

Récents développements dans les techniques de réduction et de contrôle du bruit des turboréacteurs

Jacques Julliard,
Georges Riou,
Christian Lozachmeur,
SNECMA,
Site de Villaroche,
77550 Moissy-Cramayel
Tél. : 01 60 59 71 23

Face aux demandes et contraintes de plus en plus pressantes pour réduire le bruit des avions autour des aéroports et dans une moindre mesure à l'intérieur de la cabine, un effort important a été entrepris pour améliorer les dispositifs de contrôle et de réduction du bruit des moteurs.

Les conduits de turboréacteurs doivent être revêtus de matériaux absorbants afin de réduire le bruit émis par les sources internes, notamment, celui de la soufflante qui constitue une des sources dominantes. Les méthodes d'optimisation applicables aux traitements acoustiques sont relativement bien connues. Néanmoins, certaines difficultés subsistent, notamment dans la façon d'interpréter les résultats de calcul et de les utiliser en vue de prédire la géométrie optimale de traitement et également de prédire son efficacité acoustique. Cet article décrit les techniques de dimensionnement et de caractérisation des traitements développés et mises en œuvre par SNECMA. Il présente quelques applications qui montrent les compétences de la SNECMA dans ce domaine. Il faut rappeler que les techniques passives présentées ici ne seront probablement pas suffisantes pour les futures turbomachines : En effet les entrées d'air plus courtes associées à des soufflantes lentes et à faible nombre d'aubes exigeront des traitements basse fréquence volumineux et donc difficiles, voire impossible à intégrer. Il est discuté des possibilités d'agir sur les caractéristiques des sources elles-mêmes, sur la propagation et le rayonnement sonore, et des nouvelles technologies à mettre en œuvre telles que le contrôle actif de la directivité des sons émis.

With the mounting social concern about aircraft noise, both inside the aircraft and out, a great deal of effort has gone into improving engine noise control and reduction systems. The predominant source of internally generated noise in the fan.

To reduce fan noise, jet engine ducts have to be lined with sound-absorbent materials. There are a number of methods for optimizing this lining, and they are well known; but different manufacturers have different ways of interpreting and using the results, when defining the best lining geometry and evaluating its acoustic efficiency.

The present paper explains the care that SNECMA takes in going about this, and offers a few successful applications as examples. It must be remembered, though, that this passive technology will most likely prove to be insufficient for turbomachine concepts of the future, with their shorter intakes, fewer fan blades, and lower blade tip speeds. So we will also discuss the possibilities of acting on the sound source characteristics themselves, on sound propagation and radiation, and new technological challenges such as active noise directivity control.

Les normes qui régissent le bruit des avions commerciaux sont déterminées par la réglementation internationale (OACI, annexe 16, chapitre 3). Elles fixent des niveaux limites en trois points de contrôle autour des aéroports (approche, décollage et latéral). Les niveaux admissibles pondérés par la réponse physiologique de l'oreille, la durée d'exposition et les sons purs varient en fonction de la masse de l'avion au décollage mais aussi du nombre de moteurs.

Le bruit des systèmes propulsifs a constamment diminué mais également considérablement évolué.

Pour les réacteurs monoflux ou à faible taux de dilution ($l < 2$), le processus de mélange des gaz éjectés avec air ambiant constituait de loin la composante majeure du bruit. Les sources sonores énergétiques étant situées quelques diamètres en aval de la section d'éjection, elles s'avéraient difficilement contrôlables.

Avec l'apparition dans les années 70 des premiers turbo-réacteurs à grand taux de dilution ($2 < l < 6$), le bruit de jet a radicalement diminué. Les composants majeurs

(soufflante, compresseur, turbine, chambre de combustion) interviennent de façon significative dans l'émission du bruit, la contribution majeure étant celle de la soufflante.

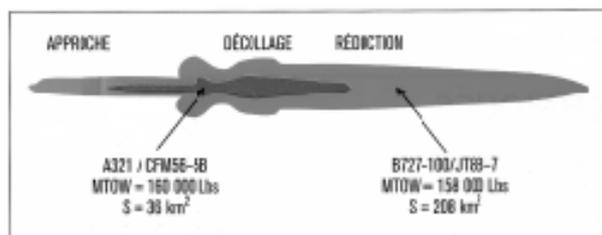


Figure 1 : Variation de la trace ISO 85 EPNdB entre moteurs à faible et à haut taux de dilution.

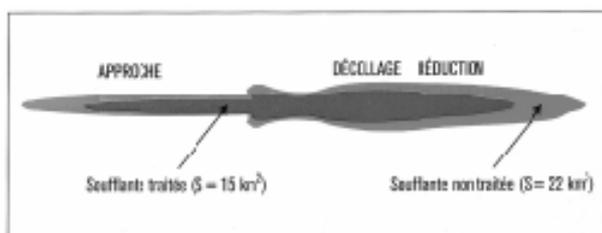


Figure 2 : Variations de la trace ISO 85 EPNdB entre soufflantes non traitée et traitée.

Les empreintes du bruit au sol relatives aux phases d'approche et de décollage (avec : réduction de poussée) sont données sur la figure 1 pour deux avions de génération différentes. Les contours extérieurs représentent le tracé des lignes ISO 85 EPNdB. La surface interne du contour exposée à des niveaux supérieurs à 85 EPNdB, est réduite d'un facteur 5 environ pour un avion certifié "Chapitre 3" par rapport à un avion certifié "Chapitre 2".

