

Étude et réalisation d'une cabine de simulation pour l'évaluation psychoacoustique de la gêne induite au sol par un bang supersonique

Guy Rabau, Philippe Herzog, Sabine Meunier

LMA-CNRS,
UPR 7051 Aix-Marseille Université, Centrale Marseille
31, chemin J. Aiguier
13402 Marseille CEDEX 20
E-mail: rabau@lma.cnrs-mrs.fr
E-mail: herzog@lma.cnrs-mrs.fr
E-mail: meunier@lma.cnrs-mrs.fr

Résumé

Le vol d'un avion à vitesse supersonique engendre au sol une onde de choc acoustique que l'on appelle bang supersonique. Il s'agit d'un son impulsionnel dont la signature temporelle est particulière (onde en «N» ou en «U»). Sa pression acoustique maximale est de l'ordre de 120 Pa avec un spectre particulièrement important dans les très basses fréquences (entre 1 et 30 Hz). De plus, son signal temporel comporte plusieurs fronts assez raides (temps de transition de l'ordre de 1 à 10 ms).

Il apparaît que cette onde provoque une gêne importante sur tout son passage. On sait que la sonie, c'est-à-dire l'intensité du son telle qu'on la perçoit, est le paramètre principal intervenant dans la sensation de gêne due à une source sonore. Mieux connaître la sonie des bangs supersoniques nous conduira à mieux évaluer la gêne causée par de telles sources de bruit.

Notre étude a pour but de reproduire en laboratoire la variabilité du bang au sol sous l'effet de sa propagation à travers la couche limite atmosphérique turbulente afin d'en estimer la gêne par une étude psychoacoustique. La première étape consiste à générer de façon expérimentale, à l'intérieur d'une cabine de simulation, différents signaux représentatifs de la variabilité du bang supersonique. Ceci est difficile en champ libre, aussi nous avons choisi de limiter le volume d'écoute à une cabine de dimensions réduites ($L \times l \times h = 3 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$) mais suffisantes pour accueillir confortablement une personne. Cette cabine est équipée d'un système de reproduction bi-canal, qui traite différemment deux bandes de fréquences : en dessous de 200 Hz et de 200 Hz à 20 000 Hz. Les signaux restitués sont tout à fait conformes à ceux que l'on pourrait entendre en extérieur. Le premier résultat de cette étude a confirmé que les bangs supersoniques sont peu gênants lorsqu'ils sont entendus à l'extérieur. Seul un effet de sursaut est constaté. Ensuite les tests perceptifs menés sur ces différents bangs générés ont montré que la gêne comme la sonie augmentent quand le niveau crête augmente, et que la durée interpic ou le temps de montée diminuent. Un modèle est proposé prenant en compte ces 3 principaux paramètres physiques du signal d'un bang supersonique.

Abstract

The aim of our work is to study loudness and annoyance of sonic boom. For that a specific listening tool must be designed. This is necessary because most of the power of the sonic boom is at very low frequencies, around 3Hz. Such low frequencies are perceived by the whole human body, then to assess the annoyance of sonic booms through listening tests requires to immerse the listener in a field as close as possible to the field in actual situations. Conversely, the strong transients existing in sonic booms lead to a significant spectrum content at higher frequencies. Together, these two aspects put a very high stress on the reproduction system, which has to reproduce the test signals with a high fidelity from very low to high frequencies. The design of this tool is made of a closed cabin which walls recovered with absorbing materials, so it can be considered as almost semi-anechoic at high frequencies. At lower frequencies, a multi-channel loudspeaker system generates a high volumic velocity by driving loudspeakers mounted in the walls of the closed volume, leading to a high pressure down to very low frequencies. Performances of the simulation has been checked through measurements and psychoacoustic tests.



Le bang supersonique est un son impulsionnel dont la signature temporelle est particulière (onde dite en «N» pour le bang primaire, le premier signal perçu, ou en «U» pour les suivants). Sa pression acoustique maximale est élevée (de l'ordre de 120 Pa), son spectre est particulièrement riche dans les très basses fréquences (entre 1 et 30 Hz), et son signal temporel comporte aussi plusieurs fronts assez raides (temps de transition de l'ordre de 1 à 10 ms, dépendant notamment de la turbulence).

L'objectif de notre travail est d'assurer la reproduction en cabine de différents signaux présentatifs de la variabilité du bang supersonique primaire au sol sous l'effet de sa propagation à travers la couche limite atmosphérique turbulente, afin d'en réaliser l'évaluation psychoacoustique. Cette cabine de simulation, doit assurer une pression maximale de 6 à 7 Pa (soit un niveau maximal de 110 dB SPL) à 3 Hz soit 20 fois moins que la pression maximale d'un bang supersonique c'est-à-dire 26 dB SPL en dessous.

