



Monitoring du bruit des avions : comparaison des indicateurs de bruit des avions calculés avec deux méthodes de détections différentes

C. Rosin et L. Iachino

Aéroports de Paris - Laboratoire, 103 Aérogare Sud - CS 90055, 94396 Orly Aerogare Cedex, France
christophe.rosin@adp.fr

Le système classique de monitoring du bruit des avions autour des aéroports est basé sur le croisement des mesures des niveaux sonores avec les informations aéronautiques provenant des traces radar. Dans certains cas, la détection des bruits d'avions fondée sur le dépassement de seuil et de durée montre ses limites en particulier pour certains indicateurs qui demandent de la précision et de l'exhaustivité. Depuis plusieurs années, Aéroports de Paris élabore une méthode de détection par validation multiple qui associe l'analyse de la forme du signal, le filtrage, et la reconnaissance audio. Cette technique permet d'améliorer significativement la corrélation avec les données radar. À partir de 2012, l'indicateur annuel IGmp (Indicateur Global Mesuré Pondéré) de l'aéroport Paris - Charles de Gaulle, limitant l'impact sonore du trafic aérien de l'aéroport (arrêté du 28 janvier 2003) est plus robuste grâce à ce principe de calcul. Il convient maintenant de comparer l'influence de cette méthode de la multivaldation sur les différents indicateurs de bruits d'aéronefs. Cet article présente donc les résultats de la comparaison des deux méthodes de détection appliquées aux mesures et aux calculs des indicateurs de bruit des avions (LAeq, LDEN et Number Above).

1 Introduction

L'impact du bruit d'avion est un enjeu important pour les principaux aéroports du monde entier. Cependant, bien que le bruit soit un problème commun à traiter, chaque aéroport a son propre trafic et sa propre riveraineté. Par conséquent, il n'existe aucune norme pour la gestion du bruit d'un aéroport.

En 2003, pour l'aéroport Paris - Charles-de-Gaulle, le gouvernement français a décidé de limiter l'impact sonore du trafic aérien autour de la plateforme aéroportuaire par une gestion de quotas de bruit en fonction du bruit réel généré par les aéronefs en vol. Chaque année, la valeur de l'Indicateur Global Mesuré et Pondéré (IGMP) de bruit des aéronefs rend compte de l'impact sonore de l'ensemble du trafic de l'aéroport. Cet indice ne doit jamais dépasser une valeur de référence.

Pour calculer l'indicateur global, huit stations de bruit situées dans les axes de pistes à une distance de 5 kilomètres mesurent le niveau maximum de bruit (LAeq, 1s, max) de chaque décollage et de chaque atterrissage.

Obtenir une mesure exhaustive sur toute une année est une mission tout à fait impossible. Par conséquent, un avion «non mesurée» est substitué par un niveau de bruit moyen d'un type d'avion correspondant pour garder une cohérence avec une gestion du budget de bruit. Cependant, la représentativité d'un indicateur de mesure est directement liée au rapport de niveaux de bruit réels mesurés sur le nombre théorique total d'événements de bruit. Depuis 2012, le calcul de l'IGMP est réalisé avec une nouvelle méthode de détection appelé "multivaldation" pour améliorer la valeur de l'indicateur. Cette méthode permet d'augmenter sensiblement le nombre d'opérations aériennes mesurées et identifiées par rapport au nombre réel d'opérations aériennes. En 2012, ce taux était de 93%, soit plus de 10 points de plus que les années précédentes.

