

CFA/VISHNO 2016

Objectivation de l'effet des composantes tonales sur le désagrément de sons d'avion au décollage

A. Minard, C. Lambourg et P. Boussard

GENESIS, Domaine du Petit Arbois BP69, 13545 Aix En Provence Cedex 04, France
antoine.minard@genesis.fr



LE MANS

Les émergences tonales qui apparaissent dans le son au sol lors d'un décollage d'avion sont principalement de 2 natures : un sifflement aigu correspondant à la fréquence de passage de pales de la soufflante des turbo-réacteurs, et une série de nombreuses sous-harmoniques dont la fondamentale correspond à la fréquence de rotation de la soufflante (« buzz-saw noise »). Il a été montré dans le cadre du projet PARASOFT que l'émergence de ces 2 composantes, à niveau perçu constant, pouvait avoir une influence significative sur le désagrément. Ainsi la grande majorité des indicateurs de niveau sonore ne permettent pas de rendre compte de cette influence. Seul l'EPNL (Effective Perceived Noise Level) inclut une pénalité en cas d'émergence tonale isolée. Cette pénalité tonale de l'EPNL ainsi que plusieurs autres indicateurs de tonalité normalisés (ISO1996-2 Annexe C, DIN45681) ou issus de la littérature (Tonalité d'Aures) ont été évalués sur les sons de décollage d'avion et comparés aux évaluations perceptives du désagrément réalisées. Il apparaît que la plupart des indicateurs considérés reflètent bien l'effet de composantes tonales isolées, telles que le sifflement de soufflante, sur le désagrément, et n'apportent pas beaucoup plus de précision que le facteur correctif inclus dans l'EPNL. En revanche, ces indicateurs s'avèrent bien moins performants pour objectiver l'augmentation du désagrément que peut provoquer une série d'harmoniques très rapprochées en fréquence (séparées de moins d'une centaine de Hz) telle que le buzz-saw noise. Seule la Tonalité d'Aures, qui ne se limite pas à une zone fréquentielle où intervient l'émergence maximale, permet de prendre en compte l'impact de ce type de source.

1 Introduction

L'environnement sonore est maintenant une préoccupation majeure, comme le montrent de nombreuses études identifiant le bruit comme principale source de nuisance. Dans le domaine des transports, le bruit de passage d'avions, ou survol, est considéré comme le plus gênant [1].

Le son de survol est généré par des sources de différentes natures (turbulences aérodynamiques, jet, soufflante, ...). Du point de vue perceptif, ces contributions peuvent être classées en trois types de composantes pour les avions actuels :

- des composantes tonales isolées, générées entre autres par la soufflante des turbopropellers ;
- une série de raies harmoniques de fréquence fondamentale basse fréquence (*Buzz Saw Noise* – *BSN*) qui est engendrée par les turbulences en bout des pales de la soufflante ;
- un bruit large bande, qui regroupe différentes contributions.

L'influence de ces différents phénomènes sur la perception des riverains d'aéroport est encore mal maîtrisée. A ce jour, les directives préconisées par les organismes de standardisation, telles que l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale), qui ont pour but de limiter la gêne des riverains, font principalement appel à la mesure de l'EPNL (Effective Perceived Noise Level), introduit il y a plus de 50 ans [2]. Cet indicateur est principalement fondé sur une estimation de la sonie (indicateur ISO532A), avec un facteur correctif pour prendre en compte l'émergence d'éventuelles composantes tonales isolées.

C'est dans cette problématique que s'inscrit le projet PARASOFT. Ce projet a pour objectif d'améliorer la compréhension du lien entre le ressenti des riverains et les paramètres acoustiques décrivant le son parvenant jusqu'à leurs oreilles, au moyen d'études perceptives, réalisées en laboratoire, évaluant le désagrément associé par des auditeurs à des sons de survol.

A l'issue des expériences perceptives réalisées [3] [4] [5], il a été mis à jour, au moins dans certains cas, une influence significative de l'émergence de composantes du son de survol, que l'on considère comme tonales. Afin d'objectiver cette influence, et dans un but de prédiction de désagrément, plusieurs indicateurs dits de « tonalité » ont

été évalués sur les sons du corpus de l'expérience dédiée à cet aspect [3]. Par ailleurs compte tenu de la nature rugueuse à l'écoute de la composante BSN un modèle de rugosité a également été testé. La section 2 détaille ces différents indicateurs, tandis que la section 3 expose leurs évaluations en tant que prédicteurs du désagrément, pour un même avion (car d'autres paramètres, que ne reflètent pas les indicateurs de tonalité, expliquent probablement les différences de désagrément perçues entre 2 avions différents).

