

CFA/VISHNO 2016

Caractérisation perceptive du bruit aux Fréquences Multiples de la Rotation (FMR) de la soufflante d'un turboréacteur

J.-F. Sciabica^a, B. Mellot^b et S. Moal^a

^aAirbus Operations, 316 route de Bayonne, 31060 Toulouse Cedex 09, France

^bAssystem France, 13 rue Marie-Louise Dissard, 31024 Toulouse, France
jean-francois.sciabica@airbus.com



LE MANS

Réduire le bruit des avions à proximité des aéroports est une préoccupation majeure de l'industrie aéronautique. Des diminutions des niveaux d'exposition au bruit des riverains ont notamment été réalisées grâce aux efforts conjoints des acteurs de ce secteur. En complément des gains réalisés ces dernières années et afin d'améliorer l'optimisation des avions du futur, il est important de pouvoir estimer et comprendre quelles sont les caractéristiques du bruit d'un avion qui créent le plus de désagrément pour les riverains d'aéroports. Cet article décrit une première étude menée sur le bruit de Fréquences Multiples de la Rotation, ou bruit FMR, généré par certains avions au décollage quand la vitesse en bout des aubes de la soufflante du turboréacteur devient supersonique. D'un point de vue signal, le bruit FMR correspond à un peigne de raies harmoniques d'amplitudes aléatoires dont la fréquence fondamentale est celle de la rotation de la soufflante. Afin de caractériser perceptivement le bruit FMR, un ensemble de stimuli correspondant à des bruits d'avions au décollage a été créé à partir d'enregistrements réalisés à proximité des pistes. Ces stimuli ont ensuite été ajustés en sonie lors d'un pré-test avant d'être évalués lors d'un test par paires où 38 participants devaient estimer la différence de désagrément entre les deux signaux présentés. Deux grandes dimensions perceptives ont ainsi pu être identifiées pour caractériser le bruit FMR, la rugosité et l'acuité.

1 Introduction

La réduction du bruit des avions est un axe important d'amélioration pour l'industrie aéronautique. Les diminutions d'émissions sonores obtenues au cours de ces dernières décennies ont contribué à réduire significativement les niveaux d'expositions aux bruits. Néanmoins, la croissance régulière du trafic aérien a un impact significatif sur le niveau de gêne perçue au sol autour des aéroports. En parallèle, le développement des constructions résidentielles autour des aéroports a entraîné l'augmentation du nombre de personnes affectées quotidiennement par le bruit aérien. En accord avec l'« approche équilibrée » pour la gestion du bruit des avions proposée par l'Organisation Internationale de l'Aviation Civile, et en parallèle au développement de technologies visant à réduire le bruit à la source en opération, l'effort d'Airbus se consacre également à la compréhension de la gêne sonore ressentie par les riverains. Cette gêne sonore dépend de différents facteurs acoustiques (niveau sonore, contenu fréquentiel) et non-acoustiques (sensibilité individuelle au bruit, facteurs sociaux et environnementaux). Ainsi, réduire la contribution des facteurs acoustiques (que nous appellerons désagrément dans la suite de cet article) autrement qu'en diminuant uniquement le bruit global des avions demeure un levier pour réduire la gêne sonore. C'est pourquoi il est désormais important de pouvoir estimer et comprendre quelles sont les caractéristiques du bruit d'un avion qui créent le plus de désagrément pour les riverains d'aéroports.

Cette étude est consacrée au bruit de Fréquences Multiples de la Rotation (FMR) généré par certains avions au décollage quand la vitesse en bout des aubes de la soufflante du turboréacteur devient supersonique. Ce phénomène trouve son origine dans les légers écarts de géométrie et de positionnement des aubes, inévitables en raison des tolérances de fabrication. Puisque la propagation d'une onde de choc, comme de toute onde sonore à haute intensité, est non-linéaire, les petites inégalités entre les ondes de choc individuelles s'agrandissent, brisant ainsi la symétrie rotationnelle, le signal sonore ne se répétant qu'après une révolution complète de la soufflante, c'est-à-dire avec la fréquence de rotation de celle-ci. D'un point de vue signal, le bruit FMR correspond à un peigne de raies harmoniques d'amplitudes aléatoires dont la fréquence fondamentale est celle de la rotation de la soufflante (voir Figure 1). Les premiers travaux sur la perception du bruit FMR remontent à 1970 avec l'apparition de ce phénomène