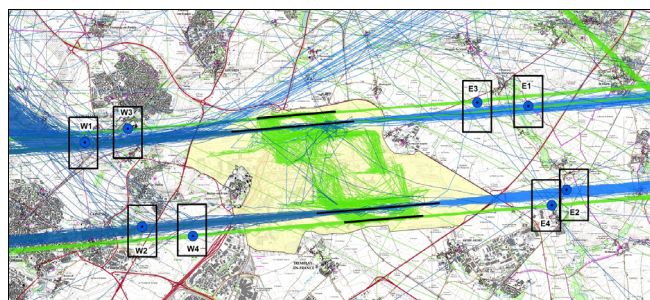


Figure 1 – Stations de mesure autour de Paris – Charles de Gaulle utilisées pour le calcul de l'IGMP (départs en bleu, arrivées en vert)

La nouvelle méthode de détection décrite dans cet article a pour objectif d'améliorer le taux de corrélation entre les événements de bruit mesurés et les survols d'avions.

2 Une nouvelle méthode de détection des événements acoustiques aéronautiques

Le système de surveillance sonore utilisé par les principaux aéroports est basé sur une détection d'événements acoustiques par dépassements de seuils de niveaux sonores et de durées couplée aux données radar afin d'identifier la source de l'aéronef. Ce type de détection est efficace pour calculer les indicateurs de bruit avec une approche statistique, où les écarts de données (faux événements et événements non détectés) se compensent par le grand nombre de valeurs mesurées sur de longues périodes. Mais cette méthode atteint ses limites pour une détection exhaustive nécessaire aux calculs de certains indicateurs (ex : Number Above, IGMP...).

La méthode de la multivaldation décrite dans cet article complète la méthode de détection classique par dépassements de seuil et de durée en ajoutant de nouvelles couches de validation. Cette méthode contient quatre étapes:

- couper le signal sonore par l'analyse de la pente
- filtrer les événements improbables sur la durée et sur un seuil de niveau sonore
- identifier les événements de type aéronautique par un modèle de reconnaissance spectrale
- corréler les événements aux informations des traces radar

La figure suivante illustre le schéma du fonctionnement général du système de surveillance du bruit des avions et des trajectoires d'Aéroports de Paris. La reconnaissance du bruit des aéronefs est réalisée par un dispositif local connecté à la station de mesure acoustique.

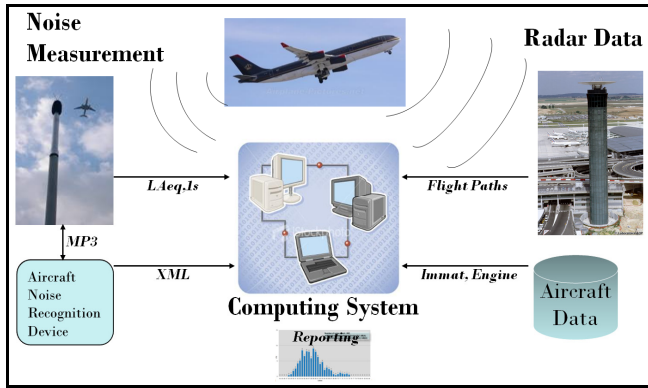


Figure 1 – Système de monitoring du bruit des avions et des trajectoires exploité par Aéroports de Paris.

2.1 Couper le signal sonore par l'analyse de la pente

Cette étape consiste à couper le signal sonore mesuré en éléments correspondant à des événements de bruit. Le début et la fin d'un événement sonore sont déterminés automatiquement par une analyse de la pente. Un élément est caractérisé par une forme en "montagne", avec une phase d'augmentation du niveau sonore, un maximum et une phase de diminution du niveau sonore.

Pour améliorer le découpage et éviter de séparer un événement sonore unique en deux parties à cause de petite variation non représentative, le niveau sonore est lissé par une moyenne arithmétique réalisée sur une période glissante de 17 secondes (la valeur considérée est 8 secondes avant et après). Ensuite, cette courbe moyennée est segmentée par l'analyse de la pente.

