Conception d'actuateurs dipolaires pour dispositif de contrôle actif de bruit

Jean-Christophe Le Roux
Centre de Transfert de Technologie du Mans
20, rue Thalès de Milet
72000 Le Mans
E-mail : jcleroux@cttm-lemans.com

Alain Roure
Laboratoire de Mécanique et d'AcoustiqueCNRS
Chemin Joseph Aiguier
13009 Marseille
E-mail : roure@lma-cnrs-mrs.fr

Résumé
Cet article expose la démarche utilisée pour développer des actuateurs dans le cadre d'une étude sur un concept de Contrôle Actif de Bruit visant à réduire les nuisances sonores en voisinage d'aéroports. Après avoir donné le contexte et le cahier des charges initial, nous explicitons la démarche qui a permis de dimensionner l'actuateur. Nous indiquons notamment de quelle manière a été choisi le haut-parleur. Nous exposons ensuite certains problèmes rencontrés lors de la mise au point. En guise de conclusion, nous présentons les résultats obtenus lors de l'application du dispositif du Contrôle Actif sur site expérimental.

Abstract
The purpose of this article concerns the development of specific actuators for Active Noise Control. They were realised for a project which objective was to reduce noise pollution in the vicinity of airports. We firstly present the context of the study and the specifications for the actuators. Secondly, we detail the thought process that led to the design of the device, particularly the selection of the actuator's transducer. We also expose one problem encountered during the development. In the conclusion, some results of the ANC system working in real conditions are shown.

Contexte : le projet TERIA

Le projet TERIA (Territorial Insert of Airport) émanait du programme INTERREG III B Meddoc mis en place par la Commission européenne pour trouver des solutions communes au problème de l'intégration environnementale des aéroports de la Méditerranée occidentale.

Un de ses objectifs était l'expérimentation, au voisinage d'aéroports, de nouvelles techniques de réduction des nuisances sonores basées sur le concept de Contrôle Actif du Bruit.

Outre les partenaires institutionnels comme la Région Lombardie, le Gouvernement des Iles Baléares ou la Chambre de Commerce et d'Industrie de Lyon, le projet TERIA réunissait des partenaires scientifiques dont l'activité principale était orientée vers l'acoustique :
- L'Istituto Trentino di Cultura (ITC) et l'Institut Polytechnique de Milan pour l'Italie,
- Le Laboratoire de mécanique et d'acoustique du CNRS (LMA) et le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) pour la France,
- Le Laboratori d'Enginyeria Acustica i Mecanica de l'Université polytechnique de Catalogne (UPC-LEAM) pour l'Espagne et,
- le Laboratoire d'électromagnétisme et d'acoustique de l'Ecole polytechnique de Lausanne (EPFL-LEMA) pour la Suisse.

Dans le projet TERIA, le LMA avait en charge l'étude et l'expérimentation d'une Barrière Active. Une Barrière Active est une antenne plane d'actuateurs et de microphones censée produire, à la manière d'un écran antibruit classique, une «ombre acoustique» lorsqu'on l'interpose entre une source de bruit gênante et une habitation à protéger. Les actuateurs sont pilotés en temps réel par un contrôleur de manière à produire à tout instant, sur les microphones de contrôle placés à environ 50 cm derrière eux, un zéro de pression acoustique.
Cette étude avait été retenue dans le projet TERIA en raison de la possibilité que permettrait une telle antenne positionnée en face d'un bâtiment, (administratif ou scolaire, par exemple), de travailler fenêtre ouverte tout en étant protégé des bruits aéroportuaires. Cette possibilité de bénéficier d'une ventilation naturelle plutôt que par

climatisation apparaît comme importante dans les pays du Sud de l'Europe ou dans tout autre pays au climat tropical.
Une antenne réduite de 15 actuateurs avait déjà été étudiée avec succès à proximité de l'aéroport de Saint-Exupéry par le LMA et le Comptoir de la Technologie dans le cadre du projet EAU financé par l'ADEME en 2002-2003. Pour TERIA, l'antenne devait être beaucoup plus grande et compter 64 modules (un module comprend un actuateur et un microphone) montés sur une antenne de 5 mètres sur 5 mètres. Elle devait être expérimentée sur la terrasse d'une villa transformée en centre d'essais et située à 400 mètres de l'extrémité des pistes de l'aéroport de Malpensa à Milan (Italie). Des simulations avaient montré qu'une telle antenne était susceptible de produire, dans le cas d'une source de bruit parasite fixe et éloignée, une réduction de 5 à 10 dB du bruit dans une zone jusqu'à 10 mètres derrière l'antenne et pour une bande de fréquence de 80 à 500 Hz. Dans le cas d'avions au décollage, les performances attendues étaient moindres mais non négligeables.

