix à payer est un encombrement important, même lorsque les casques sont repliés ;

- les oreillettes des casques **supra-auriculaires** s'appuyant sur le pavillon, les casques de ce type sont de ce fait, moins étanches que les précédents. Leur taille réduite rend ces casques très adaptés à une utilisation au cours d'un déplacement ;

- les casques **intra-auriculaires** se logent dans le conduit auditif. Leur faible taille nécessite l'utilisation d'un boîtier extérieur au casque.

## 2.2 Silencieux

L'application du contrôle actif à la réalisation de silencieux dans des conduits est ancienne [40] et l'une des plus avancées, au même titre que les casques, du point de vue industriel. Cela tient à la relative simplicité du problème à résoudre : lorsqu'on se limite au domaine des basses fréquences, le contrôle actif en boucle



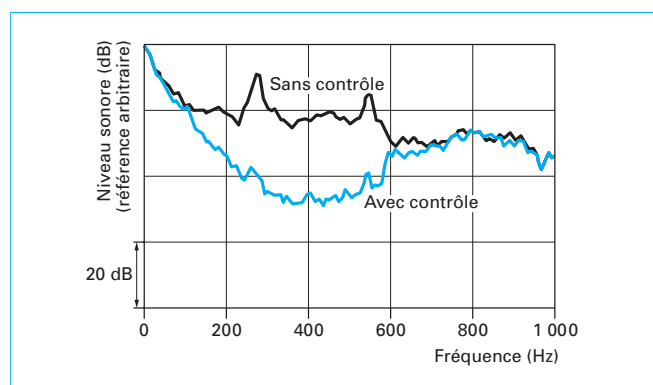


Figure 15 – Contrôle actif dans un conduit (d'après Roure [41])

ouverte peut être obtenu avec un haut-parleur placé sur la paroi du conduit, un microphone de référence placé en amont du haut-parleur et un microphone d'erreur en aval de celui-ci. La figure 15, caractéristique de l'application, montre le spectre du bruit observé, avant et après contrôle actif, dans un conduit de 40 cm × 30 cm avec un écoulement de 9 m/s [41] :

- pour les fréquences inférieures à 100 Hz, la turbulence présente sur le microphone de référence empêche toute minimisation. Cette minimisation reste toutefois possible si des raies émergent du spectre ;
- jusqu'à la fréquence de coupure du tuyau, qui se situe aux environs de 600 Hz, on observe une réduction de l'ordre d'une vingtaine de dB du bruit large bande et d'une trentaine de dB des raies créées par la rotation du ventilateur ;
- au-delà de cette fréquence de coupure, les résultats du contrôle actif et des traitements passifs doivent prendre le relais.

Divers facteurs limitent les performances du contrôle actif dans un conduit :

- ses dimensions latérales, qui déterminent la valeur de la fréquence de coupure du conduit (celle-ci est inversement proportionnelle à la plus grande de ces dimensions) ;
- la vitesse de l'écoulement, qui est à l'origine de bruits de mesure sur les microphones ;
- la longueur de tuyau rectiligne disponible en amont de la source secondaire (contrainte de causalité, cf. le paragraphe 1.3.1).

Dès les années quatre-vingt-dix, la société Digisonics Inc. implantait dans divers sites industriels aux États-Unis des silencieux actifs utilisant la technologie Digiware™. Cette technologie, basée sur les brevets de L. J. Eriksson *et al.* [42] et développée par Digisonics, utilise un contrôle actif en boucle ouverte avec des filtres à réponse impulsionnelle infinie. Les problèmes de pollution sonore résolus avec succès grâce à cette technologie sont nombreux [43]. On peut décrire trois cas industriels qui donnent une bonne idée des domaines d'application de cette technologie.

– **Épurateurs chimiques** : ces épurateurs, installés dans une tannerie pour traiter l'air de procédé avant son rejet dans l'atmosphère, utilisent quatre ventilateurs centrifuges d'environ 10 m<sup>3</sup>/s de débit. Des silencieux actifs placés en aval de ces ventilateurs ont permis une réduction de 10 dB du bruit en champ lointain dans l'octave 125 Hz, correspondant à la fréquence de passage des pales.

– **Usine de production de papier** : le bruit provenant de cette usine avait pour origine quatre pompes à vide à anneau liquide utilisées pour la déshydratation du papier. Une réduction de 30 dB de la fréquence dominante (90 Hz) a été obtenue grâce à un silencieux actif utilisant une puissance électrique de 200 W.

– **Usine de produits de papeterie** : le bruit d'un ventilateur de 5 m<sup>3</sup>/s de débit, utilisé pour l'extraction des déchets de papier de divers postes de travail, créait un son pur à 200 Hz qui pouvait être entendu jusqu'à 1 800 m de distance. Un silencieux actif placé entre le ventilateur et le cyclone a permis de réduire ce bruit de 30 dB, le rendant ainsi inaudible dans la zone avoisinant l'usine.

Parmi les silencieux actifs disponibles sur le marché on peut citer l'ACTA™ et l'ASCA™, commercialisés par Technofirst.

– **L'ACTA** est un silencieux cylindrique qui permet de réduire, par contrôle actif en boucle ouverte, les bruits de basses fréquences générés par les réseaux aérauliques dans les bâtiments et par les systèmes d'aspiration ou de ventilation dans l'industrie. Les hautes et moyennes fréquences sont traitées par des dispositifs passifs traditionnels d'atténuation.

– **L'ASCA** se présente sous la forme d'un boîtier métallique compact qui contient un microphone d'erreur, une électronique de commande, un amplificateur et un haut-parleur destiné à réduire les bruits de basses fréquences par contrôle actif en boucle fermée. Parmi ses applications, on peut citer le traitement, en sortie ou en entrée, des conduits courts, des prises d'air et des diffuseurs d'air ou des unités de conditionnement d'air autonomes (figure 16).



Figure 16 – Exemples de silencieux actifs commercialisés (doc. TechnoFirst)

## 2.3 Contrôle actif et industrie automobile

Dans l'industrie automobile, on trouve des applications du contrôle actif dans trois domaines :

- la réduction du bruit à l'intérieur de l'habitacle ;
- la réduction du bruit émis dans l'environnement par le véhicule ;
- l'amélioration de la qualité sonore.

On trouvera dans la référence [44] une bonne synthèse de ces applications.

### 2.3.1 Bruit à l'intérieur de l'habitacle

Le bruit à l'intérieur de l'habitacle peut avoir trois origines : le bruit du moteur, le bruit de roulement, généré par le contact entre le pneu et la route, et le bruit lié à l'écoulement de l'air autour de l'habitacle lorsque la vitesse du véhicule est élevée.

#### 2.3.1.1 Bruit du moteur

À l'origine du bruit produit par le moteur dans l'habitacle, il y a les vibrations engendrées par le mouvement de l'attelage mobile (pistons, bielles et vilebrequin) et par les forces résultant de la combustion. Ces vibrations ont un double effet :

- elles sont à l'origine d'un rayonnement acoustique dans l'habitacle et à l'extérieur de celui-ci ;
- elles sont transmises par voie solide aux divers éléments de l'habitacle qui deviennent ainsi des sources de bruit.

Le bruit de moteur est périodique, et on peut montrer que sa fréquence fondamentale  $f_0$  est le double de celle du régime moteur. Par exemple, lorsque ce régime varie entre 600 tr/mn et 6 000 tr/mn,  $f_0$  varie entre 20 Hz et 200 Hz. Un système de contrôle actif en boucle ouverte utilisant un signal tachymétrique comme signal de référence et un nombre limité d'actionneurs (les haut-parleurs déjà présents dans le véhicule pour l'écoute de la radio et de la musique) peut donc être implanté pour réduire le niveau du bruit de moteur. La figure 17 donne le schéma de principe du système Lotus EOC™ (pour *Engine Order Cancellation*) développé en Grande-Bretagne par Lotus et implanté (pour le marché Japonais seulement) sur la Nissan Bluebird au début des années quatre-vingt-dix.

Bien que de nombreuses études portant sur l'intégration de systèmes de contrôle actif dans des véhicules aient été menées ces dernières années (et notamment à l'Institut de recherches sur les sons et les vibrations de Southampton, Grande-Bretagne, et au Laboratoire de mécanique et d'acoustique de Marseille) il n'y a pas à ce jour, à l'exception de la Nissan précédemment citée, de voiture commercialisée avec un système de contrôle actif du bruit du moteur. Les raisons en sont à la fois économiques et psychologiques :

- malgré sa relative simplicité, le coût de l'implantation du système décrit figure 17 reste élevé, essentiellement à cause des frais d'étude et de modification du câblage du véhicule à traiter. Dans le cas des véhicules d'entrée de gamme ou de moyenne gamme, dont le prix est calculé au plus juste, ce coût peut être prohibitif. Pour les véhicules haut de gamme, ce coût serait éventuellement acceptable mais le traitement acoustique très soigné dont ils font déjà l'objet rend le contrôle actif quasiment inutile. Les seuls véhicules dans lesquels le contrôle actif devrait être implanté dans un prochain avenir sont les camions, où le niveau de bruit reste important et les problèmes de coût moins critiques ;
- le contrôle actif ne peut pas réduire totalement le bruit dans l'habitacle. De ce fait, les constructeurs répugnent à l'implanter dans leurs véhicules par crainte des réactions négatives de leurs clients potentiels. Ceux-ci pourraient imaginer, en écoutant le bruit résiduel, que le véhicule qu'ils ont acheté devait être particulièrement bruyant lors de sa conception, pour avoir nécessité l'installation d'un système électronique antibruit sophistiqué et coûteux. Cet aspect de la question reste toutefois mineur, et peut être traité par une action de marketing bien menée.

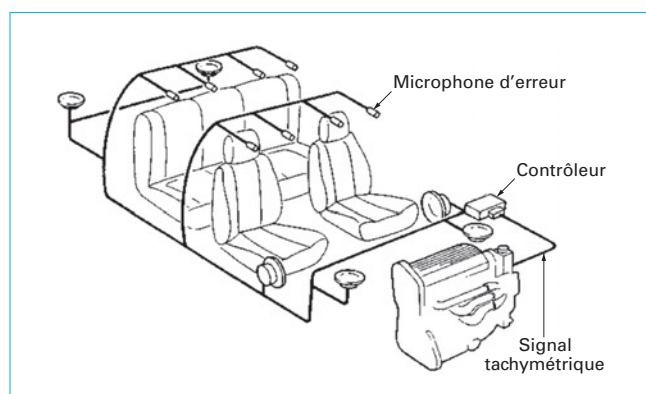


Figure 17 – Contrôle actif du bruit de moteur par le système Lotus EOC™ (d'après référence [43])

#### 2.3.1.2 Bruit de roulement

Contrairement au bruit du moteur, le bruit de roulement est assez peu prédictible, car le contact entre le pneu et la chaussée fait intervenir à chaque instant des objets de formes et de dimensions très variées : les divers motifs de la structure du pneu et les « grains » de la chaussée. Il contribue de façon significative au bruit dans l'habitacle mais aussi au bruit rayonné dans l'environnement par le véhicule. *A priori*, les bruits des quatre pneus étant décorrélés, quatre capteurs de référence devraient suffire pour le contrôle actif. Des études menées à l'Institut polytechnique de Virginie par Fuller [45] ont montré que la complexité de la génération du bruit de roulement implique en fait un plus grand nombre de capteurs et, donc, un système multivoies à références multiples, très difficile à implanter dans un véhicule avec les technologies actuelles.