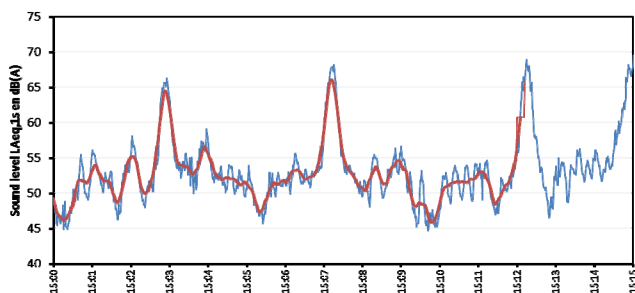


Figure 2 – Lissage du signal sonore par une moyenne glissante

Une régression linéaire est calculée sur cette courbe moyennée. Le signe de la pente de la régression linéaire ainsi que les valeurs de pente nulle sont analysés.

Chaque valeur de pente nulle correspond soit à un minimum, soit à un maximum. Le segment est défini comme la succession d'un niveau sonore minimum (pente nulle), puis du niveau sonore croissant (pente positive), puis d'un niveau sonore maximum (pente nulle), puis d'un niveau sonore décroissant (pente négative), et enfin d'un niveau sonore minimum (pente nulle).

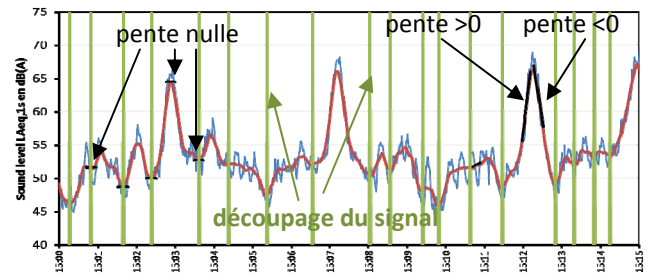


Figure 3 – Méthode utilisée pour découper le signal sonore par l'analyse de la pente.

2.2 Filtrer les événements improbables

Certains éléments sont trop courts ou ont un niveau sonore trop faible pour correspondre à des bruits de survols d'avions. Un filtrage est donc réalisé avec un critère de seuil sur niveau sonore maximal et un critère de durée.

Les paramètres du filtre - durée minimum et seuil de niveau minimum pour les niveaux maximum - dépendent de l'environnement sonore de la station de surveillance.

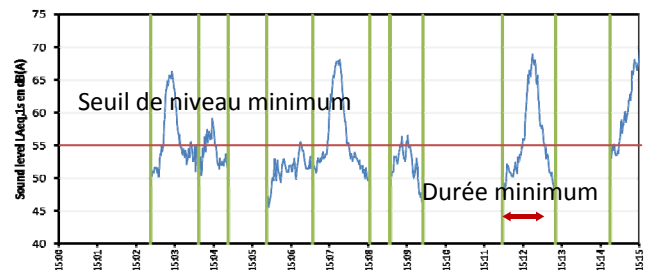


Figure 4 – Filtrage des événements avions improbables.

2.3 Modèle de reconnaissance sonore

La technologie du modèle de reconnaissance est couramment utilisée dans de nombreux domaines, comme l'identification de la voix par exemple. Pourquoi est-il si nouveau pour les avions? La reconnaissance vocale est basée sur un panel fixe de descripteurs génériques qui ne sont pas et suffisamment souples pour prendre en compte la complexité, la variabilité et la diversité de bruit dans l'environnement.

La technologie du modèle de reconnaissance utilisé pour la détection du bruit des aéronefs innove en utilisant quelques descripteurs, très spécifiques pour les aéronefs. Ainsi, la phase d'apprentissage peut être faite à partir d'un petit nombre d'échantillons. Les descripteurs sont suffisamment généraux pour détecter le bruit des avions quel que soit le type d'avion et la distance. Pour les emplacements autour de l'aéroport, il n'est pas nécessaire de réaliser un apprentissage à chaque point de mesure. Ces particularités rendent ce système efficace et très souple.

