

Synthèse de bruits de passage d'avion dans le cadre du projet PARASOFT

A. Minard, G. Lemaitre, C. Lambourg et P. Boussard
Genesis Acoustics, Domaine du petit Arbois, 13045 Aix En Provence, France
antoine.minard@genesis.fr

Les passages d'avion sont considérés comme une source de bruit particulièrement gênante. Le projet PARASOFT, mené par l'Université de Cergy-Pontoise, l'ONERA, l'INSA de Lyon et la société GENESIS, et financé par la FNRAE, étudie la signature acoustique du bruit d'avion, pour caractériser et prévoir le désagrément perçu par les riverains. Ce projet s'intéresse particulièrement aux signaux égalisés en sonie. Ceux-ci permettent de cibler des caractéristiques sonores fines du désagrément, que de trop grandes différences de sonie ne laissent pas apparaître. Le projet s'intéresse aux composantes du bruit des avions actuels (Buzz Saw Noise, bruit de jet, bruit de cellule, etc.) et aux nouveaux types de motorisation (moteurs à hélices contrarotatives). Les phases du projet sont : l'enregistrement et la synthèse sonore de passages d'avion, la réalisation d'expériences perceptives utilisant la spatialisation sonore, puis la recherche d'indicateurs objectifs du désagrément. Cet article présente la méthode utilisée pour synthétiser les bruits de passages d'avions. Les caractéristiques spectro-temporelles du signal au sol sont tout d'abord calculées à partir des paramètres des sources. Deux outils sont utilisés : la plateforme de simulation IESTA de l'ONERA (également présentée au cours de ce congrès) et un modèle simplifié développé par GENESIS. Les sources de bruit sont décrites par leur directivité, leur spectre large bande et les raies fréquentielles. Ensuite, le signal sonore est synthétisé à l'aide du logiciel GenePASS de GENESIS. Pour valider le modèle, les synthèses sonores sont comparées à des enregistrements effectués près des aéroports de Paris-Charles de Gaulle et de Marseille Provence. Ce modèle de synthèse permet un contrôle aisé des niveaux acoustiques des sources et des paramètres de vol (vitesse, altitude, etc.). A terme, les sons synthétisés seront utilisés lors d'expériences perceptives afin d'identifier les facteurs influençant significativement la gêne des riverains.

1 Introduction

L'environnement sonore devient une préoccupation centrale si l'on se réfère aux 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, ...), dont les contributions subissent de profondes transformations au cours de la propagation jusqu'au sol.

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 autre par la soufflante des turbofans ;
- une série de raies harmoniques de 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.

Les caractéristiques spectro-temporelles de ces composantes dépendent non seulement de la vitesse et du régime moteur de l'avion, mais également de transformations subies au cours de la propagation jusqu'au sol. Ces transformations sont liées à la trajectoire de l'avion et aux caractéristiques environnementales (effet Doppler, atténuation géométrique, absorption et turbulences atmosphériques, effet de sol).

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.

La perception des bruits de survol d'avions a déjà été considérablement étudiée dans la littérature (voir [3] pour un état de l'art sur ce sujet). Ces études ont mis à jour l'influence des caractéristiques du son perçu sur le désagrément [3][4], et également de facteurs non-acoustiques appelés modérateurs [5][6]. Malgré tout, le lien entre la gêne des riverains et les paramètres physiques du passage d'avions doit encore faire l'objet de nombreuses recherches afin d'en comprendre toute l'étendue et d'en établir des modèles de description fidèles et efficaces.

C'est dans cette problématique que s'inscrit le projet PARASOFT¹ financé par la FNRAE, et monté dans le cadre du réseau IROQUA². 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 évaluant le désagrément associé par des auditeurs à des sons de survol. Dans le cadre de ce projet, nous nous plaçons dans un contexte de laboratoire, où l'influence des différents paramètres et de leurs interactions doit être contrôlée.

