

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Monitoring du bruit des avions : une détection à partir du signal audio

Christophe Rosin¹, Bertrand Barbo¹, Boris Défréville²

¹Aéroports de Paris - Laboratoire, Orly Sud 103, F-94396 Orly Aéroport cedex, {christophe.rosin,bertrand.barbo}@adp.fr

²Orelia SAS, 1 rue du port de Valvins, F-77210 Avon, boris.defreville@orelia.fr

La gestion des nuisances et l'intégration dans leur environnement est un des enjeux des grandes infrastructures tels que les aéroports internationaux. En matière de bruit généré par le trafic aérien, Aéroports de Paris s'est vu confier par l'État les missions d'assurer la réalisation des mesures de bruit, conformément aux prescriptions de l'ACNUSA (Autorité de Contrôle des Nuisances Sonores Aéroportuaires), et de mettre à la disposition du public les informations environnementales et les résultats des mesures sur les nuisances sonores causées par les aéronefs.

Aéroports de Paris dispose d'un réseau d'une quarantaine de stations de mesure de bruit installées autour des aéroports parisiens. Ces stations mesurent en continu le niveau sonore et détectent automatiquement les événements acoustiques aéronautiques par l'analyse de l'évolution du niveau sonore. Par ailleurs, les informations de vol des aéronefs reçues en temps réel par un radar secondaire permettent d'identifier précisément les avions mesurés. L'ensemble de ces données est ensuite analysé à travers plusieurs indicateurs statistiques.

L'indicateur annuel IGmp (Indicateur Global Mesuré Pondéré, arrêté du 28 janvier 2003) qui limite l'impact sonore du trafic aérien sur l'aéroport de Paris-Charles de Gaulle impose d'obtenir une mesure acoustique exhaustive de chaque survol d'aéronef. Cette exigence nécessite d'améliorer la robustesse de la détection acoustique et de la corrélation avec les traces radars.

Pour répondre à cette volonté d'amélioration du système, le Laboratoire d'Aéroports de Paris teste une nouvelle technologie dont le principe consiste en une analyse fine du signal audio. L'efficacité de ce nouveau système est comparable à l'oreille humaine et montre un solide potentiel pour améliorer la détection des bruits d'avions, et par conséquent la qualité des indicateurs de bruit.

1 Introduction

Au cours des dernières décennies, la réduction du bruit des avions est devenue une préoccupation majeure pour les acteurs du transport aérien. L'impact du bruit autour des aéroports civils n'a cessé de réduire grâce aux progrès technologiques des motoristes et des aviateurs et de l'amélioration des procédures d'approche et de décollage.

En matière de bruit généré par le trafic aérien, Aéroports de Paris s'est vu confier par l'État les missions d'assurer la réalisation des mesures de bruit, conformément aux prescriptions de l'ACNUSA (Autorité de Contrôle des Nuisances Sonores Aéroportuaires), et de mettre à la disposition du public les informations environnementales et les résultats des mesures sur les nuisances sonores causées par les aéronefs.

2 Présentation du réseau de monitoring du bruit

Aéroports de Paris dispose d'un réseau d'une quarantaine de stations automatiques de mesures de bruit autour des deux grandes plateformes parisiennes Paris – Charles de Gaulle, Paris – Orly, de l'aéroport d'affaire Paris – Le Bourget, autour de l'héliport d'Issy les Moulineaux ainsi qu'autour des aéroports d'aviation légère de Toussus le Noble et de Pontoise - Corneilles.

Les stations de mesure sont principalement positionnées sous l'axe de survol des avions, dans des zones relativement calmes où les émergences du bruit des aéronefs sont

importantes. A Paris - Charles de Gaulle et Paris - Orly, les stations sont installées jusqu'à des distances d'environ quinze kilomètres dans l'alignement des pistes, et jusqu'à deux kilomètres en latérale des pistes. Au-delà de ces distances, les limites de surveillance du bruit sont atteintes, l'émergence des bruits d'avions devient faible comparée au niveau de bruit résiduel des zones urbanisées.