2 Descripteurs de tonalité et de rugosité

2.1 Correction tonale de l'EPNL

Le facteur de correction tonale inclus dans l'EPNL [2] est fondé sur une description en bandes de tiers d'octave du spectre du son. Les « irrégularités spectrales » sont repérées en localisant les bandes présentant un niveau supérieur d'au moins 5 dB à l'une des deux bandes adjacentes. Les émergences (F) dans ces bandes sont évaluées comme les différences entre les niveaux initiaux et ceux d'une version lissée de la courbe des niveaux obtenue par moyennes successives entre des bandes adjacentes. Pour chaque bande cette différence F est transformée, en fonction de la fréquence centrale de la bande identifiée, en facteur de correction tonale C dont la valeur se situe entre 0 (pour $F \leq 3\text{dB}$) et 6.67 dB (pour $F \geq 20\text{dB}$ et une fréquence centrale se situant entre 500 Hz et 5 kHz).

2.2 Audibilité tonale (ISO1996-2 C)

L'annexe C de la norme internationale ISO1996-2 [6] est fondée sur la procédure de *Joint Nordic Method* [7]. Elle fournit une procédure de détection de composantes tonales. En fonction de l'importance de celles-ci, elle délivre une mesure du degré d'émergence tonale, appelée « Audibilité tonale » (Tonal Audibility), de laquelle est déduit un ajustement entre 0 et 6 dB à ajouter au niveau sonore mesuré en dBA. Le procédé utilisé comprend trois étapes :

- Analyse fréquentielle en bandes fines pondérée A sur une fenêtre de signal de durée 300 ms (permettant une résolution fréquentielle de 3,33 Hz). Les spectres successifs ainsi calculés sont moyennés au cours du temps (la norme recommande la durée totale du signal soit d'au moins 1 minute).

- Procédure de détection automatique des émergences tonales (émergence spectrale localement supérieure à 6 dB, et largeur de bande à 3 dB inférieure à 10 % de la largeur de bande critique centrée sur la fréquence considérée).
- Dans chaque bande critique où a été détectée au moins une émergence, détermination du niveau de pression acoustique d'émergences L_{pt} (somme énergétique si plusieurs émergences distinctes ont été détectées dans cette bande) et du niveau de bruit masquant dans cette bande critique L_{pn} .
- Calcul, pour chaque bande critique identifiée (fréquence centrale f_c), de l'Audibilité Tonale (Tonal Audibility) ΔL_{ta} , en tenant compte de l'indice de masquage [8], qui correspond à la différence de niveau au seuil de masquage entre un sinus pur et la bande critique de bruit centrée sur celui-ci :

$$\Delta L_{ta} = L_{pt} - L_{pn} + 2 + \log_{10} \left[1 + \left(\frac{f_c}{502} \right)^{2.5} \right] \quad (1)$$

La valeur maximale ΔL_{ta} en dB obtenue définit la bande critique décisive. A partir de cette valeur, un ajustement en dB à appliquer sur une mesure de niveau en dBA est déterminé selon la norme, mais n'est pas considéré ici.

Par ailleurs, la norme préconise une durée minimale de signal de 1 minute (pendant laquelle ce signal est supposé stationnaire ou peu variable en termes de fréquences des émergences tonales). Compte tenu de la nature des signaux considérés ici, par essence non-stationnaires à cause, notamment, de l'effet Doppler, l'indicateur utilisé ici est en fait une adaptation de la norme aux signaux non-stationnaires. Celui-ci évalue l'audibilité tonale dans chaque portion de 1 seconde de signal, et la valeur maximale au cours du temps est conservée. Par souci de commodité, cet indicateur sera tout de même désigné dans la suite par l'identifiant de la norme.

2.3 Norme DIN45681

La norme allemande DIN45681 [9] suit un principe similaire à l'annexe C de la norme ISO1996-2, et a également pour but de fournir un ajustement en dB à appliquer à une mesure de niveau en dBA pour tenir compte des émergences tonales. Quelques différences non-négligeables subsistent toutefois :

- Analyse fréquentielle en bandes fines pondérée A. La résolution fréquentielle est calculée de sorte à se situer entre 1,9 et 4 Hz avec un nombre de points fréquentiels égal à une puissance de 2, en fonction de la fréquence d'échantillonnage du signal. Le spectre ainsi calculé est ensuite moyenné sur une durée d'environ 3 secondes.
- Procédure de détection automatique des émergences tonales (émergence spectrale localement supérieure à 6 dB, et « clarté » supérieure à 70 %¹).
- Dans chaque bande critique où a été détectée au moins une émergence, détermination du niveau de pression acoustique d'émergence L_T (somme énergétique si plusieurs émergences distinctes ont été détectées) et du niveau de bruit masquant dans cette bande critique L_G .

- L'émergence ΔL_k est évaluée de la même manière que l'audibilité tonale de la norme ISO1996 (c'est-à-dire en prenant en compte l'indice de masquage). Seule l'émergence maximale sur l'ensemble des bandes critiques est conservée.
- L'émergence finale ΔL en dB est évaluée comme la moyenne temporelle de ΔL_k .

De même un ajustement est calculé à partir de cette valeur mais n'est pas considéré ici.

