



# Propagation acoustique du bruit de VTOL en milieu urbain

Patrice Malbequi

## ► To cite this version:

Patrice Malbequi. Propagation acoustique du bruit de VTOL en milieu urbain. 16ème Congrès Français d'Acoustique ( CFA 2022 ), Apr 2022, Marseille, France. <hal-03694788>

**HAL Id: hal-03694788**

**<https://hal.science/hal-03694788v1>**

Submitted on 14 Jun 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



16<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique  
11-15 Avril 2022, Marseille

## Propagation acoustique du bruit de VTOL en milieu urbain

P. Malbéqui

ONERA, 29 avenue de la Division Leclerc, 92320 Châtillon, France



Le bruit d'un aéronef de type VTOL (Vertical Take-off and Landing) en milieu urbain est un point déterminant pour son acceptabilité par la sphère sociétale et pour la définition d'une réglementation adaptée. On caractérise les effets de réflexions et de diffraction par les bâtiments et les rues avec la méthode des rayons. Associé avec des algorithmes performants de recherche d'intersections entre rayons et éléments réfléchissants, le lancer de rayons fournit une modélisation efficace de la propagation en milieu urbain. La méthode des rayons est largement appliquée aux sources acoustiques proches du sol comme le bruit routier et d'origine ferroviaire. Sa capacité à modéliser la propagation depuis des sources de bruit en altitude des VTOL est étudiée ici. On considère la propagation acoustique depuis une source de bruit à 500 pieds d'altitude au-dessus du site de Airbus Helicopters à Marignane. La carte de bruit au-dessus du sol montre à l'aplomb de la source un chenal acoustique entre les bâtiments qui s'accompagne d'un renforcement du niveau sonore et d'une déformation des fronts d'onde, comparée à la configuration de rayonnement en champ libre. Des réductions du niveau sonore sont aussi observées dans la zone d'ombre des bâtiments.

## 1 Introduction

### 1.1 Contexte

Le concept de l'usage de drones en environnement urbain se développe depuis quelques années, soutenu par un développement intense de prototypes. La volonté est de proposer de nouveaux services, comme le transport de colis aux particuliers et d'améliorer en parallèle l'empreinte environnementale, par diminution du CO<sub>2</sub>, en remplaçant les véhicules routiers par des drones de capacité adaptée : quelques kilogrammes de charge utile pour une livraison de colis unitaire, à plusieurs centaines de kilogrammes pour une livraison dans un micro-hub urbain.

Ces développements s'accompagnent du besoin de définir des niveaux de sécurité et de sûreté et de conduire des analyses d'acceptabilité de ces nouveaux usages à l'égard de la sphère sociétale. L'acceptabilité des drones en environnement urbain dépend de nombreux facteurs dont le niveau sonore émis par les VTOL, sans oublier les facteurs psychologiques, comme la crainte de voir tomber un drone sur un riverain.

Outre l'acceptabilité du bruit, le déploiement des drones doit également comprendre la maîtrise :

- de la sécurité nécessaire pour autoriser les vols de ces appareils,
- des risques d'attaque cyber sécurité en faisant voler de nouveaux appareils en milieux inusités,
- des contraintes environnementales électromagnétiques dans lesquelles les drones devront évoluer.

### 1.2 Cadre de l'étude acoustique

Les nouvelles missions des VTOL ne prendront leur essor que si leur émission acoustique est jugée acceptable par les riverains. Cette étude en propagation s'inscrit ainsi dans un cadre plus général comprenant les éléments suivants [1].

- Faire le point sur l'environnement réglementaire acoustique urbain et ses besoins d'évolution.
- Identifier les facteurs de gêne acoustique en milieu urbain en s'appuyant sur l'expérience du transport terrestre.

- Développer une chaîne de simulation acoustique, allant de la modélisation de la source sonore du VTOL jusqu'aux tests perceptifs.

Cette communication s'intéresse à la propagation des ondes acoustiques en milieu urbain émises depuis une source de bruit en altitude. Le paragraphe 2 rappelle rapidement les facteurs physiques dominants la propagation acoustique et les principales méthodes existantes pour les prendre en compte. Le paragraphe 3 présente des calculs de propagation au-dessus du site Airbus Helicopters de Marignane par la méthode des rayons et propose, pour un site donné, une approche statistique afin de regrouper les fonctions de transfert entre source et récepteurs.