Nous avons donc conçu une installation électroacoustique permettant d'atteindre ce niveau, avec la triple contrainte de générer linéairement la partie basse du spectre, d'assurer une bonne fidélité dans les hautes fréquences, et de garantir la cohérence de phase nécessaire aux transitoires. Pour limiter le débit acoustique à reproduire, le volume d'écoute a été réduit à une cabine juste assez grande pour accueillir confortablement une personne. Cette cabine est équipée d'un système de reproduction bi-canal, qui traite spécifiquement deux bandes de fréquences :

- **Les très basses fréquences** : l'auditeur doit être «immergé» dans un champ de pression à peu près uniforme, a priori ressenti par l'ensemble du corps. Le système de reproduction est alors optimisé pour éviter d'exciter les modes de la salle existant dans cette zone du spectre.
- **Les fréquences plus élevées** : la perception est très majoritairement aérienne. La fidélité de reproduction revient alors à garantir la forme d'onde reproduite au voisinage des oreilles du sujet. Pour cela, une source sonore frontale unique est utilisée. Une phase préalable d'égalisation, réalisée à l'aide d'une tête artificielle, permet de reproduire fidèlement les stimuli en présence du sujet.

Une étude perceptive dans cette cabine de simulation, nous a permis d'estimer la gêne due au bang supersonique et de définir des critères psychoacoustiques de gêne qui pourraient faire partie d'une réglementation sur les voies aériennes empruntées par les avions supersoniques. La sonie et la gêne étant fortement corrélées nous avons étudié ces deux grandeurs. Pour différents types de bangs supersoniques, la sonie et la gêne sont mesurées sur des auditeurs. Un modèle est proposé reliant les paramètres physiques caractéristiques d'un bang supersonique à la sonie et la gêne perçues.

Réalisation de la cabine de simulation du bang supersonique

Un signal de bang sonique correspond approximativement à une onde en N, dont la pression acoustique maximale est élevée (de l'ordre de 120 Pa) et dont le spectre est particulièrement important autour de quelques Hertz (fig. 1).

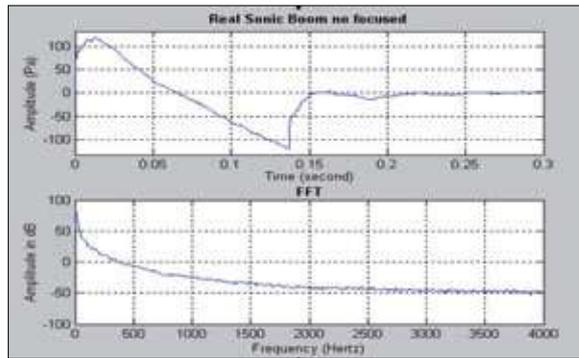


Fig. 1 : Exemple d'un signal temporel et fréquentiel de bang supersonique

Pour éviter tout risque pour les auditeurs, nous avons fixé le niveau maximal pouvant être reproduit dans la cabine à environ 110 dB SPL (non pondéré), le maximum du spectre étant vers 3 Hz, et la limite basse à reproduire étant d'environ 1 Hz. Des dimensions de l'ordre de 3 m x 2 m x 2 m (L x l x h) s'avèrent un bon compromis entre un volume intérieur suffisant pour accueillir un auditeur, et le débit acoustique requis pour atteindre le niveau spécifié.

Un volume clos présentant ces dimensions donc a été bâti à l'intérieur d'une des salles du LMA servant de cabine audiométrique et dont l'isolation était déjà excellente. Cette salle va servir de «peau extérieure» à la cabine. Puis les parois du volume intérieur ont été bâties en dalle de SIPOREX de 7 cm d'épaisseur qui ont été enduites pour en améliorer l'étanchéité. Enfin, elles ont été recouvertes d'un revêtement absorbant, permettant de réduire très significativement les réflexions aux fréquences élevées, mais dont l'épaisseur raisonnable conduit à une absorption décroissant rapidement en dessous de 300 Hz.

Un traitement passif des très basses fréquences imposant des épaisseurs de matériaux incompatibles avec le concept d'une cabine de petit volume, la compensation des effets des parois a donc été gérée par le contrôle de la réponse des haut-parleurs, pilotés de manière à réduire l'influence des modes propres à l'intérieur de la cabine. Celle-ci a donc été dotée sur l'ensemble de ses parois (sauf le sol !) d'une répartition de 16 sources dédiées aux très basses fréquences, ce nombre étant choisi en fonction du nombre de modes actifs jusqu'à environ 200 Hz.

Choix des haut-parleurs

Compte tenu des fréquences à reproduire par les sources murales, nous avons sélectionné des haut-parleurs dédiés aux subwoofers de 30 cm de diamètre (AUDAX HT 300 GO). La sensibilité de ce type de haut-parleur est faible (environ 66 dB SPL à 20 Hz, pour une tension de 1 Vrms). Cependant, sa principale limite n'est pas liée à la puissance électrique admissible, mais au déplacement de la membrane nécessaire pour obtenir le débit requis avec une linéarité suffisante pour notre besoin, beaucoup plus critique qu'en écoute de home-cinema. Par rapport à la fiche technique du constructeur, nous avons donc dimensionné l'installation de manière à utiliser moins de 15 % de l'excursion maximale du haut-parleur, et environ 1 % de sa puissance électrique admissible.

Un premier caisson clos nous a permis de valider notre démarche. Ce caisson délivrait une pression acoustique de 86 dB SPL dans la pièce, à peu près uniformément entre 3 Hz et 15 Hz. Ceci était conforme aux modèles, et a donc validé le concept d'une pièce se comportant comme un volume clos dans ce domaine de fréquences. En se limitant à la dynamique linéaire du haut-parleur, nous avons prévu d'augmenter de 30 dB le niveau obtenu avec le caisson clos, afin d'atteindre l'objectif de 110 dB SPL. Cela a conduit à utiliser 32 haut-parleurs.

