

# Caractérisation acoustique d'un drone pour la localisation à partir d'une antenne microphonique par formation de voies et goniométrie

Torea BLANCHARD<sup>1</sup>, Jean-Hugh THOMAS<sup>1,2</sup>, Kosai RAOOF<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans, LAUM UMR CNRS 6613  
Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans Cedex 09, France

<sup>2</sup>École Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans, ENSIM  
1 Rue Aristote, 72000 Le Mans, France

torea.blanchard@univ-lemans.fr, jean-hugh.thomas@univ-lemans.fr  
kosai.raoof@univ-lemans.fr

**Résumé** – Cette étude expérimentale présente un système de surveillance basé sur l'acquisition de mesures acoustiques afin de pouvoir localiser des drones dans leur environnement. Pour cela, un protocole de mesures a été mis en place afin de connaître les caractéristiques acoustiques d'un petit drone commercial. Ces mesures ont permis de construire une antenne de microphones adaptée aux fréquences du signal émis par l'appareil en utilisant peu de capteurs. Deux méthodes de localisation sont proposées et évaluées à partir de mesures en condition anéchoïque et à l'extérieur. La première est basée sur la méthode de formation de voies dans le domaine temporel. Une étape de filtrage permettant d'éliminer les fréquences indésirables du signal est effectuée en amont de l'étape de formation de voies. L'intérêt d'un choix de filtrage adapté est étudié. La seconde se base sur une approche directe en estimant les différences de temps d'arrivée de l'onde émise sur l'ensemble des paires de microphones de l'antenne.

**Abstract** – This experimental study presents a monitoring system based on the acquisition of acoustic measurements in order to locate drones in their environment. For this purpose, a measurement protocol has been set up to determine the acoustic characteristics of a small commercial drone. These measurements made it possible to build a microphone antenna adapted to the frequencies of the signal emitted by the device using few sensors. Two methods of localization are proposed and evaluated based on measurements in anechoic conditions and outdoors. The first is based on the Delay-&-Sum beamforming in the time domain. A filtering step to remove unwanted frequencies from the signal is performed before the beamforming step. The interest of a suitable filtering choice is studied. The second is based on a direct approach by estimating the Time-Differences-of-Arrival of the wave emitted on all pairs of microphones of the antenna.

## 1 Introduction

Au cours des dernières années, l'utilisation des drones est devenue de plus en plus courante depuis que la technologie permettant de les déployer est devenue très accessible. Cependant, les drones peuvent avoir un comportement dangereux, que ce soit voulu ou non. En effet, les drones peuvent facilement voler à proximité de bâtiments sensibles ou d'espaces aériens stratégiques et constituer une menace. Leur localisation à l'aide de systèmes de surveillance standard tels que les systèmes radar ou électro-optiques semblent difficiles compte tenu de leur petite taille et des matériaux utilisés. Le son émis par leur motorisation et leur sifflement aérodynamique sont exploités ici à l'aide d'un réseau de microphones dans l'objectif de les détecter et de les localiser par mesures acoustiques.

Plusieurs recherches se sont focalisées sur la localisation de drones par mesures acoustiques. Par exemple, Case et *al.* [1] ont imaginé une antenne linéaire de 24 microphones pour suivre un petit drone par formation de voies temporelle. Cependant, les auteurs ont limité leur étude à l'espace 2D. Une localisa-

tion au cas 3D a été proposée par Chang et *al.* [2] en estimant les différences de temps d'arrivée entre paires de microphones à l'aide de la fonction GCC-PHAT (Generalized Cross-Correlation with Phase Transform). Ils ont déployé deux réseaux de microphones en forme de tétraèdre pour assurer la localisation dans l'espace 3D sous l'hypothèse de champ proche.

Ces travaux de recherches prolongent ceux réalisés dans [3] et présentent une approche de localisation - sous l'hypothèse de champ lointain, qui limite la localisation aux angles d'azimut et d'élévation - appliquée au suivi d'un petit drone commercial (Phantom IV advanced DJI) utilisant une antenne de 10 microphones. Le document est organisé comme suit : la section 2 présente les méthodes de localisation acoustique utilisées, tandis que les sections 3 et 4 présentent des mesures expérimentales pour évaluer la signature acoustique du drone et les performances de localisation à partir de mesures en salle anéchoïque et en extérieur.

