

Les dispositifs d'absorption active des bruits : Quels sont les derniers obstacles à franchir ?

Laurent Blondel, Pierre Chapelle,

Faculté Polytechnique de Mons, Laboratoire d'Acoustique,
9, rue de Houdain,
B - 7000 Mons - Belgique

La revue Acoustique & Techniques s'est déjà penchée, dans de précédents numéros, sur une méthode de réduction des nuisances sonores prometteuse, le contrôle actif du bruit. Plus particulièrement, dans le numéro 7, Alain Roure énumérait quelques réalisations industrialisées ou en passe de l'être [1]. Si l'optimisme reste de mise quant à l'avenir du contrôle actif, force est cependant de reconnaître que le développement commercial des dispositifs de laboratoire reste relativement limité et confidentiel et ce, malgré les énormes investissements consentis depuis une dizaine d'années par les industriels.

Plus particulièrement, nous pouvons identifier 4 applications potentielles du contrôle actif qui restent à l'heure actuelle au stade de prototype. La première de ces applications est le contrôle du bruit dans le tuyau d'échappement des véhicules automobiles. L'intérêt et le potentiel du contrôle actif dans les tuyauteries n'étant plus à démontrer, cette application semble évidente. Cependant, sa mise au point se heurte à la difficulté de construire des sources secondaires (les sources de contre-bruit) capables de résister aux conditions extrêmes de température, d'humidité ou de corrosivité qui règnent dans ces tuyaux d'échappement. Une deuxième application, proche de la précédente, est le contrôle du bruit se propageant dans les tuyaux et dus à de gros équipements industriels, tels ventilateurs et compresseurs. Le contrôle de ce type de bruit par les méthodes passives pose souvent de gros problèmes aux techniciens (silencieux encombrants et induisant des pertes de charges) et le contrôle actif pourrait ici aussi apporter une solution avantageuse. Encore une fois, les performances et la résistance des sources secondaires s'opposent au développement rapide de cette application.

L'absence de sources secondaires adéquates limite également l'application du contrôle actif pour la réduction des bruits dans les avions ou hélicoptères. Plus particulièrement, on fait face ici à de grosses difficultés dans la conception de sources à la fois compactes, légères et puissantes [2]. Récemment, Boucher [3] s'est heurté au problème de la production de signaux acoustiques puissants en très basse fréquence lors du contrôle du bruit associé au mouvement du rotor d'un hélicoptère civil. La quatrième application - la modification active des caractéristiques acoustiques de salles de concerts, de spectacles ou de conférences - n'est pas à proprement parler une application du contrôle actif des bruits, bien qu'elle en soit basée sur les mêmes principes et algorithmes [4].

Cette application, censée permettre de transformer rapidement et aisément l'acoustique des salles, intéresse énormément les acousticiens et les architectes. Une fois de plus, l'obstacle majeur réside dans les sources électroacoustiques, dont la durée de vie reste faible par rapport à celle des salles dans lesquelles elles sont installées, ce qui nécessite leur remplacement fréquent.

Caractéristiques souhaitées des sources secondaires en contrôle actif

Bien que, depuis une vingtaine d'années, le contrôle actif ait conduit à la publication de quelques milliers d'articles techniques issus de nombreuses équipes de chercheurs à travers le monde, il est symptomatique de constater qu'une infime partie seulement de ces communications (probablement moins de 5 %) traite du problème spécifique des sources secondaires. Pour fixer les idées, notons que lors du premier congrès mondial consacré au contrôle actif, un seul papier (sur plus de 120) était directement consacré à l'étude de ces sources secondaires [5]. Ce manque d'engouement pour ces transducteurs est regrettable et explique en partie les difficultés rencontrées par les industriels et évoquées dans l'introduction.

D'une manière générale, les sources de contre-bruit doivent regrouper les qualités suivantes : elles doivent être linéaires (caractéristique fondamentale !), légères, compactes, robustes (c'est-à-dire capables de fonctionner à pleine puissance durant plusieurs années sans afficher de dégradation marquée dans leurs performances), peu onéreuses et leur sortie acoustique doit pouvoir être contrôlée facilement et de façon précise. De plus, pour certaines applications particulières, on peut souhaiter de la part des sources secondaires un rendement important (dans les applications où des puissances acoustiques importantes sont en jeu), une bande passante s'étendant très bas en fréquence (moins de 20 Hz) ou encore la capacité de résister à des atmosphères extrêmement agressives sans être endommagées.