Ces haut-parleurs ont été montés deux par deux dans des enceintes en combinaison push-pull pour réduire encore leur distorsion. Ces enceintes sont alors capables de supporter une tension de 20V (sous 8 W) et de générer chacune 86 dB SPL dans la cabine sans distorsion audible. Les 16 sources obtenues nous permettent donc d'atteindre les 110 dB SPL souhaités.

Géométrie des enceintes dédiées aux très basses fréquences

Le schéma (fig. 2) ci-après montre la solution adoptée pour le montage des 2 haut-parleurs dans chaque caisson de basse ; l'ensemble des 16 caissons constituant la totalité du système multicanaux TBF. Le volume de charge acoustique utile est d'environ 55 litres, partagé par les deux haut-parleurs. Un débord permet de fixer les sources par l'intérieur de la cabine, en les encastrant. La source rayonne dans la cabine via une ouverture de 120 mm x 320 mm, cette section étant suffisante pour assurer le débit maximal à 3 Hz sans bruit d'écoulement audible. Les haut-parleurs sont montés dans un tronçon de guide qui joue le rôle d'un filtre acoustique passe-bas, réduisant encore la distorsion.

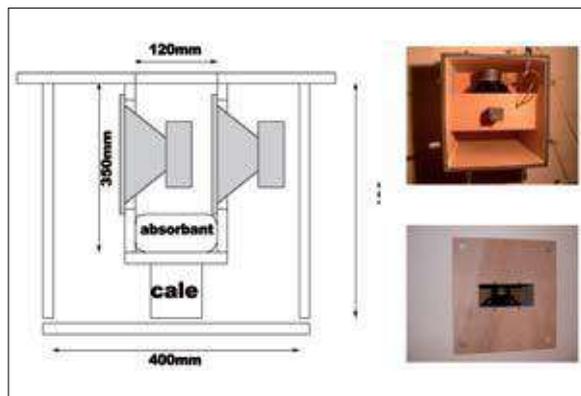


Fig. 2 : Plan et photos d'un caisson de basse

Les caissons sont construits en «médium», un aggloméré de bois très dense. La face arrière de l'enceinte est étanche mais amovible. Ceci permet de vérifier le fonctionnement de la charge acoustique, facilite la maintenance des haut-parleurs, et laisse la possibilité de reconfigurer l'enceinte pour d'éventuelles évolutions de la cabine.

Enfin la restitution de la partie haute fréquence du bang supersonique (au-delà de 200 Hz) est assurée par une enceinte commerciale compacte (TANNOY système 600).

Elle a été choisie pour assurer une source frontale unique, dans l'axe d'écoute de l'auditeur, et comporte donc deux voies coaxiales afin d'éviter des interférences au voisinage de sa fréquence de coupure. Aux fréquences élevées, cette solution permet ainsi d'assurer une bonne similitude de la reproduction sur les deux oreilles de l'auditeur, qui peut donc être égalisée globalement.

Construction de la cabine de simulation

Les parois de la cabine sont bâties en carreaux de SIPOREX choisi pour ses bonnes qualités acoustiques, mais aussi sa rapidité et facilité de mise en œuvre, et la possibilité d'un démontage ultérieur. Le plafond de la cabine est constitué d'une planche d'aggloméré de 5 cm d'épaisseur. Des raidisseurs et des sacs de sable ont été disposés sur ce plafond et contre les parois afin de limiter les vibrations et de réduire les résonances propres des parois de la cabine. Les 16 caissons de basse sont fixés (de manière étanche) sur les murs et le plafond suivant une disposition pseudo-aléatoire. Le volume compris entre la cabine intérieure et les parois de la salle audiométrique a été équipé de matériaux absorbants efficaces au-delà de 200 Hz (mousse de polyuréthane expansé). L'intérieur de la cabine est recouvert de laine de roche de 80 mm sur les murs et de 50 mm pour le plafond. Un vide d'air (de 80 ou 50 mm) est aménagé entre ces panneaux et les parois de la cabine. La fig. 3 ci-dessous représente une vue du dessus de la cabine.

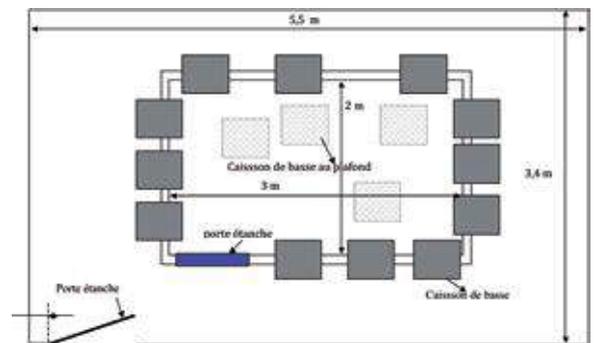


Fig. 3 : Schéma de l'aménagement de la cabine de simulation

Contrôle des haut-parleurs : égalisation du système de reproduction

Le système de reproduction est contrôlé par un dispositif d'égalisation numérique. Il doit assurer trois fonctions :

- la séparation du spectre en deux parties, correspondant à deux stratégies différentes ;
 - l'égalisation spatiale du champ aux basses fréquences ;
 - l'égalisation temporelle de l'ensemble de manière à respecter les formes d'onde à reproduire (onde en N et en U).
- Ce traitement consiste en un double filtrage temporel inverse prenant en compte la réponse impulsionnelle de la cabine. Il s'effectue en temps différé c'est-à-dire que tous les sons utilisés lors des tests psychoacoustique sont préalablement filtrés et stockés sur disque dur

Contrôle bi-canal

La séparation du spectre est effectuée par deux filtres FIR complémentaires, séparant les très basses fréquences (1 à 200 Hz) et le reste du spectre à reproduire (bande 200 Hz à 20 000 Hz). Les basses fréquences sont traitées via décimation et interpolation, afin de pouvoir réaliser des filtres ayant un support temporel suffisant tout en limitant le bruit numérique et le temps de calcul.