2.4 Tonalité d'Aures

En se fondant sur les résultats d'expériences sur des sons purs et des bruits à bande étroite, Aures [10] modélise la tonalité au travers de fonctions de pondération traduisant les effets de la largeur de pic, la fréquence, la prééminence de l'émergence, et sa contribution à la sonie totale, pour la plupart fondées sur les travaux de Terhardt et al. [11]. Aures propose également une procédure automatique d'extraction des émergences du spectre, calculé sur des fenêtres de signal de 80 ms, et y applique ces fonctions de pondération pour calculer la tonalité.

Pour la i^e émergence détectée à la fréquence f_i en Hz avec un niveau L_i en dB SPL et une largeur de pic Δz_i en Bark, les fonctions de pondérations sont les suivantes :

- Pondération de la largeur de pic :

$$w_1(\Delta z_i) = \frac{0.13}{\Delta z_i + 0.13} \quad (2)$$

- Pondération de la fréquence :

$$w_2(f_i) = \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 0.2(f_i/700 + 700/f_i)}} \right)^{0.29} \quad (3)$$

- Pondération de la prééminence :

$$w_3(\Delta L_i) = \left(1 - e^{-\frac{\Delta L_i}{15}} \right)^{0.29} \quad (4)$$

ΔL_i désigne la prééminence en dB et se calcule par :

$$\Delta L_i = L_i - \log_{10} \{ [\sum_{k \neq i}^n A_{Ek}(f_i)] + E_{Gr}(f_i) + E_{Hs}(f_i) \} \quad (5)$$

A_{Ek} est l'excitation secondaire à la fréquence f_i provoquée par la k^e émergence, E_{Gr} est l'intensité de masque du bruit, et E_{Hs} est l'intensité au seuil d'audition.

Aures combine ces trois pondérations en la pondération w_T :

$$w_T = \sqrt{\sum_{i=1}^n [w_1'(\Delta z_i) w_2'(f_i) w_3'(\Delta L_i)]^2} \quad (6)$$

avec $w_2' = w_2^{0.29}$ et $w_3' = w_3^{0.29}$.

Une dernière pondération est calculée pour prendre en compte la contribution de l'émergence à la sonie globale :

$$w_{Gr} = 1 - \frac{N_{Gr}}{N} \quad (7)$$

N_{Gr} et N sont respectivement la sonie du bruit (i.e. sans les émergences) et la sonie totale.

Enfin la tonalité d'Aures T en tu (tonality unit) est calculée comme :

$$T = c \cdot w_T^{0.29} \cdot w_{Gr}^{0.79} \quad (8)$$

avec $c = 1,09$ la constante de normalisation de sorte qu'un sinus pur à 1 kHz et 60 dB SPL ait une tonalité de 1 tu.

Finalement la valeur moyenne de tonalité au cours du temps est conservée.

¹ Paramètre lié à la largeur de pic et aux pentes de la courbe du spectre aux extrémités de cette bande.

2.5 Rugosité

Etant donnée la gamme de valeurs typiques de la fréquence fondamentale de la composante BSN (aux alentours de 75 Hz pour les sons de décollage étudiés dans le projet) la rugosité a également été évaluée afin de quantifier l'importance de cette composante dans le son global.

La rugosité d'un son décrit la sensation que provoque une modulation d'amplitude lorsque la fréquence de modulation se trouve entre 20 Hz et une centaine de Hz. Elle atteint son maximum autour de 70 Hz de fréquence de modulation. Habituellement, la rugosité est associée à la dissonance et tend à rendre le ressenti des sons plus agressif et désagréable. Zwicker et Fastl ont proposé une unité pour décrire la sensation de rugosité [8] : l'asper. Ils ont défini qu'une sensation de 1 asper correspond à la sensation de rugosité provoquée par un son pur de 1 kHz et d'un niveau de 60 dB SPL étant modulé en amplitude avec une fréquence de 70 Hz et un taux de modulation de 100 %. Le modèle de rugosité qui a été utilisé est celui de Daniel et Weber [12]. Ce modèle applique, après un premier filtrage correspondant à la réponse de l'oreille externe et moyenne, un banc de filtres au signal afin d'effectuer la décomposition en bandes de Bark. Un taux de modulation m_i^* est évalué dans chaque bande de Bark et la rugosité spécifique r_i est calculée par la formule :

$$r_i = (g(z_i) \cdot m_i^* \cdot k_{i-2} \cdot k_i)^2 \quad (9)$$

avec g la fonction de pondération de la rugosité partielle donnée par Aures [10] (pondération plus importante aux alentours des 11^e et 12^e bandes de Bark) et k_{i-2} et k_i les corrélations entre, respectivement, les bandes de Bark $i-2$ et i , et les bandes i et $i+2$.