## 2 Méthodes de localisation acoustique

### 2.1 Formation de voies temporelle

La formation de voies dans le domaine temporel consiste à focaliser l'antenne dans une direction "d'écoute" en exploitant l'ensemble des signaux mesurés. Chaque signal est retardé ou avancé d'un temps  $\tilde{\tau}(\Theta)$ , dépendant de la direction  $\Theta$  visée. Les signaux ainsi obtenus sont sommés donnant en sortie de formation de voies :

$$p(t, \Theta) = \frac{1}{M} \left( p_{\text{ref}}(t) + \sum_{n=1}^{M-1} p_n(t + \tilde{\tau}_n(\Theta)) \right). \quad (1)$$

$p_{\text{ref}}(t)$  est le signal de pression acoustique mesuré par le microphone de référence,  $p_n(t)$  le signal de pression acoustique du microphone  $n$  et  $M$  le nombre de microphones de l'antenne. La position de la source est donnée par le couple d'angles  $\Theta = (\theta, \phi)$  associée au maximum du signal en sortie de formation de voies.

### 2.2 Goniométrie acoustique

La goniométrie acoustique consiste à estimer la direction d'une source  $\mathbf{n}_s$  par la résolution d'un problème inverse dépendant uniquement de la géométrie de l'antenne, de la célérité de l'onde acoustique et des différents temps de propagation existant entre chaque microphone et celui de référence :

$$\boldsymbol{\tau} = c^{-1} \mathbf{D} \mathbf{n}_s, \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\tau} = [\dots \tau_n \dots]^T, \quad \mathbf{D} = [\mathbf{x}_1 \dots \mathbf{x}_n \dots \mathbf{x}_{M-1}]^T.$$

avec  $\tau_n$  le temps de propagation entre le microphone  $n$  et le microphone de référence,  $\mathbf{x}_n$  la position vectorielle du microphone  $n$  et  $\mathbf{n}_s$  le vecteur normalisé pointant la direction de la source.  $[\cdot]^T$  indique l'opérateur transposé. Les temps de propagation entre paires de microphones sont estimés à l'aide de la fonction d'inter-corrélation généralisée (GCC) [4]. Pour plus de détails sur la méthode le lecteur peut se référer à [3].

### 2.3 Pré-traitement par filtrage fréquentiel pour la localisation

Généralement, la localisation des sources par formation de voies temporelle ou goniométrie est réalisée à partir de signaux non traités. Or le spectre du signal de la source est supposé présenter une structure harmonique du fait de la rotation des hélices [5]. La contribution énergétique de fréquences indésirables est alors prise en compte lors de l'estimation de la position d'une source. Un pré-traitement par filtrage est proposé pour éliminer les fréquences parasites. L'énergie des fréquences indésirables pouvant provenir d'autres sources est ainsi atténuée et le rapport signal/bruit du signal de sortie de la formation de voies est augmenté.

La méthode proposée consiste à appliquer des filtres passe-bande sur chaque signal pour isoler uniquement les harmoniques souhaitées. Les signaux sont limités dans un premier

temps aux fréquences respectant la relation de Shannon-Nyquist de l'antenne définie par  $f < \frac{c}{2d}$ , où  $d$  est le plus petit écart inter-microphonique de l'antenne. Puis l'harmonique dominante du signal est détectée en utilisant l'algorithme Harmonic Spectral Product [6]. Les harmoniques multiples de cette dernière sont considérées. Pour chacune, un filtre passe-bande à phase nulle d'ordre 2 avec un facteur de qualité  $Q = 10$  est appliqué.

## 3 Analyse acoustique d'un drone

Des mesures de caractérisation acoustique ont été réalisées sur le drone comportant quatre hélices bipales dans le but d'identifier les bruits aérodynamiques et mécaniques provenant de la rotation des hélices et des moteurs. Ces mesures permettront d'adapter la géométrie de l'antenne aux fréquences identifiées du signal.