L'originalité principale de l'antenne étudiée par le LMA résidait dans le fait que grâce à l'utilisation de transducteurs (actuateurs et microphones) directifs, le contrôle pouvait être décentralisé (contrôle actif diagonal) ; c'est-à-dire que les N modules étaient complètement indépendants les uns des autres et ne nécessitaient chacun qu'un contrôle actif monovoie beaucoup plus simple à réaliser et à mettre en œuvre qu'un contrôle actif global à N voies.

Cahier des charges fonctionnel pour les modules

Dans le cadre du projet TERIA, le LMA a sous-traité au CTTM (Centre de Transfert de Technologies du Mans) l'étude et la réalisation de 64 modules (on appelle module un ensemble constitué d'un actuateur réalisé à partir d'un haut-parleur électrodynamique et d'un microphone à électret monté sur l'axe de l'actuateur) et de leur support permettant de les monter en antenne 8x8 à l'extérieur. Le CTTM a également eu en charge la fourniture des préamplificateurs des microphones et des amplificateurs de puissance des actuateurs.

Le cahier des charges établi par le LMA a été défini comme suit :

Contraintes géométriques en environnementales
- L'espacement entre modules sur leur support est susceptible de varier de 50 à 80 cm.
- Le montage et le démontage des modules de leur support doivent être rapides.
- La connectique et le câblage doivent permettre le remplacement aisé des modules tout en restant étanche, et autoriser un éloignement de 10 mètres de l'antenne avec son électronique.
- Les dimensions des actuateurs ne doivent pas dépasser le volume d'un cylindre de 20 cm de diamètre et de 40 cm de long pour laisser à l'antenne une apparence suffisamment «transparente».
- Les microphones peuvent être positionnés à une distance pouvant varier de 20 à 60 cm du centre acoustique de la source.
- Le poids maximal de chaque module est de l'ordre de 3 kg.
- L'antenne doit pouvoir rester sans protection environ 2 ans à l'extérieur.

Contraintes acoustiques
- Les actuateurs doivent posséder une directivité de type dipolaire de manière à réduire leur contribution sur les microphones de contrôle des modules voisins par rapport à celle de leur propre microphone de contrôle (condition imposée par le contrôle diagonal).
- Pour les mêmes raisons, les microphones de contrôle doivent posséder une directivité dipolaire de façon à capter préférentiellement le contre-bruit émis par l'actuateur de leur module.
- Chaque actuateur doit produire, à un mètre de son centre acoustique, dans la bande 80-500 Hz, un niveau acoustique du même ordre de grandeur que celui créé par le plus important des bruits d'avion mesurés sur la terrasse de la villa.

Contraintes économiques
- Les transducteurs doivent être choisis parmi les produits commerciaux.
- Pour minimiser les coûts, la réalisation des modules doit utiliser le plus possible d'éléments standards.

Dans ce qui suit, nous nous limitons à exposer le développement des actuateurs.

Conception des actuateurs

Monopôle acoustique / dipôle acoustique

Dans les applications les plus courantes, un actuateur est de type monopolaire. C'est, par exemple, le cas d'un haut-parleur chargé par une enceinte close. Aux basses fréquences (dimensions de la source plus petites que la longueur d'onde acoustique), pour un rayonnement dans 4π stéradians, la pression acoustique $p_m(r)$ créée par la source monopolaire à une distance «r» est alors décrite par l'expression suivante :

$$p_m(r) = \frac{jk\rho c e^{-jkr}}{4\pi r} Q$$

où
ρ est la densité de l'air,
c est la célérité,
$k=\omega/c$, ω étant la pulsation correspondant à la fréquence f,
Q est le débit acoustique du monopôle.

Le rayonnement est omnidirectionnel et la pression décroît avec la distance.