Ce positionnement particulier n'est pas sans conséquence sur le choix de la méthodologie qui va être suivie afin d'établir la base d'échantillons sonores de survol pour les expériences perceptives. En effet, la volonté d'avoir à disposition des sons dont il est possible de contrôler les paramètres incite fortement à utiliser des sons de synthèse, qui peuvent permettre de faire varier à volonté ces paramètres indépendamment les uns des autres.

Cet article présente donc le principe de synthèse qui a été adopté et la mise au point du modèle qui sera utilisé afin de générer les corpus sonores des expériences perceptives subséquentes. La section 2 détaille la problématique de la synthèse sonore dans le cadre du projet qui a conduit à la mise au point de deux modèles de synthèse complémentaires. La section 3 décrit les différentes étapes constituant le premier de ces modèles. La section 4 expose les résultats obtenus grâce à ce modèle à partir de l'analyse d'enregistrements réalisés à proximité d'aéroports. La section 5 évoque le second modèle et les résultats obtenus à

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

²<http://www.iroqua.fr/>

partir de simulations acoustiques. Enfin, la section 6 expose les principales conclusions de cette étude.

2 La synthèse sonore dans le projet PARASOFT : deux modèles complémentaires

Historiquement, deux grandes approches de la synthèse sonore se sont développées : la synthèse par modèle physique, et la synthèse par modèle de signal (voir l'ouvrage de Road [7] pour une description complète). La première modélise le comportement physique et vibratoire des sources sonores, et passe par conséquent par une entière compréhension des mécanismes responsables de la production sonore. Cette approche permet notamment d'obtenir le rendu sonore de configurations qu'il aurait été difficile d'entendre autrement (par exemple, le son produit par un nouveau type de motorisation, encore en cours de développement), mais souffre généralement d'une grande complexité de mise en œuvre et doit souvent faire l'objet d'un compromis entre approximations du modèle et qualité du rendu sonore. La seconde approche consiste à reproduire un signal existant à l'aide de signaux élémentaires (impulsions, sinus, bruit, etc.) et d'outil de traitement du signal (transformée temps-fréquence, filtrage, etc.). Cette méthode permet souvent un rendu synthétisé très fidèle, certains algorithmes informés permettant même la reproduction à l'identique d'un signal. En revanche, les paramètres de synthèse sont souvent peu contrôlables et l'absence de lien avec la physique des sources est souvent problématique pour des applications de design sonore par exemple.

Dans le cadre du projet PARASOFT, deux modèles hybrides entre ces approches ont été mis en œuvre (on parle de « modèle de signal physiquement informé » [8][9]). Dans les deux cas, le signal sonore est calculé par synthèse additive à partir de ses caractéristiques spectro-temporelles au point récepteur. Par ailleurs, bien que les signaux générés par les deux modèles soient monophoniques, ils seront à terme auralisés afin de rendre compte de l'aspect spatial du survol.

Dans le premier modèle (nommé par la suite « modèle A »), les caractéristiques du son de survol sont obtenues en supposant que les sources émettent un signal stationnaire (sinusoïdes + bruit), et en appliquant un modèle physique simplifié de la propagation acoustique jusqu'au point récepteur. Le modèle A est résumé par le schéma de la Figure 1.

Dans le second modèle (nommé par la suite « modèle B »), les caractéristiques spectro-temporelles du bruit au sol sont calculées à partir des données physiques des sources et de la trajectoire à l'aide de la plateforme IESTA de l'ONERA [10]. Le modèle B est résumé par le schéma de la Figure 2.

Cette double approche présente l'avantage de pouvoir faire varier facilement les différentes composantes des sources (modèle A) pour les faire correspondre à une très large variété d'appareils existants ou non, tout en s'assurant que le signal résultant corresponde dans tous les cas à des phénomènes (sources, trajectoires, environnement) réalistes, en particulier par comparaison avec le modèle B. Par la suite, seul le modèle A est décrit en détail (section 3), la plateforme IESTA faisant l'objet d'une présentation séparée au cours du congrès [10].