sur les turboréacteurs. Pearson et Wells [1] étudient alors son impact sur le désagrément en comparant divers bruits FMR, étalés sur 3 octaves, à un bruit large bande possédant la même enveloppe spectrale. Il en résulte que la présence de bruit FMR augmente le désagrément de 2.5 PNdB (Perceived Noise dB). Plus récemment, les travaux de Töpken ont proposé une description perceptive du bruit FMR ainsi qu'une quantification de son impact sur le désagrément. Une méthode de sémantique différentielle [2] en 16 champs conjuguée à une analyse de facteurs a permis d'identifier 3 descripteurs principaux de perception du bruit FMR (plaisant, puissant et métallique). Cette expérience a été réalisée à partir de stimuli de 5 secondes faisant se superposer 2 peignes harmoniques. Elle montre que plus l'inharmonicité entre les 2 fréquences fondamentales (décrit comme l'écart entre le rapport des 2 fréquences fondamentales et l'unité) augmente, moins le son devient désagréable [3]. Par ailleurs, une méthode d'ajustement en sonie et en préférence [5] a permis de chiffrer l'impact du bruit FMR sur ces 2 grandeurs. A même niveau perçue, on observe des écarts de 5 à 8 dB entre les différents échantillons de bruit FMR et le bruit large bande de même enveloppe spectrale. Les écarts sont plus importants lorsqu'il s'agit d'égalisation en préférence (de 15 à 23dB). Ces différents travaux mentionnent également une corrélation entre sonie et désagrément.

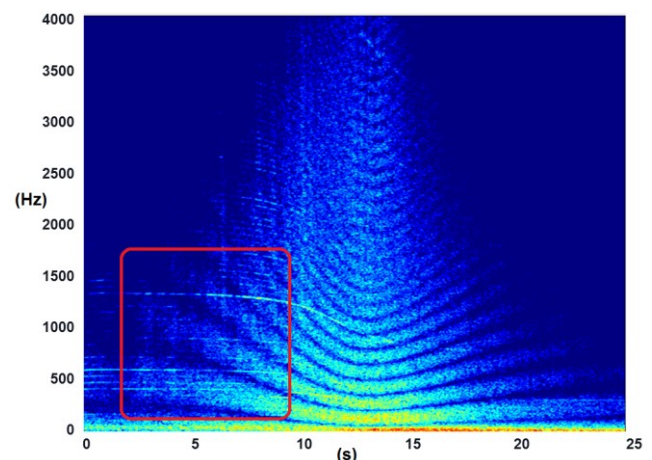


Figure 1 : Spectrogramme du bruit d'un survol d'avion au décollage. Les FMR sont entourées en rouge.

Dans cette étude, afin de caractériser le désagrément du bruit FMR, nous utilisons une méthode que nous avons déjà appliquée au bruit d'avion à l'atterrissage [6]. Il s'agit d'un test de dissemblance où les participants doivent évaluer la

différence de désagrément entre les 2 signaux présentés. A partir de cette mesure, un classement des sons selon le désagrément est possible avec une méthode de calcul de préférence. Par la suite, une analyse en composantes principales appliquée au classement des sons obtenu pour chaque participant permet d'identifier 2 grandes dimensions perceptives et de représenter les sons dans un espace perceptif. Cette méthode a été introduite par Parizet [7] pour décrire la perception de bruits de ventilation. Elle a été validée perceptivement en comparant l'espace perceptif obtenu par cette méthode à celui résultant d'un test de dissemblance. Nous présenterons dans un premier temps le choix des différents stimuli utilisés dans le test, extraits d'enregistrements de survols d'avions où le bruit FMR est quasi stationnaire. 13 stimuli ont ainsi été créés, nous permettant d'identifier jusqu'à 3 dimensions perceptives [8]. Puis nous détaillerons l'analyse du test de dissimilarité et rappellerons la méthodologie utilisée. L'attention se portera principalement sur l'identification des différentes dimensions perceptives décrivant le bruit FMR.

