

# CFA/VISHNO 2016

## Détection, classification et suivi de trajectoire de sources acoustiques par captation pression-vitesse sur capteurs MEMS numériques

A. Ramamonjy<sup>a</sup>, E. Bavu<sup>a</sup>, A. Garcia<sup>a</sup> et S. Hengy<sup>b</sup>

<sup>a</sup>LMSSC, CNAM, 2 rue Conté, 75003 Paris, France

<sup>b</sup>Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis, 5 rue du Général Cassagnou - BP  
70034, 68300 Saint-Louis, France  
aroramamonjy@gmail.com



LE MANS

L'utilisation de drones aériens est en plein essor, et la surveillance contre une utilisation inappropriée de ces appareils est un sujet de préoccupation majeure. Dans une stratégie multimodale acoustique et optronique de détection et de suivi de trajectoire par fusion de données, l'attention est ici portée au sous-système acoustique en cours de développement. Le dispositif acoustique est un ensemble d'antennes compactes (diamètre < 10 cm) et autonomes, mises en réseau afin de couvrir une zone étendue de surveillance.

Chaque unité du réseau est constituée de 10 microphones MEMS numériques permettant de mesurer de manière optimisée la pression et les composantes du vecteur de vitesse particulière sur une large gamme de fréquence. Nous présentons ici les contraintes matérielles de cette approche, et les traitements réalisés pour chaque unité du réseau. Pour augmenter la robustesse de l'approche, nous compléterons la localisation de la source mobile par une étape de détection et de classification de signature acoustique. Pour cela, un apprentissage sera effectué à partir d'une base de données de signatures acoustiques pré-enregistrées.

Une fois la source détectée, l'algorithme proposé permet de réaliser un suivi de sa trajectoire, dans plusieurs sous-bandes de fréquences adaptées aux écarts inter-microphoniques et aux caractéristiques du signal. Il est fait usage d'une approche par analyse en composantes principales dans le domaine temporel.

Des résultats de la localisation en présence d'une source sont présentés, ainsi que des pistes de développement pour une localisation en présence de sources concurrentes, et d'amélioration du suivi de trajectoire par filtrage particulière et fusion de données.

## 1 Introduction

Les récents survols de sites sensibles par des drones ont montré l'importance de la protection des biens et des personnes face à une utilisation inappropriée ou malveillante de ces véhicules. Ces engins sont difficiles à détecter par les systèmes anti-intrusion actuels en raison de leur petite taille, de leur faible signature acoustique, et de leur capacité à changer de direction et de vitesse rapidement tout en volant à faible altitude.

Une approche multimodale acoustique-optronique originale ayant pour objectif de réaliser des tâches de détection, classification, et de suivi de cible mobile est en cours d'étude. Elle consiste en l'utilisation d'un réseau de capteurs acoustiques compacts, autonomes et fonctionnant de concert, pour guider l'orientation d'un capteur optronique.

L'étude du sous système acoustique constitue l'objet d'un travail de thèse dont nous présentons ici les objectifs ainsi que des résultats préliminaires obtenus après 5 mois d'avancement. En section 2 est présentée une vue globale de l'approche proposée. L'étape de localisation acoustique est détaillée dans la partie 3. La section 4 présente le capteur utilisé lors des essais de localisation discutés en 5.

## 2 Approche globale

Le système, en cours de développement, est constitué d'un réseau de capteurs acoustiques, utilisé pour le guidage d'un capteur optronique (voir figure 1).

### 2.1 Réseau de capteurs acoustiques autonomes

Un capteur acoustique pression-vitesse 3 axes (AVS, de l'anglais *Acoustic Vector Sensor*), compact (envergure inférieure à 10 cm) est en cours de développement au LMSSC<sup>1</sup> dans le cadre d'une thèse co-financée DGA et ISL (thèse DGA no. 2015361). Ce type de capteur peut mesurer en un point la pression acoustique et les trois composantes vectorielles de la vitesse particulière dans un repère orthonormé local. Lorsque seule la pression acoustique est utilisée pour la localisation de sources, il