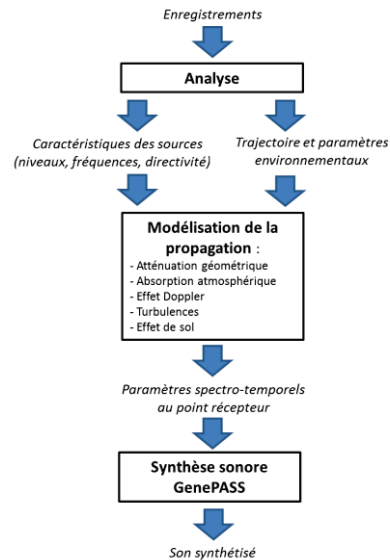


Figure 1 : Schéma résumant le modèle de synthèse A.

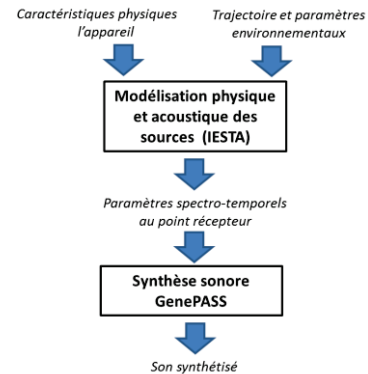


Figure 2 : Schéma résumant le modèle de synthèse B.

3 Description du modèle A

Le modèle A est fondé sur les hypothèses suivantes (voir notamment le schéma de la Figure 3) :

- L'avion est constitué d'un ensemble de sources ponctuelles directives, dont la position au cours du temps est confondue en un même point ;
- Ces sources émettent un signal stationnaire constitué d'une somme de sinusoïdes et d'un bruit large-bande ;
- La trajectoire de l'avion est rectiligne uniforme et passe à la verticale du point récepteur ;
- Les conditions atmosphériques sont supposées homogènes (sans vent ni gradient de température). L'effet de turbulences éventuelles est pris en compte par un modèle empirique ;
- Les caractéristiques acoustiques du sol sont modélisées par un coefficient de réflexion spéculaire dépendant de la fréquence, et indépendant de l'angle d'incidence.

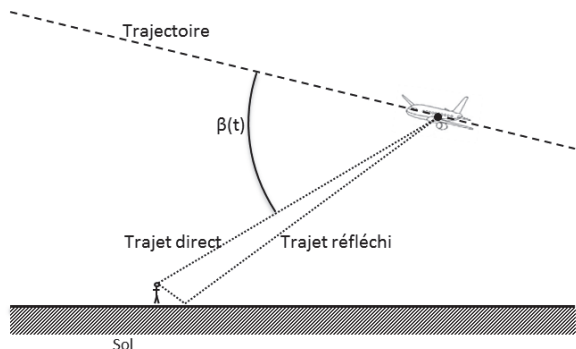


Figure 3 : Schéma de la description de la trajectoire utilisée dans le modèle.

3.1 Modélisation des sources

Les sources sur l'avion sont modélisées par des sources ponctuelles équivalentes, caractérisées par leur directivité, et le spectre du signal émis.

Spectre du signal émis

Le spectre du signal émis est décrit par deux composantes :

- Un bruit large-bande stationnaire, caractérisé par une enveloppe spectrale $N_e(f)$, échantillonnée sur le nombre de points fréquentiels désiré. Dans les exemples générés, seuls 6 points fréquentiels sont spécifiés (0, 100, 800, 1000, 5000 et 10000 Hz).
- Des sinusoïdes, qui sont classées selon trois catégories :
 - raies isolées, telles que celles générées par la soufflante ou par des cavités ;
 - séries de raies harmoniques (contribution du BSN, ou d'hélices simples) ;
 - séries de raies inharmoniques (contribution d'hélices contra-rotatives).