Enfin la rugosité totale est calculée par intégration de la rugosité spécifique sur l'ensemble des bandes de Bark :

$$R = cal \cdot \sum_i r_i \quad (9)$$

avec cal une constante de calibration de sorte que $R = 1$ asper pour un son pur à 1000 Hz et 60 dB SPL modulé à 100 % à 70 Hz.

Ce calcul est effectué dans chaque fenêtre successive de 200 ms du signal, avec un recouvrement de 50%. La valeur de rugosité finale est la valeur de rugosité médiane sur toute la durée du son.

3 Objectivation du désagrément par les indicateurs

Dans le cadre du projet PARASOFT une étude menée par un partenaire du projet [3] a eu pour objectif d'évaluer l'effet du niveau d'émergence des composantes tonales sur le désagrément ressenti. Cette section décrit le travail réalisé afin d'objectiver le désagrément mesuré lors de l'expérience perceptive.

3.1 Données expérimentales

Au cours de l'expérience détaillée dans [3], 30 participants ont évalué, par une méthode d'estimation directe, le désagrément ressenti à l'écoute de 57 sons de décollage, obtenus par synthèse [13] [14]. Chaque synthèse comportent 3 composantes : une composante large-bande (bruit de jet, bruit de soufflante, fuselage, etc.), une composante tonale isolée (raie de soufflante), et une série

harmonique de fondamentale basse fréquence (*buzz-saw noise*), notées respectivement BBN, BPF et BSN par la suite. Certaines de ces synthèses correspondaient à des enregistrements effectués dans le cadre du projet, d'autres incluaient des variations des paramètres du modèle, parmi lesquelles les niveaux d'émergence des composantes tonales BPF et BSN. Respectivement 4 et 3 gains en dB ont été appliqués à 3 synthèses initiales (c'est-à-dire établies par rapport à des enregistrements) de décollage, correspondant chacune à un avion différent. Ainsi le corpus comprenait 12 sons de synthèses pour chacun de ces 3 avions, correspondant à toutes les combinaisons de gains des 2 composantes. Les gains, notés ΔBPF et ΔBSN , ont été fixés à 0, -6, -12, et 18 dB pour le BPF et 0, -6, -12 dB pour le BSN, les sons étant égalisés en sonie par ailleurs.

Parmi les conclusions de l'expérience réalisée sur ces sons, il a été montré que les variations de gain n'avaient aucun effet significatif sur l'évaluation du désagrément d'un des 3 avions. En revanche un effet significatif de ΔBPF a été révélé pour un autre avion (noté « Avion A » par la suite) et un effet significatif de ΔBSN pour le 3^e (noté « Avion B » par la suite). Une explication possible est le fait que les synthèses initiales, et donc les enregistrements auxquels elles correspondent, présentaient des niveaux relatifs de chaque composante favorisant à l'origine l'une ou l'autre. Cette hypothèse semblait confirmée en comparant l'évolution temporelle du niveau sonore de chaque composante.

Les 5 indicateurs exposés en section 2 ont été évalués sur les 12 variations de gains de ces 2 avions. Les sous-sections suivantes abordent la question du lien entre tonalité, rugosité et désagrément, et l'efficacité de chacun de ces indicateurs pour prédire les valeurs mesurées de désagrément moyen.

3.2 Avion A – Effet du BPF

La figure 1 montre les valeurs obtenues pour les 5 indicateurs (Facteur de correction tonale de l'EPNL, ISO1996-2 C, DIN45681, Tonalité d'Aures et rugosité) pour chacune des 12 combinaisons de gains des composantes BPF et BSN, pour l'avion A. Sur chaque sous-figure, les valeurs de l'indicateur sont en ordonnée, les niveaux du facteur ΔBPF sont en abscisse, et les niveaux du facteur ΔBSN sont sur des courbes différentes, spécifiées dans la légende. On peut alors constater que les 4 indicateurs de tonalité reflètent bien les variations de ΔBPF , comme en témoignent les allures généralement décroissantes des courbes correspondantes. En revanche, ces 4 indicateurs réagissent différemment aux variations de ΔBSN .

Notamment, le facteur de correction tonale est plus élevé lorsque le BSN est réduit. L'explication logique est que, quel que soit son niveau, la composante BSN n'est pas détectée comme émergence par le calcul, et par conséquent sa présence limite le niveau d'émergence du BPF par rapport à la somme des composantes BSN et BBN.

A l'inverse, les normes DIN et ISO parviennent à détecter l'émergence du BSN lorsque ΔBPF est suffisamment faible, et fournissent alors une valeur modérée d'émergence. Lorsque la composante BPF est à son niveau initial ou peu réduite, ΔBSN n'a aucun effet sur ces deux indicateurs.

L'effet de ΔBSN sur les valeurs de la tonalité d'Aures semble ténu, avec toutefois une inversion de l'effet entre les valeurs haute et basse de ΔBPF : lorsque ce dernier est fort,

la composante BSN semble tempérer les valeurs de tonalité ; quand ΔBPF est faible, alors les valeurs de tonalité augmentent légèrement avec ΔBSN . Ce double effet pourrait être lié notamment à la prise en compte du masquage entre composantes tonales dans le modèle d'Aures.