Aujourd'hui l'application de règles de conception silencieuse et l'utilisation de dispositifs atténuateurs ont permis de ramener le bruit de la soufflante à un niveau comparable à celui des autres sources. La figure 2 compare les empreintes iso-bruit au sol de soufflantes en veine lisse et en veine traitée, pour l'approche et le décollage. Le contour externe représente la ligne ISO 80 EPNdB. L'impact du traitement acoustique se traduit par une réduction d'environ 60 % de la surface exposée à un niveau supérieur à 80 EPNdB.

Dans l'avenir, et pour répondre au souci constant de diminuer la consommation de carburant, les systèmes propulsifs envisagés seront à très grand taux de dilution avec soufflante carénée ou non. Ces propulseurs seront toujours caractérisés par un bruit de soufflante dominant, mais la signature acoustique sera beaucoup plus basse en fréquence. Le contrôle du bruit à la source et la conception de dispositifs atténuateurs poseront alors des problèmes nouveaux qui sont abordés plus loin.

Optimisation du traitement acoustique de la soufflante

Le comportement des matériaux de traitement acoustique dépend de multiples critères :

- la forme du conduit,
- la bande de fréquence et le niveau de pression sonore,
- la vitesse d'écoulement,
- de nombreux paramètres intrinsèques au matériau.

Choisir un revêtement tenant compte d'un objectif d'atténuation en lien avec un plan de vol est un réel problème d'optimisation, un choix empirique ayant toutes les chances de ne pas être efficace.

SNECMA a mis au point des outils d'optimisation décomposés en deux étapes, le lien entre ces deux étapes reposant sur la notion d'impédance acoustique du matériau :

- la première consiste à réaliser un modèle de propagation dans le conduit de la soufflante et en milieu libre extérieur pour déterminer l'impédance optimale du matériau à mettre en conduit pour assurer la plus forte atténuation du bruit.
- la deuxième consiste à développer des modèles d'impédance adaptées au choix de la technologie du traitement acoustique retenu. Ils servent à définir les caractéristiques géométriques les mieux optimisées de la structure compte tenu des contraintes d'environnement et de fabrication.

Ces modèles sont basés sur des résultats de mesures prenant en compte les paramètres géométriques des matériaux et les conditions de fonctionnement (vitesse de l'écoulement et spectre des vitesses acoustiques).

Modèle de prévision de la propagation et de l'impédance optimale

Des modèles de prévision du rayonnement extérieur pour une source acoustique placée dans un conduit cylindrique ont été réalisés. Ils prennent en compte une impédance de paroi et un écoulement à l'intérieur. Deux modèles ont été développés :

- un modèle analytique basé sur la propagation en conduit en coordonnées cylindriques. L'extrémité du tube est insérée dans un baffle infini rigide (condition nécessaire pour avoir une méthode analytique). Voir figure 3.
- un modèle numérique permettant de faire le calcul exact sur la géométrie réelle sans baffle plan.

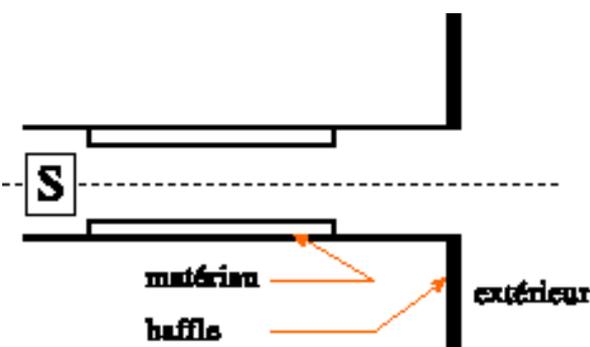


Figure 3 : Modèle basé sur la propagation en conduit.

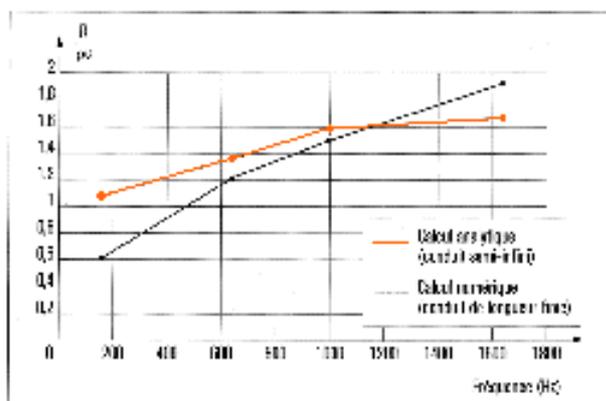


Figure 4 : Résistance optimale en fonction de la fréquence.

Le modèle développé intègre la recherche de l'impédance minimisant le bruit transmis fréquence à fréquence. La figure 4 montre un résultat d'optimisation pour la résistance adimensionnée (partir réelle de l'impédance R divisée par ρc) en fonction de la fréquence.

On peut remarquer que l'impédance optimale varie avec la fréquence.

Propriétés des traitements acoustiques

La plupart des absorbants sonores utilisés dans les applications aéronautiques sont à réaction localisée, car ils fonctionnent dans un environnement hostile. Le plus simple est constitué d'une structure en nid d'abeilles recouverte par une couche poreuse et fermée par une

couche réfléchissante. Des structures de plus en plus complexes, avec des couches poreuses supplémentaires insérées entre deux hauteurs de nid d'abeilles, sont utilisées afin d'étendre l'accord en fréquence sur une bande plus large. La taille des cellules est suffisamment petite pour que la caractéristique acoustique soit l'impédance normale. Néanmoins la taille des cellules doit être suffisante afin que l'impédance au niveau de chaque cellule soit représentative de l'impédance globale. Le paramètre prépondérant pour l'accord en fréquence est la hauteur de la cavité. Une hauteur proche du quart de la longueur d'onde à atténuer donne le maximum de vitesse acoustique au niveau de la paroi poreuse, une partie importante de l'énergie acoustique étant ainsi dissipée par effet visco-thermique. La valeur de la résistance sert alors à ajuster l'amortissement.