Un dipôle acoustique est une source constituée de deux monopôles identiques, séparés d'une distance «d» petite devant la longueur d'onde ($kd<<1$), mais dont les débits sont en opposition de phase (voir figure 1 page suivante).
L'un des exemples les plus courants est un haut-parleur sans écran rayonnant par ses deux faces. Le champ de pression créé par un dipôle s'obtient en appliquant le principe de superposition à deux sources de type monopolaire. Il est donné par $p_d(r)$:

$$p_d(r) = \frac{jk\rho c}{4\pi}\left[-\frac{e^{-jkr_1}}{r_1} + \frac{e^{-jkr_2}}{r_2}\right]Q$$

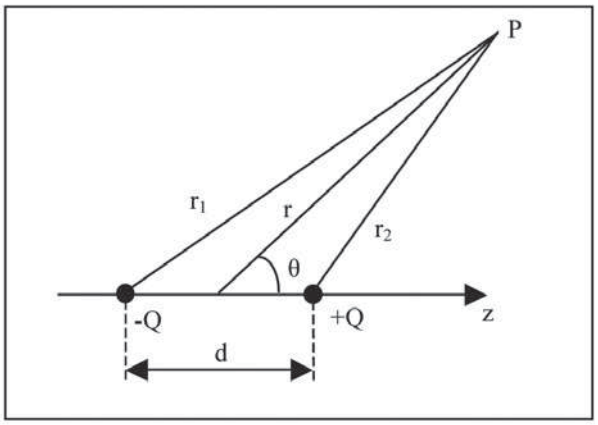

Fig. 1: Représentation schématique d'un dipôle

En considérant «d» petit, le terme entre crochet peut être approximé par un calcul différentiel. Ceci conduit à la relation suivante :

$$p_d(r) = \frac{k^2\rho c}{4\pi}\frac{e^{-jkr}}{r}Qd\cos\vartheta\left[1+\frac{1}{jkr}\right]$$

Aux basses fréquences, le champ lointain du dipôle (pour $(kr)^2>>1$) est alors donné par :

$$p_d(r) = \frac{k^2\rho c}{4\pi}\frac{e^{-jkr}}{r}Qd\cos\vartheta = p_m(r)\left(-jkd\cos\vartheta\right)$$

Une source dipolaire est directionnelle et montre une directivité en cosθ, indépendante de la distance et de la fréquence (figure 2). Aux basses fréquences, comparée à une source monopolaire de même débit Q, une source dipolaire montre une amplitude plus faible et une pente positive de 6dB/octave (figure 3). La distance «d», appelée «moment dipolaire», intervient sur l'amplitude du champ acoustique généré.

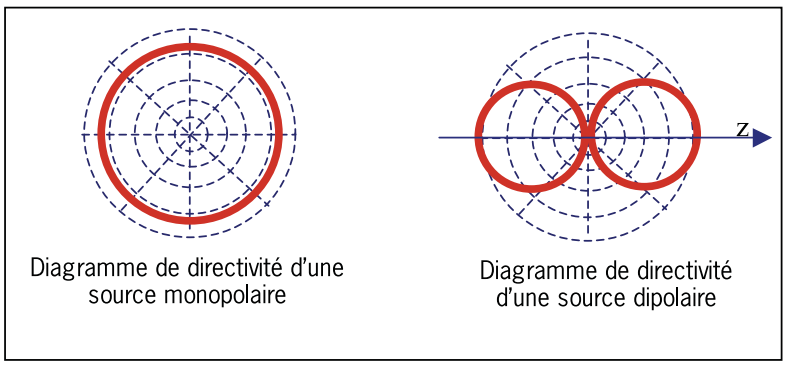

Fig. 2: Directivité de sources dipolaire et monopolaire

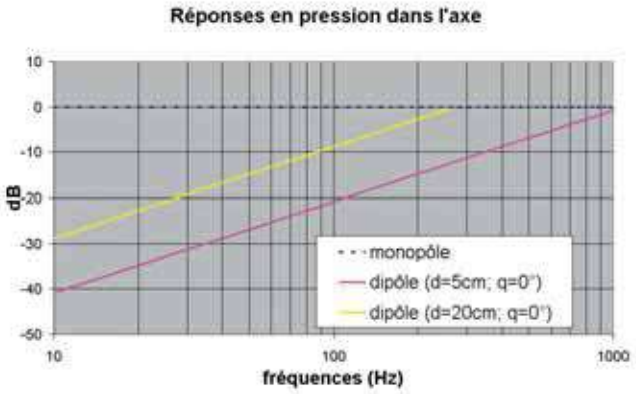

Fig. 3: Réponses en pression de sources dipolaires comparées à celle d'une source monopolaire de même débit

Choix du haut-parleur

La première phase de la conception a consisté à définir les critères permettant de choisir le haut-parleur à utiliser pour l'actuateur. Du point de vue des dimensions, les contraintes ont été celles qui sont fixées par l'encombrement souhaité pour les modules (cylindre de 20cm de diamètre).

