

# Compte-rendu des journées d'étude sur le bruit des ventilateurs

Organisées les 11 et 12 décembre 1996 à Lyon par le Groupe Aéro- et Hydro-acoustique de la SFA, les journées d'étude sur le bruit des ventilateurs ont été un succès. Elles ont permis à plus de 35 inscrits d'assister à une dizaine de conférences et présentations portant sur trois thèmes :

- la ventilation dans les installations aérothermiques,
- la climatisation automobile,
- le conditionnement d'air dans les avions.

**Michel Roger,**  
ECL,  
36, avenue Guy de Collongue,  
BP 163,  
69131 ECULLY CEDEX,  
tél : 04 72 18 60 09,  
fax : 04 72 18 91 43

## Généralités et Etat de l'art

Nous proposons ici un point rapide sur l'état actuel des connaissances et les idées principalement admises. Bon nombre d'entre elles ont été rappelées à l'occasion de la conférence d'Alain Guédel du Centre d'études techniques des industries aéronautiques et thermiques (CETIAT).

## Physique du bruit d'origine aérodynamique

A l'heure actuelle, les mécanismes d'émission sonore liés aux écoulements dans les machines tournantes aérodynamiques sont bien identifiés et recensés. Conformément à l'analogie acoustique, qui sert de base à tous les développements théoriques effectués dans les dernières décennies, le bruit est de trois types :

- Un bruit de nature monopolaire dû au déplacement de volume d'air par les pales en mouvement.
- Un bruit de nature dipolaire lié aux efforts exercés par les pales sur l'air ambiant (bruit de charge) ou à l'impact d'écoulements instationnaires sur des surfaces solides (bruits d'interaction, cas des diaphragmes ou des discontinuités dans les conduites, des décollements, etc.).
- Un bruit de nature quadripolaire dit bruit propre des écoulements car il ne fait pas intervenir directement des surfaces solides (turbulence, déformation des écoulements autour d'obstacles).

Le bruit d'épaisseur ne dépend que de la cinématique des pales. Les deux autres, en revanche, font intervenir directement l'écoulement qui se développe dans leur environnement immédiat et nécessite de recourir à la mécanique des fluides.

Dans le cas des ventilateurs, le bruit d'épaisseur et le bruit propre des écoulements sont généralement négligeables devant le bruit dipolaire. Ce dernier se manifeste pourtant encore de façons très diverses. On distingue ainsi :

- Le bruit de charge stationnaire, lié à l'effort moyen sur les pales d'un rotor. Ce bruit n'est déterminant que si le nombre de Mach est assez grand et le nombre de pales modéré, sur les premières raies des rotors et les aubes des stators en fonctionnement aérodynamique instationnaire périodique.
- Le bruit des charges instationnaires aléatoires, responsable de l'émission à large bande des ventilateurs,

souvent prédominant et déterminant pour le niveau de bruit global. Pour simplifier, on peut faire entrer aussi dans cette catégorie le bruit propre d'un profil de pale, défini comme le bruit que produirait le profil dans un écoulement exempt de toute perturbation extérieure (bruit de bord de fuite ou de décollement). Dans certains cas, le bruit à large bande peut se manifester sous la forme de pics à bande étroite, quand les écoulements concernés sont sujets à des instabilités partiellement cohérentes (sifflements de bords de fuite, décollements tournants, etc.) ou donnent lieu à des interactions quasi-cohérentes (ingestion d'une turbulence étirée).

On constate donc que la diversité des mécanismes est grande ; de plus, leur hiérarchisation est très tributaire des spécificités de chaque machine.

## Bilan et perspectives

Il est notoire que des carences persistent à l'heure actuelle dans le domaine du diagnostic, de la prévision et de la réduction des sources de bruit dans les ventilateurs. La plupart du temps, on se restreint à l'emploi de lois de similitude fondées sur l'observation de données expérimentales. Si ces lois donnent souvent de bons résultats, elles ne permettent pas de dépasser un certain seuil d'amélioration. Elles ne partent pas d'une identification a priori des sources mais plutôt d'un constat a posteriori global sur l'existant.