#### 2.3.1.3 Bruit aérodynamique

Les origines du bruit aérodynamique sont doubles :

- les interactions entre l'écoulement et les divers appendices de la carrosserie (essuie-glace, rétroviseurs...) ;
- les fluctuations de pression dans la couche limite turbulente autour de la voiture qui excitent la structure de celle-ci et génèrent un bruit dans l'habitacle.

Des expériences sont menées dans plusieurs centres de recherches pour tenter de réduire, par contrôle actif, les vibrations résultant de l'excitation d'un panneau par la couche limite turbulente, mais aucune application à l'industrie automobile n'est actuellement envisagée.

### 2.3.2 Bruit émis à l'extérieur du véhicule

Pour le bruit émis à l'extérieur du véhicule, une quatrième source de bruit, due à l'échappement, vient s'ajouter à celles que nous venons de citer.

#### 2.3.2.1 Bruit d'échappement

Les solutions utilisées pour appliquer les techniques de contrôle actif aux gaines de ventilation ne sont pas transposables aux tuyaux d'échappement à cause des conditions extrêmes qui règnent dans ces tuyaux. Deux approches ont été envisagées :

- placer des transducteurs près de l'embouchure du tuyau ;
- utiliser des actionneurs spécialisés.

Dans la première approche, des haut-parleurs optimisés pour résister à un environnement agressif (température élevée, projections diverses, vibrations...) sont utilisés comme sources secondaires. La source de bruit en sortie du tuyau d'échappement est





Figure 18 – Contrôle actif du bruit d'échappement par volet oscillant : système Exact™ (doc. TechnoFirst)

assimilée à un monopôle rayonnant à une fréquence double de celle du moteur et donc l'utilisation d'une source secondaire monopolaire disposée près de l'embouchure permet, en théorie, d'obtenir une réduction de bruit dans tout l'espace (cf. première partie, paragraphe 2.2.2). Le signal de référence, comme pour la réduction du bruit du moteur, est un signal tachymétrique.

Dans la deuxième approche, l'actionneur est un volet oscillant inséré dans le tuyau d'échappement afin de réguler le débit et au final de réduire efficacement le bruit en sortie. Cette solution, mise au point au Laboratoire d'Études Aérodynamiques de Poitiers [46] [47] a donné naissance au système Exact™ commercialisé par TechnoFirst (figure 18).

#### 2.3.2.2 Protection contre le bruit émis à l'extérieur du véhicule

Les méthodes de réduction du bruit émis à l'extérieur du véhicule décrites au paragraphe précédent réduisent ce bruit à la source. On peut aussi se protéger de ce bruit en empêchant sa propagation au moyen d'un réseau de sources de contre-bruit formant un écran acoustique actif. Cette solution sera décrite au paragraphe 2.5.1.

#### 2.3.3 Amélioration de la qualité sonore

La réduction des bruits ne constitue qu'un volet des applications du contrôle actif dans l'automobile. Un deuxième volet, tout aussi important, concerne l'amélioration de la qualité sonore. Dans ce cas, il ne s'agit plus de supprimer le bruit mais plutôt de le remodeler, de façon à lui faire traduire une certaine information. Ce remodelage peut avoir pour but de rendre certains bruits plus agréables, d'améliorer le confort acoustique des passagers [48], ou d'obtenir un « son » particulier à la voiture qui permettra de la dif-

férer de ses concurrentes [49]. Les apports du contrôle actif à la qualité sonore seront traités au paragraphe 3. Des notions de base sur la qualité sonore sont données dans le fascicule [R 6 140] « Perception acoustique et qualité sonore ».

## 2.4 Contrôle actif et industrie aéronautique

Les applications du contrôle actif sont nombreuses dans l'industrie aéronautique et peuvent être classées selon divers critères :

- le type de contrôle actif, qui peut être acoustique, vibroacoustique ou vibratoire ;
- le type d'avion concerné, à hélice ou à réaction ;
- le but du contrôle : réduction du bruit dans la cabine (localement, au niveau des passagers, ou dans toute la cabine) ou du bruit émis par l'avion dans l'environnement.

Des études concernant la réduction du bruit dans les hélicoptères sont également menées.

Quelques applications sont décrites dans les paragraphes qui suivent, à l'exclusion de celles concernant le contrôle actif vibratoire que le lecteur retrouvera dans le fascicule [R 6 200] « Contrôle actif des vibrations ».

### 2.4.1 Systèmes de contrôle actif pour la réduction du bruit dans les cabines

La réduction par un contrôle actif du bruit dans les cabines d'avion a fait l'objet de nombreuses études [19] [20] [21] [22] [23] [24] [25] [26] [27] [28] [29] et programmes de recherche soutenus par la communauté européenne, comme Brite Euram ASANCA (pour *Advanced Study of Active Noise Control in Aircrafts*) [50], ou par la NASA aux États-Unis [51].

Nous allons décrire deux systèmes actuellement sur le marché, le système NVX™ développé par Lord Corporation et le système UltraQuiet Cabin™ de Ultra Electronics.

#### 2.4.1.1 Système NVX

Pour une présentation plus détaillée de ce système, on pourra consulter le travail de Billoud [52] qui est à la base de ce paragraphe.

Le bruit dominant dans une cabine d'avion à hélices est un bruit à spectre de raies dont la fréquence fondamentale est égale à la fréquence de rotation d'une hélice multipliée par le nombre de pales. À l'origine de ce bruit, il y a l'interaction d'écoulements instationnaires avec la structure de l'appareil qui excite cette dernière en vibration.

Le système NVX a été développé par Lord Corporation pour réduire les premiers harmoniques de la fréquence de passage des pales dans un Beechcraft KingAir, avion d'affaire possédant deux turbopropulseurs Pratt & Whitney et des hélices à trois pales ou quatre pales.

• **Choix des actionneurs** : dans le cas du Beechcraft, la partie de structure excitée par le passage des pales se trouve au niveau du nez de l'appareil. Elle est très complexe et des essais préliminaires ont montré qu'il était difficile de corréler sa vibration avec le bruit dans la cabine. Pour cette raison, les actionneurs du système NVX sont des haut-parleurs conçus avec les spécifications suivantes :

- optimisation des paramètres de Thielle et Small pour une efficacité acoustique entre 60 Hz et 150 Hz malgré un espace limité pour l'installation ;
- faible distorsion de façon à éviter l'amplification d'harmoniques élevés ;
- choix d'un aimant réalisé avec un lanthanide, le néodyme, pour améliorer le rapport concentration magnétique/poids.

Des amplificateurs de puissance travaillant en classe D sont intégrés à ces haut-parleurs.



Figure 19 – Capteurs utilisés par le système UltraQuiet Cabin™ (doc. Ultra Electronics)

• **Choix des capteurs** : les signaux de référence sont délivrés par des accéléromètres placés sur la structure de l'avion.

• **Le contrôleur** : bien qu'étant placé dans l'enceinte pressurisée de l'appareil, le contrôleur est soumis à de sévères contraintes environnementales :

- température de fonctionnement :  $-15^{\circ}\text{C}$  à  $+55^{\circ}\text{C}$  ;
- vibrations : jusqu'à 3 g (crête), ce qui nécessite une conception spécifique des cartes électroniques et du boîtier ;
- taux d'humidité : jusqu'à 100 % avec condensation possible et formation de gouttes, ce qui implique l'étanchéité du boîtier et l'utilisation de vernis spéciaux pour les cartes ;
- nécessité de tenir compte des normes CEM.

Les performances annoncées sont une réduction du bruit de 10 dB au niveau du siège du copilote et de 25 dB au niveau du siège arrière droit.

D'autres applications du système NVX sont présentées dans le fascicule [R 6 200] « Contrôle actif des vibrations ».

#### 2.4.1.2 Système UltraQuiet Cabin™

Ce système, développé par Ultra Electronics, permet de réduire les composantes tonales du bruit dans les cabines d'avion par contrôle actif vibratoire (Bombardier Série Q, Bombardier Challenger 604) ou par contrôle actif acoustique (Saab 340, Saab 2000, Raytheon King Air 90, 200, 300 et 350, Lockheed C130 Hercules).

• **Les capteurs** : les capteurs utilisés sont des microphones et des accéléromètres (figure 19). Les microphones sont montés sur une plaque derrière l'habillage de la cabine (figure 19b) et les accéléromètres sont placés sur la structure de l'avion. Tous ces capteurs, dont la masse est très faible (moins de 0,03 kg pour les microphones et moins de 0,16 kg pour les accéléromètres) sont alimentés par le contrôleur. Typiquement, le nombre de capteurs à utiliser dans un avion à turbopropulseurs est de l'ordre de 70.

• **Le contrôleur** : il peut recevoir les signaux de 96 capteurs et des signaux spécifiques à l'avion (signaux tachymétriques par exemple) et il peut commander jusqu'à 48 actionneurs (figure 20). Il peut aussi garder en mémoire les réglages correspondant à plusieurs configurations de la cabine. Son poids est inférieur à 3,5 kg et il consomme moins de 12 W.

• **Les actionneurs** : les actionneurs sont de deux types : vibratoires à inertie ou haut-parleurs. Les actionneurs vibratoires (figure 21), dénommés ATVA™ (pour *Active Tuned Vibration Absorbers*), ont été spécialement développés pour cette application. Ils pèsent moins de 600 g et sont capables de générer une force de 150 N. Lorsqu'ils sont utilisés seuls (sans haut-parleurs) leur nombre est d'environ 35 pour un avion à turbopropulseurs. Leur consommation est inférieure à 15 W par voie. Les



Figure 20 – Contrôleur du système UltraQuiet Cabin™ (doc. Ultra Electronics)

haut-parleurs peuvent être utilisés seuls ou conjointement avec les actionneurs vibratoires. Ils sont intégrés à l'habillage de la cabine (figure 22) et leur poids total (incluant le poids de l'amplificateur de puissance et celui de l'enceinte) ne dépasse pas 1,5 kg. Lorsqu'ils sont utilisés seuls, le nombre de haut-parleurs nécessaire dans un avion à turbopropulseurs est de l'ordre de 12.