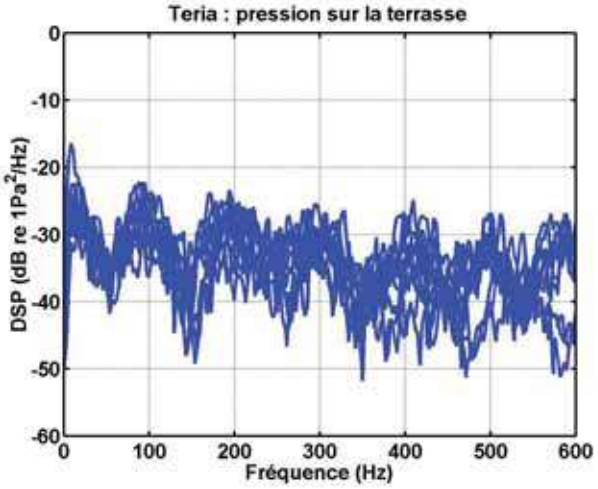

Fig. 4: Densité spectrale de puissance du bruit à contrôler (dB re 1Pa²/Hz)

Par ailleurs l'hypothèse que chaque actuateur est censé produire, à un mètre de son centre acoustique, dans l'axe, un niveau de bruit du même ordre de grandeur que celui créé par le plus bruyant des avions a permis d'estimer le volume d'air devant être déplacé par le haut-parleur. La figure 4 montre un exemple de spectres de bruit relevés sur la terrasse à protéger pendant un décollage : chaque courbe correspond à une tranche de temps de 1 seconde. Les variations de densité spectrale sont très significatives. Le débit crête de l'actuateur est donc estimé pour

chacune de ces tranches, et la valeur maximale est retenue pour dimensionner l'actuateur.

Un calcul, prenant comme hypothèse un écartement des deux pôles de l'actuateur de 20 cm ainsi qu'un coefficient de sécurité de 10 dB sur le niveau obtenu (cette marge est nécessaire pour assurer le réglage de l'algorithme), a fourni une valeur «crête» pour le volume d'air à déplacer par le haut-parleur d'environ 100 cm^3. Cette valeur a été obtenue en multipliant le volume RMS nécessaire maximal par un facteur de crête supposé être celui de la pression mesurée. Avec ce critère, la minimisation de la taille de l'actuateur a imposé de choisir un haut-parleur de 7'' (dont la surface émissive est de l'ordre de 150 cm^2), et de sélectionner un modèle possédant une excursion linéaire de membrane d'au moins 7 mm. Il n'est en effet pas possible d'obtenir un volume d'air déplacé de 100 cm^3 avec des modèles de haut-parleur de tailles plus petites qui ont des valeurs d'excursion linéaire de membrane plus faibles. En revanche, le choix d'un haut-parleur de 7'' nous a placé en limite des contraintes imposées pour la dimension des actuateurs car le diamètre extérieur est en général de 18 ou 19 cm, auquel il faut ajouter le corps de l'actuateur (voir figure 5-a). Pour accroître le niveau acoustique généré par l'actuateur, et par conséquent essayer de réduire la taille du haut-parleur, il a été envisagé de placer des charges acoustiques de type résonateur de Helmoltz à l'avant et à l'arrière du haut-parleur (figure 5-b). Ceci permet d'optimiser les performances de l'actuateur sur la bande de fréquence concernée.

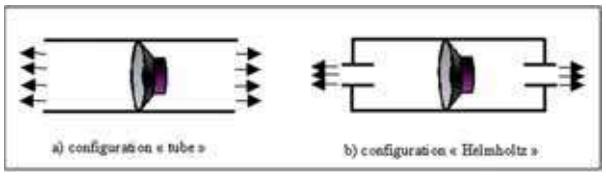

Fig. 5 : Configurations envisagées pour les actuateurs

La figure 6 montre des simulations du débit acoustique généré par deux actuateurs utilisant le même haut-parleur de 7'', l'un correspondant à un montage «tube» (figure 5-a), l'autre à un montage de type «Helmholtz» (figure 5-b) avec une fréquence d'accord des résonateurs d'environ 300 Hz. Il apparaît une nette augmentation du débit acoustique sur la bande de fréquences 100 Hz/400 Hz.