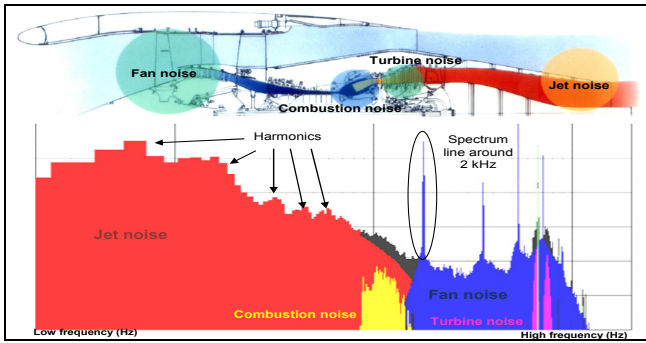


Figure 5 – Identification spectrale des sources sonores d'un moteur d'avion.

Le schéma ci-dessus décompose les différentes sources sonores d'un moteur d'avion et montre les informations spectrales qui sont utilisées en tant que descripteurs spécifiques pour la reconnaissance des moteurs d'avions.

Une mesure du bruit d'un moteur d'aéronef sur un banc en laboratoire est caractérisé par :

- des harmoniques en-dessous de 1000 Hz correspondant au bruit de jet
- une raie spectrale autour de 2000 Hz correspondant au bruit de fan.

Pour faciliter l'intégration de cette nouvelle couche permettant la validation de la mesure, la reconnaissance est faite localement. Le dispositif de reconnaissance du bruit des avions est connecté à la station de surveillance du bruit pour analyser le signal sonore en temps réel. Le résultat de la reconnaissance est synthétisé dans un fichier au format XML puis transmis au serveur central par l'intermédiaire d'un modem, et est importé dans la base de données.

Un élément de mesure découpé par l'analyse de la pente puis filtré selon les critères définis, est validé comme un évènement de bruit d'avions si un pourcentage minimum de sa durée est validé par la reconnaissance. Le pourcentage minimal de la reconnaissance dépend de l'environnement sonore du point de mesure.

Plus précisément, pour l'Indicateur Global de bruit des aéronefs qui est basé sur les niveaux de bruit maximum, un évènement est validé si la valeur maximale du bruit est également reconnue comme un bruit d'avion.

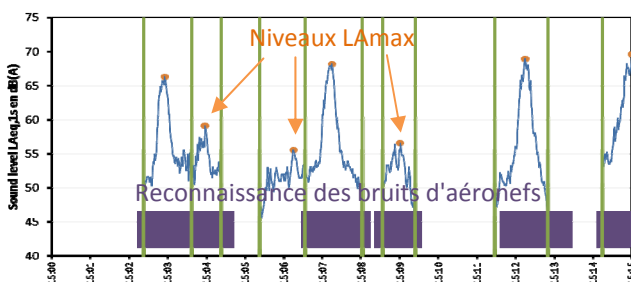


Figure 6 – Résultats de la détection des bruits d'avions après les trois étapes de la méthode de la multivaldiation.

2.4 Corrélation avec les traces radar

Les différentes étapes de détection des bruits d'aéronefs du système de surveillance permettent de générer une liste d'évènements sonores. Dans le même temps, la détection des survols à partir des traces radar permet de générer une

liste d'avions qui survolaient la station de surveillance sonore. Une corrélation est donc établie entre les deux listes. La liaison est effectuée lorsque le niveau de bruit maximal d'un évènement sonore se situe dans un délai de 30 secondes avant ou après l'heure du survol.

L'efficacité de ce procédé de multivaldiation apparaît clairement à ce stade. Si les faux évènements sont trop nombreux, ils augmentent le nombre de cas où deux évènements de bruit apparaissent pendant une période survol ce qui rend impossible la corrélation. La validation de la source sonore d'aéronef avant la corrélation augmente efficacement le taux de corrélation, en améliorant l'exactitude des données corrélées.