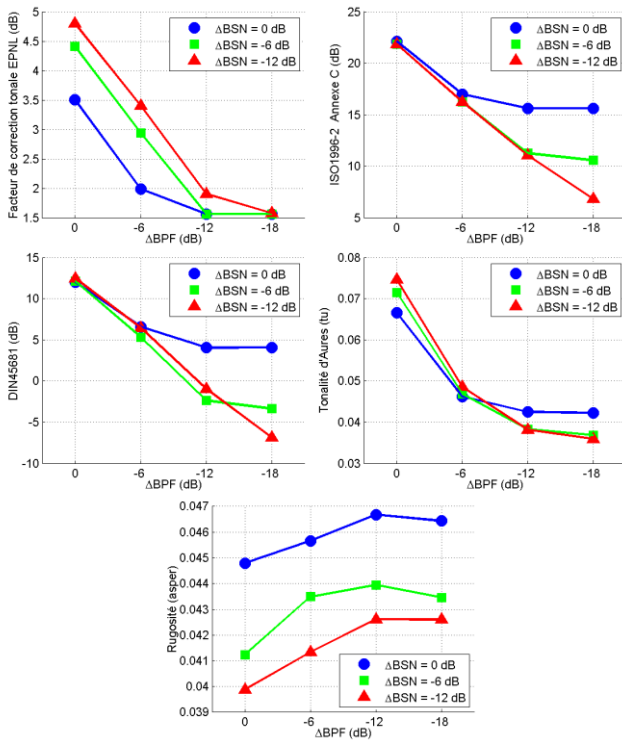


Figure 1 – Valeurs des 5 indicateurs de tonalité pour les 12 combinaisons de gains BPF et BSN.

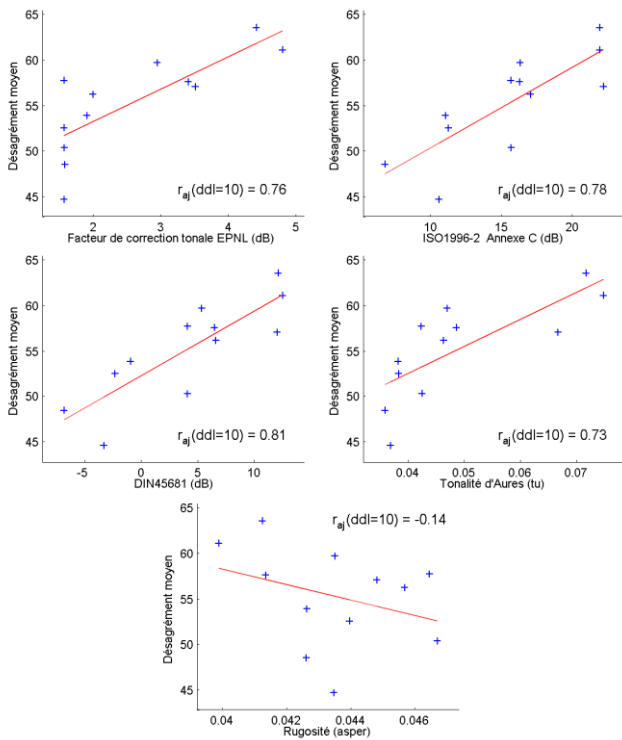


Figure 2 – Valeurs des 5 indicateurs de tonalité pour les 12 combinaisons de gains BPF et BSN.

Enfin, la rugosité semble bien refléter les variations de ΔBSN , mais sa relation avec ΔBPF est l'inverse de celle des autres indicateurs, probablement à cause d'un effet de

masquage par la composante BPF, qui quand elle est importante masque la rugosité.

Dans un second temps les valeurs de ces indicateurs ont été comparées aux évaluations moyennes du désagrément au travers de régressions linéaires. La figure 2 montre les diagrammes de dispersion correspondants, ainsi que les droites de régression, et affiche les valeurs du coefficient de corrélation de Bravais-Pearson ajusté (« r_{aj} », « ddl » signifie « degrés de liberté »).

Cette figure permet de constater que, à l'exception de la rugosité qui n'est pas corrélée avec le désagrément, les indicateurs semblent relativement proches en termes de capacité à expliquer le désagrément moyen. On note notamment que le facteur de correction tonale n'est pas spécialement moins corrélé que les autres indicateurs, pourtant plus « raffinés ».

3.3 Avion B – Effet du BSN

La figure 3 montre les valeurs obtenues pour les 5 indicateurs (Facteur de correction tonale de l'EPNL, ISO1996-2 C, DIN45681, Tonalité d'Aures et rugosité) pour chacune des 12 combinaisons de gains des composantes BPF et BSN, pour l'avion B. Sur chaque sous-figure, les valeurs de l'indicateur sont en ordonnée, les niveaux du facteur ΔBPF sont en abscisse, et les niveaux du facteur ΔBSN sont sur des courbes différentes, spécifiées dans la légende. Les allures des courbes sur cette figure sont assez différentes de celle obtenues pour l'avion A. Notamment la tendance généralement décroissante pour l'avion A semble moins nette ici. En revanche l'effet de ΔBSN est plus visible, les 3 courbes étant globalement bien séparées pour chaque indicateur.