Egalisation spatiale

Dans l'application actuelle, les différentes sources murales sont pilotées par un même signal de base, pondéré spatialement en fonction des positions des sources afin d'éviter d'exciter les modes de la cabine. Cette pondération est optimisée pour la position d'écoute, choisie préalablement (principe de la «formation de voie» transposé à un problème intérieur). Le traitement numérique consiste alors à inverser la réponse des sources (pour compenser leur réponse mécano-acoustique) et celle de la cabine (pour compenser les résidus de résonances modales qui ne sont pas complètement éliminés par la formation de voie).

Egalisation temporelle

La réalisation de l'égalisation temporelle s'effectue enfin globalement sur le système bi-canal, en 3 étapes :

- mesure de la réponse impulsionnelle de la cabine,
- détermination des filtres inverses pour les 2 canaux (BF et HF), et
- convolution par ces deux filtres FIR pour la correction des 2 canaux.

Un programme MATLAB se charge de l'exécution et de l'automatisation de cette tâche. Un second programme MATLAB réalise le filtrage des signaux originaux. Une des principales difficultés associées à cette étape est de déterminer des filtres inverses respectant à la fois divers critères physiques (faible erreur RMS entre les formes d'onde reproduites et les signaux originaux), et des critères perceptifs (bruit de fond négligeable, artefacts peu audibles, etc). Plusieurs stratégies d'inversion des réponses ont dû être essayées avant de satisfaire à ce compromis, notamment pour éviter que l'annulation des résidus de modes ne se traduise par des «pré-échos», audibles même à faible niveau.

Montage expérimental final

Les 16 caissons de basse sont alimentés par 16 amplificateurs de puissance (Inter M QD 4480 – 80 Weff par canal) au travers d'un splitter (RANE DA 216a, assurant la pondération de 16 sorties). Un amplificateur (SAMSON Servo 170 - 120 Weff) alimente le haut-parleur dédié à la restitution de la partie haute du spectre. Un ordinateur portable (DELL Latitude) est chargé de l'automatisation des tests psychoacoustiques. Un programme MATLAB, selon une procédure adéquate (voir chapitre suivant), sélectionne les sons préalablement filtrés et stockés dans le disque dur. Une carte son USB (M-audio mobile-pre) convertit les signaux numériques en signaux analogiques. Cette carte a été modifiée pour pouvoir convertir les très basses fréquences. Sa voie gauche est raccordée à l'entrée du splitter (signal très basse fréquence) alors que la voie droite est raccordée à l'entrée de l'amplificateur de la partie haute fréquence.

Contrôle des signaux reproduits

Les figures 4 et 5 illustrent le rôle et l'efficacité du filtrage appliqué sur les signaux originaux.

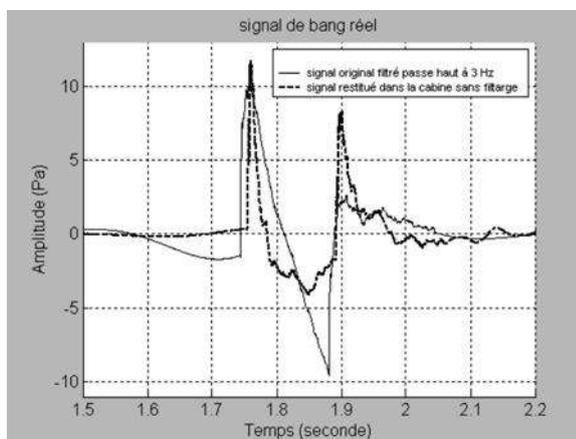


Fig. 4 : Onde en N originale et après restitution sans filtrage

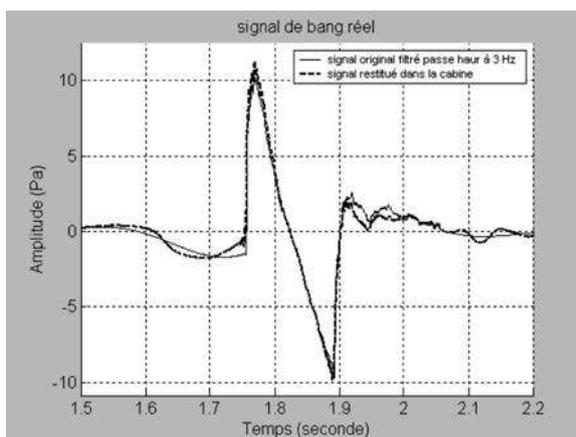


Fig. 5 : Onde en N originale et après restitution avec filtrage

Sans filtrage les ondes en N et en U originales (préalablement filtrés en passe haut à 1 Hz pour respecter la limite basse fréquence à reproduire) sont très mal reproduites. L'onde en N devient une onde en U alors que l'onde en U se transforme en double onde en N avec l'apparition de 2 pics négatifs d'un niveau non négligeable.