1. Laboratoire de mécanique des structures et des systèmes couplés, EA 3196

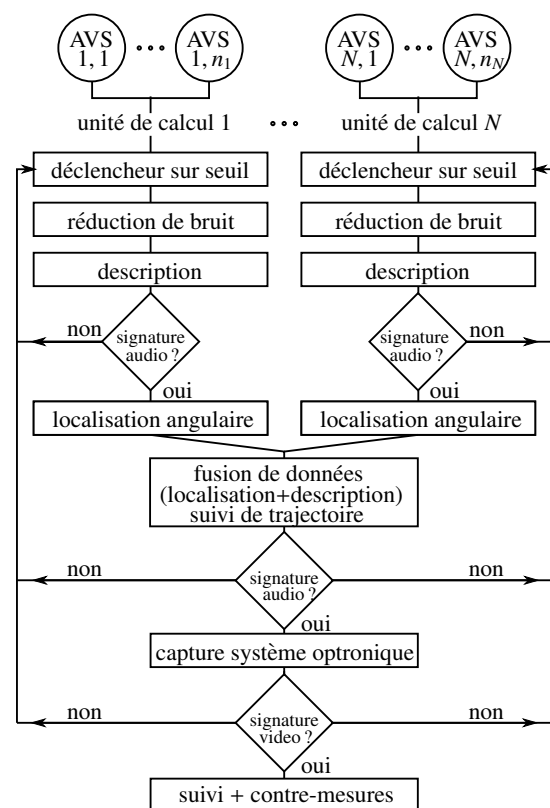


FIGURE 1 – Schéma de la méthode de détection/classification/suivi de cible

est souvent nécessaire d'utiliser des antennes de grande envergure. La localisation avec une antenne compacte est permise par la mesure en un point du champ acoustique complet (pression et vitesse particulière).

La modalité acoustique permet la localisation avec une large couverture angulaire. De plus, la détection acoustique est robuste à la présence d'obstacles (bâtiments) sur le trajet cible-capteur. Une limitation des capteurs acoustiques est leur faible portée de détection/localisation en milieu complexe (réflexion, diffraction, diffusion, effets micro-météorologiques) et bruité.

La portée peut être augmentée par l'utilisation d'un réseau d'AVS. De plus, un AVS peut être rendu autonome en l'associant à une unité de calcul dédiée aux opérations

de traitement du signal et de reconnaissance de signature. Les algorithmes existants pour la localisation de sources multiples [1, 2, 3] basés sur des mesures avec  $n$  AVS synchronisés seront utilisables en formant  $N$  groupes de  $\{n_1, \dots, n_N\}$  AVS reliés respectivement aux mêmes  $N$  unités de calcul (voir figure 1).

## 2.2 Système multimodal multi-capteurs

L'intégration d'un réseau d'AVS au sein d'un système multimodal et multi-capteurs de détection, classification et de suivi de trajectoire (voir figure 1) est proposée. Le système d'imagerie active à crénelage temporel développé à l'ISL<sup>2</sup> permet la distinction et le suivi vidéo d'un drone avec une portée dépassant le kilomètre. Cependant, la connaissance a priori de la position de la cible est nécessaire au début du suivi vidéo. Cette première position peut être estimée grâce au réseau de capteurs acoustiques.

Lors du dépassement d'un seuil énergétique, une réduction de bruit par formation de voies dans 4 directions principales sera effectuée. Dans chacune de ces voies, une description et une classification sera effectuée. Si la signature acoustique d'un drone est identifiée, la procédure de localisation par méthode acoustique est enclenchée. Puis, une mutualisation des données de plusieurs capteurs (description, angles de localisation) permettra d'obtenir une localisation complète de la cible par triangulation à partir des angles de localisation de plusieurs capteurs. Un suivi de trajectoire par filtrage particulière sera opéré, ainsi qu'un affinage de l'étape de classification par la prise en compte du mouvement de la source et l'évolution de sa signature acoustique au cours du temps. Si la présence d'un drone est toujours suspectée, l'information de sa position sera utilisée comme donnée d'entrée pour le réglage initial du système d'imagerie active (orientation et profondeur de champ), avant enclenchement du suivi et de la classification vidéo pour compléter le suivi acoustique.

## 3 Méthode de localisation

Le schéma bloc de l'algorithme de localisation est présenté sur la figure 2. Cette section détaille les différentes étapes algorithmiques. Des essais de localisation sont effectués en section 5.