Les stations mesurent en continu (par pas de une seconde) les niveaux sonores en dB(A) et par bandes de tiers d'octave. Les événements acoustiques attribués aux survols d'aéronefs sont détectés de manière automatique par la méthode de dépassement de seuil. L'évolution temporelle du niveau sonore est analysée ; dès que le niveau seuil est dépassé pendant une certaine durée, un événement sonore est codé.

En parallèle de ces mesures de bruit, les informations de vol de chaque aéronef sont reçues en temps réel par un radar secondaire. Le croisement des données acoustiques et trajectographiques permet d'identifier précisément chaque avion mesuré (immatriculation de l'avion, numéro de vol, compagnie aérienne, groupe acoustique...). Le principe de la corrélation des données est synthétisé par le schéma suivant :

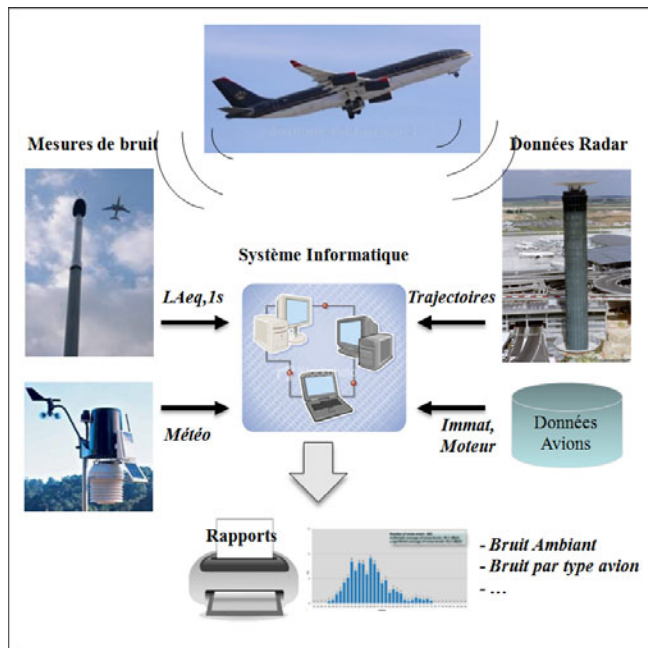


Figure 1 : Schéma du système de monitoring du bruit d'avion

Ces données sont ensuite étudiées au travers d'indicateurs statistiques. Deux types d'analyses sont réalisés suivant une approche quantitative et qualitative. L'approche quantitative permet d'analyser d'une manière globale l'impact sonore de l'ensemble du trafic sur un site et pour une période. Les indicateurs utilisés sont le niveau de bruit ambiant et la contribution du bruit des avions dans ce bruit ambiant. L'approche qualitative, pour laquelle les informations trajectographiques sont indispensables, permet d'analyser l'impact sonore de chaque survol d'avion. L'indicateur utilisé est généralement le niveau maximum ($L_{Aeq,1s,max}$ noté L_{Amax}). Cette analyse détaillée permet de suivre l'évolution du bruit et de la flotte sur chaque site de mesure.

Par ailleurs, à la demande de l'État Français (arrêté du 28 janvier 2003), un Indicateur Global Mesuré Pondéré (IGmp) est calculé chaque année pour limiter l'impact sonore du trafic aérien sur l'aéroport de Paris-Charles de Gaulle. Cet indicateur, calculé à partir des niveaux de bruit maxima des avions L_{Amax} , impose d'obtenir une mesure acoustique exhaustive de chaque survol d'aéronef. Ceci nécessite d'améliorer la robustesse de la détection acoustique et la corrélation avec les traces radars. Un système tel que la reconnaissance audio des bruits d'avions permet de répondre à ces exigences.