• **Les amplificateurs de puissance** : commandés par le contrôleur, ils sont intégrés aux haut-parleurs et alimentés par une tension continue de 28 V. Leur poids est inférieur à 0,25 kg (figure 23).

Les effets d'un contrôle actif utilisant le système UltraQuiet dépendent du point de mesure dans la cabine. Le constructeur annonce une atténuation moyenne d'environ 15 dB(A). Les résultats du contrôle dans la cabine de pilotage (C 130 Hercules) sont présentés dans le tableau 3. On trouvera une description complète de l'utilisation du système UltraQuiet dans un avion d'affaires à turbopropulseurs dans la référence [53].

#### 2.4.2 Bruit dû à la couche limite turbulente

L'excitation de la structure d'un avion par les fluctuations de pression de la couche limite turbulente constitue une contribution majeure au bruit dans la cabine d'un avion de transport à réaction. C'est un bruit à large bande dont la composition fréquentielle est liée à la turbulence dans la couche limite et à la réponse élastique des panneaux couplés à la cavité constituée par l'habitacle. Il est

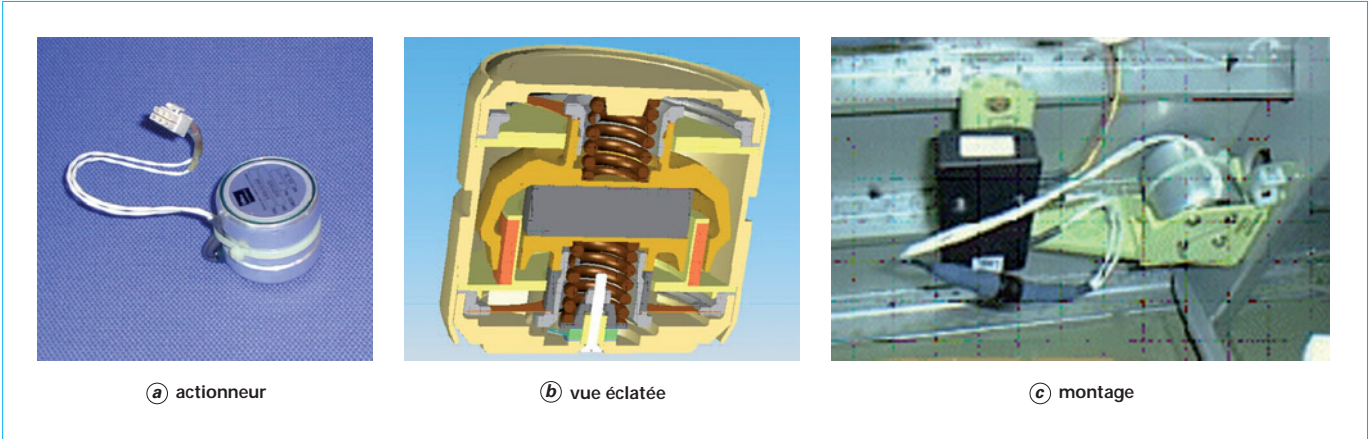


Figure 21 – Actionneurs vibratoires du système UltraQuiet Cabin™ (doc. Ultra Electronics)

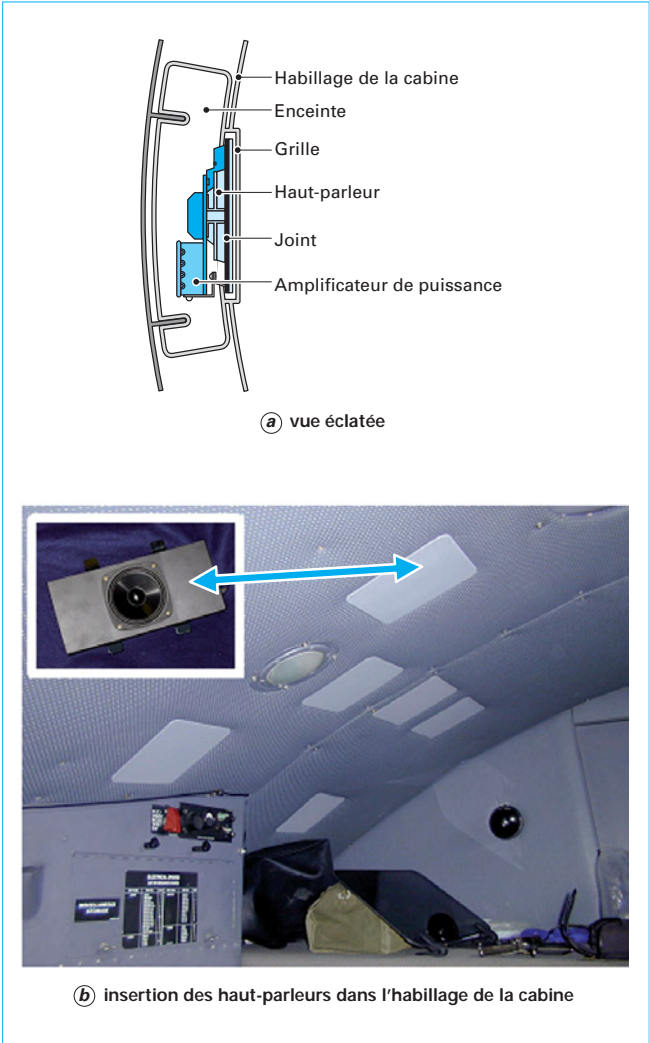


Figure 22 – Montage des haut-parleurs du système UltraQuiet Cabin™ (doc. Ultra Electronics)

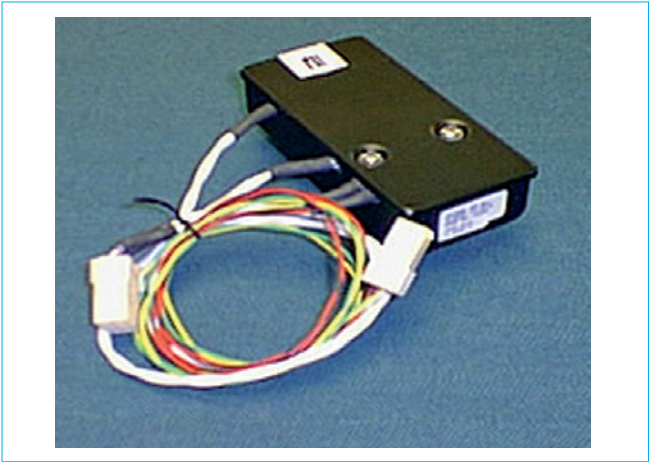


Figure 23 – Amplificateur de puissance du système UltraQuiet Cabin™ (doc. Ultra Electronics)

Tableau 3 – Niveaux sonores dans la cabine de pilotage d'un C130 Hercules, système UltraQuiet Cabin™ (doc. Ultra Electronics)		
Emplacement	Niveau sonore sans contrôle actif (dB)	Niveau sonore avec contrôle actif (dB)
Pilote	103,2	93,5
Copilote	111,8	96,0
Mécanicien	106,5	93,7
Navigateur	107,6	100,2
Coucheette	117,1	103,2



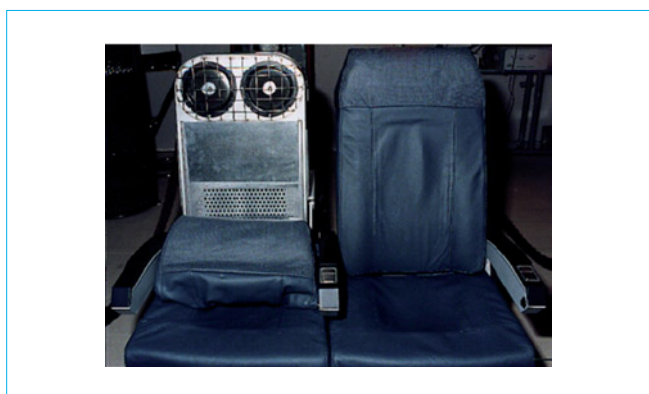


Figure 24 – Vue éclatée d'un siège utilisant le système ANCAS™ (doc. TechnoFirst)

difficile d'obtenir des signaux de référence (qui doivent être bien corrélés avec ce bruit et respecter la condition de causalité) car les sources de bruit sont réparties tout autour de l'appareil. Le seul contrôle actif envisageable est donc un contrôle en boucle fermée [54] [55] [56] [57]. Fuller [58] a étudié la possibilité d'utiliser un contrôle hybride basé sur l'utilisation de matériaux intelligents. Le contrôle actif de la couche limite reste, et pour une durée probablement assez longue, un sujet de recherche de laboratoire.

#### 2.4.3 Contrôle local du bruit dans la cabine

Dans ce type de contrôle, on cherche à réduire le bruit autour de la tête du passager. Ce résultat peut, bien entendu, être obtenu à l'aide d'un casque comme ceux décrits au paragraphe 2.1. Certaines compagnies proposent d'ailleurs ce service aux passagers de la première classe ou de la classe affaires. On peut aussi envisager d'inclure un appui-tête actif dans les sièges de l'avion comme dans le procédé ANCAS™ (pour *Active Noise Controller for Aircraft Seat*) développé par TechnoFirst en collaboration avec Dassault Electronique (figure 24).