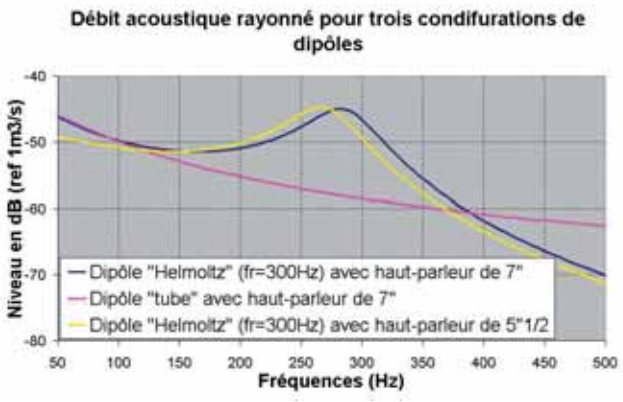

Fig. 6 : Impact de la charge acoustique et du haut-parleur sur le débit acoustique généré par l'actuateur

Sur la figure 6 sont également présentées les performances obtenues en remplaçant dans la configuration «Helmholtz» le haut-parleur de 7'' par un modèle de 5''1/2. Ce dernier possède un rendement moindre, ce que l'on voit aux fréquences inférieures à 100 Hz où le niveau de débit généré est plus faible. En revanche, sur la bande de fréquence 120 Hz/ 370 Hz le niveau est supérieur à ce que l'on aurait avec un haut-parleur de 7'' monté en configuration «tube».

Ces résultats ayant été confirmés par des essais sur un cas académique, il a été décidé d'opter pour un haut-parleur de 5''1/2. Le choix s'est porté sur le modèle 15W/8530K00 de la marque Scan-Speak qui offre un bon compromis entre une taille réduite et une bonne amplitude d'excursion linéaire, tout en conservant un bon rendement et un poids raisonnable. Ses caractéristiques sont données en figure 7.

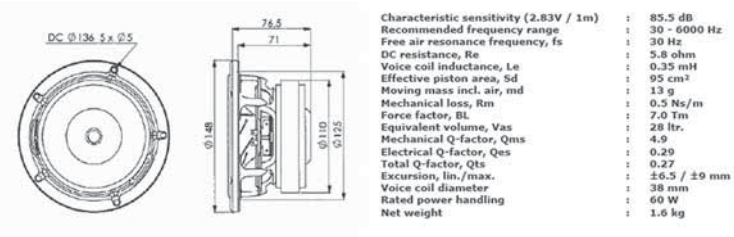

Fig. 7 : Caractéristiques du haut-parleur ScanSpeak 15W/85300K00

Conception de l'actuateur

Dans un second temps, les contraintes géométriques et environnementales ont été prises en compte. Ainsi, le fait de pouvoir occasionnellement supporter la pluie sans risquer la destruction des composants électroacoustiques, nous a d'emblée imposé d'orienter les ouvertures (surfaces rayonnantes du dipôle) vers le bas. Compte tenu de la gamme de fréquences du cahier des charges (80 Hz/ 500 Hz) et des dimensions de l'actuateur, l'orientation des surfaces rayonnantes a peu d'influence sur les performances acoustiques de ce dernier.

Un processus itératif a ensuite permis un premier dimensionnement de l'actuateur en effectuant un compromis entre dimensions extérieures minimales, utilisation de composants commerciaux, encombrement du haut-parleur, performances acoustiques (notamment l'ajustement de la fréquence de résonance des Helmholtz), contraintes liées à l'utilisation, ergonomie et esthétisme. Une vue schématique de la configuration retenue est présentée en figure 8.