Le filtrage réalisé, bien que ne prenant pas en compte chacun des haut-parleurs s'avère très performant, et indispensable pour respecter la forme temporelle des signaux perçus par les auditeurs lors des tests psychoacoustiques.

Ces courbes correspondent à des enregistrements effectués avec un seul micro placé à la position du centre virtuel de la tête d'un auditeur. Il a été vérifié que le signal reproduit est assez uniforme dans toute la cabine, et en particulier au niveau des deux oreilles du sujet.



Photos 1 : Vue intérieure de la cabine de simulation (gauche) sans la laine de roche / (droite) complètement terminée

Evaluation psychoacoustique de la gêne d'un bang supersonique

Des études sur le bang supersonique et ses effets sur l'homme ont été entreprises à l'Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis (68) dès la fin des années 50 [1]. Il en ressortait qu'un bang supersonique ne provoque aucune lésion auditive sur l'homme. Seul un effet de «sursaut» a été constaté et étudié [2]. Ces travaux ont été réalisés pour des signaux correspondant à un bang se propageant en extérieur.

Toutefois, il faut distinguer deux types de conditions d'écoute quand on étudie la perception du bang supersonique : l'écoute du bang à l'extérieur et à l'intérieur d'une habitation. Dans la première condition, le stimulus est une onde en N ou en U (figures 4 et 5) ; dans la seconde condition, il faut prendre en compte les sons «secondaires», rayonnés par des structures mises en vibration par l'onde très basse fréquence du bang.

Aux États-Unis, différents laboratoires ont travaillé sur la perception du bang supersonique en condition d'écoutes extérieure et intérieure et en particulier sur la sonie et la gêne provoquées par de tels bruits. Les premières expériences ont été menées avec des signaux de bang supersoniques primaires [3]. Les auteurs ont trouvé que la partie basse du spectre (<40 Hz) n'a pas d'influence sur la sonie. Mais les expériences ayant été menées sous casque, les très basses fréquences (TBF), inférieures à 20 Hz, n'ont donc pas été reproduites correctement, ce qui explique peut-être leurs résultats. Plus tard, Niedzwiecki et Ribner [4] ont effectué des mesures avec le même type de signaux (onde en N) cette fois-ci dans une cabine, en simulant le champ libre. Dans cette cabine, d'un volume de 2,1 m³, les signaux reproduits atteignaient 100 Pa pour une bande de fréquence comprise entre 0,1 et 5 000 Hz. La sonie et la gêne semblaient diminuer quand on supprimait les TBF (< 50 Hz), mais les effets n'étaient pas significatifs. D'autre part, les mesures de sonie et de gêne n'étaient pas équivalentes c'est-à-dire que des mesures de sonie ne suffisaient pas à expliquer la gêne.

Depuis les années 90, la NASA a repris des études sur la perception des bang supersoniques pour différentes natures de signaux (en condition d'écoutes intérieure et extérieure) en faisant varier différents paramètres sensibles comme le

temps de montée, le niveau et la durée des signaux [5] [6] [7]; on trouve un résumé de leurs travaux dans Leatherwood et al., [8]. Leurs études ont été menées soit en champ libre dans une cabine de leur conception d'un volume assez réduit (de l'ordre de 1,5 m³) capable de reproduire des niveaux jusqu'à 190 Pa avec une large bande passante, soit dans une habitation. Ils ont étudié plusieurs formes de bang, et notamment des formes d'ondes pour lesquelles le pic d'énergie est atteint en deux étapes : une croissance initiale rapide, qui permet d'atteindre une pression intermédiaire, suivie d'une croissance plus longue jusqu'au pic de pression maximum (FSM pour front-shock-minimized). Les pentes des deux parties de l'attaque sont différentes. Les bangs de type FSM étaient jugés moins forts que les ondes en N pour une même pression maximale [6].

De plus, pour les bangs perçus à l'extérieur, la sonie et la gêne sont fortement corrélées ce qui n'est pas le cas en situation d'écoute à l'intérieur d'une habitation [7]. Un bang sera jugé aussi gênant qu'un bruit blanc stationnaire si son niveau est 22 dB SPL supérieur au niveau du stationnaire.

Fidell et al. [9] ont mené une étude comparative entre différents signaux de même famille (bruits d'avion par exemple) et des bangs supersoniques perçus à l'extérieur. Ils ont montré que la présence de TBF (<90 Hz) a une importance dans la perception de la gêne et que, lorsque les TBF sont présentes, la sonie est très corrélée à la gêne. Enfin la durée d'un bang supersonique n'a pas d'influence sur la gêne perçue.

La cabine de simulation nous permet de contrôler tous les paramètres physiques du bang. Il s'agit maintenant d'étudier l'effet des variations de ces paramètres sur la perception, en particulier sur la sonie et la gêne perçues.

Nous avons montré [10] que la sonie et la gêne procurées par des ondes en U étaient comparable à celles procurées par les ondes en N. Nous avons donc choisi de travailler sur la sonie et la gêne des ondes en N. Les signaux avec lesquels nous allons travailler ont été synthétisés numériquement pour contrôler tous les paramètres qui varient dans les intervalles décrits ci-dessous.