Pour le BSN, la fondamentale f_0 se situe le plus souvent entre 50 et 100 Hz, selon le régime moteur, et les partiels harmoniques sont pris en compte jusqu'à 5000 Hz. Pour la raie de soufflante, la fréquence fondamentale correspond à Nf_0 , où N est le nombre de pales de la soufflante, et un seul partiel harmonique est pris en compte. Dans le cas du BSN, les niveaux des partiels à l'émission sont spécifiés par une enveloppe spectrale $BSN_e(f)$, spécifiée pour les exemples générés en 7 points fréquentiels (0, 300, 500, 1000, 1500, 5000 et 10000 Hz). Pour la raie de soufflante, les niveaux sont spécifiés directement aux 2 fréquences prises en compte. Cette description est également reproduite, le cas échéant, pour toute autre émergence harmonique.

Directivité

A chacune de ces sources ponctuelles équivalentes est associée une directivité décrite par un gain $D(\beta, f)$ en dB spécifié à différents angles d'émission β et différentes fréquences f . Dans les exemples générés, ce gain est défini pour 5 fréquences (0, 500, 1000, 2500 et 20000 Hz) et pour 7 angles d'émission de 0° à 180° par pas de 30° .

Les caractéristiques de directivité des sources influencent l'enveloppe temporelle du signal sonore au point récepteur : une directivité marquée a tendance par

exemple à entraîner une brusque variation de niveau lorsque le récepteur entre dans le lobe de directivité de la source.

A chaque instant t , le gain à appliquer est obtenu par interpolation linéaire des valeurs de directivité des sources à la fréquence considérée et à l'angle d'émission $\beta(t)$.

3.2 Modélisation de la propagation

La propagation acoustique entre l'avion et le point récepteur fait intervenir plusieurs phénomènes qui sont décrits ci-dessous.

Atténuation géométrique

L'atténuation géométrique $A_{div}(t)$ en dB correspond à la dispersion énergétique d'une source supposée ponctuelle (Eq. (1)).

$$A_{div}(t) = 20 \log \left(\frac{1}{d(t)} \right) \quad (1)$$

où $d(t)$ est la distance source récepteur en mètres. Dans le cas d'un survol, cette distance dépend du temps, et l'atténuation géométrique dépend donc également du temps.

Absorption atmosphérique

L'absorption atmosphérique $A_{atm}(t, f)$ en dB correspond à la dissipation énergétique de l'onde sonore entre le point émetteur et le point récepteur (Eq. (2)).

$$A_{atm}(t, f) = \frac{\alpha(f) \cdot d(t)}{1000} \quad (2)$$

où $\alpha(f)$ est le coefficient d'atténuation atmosphérique en dB/km [11], et dépend de la fréquence, mais également de la température et du pourcentage d'humidité (fixés ici respectivement à 20°C et 50 %).

Effet Doppler

L'effet Doppler correspond à la déviation de fréquence entre le point émetteur et le point récepteur, qui résulte du déplacement de la source par rapport au point de réception. L'effet Doppler se traduit par le rapport $r_{dop}(t)$ entre la fréquence déviée à la fréquence à l'émission dont l'expression est donnée dans l'Eq. (3).

$$r_{dop}(t) = \frac{1}{1 - \frac{V}{c} \cdot \cos(\beta(t))} \quad (3)$$

où V est la vitesse de l'avion, c est la vitesse du son.

Turbulences atmosphériques

Au cours de la propagation, le signal sonore subit des fluctuations d'amplitudes qui peuvent être attribuées aux turbulences atmosphériques. Le modèle de turbulences utilisé est un modèle empirique fondé sur la génération aléatoire de modulations d'amplitude, dont les caractéristiques dépendent du temps et de la fréquence. L'amplitude maximale de modulation est spécifiée comme paramètre d'entrée, et est par la suite pondérée de sorte que les modulations soient d'autant moins importantes que l'avion est proche, et globalement plus faibles en basses qu'en hautes fréquences.

Effet de sol

L'effet de sol correspond à la réflexion du champ direct sur le sol. Dans le modèle, il est pris en compte en additionnant à la contribution du champ direct sa réplique retardée en fonction de la différence de marche entre le rayon direct et le rayon réfléchi, et filtrée pour prendre en compte l'absorption du sol.