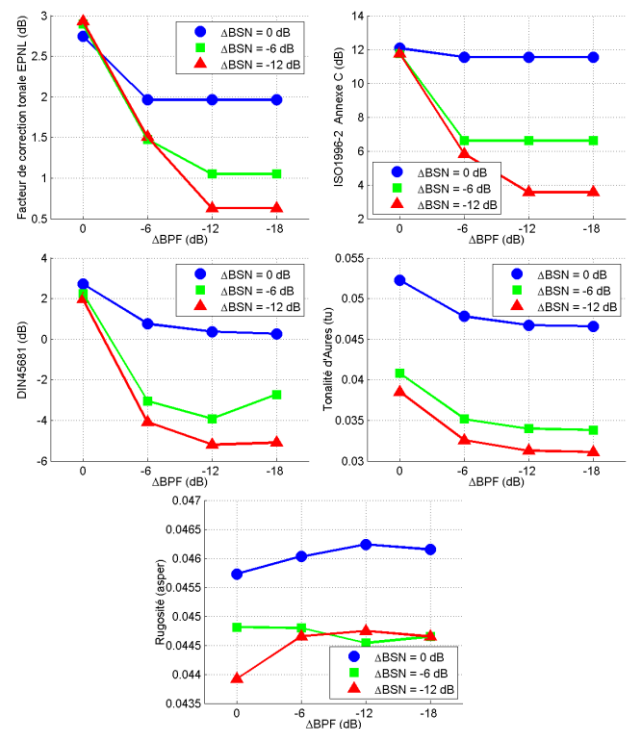


Figure 3 – Valeurs des 5 indicateurs de tonalité pour les 12 combinaisons de gains BPF et BSN, pour l'avion B.

Le facteur de correction tonale de l'EPNL traduit le mieux l'effet de ΔBPF (courbes plus décroissantes). Cet indicateur parvient toutefois à détecter la présence de BSN lorsque ΔBPF est faible, mais cette capacité disparaît totalement lorsque ΔBPF est à son niveau initial (0 dB). Les

normes ISO et DIN ont des tendances assez similaires, même si l'effet de Δ BSN est plus prononcé.

La tonalité d'Aures est en revanche la seule à distinguer les 3 niveaux de Δ BSN lorsque Δ BPF est au niveau maximum (0 dB). Cet indicateur parvient donc bien à détecter les séries harmoniques, même quand une raie isolée importante est présente. Cet aspect provient sans doute du fait qu'il considère l'ensemble du spectre dans le calcul d'émergence tonale, tandis que les autres indicateurs ne conservent que l'émergence maximale.

Enfin, il est intéressant de noter que la rugosité parvient également à détecter la variation de Δ BSN, même à fort niveau de Δ BPF. Cependant les valeurs de rugosité semblent réduites par la présence de la composante BPF.

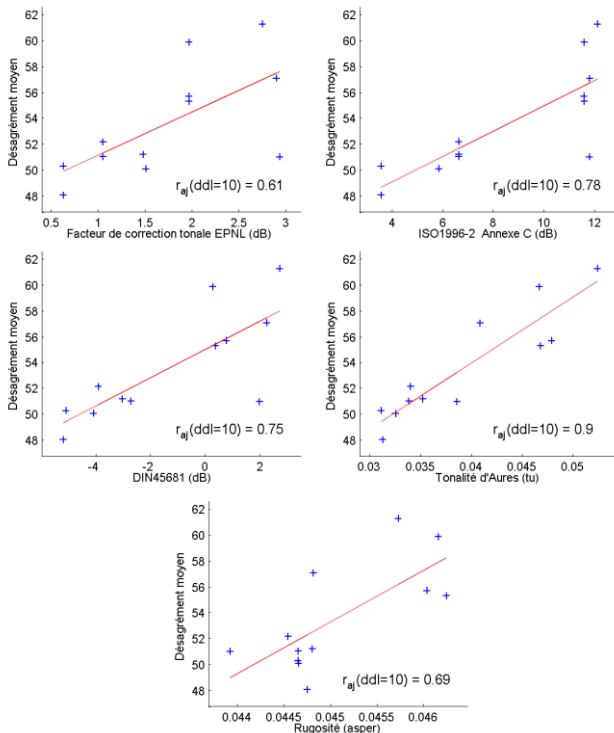


Figure 4 – Valeurs des 5 indicateurs de tonalité pour les 12 combinaisons de gains BPF et BSN, pour l'avion B.