La mise au point d'une source secondaire regroupant toutes ces caractéristiques parfois antagonistes semble utopique : il semble plus raisonnable de s'attacher à créer plusieurs types de sources de contre-bruit, aux caractéristiques différentes et complémentaires. Ceci permettrait au technicien de choisir la source optimale pour un problème donné.

Sources existantes

À l'heure actuelle, l'énorme majorité des dispositifs de contrôle actif des bruits, tant industriels que de laboratoire, fait appel à un ou plusieurs haut-parleurs(s) électrodynamique(s) classique(s), semblables à ceux que l'on peut trouver dans les installations haute-fidélité. Cette solution possède bien évidemment de multiples avantages, ces haut-parleurs offrant une grande linéarité, une bande passante raisonnable, étant facilement contrôlables pour un coût relativement modique. Ceci explique pourquoi plusieurs recherches ont été menées afin d'adapter le haut-parleur électrodynamique lorsque la situation l'exige. Ainsi, Leventhall [6] a proposé de coller sur la membrane du haut-parleur une feuille d'un matériau résistant à l'humidité et aux hautes températures (250 °C). D'autres solutions, basées sur le même principe mais sensiblement plus élaborées ont également été proposées par Inoue [7].

Les haut-parleurs électrodynamiques peuvent également être modifiés avec succès afin de produire des débits acoustiques importants (supérieurs à 0,05 m³/s) à des fréquences basses (15 Hz environ). L'idée est ici d'associer le haut-parleur à une enceinte accordée sur la fréquence particulière f_p qui doit être émise, selon un principe semblable à celui utilisé dans les dispositifs "Bass-Reflex" [8]. La charge acoustique sur la membrane du haut-parleur devient extrêmement importante à la fréquence f_p : le déplacement de la membrane à cette fréquence est alors négligeable, et toute la puissance acoustique est émise par l'orifice percé dans l'enceinte (figure 1). Cette procédure permet l'émission de grands débits acoustiques tout en gardant la linéarité des haut-parleurs. Son principal inconvénient réside dans la nécessité de construire des enceintes généralement très encombrantes.

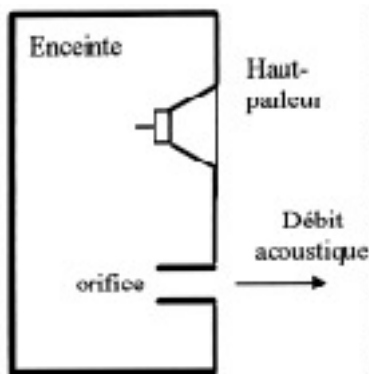


Fig.1 : Enceinte acoustique accordée.

Une source secondaire n'ayant rien à voir avec le haut-parleur électrodynamique, le volet oscillant, a été décrite dans un précédent numéro d'Acoustique & Techniques [9]. Cette source permet de réduire significativement les fluctuations d'écoulement dans une conduite soumise à un écoulement pulsé. Par sa conception, cette source offre des qualités de robustesse, de résistance aux environnements hostiles et de facilité de commande. Cependant, elle est uniquement dédiée au contrôle des pulsations d'écoulement dans les conduits, et semble impossible à utiliser dans d'autres dispositifs d'absorption active.

Le générateur acoustique à air comprimé

Bien que connu de longue date (une des premières références traitant du sujet date de 1930), le générateur acoustique à air comprimé (G.A.C.) n'a pas suscité un intérêt majeur dans les communautés scientifiques et industrielles. Pourtant, cette source, comme nous allons le voir maintenant, offre des perspectives extrêmement intéressantes dans le cadre du contrôle actif.

Le G.A.C., symbolisé à la figure 2, produit un débit acoustique sur la base de la modulation d'un jet de fluide créée à partir de la détente d'air comprimé contenu dans un réservoir. La modulation du jet est assurée par une vanne, dont la section de passage varie dans le temps. Généralement, cette vanne est commandée par un vibreur électrodynamique placé, pour des raisons de commodité, dans la chambre de compression. L'idée d'utiliser cette source comme générateur secondaire dans les dispositifs actifs est développée dans les références [10], [11] et [12].