## 2 Facteurs physiques et méthodes de propagation

### 2.1 Principaux facteurs physiques influençant la propagation

A l'échelle « microscopique » d'une rue, la description fine des réflexions acoustiques sur les façades de bâtiments et le sol se caractérise par une modification de la répartition spatiale de l'énergie émise et dépend fortement de la taille des irrégularités de surface de l'obstacle (comparée à la longueur d'onde acoustique). Cette modification va de la réflexion spéculaire sur une façade en basse fréquence à la réflexion spéculaire sur un détail de la géométrie en haute fréquence, en passant par la diffusion avec un rayonnement suivant toutes les directions aux fréquences intermédiaires.

A l'échelle « macroscopique » d'un quartier, la nature de l'environnement du milieu urbain est un facteur dominant. Il peut être constitué d'immeubles de hauteurs basse (quatre à cinq étages) et élevée (centre d'affaire avec quelques dizaines d'étages), ou encore d'habitats pavillonnaires. La largeur des rues, plus ou moins absorbantes selon la présence d'espace vert, influence la propagation acoustique, les rues étroites pouvant notamment se comporter comme un guide d'onde.

Selon la loi de Snell-Descartes, l'hétérogénéité du milieu de propagation (gradients moyens de vent et de température) réfracte les ondes acoustiques : un gradient de célérité du son positif rabat l'énergie acoustique vers le sol et un gradient négatif la dirige vers le ciel.

Enfin, la turbulence cinématique et thermique de la basse atmosphère peut introduire une dispersion de la pression acoustique. En espace libre, dans la couche limite atmosphérique, la turbulence a tendance à lisser les interférences du champ de pression, et la diffraction acoustique par les structures tourbillonnaires permet à l'énergie sonore de pénétrer dans les zones d'ombre. En milieu urbain, la situation est encore plus complexe, car la nature de la turbulence dépend aussi de la dimension et de l'agencement des bâtiments.

## 2.2 Méthodes de propagation

On décrit les principales méthodes géométriques et ondulatoires utilisées pour la propagation en environnement urbain.

La théorie classique de la réverbération provient de l'acoustique des salles de Sabine. Le champ total est décomposé en champ incident et champ réverbéré. A proximité de la source, on obtient classiquement une décroissance du niveau de 6 dB par doublement de distance puis, au-delà d'une certaine distance (appelée rayon de réverbération), les réflexions multiples forment un champ diffus où le niveau ne varie plus avec la distance à la source. Cette méthode est applicable aux géométries de formes quasi parallélépipédiques et aux surfaces faiblement absorbantes.

La méthode des sources images s'appuie sur l'acoustique géométrique pour la prise en compte de réflexions successives. Appliquée à des rues aux formes en U, puis étendue à un réseau de rues, la méthode est utilisée dans le cadre de l'acoustique urbaine, mais ne reste applicable qu'aux géométries simples pour lesquelles la position des sources images est facile à déterminer [2].

Dans l'approche particulière, le champ acoustique est assimilé à un ensemble de particules sonores, et la répartition de l'énergie sonore est déterminée par celle des particules. La méthode repose sur la recherche de la densité locale de particules. Ainsi, la méthode s'appuie sur le même principe que la méthode lagrangienne des rayons et la LBM avec un suivi des particules. Au bout d'un certain temps, la répartition spatiale des particules permet de remonter au niveau sonore par comptage des particules dans chaque maille de l'espace discrétisé. Une autre méthode consiste à calculer la répartition des particules en résolvant une équation de diffusion [3]. Elle repose sur le paramètre de diffusion caractérisant la façade du bâtiment estimé par la mesure. L'influence de la géométrie et la position des diffuseurs n'est pas prise en compte et la méthode ne s'applique qu'en milieu fortement diffusant (rue étroite).