3 Reconnaissance du bruit des avions

L'homme, grâce à ses oreilles a appris à identifier facilement le bruit des avions. Le son entendu est analysé par le cerveau qui instantanément compare aux expériences antérieures où l'avion était à la fois vu et entendu, la vue et le bruit étant associé l'un à l'autre. Dans le cas d'un système de mesure avec reconnaissance des sources, le microphone cherche à remplacer l'oreille et l'ordinateur cherche à remplacer le cerveau. L'identification des sources impose donc de savoir les décrire et de définir de bons descripteurs traduisant les caractéristiques physiques propres à chaque type de bruit. La définition des descripteurs physiques est une étape essentielle pour garantir une identification des

bruits des avions avec une performance proche de l'oreille humaine.

En traitement du signal, les descripteurs physiques d'une source sonore sont des assemblages d'opérateurs mathématiques spécifiques qui caractérisent toutes les variations sonores au sein d'une même famille de bruit particulier. Ces descripteurs décrivent des variations à la fois sur les plans temporel et spectral.

Un descripteur de bruit d'avion doit être capable de reconnaître un bruit émis par tous les types d'avion dans toutes leurs phases de vol ; que ce soit un Airbus ou un Boeing (par exemple), équipés de moteurs Rolls Royce, Snecma ou Pratt & Whitney, pendant les phases d'approche, de décollages ou d'atterrissages, pour des niveaux sonores faibles ou élevés, à des altitudes variables.

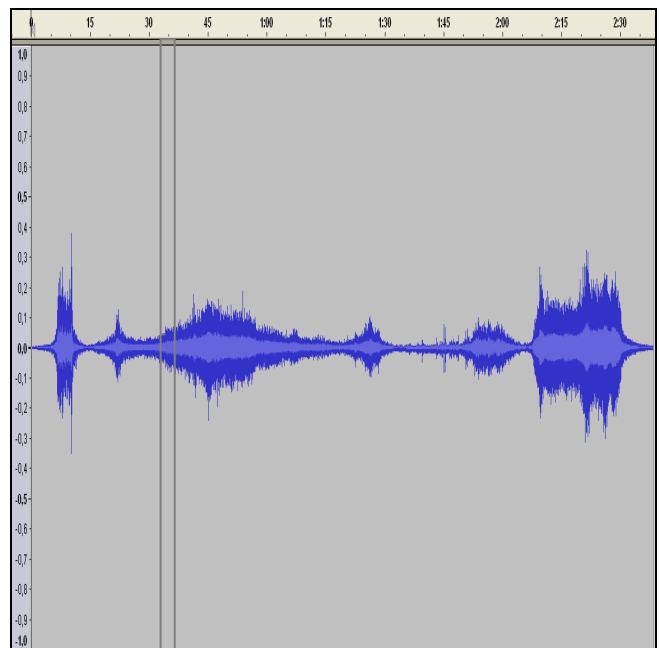


Figure 2 : Évolution temporelle d'un signal audio de différentes sources (durée 2 minutes 45 secondes) : train, motocyclette, avion, automobile, voix parlée puis train.

La figure ci-dessus est l'évolution temporelle d'un signal composé de différentes sources de bruit. Elle illustre le manque d'informations spécifiques qui pourrait garantir qu'un événement sonore est un bruit d'avion. Les paramètres d'intensité sonore et de temps ne sont pas suffisants pour décrire des familles de bruits bien particuliers.