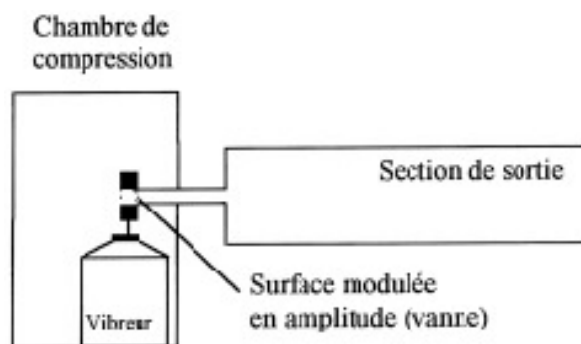


Fig.2 : Schéma de principe de la source à air comprimé.

L'étude théorique montre que le comportement acoustique de la source diffère selon que le débit au passage de la surface modulée est supersonique ou sonique (le type de débit est gouverné par le nombre de Mach atteint au passage de la surface modulée : il est supersonique lorsque ce nombre est égal à 1, et sonique lorsque ce nombre est inférieur à l'unité).

L'équation acoustique fondamentale de la source supersonique est décrite dans la référence [10]. La principale conclusion qui se dégage de l'examen de cette équation est que la source supersonique se comporte linéairement (pour autant que la vanne de modulation ait elle-même un comportement linéaire, ce qui dépend en grande partie du soin avec laquelle elle est conçue). En d'autres termes, la dépendance entre les variations de débit acoustique à la sortie de la source et les variations de la surface de modulation est linéaire. Pour obtenir un débit supersonique, la pression dans la chambre de compression doit être d'environ 3,10⁵ Pa.

Dans le cas sonique, l'équation décrivant le comportement de la source s'écrit :

$$Q_2(t) = A_1(t) \times \sqrt{\frac{C_d \times (p_{pl} - p_2(t))}{\rho}}$$

Dans cette équation, obtenue par application directe de l'équation de Bernoulli pour les fluides incompressibles, $Q_2(t)$, $A_1(t)$, p_{pl} , $p_2(t)$, C_d et p représentent respectivement le débit acoustique produit par la source, la surface de l'orifice modulé, la pression dans la chambre de compression, la pression à la sortie de l'orifice modulé en amplitude et la masse volumique du fluide considéré. C_d représente un coefficient de décharge, qui dépend de la géométrie de l'orifice. Cette équation de base est non linéaire : la pression acoustique à la sortie de la source est une fonction non linéaire du débit acoustique émis. Cette non linéarité est illustrée à la figure 3, qui montre la forme typique de la pression acoustique à la sortie de la source obtenue pour une modulation sinusoidale de la vanne.

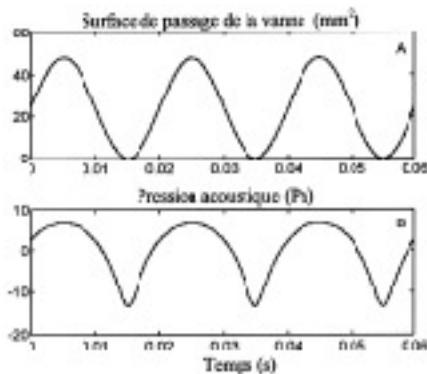


Fig.3 : Pression acoustique à la sortie de la source sonore (B), pour une modulation sinusoidale de la vanne (A).

Contrairement à la source supersonique, la source sonore semble, du fait de son comportement non linéaire, peu intéressante dans le cadre de l'absorption acoustique active. Cependant, cette conclusion un peu hâtive est erronée. En effet, nous devons garder à l'esprit que le but de tout système d'absorption active est de minimiser les variations de pression acoustique en un endroit souvent très proche de la source secondaire. En d'autres termes, si le dispositif actif est efficace, le terme $p_2(t)$ de l'équation fondamentale du G.A.C. sonore tend vers zéro et le débit acoustique produit par la source devient alors une fonction linéaire de la surface de modulation. Notons pour être complet que dans ce cas, le contrôleur adaptatif utilisé dans le dispositif actif doit être robuste : il doit converger vers sa caractéristique optimale en dépit du caractère non linéaire initial de la source secondaire.

Afin d'illustrer l'intérêt du G.A.C., nous avons comparé ses performances à celles d'un haut-parleur électrodynamique. La comparaison s'est faite dans deux cas de figures. Dans le cas A, les sources sont supposées fonctionner comme générateur acoustique. Elles sont connectées à un tuyau de 20 cm de diamètre et muni d'une terminaison anéchoïque (un évent). Dans le cas B, les sources sont utilisées dans un dispositif d'absorption active dans les tuyaux, et "voient" une impédance acoustique relativement faible ($1\,000\text{ N.s/m}^5$). Les caractéristiques des dispositifs considérés pour la comparaison sont les suivantes :

- le haut-parleur : diamètre du diaphragme = 20 cm ; excursion maximale de diaphragme : 1,2 cm crête-à-crête ; puissance électrique d'entrée maximale : 200 W.
- la source supersonique possède une pression de chambre de compression égale à $3 \times 10^5\text{ Pa}$.
- la pression dans la chambre de compression dépend, dans le cas sonore, des conditions expérimentales considérées.