Le lancer de rayons est très répandu pour la propagation en milieu urbain. Son approximation haute fréquence (longueur d'onde acoustique  $\lambda$  petite devant les dimensions caractéristiques du milieu) n'est pas si restrictive. Pour la diffraction par une bande de largeur  $a$ , l'approximation des rayons se compare bien à la solution de référence, même lorsque  $\lambda$  est du même ordre que  $a$ . Une limite de la méthode tient à l'apparition de caustiques où la surface du tube de rayon devient petite et la pression acoustique singulière. De nombreux logiciels sur la méthode des rayons existent pour modéliser les réflexions multiples sur les bâtiments. Le calcul de la pression sonore peut être mené par comptage de

rayons cohérents ou incohérents autour d'un point d'observation (petite sphère), le lancer d'un tube de rayons, ou encore la méthode des géodésiques [4]. En écoulement homogène, les rayons se propagent suivant des lignes droites. En présence d'écoulement, la trajectoire des rayons est déterminée par intégration dans le temps d'un système de deux équations différentielles vectorielles du premier ordre portant sur la position ( $dr/dt$ ) et la direction ( $dk/dt$ ). La trajectoire complète du rayon est obtenue de proche en proche par incrémentation du pas de temps  $dt$ .

Les méthodes ondulatoires résolvent une équation de propagation et, comparées aux méthodes géométriques, intègrent directement la diffraction. La méthode des éléments finis de frontières résout de façon exacte l'équation de Helmholtz en écoulement uniforme. La discrétisation surfacique des corps diffractants conduit à un système linéaire de dimension égale au nombre des éléments finis. La méthode est ainsi limitée au domaine basse-moyenne fréquence : elle permet d'optimiser la forme d'un mur anti-bruit, mais son application au milieu urbain à l'échelle d'un quartier n'est pas réaliste.

En présence d'un écoulement complexe avec couche limite ou couche de cisaillement, il n'est pas possible d'établir une équation de propagation portant sur une seule variable (pression, vitesse, masse volumique). Seules les équations d'Euler permettent de traiter le problème. Le développement des schémas numériques d'ordre élevé pour estimer les dérivées spatiales a permis des progrès significatifs dans la résolution des équations d'Euler [5]. Une difficulté d'ordre pratique est la réalisation du maillage fluide autour des obstacles, même si la méthode IBC (Immersed Boundary Condition) simplifie grandement cette tâche. Dans son principe, cette méthode part d'un maillage structuré du fluide et d'un maillage surfacique de l'objet, tous deux simples à réaliser et, via des algorithmes adaptés, détermine l'intersection entre les maillages fluide et surfacique, sur laquelle sont imposées les conditions aux limites [6]. Par résolution des équations d'Euler, on peut déterminer la propagation en milieu hétérogène à Mach élevé, comme par exemple le rayonnement du bruit de jet en écoulement cisailé. Les équations d'Euler sont aussi utilisées pour traiter la propagation en extérieur avec une topographie [7] et en milieu urbain, comme la propagation depuis un point source dans une aire comprenant des réflexions multiples entre bâtiments [8]. Cette dernière application montre que, même si des ondes se propagent au-dessus des toits, la majorité de l'énergie reste confinée entre les bâtiments.

La méthode Lattice Boltzmann (LBM) modélise la propagation et les collisions des particules dans une grille régulière appelée « lattice ». Cette méthode n'est ni ondulatoire, ni même énergétique, car elle ne comprend pas de façon explicite une équation de conservation. La LBM utilise les modèles microscopiques des particules et s'appuie sur l'évaluation d'une densité de probabilité des particules dans le fluide, dont on déduit ensuite les grandeurs physiques comme la pression acoustique, la masse volumique. La LBM a fait une percée significative dans les sciences physiques et en particulier dans le domaine de l'aéro-acoustique. Elle constitue une alternative à la résolution des équations de Naviers-Stokes en aérodynamique instationnaire, dont la mise en œuvre s'avère lourde avec les codes CFD dits « high

fidelity ». La résolution numérique de la LBM en présence d'objets de géométrie complexe dans le fluide bénéficie de la stratégie efficace de maillage par IBC. La LBM a été récemment appliquée à la génération de la source de bruit par un VTOL [9]. Outre son aspect démonstratif, il faut souligner sa facilité de mise en œuvre et la qualité des résultats à bas Mach. La LBM est aussi utilisée pour modéliser l'aérodynamique en milieu urbain [10].