Ces considérations étant exposées, le développement des modèles d'impédance est une tâche ardue avec des traitements acoustiques dont les caractéristiques sont sensibles à la fois aux hauts niveaux de pression sonore et à l'écoulement dont la vitesse varie avec le régime moteur. La non-linéarité des matériaux absorbants est

caractérisée par un accroissement de la résistance acoustique et une diminution de la réactance pour la couche poreuse. De nombreuses études et essais sur différents types de couche poreuse avec des variations des paramètres physiques, ont été réalisés afin de développer des modèles qui relient l'impédance acoustique complexe aux caractéristiques des absorbants, en fonction des paramètres aéro-acoustiques. La modélisation de l'impédance acoustique a été faite sur la base de travaux théoriques tels que ceux de Guess, Melling, Hersch et Rogers [1,2,3], et de résultats d'essais SNECMA obtenus sur un tube à onde stationnaire, sur veine à écoulement tangentiel (figure 5), et en écoulement traversant permanent.

À titre d'exemple, on donne les résultats obtenus pour des mesures avec un écoulement rasant (voir schéma du montage). Les résultats donnés sur la figure 6 correspondent à un matériau avec un pourcentage de perforation de 4 % des trous de diamètre 0,5 mm dans une tôle d'épaisseur 0,7 mm. Les effets de variation de l'impédance avec la vitesse d'écoulement et du niveau acoustique sont clairement mis en évidence.

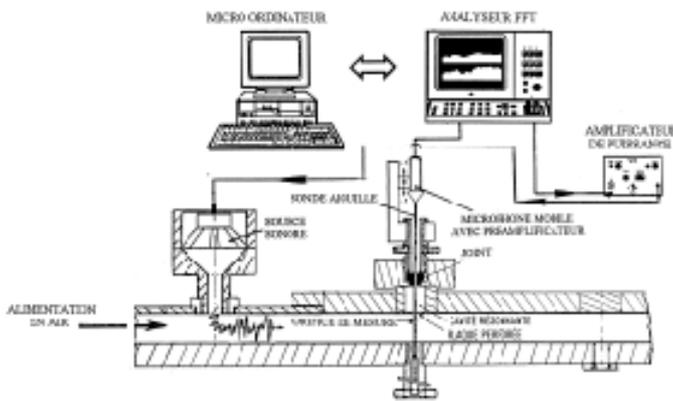


Figure 5 : Montage à écoulement tangentiel.

Choix de la technologie et optimisation des paramètres de traitement

Après avoir montré l'intérêt d'une démarche d'optimisation pour le choix des matériaux de traitement, on montre dans ce paragraphe des résultats corrects obtenus.

Le choix de la technologie dépend bien sûr du niveau d'atténuation en EPNdB requis, mais d'autres éléments importants doivent aussi être pris en compte, tels que la gamme de fréquence à atténuer, la surface traitée, les contraintes d'intégration (notamment la hauteur disponible), ainsi que les contraintes de masse et de coût de fabrication.

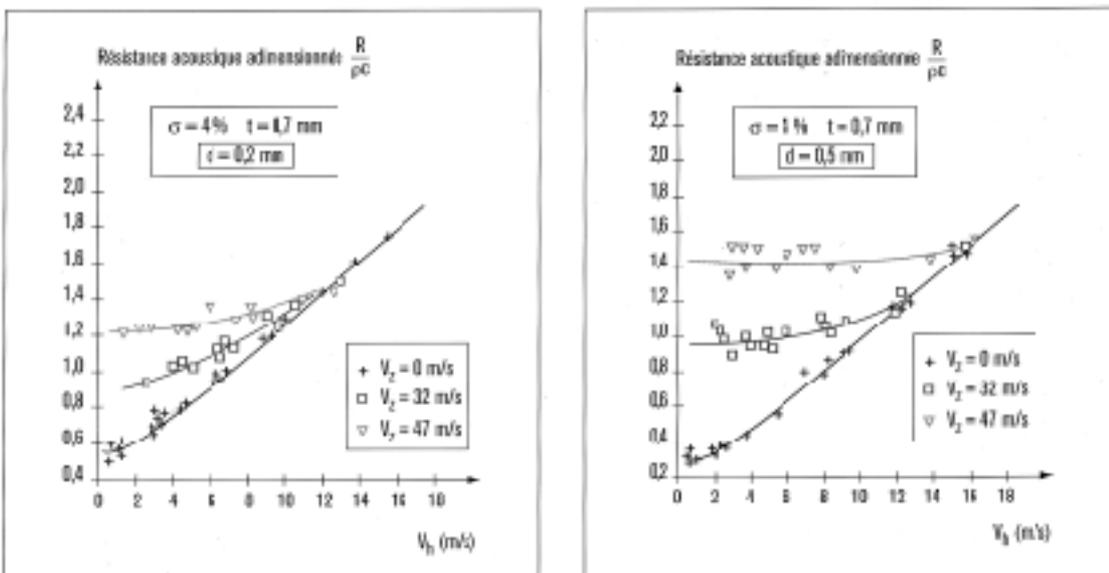


Figure 6 : Résistance acoustique en fonction du niveau acoustique (vitesse acoustique) avec écoulement rasant.