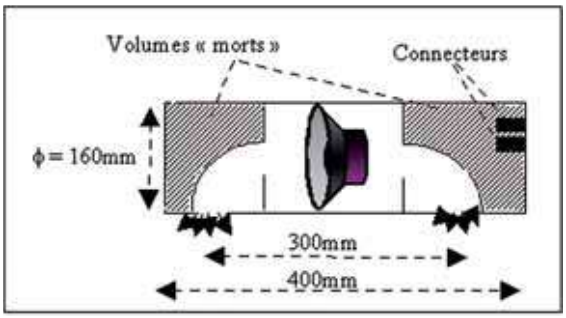

Fig. 8 : Vue schématique de l'actuateur

Du point de vue des performances, la figure 9-a montre une simulation de l'excursion de la membrane du haut-parleur en fonction de la fréquence pour une excitation sinusoïdale de 10 Vrms : l'excursion de la membrane reste toujours nettement en-dessous de la limite linéaire quelle que soit la fréquence d'excitation. La figure 9-b montre quant à elle une estimation de la Densité Spectrale de Puissance générée par l'actuateur à 1 m dans l'axe, pour un niveau d'excitation RMS de 10 V répartit uniformément sur la bande de fréquences 50 Hz/500 Hz. On constate que le niveau généré est largement supérieur à celui du bruit à contrôler excepté en-dessous de 100 Hz. Ceci n'est pas pénalisant car une égalisation du spectre envoyé à l'actuateur, accentuant l'amplitude de l'excitation en-dessous de 200 Hz au détriment des fréquences plus élevées, permet de corriger le manque de niveau aux basses fréquences.

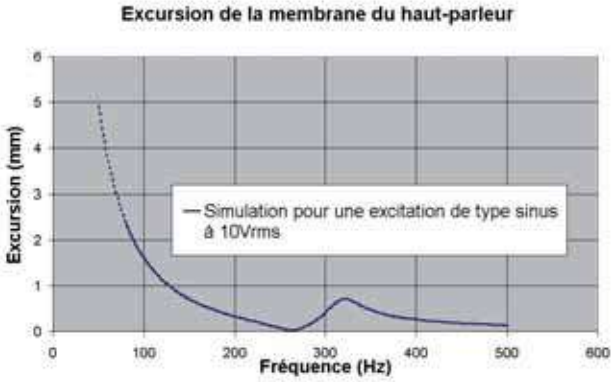

Fig. 9-a : Performances de l'actuateur : simulation de l'excursion de la membrane du haut-parleur

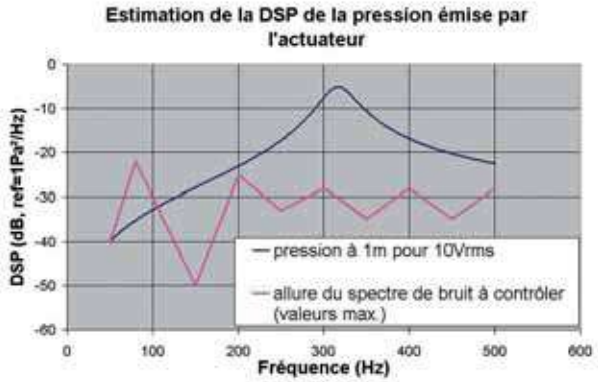

Fig. 9-b : Performances de l'actuateur : Densité Spectrale de Puissance de la pression émise

Mise au point et fabrication des actuateurs

Pour finaliser la conception, un premier prototype fonctionnel a été réalisé sur la base des résultats présentés ci avant. De nouvelles itérations ont été nécessaires notamment pour ajuster les longueurs des évents et les volumes des résonateurs de Helmholtz. En effet, lorsque les fréquences de résonance des deux Helmholtz ne sont pas parfaitement accordées, une dissymétrie apparaît qui génère une composante monopolaire et dégrade fortement la directivité de l'actuateur. Les relevés expérimentaux présentés en figure 10 illustrent ce point : avec un actuateur mal réglé, il apparaît une composante monopolaire vers 250 Hz dont l'amplitude est supérieure à celle de la composante dipolaire. Lorsque l'actuateur est correctement réglé, on constate par ailleurs un bon accord entre la simulation de la pression acoustique rayonnée dans l'axe et celle mesurée.