### 2.3 Choix de la méthode de propagation

Pour cette étude on choisit d'utiliser la méthode des rayons qui couvre bien le spectre étendu d'émission des VTOL. De plus, cette méthode est d'un usage fréquent pour caractériser l'influence du milieu urbain sur la propagation du bruit routier, et de nombreux codes l'utilisant sont disponibles. L'aérodynamique avec des gradients de vents et de température suivant l'altitude a aussi un effet significatif en propagation, mais ce facteur complexe à modéliser en milieu urbain sort du cadre de notre étude.

## 3 Propagation acoustique au-dessus du site Airbus Helicopter

### 3.1 Modélisation du site de AIRBUS Helicopter sous Open-Street

Airbus Helicopters a réalisé des essais sur le site de Marignane en 2020. Un hélicoptère a survolé les bâtiments du site, en vol rectiligne et aux vitesses constantes de 40 et 90 kts, et aux altitudes de 500 et 1000 pieds, suivant deux trajectoires latérales de part et d'autre du site (Figure 1, lignes rouge). Lors des passages de l'hélicoptère des mesures acoustiques ont été réalisées avec 8 microphones disposés sur ce site [11].

La Figure 1 illustre le site Airbus Helicopters sous Google Map et sa modélisation via Open-Street pour le calcul de rayons avec le logiciel MithraSOUND [12].

Pour la modélisation des effets de propagation on suppose la source acoustique ponctuelle et isotrope. Elle est fixe, à une altitude de 500 pieds au-dessus du sol, et placée sur la trajectoire latérale gauche (rectangle en bleu sur la Figure 1 du bas). Elle émet un bruit large bande dans la gamme de fréquences de 63 Hz à 8 000 Hz. Le champ acoustique total est déterminé dans un plan horizontal à 3 mètres au-dessus du sol, sur un pavé rectangulaire comprenant au total 2000 récepteurs. Le niveau acoustique est aussi déterminé aux positions des 8 microphones, en dBA et dans les 8 octaves de la bande [63 Hz- 8000 Hz].

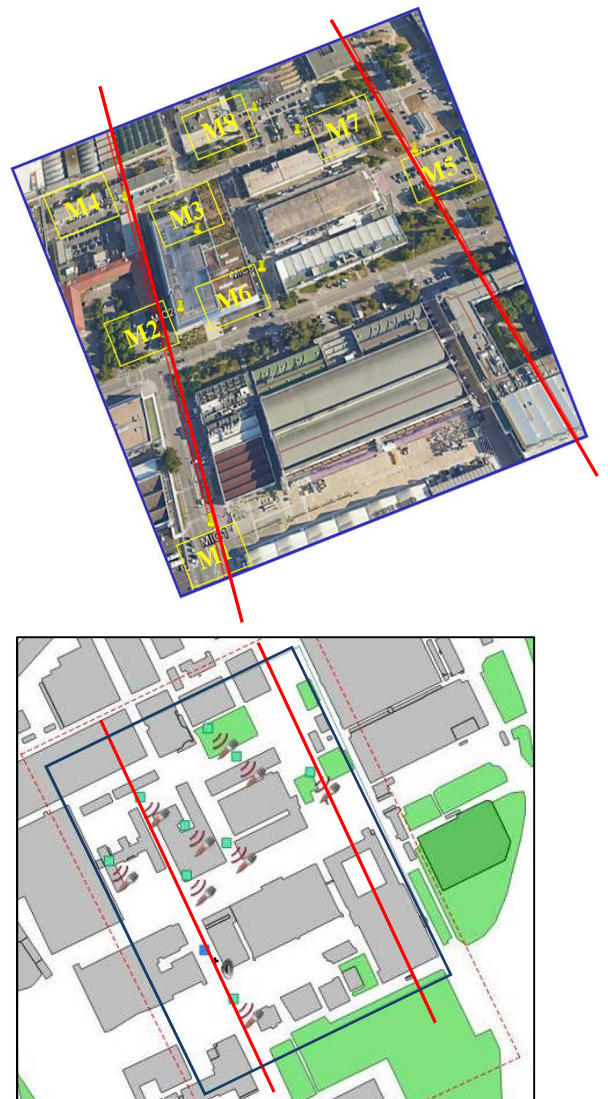


Figure 1 – En haut : site de Airbus Helicopters sous Google-Map ; en bas : modélisation du site sous Open-Street pour le calcul des rayons ; ■ source acoustique ; ■ microphones.