2 Stimuli

Les stimuli de ce test sont tous issus d'enregistrements réalisés avec un micro positionné à une hauteur de 1.2 m placé dans un champ situé à environ 2 km du seuil de piste. La grande majorité d'entre eux ont été enregistrés près de l'aéroport de Toulouse Blagnac, la même journée, dans des conditions de météo claire (ciel bleu et pas de vent). Les stimuli restants sont quant à eux issus d'enregistrements d'essais de certification acoustique. Plusieurs modèles d'avions ont été utilisés, à savoir 10 de la gamme Airbus et 3 issus de la concurrence. La durée des sons, limitée à 6 secondes, a été choisie pour avoir un bruit FMR présent et quasiment stationnaire sur tous les enregistrements. D'un enregistrement à l'autre, en fonction du type d'avion et de la trajectoire de décollage, la durée du FMR peut être très variable mais demeure toujours supérieure à 6 secondes (pour rappel, dans son expérience de caractérisation perceptive, Töpken travaillait avec des sons de 5 secondes).

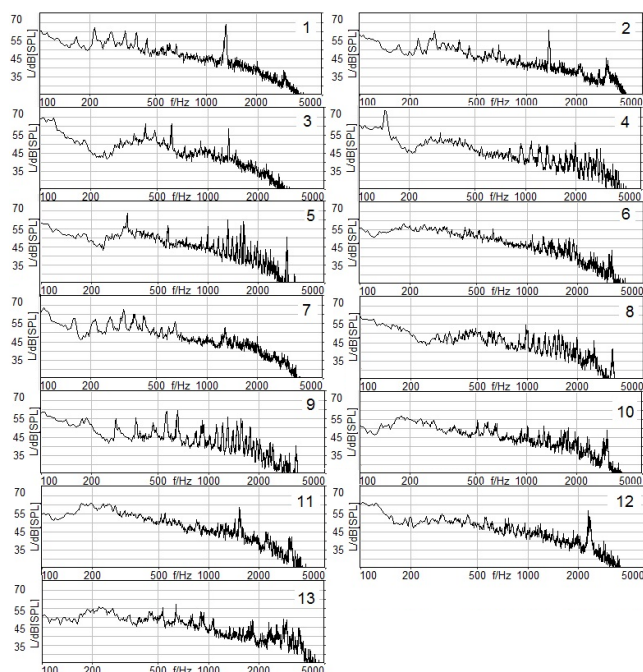


Figure 2 : Spectres moyennés des 13 stimuli du test

La figure 2 représente les spectres moyennés dans le temps des 13 stimuli. Par souci de confidentialité, les sons ne sont pas identifiés mais seulement numérotés de 1 à 13. Le bruit FMR se manifeste par la présence de raies très rapprochées dans le spectre. Celles-ci sont plutôt localisées en fréquence entre 1000 et 3500 Hz. Sur certains stimuli (1 et 7 par exemple) on observe également des raies de bruit FMR dans les basses fréquences (à partir de 200 Hz). De même, on peut remarquer la présence de la raie principale du bruit de soufflante sur plusieurs spectres entre 1000 et 2000 Hz (Spectres 1 et 2 par exemple)

Ajustement en sonie

La sonie étant reconnue comme la 1ère dimension perceptive expliquant le désagrément des bruits d'avions [6], [9], les stimuli ont été ajustés en sonie lors d'un pré-test réalisé sur 6 personnes. Au préalable, les sons ont été égalisés en maximum de sonie avec la norme ISO 532B. Le niveau sonore moyen des sons alors diffusés au casque variait entre 72 et 75 dB(A). Même si les participants du test étaient familiarisés à l'écoute de bruits d'avions, tous ont mentionné que la tâche n'était pas aisée. Cet ajustement en sonie a été réalisé en utilisant l'interface présentée en figure 3. Les participants devaient choisir le son dont le niveau de bruit était le même que celui d'un son de référence (stimulus dont le niveau en maximum de sonie calculée au préalable est médian). Les stimuli étaient diffusés avec un casque de marque Beyerdynamic, modèle DT 990 Pro, dont la réponse en fréquence a été égalisée.