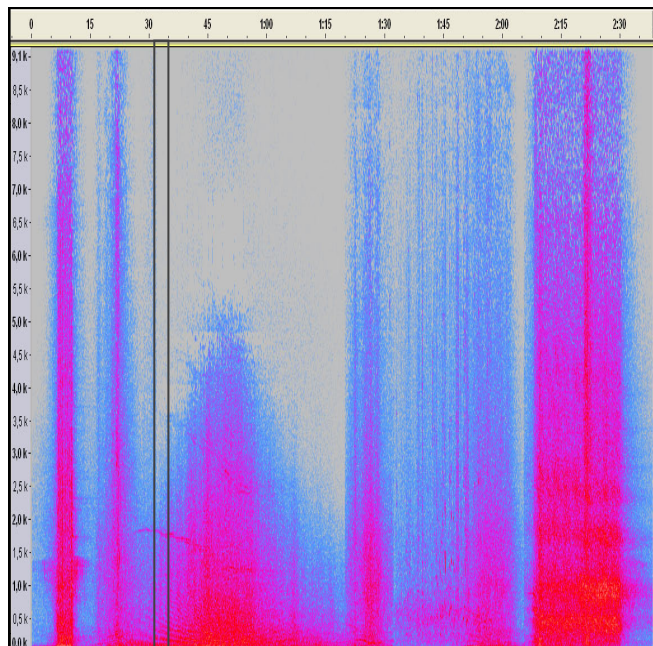


Figure 3 : Sonogramme du signal audio de la figure 2

La figure 3 fournit une information tridimensionnelle d'une source de bruit : spectre en ordonnée - temps en abscisse - intensité en code couleur (élevée en rouge, faible en gris). Grâce à cette évolution temporelle de l'intensité spectrale, il est possible de visualiser et d'extraire certaines caractéristiques de chaque source de bruit.

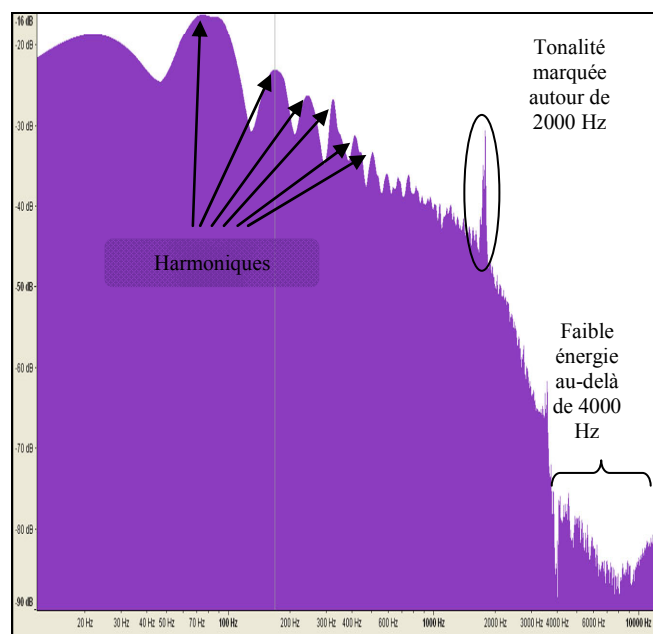


Figure 4 : Représentation 2D du spectre (intensité de chaque fréquence à un instant donné) pour la seconde 35 (figures 2 et 3) – illustration des caractéristiques d'un bruit d'avion

La figure 4 correspond à une coupe du sonogramme à un instant donné où un avion survole le microphone. On distingue nettement que le bruit de l'avion a trois caractéristiques:

- des harmoniques en dessous de 1000 Hz
- une tonalité marquée autour de 2000 Hz
- une énergie sonore faible au-delà de 4000 Hz.

Ces trois caractéristiques se retrouvent sur chaque mesure d'avion. Elles varient selon le type de survol (approche, décollage, montée, palier) et selon l'emplacement relatif de l'avion par rapport au point de mesure. Les variations portent sur le nombre et la fréquence des harmoniques, la fréquence et le niveau de la raie marquée, et la hauteur spectrale à partir de laquelle il y a une chute de l'énergie sonore.

Pour définir les descripteurs physiques des bruits d'avion, toutes ces variations doivent être prises en considération. Pour cela, une importante phase «d'apprentissage» est réalisée selon une méthode de classification d'échantillons, l'objectif étant de discriminer de la meilleure manière les échantillons sonores d'aéronefs des échantillons correspondant à toutes les autres sources sonores.