### 3.2 Résultats de calcul

Pour caractériser l'influence du milieu urbain, le champ acoustique total  $p_t$  (somme du champ incident émis par la source,  $p_i$  et du champ diffracté par le milieu urbain,  $p_s$ ) est référencé par le champ incident :  $p_t/p_i$ . Cette normalisation classique fournit une représentation des niveaux indépendante de la distance source-récepteur [13]. Le rapport  $p_t/p_i$ , exprimé en décibels, est proche de zéro lorsque les effets de diffraction sont faibles, négatif s'il y a réduction du niveau (effet de masque), et positif par focalisation des ondes acoustiques ou diffraction en limite de zone éclairée.

Le cadran haut de la Figure 2 représente l'empreinte sphérique du champ incident au-dessus du sol (les bâtiments sont dessinés, mais non pris en compte dans le calcul). Le cadran bas présente le calcul des rayons, avec les bâtiments, intégrant 3 chemins de réflexions et 2 de diffraction. On observe à l'aplomb de la source un chenal acoustique entre les bâtiments, accompagné d'un renforcement du niveau sonore, et d'une déformation des fronts d'onde, comparée à la configuration en champ libre. Localement, des réductions



du niveau sonore sont aussi observées dans la zone d'ombre des bâtiments (niveaux en jaune.)



Figure 2 – Niveau acoustique en dBA à 3 mètres au-dessus du sol sur le site Airbus de Marignane. Haut : champ libre (sans bâtiment); bas : en présence des bâtiments et des rues.

On présente Figure 3 les niveaux globaux en dBA sur les microphones calculés : en champ libre, avec les bâtiments, et les niveaux avec bâtiments référencés par le champ libre. On note que le niveau référencé évolue de 0 à 5 dB selon le microphone considéré, ce qui montre l'influence sensible des bâtiments. Le niveau du microphone M2, placé sur le toit d'un bâtiment et en vue directe de la source, atteint 5 dB, soit quasiment le doublement de pression attendu.

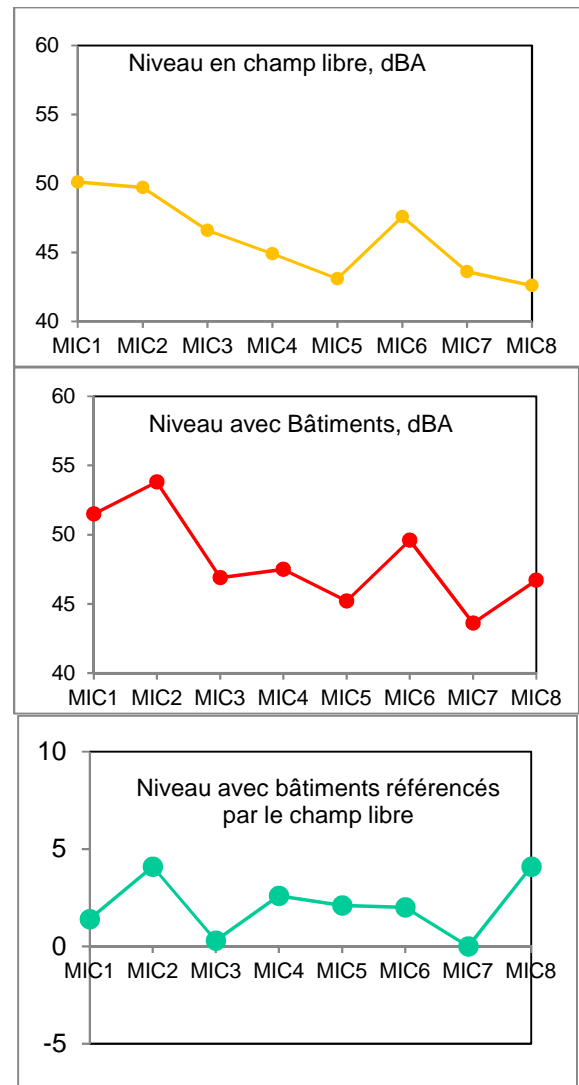


Figure 3 – Niveaux en dBA sur les microphones M1 à M8. De haut en bas : niveaux en champ libre; en présence des bâtiments et niveaux avec bâtiments référencés par le champ libre.