Aussi un grand nombre d'itérations sont-elles nécessaires pour aboutir à la définition finale, sachant par ailleurs que les tolérances sur les paramètres physiques des réalisations sont étroitement dépendantes du procédé de fabrication adopté. Ainsi par exemple, la fabrication des tôles micro-perforées par les techniques de perçage BE, ne peut produire que des trous plus ou moins coniques. Ce qui conduit à l'introduction de paramètres géométriques "équivalents" dans nos modèles.

L'optimisation des paramètres physiques d'une structure absorbante consiste à définir un traitement dont la courbe d'impédance est la plus proche possible de celle de l'impédance optimale calculée. Dans le cas d'une structure à un seul degré de liberté (1DDL), il est relativement facile de trouver une définition vérifiant un optimum. En revanche, pour satisfaire plusieurs "optimums" (en fréquence), la situation est plus difficile ; il faut alors passer à une structure à deux degrés de liberté (2DDL). Les tracés montrés sur les

figures 7a et b illustrent la situation et la philosophie adoptée. La définition optimale correspond le plus souvent à une courbe d'impédance qui est un compromis reproduisant au mieux à la fois les courbes de résistance et de réactance optimales pour plusieurs fréquences. Un autre critère pour une bonne efficacité sur le bruit à large bande est de définir un traitement suffisamment amorti, qui conduise à des évolutions "douces" avec la fréquence pour les parties résistive et réactive de l'impédance.

Comparaisons des prévisions et des mesures sur les efficacités de traitements

Afin d'évaluer le degré de confiance dans nos modèles mathématiques et nos outils d'optimisation et de prévision, de nombreux essais ont été faits dans différentes installations. Les résultats exprimés en atténuation de puissance sonore sont obtenus par l'écart en énergie rayonnée entre veines lisse et traitée. L'approximation d'un coefficient de réflexion faible à l'extrémité du conduit est relativement justifiée aux moyennes et hautes fréquences.

C'est la veine d'essais Bertin et Cie qui a été utilisée pour tester des échantillons de traitement en présence d'écoulement. Cette installation est constituée de deux chambres réverbérantes pour les mesures acoustiques, entre lesquelles est insérée une veine d'essais (18 X 4 cm²) longue de 58 cm. Les spectres d'atténuation obtenus montrent que l'accord avec les calculs est satisfaisant en termes de fréquences atténuées, mais l'est moins pour les niveaux d'atténuation. Ces résultats sont donc satisfaisants pour des comparaisons de traitements, mais ne doivent pas être utilisés directement pour l'application au moteur, la structure modale n'étant pas suffisamment représentative de celle dans un conduit de moteur.

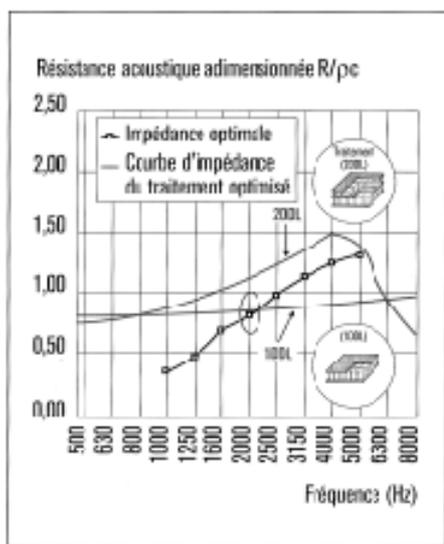


Figure 7a : Courbes d'impédance de traitements optimisés avec 1 ou 2 DDL par rapport à la courbe d'impédance optimale.

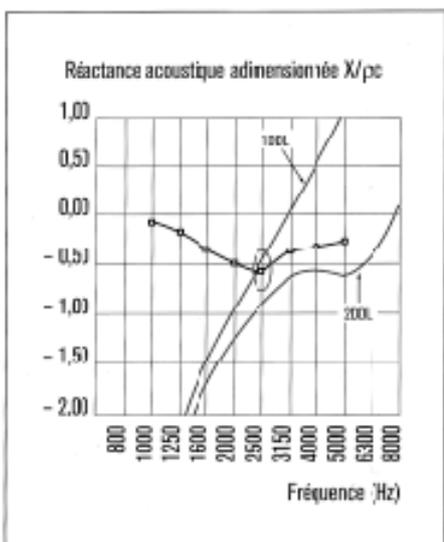


Figure 7b : Courbes d'impédance de traitement optimisées avec 1 ou 2 DDL par rapport à la courbe d'impédance optimale.

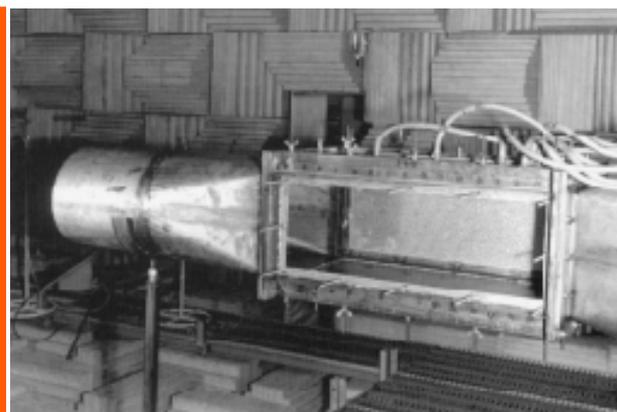


Figure 8 : Veine d'essais rectangulaire

L'installation d'essais SNECMA pour tester l'efficacité des traitements de conduit aval est présentée figure 8. La veine d'essais est rectangulaire, avec deux hauteurs de conduit possibles (24 et 32 cm) qui sont représentatives de conduits annulaires à l'aval de la soufflante pour les applications moteurs CFM56-3 et 5. Les résultats présentés montrent un accord satisfaisant entre calculs et mesures. Ils peuvent donc être directement appliqués au moteur, après correction de l'effet de la longueur traitée (figure 9).