3.3 Synthèse sonore

L'application des différentes étapes de propagation aux descriptions des sources émises permet d'obtenir les caractéristiques spectro-temporelles du son au point récepteur. L'étape de synthèse sonore, réalisée par le logiciel GenePASS, consiste à transformer ces données en un signal de pression dans le domaine temporel.

Les données d'entrée pour la synthèse sonore sont :

- $N_r(t_l, f_m)$ le niveau SPL moyen de la composante de bruit large-bande dans chaque bande de 1/3 d'octave de fréquence centrale f_m et pour chaque fenêtre temporelle centrée sur t_l ;
- $L_{r_i}(t_l)$ et $f_i(t_l)$, le niveau SPL et la fréquence instantanée de la $i^{\text{ème}}$ sinusoïde à l'instant t_l .

La composante correspondant au bruit large-bande est synthétisée par méthode Overlap Add [12]. Cette méthode d'analyse-synthèse est fondée sur la décomposition du signal temporel en une succession de fenêtres recouvrantes. Pour la partie synthèse, l'algorithme consiste à créer, dans chaque fenêtre, un spectre à court terme dont le module est obtenu par interpolation en bandes fines de $N_r(t_l, f_m)$, et la phase est générée par tirage aléatoire. Ce spectre à court terme est ensuite inversé par IFFT, puis ajouté avec recouvrement au signal temporel final (procédé Overlap Add).

Un signal temporel est généré indépendamment pour chaque composante tonale i . Pour cela, l'amplitude instantanée est obtenue par interpolation du niveau SPL $L_{r_i}(t_l)$. De même, la phase instantanée est calculée par l'interpolation linéaire puis intégration numérique de la fréquence $f_i(t_l)$ pour chaque échantillon du signal.

Les signaux temporels correspondant à la composante de bruit large-bande et aux composantes tonales sont ensuite additionnés. Enfin, l'effet des turbulences atmosphériques et l'effet de sol sont appliqués tel que décrit plus haut au signal résultant.

4 Résultats de synthèse du modèle A à partir d'enregistrements

Une campagne d'enregistrement de survols a été réalisée près des aéroports de Marseille-Provence et de Paris Charles-de-Gaulle. Ces enregistrements avaient un objectif double :

- Identifier des paramètres de sources, de trajectoire (altitude, vitesse, ...) et d'environnement réalistes pour la synthèse ;
- Valider par comparaison à l'écoute le réalisme des synthèses effectuées.

Des enregistrements de décollages et d'atterrissages ont été réalisés à une distance variant de 2 à 3,5 km des pistes, à l'aide d'un microphone ambisonique SoundField ST450, d'une tête artificielle Cortex MK2 et d'un enregistreur Sound Devices 788T. Le signal utilisé pour l'analyse-synthèse correspond à la composante omnidirectionnelle (voie W) du signal ambisonique. L'ensemble des 4 composantes seront à terme utilisées pour déterminer la position angulaire exacte de l'avion au cours du temps.

Le microphone était placé à 1,65 m du sol dans l'axe du survol. Un grand nombre de modèles d'avion ont ainsi pu être enregistrés.

A partir de ces enregistrements, des paramètres du modèle A (termes sources, trajectoire, environnement) ont été déterminés par itérations successives (synthèse-écoute-ajustement des paramètres). Cette méthode a permis d'effectuer la synthèse de 12 modèles différents au décollage : Airbus A318, A319, A320, A330 et A380, Boeing 737, 767 et 777, Embraer ERJ145 et ERJ190, De Havilland Canada DHC8 et BAe Systems 146.

La Figure 4 montre par exemple la représentation temps-fréquence d'un décollage d'A320. La Figure 5, la Figure 6 et la Figure 7 montrent respectivement la représentation temps-fréquence de la synthèse seule du bruit large-bande, de la raie de soufflante et du BSN, correspondant à cet enregistrement. La Figure 5 permet notamment de voir les effets de turbulences (modulations d'amplitudes plus visibles entre les secondes 18 et 23) et l'effet de sol (filtrage en peigne). Enfin, la Figure 8 montre le résultat final de la synthèse d'A320 au décollage.