#### 2.4.4 Bruit de soufflante

Les origines des bruits dans un turboréacteur sont très variés : bruit de couche limite, bruits dus aux interactions sillages-aubages-champs de pression, aux fluctuations de pression ou de débit, à la combustion, à la turbine, à l'émission acoustique d'ondes de choc, aux mélanges turbulents et aux interactions entre ondes de choc et turbulence. L'un d'entre eux, celui des parties tournantes, a pris une grande importance ces dernières années avec l'apparition de soufflantes de grand rapport de dilution. Pour ces soufflantes, l'écoulement lié au passage des aubes du rotor devant les éléments du stator produit un sifflement dont la fréquence fondamentale se situe vers 2 kHz. Ce sifflement est particulièrement gênant lorsque l'avion est en approche ou au sol. L'efficacité des solutions passives actuelles utilisées pour le réduire, basées sur l'utilisation de matériaux absorbants, est tout juste suffisante pour permettre aux constructeurs de satisfaire aux normes de bruit en vigueur. Comme le bruit à traiter est engendré par un mouvement rotatif, on peut penser qu'un contrôle actif avec référence tachymétrique pourrait être utilisé avec succès. Compte tenu de l'importance de la section du réacteur, et donc du nombre élevé de modes contribuant au bruit, le dispositif devra être multivoies. Plusieurs programmes de recherche européens, impliquant de nombreux industriels et laboratoires, ont été menés ou sont en cours, pour tenter de réduire les bruits de soufflante et, plus généralement, les bruits de réacteurs. Les traitements envisagés sont passifs, actifs, ou hybrides. On peut citer RANNTAC (pour *Reduction of Aircraft Noise by Nacelle Treatment and Active Control*), programme euro-

péen BRITE EURAM de 1998 à 2000 et SILENCE®, programme GROWTH/AERONAUTICS de 2001 à 2006. Les problèmes à résoudre concernent les actionneurs (ils doivent être légers, avoir une consommation électrique faible et être capables de produire un niveau suffisamment élevé) et surtout la possibilité de réaliser le contrôle actif dans un écoulement à grande vitesse. Les premiers résultats sont prometteurs mais la perspective d'applications industrielles reste encore éloignée.

## 2.5 Contrôle actif et protection des habitations

### 2.5.1 Écrans actifs

La protection des habitations situées au voisinage des aéroports, des voies ferrées ou des routes à grande circulation par des écrans acoustiques actifs est une idée qui peut paraître au départ séduisante. De nombreuses études académiques ont été menées sur ce sujet (voir par exemple les références [59] et [60]), mais aucun dispositif pratique réellement efficace n'a été mis au point à ce jour. Les difficultés à surmonter sont en effet nombreuses :

- comme nous l'avons montré dans la première partie de ce travail, le nombre de capteurs d'erreur et de sources secondaires devient prohibitif lorsque la largeur de bande du bruit à réduire devient importante ;
- les caractéristiques des sources de bruit ne sont pas connues *a priori* ;
- ces sources peuvent être fixes (bruit de chantier par exemple) mais sont le plus souvent mobiles (dans deux ou trois dimensions selon l'application visée) ;
- l'écran actif étant situé à l'extérieur, il devra faire appel à des transducteurs spécialisés pour tenir compte des conditions environnementales ;
- l'élaboration de signaux de référence fortement corrélés avec les bruits à réduire est une tâche très difficile.

Des études exploratoires ont été menées dans le cadre du projet EAU (pour Écrans Actifs Urbains), à l'aéroport de Lyon Saint-Exupéry en 2003, ou du projet Européen InterregIII-MEDOC TERIA (pour *Territorial Insert of Airport*), à l'aéroport de Milan Malpensa en 2006, afin d'étudier la faisabilité d'écrans acoustiques actifs, et des résultats encourageants ont été obtenus [61]. Malgré tout, compte tenu de l'état actuel des connaissances théoriques sur le sujet et des technologies actuellement disponibles, la réalisation d'écrans actifs efficaces n'est pas envisageable dans un avenir prévisible.

### 2.5.2 Cas particulier du bruit des transformateurs

La réduction du bruit d'un transformateur par contrôle actif ne se heurte pas aux difficultés que nous avons soulevées dans le paragraphe précédent. La source du bruit est fixe et le bruit émis est périodique avec une fréquence fondamentale double de celle du réseau électrique de distribution (50 ou 60 Hz). Un contrôle actif est donc tout à fait envisageable puisqu'un signal de référence peut être facilement obtenu. De nombreuses études [62] [63] [64] [65] ont été publiées sur le sujet. Les solutions industrielles actuellement proposées combinent un contrôle actif vibratoire et un contrôle actif acoustique. Parmi les études récentes concernant le sujet, on peut citer le projet ATQ (pour *Active Transformer Quieting*), labellisé EUREKA, qui a réuni des partenaires de la Communauté européenne, de la Suisse et des États-Unis pour la période 1998-2001.

### 2.5.3 Fenêtres actives

On peut concevoir deux types de fenêtres actives :

- des fenêtres qui réduisent le bruit extérieur même si elles sont ouvertes ;
- des fenêtres munies d'un double vitrage actif.

Aucune de ces deux technologies n'est parvenue réellement à maturité, mais de nombreuses tentatives ont été faites. Les expérimentations les plus récentes ont été menées au cours du projet TERIA, par l'Université polytechnique de Catalogne (Laboratoire d'ingénierie acoustique et mécanique), Espagne, le Centre scientifique et technique du bâtiment, département acoustique et éclairage, en France, et l'Institut pour la technologie de la construction, en Italie. On trouvera le détail des résultats de ces expérimentations dans le document TERIA Guidelines [66]. Des actionneurs spécifiques ont été mis au point par TechnoFirst pour la réalisation d'un double vitrage actif [67].

### 3. Aspects psychoacoustiques du contrôle actif

Le premier indicateur qui a été utilisé pour mesurer l'efficacité d'un contrôle actif est l'atténuation, en dB, du bruit primaire (cf. [BR 3 010, § 2]. Malheureusement, cette réduction du niveau physique du bruit ne se traduit pas par une réduction équivalente du niveau de bruit perçu par un auditeur. Du point de vue subjectif, les atténuations sont, le plus souvent, moins importantes que ce que les mesures physiques laissent espérer. L'utilisation du dBA pour tenter d'évaluer la réduction du niveau perçu améliore peu les choses :

- la forme de la courbe de pondération fréquentielle qui définit les dBA sous-estime la contribution des basses fréquences dans le niveau sonore (figure 25). Le domaine d'efficacité du contrôle actif étant situé précisément dans ces basses fréquences, le calcul de l'atténuation en dBA sera donc peu significatif ;

- cette pondération ne tient aucun compte du phénomène de masquage fréquentiel qui se manifeste par la baisse d'audibilité, partielle ou totale, d'un son lorsqu'il est en présence d'un autre son [68]. À cause de ce phénomène, un son masqué avant le contrôle actif peut apparaître dans le bruit contrôlé et augmenter la gêne acoustique de l'auditeur.

Pour évaluer correctement les effets subjectifs du contrôle actif, il faut utiliser les **indicateurs perceptifs** mis au point par les psychoacousticiens : la **sonie**, l'**acuité**, la **rugosité** et la **force de fluctuation**. La mesure « objective » de ces indicateurs utilise des logiciels développés par les équipes de E. Zwicker et H. Fastl, en Allemagne et de B. Moore en Grande-Bretagne.

#### 3.1 Indicateurs perceptifs

On pourra consulter sur le sujet le fascicule [R 6 140] « Perception acoustique et qualité sonore » ainsi que les références [68] et [69].

##### 3.1.1 Sonie

La sonie  $N$  est l'équivalent sensoriel de l'intensité physique d'un son : c'est l'intensité **telle qu'elle est ressentie**. Elle dépend du niveau acoustique, de la fréquence et de la durée du son considéré, ainsi que du type de champ acoustique (champ libre ou champ diffus). Elle se mesure en **sones** : un sone correspond à la sonie d'un son se propageant par ondes planes face à l'auditeur, de fréquence 1 kHz, de niveau 40 dB et de durée 1 s. Une méthode de calcul de la sonie pour les sons stationnaires, développée par Zwicker [70] a fait l'objet d'une normalisation (ISO 532 B). Cette méthode a ensuite été étendue par cet auteur au cas des sons non stationnaires [71]. Diverses améliorations du modèle de Zwicker ont été proposées, notamment par Moore et Glasberg [72].

Le calcul de la sonie selon la méthode de Zwicker fait appel aux notions de **bandes critiques** et de **densité de sonie**.

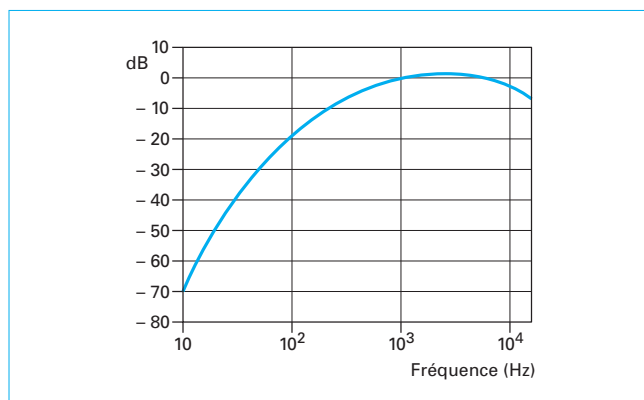


Figure 25 – Courbe de pondération fréquentielle A

La notion de bande critique permet de rendre compte de la faculté de l'oreille à effectuer une analyse spectrale par bande de largeur relative constante des signaux sonores qu'elle reçoit. Dans le modèle de Zwicker, la gamme audible est divisée en 24 intervalles juxtaposés appelés bandes critiques dont l'unité est le **bark**. La sonie dans les différentes bandes critiques est la densité de sonie ou sonie spécifique. Elle s'exprime en **sones/bark** et on la note  $N'(z)$ . On a :

$$N = \int_0^{24} N'(z) dz \quad (6)$$

La figure 26 représente le spectre par tiers d'octaves d'un signal sonore (ici un bruit de circulation) et son équivalent dans le domaine sensoriel, la répartition de la densité de sonie calculée selon la norme ISO 532 B.

Pour un son donné, on définit aussi le **niveau d'isophonie**  $L_N$ , dont l'unité est le **phone**, qui est le niveau physique d'un son de fréquence 1 kHz se propageant par ondes planes face à l'auditeur, et dont la sonie est jugée par cet auditeur équivalente à celle du son considéré. Le niveau d'isophonie et la sonie sont liés par la relation :

$$L_N = 40 + 10 \log_2(N) \quad (7)$$

Une bonne approximation de la sonie globale moyenne, selon Zwicker, est la valeur dépassée pendant 10 % du temps, notée  $N_{10}$ .

##### 3.1.2 Acuité

L'**acuité**  $S$  (pour *Schärfe* en allemand ou *sharpness* en anglais) est un indicateur psychoacoustique introduit par von Bismark [73] à la suite d'une étude sur le timbre des sons. Elle est principalement déterminée par la forme de l'enveloppe spectrale du son considéré et par la distribution de l'énergie acoustique sur l'axe des fréquences. Son unité est l'**acum** et elle se calcule par la relation :

$$S = \frac{0,11}{N} \int_0^{24} N'(z) g(z) dz \quad (8)$$

La fonction de pondération  $g(z)$  est égale à l'unité pour  $z < 14$  et elle est de forme polynomiale pour  $z \geq 14$ . La forme du polynôme varie selon les auteurs.