Les différentes caractéristiques comparées sont les suivantes :

- le débit acoustique émis : dans chaque cas, afin de disposer d'une base identique pour la comparaison, on impose un débit acoustique de $0,05\text{ m}^3/\text{s}$ à la fréquence de 50 Hz.
- le rapport des surfaces d'émission : c'est le rapport entre l'aire de la section de passage de la vanne lorsqu'elle entièrement ouverte et l'aire de la membrane du haut-parleur. Lorsque ce rapport est petit, la source est plus facilement adaptable sur des systèmes de contrôle actif de petites dimensions (absorption active dans les tuyaux d'échappement des véhicules par exemple).
- le rendement : le rendement est évidemment une caractéristique importante d'une source acoustique et est défini comme étant le rapport de la puissance acoustique émise à la puissance pneumatique fournie pour comprimer l'air (cas du G.A.C.), ou à la puissance électrique fournie (cas du haut-parleur).
- la linéarité du processus d'émission acoustique.
- le paramètre de rendement : lorsque la source est utilisée comme source secondaire en absorption active, la pression acoustique à la sortie de la source est en général proche de zéro, ce qui signifie que la source développe une puissance acoustique négligeable. Dans ce cas, on remplace la notion de rendement par celle de "paramètre de rendement", définie comme le rapport entre le carré du débit acoustique émis par la source et la puissance (pneumatique ou électrique) nécessaire à son bon fonctionnement.
- la résistance aux environnements extrêmes : comme nous l'avons vu, cette caractéristique peut être fondamentale dans certains problèmes spécifiques de contrôle actif.
- les caractéristiques du contrôleur utilisé dans le dispositif d'absorption active.

Le tableau 1 page 13 donne les résultats de la comparaison.

Commentaires et conclusions

Le tableau 1 montre l'intérêt indéniable du G.A.C. appliqué au contrôle actif. Plus particulièrement, la source sonore semble extrêmement intéressante puisqu'elle offre, par rapport au haut-parleur électrodynamique, plusieurs avantages : un paramètre de rendement environ 5 fois plus élevé, une surface d'émission beaucoup plus faible, et une bonne résistance aux environnements hostiles. Cette source semble promise à un bel avenir dans le cadre du contrôle actif dans les tuyaux d'échappement. Le G.A.C. supersonique possède un faible rendement : la pression dans la chambre de compression est tellement grande qu'une partie importante de l'énergie est dissipée sous forme de turbulences au passage de la vanne. Malgré son faible rendement, ce dispositif est capable d'émettre de grandes puissances acoustiques (quelques milliers de watts), ce qui en fait une solution intéressante pour le contrôle actif dans tous les cas où de grandes puissances acoustiques doivent être atténuées (compresseurs, grands ventilateurs, cheminées industrielles...).

Un prototype de G.A.C. sonore a été mis au point au laboratoire (figure 4). Un soin particulier a été apporté à la conception de la vanne de modulation, afin de la rendre hautement linéaire. Des essais intensifs effectués sur le prototype ont montré la validité de l'équation fondamentale évoquée ci-dessus et ont également révélé que la source



Fig.4 : Vue du prototype de G.A.C qui a été développé. On peut y apercevoir la vanne dont la surface de passage est modulée en amplitude grâce au vibreur électrodynamique. L'ensemble du dispositif est placé dans une boîte hermétique (de volume égal à quelques dm³), qui joue le rôle de chambre de compression. Cette chambre est alimentée via une bonbonne d'air sec comprimé. Le tuyau d'alimentation est visible en bas à gauche.