La Figure 4 illustre le spectre normalisé des microphones. Pour les microphones M1 et M5, on observe des variations de niveaux relativement faibles d'une octave à l'autre. Pour les microphones M2 et M8, les variations sont beaucoup plus fortes, malgré l'émission par octave à la source, qui devrait réduire les interférences entre champs incident et réfléchis. Il convient d'approfondir ces premiers résultats et la mise en œuvre du logiciel de rayons. Notamment, la modélisation des rayons dans Mithra suppose, pour optimiser la recherche des intersections entre rayons et bâtiments, une approche dite 2.5D, où la scène est projetée dans un plan horizontal. Cette technique éprouvée avec une source de bruit proche du sol est à consolider pour une source en altitude.

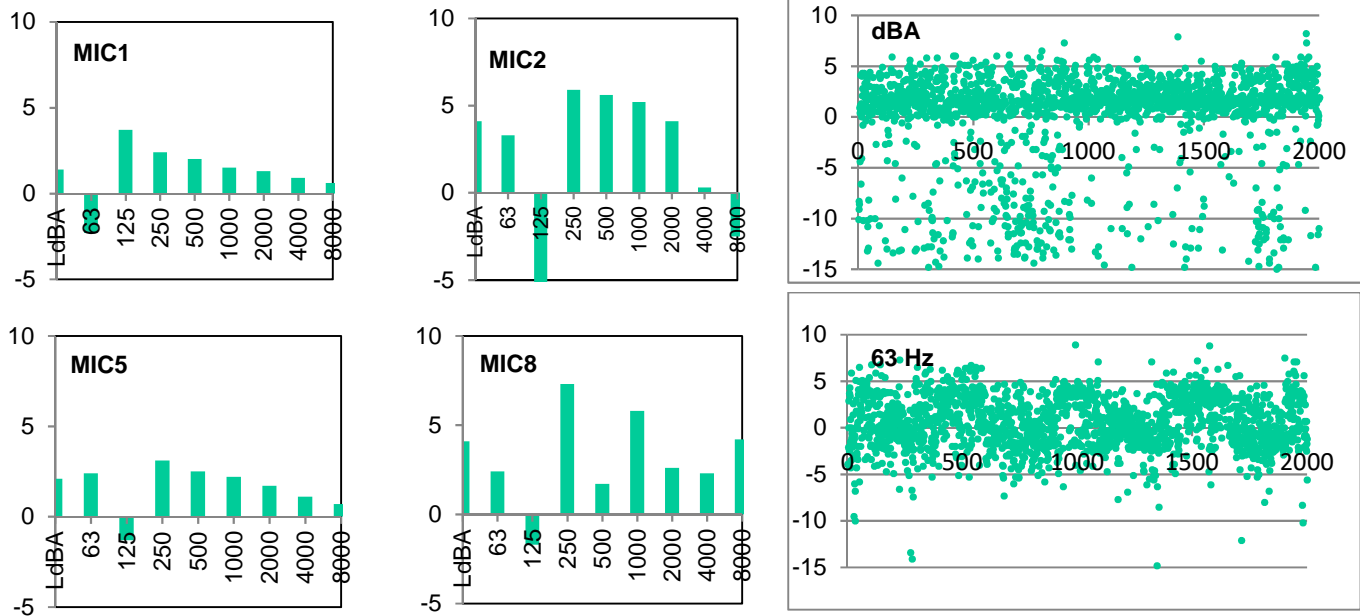


Figure 4 – Spectres des microphones M1, M2, M5 et M8, normalisés par rapport au champ libre.