De fait, on constate qu'il est parfois possible de réduire facilement dans un premier temps le niveau d'une machine de façon très substantielle, grâce à des artefacts s'appuyant davantage sur l'empirisme que sur une bonne connaissance des phénomènes physiques en cause. Ceci s'explique par le fait qu'à l'origine, la machine était loin de constituer une solution optimale sur un plan aéronautique. En partant d'une machine de conception plus élaborée, en revanche, il devient difficile d'obtenir des améliorations acoustiques spectaculaires. On peut ainsi s'étonner qu'il soit aussi laborieux de gagner les quelques décibels suivants quand l'étape de l'empirisme a déjà été si bénéfique ; la raison en est que cette seconde étape requiert une action plus précise que les mécanismes physiques de production de bruit, et donc une identification des mécanismes prépondérants.

Cette difficulté fait ressortir le besoin de modèles de prédiction physiques. A ce titre, la variété des sources de bruit fait qu'il est illusoire d'espérer mettre au point un modèle universel. La seule approche raisonnable consiste à développer des modèles ad hoc pour chaque mécanisme pris séparément et à valider ces modèles par des mesures adaptées.

Par exemple, la contribution au bruit à large bande due au bruit propre des pales d'un ventilateur peut s'étudier à partir d'une grille de profils ou d'un profil unique testé en soufflerie anéchoïque, selon la stratégie illustrée dans la communication de T. Burgain (ABB Solyvent-Ventec) : l'expérience permet d'abord de recalibrer un modèle simple de bruit de profil isolé, modèle que l'on transpose ensuite à une pale en rotation, puis à un rotor complet.

De la même manière, il est illusoire d'exiger d'un modèle qu'il fournisse une prédiction des niveaux de bruit au décibel près. En revanche, ce qui est primordial, c'est que le modèle restitue les tendances d'évolution justes en fonction d'une variation des paramètres, de façon à pouvoir être utilisé comme outil de définition de configurations à moindre bruit dans le cadre d'études paramétriques. Dans cette optique, le modèle n'a pas besoin d'être précis, mais il doit être simple à utiliser, rapide et reposer sur une identification correcte des sources prépondérantes.

L'application de modèles mis au point lors des dernières décennies dans le domaine de l'aéronautique (bruit des pales de rotors et des turbo réacteurs) constitue déjà à l'heure actuelle un moyen privilégié de combler des lacunes dans le domaine des ventilateurs. Cependant, si l'application ne pose aucun problème de principe, l'applicabilité n'est pas toujours garantie. En effet les nombres de Mach représentatifs des écoulements aéronautiques sont en général bien plus élevés que ceux qui caractérisent les ventilateurs, ce qui remet en question la hiérarchisation des mécanismes. Par exemple, le bruit de bord de fuite des pales joue un rôle bien plus important dans les ventilateurs que dans les machines tournantes aéronautiques, alors que le bruit de charge stationnaire est bien plus important pour celles-ci que pour ceux-là.

Ceci étant précisé, le problème majeur à l'heure actuelle est la prise en compte des effets d'installation, très déterminants dans le cas des ventilateurs. On entend par effet d'installation toute différence entre le bruit d'un ventilateur testé en conditions d'écoulement idéales et celui du même ventilateur en conditions réelles, sur un même point de fonctionnement aéraulique. Ces effets sont de deux types :

- aérodynamiques, lorsqu'ils agissent sur le degré d'inhomogénéité des écoulements et par la même sur la structuration des sources de bruit d'origine aérodynamique (entrée d'air non symétrique induisant des distorsions angulaires de l'écoulement, par exemple) ;
  - acoustiques, lorsqu'ils agissent sur la propagation du bruit (résonances de circuits et de cavités de distribution, de carénages ou de plénums d'entrée d'air, par exemple).
- Les effets d'installation constituent sans aucun doute l'objectif principal des acousticiens d'aujourd'hui.