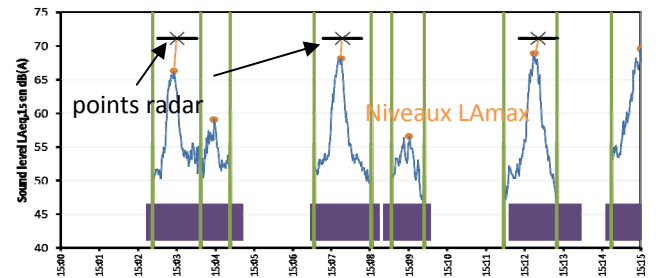


Figure 7 – Corrélation avec les traces radar.

3 Comparaison des indicateurs calculés avec les deux méthodes

L'analyse est réalisée sur une station de mesure située dans le centre de la ville de Gonesse, sous l'axe de la piste d'atterrissage du doublet Sud, à environ sept kilomètres à l'Ouest de l'aéroport Paris – Charles de Gaulle. La période analysée est l'année complète 2013.

3.1 Indicateurs de niveaux d'exposition

Pour tous les sites de mesure permanente, plusieurs indicateurs sont publiés chaque mois et chaque année, en particulier les indicateurs d'exposition au bruit des avions non pondéré (niveau sonore LAeq évènement aéronautique) et pondéré (niveau sonore LDEN des évènements aéronautiques). Les graphes suivants indiquent les valeurs de ces indicateurs en fonction des deux méthodes de détection.

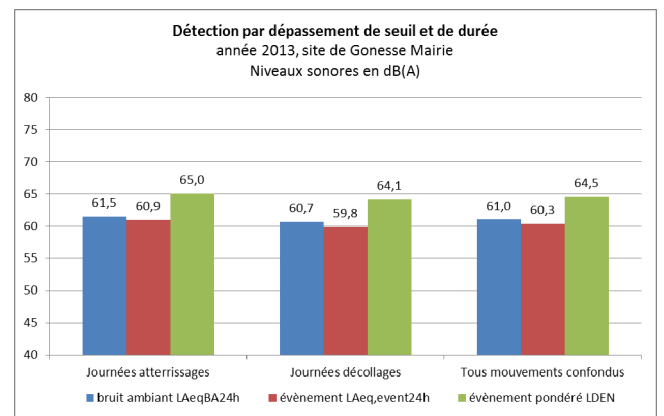


Figure 8 – Niveaux sonores d'exposition avec la méthode de détection classique.

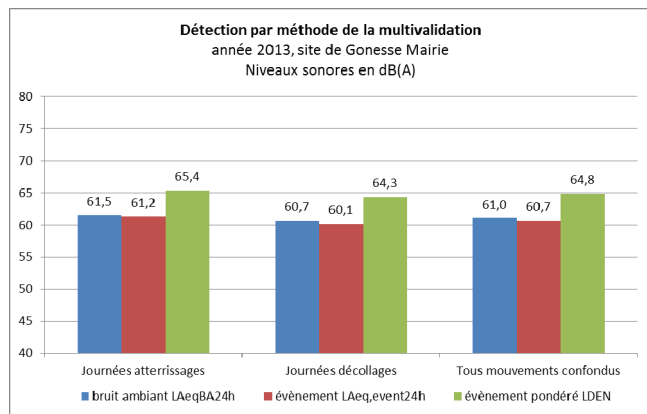


Figure 9 – Niveaux sonores d'exposition calculés avec la méthode de détection multivaldiation.

Les écarts observés entre les deux méthodes sont inférieurs au demi-décibel. Les deux méthodes de détection permettent d'obtenir des résultats de niveaux d'exposition très proches.

Dans ce cas de figure, la méthode de la multivaldiation n'apporte pas de gain sensible sur ces indicateurs alors que le calcul est réalisé à partir d'une liste d'évènements sonores plus robuste. Ceci permet de conclure que les indicateurs publiés depuis des années sont solides et que le changement de méthode de détection n'entraînera pas de modifications sensibles des résultats.

3.1 Taux de corrélation

Les évènements acoustiques détectés sont corrélés aux trajectoires des aéronefs, ce qui permet d'obtenir des informations détaillées sur un mouvement (type avion, type de moteur, aéroport de provenance ou de destination, altitude, vitesse, nombre de passagers, compagnie aérienne...).