La figure 5 suivante est une représentation en 2D de deux caractéristiques. Les événements sonores étiquetés comme bruit d'avions sont colorés en bleu, les échantillons étiquetés comme autres sources sonores en rouge. La phase d'apprentissage permet de définir la frontière la plus adaptée pour discriminer les deux catégories. Ici, la ligne verte représente une frontière trop drastique alors que la ligne pourpre correspond à un «sur-apprentissage». La ligne noire représente la délimitation appropriée.

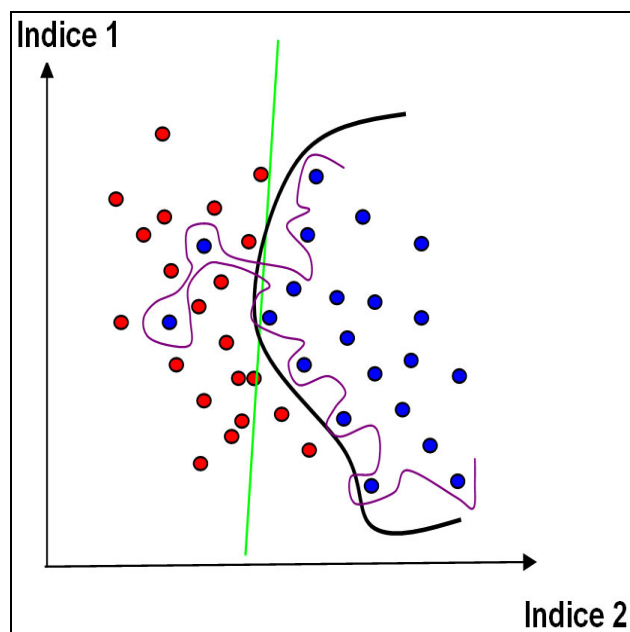


Figure 5 : Illustration des différentes délimitations possibles définies pendant la phase d'apprentissage pour identifier les événements sonores d'aéronefs. La ligne noire représente la discrimination appropriée des échantillons de deux familles suivant deux descripteurs

Tout nouvel échantillon positionné sur la droite de la limite adéquat sera identifié comme un événement sonore d'avion, et vice versa, tout nouvel échantillon positionné sur la gauche de la frontière sera considérée comme un événement sonore "non" avion.

Les systèmes traditionnels de reconnaissance reposent sur un nombre fixe de caractéristiques (descripteurs) du signal sonore, quelle que soit la source à identifier. De telles méthodes sont performants dans le domaine de la reconnaissance vocale (il y a un dictionnaire de mots), mais n'est pas approprié pour les bruits de l'environnement qui sont par définition plus complexes et non-stationnaires.

L'avantage de ce système réside dans sa capacité à généraliser des descriptions de sources sonores uniquement à partir d'un nombre d'exemples relativement faible lors de la phase d'apprentissage.

4 Amélioration du système traditionnel grâce à la reconnaissance

4.1 Validation du système de reconnaissance

Le Laboratoire d'Aéroports de Paris a effectué un test sur 31 séquences sonores de 15 minutes, soit 465 minutes de signal audio. Ces données proviennent de différentes stations de mesures de bruit du réseau de surveillance autour des aéroports Paris – Charles de Gaulle et Paris - Le Bourget (cf. figure 6). Les séquences sonores couvrent un large éventail de situations : conditions météorologiques favorables et défavorables, bruit ambiant faible et élevé (parfois des périodes de bruit de chantier). Globalement, les conditions sont assez défavorables à une bonne reconnaissance des sources de bruit.