Les mesures ont été effectuées avec et sans hélices pour analyser la contribution des hélices et des moteurs au bruit total. Les Densités Spectrales de Puissance (DSP) des signaux enregistrés avec et sans hélices pour une vitesse de rotation fixe sont données à la Figure 1. La fréquence de rotation du rotor a été estimée à l'aide d'une caméra rapide à environ 7742 tr.min<sup>-1</sup>, soit  $f_0 = 128$  Hz. Les harmoniques paires de plus haute énergie et les harmoniques impaires, de plus faible énergie, sont clairement visibles jusqu'à environ 6 kHz. Le graphe a été volontairement limité jusqu'à 2 kHz pour plus de lisibilité. La structure harmonique du spectre lorsque les pales sont montées montre clairement que le bruit est principalement d'origine aérodynamique.

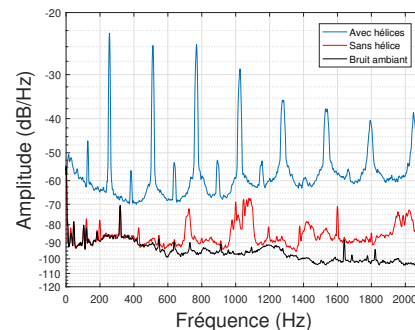


FIGURE 1: Densités spectrales de puissance du son émis par le drone avec hélices (bleu), sans hélice (rouge) et du bruit de fond (noir) dans la salle anéchoïque jusqu'à 2 kHz.

## 4 Localisation

La figure 2 montre un schéma de l'antenne utilisée pour les mesures de localisation en salle anéchoïque et en extérieur. Les microphones ont été placés de sorte que l'antenne soit adaptée aux fréquences inférieures à 2144 Hz pour les mesures en salle anéchoïque et a été étendue à 3430 Hz pour celles réalisées à l'extérieur. Ce changement de géométrie de l'antenne se justifie par l'intérêt de considérer plus d'harmoniques dans sa

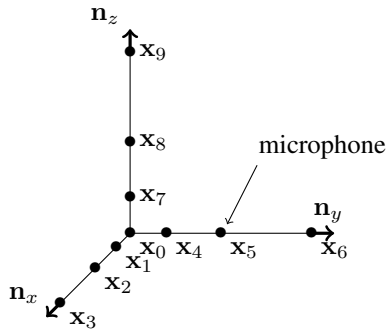


FIGURE 2: Schéma de la géométrie de l'antenne composé de dix microphones.

bande d'étude lors des mesures à l'extérieur. La vitesse du son est fixée à  $c = 343 \text{ m.s}^{-1}$ . Les signaux enregistrés par les microphones sont divisés en segments de temps de 0,15 s et 0,5 s pour la formation de voies et la goniométrie respectivement. La localisation du drone est ensuite traitée pour chaque segment.

#### 4.1 Salle anéchoïque

Le drone a été placé au sol à 3 m du centre de l'antenne dans la direction  $45^\circ$  en azimut et  $3.8^\circ$  en élévation (le centre du drone était considéré dans le même plan que les hélices). Le drone a volé verticalement du sol jusqu'à une hauteur d'environ 3,5 m avec une vitesse presque constante. La position du drone a été approximée par une trajectoire rectiligne verticale à vitesse constante connaissant le temps de trajet et les positions de départ et d'arrivée de l'appareil. La localisation à partir des signaux non filtrés est comparée aux estimations obtenues pour 4 filtrages différents. Chaque filtrage a permis de sélectionner entre 1 et 4 harmoniques du signal, allant de la fondamentale aux harmoniques plus hautes. La figure 3 montre un exemple de DSP avec 4 harmoniques sélectionnées.