### 3.3 Détermination d'un facteur correctif

On présente Figure 5 la carte de bruit à 3 m au-dessus du sol (référéncé par rapport au champ libre) sous forme de nuages de points, constituée par les 2 000 récepteurs répartis dans le plan horizontal. On peut voir cette représentation comme celle d'un histogramme « inversé » (en considérant chaque point du nuage comme une bille placée sur des fils horizontaux suffisamment rapprochées, si on tourne de 90° le boulier, les billes vont glisser le long des fils. Le nombre de billes sur chaque fil donne alors une « image » de la densité de probabilité). La Figure 5 illustre la dispersion du niveaux global et de quelques octaves, sur l'ensemble des 2000 récepteurs. Ainsi, on observe pour le niveau global et l'octave 250 Hz une dispersion des niveaux de 0 à 5 décibels. A 63 Hz, la gamme des variations est supérieure et s'étend de -5 à 5 dB. En revanche, à 1 000 et 8 000 Hz, la dispersion est réduite de 2 à 5 dB. Cette tendance suggère de caractériser le site avec un facteur global qui dépend de la fréquence.

Plus précisément, on propose de considérer un facteur correctif qui, pour un site donné, traduit l'influence de l'effet urbain sur les niveaux acoustiques déterminés en champ libre. L'objectif est de l'intégrer à une chaîne de simulation acoustique, allant de la modélisation de la source sonore jusqu'aux tests perceptifs.

En pratique le facteur correctif est déterminé par les grandeurs moyennes et les écarts types des fonctions de transfert entre source et récepteurs, calculées dans un plan horizontal. Ce facteur est supposé être représentatif d'un site donné et il est aussi plus facile à manipuler au sein de la chaîne de simulation, que les fonctions de transfert qui représente un volume important de données.

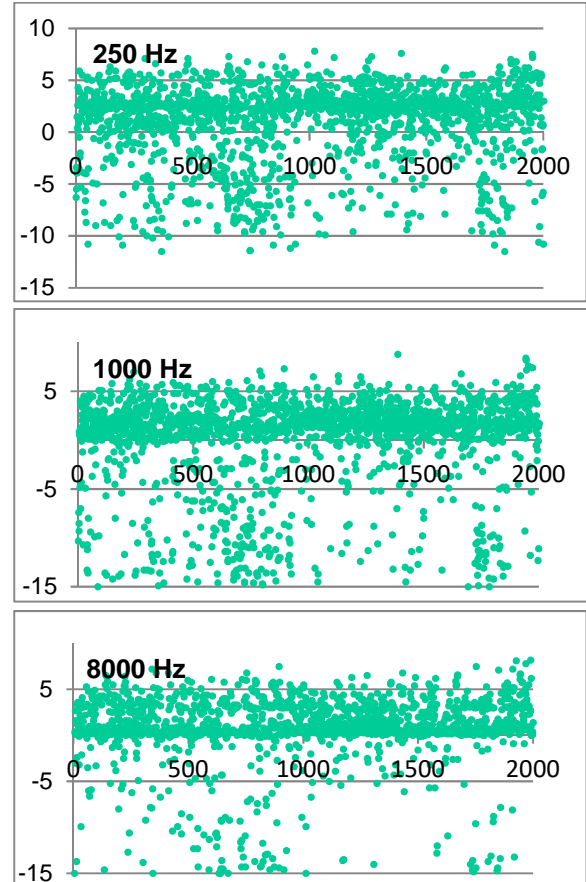


Figure 5 – Nuage de points de la carte horizontale en dBA et pour les octaves 63, 250, 1000 et 8 000Hz.

Le TABLEAU 1 présente le facteur correctif du site de Marginane. Les valeurs moyennes et les écarts types sont calculés à partir des nuages de points de la Figure 5, en dBA et aux fréquences de 63, 250, 1000 et 8000 Hz. On note une valeur moyenne assez faible et un écart type plus significatif qui croît avec la fréquence.

TABLEAU 1 – Facteur correctif

Fréquence (Hz)	dBA	63	250	1000	8000
Moyenne	-0,7	0,5	0,6	-0,8	-2,3
Ecart Type	8,1	1,4	6,6	8,1	11,3

## 4 Conclusion

La propagation du bruit d'aéronefs de type VTOL en milieu urbain est un problème émergent qu'il convient d'examiner afin de fixer l'acceptabilité de ce nouveau moyen de transport et de définir une réglementation adaptée. La méthode des rayons est largement utilisée pour caractériser la propagation acoustique en milieu urbain de sources au sol comme le bruit routier. Elle a été appliquée ici à une source de bruit en altitude au-dessus d'un site comprenant de nombreux bâtiments.