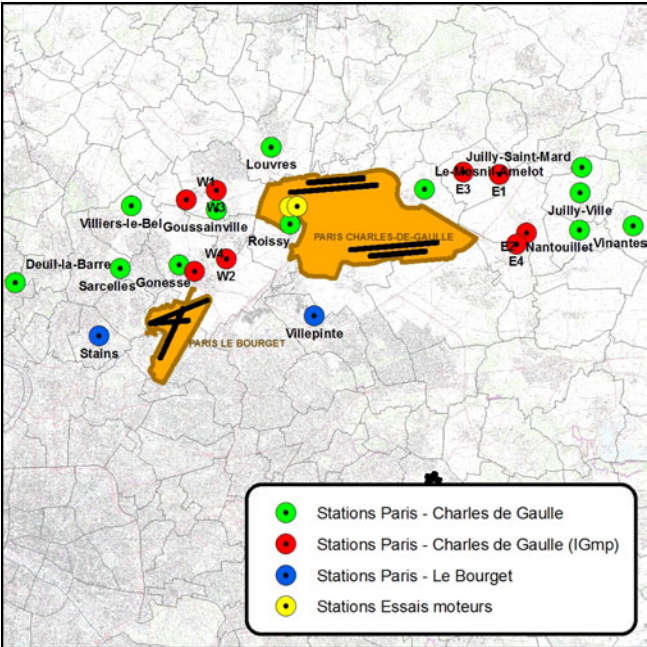


Figure 6 : Station de surveillance du bruit autour des aéroports Paris - Charles de Gaulle et Paris - Le Bourget (la totalité du réseau comprend une quarantaine de stations en Ile de France).

Les données audio traitées sont d'une qualité médiocre (codage en 24 bits, avec une fréquence d'échantillonnage de 24 kHz et un débit de 40 kbits/s). Le traitement est réalisé en temps réel, en rejeu il peut être réalisé à une vitesse supérieure. Les résultats sont écrits simplement dans un fichier de type texte ou xml. Une interface graphique permet en parallèle de visualiser rapidement les résultats de reconnaissance des aéronefs, d'écouter et de visualiser le signal audio de la période analysée, et d'afficher les survols d'avions pendant la période traitée.

La figure 7 suivante présente un exemple de visualisation des résultats de la reconnaissance pour une séquence audio provenant de la station de Gonesse le 10 mars 2008, à 19 heures. De haut en bas sont représentés : le signal sonore, les événements sonores des aéronefs tels qu'ils sont détectés par le système d'Aéroports de Paris

(dépassement de seuil), le niveau maximum correspondant, l'information trajectographique, la reconnaissance des sources sonores par l'oreille humaine, et enfin les événements provenant du système de reconnaissance des bruits d'avions à partir du signal audio.

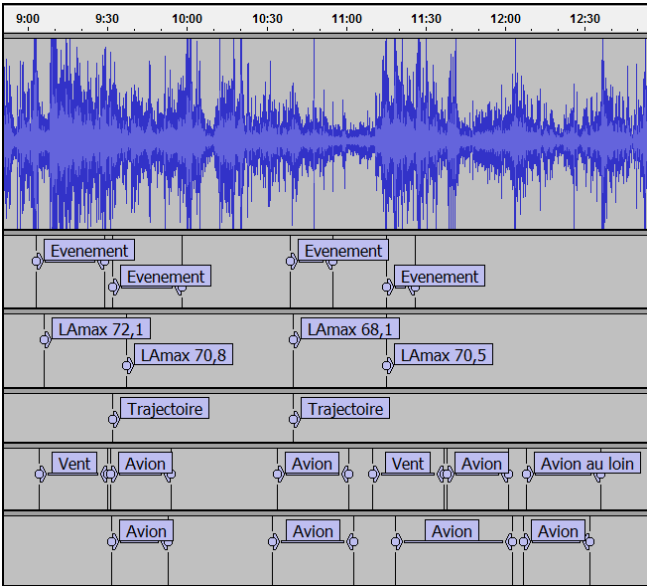


Figure 7: Comparaison des systèmes de détection d'avions (dépassement de seuil et niveau maximum associé, trace radar, écoute humaine, système de reconnaissance audio).