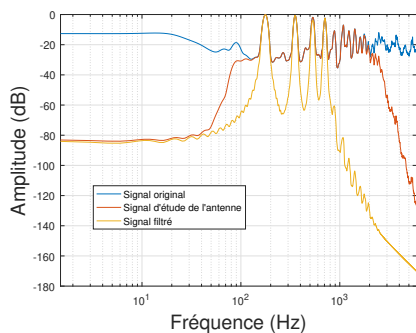


FIGURE 3: Densités spectrales de puissance du signal original (bleu), du signal limité à la bande d'étude de l'antenne (rouge) et de sa version filtrée pour la formation de voies (jaune) obtenues à partir du microphone de référence dans la chambre anéchoïque. Quatre harmoniques ont été sélectionnées.

Les erreurs de localisation en azimut et en élévation pour la

formation de voies sont données à la figure 4 et ceux de goniométrie à la figure 5. Les résultats montrent une sensible dégradation des erreurs lorsque la totalité du signal est prise en compte. Le bruit provenant de fréquences indésirables pourraient détériorer la précision de localisation. Inversement, les erreurs de localisation sont plus importantes si le nombre d'harmoniques sélectionnées n'est pas suffisant.

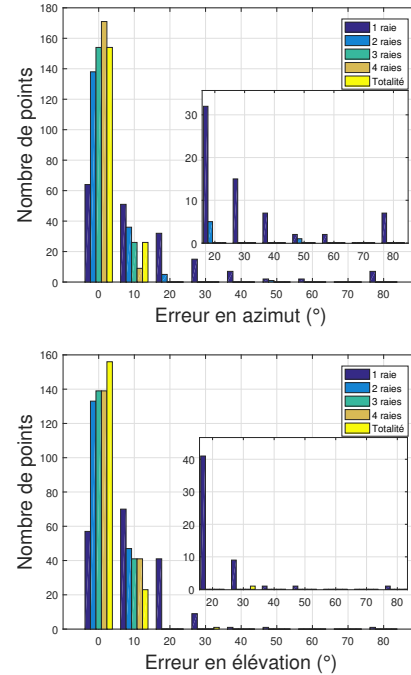


FIGURE 4: Histogrammes des erreurs de localisation du drone par formation de voies après filtrage pour différentes harmoniques sélectionnées et la totalité du signal dans  $[0^\circ, 80^\circ]$  et par intervalle de  $10^\circ$  en azimut (haut) et en élévation (bas).

#### 4.2 Mesures extérieures

Une trajectoire similaire a été réalisée en extérieur. Le drone a été placé à une distance d'environ 10,4 m et a volé verticalement à une hauteur d'environ 5 m. Les coordonnées GPS de l'antenne ont été mesurées à l'aide d'une application mobile. Les coordonnées cartésiennes  $x, y$  du drone sont calculées à partir de la latitude et la longitude fournies par le GPS du drone et celles du microphone de référence. La coordonnée  $z$  est donnée par le capteur du drone. Enfin, les angles en azimut et en élévation sont obtenus par passage en coordonnées sphériques. Un exemple de résultats de localisation est donné à la figure 6 avec un filtrage des signaux permettant de considérer uniquement 3 harmoniques.

### 5 Conclusion

Cette étude a permis de déterminer la signature acoustique d'un petit drone commercial (DJI Phantom IV) en vue de concevoir une antenne acoustique adaptée pour réaliser des mesures

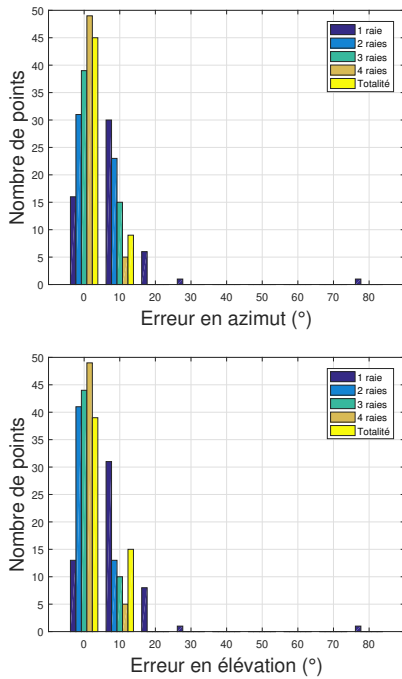


FIGURE 5: Histogrammes des erreurs de localisation du drone par goniométrie après filtrage pour différentes harmoniques sélectionnées et la totalité du signal dans  $[0^\circ, 80^\circ]$  et par intervalle de  $10^\circ$  en azimut (haut) et en élévation (bas).