- Δp peut varier (voir fig. 6) entre 100 et 200 Pa \Rightarrow ainsi le Δp maximum est de 110 dB SPL crête soit 6 à 7 Pa.

- Nous ferons varier les niveaux entre 85 dB SPL crête et 110 dB SPL crête,

- le temps de montée T_m et le temps de descente T_d des 2 pics présents dans les ondes en N varient entre 1 et 25 ms,

- Δt (Δt), la durée entre chacun des 2 pics (et durée interpic) est comprise entre 75 et 500 ms.

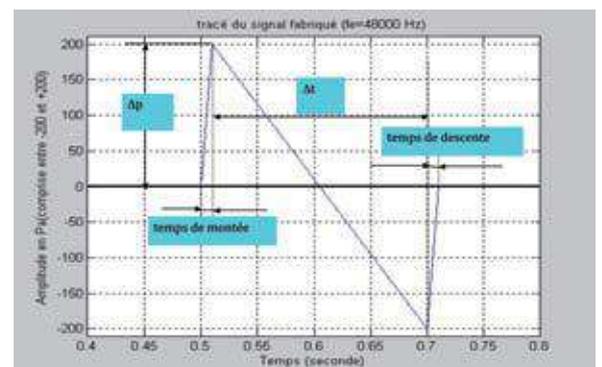


Fig. 6 : Onde en N et paramètres physiques associés

Le choix des sons effectué, nous avons réalisé deux tests psychoacoustiques. Le premier test nous permet de mesurer, pour une large gamme de bangs supersoniques, la sonie et la gêne en faisant varier les paramètres physiques décrits ci-dessus. Avec le second test, nous traçons les fonctions de sonie c'est-à-dire l'évolution de la sonie en fonction du niveau d'un son. Cela nous conduit à proposer un premier estimateur permettant de prévoir la sonie en fonction de l'analyse physique d'un bang sans avoir recours à un test psychoacoustique. Toutes les expériences ont été menées par estimation de grandeur [11].

Gêne et sonie en fonction des paramètres physiques du bang

Les paramètres utilisés lors de ce test sont les suivants : 40 sons avec $T_m = 0,1 ; 0,4 ; 1,6 ; 6,4$ et 25 ms, $D_t = 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500$ ms et le niveau $N = 110$ dB crête soit 7 Pa (tous les sons fabriqués ont été égalisés en niveau à $+ ou - 1$ dB crête). Douze auditeurs ont participé à ce test. Les moyennes géométriques brutes des auditeurs sont présentées ici. La figure 7 montre les résultats obtenus pour la sonie et la gêne lorsqu'on fixe la durée interpic en faisant varier le temps de montée T_m . On observe que la sonie et la gêne diminuent quand le temps de montée augmente. Pour $T_m = 25$ ms la sonie et la gêne sont de 3 à 4 fois plus faibles que pour un T_m de $0,1$ ms.

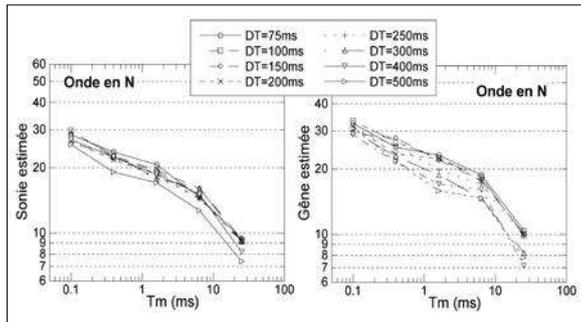


Fig. 7 : Sonie et gêne estimées pour une onde en N en fonction du temps de montée (T_m) pour différents D_t (données brutes non normalisées)

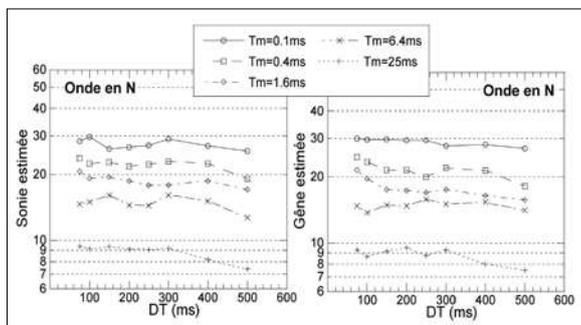


Fig. 8 : Sonie et gêne estimée pour une onde en N en fonction de la durée interpic D_t pour différents T_m (données brutes non normalisées)

La variation de D_t , c'est-à-dire finalement la variation de la durée des sons, n'influe pas ou peu sur la sonie. Les résultats pour la gêne sont quasiment identiques aux résultats pour la sonie.

La figure 9 représente la gêne en fonction de la sonie pour tous les sons testés. On peut voir que les courbes obtenues sont sensiblement des droites de pente égale à 1. Cela nous montre que les auditeurs jugent en moyenne la gêne de la même manière que la sonie. La mesure de la gêne est donc très fortement corrélée à la mesure de sonie. En d'autres termes on peut avoir accès à la gêne en mesurant la sonie.