Sur la période analysée, un auditeur expert des bruits de l'environnement a identifié 170 événements sonores d'avions, tous confirmés par une trajectoire. Le système de reconnaissance a détecté 166 événements de bruits aéronautique ce qui correspond à un taux de reconnaissance de 98%. Ce résultat met l'accent sur les performances du logiciel. L'écoute attentive des quatre aéronefs non détectés par le système de reconnaissance a permis de constater que les conditions météorologiques étaient très mauvaises, l'oreille humaine de l'expert étant elle-même très hésitante sur la reconnaissance.

Événement acoustique	Début	09:03	09:32	10:39	11:15		
	Fin	09:29	09:58	10:55	11:26		
L _{Amax}	Heure	09:06	09:37	10:40	11:15		
	en dB(A)	72,1	70,8	68,1	70,5		
Trace radar	Heure	09:32		10:40			
Écoute humaine	Début	09:04	09:31	10:34	11:10	11:38	12:08
	Fin	09:30	09:54	10:10	11:37	12:01	12:04
	Étiquette	Vent	Avion	Avion	Vent	Avion	Avion au loin
Reconnaissance	Début		09:32	10:32	11:19	12:07	
	Fin		09:53	11:03	12:03	12:32	
	Étiquette		Avion	Avion	Avion	Avion	

Table 1: Détails des résultats des différentes détections indiquées sur la figure 7

Les deux premiers événements sonores sont associés à la même trajectoire de vol. Le système de reconnaissance indique que le premier événement n'est pas un avion, ce qui est confirmé par l'expert qui entend un bruit de vent. Le deuxième événement est reconnu comme étant un bruit d'avion tant par l'expert que par le logiciel de reconnaissance. Ici, on constate que la reconnaissance permet de repérer le faux événement de la liste des événements sonores détectés.

Pour le troisième événement, les quatre systèmes de détection valident le survol d'un avion. Le système de reconnaissance détecte le bruit d'avion un peu plus tôt que les autres systèmes, pendant une durée légèrement plus longue. La reconnaissance permet d'affiner la durée d'un événement sonore mesuré.

Le quatrième événement n'a pas de correspondance avec une trajectoire. L'expert décrit un bruit de vent, suivi de bruits d'avions lointains. Sur ce site de mesure, il est courant d'entendre des avions au loin qui décollent ou atterrissent d'autres pistes de Charles de Gaulle ou du Bourget, sans survoler la station de mesure. Cet exemple montre que le système de reconnaissance est très sensible et est capable de détecter des bruits d'aéronefs éloignés du lieu de mesure.

4.2 Insertion dans le système existant : amélioration des résultats

La technique de reconnaissance a été testée en continu pendant 3 semaines sur le site de mesure de la station Thieux E2 à l'Est de l'aéroport Paris – Charles de Gaulle. Pour cette campagne de mesure, les données exploitables en parallèles sont donc les événements sonores détectés par la technique du dépassement de seuil, les niveaux maxima associés L_{Amax} , les périodes pour lesquelles le système de reconnaissance a détecté des avions, et les trajectoires des avions survolant le point de mesure. Les résultats sont indiqués dans le tableau 2.

Nombre de trajectoires		7480
Dépassement de seuil	Nombre d'événements sonores corrélés aux trajectoires	6501
	Taux de corrélation	87%
Dépassement de seuil et reconnaissance audio	Nombre d'événements corrélés aux trajectoires	6998
	Taux de corrélation	94%
Dépassement de seuil et reconnaissance audio du L_{Amax}	Nombre d'événements corrélés aux trajectoires	6805
	Taux de corrélation	91%

Table 2: Résultats de l'amélioration apportée par le système de reconnaissance des bruits d'avions.