de localisation. Deux méthodes ont été proposées pour assurer la localisation. La première est basée sur la formation de voies temporelle. La deuxième méthode est basée sur l'estimation des temps de propagation entre paires de microphones à l'aide de la fonction GCC. Un pré-traitement des signaux par filtrage fréquentiel est effectué pour considérer uniquement les harmoniques souhaitées, ceci dans le but de réduire l'énergie de fréquences parasites. La méthode ne nécessite pas forcément une connaissance préalable des harmoniques du drone mais requiert leur détection.

Des mesures expérimentales ont été faites dans une salle anéchoïque et en extérieur. L'antenne a été conçue à partir des mesures de caractérisation acoustique du drone. Une étude du choix du filtrage lors du pré-traitement des signaux a montré l'influence du nombre d'harmoniques considéré dans les signaux mesurés sur les résultats de localisation. Un nombre insuffisant d'harmoniques donne lieu à des erreurs en matière d'angles plus importantes.

Un post-traitement des données par filtrage de Kalman est en cours d'étude pour le suivi de la trajectoire de l'appareil en de vol.

## Remerciements

Ces travaux sont financés par une bourse de thèse DGA.

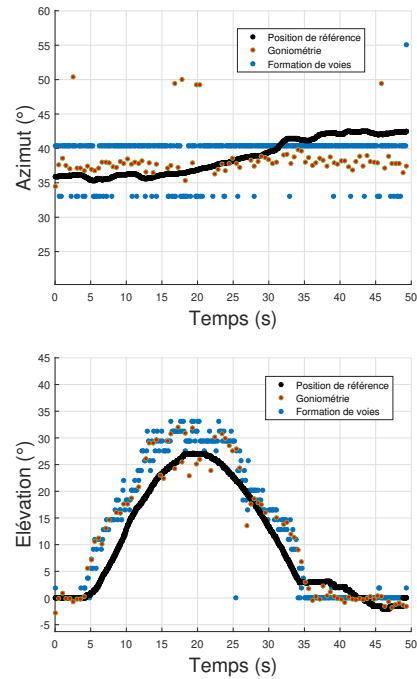


FIGURE 6: Résultats de localisation par formation de voies après filtrage (bleu), goniométrie (rouge/vert) et les positions GPS (noir) pour les mesures extérieures en azimut (haut) et en élévation (bas).

## Références

- [1] Ellen E Case, Anne M Zelnio, and Brian D Rigling. Low-cost acoustic array for small uav detection and tracking. In *Aerospace and Electronics Conference. IEEE National*, pages 110–113. IEEE, Dayton, USA, 2008.
- [2] Xianyu Chang, Chaoqun Yang, Junfeng Wu, Xiufang Shi, and Zhiguo Shi. A surveillance system for drone localization and tracking using acoustic arrays. *IEEE 10th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM)*, pages 573–577, Sheffield, UK, 2018.
- [3] Torea Blanchard, Jean-Hugh Thomas, Kosai Raoof, Alexis Chalopin, and Maximilien Vidal. Localisation par antenne acoustique avec peu de capteurs : goniométrie et formation de voies. *XXVIème colloque GRETSI*, Nice, France, 2017.
- [4] Charles Knapp and Glifford Carter. The generalized correlation method for estimation of time delay. *IEEE transactions on acoustics, speech, and signal processing*, 24(4) :320–327, 1976.
- [5] Giorgia Sinibaldi and Luca Marino. Experimental analysis on the noise of propellers for small uav. *Applied Acoustics*, 74(1) :79–88, 2013.
- [6] Manfred R Schroeder. Period histogram and product spectrum : New methods for fundamental-frequency measurement. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 43(4) :829–834, 1968.