Egalisation du son n°1 / 13

REFERENCE

Parmi les sons suivants, choisissez celui qui a le même niveau de bruit que la référence :

-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Effacer Valider

Figure 3 : Interface du test d'ajustement en sonie

En moyenne, sur 6 sujets, les ajustements vont de -1 dB à +1,6dB. L'écart type est assez important (1.2 dB) en raison de la difficulté de la tâche. Après ajustement, le niveau moyen des sons varie de 71.2 à 74.5 dB(A) (Moyenne à 72.4 dB(A)), correspondant à une variation de sonie de 25.9 à 31.4 sones (Moyenne à 28.5 sones).

3 Protocole expérimental

38 personnes, toutes travaillant pour Airbus et déclarant ne souffrir d'aucun trouble auditif, ont participé au test. Chaque session durait en moyenne 30 minutes. Les sons étaient toujours diffusés au casque dans une salle dédiée aux écoutes. Les consignes étaient communiquées aux participants par écrit. Plusieurs sons servant d'exemples étaient intégrés au début du test. Les niveaux des sons étaient fixés à l'avance (avec un niveau moyen de 72.4 dB(A)) et les participants ne pouvaient pas intervenir sur celui-ci.

Il était demandé aux participants d'évaluer la différence de désagrément entre les 2 sons A et B présentés. Pour ce

faire, ils devaient utiliser l'interface de la figure 4, qui leur permettait de placer un curseur continu entre « A beaucoup plus désagréable que B » et « B beaucoup plus désagréable que A ». 78 paires étaient ainsi évaluées, dans un ordre défini de manière aléatoire afin de se prémunir de l'effet d'apprentissage. Les participants pouvaient écouter les sons autant de fois qu'ils le souhaitaient.

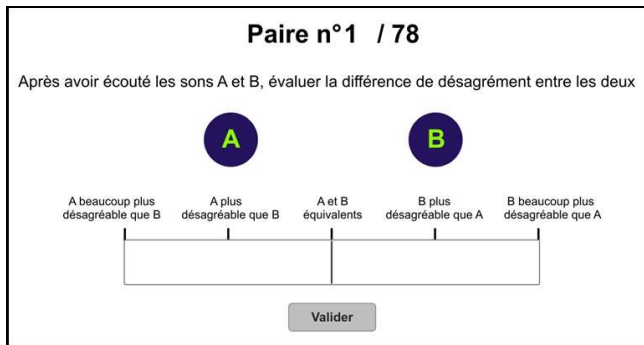


Figure 4: Interface du test de dissemblance

4 Résultats

4.1 Désagrément

Les réponses des participants sont tout d'abord transformées en probabilités d'estimer que le son A est plus désagréable que le son B. En sommant alors ces probabilités pour un son J par rapport à tous les autres sons, on obtient la note de désagrément du son J, comprise entre 0 et 12. Cette méthode, utilisée par Parizet [7], est similaire à un modèle de Bradley-Terry-Luce (BTL). En appliquant l'opération à tous les sons du test et en moyennant sur tous les participants, on obtient alors le classement de désagrément de la figure 5.

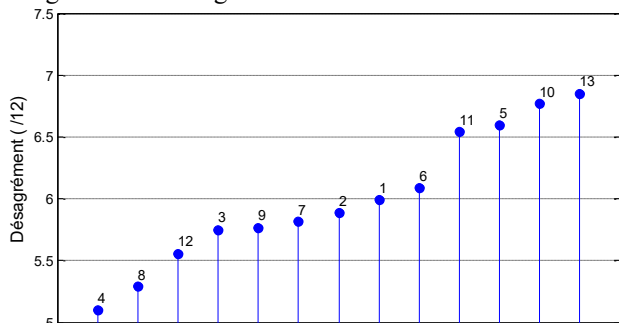


Figure 5 : Classement du désagrément

L'étude de ce classement montre tout d'abord que les notes obtenues sont très proches. Malgré une grande diversité de sonorités, les participants n'ont pas entendu de différences de désagrément très marquées entre les sons. La différence maximale de désagrément est inférieure à 2 points (sur une échelle de 12 points). Ce résultat confirme donc que la sonie est bien prépondérante dans la description du désagrément associé à la présence de bruit FMR.