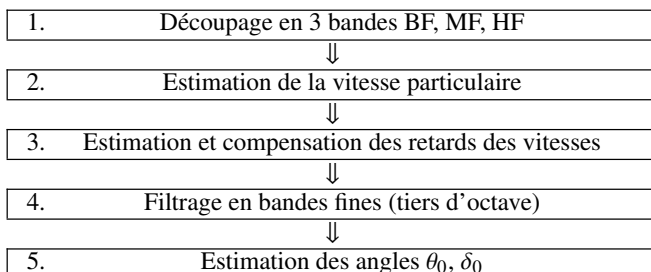


FIGURE 2 – Schéma bloc de l'algorithme de localisation

### 3.1 Modèle de signal et angles de localisation

On s'intéresse à la localisation, grâce à un capteur AVS placé à l'origine du repère orthonormé  $(O, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ , d'une

source en champ lointain émettant une onde plane venant de la direction définie par l'azimut  $\theta_0$  et le site  $\delta_0$ . La source émet un signal quelconque. La vitesse acoustique s'écrit :

$$\vec{v}(\vec{r}, t) = \vec{A}v_r(\vec{r}, t) \quad (1)$$

$$\vec{A} = [X, Y, Z]^T = -[\cos\theta_0 \cos\delta_0, \sin\theta_0 \cos\delta_0, \sin\delta_0]^T \quad (2)$$

où  $T$  désigne l'opérateur de transposition, et  $v_r = \frac{p_0}{\rho_0 c_0}$  dans le modèle d'onde plane, où  $p_0, \rho_0$  et  $c_0$  sont respectivement la pression acoustique à l'origine, la masse volumique de l'air et la célérité des ondes acoustiques dans l'air.

### 3.2 Estimation de vitesse particulière

La linéarisation de l'équation d'Euler dans le cadre de l'acoustique linéaire [4] permet de relier la vitesse acoustique  $\vec{v}$ , la pression acoustique  $p$  et la masse volumique de l'air  $\rho_0$  par :

$$\vec{v}(\vec{r}, t) = - \int_0^t \frac{1}{\rho_0} \vec{\text{Grad}}(p(\vec{r}, \tau)) d\tau, \quad (3)$$

L'intégration est approximée, dans le domaine temporel, par la méthode des trapèzes [5]. Une approximation  $\vec{g}_p$  du gradient de pression à l'origine est donnée par la différence finie de la pression au premier ordre :

$$\vec{g}_p = \sum_{i=\{x,y,z\}} \frac{p_{2,i} - p_{1,i}}{d_{12}} \vec{e}_i \quad (4)$$

où  $d_{12}$  est l'écartement inter-microphonique, et  $p_{1,i}$  et  $p_{2,i}$  sont respectivement les pressions mesurées sur l'axe  $\vec{e}_i$  aux positions  $-d_{12}/2$  et  $+d_{12}/2$ . Pour un écartement donné, une erreur importante sur l'estimation de la vitesse est obtenue en hautes fréquences, où l'approximation (4) n'est plus valide, et en basses fréquences, où l'amplification du bruit est importante. En pratique, l'estimation de la vitesse particulière est effectuée dans 3 sous-bandes de fréquences, en utilisant des écarts inter-microphoniques adaptés. Des distances inter-microphoniques de 6 cm, 2.5 cm et 1 cm sont donc respectivement utilisés en basses fréquences (BF : 200 à 1000 Hz), moyennes fréquences (MF : 1 à 2.5 kHz) et hautes fréquences (HF : 2.5 à 8 kHz) avec le capteur utilisé pour les essais de localisation. Les signaux dans les sous-bandes sont créés par filtrage passe bande de Butterworth [6], rendu zéro-phase par filtrage avant-arrière [7, 8].