Tableau 1: Nombre d'évènements acoustiques détectés avec les deux méthodes.

	Nombre d'évènements acoustiques détectés	Nombre de faux évènements	Taux de faux évènements
Nombre de survols réels	133029	--	--
Méthode classique	253116	120087	47%
Méthode multivaldiation	179666	46637	26%

Le tableau ci-dessus indique le nombre d'évènements sonores détectés par les deux différentes méthodes de détection. On constate que le nombre d'évènements détectés avec la méthode classique est très supérieur au nombre réel de survols du site de mesure. Cela provient des nombreux faux évènements détectés. Un faux-évènement est un évènement qui soit n'est pas un évènement aéronautique (passage d'un véhicule routier...), soit un évènement aéronautique éloigné qui n'a pas survolé le point de mesure.

Cela est le cas sur l'aéroport Paris - Charles de Gaulle en raison du nombre de mouvements important et du nombre de pistes.

Les tableaux suivants indiquent les nombres d'évènements détectés et corrélés aux survols d'avions, ainsi que les taux de corrélation pour les deux méthodes de détection en distinguant les résultats pour les mouvements d'atterrissages et les mouvements de décollages

Tableau 2: Nombre d'évènements acoustiques détectés et corrélés avec la méthode classique.

Type de mouvement	Nombre de survols	Nombre d'évènements acoustiques détectés	Nombre d'évènements corrélés	Taux de corrélation
Atterrissages	60801		49010	81%
Décollages	72228		56874	79%
Tous mouvements confondus	133029	253116	105884	80%

Tableau 2: Nombre d'évènements acoustiques détectés et corrélés avec la méthode de la multivaldiation.

Type de mouvement	Nombre de survols	Nombre d'évènements acoustiques détectés	Nombre d'évènements corrélés	Taux de corrélation
Atterrissages	60801		57624	95%
Décollages	72228		65719	91%
Tous mouvements confondus	133029	179666	123343	93%

Sur ce site de mesure, la méthode de la multivaldiation permet d'obtenir une amélioration du taux de corrélation de 13 points (14 points pour les atterrissages, et 12 points pour les décollages). L'amélioration du codage des évènements sonores d'avions permet d'améliorer très nettement le taux de corrélation. Les deux effets remarquables de la méthode de la multivaldiation sont la consolidation qualitative de la détection des bruits d'avions, et l'amélioration quantitative du nombre d'évènements sonores corrélés aux trajectoires.

3.3 Indicateurs évènementiels

Les indicateurs évènementiels sont réalisés avec le niveau sonore seconde le plus élevé lors d'un survol d'aéronef. Ils peuvent être calculés soit à partir de la liste des évènements sonores corrélés aux trajectoires, soit à partir de la liste des évènements sonores uniquement.

Distribution statistique des niveaux L_{Amax}

Le graphique ci-dessous montre les résultats des distributions statistiques des évènements sonores non

corrélés aux trajectoires avec les deux méthodes de détection.

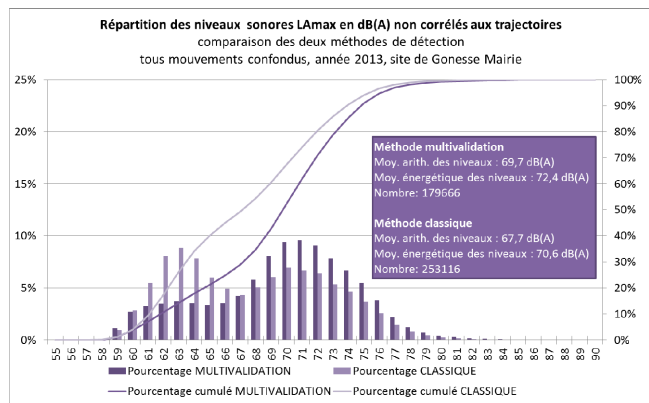


Figure 10 – Distribution des niveaux sonores LMax tous mouvements confondus.