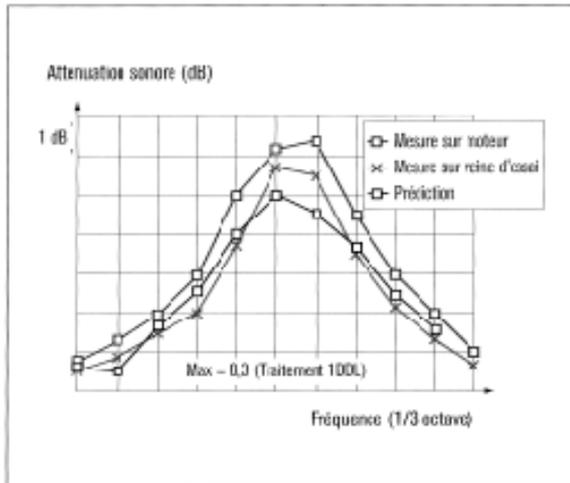


Figure 9 : Atténuations prédite et mesurée pour le conduit annulaire aval d'une soufflante et un conduit rectangulaire de même hauteur

De nombreux résultats d'essais sur moteur avec nacelle traitée ont été utilisés pour valider nos outils de prévision. La figure 10 montre, pour une manche d'entrée d'air traitée, le très bon accord entre mesure et prévision. Des comparaisons analogues sont présentées figure 11 pour des résonateurs simple et double couche dans un conduit aval de soufflante.

Contrôle acoustique actif

L'évolution prévisible vers des moteurs à très haut taux de dilution incite à étudier de nouveaux systèmes de réduction du bruit. En effet, l'efficacité des traitements passifs sera fortement réduite à cause des nacelles plus courtes, des fréquences plus basses et des difficultés d'intégration des structures absorbantes.

Dans ce contexte SNECMA a lancé des études expérimentales pour évaluer le contrôle acoustique actif comme moyen de réduire le bruit de soufflante. L'objectif est de réduire le bruit de raies en champ lointain dans une direction choisie en contrôlant la directivité du rayonnement sonore.

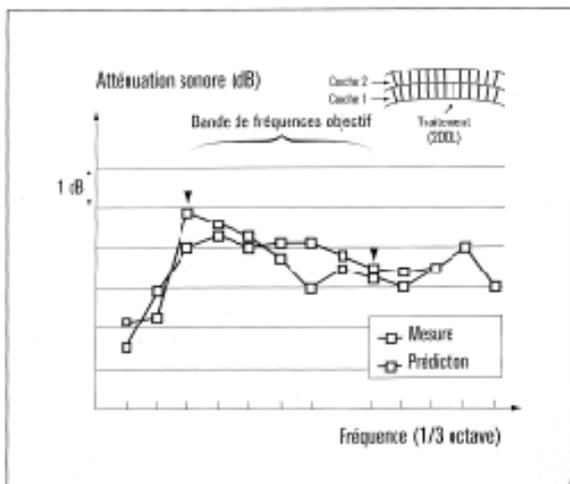


Figure 10 : Atténuations prédite et mesurée pour un conduit d'entrée d'air (Application CFM56).

L'idée bien connue de l'antibruit consiste à faire interférer de façon destructive, d'une part, le champ sonore produit par la source "non contrôlée" (champ primaire), et d'autre part, un champ sonore créé par une ou plusieurs sources sonores contrôlées (champ secondaire). Afin d'évaluer par une approche expérimentale les potentialités du contrôle acoustique actif, un dispositif a été mis en place sur une maquette de soufflante. L'installation d'essais est décrite et quelques résultats sont montrés et commentés.

Description de l'installation d'essais

Les essais ont été réalisés sur une maquette de soufflante au banc anéchoïque de SNECMA (figure 12). Une cloison mobile absorbante permet de séparer les rayonnements amont et aval. Des microphones fixes et mobiles mesurent

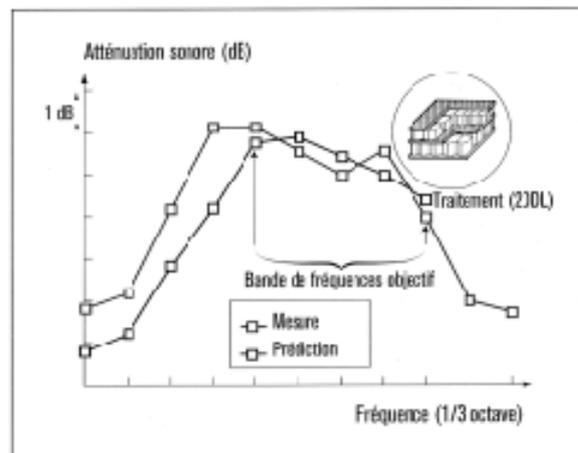
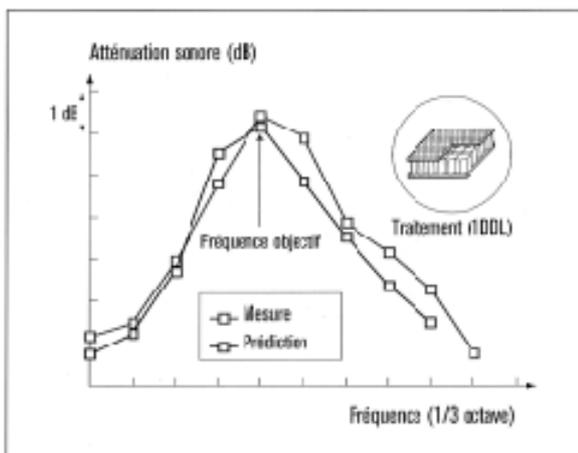


Figure 11 : Atténuations prédite et mesurée pour un conduit de sortie de soufflante.