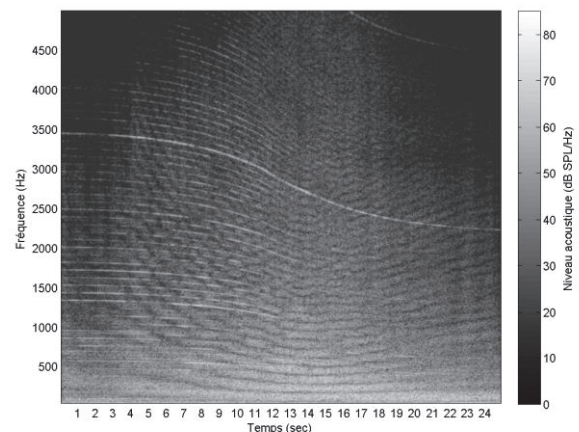


Figure 4 : Représentation temps-fréquence d'un enregistrement d'A320 au décollage.

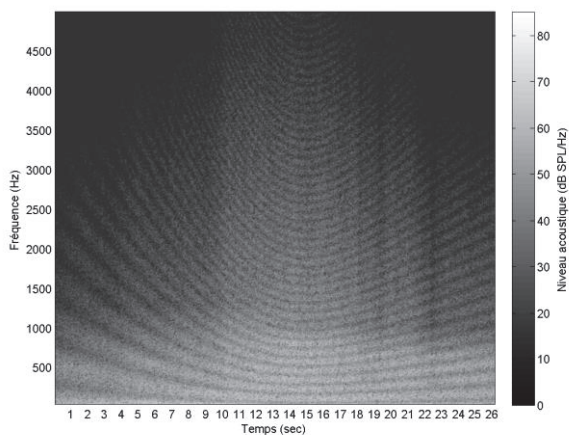


Figure 5 : Représentation temps-fréquence de la synthèse du bruit large-bande seul d'un A320 au décollage (modèle A).

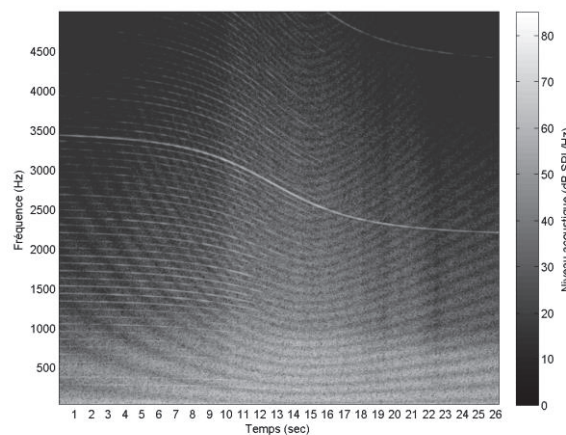


Figure 8 : Représentation temps-fréquence de la synthèse finale d'un A320 au décollage (modèle A).

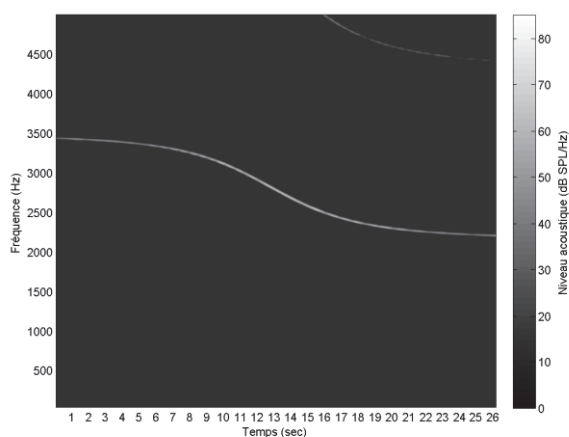


Figure 6 : Représentation temps-fréquence de la synthèse de la raie de soufflante seule d'un A320 au décollage (modèle A).