4.2) Description perceptive des sons

Nous disposons du classement de chaque son selon son désagrément pour chaque participant. Ainsi, un son donné est décrit par ses 38 notes de désagrément. Il est alors possible d'envisager de réduire ce nombre de dimensions et d'assimiler les dimensions réduites aux dimensions perceptives de notre ensemble de sons [7]. Une analyse en

composantes principales a donc été appliquée à la matrice contenant pour chaque son les 38 notes de désagrément. Comme 13 sons étaient considérés, une réduction à 3 dimensions a été retenue [9].

La figure 6 représente les 13 sons dans l'espace perceptif obtenu avec les 2 principales dimensions.

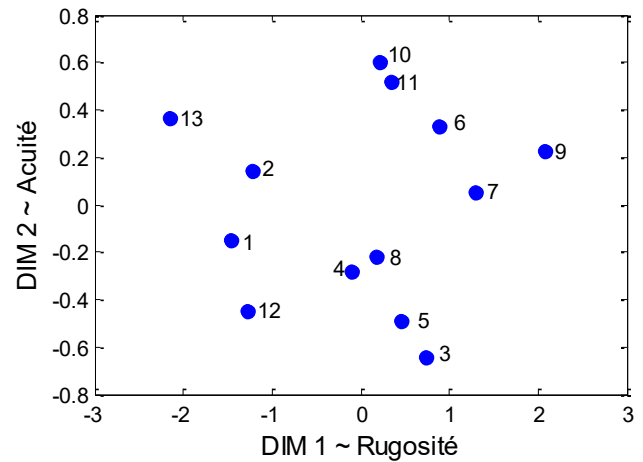


Figure 6 : Espace perceptif contenant les 13 sons du test

Afin d'identifier les dimensions perceptives, les coordonnées selon chaque dimension ont été comparées aux valeurs de 3 indicateurs perceptifs appliqués aux 13 sons du test : la sonie moyenne, l'acuité [10] et la rugosité spécifique [10] intégrée entre les bandes de Bark 10 et 14. Nous avons réduit les bandes d'intégration de la rugosité spécifique pour augmenter le coefficient de corrélation. Ce choix est cohérent avec la distribution des raies de FMR entre 1000 et 3500 Hz (voir figure 2).

Le tableau 1 détaille les coefficients de corrélation entre les 3 dimensions et les 3 indicateurs. Le résultat de cette analyse laisse entendre que la rugosité est la première dimension perceptive et que l'acuité décrit le 2ème axe de l'espace. Même si les sons avaient été ajustés en sonie, la 3ème dimension demeure assez bien corrélée à cette grandeur. Au total, ces 3 dimensions décrivent 76 % de l'information (56 % pour la rugosité, 12 % pour l'acuité et 8 % pour la sonie).

Tableau 1: Coefficients de corrélation entre les dimensions perceptives et les indicateurs perceptifs.

	Dim 1	Dim 2	Dim 3
Rugosité	0.83	0.12	-0.57
Acuité	-0.33	0.76	0.55
Sonie	-0.31	0.35	0.72

La figure 7 montre les corrélations des dimensions perceptives avec les indicateurs retenus. Les valeurs de rugosité (calculées avec notre méthode détaillée ci-dessus) sont comprises entre 0.97 et 1.23 asper. Les valeurs d'acuité s'étalent quant à elles entre 1.3 et 2.3 acum.