##### 3.1.3 Force de fluctuation et rugosité

Les études de qualité sonore ont mis en évidence l'importance de deux paramètres, la force de fluctuation et la rugosité, dans l'impression de désagrément causée par un son. Ces deux paramètres sont

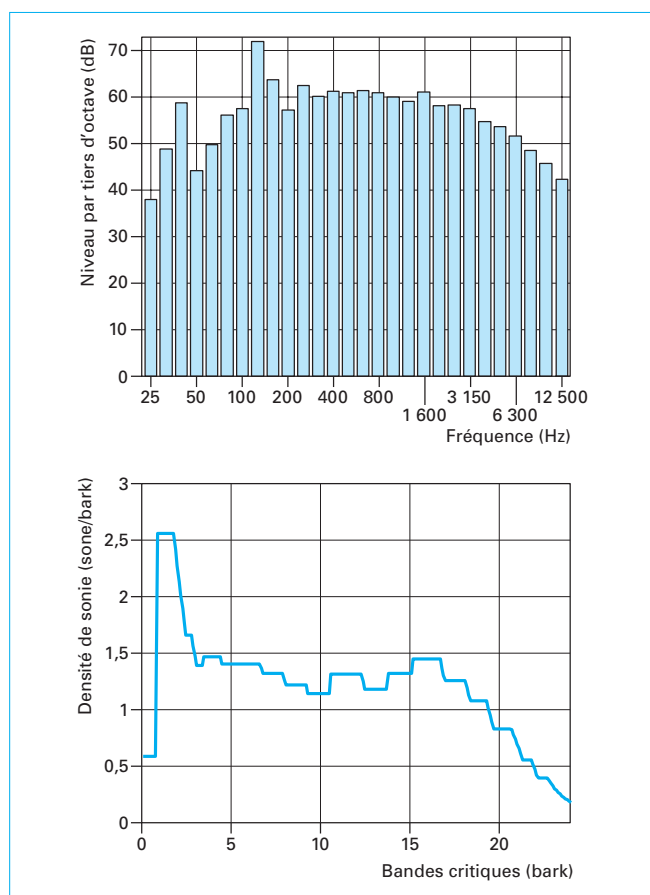


Figure 26 – Les deux aspects de l'intensité sonore : spectre par tiers d'octaves et densité de sonie d'un bruit de circulation selon la norme ISO 532 B

liés aux fluctuations temporelles de l'amplitude des sons dans les très basses fréquences. Pour des fréquences de modulation inférieures à 20 Hz on parle de force de fluctuation, dont le symbole est  $F$  et l'unité le vacil. Pour des fréquences de modulation entre 30 Hz et 70 Hz, on parle de rugosité, dont le symbole est  $R$  et l'unité l'asper. Le calcul de ces indicateurs est donné dans la référence [68]. Il nécessite l'utilisation de logiciels spécialisés comme, par exemple, LEA<sup>TM</sup> qui est commercialisé par la société Genesis.

### 3.2 Contrôle actif des sons purs

Le cas du contrôle actif des sons purs est purement académique. L'étude des effets psychoacoustiques d'un tel contrôle n'est toutefois pas inintéressante car elle permet de mettre en évidence les paramètres intervenant dans la réduction du niveau d'isotonie, seul indicateur perceptif utilisable pour un tel son [74] [75]. Elle s'appuie sur l'utilisation de la norme ISO R-226 [76], elle-même basée sur les travaux de Robinson et Dadson [77].

Le niveau d'isotonie  $L_N$  d'un son pur se calcule, à partir du niveau physique  $L_p$ , par la relation :

$$L_N = a(f) + b(f)L_p + c(f)L_p^2 \quad (9)$$

dans laquelle les coefficients d'ajustement  $a(f)$ ,  $b(f)$  et  $c(f)$  sont donnés, sous forme de table, par l'ISO pour une suite discrète de

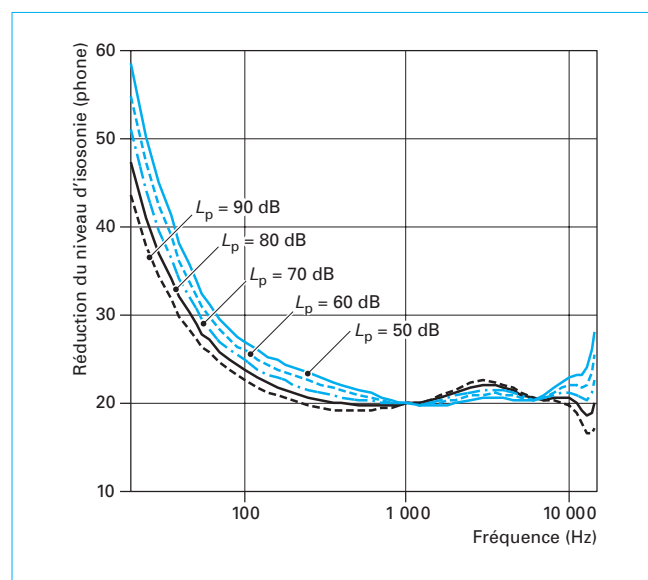


Figure 27 – Réduction du niveau d'isotonie correspondant à une réduction de 20 dB du niveau physique tracée pour un niveau physique initial variant de 50 dB à 90 dB (d'après Canévet et Mangiante [75])

fréquences entre 20 Hz et 15 000 Hz. On en déduit qu'une réduction  $\Delta L_p$  du niveau physique se traduira par une réduction  $\Delta L_N$  du niveau d'isotonie donnée par :

$$\Delta L_N = 2 c(f)L_p \Delta L_p + [b(f) \Delta L_p - c(f)(\Delta L_p)^2] \quad (10)$$

où  $L_p$  est le niveau physique avant réduction.

La quantité  $\Delta L_N$  dépend de trois paramètres : la fréquence, par l'intermédiaire des coefficients  $b(f)$  et  $c(f)$ , la valeur initiale du niveau physique et la valeur de la réduction, après contrôle, de ce niveau.

La figure 27 montre l'influence du niveau physique initial  $L_p$  du son à contrôler sur l'importance de la réduction du niveau d'isotonie obtenue pour une valeur donnée (ici 20 dB) de la réduction du niveau physique.

On constate que  $\Delta L_N$  augmente avec  $L_p$  dans la bande de fréquence comprise entre 1 kHz et 6 kHz et décroît avec cette quantité à l'extérieur de cette bande. Ceci s'explique facilement si on remarque que  $\frac{\partial \Delta L_N}{\partial L_p} = 2 c(f) \Delta L_p$ . Comme  $\Delta L_p$  est toujours positif

(le niveau physique a été réduit), le signe de la dérivée est celui de  $c(f)$ . L'examen des tables de l'ISO montre que cette quantité n'est positive qu'entre 1 kHz et 6 kHz.

La figure 28 montre la correspondance entre  $\Delta L_p$  et  $\Delta L_N$  pour une valeur donnée (ici 70 dB) de  $L_p$ .

On voit que  $\Delta L_N$  augmente avec  $\Delta L_p$  dans toute la gamme audible. Ceci résulte de la relation  $\frac{\partial \Delta L_N}{\partial L_p} \approx b(f)$  avec  $b(f) > 0$  obtenue en négligeant dans l'expression de cette dérivée l'effet de  $c(f)$  à cause des valeurs très faibles de ce coefficient.

L'application pratique la plus proche du contrôle actif d'un son pur serait la réduction d'une raie (ou d'un ensemble de raies) émergeant dans un spectre de bruit à large bande. Une étude menée dans la référence [75] montre que les résultats décrits dans ce paragraphe demeurent valables pour un tel contrôle.



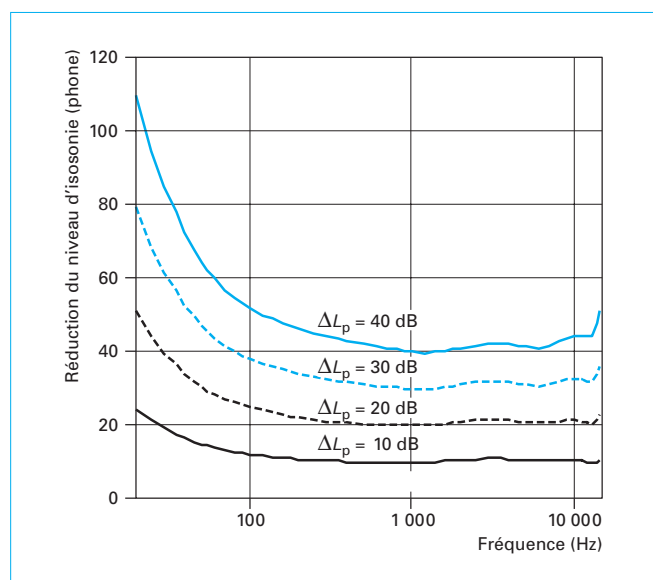


Figure 28 – Correspondance entre les réductions de niveau physique et les réductions du niveau d'isophonie (d'après Canévet et Mangiante [75])

### 3.3 Contrôle actif des sons complexes

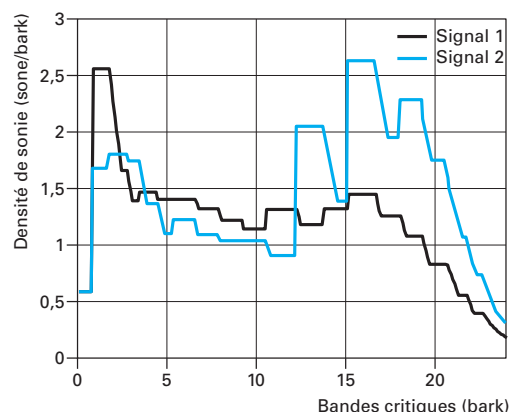
Les résultats des tentatives de contrôle actif des sons complexes sont souvent jugés décevants lorsqu'ils sont appréciés par un auditeur. Bien entendu, le niveau physique du son est réduit après contrôle, mais les modifications des attributs psychoacoustiques du signal n'entraînent pas toujours une amélioration subjective du son perçu. Les études de Mangiante et Canévet [78] [79], dont nous reproduisons ici quelques résultats, détaillent ces modifications dans le cas du contrôle actif de bruits environnementaux.

Deux signaux de test de même niveau ont été utilisés. Le signal 1 correspond au bruit d'une voiture quittant un emplacement de parking et le signal 2 à divers bruits de rue mixés avec un bruit de marteau piqueur. Une représentation temps-fréquence en 3D de ces signaux (non reproduite dans cet article) montre que ces signaux sont suffisamment stationnaires pour que le modèle de Zwicker soit applicable. La densité de sonie des deux signaux est représentée figure 29a. Le contrôle actif est simulé à l'aide d'un filtre coupe-bande dont la courbe d'atténuation est représentée figure 29b.