### 3.3 Mesures de vitesse délocalisées

Lorsque la vitesse sur l'axe  $\vec{e}_i, i = \{x, y, z\}$  est mesurée en dehors de l'origine, sur l'axe  $\vec{e}_i$ , on parle de mesure de vitesse délocalisée [9]. Considérant une mesure de vitesse en un point  $P$  et dans l'hypothèse d'une onde incidente plane, la vitesse mesurée est la vitesse à l'origine (point  $O$ ) décalée du temps de propagation par rapport à  $\vec{OP}$ . On montre que ce retard sur un axe  $i$  est le même que celui de  $p_{2,i} + p_{1,i}$  sur  $p_0$ . Le retard est mesuré en utilisant une technique d'estimation de retards fractionnaires dans le domaine spectral, proposée par [10] et modifiée par [11]. Une fois estimé, ce retard est compensé pour obtenir une estimation du vecteur vitesse à l'origine. Les mesures délocalisées permettent une économie sur le nombre de capteurs utilisés car un même microphone peut servir à l'estimation du gradient de pression dans plusieurs bandes de fréquences<sup>3</sup>.

3. Par exemple sur le capteur figure 3(d) et sur un axe donné, le capteur à 2.5 cm du capteur central est utilisé (avec, respectivement, le capteur central

2. Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis

### 3.4 Estimation de la direction de la source

Une estimation des angles  $\theta_0$  et  $\delta_0$  est donnée par les expressions :

$$\theta_0 = 2 \arctan \left( \frac{-Y}{\sqrt{X^2 + Y^2} - X} \right) - \begin{cases} \pi & \text{si } P < 0, \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (5a)$$

$$\delta_0 = \text{signe}(P) \times \arcsin \left( \frac{-Z}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} \right) \quad (5b)$$

où  $P$  est l'amplitude de la pression acoustique. En supposant un modèle d'ondes planes, où les signaux de pression et de vitesse sont proportionnels,  $P$ ,  $X$ ,  $Y$  et  $Z$  (équation 2) sont estimés par une analyse en composantes principales dans le domaine temporel des signaux de pression et des signaux de vitesse à l'origine sur les 3 axes. Il s'agit d'une extension à 3D de l'approche utilisée par [12].

En pratique, l'analyse est répétée dans 17 bandes de tiers d'octave de fréquences centrales nominales (banc de filtres construit conformément à la norme ANSI S1.11 [13]) :

- (BF) : [200, 250, 315, 400, 500, 630, 800] Hz
- (MF) : [1000, 1250, 1600, 2000, 2500] Hz (6)
- (HF) : [3150, 4000, 5000, 6300, 8000] Hz.

### 3.5 Localisation de sources multiples

Une localisation de sources multiples est possible en adaptant le nombre, la position et la largeur des filtres utilisés en 3.4 pour concentrer les efforts de localisation dans les zones fréquentielles où les spectres des sources ne se recouvrent pas. La localisation échoue si ces zones n'existent pas. D'autres approches seront testées, comme celles de [2] et de [3], qui se proposent de localiser respectivement  $4N - 2$  et  $8N - 2$  sources avec  $N$  AVS, si celles-ci sont suffisamment incohérentes.

## 4 Capteur à base de MEMS numériques

### 4.1 Microphones MEMS numériques

Un capteur est en cours de développement, à base de microphones MEMS au silicium [14] à sortie numérique. L'intérêt que porte la communauté scientifique à ce type de capteurs pour la conception d'antennes acoustiques est croissant [14, 15, 16]. Les MEMS de dernière génération présentent de bonnes performances dans la bande audible [17]. Leur faible coût, leur petite taille, et le conditionnement et la numérisation intégrés au système sur puce, permettent une miniaturisation et une densification des antennes acoustiques, et le déploiement relativement aisé de grands réseaux acoustiques.

### 4.2 Géométrie et versions d'étude

Deux versions d'étude ont été montées. La première version (figure 3(a)) est dotée d'une structure rigidifiante cubique. Les tests réalisés avec ce capteur ont montré que des effets de diffraction importants apparaissent dès 4000 Hz, et qu'un moindre encombrement autour du dispositif est nécessaire pour éviter ces phénomènes dans le domaine fréquentiel visé (200 Hz à 8000 Hz).

et le capteur à 1.5 cm du capteur central) en MF et en HF.