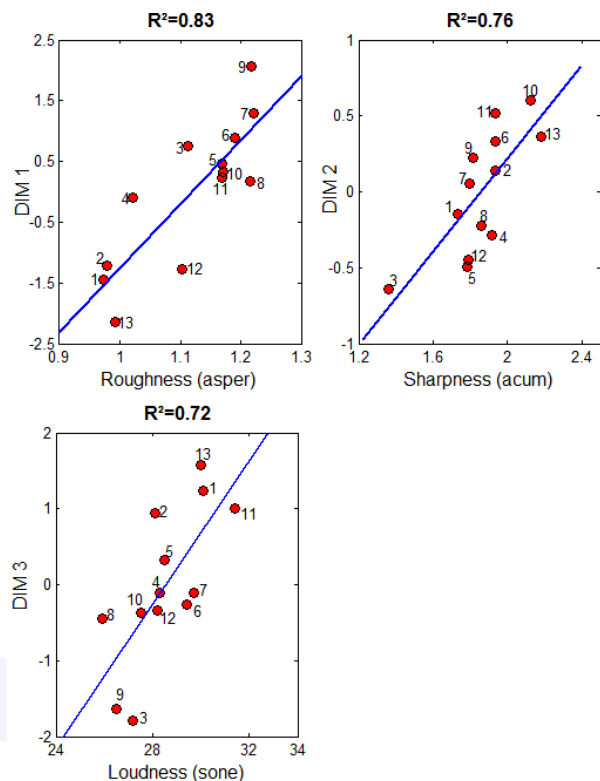


Figure 7 : Corrélations entre les dimensions perceptives et les indicateurs

5 Discussion

Le classement du désagrément montre que les notes moyennées varient entre 5 et 7 (sur une échelle à 12 points). Même si les sons semblaient aux auteurs très différents d'un point de vue perceptif au moment de leur choix, l'ajustement en sonie a réduit la différence de désagrément perçue entre eux. Ainsi, même si nous ne l'avons pas démontré, la sonie semble (et ce n'est pas non plus surprenant) être la dimension première décrivant la perception du bruit FMR puisqu'une fois l'ajustement en sonie effectué, les variations de désagrément sont très faibles.

Le poids de chaque dimension est connu grâce à l'analyse en composante principale de la matrice des notes de désagréments pour chaque sujet. Nous obtenons ainsi 56% pour la 1^{ère} dimension, 12% pour la seconde et 8 % pour la 3^{ème}, soit un total de 76% pour les 3 principales dimensions. Ce résultat est plutôt satisfaisant dans la mesure où nous sommes en présence de sons riches d'un point de vue signal et complexes d'un point de vue perceptif. Les sons étant ajustés en sonie, nous nous affranchissons de surcroît d'une dimension généralement prépondérante dans ce type d'étude. Par ailleurs, les sons étant issus d'enregistrements divers, et présentant des non-stationnarités, certaines dimensions perceptives décrivant des phénomènes temporels peuvent être de bons candidats pour décrire les 24% restants de la perception du désagrément.

En ce qui concerne la rugosité, la figure 7 montre que les variations entre les sons mesurés sont assez faibles (de 0,97 à 1.23 asper). Les sons présentent en effet tous un niveau de rugosité assez présent, puisque chaque son contient du bruit FMR. La contribution de la rugosité au désagrément apparaît comme la dimension principale (pour

des sons ajustés en sonie) puisque cette dimension représente 56% de la description. Le calcul de la rugosité réalisé pour cette étude est basé sur l'intégration de la rugosité spécifique sur une gamme de fréquences donnée, déterminée par la maximisation du coefficient de corrélation. Il permet ainsi de mettre en avant le fait que les composantes du bruit FMR se situent principalement dans une gamme de fréquence entre 1000 et 3500 Hz.

Par ailleurs, les variations d'acuité sont plus importantes puisqu'elles s'étalent entre 1.3 et 2.3 acum (une écoute des sons permet de confirmer cette tendance). Concernant l'ajustement en sonie, nous avons choisi, avant le pré-test, de réaliser un ajustement en maximum de sonie dans la mesure où les sons sont non-stationnaires. Le pré-test d'ajustement perceptif de la sonie, réalisé par la suite, montre des écarts importants entre les 6 participants bien que ces derniers soient spécialistes du bruit avion. La présence de rugosité entre les sons peut expliquer la difficulté à réaliser l'ajustement néanmoins, la sonie n'étant corrélée qu'avec la 3^{ème} dimension, l'ajustement peut être considéré comme réussi. La figure 7 montre que la sonie calculée sur les sons après ajustement lors du pré-test varie entre 26 et 32 sones.