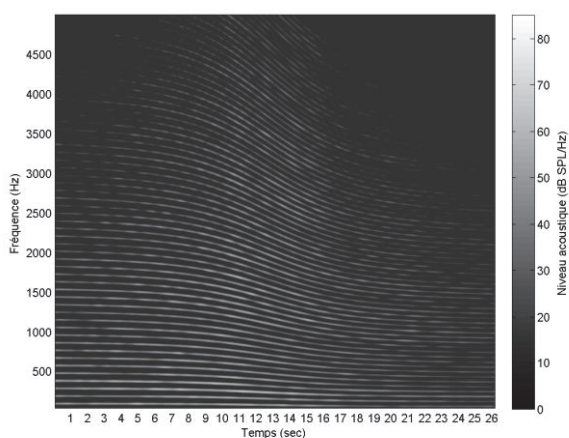


Figure 7 : Représentation temps-fréquence de la synthèse du BSN seul d'un A320 au décollage (modèle A).

5 Résultats de synthèse du modèle B à partir de données IESTA

Dans le modèle B (voir Figure 2), la contribution des sources ainsi que la propagation jusqu'au point récepteur sont modélisées par la plateforme IESTA de l'ONERA [10] (en remplacement donc des étapes du modèle A décrite en sections 3.1 et 3.2, à l'exception des turbulences et de l'effet de sol). Ces données sont ensuite utilisées pour générer un signal temporel en appliquant la synthèse sonore décrite en section 3.3. Ce modèle complémentaire présente l'intérêt de permettre de simuler des procédures opérationnelles de vol en prenant en compte les variations de régime, de vitesse et de configuration de l'avion.

Les données de sortie de la plateforme IESTA utilisées pour la synthèse sonore au point récepteur sont les suivantes :

- Une composante large-bande décrite par le niveau de bruit dans chaque bande de 1/3 d'octave entre 25 Hz et 16 kHz, par pas de 0,5 secondes ;
- Une série de sinusoïdes définies par leur niveau et leur fréquence instantanés, par pas de 0,5 secondes ;
- Un jeu de coordonnées de l'avion, relatives au point récepteur, par pas de 0,5 secondes.

Ces données ont été générées pour un A320 au décollage, pour un A340 au décollage et à l'atterrissage, et pour une simulation de CROR (*Counter Rotating Open Rotor*) en survol à altitude constante. Les résultats de synthèse pour l'A320 au décollage et pour le CROR sont montrés respectivement en Figure 9 et en Figure 10.

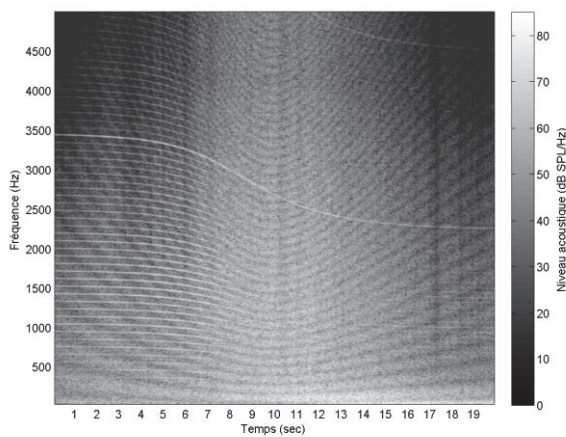


Figure 9 : Représentation temps-fréquence de la synthèse d'un A320 au décollage (modèle B).