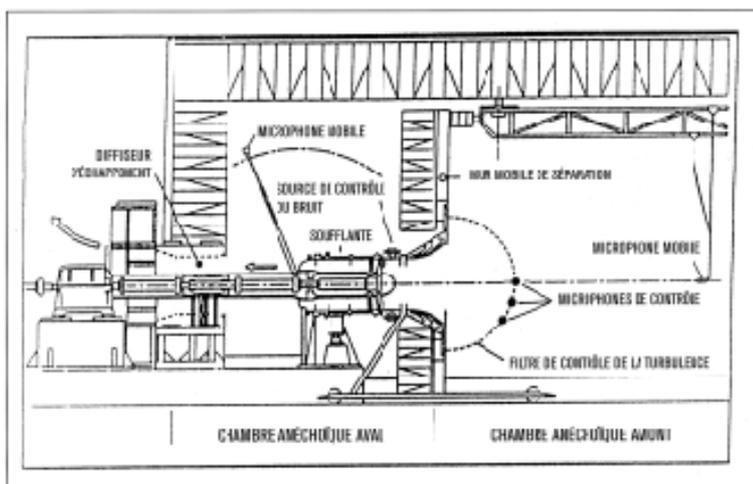


Figure 12 : Banc d'essais anéchoïque de compresseur.

la directivité du bruit rayonné. La maquette de soufflante est un compresseur axial monoétage avec 48 aubes mobiles et 98 aubes fixes. Le régime de rotation au point nominal est de 12 600 tr/mn et le diamètre est de 47 cm. Neuf ou douze tiges équiréparties azimuthalement ont été placées à 0,34 D en amont de la soufflante dans le but d'engendrer des sillages qui interagissent avec les aubes mobiles. Ces interactions produisent un bruit de raies intense à la fréquence de passage des aubes mobiles et à ses harmoniques sur des modes azimuthaux d'ordre bien identifié puisque fonction du nombre d'aubes et du nombre de tiges. À la fréquence du fondamental, les premiers modes excités sont le mode plan avec 12 tiges et le mode azimuthal d'ordre 3 avec 9 tiges. La maquette est alimentée en air au travers d'un filtre de contrôle de la turbulence (FCT) installé sur la manche d'entrée d'air et dont le rôle est de minimiser la turbulence atmosphérique ainsi que les tourbillons de sol en vue de simuler au mieux les caractéristiques de l'écoulement en vol.

Une unité de calcul et de contrôle adaptatif spécialement développée pour cette application gère l'identification de la source primaire, analyse les signaux des capteurs d'erreur (microphones de contrôle) et alimente les sources

secondaires afin de minimiser le bruit dans la zone de contrôle. Le contrôle est assuré par 8 microphones implantés de façon judicieuse sur le FCT. Huit haut-parleurs, à chambre de compression, et de forte puissance, sont installés à la périphérie du conduit de la manche dans une même section, tous les 45 degrés. Ces sources dites de contrôle débouchent par de petits orifices dans la paroi du conduit et émettent le contre bruit. Elles sont pilotées par un contrôleur multivoies qui traite les informations délivrées par les capteurs d'erreur. Le signal de référence (top par tour) utilisé par le contrôleur est fourni par un capteur installé sur l'arbre de la machine.

Plusieurs codes dédiés à l'unité de contrôle ont été évalués. L'algorithme temporel LMS (least mean square) s'est révélé être de loin le mieux adapté pour suivre les légères fluctuations en niveau et en fréquence de la source soufflante. Au cours des différents essais réalisés, le contrôleur s'est montré suffisamment robuste pour s'accommoder des fluctuations de régime de la machine.

Résultats expérimentaux

La figure 13 montre la signature acoustique en champ lointain (analyse en bandes étroites) de la soufflante observée dans l'axe de la manche de l'entrée d'air, avec et sans contrôle actif. Les figures 14 et 15 donnent la directivité de la raie du son fondamental pour les rayonnements amont et aval, pour deux régimes machine. Dans tous les cas, le niveau de pression sonore de la raie du son fondamental est réduit jusqu'à 10/15 dB dans la zone de contrôle amont et son prolongement. Le rayonnement aval est le plus souvent affecté, surtout aux basses fréquences. Il peut soit être renforcé, soit être réduit, en fonction de la fréquence de la source. Un essai avec des points de contrôle positionnés en paroi sur une génératrice du conduit a également donné une atténuation notable.