Caractéristique	G.A.C. (supersonique)	G.A.C. (sonique)	Haut parleur électrodynamique
Débit acoustique émis	0.05 m ³ /s (fréquence = 50 Hz)		
Cas A : les sources agissent comme générateurs acoustiques			
Pression de chambre de compression	Pression atmosphérique + 2.0 10 ³ Pa	Pression atmosphérique + 9/2 Pa	Sans objet
Rapport des surfaces (1)	0.005	0.07	1
Rendement (2)	0.35 %	36 %	8 %
Linéarité du processus d'émission acoustique	Très bonne	Source non linéaire	Excellente
Cas B : les sources agissent comme sources secondaires			
Pression de chambre de compression	Pression atmosphérique + 2.0 10 ³ Pa	Pression atmosphérique + 9/2 Pa	Sans objet
Paramètre de rendement (3)	2.7 10 ³ m ³ /s/W	3.2 10 ³ m ³ /s/W	6.25 10 ⁶ m ³ /s/W
Linéarité du processus d'émission acoustique	Très bonne	Bonne, lorsque la phase transitoire est terminée	Excellente
Résistance aux environnements extrêmes	Bonne	Bonne	Mauvaise
Caractéristique du contrôleur	Pas d'exigence particulière	Doit être robuste	Pas d'exigence particulière

Tab.1 : Comparaison des performances du G.A.C (supersonique ou sonique) avec celles d'un haut-parleur classique.

se comportait linéairement lorsque la pression acoustique à sa sortie était proche de zéro. Nous étudions à l'heure actuelle les possibilités existantes pour augmenter la robustesse des algorithmes utilisés par le contrôleur. Nous pensons que ces développements posent une première étape dans la mise au point d'une source particulièrement bien adaptée au contrôle actif, source qui, dans plusieurs cas, fait aujourd'hui défaut. Plus particulièrement, nous pensons pouvoir adapter la source sur un dispositif de contrôle actif dans les échappements de véhicules, un problème qui suscite un intérêt important auprès des constructeurs automobiles. Les progrès réalisés dans le domaine du contrôle actif, et plus particulièrement dans le domaine des contrôleurs, ont été très importants au cours des 10 dernières années. Il serait dommage que ces progrès ne puissent conduire, faute de sources secondaires adéquates, à l'application intensive de l'absorption active pour les problèmes de bruit où ses avantages sur l'absorption passive sont évidents.

Remerciements

Le développement du projet de source à air comprimé est mené en collaboration avec le Professeur S.J. Elliott (Université de Southampton, Institute of Sound and Vibration Research).

Références bibliographiques

[1]. A. Roure, "Le contrôle actif du bruit et des vibrations : où en est-on ? Acoustique et Techniques 7, pp. 3-4 ; octobre 1996

[2]. P.N. Larsen et G. Venet, "Advanced Actuators for Active Noise Control in Propeller aircraft". Proceedings of Inter-Noise '93, pp. 77-82 ; 1993

[3]. C.C. Boucher, S.J. Elliott et K.H. Baek, "Active Control of Helicopter Rotor Tones", Proceedings of Inter-Noise '96, pp. 1179-1182 ; 1996

[4]. P.A. Nelson et S.J. Elliott, "Least Square Approximations to Exact Multiple Point Source Reproduction", Proceedings of the Institute of Acoustics 10, pp. 151-168 ; 1988

[5]. C.I. Beltran, "Acoustic Transducer Nonlinearities and how they effect the Performance of Active Noise Control Systems", Proceedings of Active '95, pp. 837-848 ; 1995

[6]. H.G. Leventhall, "Problems of Transducers for Active Attenuation of Noise" Proceedings of Inter-Noise'88, pp. 1091-1094 ; 1988

[7]. Y. Inoue, T. Fuchiwaki et K. Fujii, "Active Control of Low Frequency Sound from Large-sized Induced Fan", Proceedings of Active'95, pp. 477-480 ; 1995

[8]. L.A. Blondel, "Tuned Loudspeaker Enclosures for Active Noise Control", Thèse de Maîtrise, Université de Southampton (I.S.V.R.), Grande-Bretagne ; 1995

[9]. J. Tartarin et J-L. Peube, "Le contrôle actif des pulsations d'écoulements", Acoustique et Techniques 7, pp. 7-12 ; octobre 1996

[10]. C.J. Chapman et A.G. Glendinning, "A Theoretical Analysis of a Compressed Air Loudspeaker", Journal of Sound and Vibrations 138 (3), pp. 493-499 ; 1990

[11]. A.G. Glendinning, P.A. Nelson et S.J. Elliott, "Experiments on a Compressed Air Loudspeaker", Journal of Sound and Vibrations 138 (3), pp. 479-491 ; 1990

[12]. L.A. Blondel et S.J. Elliott, "Subsonic Compressed-Air Sources For Active Noise Control", Proceedings of Active'97, pp. 619-634 ; 1997