Concernant le développement, le point critique a été la combinaison de la contrainte sur l'encombrement de l'actuateur et de la dissymétrie entre l'avant et l'arrière du haut-parleur. En effet, cela introduit une incertitude non négligeable sur les volumes de charge du transducteur car ceux-ci sont relativement faibles (de l'ordre du litre). D'autre part, l'encombrement défini pour l'actuateur a imposé une longueur différente pour chacun des deux évents. Compte tenu de ces éléments, il est impossible que les

Fig. 11 : Fabrication de la série et vue de l'actuateur monté sur son support

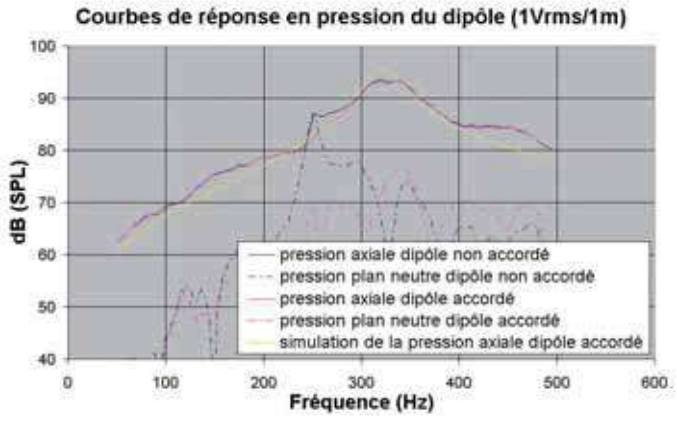

Fig. 10 : Courbes de réponse en pression montrant l'impact d'un accord différent des deux Helmholtz

caractéristiques des deux Helmholtz soient parfaitement identiques : l'objectif est de les rendre les plus proches possible. Pour cela, la monture du haut-parleur a été modifiée pour pouvoir effectuer un équilibrage fin des volumes après montage. Les actuateurs livrés sont présentés en figures 11.

Conclusion

Soixante-quatre actuateurs ont été fournis pour être installés sur site expérimental (figure 12). Lors de mesures préliminaires, les niveaux fournis par les actuateurs ont été jugés satisfaisant. Les figures 13 et 14 présentent des exemples de résultat obtenus par

Fig. 12 : Vues de l'antenne équipée de 56 actuateurs

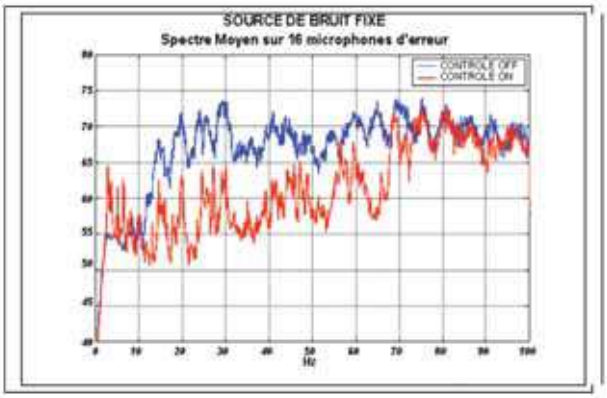

Fig. 13 : Effet du contrôle actif du bruit pour une source de bruit immobile

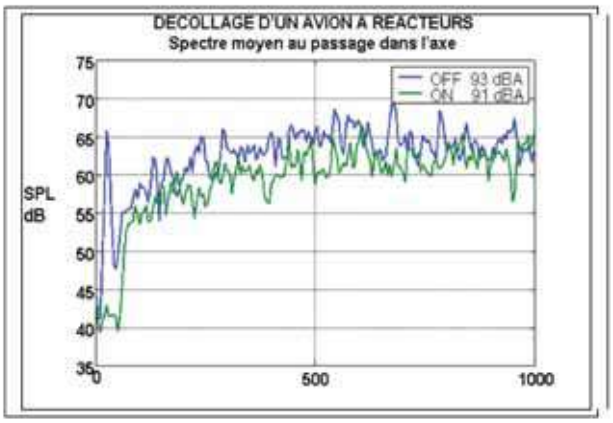

Fig. 14 : Effet du contrôle actif du bruit lors du passage d'un avion au décollage

le dispositif de contrôle actif. Dans les deux cas exposés, la grandeur est le spectre de pression moyenné sur les 16 microphones centraux de l'antenne. Le premier exemple montre le résultat de l'application du contrôle actif dans le cas d'une source de bruit immobile émettant un bruit blanc à 30 m en avant de l'antenne. Le second exemple de contrôle est réalisé lors du passage d'un avion au décollage dans l'axe de l'antenne. Dans les deux cas, l'algorithme de contrôle actif (pas encore optimisé) a convergé, permettant une certaine réduction du niveau de bruit, ce qui laisse à penser que les actuateurs sont correctement dimensionnés pour le problème à traiter. ■