Afin de prolonger l'étude du bruit FMR, il nous faut désormais nous intéresser à l'impact des composantes du signal sur la perception. La synthèse sonore peut donc intervenir à ce stade des travaux pour la création de signaux dont les paramètres sont parfaitement contrôlés. Des développements sont en cours pour inclure à nos outils de synthèse sonore actuels la synthèse du bruit FMR.

Conclusion

Un test de dissemblance visant à évaluer la différence de désagrément par paires entre des stimuli présentant du bruit FMR a été réalisé auprès de 38 participants. 13 stimuli de 6 secondes où le bruit FMR est quasi-stationnaire ont été préparés à partir d'enregistrements et ont été ajustés en sonie au cours d'un pré-test. Une 1^{ère} analyse par un modèle de Bradley-Terry-Luce a permis d'obtenir un classement de ces stimuli sur une échelle de désagrément de 0 à 12. La totalité des stimuli se situe dans une fourchette de notes allant de 5 à 7. Malgré la diversité perceptive des stimuli (variations d'acuité et de rugosité notamment), les participants ont considéré que les 13 stimuli étaient proches en termes de désagrément. Les stimuli étant ajustés en sonie, la présence du bruit FMR apparaît donc comme la dimension principale pour caractériser le désagrément produit. En poursuivant l'étude par une analyse en composante principale sur la matrice contenant, pour chaque stimulus, les notes de désagrément de tous les participants, nous représentons l'espace perceptif du désagrément associé à nos 13 stimuli. 3 dimensions réussissent à décrire 76% de l'information totale. La première dimension perceptive de cet espace est la rugosité, les coordonnées des stimuli selon cet axe étant corrélées à 83% à un indicateur personnalisé de la rugosité, intégrant la rugosité spécifique entre les bandes de Bark 10 et 14, zone fréquentielle où se concentre l'énergie des FMR. La 2^{ème} dimension est portée quant à elle par l'acuité avec un coefficient de corrélation de 76%. Afin de prolonger la caractérisation perceptive, l'utilisation de la synthèse sonore permettra dans des tests futurs de jouer sur ces

dimensions perceptives ainsi que sur l'émergence des raies multiples afin de quantifier de manière plus approfondie leurs impacts respectifs sur le désagrément.

Références

- [1] K. S. Pearsons and R. J. Wells, Judged Noisiness of Sounds Containing Multiple Pure Tones, *J. Acoust. Soc. Am.* **47**, 89 (1970).
- [2] S. Töpken, J. L. Verhey, R. Weber, Perceptual space of multiple complex tones, *Proceedings of ICA 2010*, (2010).
- [3] S. Töpken, J. L. Verhey, R. Weber, Psychoacoustic evaluations of mixed complex tones, *Proceedings of Internoise 2010*, (2010).
- [4] S. Töpken, J. L. Verhey, R. Weber, Evaluation of multi-tone-sounds, *Proceedings of Internoise 2011*, (2011).
- [5] S. Töpken, J. L. Verhey, R. Weber, Preference and loudness of multi-tone sounds, *Proceedings of Internoise 2012*, (2012).
- [6] J-F. Sciabica, A-L. Verneil, S. Moal, Perceptive representation of aircraft noise unpleasantness at landing, *Proceedings of Internoise 2015*, (2015).
- [7] E. Parizet, N. Hamzaoui and G. Sabatié, Comparison of some listening test methods: a case study, *Acta Acustica united with Acustica*, **91** (2005).
- [8] P-Y. Michaud, Distorsions des systèmes de reproduction musicale : Protocole de caractérisation perceptive, *Thèse de doctorat de l'université d'Aix-en-Provence*, (2012).
- [9] B. Barbot, Caractérisation perceptive du bruit d'avions, *Thèse de doctorat de l'université de Cergy-Pointoise*, (2008).
- [10] E. Zwicker, H. Fastl, *Psychoacoustics: Facts and Models*, (1990).