Du point de vue de la réduction de bruit des ventilateurs, les stratégies possibles consistent à agir, soit directement sur les mécanismes d'émission (réduction du bruit à la source,

par application des principes analogiques ou par contrôle actif des écoulements instationnaires), ce qui doit se faire impérativement à performances aérauliques égales, soit à agir sur la propagation, à l'aide de moyens passifs (traitements absorbants de parois ou optimisation des géométries), réactifs (emploi de résonateurs de Helmholtz ou de résonateurs quart d'onde) ou actifs (techniques d'antibruit).

Dans tous les cas, l'action nécessite une identification et une hiérarchisation préalables des mécanismes, qui dépend énormément du type de matériel étudié. Pour cette raison, il faut se méfier des idées préconçues et se garder de généraliser systématiquement les conséquences d'une amélioration observée sur un type de ventilateur à un autre type.

Par exemple, il est inexact d'affirmer que le minimum de bruit d'un ventilateur est toujours corrélé au maximum de rendement aéraulique. De même, un jeu minimal en extrémité de pale pour un ventilateur axial caréné ne correspond pas forcément au niveau de bruit minimal, notamment lorsque des écoulements en extrémité de pale ont une composante radiale notable (cas des ventilateurs hélicoïdes de paroi décrit dans la présentation d'Alain Guédel).

L'aéroacoustique est une discipline de synthèse qui ne peut dissocier les aspects aérauliques et acoustiques. C'est pourquoi le souci de réduction des ventilateurs justifie aujourd'hui plus que jamais une synergie forte entre aérodynamiciens et acousticiens.

## La climatisation automobile

### Bilan

La ventilation-climatisation automobile correspond à des écoulements à petit nombre de Mach. Le bruit est généralement caractérisé par un spectre à large bande irrégulier, duquel émerge une ou deux des raies du ventilateur (ventilateur centrifuge dit "cage d'écureuil" ; les raies peuvent résulter d'une interaction aérodynamique ou venir du moteur d'entraînement) ; l'émergence est malgré tout assez faible et le niveau global est déterminé surtout par le bruit à large bande. Les différentes contributions présentées lors de la conférence de Jean-Christophe Kraemer (Renault SA) et des communications de Edmond Benarrous (Metraflu) et Eric Flouret (Valéo) ont permis de constater que les approches utilisées suivaient toutes la même stratégie, imposée par la structure technologique complexe des installations. Une synthèse des observations peut être proposée sous la forme suivante :

- les vibrations jouent un rôle secondaire dans le bruit des blocs de climatisation, même si certaines sources d'origine vibratoire sont détectables sur les analyses en bande fine. En fait les vibrations sont excitées par les sources du bruit d'origine aérodynamique.
- La contribution du ventilateur est claire et prédominante dans une gamme de moyennes fréquences, comme le montrent les essais comparatifs effectués avec ventilateur et en remplaçant le ventilateur par une alimentation en air extérieure et silencieuse.
- Dans les hautes fréquences, il semble que le bruit soit principalement dû aux écoulements turbulents et décollés

se développant dans l'ensemble du circuit, notamment dans les gaines de distribution et aux bouches de soufflage, puisque la suppression du ventilateur ne modifie pas la forme du spectre de façon déterminante.

- La partie basse fréquence du spectre est plus délicate à interpréter. Elle comporte une ou deux remontées qui, elles aussi, existent en l'absence du ventilateur. De plus, le niveau en basses fréquences est soumis à des variations parfois spectaculaires ; il peut être plus important lorsqu'il est mesuré sur véhicule, par rapport aux essais en chambre sourde ou en chambre semi-anéchoïque. Cette partie du spectre est fortement dépendante des résonances acoustiques propres du circuit de climatisation dans son ensemble (longueurs d'ondes de l'ordre du mètre), résonances qui peuvent être couplées à celles de l'habitable. L'analyse des comportements observés est rendue délicate par la complexité géométrique du circuit de ventilation, nécessairement très compact.