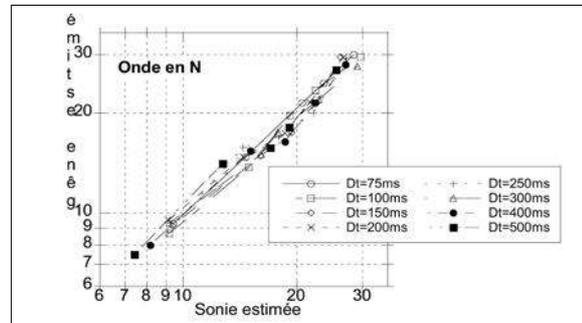


Fig. 9 : sonie=f (gêne) pour les ondes en N (données brutes non normalisées)

On peut noter que tous les sujets ont trouvé les signaux d'un niveau très acceptable pour ne pas dire faible et peu gênant. Ceci n'est pas étonnant : un signal impulsionnel de 110 dB crête de durée inférieure à environ 500 ms produit une sonie beaucoup plus faible qu'un signal stationnaire de même niveau et de durée plus grande [12]. De plus le maximum d'énergie de nos sons est à 3 Hz donc non audible.

Estimateur de sonie pour un bang supersonique

Nous avons mesuré et tracé la sonie estimée en fonction du niveau N des bangs supersoniques pour T_m et D_t fixés.

Les paramètres choisis pour ce test sont les suivants : $T_m = 1, 2, 4, 6, 8, 10$ ms, $D_t = 75, 150, 300$ ms et $N = 85, 90, 95, 100, 105, 109$ dB crête soit 108 sons avec 18 sons par niveau. Tous les sons fabriqués ont été égalisés en niveau à $+ ou - 1$ dB crête. Treize auditeurs ont participé à ce test. Lors d'un test, la moyenne de toutes les estimations d'un auditeur a été calculée. Puis chaque estimation de l'auditeur est divisée par cette valeur et enfin, pour un son donné, la moyenne géométrique des estimations de tous les auditeurs est calculée. C'est ce qui est représenté sur les figures 10 et 11.

La figure 10 montre la sonie en fonction du niveau pour 2 valeurs de T_m (1 et 10 ms) et pour différentes valeurs de D_t .

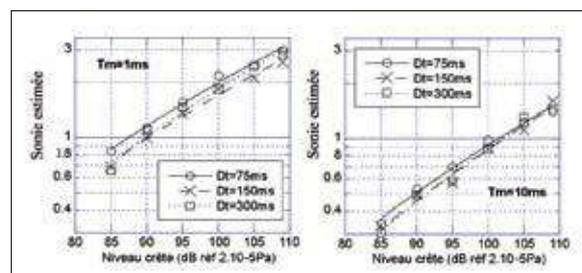


Fig. 10 : Fonction de sonie pour $T_m=1$ ms à gauche et $T_m=10$ ms à droite (données normalisées)

La figure 11 montre la sonie en fonction du niveau pour 2 valeurs de Dt et pour différentes valeurs de Tm.

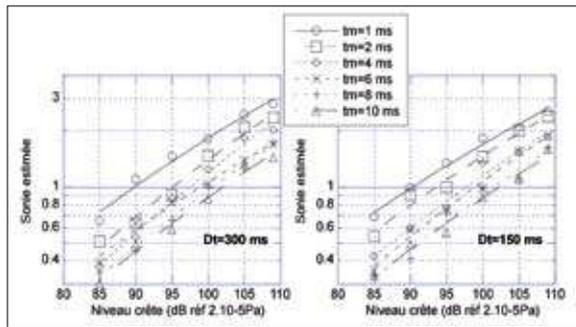


Fig. 11 : Fonctions de sonie pour Dt=300 ms à gauche et Dt=150 ms à droite (données normalisées)

Les différentes droites sur les figures représentent un ajustement par une fonction exponentielle entre la sonie et le niveau. Nous recherchons la relation entre la sonie, le niveau, Tm et Dt, ce qui pourrait permettre, entre autres, d'extrapoler les résultats pour des niveaux supérieurs à 110 dB. De plus, dans nos conditions expérimentales, la gêne variant comme la sonie, les informations sur la sonie seront totalement transposables à la gêne. Par une régression multiple incrémentielle, nous établissons que les fonctions de sonie mesurées peuvent s'exprimer sous la forme $S = K * P^\alpha * t_m^B * 10^{C \cdot Dt}$ (S est la sonie estimée non normalisée, P la pression maximum, K et α des constantes) du même type que les fonctions de sonie pour les sons stationnaires [13].

À l'issue de ces mesures, nous avons déterminé une équation qui relie la sonie aux différents paramètres [8] :

$$S = K * P^\alpha * t_m^B * 10^{C \cdot Dt}$$

S est proportionnelle à des sones

avec $\alpha = 0,55$; $B = -0,32$; $C = -14.10^{-4}$ et $K = 1,33$

P est exprimé en Pascals et correspond à la pression maximum, Tm et Dt sont en millisecondes.

