

Minimisation des Nuisances Sonores des Trajectoires de Réseaux de Drones : Une Approche Centrée sur la Population

Antoine Henry

ENAC - École Nationale de l'Aviation Civile, Toulouse, France
antoine.henry-ext@enac.fr

Keywords : *Nuisances sonores, espace aérien urbain, empreinte sonore des drones, optimisation de trajectoires, acceptabilité sociale*

1 Contexte

L'intégration des nuisances sonores dans la planification des trajectoires de drones est un enjeu crucial pour leur acceptation sociale et leur développement durable. Les recherches récentes se concentrent sur l'optimisation des trajectoires uniques en tenant compte du bruit généré. Cependant, l'évaluation des nuisances sonores ne se limite pas à la pression sonore perçue, elle doit également prendre en compte le nombre de personnes exposées et leur sensibilité au bruit. Dès les années 1970, des études ont établi une relation dose-effet entre l'exposition sonore et la nuisance perçue. Des méthodes ont ensuite été développées pour convertir les expositions sonores en unités comparables, telles que le $L_{eq,24h}$ (Niveau sonore continu équivalent sur 24h) permettant d'évaluer les nuisances subjectives sur différentes échelles de réponse. Le rapport FICON (1992) [1] a popularisé la variable %HA, qui représente le pourcentage de la population « fortement gênée » par une exposition prolongée à un niveau sonore donné.

Ce papier propose une méthodologie combinant l'estimation de la densité dynamique de population avec la modélisation de la propagation du bruit. Un algorithme d'optimisation à deux étages est ensuite introduit pour minimiser la nuisance sonore tout en garantissant l'efficacité opérationnelle des réseaux de drones.

2 Méthodologie d'évaluation de la nuisance sonore

Pour évaluer les nuisances sonores, il est essentiel de connaître la distribution spatio-temporelle de la population. Une méthode intégrant des données d'utilisation du temps et une classification géospatiale de l'occupation des sols est spécifiquement développée pour modéliser la distribution de la population en milieu urbain. La première étape consiste à analyser les données de l'enquête « Emploi du Temps » (EDT) de l'INSEE (2009), qui suit les activités quotidiennes de 12 000 ménages par intervalles de 10 minutes. Les activités sont catégorisées en cinq lieux : lieux de travail, domiciles, zones de loisirs, déplacements et lieux inconnus. La deuxième étape utilise la base de données Urban Atlas, qui couvre les villes européennes de plus de 50 000 habitants. Les catégories d'Urban Atlas, telles que le tissu urbain ou les zones industrielles, sont associées aux cinq lieux précédents.

Des cartes de densité de population sont générées en redistribuant les populations selon les pourcentages d'activités horaires et l'espace disponible. Par exemple, 31% de la population se trouve sur les lieux de travail à 11h et 49% à domicile. Ces cartes révèlent des dynamiques urbaines, comme la dominance résidentielle la nuit et les pics d'activité sur les lieux de travail et de loisirs en journée.

Les nuisances sonores sont ensuite calculées à l'aide d'un modèle d'émission sonore ponctuelle. Chaque trajectoire du réseau est discrétisée, et la propagation du bruit est simulée par un algorithme de *ray-tracing*, qui prend en compte l'effet de masquage des bâtiments. Pour chaque

point de vue au sol, le Niveau d'Exposition Sonore (SEL) est calculé pour chaque événement sonore, c'est-à-dire chaque passage de drone. Le niveau sonore continu équivalent sur 24 heures ($L_{eq,24h}$) est ensuite dérivé du SEL .

La variable « Pourcentage de Personnes Fortement Gênées » (%HA), affinée par [2], est utilisée pour mesurer la proportion de personnes se considérant comme « fortement gênées ». Cette variable est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$\%HA = \frac{100}{1 + e^{5.854 - 0.075 \cdot L_{eq,24h}}} \quad (1)$$

Enfin, la proportion estimée de personnes fortement gênées (HA) est calculée en combinant les résultats du modèle de propagation du bruit avec les cartes de densité de population.

3 Modèle mathématique

La métrique de nuisance sonore est intégrée dans une fonction objectif composite, qui inclut également la distance moyenne de livraison et le nombre d'intersections de trajectoires. La distance moyenne de livraison reflète l'efficacité énergétique et temporelle, tandis que le nombre d'intersections de trajectoires est lié à la complexité de l'espace aérien et à la gestion des conflits.

Des poids sont attribués à chaque métrique, permettant de privilégier soit l'efficacité opérationnelle, soit la réduction du bruit, selon le contexte. La fonction objectif est minimisée à l'aide d'un algorithme d'optimisation à deux étapes. Le premier étage utilise l'algorithme Probabilistic Roadmap (PRM) pour générer un réseau initial de trajectoires réalisables. Le PRM échantillonne des points dans l'espace aérien et les connecte pour former des chemins sans collision. Même si l'algorithme est optimal lorsqu'un nombre infini de points est échantillonné, il est volontairement arrêté suffisamment tôt afin d'éviter une explosion du temps de calcul des plus courts chemins. Cette étape garantit une connectivité et une faisabilité initial, mais le réseau résultant peut ne pas être optimal en termes d'exposition sonore ou d'efficacité opérationnelle. Le deuxième étage affine ce réseau à l'aide d'un recuit simulé (SA), qui ajuste les positions des nœuds et la structure du graphe pour minimiser la fonction objectif composite. Cette fonction intègre la distance de déplacement, les intersections de trajectoires et la nuisance sonore.

4 Résultats

La méthodologie est validée par une étude de cas à Paris, simulant la livraison d'échantillons de sang entre hôpitaux et cliniques. Les résultats montrent que l'approche à deux étapes surpasse le PRM seul, en produisant des réseaux à la fois efficaces sur le plan opérationnel et socialement acceptables. En ajustant les poids dans la fonction objectif, l'algorithme peut générer des réseaux qui minimisent soit la distance de déplacement, avec certains compromis sur le bruit, soit réduisent significativement la nuisance sonore, au détriment de trajets légèrement plus longs. Cette étude souligne la flexibilité du cadre proposé, qui peut s'adapter à divers contextes réglementaires et sociétaux, et ouvre la voie à des réseaux de livraison par drones plus durables et respectueux des communautés.

References

- [1] *Federal Agency Review of Selected Airport Noise Analysis Issues*. Report for the Department of Defense. Federal Interagency Committee on Noise (FICON), 1992.
- [2] Sanford Fidell and Laura Silvati. "Parsimonious alternative to regression analysis for characterizing prevalence rates of aircraft noise annoyance". In: *Noise Control Engineering Journal* 52.2 (2004), p. 56. ISSN: 07362501. DOI: 10.3397/1.2839741.