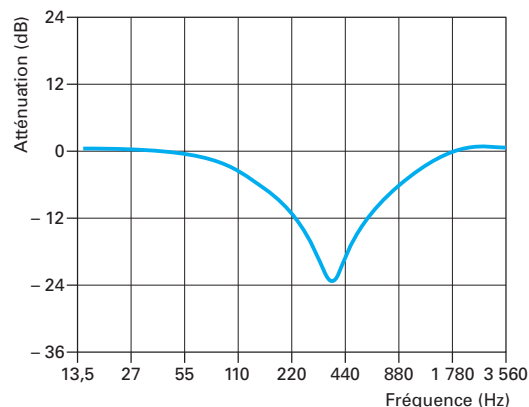
On voit que, pour le signal 1, l'énergie est principalement concentrée dans la partie basse de l'échelle des barks alors que pour le signal 2 cette concentration se situe dans la région allant de 12 à 20 barks. Le contrôle actif sera donc plus efficace pour le premier signal. Ce résultat est confirmé par le tableau 4 : l'atténuation du signal 1 (de l'ordre de 6 dB SPL) est le double de celle du signal 2. Comme le contrôle actif n'agit que sur les composantes de basses fréquences des signaux, on constate une augmentation, après contrôle, de l'acuité et de la rugosité. On trouvera dans la référence [79] une étude détaillée de l'influence des divers paramètres du contrôle actif (importance de l'atténuation, largeur de la bande contrôlée et position de la bande contrôlée) sur les indicateurs perceptifs de nombreux bruits environnementaux.

### 3.4 Contrôle actif et confort acoustique

On peut se demander si les augmentations de l'acuité et de la rugosité résultant du contrôle actif ne peuvent pas, dans certains cas, augmenter la gêne acoustique malgré la réduction du niveau



(a) densité de sonie des sons testés



(b) courbe d'atténuation du filtre coupe-bande utilisé pour la simulation du contrôle actif

Figure 29 – Simulation de contrôle actif de sons complexes

d'isophonie. Pour examiner ce point, deux indicateurs multivariés peuvent être utilisés. Il s'agit de l'*UBA* (pour *unbiased annoyance*) proposé par Zwicker [80] pour quantifier la gêne acoustique apportée par un son quelconque, et du confort acoustique *W* (pour *Wohlklang* en allemand) proposé par Aures [81].

L'*UBA*, dont l'unité est l'*au* (pour *annoyance unit*), est défini par la formule :

$$UBA = d(N_{10})^{1,3} \left\{ 1 + 0,25(S-1)\log(N_{10}+10) + 0,3F\left(\frac{N_{10}+1}{N_{10}+0,3}\right) \right\}$$

$$d = \begin{cases} 1 & \text{de 6 h à 22 h} \\ 1 + \left(\frac{N_{10}}{5}\right)^{0,5} & \text{de 22 h à 6 h} \end{cases} \quad (11)$$

Le confort acoustique, sans unité, s'écrit :

$$W = e^{-(0,55R+0,113S)} (1,24 - e^{-2,2T}) e^{-(0,02N)^2} \quad (12)$$

où *T* est la tonalité, indicateur perceptif très complexe lié aux émergences spectrales éventuellement présentes dans un son.

Tableau 4 – Effet d'un contrôle actif simulé sur divers indicateurs perceptifs

Indicateur	Signal 1			Signal 2		
	Avant contrôle	Après contrôle	Variation	Avant contrôle	Après contrôle	Variation
Niveau (dB SPL)	78,0	72,1	5,9	78,1	75,2	2,9
Niveau (dB A)	73,1	68,4	4,7	77,1	75,4	1,7
Niveau d'isotonie (phone)	88,7	83,9	4,8	93,3	89,6	3,7
N10 (phone)	94,3	89,6	4,7	94,4	90,9	3,5
Acuité (acum)	1,40	1,68	– 0,28	1,85	2,16	– 0,31
Rugosité (asper)	0,55	0,71	– 0,16	0,50	0,55	– 0,05

Tableau 5 – Contrôle actif et confort acoustique

Indicateur	Signal	Avant contrôle	Après contrôle	Variation (%)
<i>UBA</i> (ua) <i>d</i> = 1	Signal 1	156,0	111,0	– 28,8
	Signal 2	183,9	145,4	– 21,0
	Bruit de Jet 1	220,8	187,7	– 15,0
	Bruit de Jet 2	165,5	103,7	– 37,4
	Trafic	104,6	63,2	– 39,6
<i>W</i>	Signal 1	0,101	0,122	+ 20,9
	Signal 2	0,064	0,086	+ 34,7
	Bruit de Jet 1	0,116	0,121	+ 4,6
	Bruit de Jet 2	0,122	0,131	+ 7,0
	Trafic	0,108	0,122	+ 12,9

Le tableau 5 résume les résultats obtenus dans les études de Mangiante et Canévet [79] et [82] pour divers bruits environnementaux. Il montre qu'après contrôle actif, quel que soit le type de bruit étudié, l'indicateur *W* augmente et l'indicateur *UBA* diminue : le contrôle actif diminue la gêne acoustique.

Bien entendu, l'utilisation de ces indicateurs ne peut donner qu'une première estimation des impressions subjectives et il faut rester très prudent vis-à-vis des conclusions qu'ils permettent de tirer. On peut toutefois les utiliser pour l'étude de faisabilité d'un système de contrôle actif. L'évaluation des performances psychoacoustiques du système doit être ensuite entreprise par les méthodes classiques basées sur des jurys de test.

### 3.5 Bilan et perspectives

Les collaborations établies depuis quelques années entre les spécialistes du contrôle actif et ceux de la psychoacoustique ont donné naissance à plusieurs axes de recherche :

– l'évaluation des effets psychoacoustiques de la réduction d'un niveau de bruit par contrôle actif [74] [75], [78] et [82] [83]. Toutes

les études ont montré que, malgré une augmentation de l'acuité, la gêne acoustique est diminuée après contrôle. Elles ont montré aussi que toute réalisation d'un système de contrôle actif doit commencer par une étude du profil de densité de sonie, puis être définie de manière à « raboter » les éventuelles émergences présentes sur ce profil, émergences qui sont généralement à l'origine de la gêne ressentie ;

– l'utilisation du contrôle actif pour améliorer la qualité sonore [79] et [84] [85] [86] [87] [88] [89] [90] [91] [92] [93]. C'est certainement l'axe le plus prometteur, en particulier dans le domaine de l'automobile et celui de l'aviation ;

– la mise au point d'algorithmes de contrôle actif permettant de minimiser le niveau d'isotonie en temps réel. Les recherches dans ce domaine sont encore embryonnaires. L'estimation du niveau d'isotonie à partir des capteurs de pression utilisés pour le contrôle nécessite des calculs complexes et non linéaires dont la mise en œuvre en temps réel est difficilement envisageable dans l'état actuel des connaissances et de la technologie. Un algorithme a toutefois été mis au point par Sommerfeldt [94]. Basé sur les courbes de Robinson et Dadson, il a donné des résultats encourageants en simulation.

## 4. Conclusion

En 1995, Roure [41] écrivait « Le contrôle actif, mais oui ça marche ! Ce titre, un peu provocateur est une réponse à un reproche souvent formulé envers le contrôle actif, à savoir qu'on en parle beaucoup, qu'en laboratoire ou en simulation les résultats sont prometteurs, mais qu'on ne l'entend guère fonctionner en pratique ». Cette phrase reflète l'optimisme de l'époque. Les développements de l'électronique numérique, la création de sociétés de transfert technologiques axées sur le contrôle actif, le nombre impressionnant de publications scientifiques sur le sujet, donnaient à penser que les conditions d'une diffusion en termes d'applications industrielles du contrôle actif étaient réunies. Qu'en est-il aujourd'hui ?

- **Sur le plan scientifique**, il faut tout d'abord se rappeler qu'il existe des limites en contrôle actif liées à la physique. Les deux principales résultent de la contrainte de causalité et de l'augmentation prohibitive du nombre de sources de contre-bruit à commander avec la fréquence et l'étendue du domaine à contrôler.

À cause de la contrainte de causalité, les applications pratiques du contrôle actif concernent presque toujours des bruits pour lesquels on peut disposer d'un signal bien corrélé avec le bruit à traiter comme, par exemple, les bruits de moteur ou les bruits de

ventilateur. Pour les autres types de bruit, notamment les bruits aérodynamiques ou les bruits des sources mobiles, le contrôle actif reste, pour une période probablement assez longue, un sujet de recherche de laboratoire.

Pour simplifier la commande des systèmes comportant un grand nombre de sources secondaires, un axe de recherche prometteur concerne le **contrôle décentralisé** (ou **contrôle diagonal**) qui permet de segmenter un système complexe en un ensemble de systèmes élémentaires plus faciles à contrôler [95].

- **Sur le plan industriel**, les applications du contrôle actif ne sont pas légions. Les seules qui sont parvenues à maturité sont les casques, les silencieux ou la réduction du bruit dans les habitacles. Le prochain transfert technologique devrait concerner l'utilisation du contrôle actif pour améliorer la qualité sonore dans le domaine de l'automobile et celui de l'aviation.

Faut-il pour autant être pessimiste pour l'avenir du contrôle actif ? Certainement pas. Le nombre d'équipes de recherches sur le sujet dépasse actuellement la centaine, preuve de l'intérêt qu'il continue de susciter, et le nombre de brevets déposés ne cesse de croître [29]. Les progrès de l'électronique numérique ne sont pas près de s'arrêter et leurs inévitables retombées permettront probablement d'ouvrir des portes actuellement fermées. Utilisé en complément des traitements passifs, eux aussi en progrès, le contrôle actif a donc de beaux jours devant lui.