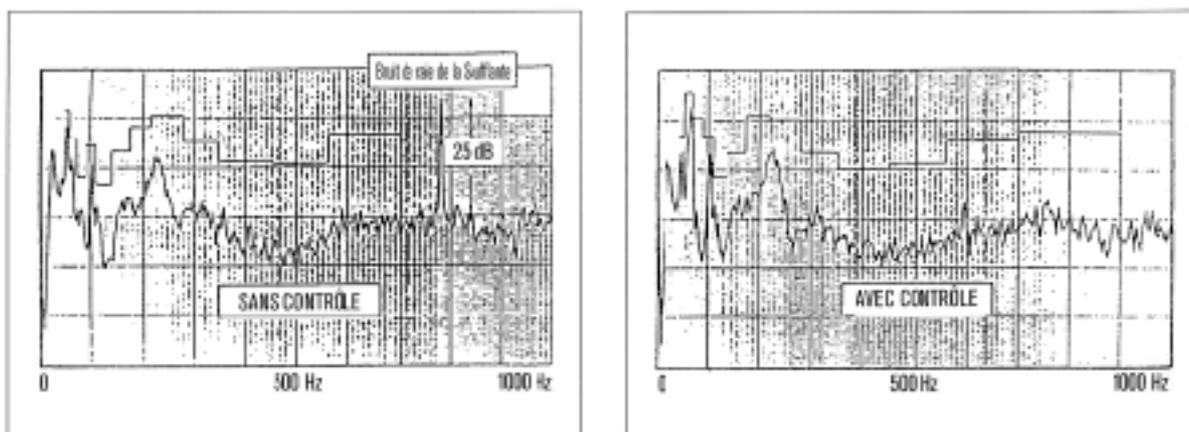


Figure 13 : Spectres en champ lointain dans l'axe de l'entrée d'air, sans et avec contrôle. Bruit de raie soufflante : 780 Hz.

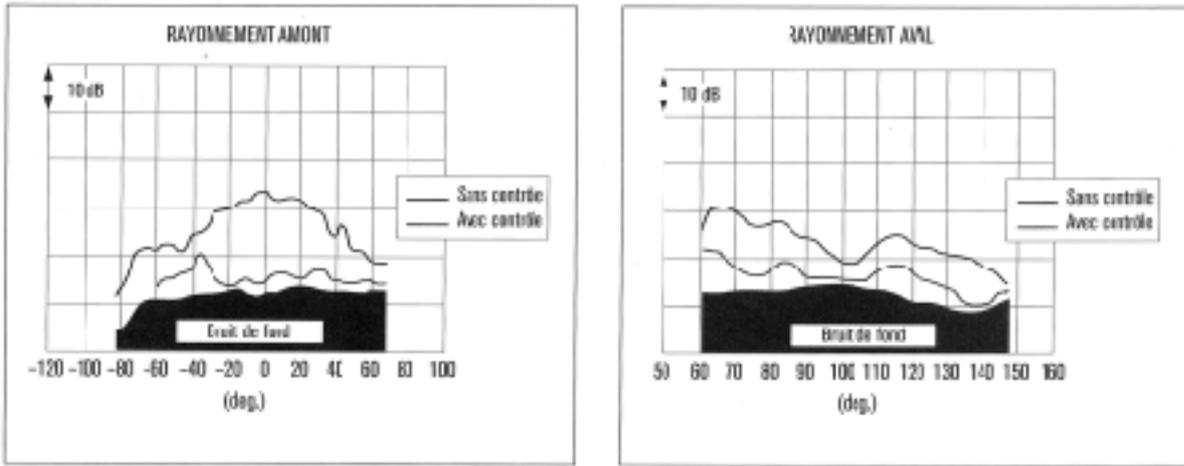


Figure 14 : Directivité du bruit de raie de la soufflante à 780 Hz.

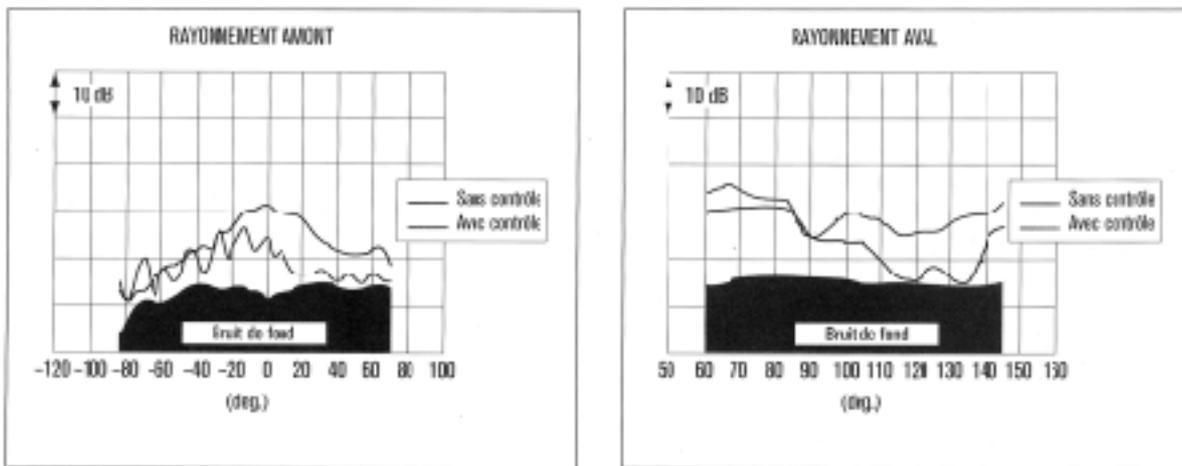


Figure 15 : Directivité du bruit de raie de la soufflante à 840 Hz.

Afin de vérifier l'étendue spatiale de la zone d'atténuation, le bruit en champ lointain a été mesuré en site avec une antenne mobile (figure 16). Le bruit est réduit dans un large angle solide.