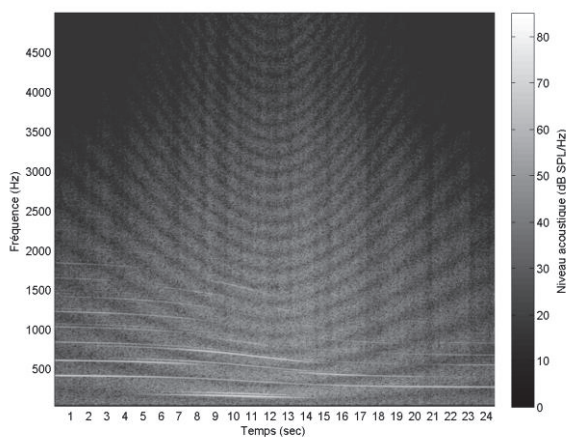


Figure 10 : Représentation temps-fréquence de la synthèse d'un CROR en survol (modèle B).

6 Conclusion

Cet article présente un modèle simplifié de synthèse sonore de survols (modèle A). Le principe de synthèse peut être vu comme une synthèse par modèle de signal physiquement informé. Les sources sont décrites par une somme de signaux élémentaires (sinusoïdes et bruit large-bande). La propagation est modélisée physiquement. Le signal de pression au point récepteur est synthétisé par des outils de traitement du signal (filtrage, synthèse additive) à partir des données spectrales. Cette modélisation permet d'avoir à disposition un outil de synthèse générique, rapide et aisément contrôlable. Il est notamment très simple de modifier par exemple la vitesse ou l'altitude de l'avion, ou bien les niveaux relatifs du bruit large-bande, du BSN ou de la raie de soufflante.

Un second modèle (modèle B) a également été présenté. Ce modèle offre l'avantage de pouvoir synthétiser des sons de survols à partir des paramètres physiques des sources et de procédures standard de vol. Ce modèle offre également la possibilité d'obtenir une idée du son qui pourrait être produit par un appareil ou un système en cours de développement (CROR). Il est en revanche moins souple que le modèle A pour étudier l'influence des composantes du signal sonore sur la perception du bruit de survol.

Les résultats de synthèse ont été comparés à des enregistrements de survols de nombreux modèles d'avion effectués à proximité des aéroports de Roissy-Charles-de-Gaulle et de Marseille-Provence. Ces enregistrements ont en outre permis d'ajuster les paramètres de synthèse, notamment des sources à l'émission (pour le modèle A). Pour les différents modèles, les sons synthétisés sont proches des sons enregistrés.

Dans la suite immédiate du projet PARASOFT, ce modèle va être utilisé afin de constituer une base sonore de survols, permettant de comparer l'influence des différentes caractéristiques sonores indépendamment les unes des autres. Cette base de données servira ensuite pour l'étude perceptive de l'influence de ces paramètres, afin, à terme, d'objectiver le désagrément des riverains d'aéroport.

Références

- [1] H. M. Miedema, 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] B. Barbot, *Aircraft noise perceptual characterization*, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise (2008).
- [4] S. E. More, *Aircraft noise characteristics and metrics*, Thèse de doctorat, Purdue University (2010).
- [5] R. Guski, U. Felscher-Such, R. Schuemer. The concept of noise annoyance: how international expert see it, *Journal of Sound and Vibration* **223**(4), 513-527 (1999).
- [6] T. J. Schultz, Synthesis of social surveys on noise annoyance, *Journal of the Acoustical Society of America* **64**(2), 377-405 (1978).
- [7] C. Road, *The computer music tutorial*, MIT Press (1996).
- [8] X. Serra, *A system for sound analysis/transformation/synthesis based on a deterministic plus stochastic decomposition*, Thèse de doctorat, Stanford University (1989).
- [9] P. R. Cook. Physically informed sonic modeling (phism): Synthesis of percussive sounds. *Computer Music Journal*, **21**(3), 38-49 (1997).
- [10] I. Legriffon, Evaluation de la chaîne acoustique CARMEN de IESTA sur des essais en phase de décollage, *Actes du 12^e Congrès Français d'Acoustique*, Poitiers (2014).
- [11] ISO 9613-2, *Acoustics, Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2: General method of calculation* (1996).
- [12] J.B. Allen, L.R. Rabiner, A Unified Approach to Short-Time Fourier Analysis and Synthesis, *Proceedings IEEE* **65**(11), 1558-1564 (1977).