Des régressions linéaires ont également été effectuées entre les valeurs de ces indicateurs et les évaluations moyennes du désagrément. La figure 4 affiche les diagrammes de dispersion correspondants, les droites de régression, et les valeurs du coefficient de corrélation de Bravais-Pearson ajusté (« r_{aj} », « ddl » signifie « degrés de liberté »).

Cette figure permet de d'abord constater les limites du facteur de correction tonale, dont le coefficient de corrélation est cette fois nettement inférieur à ceux des autres indicateurs de tonalité. A l'inverse, la tonalité d'Aures obtient un coefficient de corrélation particulièrement intéressant pour cet avion. Les normes DIN et ISO offrent des coefficients de corrélations assez proches, et similaires à ceux obtenus pour l'avion A. Enfin, le coefficient de corrélation de la rugosité reste modéré, et se situe entre ceux du facteur de correction tonale de l'EPNL et ceux des normes DIN et ISO. La rugosité n'en offre pas moins une alternative intéressante pour quantifier l'impact perceptif de séries harmoniques telles que le BSN.

3.4 Discussion

Les résultats exposés ici apportent des constatations intéressantes sur la prise en compte d'émergences tonales dans les survols d'avion. Lorsque la composante principale, tout du moins du point de vue du désagrément, est une composante tonale isolée (cas de l'avion A), tous les indicateurs de tonalité semblent relativement efficaces et équivalents. Notamment, le facteur de correction tonale de l'EPNL, qui inclut des méthodes de détection et de calcul d'émergence parmi les plus simples, ne semble pas significativement inférieur en terme de corrélation à des méthodes plus complexes comme la norme DIN45681 ou l'annexe C de la norme ISO1996-2. Peut-être peut-on simplement observer une moins bonne adéquation aux valeurs mesurées de désagrément pour les émergences faibles.

En revanche, lorsque le son contient une série harmonique beaucoup pénalisante pour le désagrément (cas de l'avion B), le facteur de correction tonale de l'EPNL semble peu efficace pour expliquer le désagrément. La norme DIN45681 et l'annexe C de la norme ISO1996-2 ne sont pas vraiment de meilleurs indicateurs dans ce cas. Seule la tonalité d'Aures semble prédire les valeurs de désagrément très efficacement. L'explication est très probablement à chercher dans le fait que celle-ci calcule une pondération liée au degré d'émergence (w_3) sur l'ensemble du spectre, prenant ainsi en compte aussi bien les émergences isolées que les séries harmoniques. Les 3 autres indicateurs de tonalité ne conservent que la bande (de tiers d'octave pour le facteur de correction tonale, ou de Bark pour les 2 autres) où survient l'émergence maximale, négligeant ainsi la contribution de tous les partiels de la série harmonique se situant hors de cette bande. La procédure de détection des émergences peut également avoir un impact, notamment dans le cas du facteur de correction tonale. En effet, dans le cas de ce dernier, les émergences sont repérées comme une bande de tiers d'octave manifestant un niveau sensiblement supérieur à ces voisines (un peu à la manière du *prominence ratio PR* de la norme ISO7779). Or une série harmonique telle que le BSN risque de générer des niveaux relativement similaires entre bandes de tiers d'octave voisines.

Enfin la rugosité offre une alternative intéressante pour la prise en compte des sources de type BSN dans le désagrément perçu au son de décollage. Toutefois son évaluation semble assez perturbée par la présence de composante tonale isolée telle que la composante BPF, et ne peut donc pas à elle seule expliquer le désagrément des sons considérés ici.

4 Conclusion

Cette étude avait pour objectif d'évaluer la capacité de différents indicateurs, notamment de tonalité, à prédire le désagrément ressenti à l'écoute de sons de survols d'avion (décollages) présentant différentes composantes tonales, à différents degrés d'émergence. Les résultats montrent que lorsqu'une composante tonale isolée (BPF) est prépondérante, les indicateurs de tonalité se distinguent peu en termes de capacité à expliquer les jugements de désagrément. En revanche lorsque le son comprend une série de nombreuses harmoniques de fréquence fondamentale basse fréquence (BSN), la plupart des indicateurs de tonalité montrent leurs limites. En effet ils ne

considèrent le degré d'émergence que dans une bande du spectre où cette émergence est maximale. Le seul indicateur de tonalité qui fait exception est la tonalité d'Aures qui ne se limite pas à l'émergence maximale. Cet indicateur prend également en compte un nombre important d'aspects des émergences (largeur de pic, fréquence, masquage entre composantes tonales, contribution à la sonie globale) qui ne sont pas tous considérés dans les autres, et qui n'ont pas été étudiés ici. Plusieurs études [15] [16] [17] ont évalué l'impact de ces paramètres sur la tonalité perçue et ont confirmé la pertinence de cet indicateur. Toutefois, si la procédure de détection automatique des émergences tonales de cet indicateur n'est pas la plus complexe, le calcul de sa valeur finale inclut de nombreuses pondérations et coefficients dont le sens physique n'est pas assuré, et qui rendent hasardeuse la manipulation de cet indicateur.