- Les résonances sont mises en évidence en supprimant l'écoulement et en remplaçant le ventilateur par un haut-parleur alimenté en bruit blanc. En situation réelle, elles sont excitées à la fois par le ventilateur et l'écoulement, qui tous deux émettent dans toute la gamme des fréquences. Du fait de leur existence, les lois de similitude habituellement invoquées à propos des ventilateurs peuvent être mises en défaut, ce qui constitue le caractère le plus significatif des effets d'installation en climatisation automobile. En revanche, les similitudes sont respectées en moyennes et hautes fréquences, où le niveau de bruit évolue comme la puissance cinquième d'une vitesse caractéristique des écoulements.

Parallèlement aux essais comparatifs, les systèmes de climatisation constituent un champ d'application privilégié pour les techniques de mesure de spectres cohérents associant des capteurs phénoménologiques de champ proche (capteurs de pression intégrés aux parois, par exemple) et des microphones de champ lointain, dans l'optique d'une localisation ou discrimination des sources. Ces techniques sont néanmoins rendues délicates par le fait que les sources sont réparties.

### Perspectives de modélisation

La modélisation du bruit des climatiseurs en est encore à ses premiers pas. Sans prétendre à l'exhaustivité, on pourrait la concevoir en les termes suivants :

- Recherche de modèles spécifiques simples fondés sur l'analogie acoustique, après identification des sources prépondérantes par les méthodes précitées. De tels modèles se proposeraient de remplacer ou compléter progressivement les lois de similitude classiques. Ils pourraient en outre intégrer des outils existants de mécanique des fluides numériques (codes k-epsilon...) pour définir les sources associées à des écoulements typiques en conduits : décollements, volets de répartition...

- Modélisation de la propagation en termes de matrices de transfert, conformément à la théorie des circuits acoustiques (ondes planes). A ce titre, l'identification des fréquences résonantes en basses fréquences par des codes d'acoustique numérique est un complément d'information prometteur, qui peut se prêter à des études paramétriques.

- La recherche de modèles physiques spécifiques pour le bruit des ventilateurs centrifuges, s'appuyant sur des

expériences simplifiées préservant les effets d'installation, reste le point d'intérêt général prioritaire. Dans ce domaine, presque tout reste à faire.

### Conditionnement d'air en aéronautique

Dans le domaine du conditionnement d'air en aéronautique, le circuit comporte la plupart du temps un rotor et un stator redresseur à flux axial fonctionnant dans un conduit à symétrie de révolution (le rotor est soit axial, soit hélico-centrifuge, c'est-à-dire monté sur un cône). Le problème actuel est plutôt la réduction du bruit de raies aux harmoniques de la fréquence de passage des pales du rotor, dont l'émergence est très importante. Dans un tel cas, les sources du bruit de raies sont clairement de deux types :

- Le bruit du rotor dû à une inhomogénéité azimutale stationnaire de l'écoulement d'alimentation. Il s'agit d'un effet d'installation de nature aérodynamique caractéristique de cette classe de machines, provenant par exemple du montage d'un plénum d'entrée d'air latéral.

- Le bruit du stator dû à l'impact périodique des sillages du rotor. Ce bruit ne peut être réduit que par un choix judicieux des nombres de pales du rotor et d'aubes du stator, ainsi qu'en ménageant une distance suffisante entre le rotor et le stator.

- Bien que le bruit à large bande ne soit pas la préoccupation majeure, il peut comporter des remontées importantes à des fréquences intermédiaires (par exemple, la moitié de la fréquence de passage des pales), certainement dues à des instabilités de fonctionnement (décollements tournants, effets de jeux, etc.).

A bien des égards, les appareils de conditionnement d'air de l'aéronautique s'apparentent aux turbomachines, que ce soit par leur nombre de Mach élevé (entre 0,2 et 0,9), par leur vitesse de rotation (plusieurs dizaines de milliers de tours par minute) ou par leur architecture axiale. Ils correspondent à des sources à hautes fréquences.