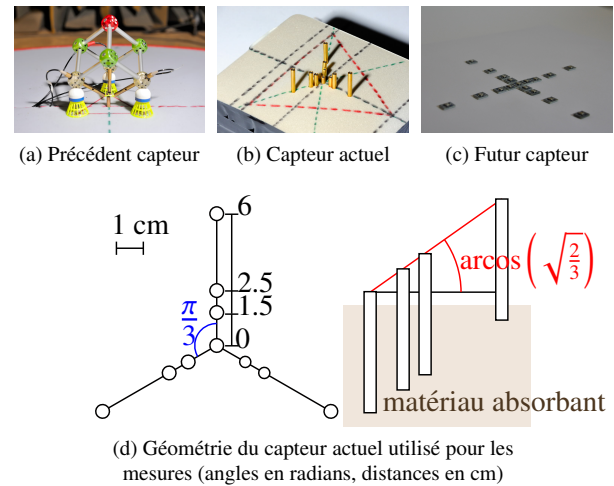
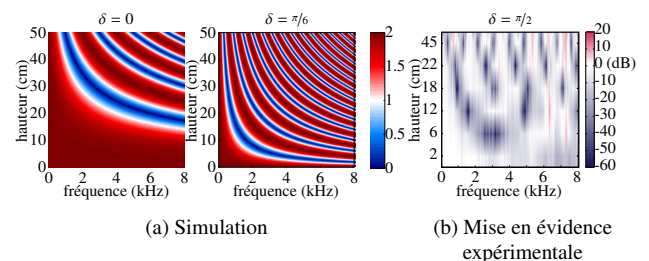


FIGURE 3 – Prototypes de capteurs

La version actuelle du capteur (figures 3(b) et 3(d)) a été utilisée pour les expériences présentées à la section 5. L'estimation de la vitesse particulaire en BF (resp. MF, HF) est effectuée avec les 3 doublets de capteurs situés à (0, 6) (resp. (0, 2.5), (1.5, 2.5)) cm de l'origine pour obtenir une distance inter-microphonique de 6 (resp. 2.5, 1) cm. Les axes du capteur sont orientés vers le haut, et la direction de la source est estimée dans un repère local avant d'être convertie dans le repère naturel nord/ouest/verticale. L'analyse montre que le placement des microphones à des hauteurs différentes biaise l'estimation de vitesse particulaire. En effet la présence d'une source image pour chaque microphone due aux réflexions au sol<sup>4</sup> provoque un filtrage en peigne du signal. La figure 4 montre le rapport de l'amplitude de pression  $p$  par rapport à  $p_0$ , où  $p_0$  est mesurée au sol et  $p$  à différentes hauteurs au dessus de  $p_0$ . Le tracé met en évidence que le filtrage dépend du site  $\delta$  de la source, et qu'il est différent pour des microphones situés à des hauteurs différentes, pouvant provoquer une erreur de la différence finie de la pression des différents couples de microphones du capteur actuel. Ce filtrage n'a pas lieu pour des microphones tous positionnés au sol.



Une source émet à un site  $\delta$  et à 2.8 mètres d'un capteur au sol. Le rapport des pressions en hauteur (au dessus du capteur au sol) et au sol est tracé. (a) : résultat analytique pour un sol totalement réfléchissant. (b) : mise en évidence expérimentale effectuée en chambre semi-anechoïque (sol réfléchissant, murs/plafond absorbants).

FIGURE 4 – Effet de sol

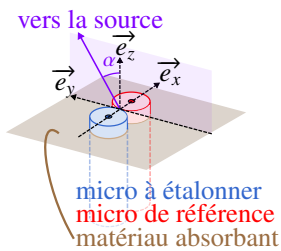
Afin d'éviter d'utiliser un modèle d'impédance de

4. En vue d'une utilisation en milieu extérieur, les réflexions sur les murs et le plafond qui apparaissent également en milieu fermé, ne sont pas prises en compte lors de la conception du capteur.