Les données présentées ici n'ont pas été mesurées par rapport à une valeur de référence (par exemple la fonction de sonie d'un sinus à 1 000 Hz) aussi nous n'avons pas accès à la sonie en sones mais à une valeur qui lui est proportionnelle. Pour donner un ordre de grandeur, nous avons établi des comparaisons entre la sonie d'un son pur stationnaire et la sonie des bangs mesurés. Cela nous a permis de montrer qu'un bang supersonique de durée interpic de 150 ms avec un temps de montée de 1 ms et un niveau crête de 100 dB (onde en N) était perçu de même sonie qu'un son pur stationnaire de 1 000 Hz à 82 dB SPL soit environ 16 sones. Cette relation permet donc de déterminer le rapport entre la sonie de deux sons différents, par exemple avant et après une modification du signal (due à la forme de l'avion, aux conditions atmosphériques) en fonction des paramètres des signaux (P, Tm et Dt). Sonie et gêne variant de la même manière ce calcul nous indique également la variation de la gêne ressentie lorsqu'on modifie les paramètres physiques du bang.

Conclusion

Afin d'évaluer la perception de la sonie et de la gêne d'un bang supersonique nous avons mis au point une cabine

dans laquelle nous sommes capables de reproduire correctement un bang supersonique. Nous avons atteint un niveau de 110 dB SPL pour tous les signaux générés. Un filtrage temporel inverse nous a permis de nous affranchir des défauts inévitables de la cabine aux TBF. Les signaux restitués sont ainsi tout à fait conformes à ceux que l'on pourrait entendre en extérieur. La seule contrainte est que les sons doivent être traités avant leur restitution (temps différé). Nous ne prenons pas en compte les variations qui peuvent apparaître pendant les tests (température, éventuelle mobilité du sujet, etc...). Pour faire évoluer cette cabine, il faudrait pouvoir piloter indépendamment chaque haut-parleur dédié aux très basses fréquences. Nous avons développé au LMA depuis quelques années un dispositif de contrôle actif multivoies. Ce système, avec quelques adaptations puisqu'il a été initialement conçu pour faire de l'anti-bruit, pourrait être utilisé pour piloter chaque haut-parleur en temps réel. Nous pourrions ainsi prendre en compte toutes les caractéristiques de la cabine supersonique afin d'adapter les algorithmes du contrôleur temps réel du LMA à la reproduction de tout type de signaux riches en TBF et en particulier de bangs supersoniques. Cette cabine nous a permis d'établir le lien entre la gêne et la sonie pour un bang supersonique en extérieur et de proposer une relation liant les paramètres physiques d'un bang supersonique avec leur sonie. Nous n'avons pas étudié les bangs à leurs niveaux réels mais le modèle de sonie que nous proposons permet d'extrapoler la gêne pour des bangs plus forts, tout en gardant à l'esprit que cette extrapolation peut atteindre ses limites pour des niveaux très forts. Enfin, il faudrait compléter ces mesures par des expériences sur des bangs supersoniques perçus dans une habitation. Même pour des niveaux faibles, l'effet de rattle (mise en vibration, par l'onde supersonique, d'éléments de l'habitation comme vitres, objets divers, etc...) est perceptible et notable. On est alors confronté au problème de la simulation correcte de cet effet. Du point de vue de la gêne, le problème est plus complexe.

Références bibliographiques

- [1] Dancer A., Robin L., Parmentier G., Schaffar M., et Thery C. – 1959 à 1984 : « les ondes aériennes et leurs effets : résumé de 25 années d'activité à l'ISL (1959-1984) » Notice bibliographique NB 401/85, 1984
- [2] Buck K., Dancer A. et Hartmann M. et al – 1977, « Etude du sursaut provoqué par le bang sonique chez l'homme », Rapport R 114/77 ISL, 1977
- [3] Zepler E. E. Harel J. R. P., « the loudness of sonic booms and other Impulsive Sounds », J. S. Vibration, Vol 2 (3), 249-256, 1965
- [4] Niedzwiecki A. et Ribner H. S., « Subjective loudness and annoyance of filtered N-wave sonic booms », J. Acoust. Soc. Am., 65(3), 705-707, 1979.
- [5] Leatherwood J. D., Shepherd K. P., Sullivan B. M., « Simulator for Assessing Subjective Effects of Sonic Booms » NASA TM-104150, 1991
- [6] Leatherwood J. D., et Sullivan B. M. « Laboratory study of effects of sonic boom shaping on subjective loudness and acceptability, » NASA Technical Paper 3269, 1-25, 1992.
- [7] Leatherwood J. D., Sullivan B. M., « Loudness and Annoyance Response to Simulated Outdoor and Indoor Sonic Booms », NASA TM-107756, 1993
- [8] Leatherwood J. D., Sullivan B. M., Shepherd K. P., McCurdy D. A., et Brown S. A. « Summary of recent NASA studies of human response to sonic booms », J. Acoust. Soc. Am. 111 (1), 586-598, 2002.
- [9] Fidell S., Silvati L. et Pearsons K., « Relative rates of growth of annoyance of impulsive and non-impulsive noises », J. Acoust. Soc. Am., 111(1), 576-585, 2002.
- [10] Rabau G., Meunier S., P. Herzog., « Evaluation psychoacoustique de la gêne induite au sol par un bang supersonique », Rapport final, déc. 2005
- [11] Stevens S. S., « The direct estimation of sensory magnitudes-loudness », Am. J. Psychol. 69, 1-25, 1956
- [12] Bouillet I., « La sonie des sons impulsionnels : mesures et modèles » thèse de l'Univ. Marseille II, juin 2005
- [13] Canévet, G., Hellman, R., et Scharf, B., « Group estimation of loudness in sound fields », Acustica 60, 277-282, (1986)