Sur la période de mesure, les informations trajectographiques indiquent un nombre de 7480 survols d'aéronefs au-dessus du point de mesure. Le nombre d'événements sonores détectés de manière traditionnelle (dépassement de seuil) pour lesquelles il est possible de lier une information de vol est de 6501, soit un taux de corrélation de 87%.

L'ajout du filtre de reconnaissance des bruits d'avions permet d'augmenter le taux de corrélation à 94%. La

reconnaissance, en supprimant les faux événements augmente très nettement le nombre de bonnes associations.

En ce qui concerne l'indicateur global IGmp qui ne prend en compte que les niveaux de bruit maxima des survols d'avions, l'ajout du filtre de reconnaissance des bruits d'avions appliqué uniquement aux niveaux L_{Amax} permet d'obtenir un taux de corrélation de 91%. Au-delà du fait que le système apporte une amélioration qualitative par la validation de la source sonore mesurée, on constate à travers ce résultat, qu'il permet aussi d'augmenter significativement le nombre de mesures pour lesquelles il est possible d'obtenir des informations trajectographiques.

5 Conclusion

Le Laboratoire d'Aéroports de Paris améliore son système monitoring du bruit des avions en insérant un module de reconnaissance des sources à partir du signal audio. Cette technique permet de valider les événements sonores mesurés par la méthode de détection traditionnelle de dépassement de seuil. L'intérêt est de valider les bruits des avions en supprimant les faux événements, et de valider les niveaux de bruit maxima des survols d'avions.

Par ailleurs, la reconnaissance peut apporter des solutions aux aérodromes qui ne possèdent pas d'informations trajectographiques. C'est le cas des aérodromes dédiés à l'aviation légère qui accueillent de petits avions non pourvus de transpondeur. L'utilisation du système de reconnaissance des bruits d'avions permet d'identifier les sources sonores et de valider les événements sonores mesurés.

Certains appareils de mesure peuvent être situés à proximité d'autres axes de transports (autoroutes ou voies ferrées), ou à proximité de source parasites (ball-trap...). La reconnaissance permet alors de discriminer les sources dans un environnement multi-sources.

Dans les zones éloignées des aéroports, là où les émergences des avions sont faibles par rapport au bruit résiduel, le système de reconnaissance permet d'améliorer la détection et d'étendre le réseau de surveillance dans de nouvelles communes.

En monitoring du bruit, le vent est souvent un paramètre d'influence mal traité. Avec une phase d'apprentissage des bruits du vent, la reconnaissance peut apporter une meilleure maîtrise de la mesure.

Le système de reconnaissance présente des résultats proches de l'oreille humaine, et donc proche de ce que les populations autour des aéroports peuvent ressentir. La reconnaissance des avions est une forte attente de la part des riverains qui sont souvent prudents face aux mesures provenant des réseaux de surveillance du bruit.

Références

- [1] Barbo B., Rosin C., Machet J.M., Défréville B., "A pattern recognition approach for aircraft noise detection", *Internoise* (2009).
- [2] Barbo B., Machet J.M., "Air Traffic Noise Quota at Paris –Charles-de-Gaulle Airport, a Global Indicator from Actual Noise Levels", *Internoise* (2008).
- [3] McAdams S., "Recognition of sound sources and events", *Thinking in Sound: The Cognitive*

Psychology of Human Audition, Oxford University Press, 146-198 (1993).

- [4] Almuallim H., Dietterich T.G., "Learning boolean concepts in the presence of many irrelevant features", *Artificial Intelligence*, 69(1-2):279–305 (1994).
- [5] Koller D., Sahami M., "Toward optimal feature selection", *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Machine Learning*, 284–292 (1996).
- [6] Blum A.L., Rivest R.L., "Training a 3-node neural networks is NP-complete", *Neural Networks*, 5:117–127 (1992).
- [7] Défréville B., Roy P., Rosin C., Pachet F., "Automatic recognition of urban sound sources", *Audio Engineering Society*, 6827, (2006).