On constate que la méthode classique apporte beaucoup de faux évènements dans les catégories de niveaux les plus faibles. Cela se traduit par des moyennes arithmétiques et énergétiques plus faibles pour la méthode de détection classique que pour la méthode de la multivaldiation. Tous mouvements confondus, les écarts sont d'environ deux décibels pour ce site de mesure.

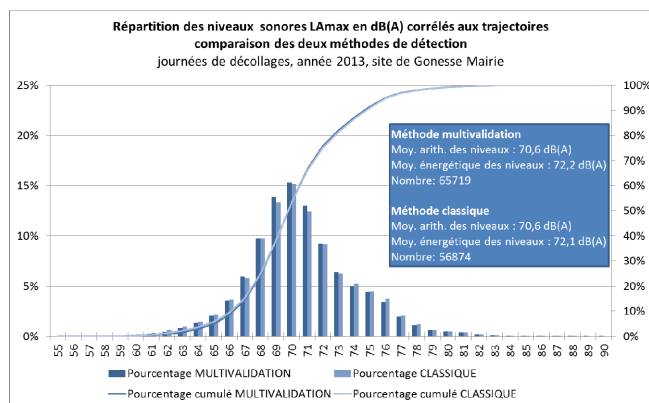


Figure 11 – Distribution des niveaux sonores LMax corrélés pour des journées de décollages.

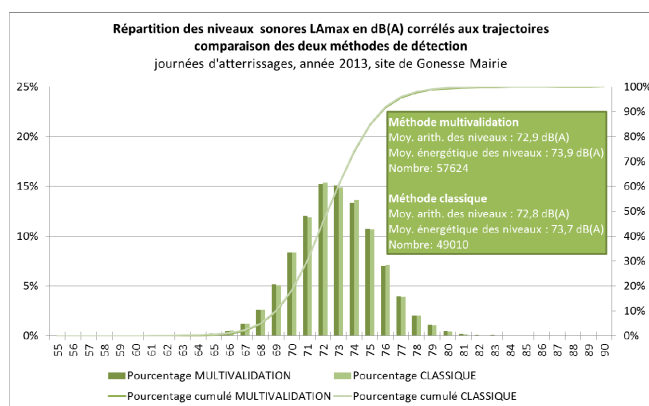


Figure 12 – Distribution des niveaux sonores LMax corrélés pour des journées d'atterrissages.

Les distributions statistiques des décollages et des atterrissages tracées avec les évènements sonores corrélés aux trajectoires ont des formes similaires pour les deux méthodes de détection. Les moyennes arithmétiques et

énergétiques ont des résultats sensiblement équivalents pour les deux méthode de détection, à l'atterrissage comme au décollage. Seul le nombre de valeurs d'évènements sonores est différent.

Number above

Le number above correspond au nombre de survols quotidiens qui ont dépassé un certain seuil de niveau sonore. En général, les seuils sont fixés à 65 dBA et 62 dBA.

Number above non corrélé :

Le tableau suivant indique les résultats des indicateurs Number Above (NA) calculés avec les deux méthodes pour des évènements sonores non corrélés. En moyenne, le nombre d'aéronefs au-dessus du site de mesure analysé est de 364 survols par jour.

Tableau 3: Number above calculé à partir des évènements non corrélés, tous mouvements confondus.

Indice	Détection par la méthode classique	Détection par la méthode multivaldiation
NA62	571	439
NA65	414	386

Pour chacune des deux méthodes, les résultats indiquent des valeurs supérieures au nombre moyen de survols quotidien. Le site étant en zone proche de l'aéroport et sous l'axe des atterrissages, les niveaux sonores des atterrissages sont tous supérieurs à 65 dBA. La méthode classique comptabilise de nombreuses détections de faux évènements en supplément des détections des bruits d'aéronefs. Les résultats de calculs avec méthode de la multivaldiation sont également supérieurs, mais plus proche du nombre de survols moyen. Les évènements supplémentaires correspondent aux mesures de bruit d'avions des autres pistes de l'aéroport.