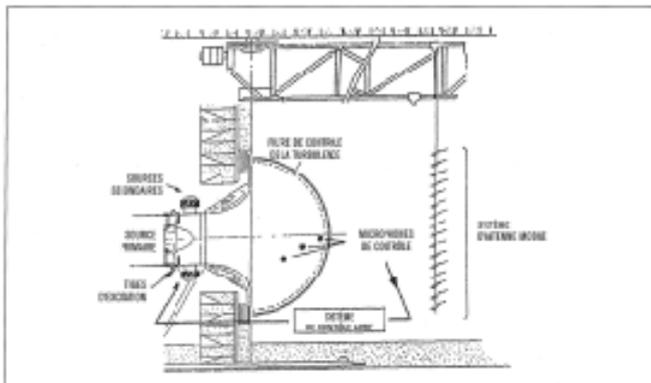


Figure 16 : Configuration d'essai avec antenne mobile.

Des essais ont été menés jusqu'à 2500 Hz (fréquence limite de fonctionnement du contrôleur actuel), avec des atténuations moindres mais encore significatives compte tenu du nombre de points de contrôle utilisés, faible pour cette fréquence (figure 17). Le contrôle actif du bruit n'est ici pas trop critique, car les traitements acoustiques passifs ont une bonne efficacité dans ce domaine de fréquences.

Les dispositifs de réduction actifs et passifs se présentent donc comme très complémentaires et une combinaison des deux techniques apparaît très prometteuse pour les nouveaux concepts de moteurs.

De nouveaux développements et essais se poursuivent, avec d'une part des capacités de calcul plus importantes pour piloter un plus grand nombre de haut-parleurs et de microphones, et d'autre part des capteurs de contrôle disposés en paroi de manche pour des applications moteur plus réalistes.

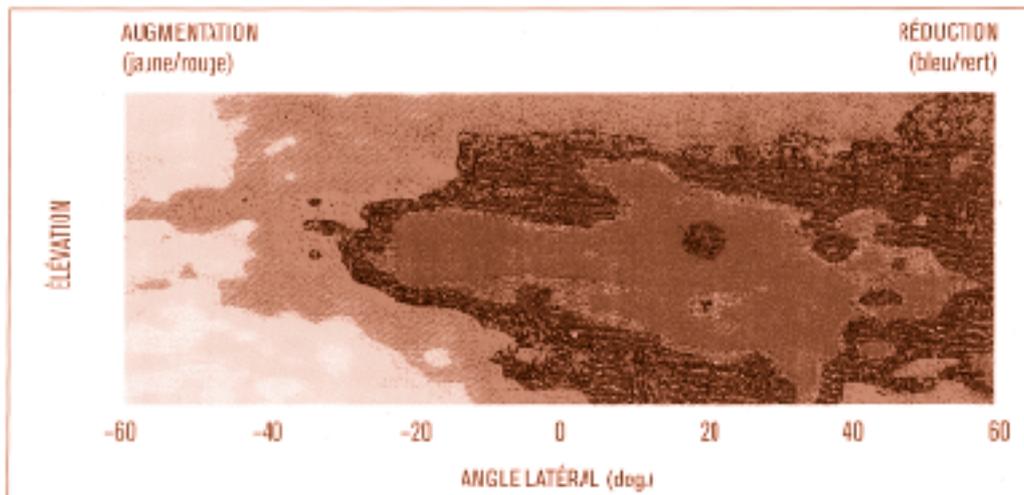


Figure 17 : Directivité amont du contrôle.
Réduction du niveau de bruit de raie de la soufflante, à 2500 Hz.

Conclusion

Les traitements acoustiques passifs resteront encore pour de nombreuses années un moyen très efficace pour réduire de façon notable le bruit des soufflantes. Les succès rencontrés dans les applications moteurs CFM56 et plus particulièrement avec le CFM56-5C installé sur l'avion Airbus A 340 permettent d'être pleinement confiants dans le choix des techniques de dimensionnement adoptées en termes de méthodes et modèles mathématiques utilisés.

Quelques progrès sont encore permis, notamment en utilisant les méthodes numériques visant à optimiser les traitements pour leur efficacité en champ lointain. Cependant, malgré les améliorations attendues, il faut prévoir la mise en œuvre d'autres solutions pour les futurs concepts de soufflante dans un contexte où les règlements de bruit évolueront vraisemblablement vers plus de sévérité.

L'efficacité du contrôle acoustique actif a été démontrée expérimentalement à partir d'essais sur une maquette de soufflante. Des réductions de bruit de raies de 10 à 15 dB ont été obtenues en champ lointain sur une plage angulaire relativement étendue.

Le contrôle actif s'avère être un moyen bien adapté et très efficace de réduction du bruit de raies aux basses fréquences, pour des modes acoustiques d'ordre faible, tandis que les structures absorbantes passives montrent de bonnes performances acoustiques sur le bruit à large bande aux moyennes et hautes fréquences et notamment pour les modes acoustiques d'ordre élevé. Aussi pour les nouveaux concepts de soufflantes et plus particulièrement ceux à très fort taux de dilution, une combinaison des techniques active et passive semble une voie prometteuse.

Références bibliographiques

- [1] AS Hersh and B. Walker, The acoustic behaviour of Helmholtz resonators exposed to high speed grazing flows, AIAA paper 76-563, july 1976
- [2] AW Guess, Calculation of perforated plate liner parameters from specified acoustic resistance and reactance, JSV, 1975, 40 (1)
- [3] TH Melling, Acoustic impedance of perforates at medium and high sound pressure levels, JSV, 1973, 29 (1), 1-65
- [4] J Julliard, G. Riou, Ch. Lozachmeur, Récents développements dans les techniques de réduction et de contrôle du bruit des turboréacteurs, Revue scientifique SNECMA, n° 6, juin 1995