sol, le développement d'une troisième version du capteur est proposé (figure 3(c)). Les composantes  $v_x$  et  $v_y$  de la vitesse à l'origine seront estimées à l'aide de microphones MEMS numériques positionnés au sol, suivant deux axes orthogonaux  $\vec{e}_x$  et  $\vec{e}_y$ . Ainsi, les sites mesurés seront positifs et les effets de sol mis en évidence sur la figure 4 seront évités. La composante verticale de la vitesse sera estimée en utilisant l'expression  $v_z = \sqrt{\frac{p_0}{\rho_0 c_0} - v_x^2 - v_y^2}$  comme effectué par Microflow<sup>®</sup> [18, 19, 20]. Sur chaque axe ( $\vec{e}_x, \vec{e}_y$ ), 5 MEMS seront utilisés, positionnés à [-7,-4,-2,-1,0,1,2,4,7] cm de l'origine. En utilisant les MEMS situés aux positions [0,1,2,4,7] cm, les écarts inter-microphoniques respectifs [1,2,3,4,5,6,7] cm pourront être utilisés pour estimer la vitesse particulière dans différentes zones fréquentielles (délocalisation des mesures de vitesse à [0.5, 1, 2.5, 2, 4.5, 3.5] cm respectivement). L'estimation de la direction de la cible sans délocalisation des mesures de vitesse pourra être effectuée en utilisant les couples de capteurs situés à (-7,+7), (-4,+4), (-2,+2), (-1,+1) cm de l'origine, évitant la phase d'estimation/compensation de retards, mais au prix d'un plus grand nombre de microphones et d'un plus petit nombre de zones fréquentielles d'étude possibles.

Le capteur final devra être pensé pour une utilisation en milieu extérieur, et en particulier être résistant aux intempéries.

### 4.3 Étalonnage



(a) Méthode d'étalonnage

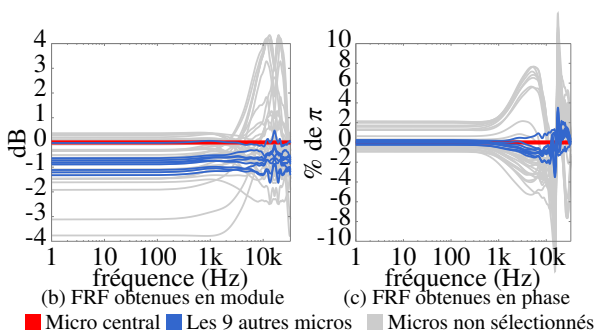


FIGURE 5 – Étalonnage relatif des microphones du capteur actuel

L'approche proposée reposant sur l'utilisation d'un capteur compact ayant pour objectif d'être efficace pour les tâches de localisation sur chaque bande, il est essentiel d'appareiller les microphones composant le capteur proposé. C'est pourquoi, un étalonnage relatif est réalisé par la mesure et la compensation des fonctions de réponse en fréquence (FRF) des microphones, relatives à celle du microphone central (référence). Pour cela, les microphones étalon et de référence sont insérés affleurant dans un matériau absorbant

en chambre anéchoïque, et un signal est émis depuis un haut-parleur situé dans le plan perpendiculaire à l'axe des deux micros, passant par le milieu de leurs deux capsules (figure 5(a)). Les FRF sont estimées en utilisant la méthode de Welch [21], puis leur module et leur phase sont lissés et interpolés à des bins fréquentiels arbitraires par une spline [22]. Les 10 microphones possédant les FRF les plus proches sont sélectionnés (courbes rouges et bleues) pour constituer le capteur actuel.

## 5 Essais de localisation et de suivi

### 5.1 Localisation de haut-parleurs

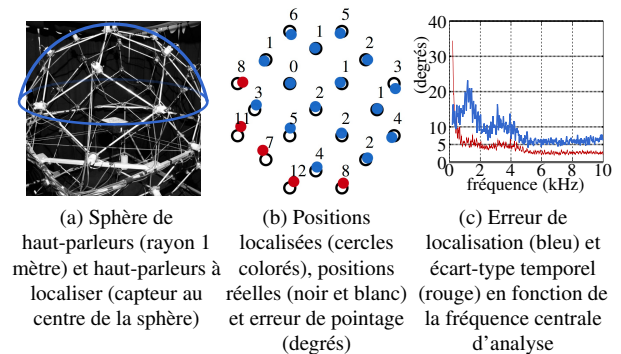


FIGURE 6 – Localisation de haut-parleurs

La localisation de 21 haut-parleurs de l'hémisphère nord (voir figure 6(a)) d'une sphère de 50 haut-parleurs est testée pour valider la méthode de localisation angulaire proposée. Les 21 haut-parleurs émettent à tour de rôle un bruit rose de 5 secondes, et le capteur est positionné au centre de la sphère. La localisation est répétée par trames de 10 ms. Dans chaque trame temporelle, une direction consensus est déterminée en calculant la moyenne pondérée des directions trouvées dans les 17 bandes de fréquence définies par (6). La pondération utilisée est similaire à celle employée par [12] : les poids augmentent avec l'émergence du signal de sous-bande par rapport au bruit de fond, et avec la prépondérance de la variance associée à la première composante principale par rapport à celles des 3 composantes principales suivantes.