Number above corrélés :

Le tableau suivant indique les résultats des indicateurs Number Above (NA) calculés avec les deux méthodes pour des évènements sonores corrélés aux trajectoires des aéronefs.

Tableau 4: Number above calculé à partir des évènements corrélés, tous mouvements confondus.

Indice	Détection par la méthode classique	Détection par la méthode multivaldiation
NA62	275	335
NA65	267	327

Contrairement à la méthode classique, la multivaldiation permet d'obtenir un résultat plus proche du nombre réel de survols au-dessus la commune.

Les indicateurs acoustiques basés sur le nombre sont directement concernés par la qualité de la détection des avions.

5 Conclusion

Chacune des quatre étapes de la méthode multivaldation donne sa contribution notamment pour améliorer la précision dans la détection des bruits des avions et de leurs identifications:

- l'analyse de la pente pour découper le signal sonore détermine automatiquement le début et la fin d'un évènement sonore pour une estimation du temps d'exposition au bruit des avions;
- les paramètres des filtres pour sélectionner une durée appropriée et une gamme de niveaux sonores correspondant aux survols d'avions ce qui améliore la corrélation en éliminant une partie des faux évènements;
- la reconnaissance des bruits d'avions pour valider la source sonore en élimant les faux évènements avant la corrélation;
- la corrélation avec les traces radar pour identifier les sources sonores.

Cette méthode multivaldation améliore de manière significative le taux de corrélation entre la mesure du bruit des aéronefs et de l'information de survols des avions. Sur les stations de surveillance dédiées au calcul de l'indicateur IGMP de l'aéroport Paris – Charles de Gaulle, ce taux dépasse 90% soit 10 points de plus que la méthode standard de dépassement de seuil.

Cette méthode augmente la précision de l'identification de la source sonore. Pour la gestion de l'impact du bruit autour des aéroports, les indicateurs calculés avec la multivaldation sont plus robustes. Les résultats des calculs des indicateurs d'exposition avec les deux méthodes sont très proches ce qui permet une bonne continuité dans les valeurs publiées.

Pour les indicateurs évènementiels non corrélés, on constate des écarts significatifs entre les deux méthodes. Avec la corrélation, les résultats sont très proches malgré le nombre de valeurs qui est très inférieur pour la méthode classique.

L'indicateur Number Above est très influencé par la qualité de la détection des bruits d'avions. La méthode multivaldation apporte un réel gain par rapport à la méthode classique.

Références

- [1] C. Rosin, "Aircraft noise monitoring: threshold overstepping detection vs noise level shape and audio pattern recognition detection", *Internoise 2013*, Innsbruck, Austria, September 15-18 (2013).
- [2] C. Rosin, B. Barbo, "Aircraft noise monitoring: noise level shape and spectrum pattern recognition applied to aircraft noise detection", *Internoise 2010*, Lisbon, Portugal, June 13-16 (2010).
- [3] B. Barbo, C. Rosin, J-M. Machet, "A pattern recognition approach for aircraft noise detection", *Internoise 2009*, Ottawa, Canada, August 23-26 (2009).
- [4] B. Barbo, J-M Machet, "Air Traffic Noise Quota at Paris – Charles-de-Gaulle Airport, a Global Indicator from Actual Noise Levels", *Internoise 2008*, Shangai, China, October 26-29 (2008).
- [5] [5] AFNOR, French Standard NF S 31-190, "Acoustics – Characterisation of environment audible aircraft noises", France, March (2008).
- [6] Défréville B., Roy P., Rosin C., Pachet F., "Automatic recognition of urban sound sources", *Audio Engineering Society*, 6827, (2006).
- [7] McAdams S., "Recognition of sound sources and events", *Thinking in Sound: The Cognitive Psychology of Human Audition*, Oxford University Press, 146-198, (1993).