L'objectif à plus grande échelle de ce travail est de s'interroger sur la pertinence des indicateurs de désagrément global qui sont usuellement utilisés pour caractériser les sons de survols d'avion. Si l'ensemble de cette étude montre une chose, c'est que les émergences tonales, qu'elles soient isolées ou sous forme de série harmonique, doivent être prises en compte. Dans le cas de composante isolée, l'EPNL semble pertinent, et donc à préférer à des indicateurs tels que le niveau équivalent L_{Aeq} par exemple. En revanche dans le cas de séries harmoniques telles que le *buzz-saw noise*, l'EPNL pourrait être raffiné, soit en incluant une procédure plus fine de détection des émergences, qui permettrait notamment de considérer l'ensemble du spectre, soit en ajoutant un facteur correctif lié à la rugosité par exemple.

Par ailleurs, dans le cadre du projet PARASOFT, les facteurs de désagrément des sons de survols d'avion ne se sont pas limités aux émergences tonales. En effet, une autre partie du projet était consacrée aux facteurs temporels du survol, parmi lesquels l'effet Doppler, la durée perçue, le caractère soudain et les turbulences [4] [5]. Cette partie du projet a également montré des effets notables de la durée perçue (qui est par ailleurs également prise en compte dans l'EPNL) et des turbulences, qui doivent également être considérés lorsque l'on souhaite prédire efficacement le désagrément de tels sons.

Remerciements

PARASOFT² est un projet collaboratif entre l'Université de Cergy-Pontoise, l'ONERA, l'INSA Lyon, et GENESIS, financé par la FNRAE, et monté dans le cadre du réseau IROQUA³.

Références

- [1] H. M. Mediema & H. Vos, Exposure-response relationships for transportation noise, *Journal of the Acoustical Society of America*, **104**(6), 3432-3445, 1998.
- [2] International Civil Aircraft Organization, Annex 16, Chapter 3, 6th edition, 2011.
- [3] L. Brocolini & E. Parizet, Influence of tonal

components on the unpleasantness of airplane noise at take-off, *Proceedings of Internoise 2015*, San Francisco, USA, 2015.

- [4] A. Paté, C. Lavandier & A. Minard, Influence of temporal aspects of aircraft sound signature on perceived unpleasantness, *Proceedings of Internoise 2015*, San Francisco, USA, 2015.
- [5] A. Paté, C. Lavandier, A. Minard & I. Legriffon, Perceived unpleasantness of aircraft flyover noise: Influence of temporal parameters, *Applied Acoustics* (submitted).
- [6] ISO1996-2:2007, Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise - Part 2: Determination of environmental noise levels, 1987.
- [7] T. H. Pedersen, M. Sondergaard & B. Andersen, Objective method for assessing the audibility of tones in Noise Joint Nordic Method – Version 2, *AV 1952/99 DELTA Acoustics and Vibration*, 2000.
- [8] E. Zwicker & H. Fastl, *Psychoacoustics: Facts and Models*, New York: Springer, 1990.
- [9] DIN45681:2005-03, Acoustics – Detection of tonal components of noise and determination of tone adjustment for the assessment of noise immisions, 2005.
- [10] W. Aures, A model for calculating the sensory euphony of various sounds, *Acustica*, **59**, 130-141, 1985.
- [11] E. Terhardt, G. Stoll & M. Steewann, Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal sounds, *Journal of the Acoustical Society of America*, **71**(3), 679-688, 1982.
- [12] P. Daniel & R. Weber, Psychoacoustical Roughness: Implementation of an Optimized Model, *Acta Acustica united with Acustica*, **83**, 113-123, 1997.
- [13] A. Minard, G. Lemaitre, C. Lambourg & P. Boussard, Synthèse de bruits de passage d'avion dans le cadre du projet PARASOFT, *Actes du 12e Congrès Français d'Acoustique*, Poitiers, 2014.
- [14] A. Minard, S. Hourcade, C. Lambourg & P. Boussard, Controllable sound simulations of aircraft flyovers, *Proceedings of Internoise 2015*, San Francisco, USA, 2015.
- [15] E. Parizet & S. Fingerhuth, Subjective evaluation of tonalness and relation between tonalness, *Proceedings of Internoise 2009*, 2009.
- [16] S. R. More, Aircraft noise characteristics and metrics, Purdue University, PhD thesis, 2010.
- [17] A. Hastings, K. H. Lee, P. Davies & A. M. Surprenant, Measurement of the attributes of complex tonal components commonly found in product sound, *Noise Control Engineering Journal*, **51**(4), 195-209, 2003.
- [18] S. C. Fingerhuth, Tonalness and consonance of technical sounds, Aachen Institute of Technology, PhD thesis 2009.

²http://www.fnrae.org/1-39841-Detail-projet.php?id_theme=11&id_projet=87

³<http://www.iroqua.fr/>