# Contrôle actif des bruits

## Conception des systèmes et applications

par Gérard MANGIANTE

Professeur des universités

Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (CNRS Marseille)

### Références bibliographiques

- [1] MANGIANTE (G.), ROURE (A.) et WININGER (M.). – *Multiprocessor controller for active noise and vibration control*. Proc. of Active 95, Newport Beach, USA, p. 1183-90 (1995).
- [2] MANGIANTE (G.). – *Architectures parallèles pour le contrôle actif*. Publications du Cetim « Applications du contrôle actif à la réduction des bruits et vibrations », Senlis, France, p. 217-24 (1995).
- [3] ROURE (A.), HERZOG (P.) et PINHÈDE (C.). – *Active barrier for airport noise*. Proc. of Inter-Noise 2006, Honolulu, USA (2006).
- [4] MANGIANTE (G.), ROURE (A.) et MATHEVON (V.). – *Active control of sound in ducts using self directional secondary sources*. Proc. of Active 97, Budapest, Hongrie, p. 307-18 (1997).
- [5] MANGIANTE (G.), ROURE (A.) et WININGER (M.). – *Optimized unidirectional system for active control of sound in ducts*. Proc. of Active 99, Fort Lauderdale, USA, p. 493-502 (1999).
- [6] NYKÄNEN (H.), ANTILA (M.), KATAJA (J.), LEKKALA (J.) et UOSUKAINEN (S.). – *Active control of Sound based on utilising EMFi Technology*. Proc. of Active 99, Fort Lauderdale, USA, p. 1159-70 (1999).
- [7] ELLIOTT (S.J.). – *Signal processing for active control*. Academic Press, Londres, 511 p. (2001).
- [8] KUO (S.M.) et MORGAN (D.R.). – *Active noise control systems – Algorithms and DSP Implementations*. Wiley, New-York, 389 p. (1996).
- [9] HANSEN (C.H.) et SNYDER (S.D.). – *Active control of noise and vibration*. E & FN Spon, Londres, 1267 p. (1997).
- [10] MANGIANTE (G.). – *Analyse et synthèse des filtres actifs analogiques*. Lavoisier, Tec & Doc, Paris, 380 p. (2005).
- [11] AGNELLO (A.). – *16-bit conversion paves the way to high-quality audio for PCs*. Electric Design, 26 juill. 1990.
- [12] KUO (S.M.) et GAN (W.S.). – *Real-time signal processing: implementations and applications*. Upper Saddle River, Prentice Hall (2005).
- [13] MANGIANTE (G.). – *An introduction to active noise control*. International Workshop on Active Noise Control and Vibration Control in Industrial Applications, Cetim, Senlis, France, paper A, p. 1-45 (1996).
- [14] DARBYSHIRE (E.P.) et KERRY (C.J.). – *A real time computer for active control*. GEC Journal of Research, 13, p. 138-45 (1996).
- [15] MANGIANTE (G.) et ROURE (A.). – *A general purpose multichannel adaptive system for active control of sound and vibration*. Proc. of 2<sup>nd</sup> Conference on Recent Advances in Active Control of Sound and Vibration, Blacksburg, USA, p. 527-34 (1993).
- [16] MANGIANTE (G.) et ROURE (A.). – *Compact multichannel controller for Active Noise and Vibration Control*. Noise Control Engineering Journal, 43, n° 2, p. 43-50 (1995).
- [17] SNYDER (S.D.), HANSEN (C.H.) et VOKALEK (G.). – *User's Guide for the EZ-ANC II*. Document technique Causal Systems, Adelaide, Australie (2002).
- [18] BOUDREAU (A.). – *ZEN 3-Channel X-LMS Controller User Manual*. Document technique Soft-dB, Québec, Canada (2007).
- [19] Recueil de conférences. – *Applications du contrôle actif à la réduction des bruits et vibrations*. Publications du Cetim, Senlis, France, 299 p. (1995).
- [20] Recueil de conférences. – *Workshop on Active Noise Control and Vibration Control in Industrial Applications*. Publications du Cetim, Senlis, France (1996).
- [21] Recueil de conférences. – *Second Conference on Recent Advances in Active Control of Sound and Vibration*, Blacksburg, USA, Technomic Publishing Company Inc., Lancaster, USA, 1005 p. (1993).
- [22] Recueil de conférences. – Active 95, Newport Beach, USA, édité par S. Sommerfeldt, The Pennsylvania State University, et H. Hamada, Tokyo Denki University, 1354 p. (1995).
- [23] Recueil de conférences. – Active 97, Budapest, Hongrie, édité par S. J. Elliott, University of Southampton et G. Horváth, Technical University of Budapest, 1212 p. (1997).
- [24] Recueil de conférences. – Active 99, Fort Lauderdale, USA, édité par S. Douglas, Southern Methodist University, 2 vol., 1322 p. (1999).
- [25] Recueil de conférences. – Active 2002, Southampton, G.-B., édité par P. Gardonio et B. Rafaely, 692 p. (2002).
- [26] Recueil de conférences. – Active 2004, Williamsburg, USA, cédérom, INCE/USA (2004).
- [27] Recueil de conférences. – Active 2006, Adelaide, Australie, cédérom, INCE/USA (2006).
- [28] GUICKING (D.). – *GORBI Guicking's online reference bibliography on active noise and vibration control*. Base de données sur cédérom (publications), Drittes Physikalisches Institut, University of Göttingen, Allemagne.
- [29] GUICKING (D.). – *GOPI Guicking's online reference bibliography on active noise and vibration control*. Base de données sur cédérom (brevets), Drittes Physikalisches Institut, University of Göttingen, Allemagne.
- [30] SIMSHAUSER (E.D.) et HAWLEY (M.E.). – *The noise cancelling headset – an active ear defender*. J. Acoust. Soc. Am. 27, n° 1, p. 207 (1955).
- [31] HAWLEY (M.E.). – *Acoustic interference for noise control*. Noise Control, 2, p. 61-63 (1956).
- [32] OLSON (H.F.). – *Electronic control of noise, vibration and reverberation*. J. Acoust. Soc. Am., 28, n° 5, p. 966-72 (1956).
- [33] MEEKER (W.F.). – *Component characteristics for an active ear defender*. J. Acoust. Soc. Am., 29, p. 1252 (1957).
- [34] WHEELER (P.D.). – *Voice communications in the cockpit noise environment – the role of active noise reduction*. Ph. D. Thesis, University of Southampton, Southampton, G.-B. (1986).
- [35] CARME (C.). – *Absorption acoustique active dans les cavités*. Thèse, Université d'Aix-Marseille II, Marseille, France (1987).
- [36] BRAMMER (A.J.), PAN (G.J.) et CRABTREE (R.B.). – *Adaptive feed-forward active noise reduction headset for lowfrequency noise*. Proc. Active 97, Budapest, Hongrie, p. 365-72 (1997).
- [37] CARTES (D.A.), RAY (L.R.) et COLLIER (R.D.). – *Experimental evaluation of leaky-mean-square algorithm for active noise reduction in communication headsets*. J. Acoust. Soc. Am., 111, n° 4, p. 1758-71 (2002).
- [38] DARLINGTON (P.) et ROOD (G.M.). – *Next generation active noise reduction systems*. Audio Effectiveness in Aviation, AGARD-CP-596, p. 23-1 – 23-5 (1997).
- [39] RAEFALY (B.) et JONES (M.). – *Combined feedback-feedforward active noise-reducing headset – The effect of the acoustics on broadband performance*. J. Acoust. Soc. Am., 112, n° 3, p. 981-9 (2002).
- [40] MANGIANTE (G.) et al. – *Dispositif absorbeurs actifs pour conduits*. Brevet Français n° 77/10497 (1977).
- [41] ROURE (A.). – *Le contrôle actif, mais oui ça marche !* Publications du Cetim « Applications du contrôle actif à la réduction des bruits et vibrations », Senlis, France, p. 3-8 (1995).