La carte du bruit au-dessus du sol montre la création d'un chenal acoustique entre les bâtiments, accompagné d'un renforcement du niveau sonore et d'une déformation des fronts d'onde. Comme attendu, des réductions du niveau sonore sont aussi observées dans la zone d'ombre des bâtiments.

Les résultats proches du sol montrent que la présence des bâtiments peut modifier, typiquement de 5 décibels, le champ acoustique par rapport à la configuration en champ libre. Localement, on a rencontré d'assez fortes variations de niveaux sur les spectres de quelques microphones proches du sol, malgré une émission large bande à la source devant réduire les interférences. Ce comportement pourrait être dû à une modélisation incomplète de la méthode des rayons utilisée avec une source en altitude au-dessus des bâtiments. Il est prévu de poursuivre la mise en œuvre du code de rayons sur des configurations académiques avec une source en altitude et présence de réflexions multiples, et de confronter les résultats avec des solutions de référence, comme les sources images et la BEM.

## Remerciements

Cette étude a été financée par la DGAC dans le cadre du projet Mosquito et réalisée en collaboration avec Airbus Helicopters et Safran Helicopter Engines.

## Références

- [1] F. Cléro, J. Caillet, E. Bouty, C. Sensiau, Ingrid LeGriffon, P. Malbéqui, MOSQUITO Project – a fast estimation approach for urban acoustic environment, INCE Europe, CidB, QUIET DRONES, International e-Symposium on UAV/UAS Noise, Remote from Paris, 19<sup>th</sup> to 21<sup>st</sup> October, (2020).
- [2] A. Pelat, Approche modale de la propagation acoustique dans les guides d'ondes ouverts et application à l'acoustique urbaine, Thèse de Doctorat en Acoustique, Université du Maine, Le Mans, France, (2009).
- [3] J. Picaut, Numerical modeling of urban sound fields by a diffusion process, Applied Acoustics 63, 965–991, (2002).
- [4] S. Candel, Numerical solution of conservation equations arising in linear wave theory: application to aeroacoustics, J. Fluid Mech. 83, 465–493, (1977).

- [5] C. K. W. Tam, J. C. Webb, Dispersion-relation preserving finite difference schemes for computational acoustics, J. Comput. Phys. 107, 262–281, (1993).
- [6] M. Lorteau, L. Wiart, V. Kopiev, S. Denisov, Numerical study, with experimental validation, of fan noise installation effects in over-wing Nacelle configuration using the immersed boundary method, Aeroacoustics Conferences, 25th AIAA/CEAS, AIAA Paper 2019-2519, 20-23 May, (2019).
- [7] D. Dragna, Ph. Blanc-Benon, F. Poisson, Time-domain solver in curvilinear coordinates for outdoor sound propagation over complex terrain, J. Acoust. Soc. Am. 133(6), 3751-3763, (2013).
- [8] M. W. Parker, S. A. Ketcham, H.H. Cudney, Acoustic Wave propagation in Urban Environments, Hpcmp Users Group Conference, IEEE, (2007).
- [9] D. Casalino, W. C. P. Van der Velden, G. Romani, Community Noise of Urban Air Transportation Vehicles, AIAA Scitech 2019 Forum, San Diego, California, 7-11 January, (2019).
- [10] J. Jacob, P. Sagaut, Wind comfort assessment by means of large eddy simulation with lattice Boltzmann method in full scale city area, Building and Environment 139, 110-124, (2018).
- [11] J. Caillet, P. Dieumegard, Effet de bâtiments sur la propagation acoustique, essais en vol sur H130, projet Mosquito, Note ETGVA-2020-005, (2020).
- [12] MithraSOUND, Manuel Technique, CSTB, Juin 2008.
- [13] P. Malbéqui, S. Candel, E. Rignot, Boundary integral calculations of scattered fields: Application to a spacecraft launcher, J. Acoust. Am. 82 (5), November (1987).