A ce titre, ils bénéficient des méthodes éprouvées mises en œuvre dans les dernières décennies pour étudier le bruit des rotors libres aéronautiques et des étages de turbo-réacteurs. Les trois présentations proposées par François Peyraut (Sciences Industries Conseils), Jean Christophe Legros (Liebherr Aerospace) et Didier Amor (Technofan) permettent ainsi de reconnaître dans le formalisme de Lawson la base de calculs simples du bruit de raies se prêtant aux études paramétriques, à condition de disposer de modèles physiques réalistes pour déterminer les efforts instationnaires sur pales ou aubes indispensables à son utilisation (nous distinguons ici le formalisme de Lawson du modèle dit de Lawson qui lui, suppose que l'amplitude des harmoniques de charge sur une pale ou une aube décroît de façon exponentielle à partir de la charge moyenne. Ce modèle, introduit comme pis-aller à une certaine époque pour pallier le manque de données aérodynamiques instationnaires, ne prend pas en compte la phase des harmoniques de charge et suppose un lien sans fondement entre charges fluctuantes et charge moyenne.

La caractérisation expérimentale ou théorique de la distorsion de l'écoulement d'alimentation du rotor et des paramètres moyens des sillages est une étape incontournable pour le diagnostic des deux sources précitées.

Pour les machines axiales au voisinage du point de fonctionnement nominal, on dispose de lois d'évolution des sillages qui permettent de faire des calculs simplifiés mais réalistes du bruit d'interactions rotor-stator. En revanche, de tels résultats en dehors du régime nominal (hors adaptation) ou pour les machines hélico-centrifuges restent encore à établir.

Ici aussi, il est concevable à brève échéance d'utiliser des codes de mécanique des fluides numériques instationnaires pour déterminer les sources acoustiques (fluctuations de pression sur les pales ou les aubes lors des interactions de sillages, par exemple).

Ces démarches doivent permettre d'établir un passage cohérent des recherches à caractère fondamental à l'application pratique dans les secteurs industriels confrontés aux problèmes de bruit. Il convient, ici aussi, d'entretenir une synergie permanente pour assurer l'efficacité du transfert des méthodes et des savoir-faire. ■

## Sur les transferts de compétences

A l'heure actuelle, des codes de simulation du bruit des installations de ventilation commencent à se développer et à être utilisés sur le marché, comme le montrent les présentations de Gilles Chatel (SECAV) et François Peyraut (SIC).

## JOURNÉES D'ÉTUDES SUR LE BRUIT DES VENTILATEURS Programme des conférences

### Conférences générales - mercredi 11 décembre 1996

14h00	Michel ROGER (ECL) Accueil - Présentation des journées.
14h30	Alain GUEDEL (CETIAT) Bruit des ventilateurs - Bilan et perspectives.
15h15	Jean-Christophe KRAEMER (Renault SA) Bruit des systèmes de ventilation dans l'automobile.
16h30	Visite des installations aéroacoustiques du Laboratoire de Mécanique des Fluides et Acoustique de l'ECL.

### Conférences du jeudi 12 décembre 1996

9h00	Edmond BENARROUS (Metraflu) Discrimination des sources aéroacoustiques dans un circuit de conditionnement d'air.  Eric FLOURET (Valéo) Caractérisation du bruit d'appareil de chauffage/climatisation dans un véhicule.  Gilles CHATEL (SECAV) Logiciel de calcul prévisionnel des bruits de ventilation transmis dans les emménagements de navires.  Alain GUEDEL (CETIAT) Bruit des ventilateurs hélicoïdes de paroi utilisés dans le conditionnement d'air.  Thierry BURGAIN (Solyvent-Ventec) Caractérisation des sources de bruit à large bande d'un ventilateur. Cas du bruit propre des pales.
12h/14h	Déjeuner
14H00	François PEYRAUT (Sciences Industries Conseils) Optimisation aéroacoustique d'un pack de conditionnement d'air à l'aide du logiciel DECIVENT.  Jean-Christophe LEGROS (Liebherr Aerospace) Identification des sources de bruits des ventilateurs de conditionnement d'air d'avions.  Didier AMOR (Technofan) Réduction et modélisation du bruit de raies dans les ventilateurs axiaux et mixtes.