- [42] ERIKSSON (L.J.) et al. – *Active attenuation system with on-line modelling of speaker, error path and feedback path*. Brevet Américain n° 4 677 676, 30 juin 1987.
- [43] LEVENTHALL (H.G.) et WISE (S.). – *Contrôle actif du bruit provenant des installations de déplacement d'air*. Publications du Cetim « Applications du contrôle actif à la réduction des bruits et vibrations », Senlis, France, p. 133-8 (1995).
- [44] MACKAY (A.) et KENCHINGTON (S.). – *Active control of noise and vibration – a review of automotive applications*. Proc. of Active 2004, Williamsburg, USA, cédérom, INCE/USA, 12 p. (2004).
- [45] PARK (C.), FULLER (C.) et KIDNER (M.). – *Evaluation and demonstration of advanced active noise control in a passenger automobile*. Proc. of Active 2002, Southampton, G.-B., p. 275-84 (2002).
- [46] TARTARIN (J.). – *Le contrôle actif en écoulement non stationnaire*. Publications du Cetim « Applications du contrôle actif à la réduction des bruits et vibrations », Senlis, France, p. 11-8 (1995).
- [47] FOHR (F.), CARME (C.), PEUBE (J.-L.), VIGNASSA (P.) et LE BRAZIEDEC (F.). – *Active exhaust line for truck diesel engine*. Proc. of Active 2002, Southampton, G.-B., p. 327-32 (2002).
- [48] GONZALEZ (A.), FERRER (M.), DE DIEGO (M.), PIÑERO (G.) et GARCIA-BONITO (J.J.). – *Sound quality of low-frequency and car engine noise after active noise control*. J. of Sound and Vibration, 265, p. 663-79 (2003).
- [49] CARME (C.), MELLIN (V.) et KRONAST (M.). – *Sound profiling for active noise control*. Proc. of Active 2006, Adelaide, Australie, cédérom, INCE/USA, 8 p. (2006).
- [50] BORCHERS (I.U.), BILLOUD (G.), DOPPENBERG (E.), KOERS (P.), PAILLARD (J.) et RENGIER (K.). – *Selected flight test data and control systems results of Brite/Euram ASANCA study*. Proc. of InterNoise 93, Louvain, Belgique (1993).
- [51] ZALAS (J.M.) et TICHY (J.). – *Active attenuation of propeller blade passage noise*. Rapport NASA 1722386, Contrat NAS1-17231 (1984).
- [52] BILLOUD (G.). – *Système de contrôle actif de bruit Lord NVX™ pour avion d'affaire Beechcraft KingAir. Un concept devenu produit*. Publications du Cetim « Applications du contrôle actif à la réduction des bruits et vibrations », Senlis, France, p. 203-8 (1995).
- [53] HINCHLIFFE (R.), SCOTT (I.), PURVER (M.) et STOTHERS (I.). – *Tonal active control in production on a large turbo-prop aircraft*. Proc. of Active 2002, Southampton, G.-B., p. 369-76 (2002).
- [54] MAURY (C.), GARDONIO (P.) et ELLIOTT (S.J.). – *Model for the active control of the flow-induced noise transmitted through a stiffened double-panel*. Proc. of Active 2002, Southampton, G.-B., p. 575-86 (2002).
- [55] GARDONIO (P.) et ELLIOTT (S.J.). – *Active control of structure-borne and airborne sound transmission through double walls*. J. Aircraft, 36, n° 2, p. 1023-32 (1999).
- [56] MAURY (C.), GARDONIO (P.) et ELLIOTT (S.J.). – *Active control of the flow-induced noise transmitted through a panel*. AIAA Journal, 39, n° 10, p. 1860-67 (2001).
- [57] THOMAS (D.R.) et NELSON (P.A.). – *Feedback control of sound radiation from a plate excited by a turbulent boundary layer*. J. Acoust. Soc. Am., 98, n° 5, p. 2651-62 (1995).
- [58] FULLER (C.). – *Active control of sound radiation from structures : Progress and future directions*. Proc. of Active 2002, Southampton, G.-B., p. 3-27 (2002).
- [59] SHIRO (I.), HIROO (Y.) et HIDEKI (T.). – *Basic study on active noise barrier*. J. Acoust. Soc. Jap., 12, p. 299-306 (1991).
- [60] DUHAMEL (D.), SERGENT (P.), HUA (C.) et CINTRA (D.). – *Measurement of active control efficiency around noise barriers*. Appl. Acoust., 55, p. 217-41 (1998).
- [61] ROURE (A.), HERZOG (P.) et PINHEDE (C.). – *Active barrier for airport noise*. Proc. of InterNoise 2006, Honolulu, États-Unis, cédérom, INCE/USA, 10 p. (2006).
- [62] CONOVER (W.B.) et RINGLEE (R.J.). – *Recent contribution to transformer audible noise control*. AIEE Transactions, Applications and Industry, n° 64 D, p. 77-90 (1955).
- [63] ROSS (C.F.). – *Experiments on the active control of transformer noise*. J. of Sound and Vibration, 61, n° 4, p. 473-80 (1978).
- [64] ANGEVINE (O.L.). – *Active cancellation of the hum of large electric transformers*. Proc. of InterNoise 92, Toronto, Canada vol. 1, p. 383-90 (1992).
- [65] MARTIN (T.) et ROURE (A.). – *Optimization of an active noise control system using spherical harmonics expansion of the primary field*. J. of Sound Vibration, 201, n° 5, p. 577-93 (1997).
- [66] TERIA. – *Guidelines*, document Internet, www.teria.itc.cnr.it
- [67] CARME (C.). – *Active noise control for double glazing*. J. Acoust. Soc. Am., 121, n° 5, p. 3162 (2007).
- [68] ZWICKER (E.) et FASTL (H.). – *Psychoacoustics : facts and models*. Springer (1999).
- [69] ZWICKER (E.) et FELDTKELLER (R.). – *Psychoacoustique – L'oreille récepteur d'informations*. Masson, 234 p. (1981).
- [70] PAULUS (von E.) et ZWICKER (E.). – *Programme zur automatischen Bestimmung der Lautheit aus Terzpegeln oder Frequenzgruppenpegeln*. ACUSTICA, 27, p. 253-66 (1972).
- [71] ZWICKER (E.). – *Procedure for calculating loudness for temporally variable sounds*. J. Acoust. Soc. Am., 62, p. 675-82 (1977).
- [72] MOORE (B.C.J.) et GLASBERG (B.R.). – *A revision of zwicker's loudness model*. ACUSTICA – acta acustica, 82, p. 335-45 (1996).
- [73] BISMARCK (von G.). – *Sharpness as an attribute of the timbre of steady sounds*. ACUSTICA, 30, p. 159-72 (1974).
- [74] MANGIANTE (G.). – *Limitations on the performance of active noise control systems due to subjective effects*. J. Acoust. Soc. Am., 115, p. 2498 (2004).
- [75] CANEVET (G.) et MANGIANTE (G.). – *Psychoacoustic assessment of active noise control*. Proc. of Active 2004, Williamsburg, USA, cédérom, INCE/USA, 12 p. (2004).
- [76] *Normal equal-loudness contours for pure tones and normal threshold of hearing under free field listening conditions*. Recommandation ISO R-226, International Organization for Standardization, Genève, Suisse, déc. 1961 et mars 1987.
- [77] ROBINSON (D.W.) et DADSON (R.S.). – *A re-determination of the equal loudness relations for pure tones*. British Journal of Applied Physics, 7, p. 166-81 (1956).
- [78] MANGIANTE (G.) et CANEVET (G.). – *Psychoacoustical comparison of active versus passive noise control techniques*. J. Acoust. Soc. Am., 117, p. 2528 (2005).
- [79] MANGIANTE (G.) et CANEVET (G.). – *Active reduction of environmental noise : a sound quality evaluation*. Proc. of InterNoise 2006, Honolulu, États-Unis, cédérom, INCE/USA, 10 p. (2006).
- [80] ZWICKER (E.). – *A proposal for defining and calculating the unbiased annoyance*. Proc. of 5th Oldenburg Symposium on Psychological Acoustics, Oldenburg, Allemagne, p. 187-202 (1991).
- [81] AURES (W.). – *Berechnungsverfahren für den sensorischen Wohlklang beliebiger Schallsignale*. (A model for calculating the sensory euphony of various sounds), ACUSTICA, 59, p. 130-41 (1985).
- [82] MANGIANTE (G.) et CANEVET (G.). – *Noise annoyance reduction using active control*. J. Acoust. Soc. Am., 121, n° 5, p. 3179 (2007).
- [83] SHOJI (A.) et HAMADA (H.). – *Evaluation of the subjective effects of ANC*. J. Acoust. Soc. Am., 100, p. 2620 (1996).
- [84] SAUNDERS (W.R.) et VAUDREY (M.A.). – *Active noise control systems : Designing for the human auditory system*. Proceedings of the Noise-Con 96, Seattle, USA, p. 385-90 (1996).
- [85] KUO (S.M.) et YANG (Y.). – *Broadband adaptive noise equalizer*. IEEE Signal processing Letters, 3, p. 234-5 (1996).
- [86] WATANABE (Y.), TOKUNO (H.), HAMADA (H.) et NELSON (P.A.). – *Subjective investigation of the new transaural system (Stereo Dipole System)*. Proc. of Active 97, Budapest, Hongrie, p. 919-26 (1997).
- [87] WATANABE (Y.), TOKUNO (H.), HAMADA (H.) et NELSON (P.A.). – *Sound reproduction for telecommunication system using auditory cues in virtual acoustic environment*. Proc. of Active 99, Fort Lauderdale, USA, p. 1293-305 (1999).
- [88] CHOI (J.-W.) et KIM (Y.-H.). – *Generation of an acoustically bright zone within an illuminated region*. J. Acoust. Soc. Am., 111, n° 4, p. 1695-700 (2002).
- [89] CHOI (J.-W.) et KIM (Y.-H.). – *Active control for the enhancement of sound field*. Proc. of Active 2004, Williamsburg, USA, cédérom, INCE/USA, 12 p. (2004).
- [90] YENDURI (R.K.). – *Frequency domain active sound quality control algorithms*. M. S. Thesis, Northern Illinois Univ. DeKalb, États-Unis (2005).
- [91] YENDURI (R.K.) et KUO (S.M.). – *Frequency domain broadband active sound quality control algorithms*. Proc. of Active 2006, Adelaide, Australie, cédérom, INCE/USA, 12 p. (2006).
- [92] SINGARAJU (S.) et KUO (S.M.). – *Noise masking using psychoacoustics*. Proc. of Active 2006, Adelaide, Australie, cédérom, INCE/USA, 12 p. (2006).
- [93] KELLER (M.), ROURE (A.) et MARROT (M.). – *Acoustic field reproduction for psychoacoustic experiments : applications to aircraft interior noise*. Proc. of Active 2006, Adelaide, Australie, cédérom, INCE/USA, 12 p. (2006).
- [94] SOMMERFELDT (S.D.) et SAMUELS (T.O.). – *Incorporation of loudness measures in active noise control*. J. Acoust. Soc. Am., 109, p. 591-9 (1996).
- [95] ELLIOTT (S.J.) et BOUCHER (C.C.). – *Interaction between multiple feedforward active control systems*. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 2, p. 521-30 (1994).

## Sociétés et fabricants

(liste non exhaustive)

**ANR Headsets**  
<http://www.anr-headsets.com/>

**BBN Physical Systems & Technologies**

**Bose Corporation**  
<http://www.bose.com/>

**Causal Systems**  
Pty Ltd <http://www.causalsystems.com/>

**Digisonix, Inc.**

**dSPACE Inc.**  
<http://www.dspaceinc.com/>

**Genesis SA**  
<http://www.genesis.fr/>

**Headsets, Inc. USA.**

**Koss Corporation, 4129 North Port Washington Road, Milwaukee, WI 53212, USA.**  
<http://www.koss.com/>

**Lord Corporation,**  
<http://www.lord.com/>

**Noise Cancellation Technologies, Inc.,**  
<http://www.nctclearspeech.com/>

**PCB Piezotronics, Inc.**  
<http://www.pcbpiezotronics.fr/>

**Sennheiser electronic GmbH & Co.**  
<http://www.sennheiser.com/>

**TechnoFirst S.A., Parc Industriel et Technologique de Napollon**  
<http://www.technofirst.com/>

**UltraElectronics**  
<http://www.ultra-electronics.com/>



## Gagnez du temps et sécurisez vos projets en utilisant une source actualisée et fiable !

### 15 DOMAINES D'EXPERTISE

- ✓ Automatique - Robotique
- ✓ Biomédical - Pharma
- ✓ Construction et travaux publics
- ✓ Électronique - Photonique
- ✓ Énergies
- ✓ Environnement - Sécurité
- ✓ Génie industriel
- ✓ Ingénierie des transports
- ✓ Innovation
- ✓ Matériaux
- ✓ Mécanique
- ✓ Mesures - Analyses
- ✓ Procédés chimie - bio - agro
- ✓ Sciences fondamentales
- ✓ Technologies de l'information



Articles de référence  
disponibles en français  
et en anglais.

Détails des offres et sommaires  
à retrouver sur le site

[www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr)

Les offres Techniques de l'Ingénieur permettent d'accéder à une **base complète et actualisée d'articles** rédigés par les meilleurs experts et validés par des comités scientifiques, avec :

+ de 10 000 articles de référence et 1 000 fiches pratiques opérationnelles.

3 000 quiz dans + de 1 000 articles interactifs.

+ de 550 bases documentaires, + de 30 Parcours Pratiques répartis dans plus de 90 offres.

1 280 auteurs contribuent chaque année à enrichir cette ressource.

Service de Questions aux experts.

Les Archives, technologies anciennes et versions antérieures des articles.

+ de 300 000 utilisateurs de [techniques-ingenieur.fr](http://techniques-ingenieur.fr) chaque mois !

NOS ÉQUIPES SONT  
À VOTRE DISPOSITION

Par téléphone  
 33 (0)1 53 35 20 20

Par email  
 [infos.clients@teching.com](mailto:infos.clients@teching.com)