La figure 6(b) montre la localisation moyenne obtenue pour chacun des haut-parleurs. La figure 6(c) montre des résultats qui seraient obtenus dans une sous-bande en fonction de sa fréquence centrale<sup>5</sup>. La courbe bleue représente l'erreur obtenue en moyenne sur toutes les positions et sur 5 secondes, la courbe rouge représente l'écart-type, moyenné sur toutes les positions, par rapport à la position trouvée en moyenne au cours du temps.

Les premiers résultats de localisation semblent prometteurs. On obtient en effet une erreur de localisation moyenne de 4 degrés. Les positions localisées fluctuent avec la fréquence et moins avec le temps (excepté aux plus basses fréquences). Ce résultat suggère la perturbation des mesures par des effets de salle, hypothèse confortée par la

5. En condition réelle de mesure, les 17 fréquences centrales d'analyse définies par (6) sont utilisées, et la direction donnée en résultat est la moyenne pondérée des 17 directions trouvées dans les 17 bandes de fréquence correspondantes. La figure 6(c) s'intéresse à la localisation qui serait obtenue dans une seule bande de fréquence en fonction de la fréquence centrale d'analyse utilisée.

présence de zones de l'espace où se concentrent de grandes erreurs de même type. Par exemple, les positions où l'erreur en azimuth est grande sont concentrées sur le quadrant 3 de la figure 6(b). Aussi, les plus grandes erreurs en site sont observées sur les positions aux plus petits sites. Ces dernières positions correspondent aux zones non protégées des réflexions au plafond par un matériau absorbant<sup>6</sup>. Des mesures en chambre semi-anéchoïque (murs/plafonds absorbants et sol réfléchissant) ont exhibé une erreur absolue moyenne en élévation ( $9.5^\circ$ ) qui dépasse celle obtenue en azimuth ( $5.5^\circ$ ), mettant en évidence l'effet de sol. En vue d'une utilisation en milieu extérieur ouvert, une attention particulière est à accorder à l'effet de sol dans la conception du capteur et de la méthode.

L'écart-type figure 6(c) est très élevé en BF, où il dépasse 30 degrés à 200 Hz, pour une raison à déterminer et qui peut être liée à l'intégration temporelle du signal pour la détermination de la vitesse (voir partie 3.2), ou à une mauvaise estimation du décalage temporel entre les vitesses délocalisées et la pression mesurée au centre du capteur.

## 5.2 Suivi de trajectoire simulée d'un drone

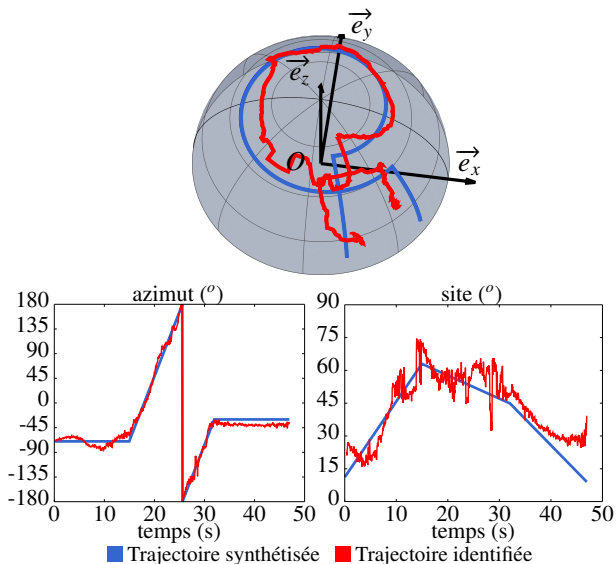


FIGURE 7 – Suivi de trajectoire d'un son de drone spatialisé

Afin d'évaluer les capacités de la technique pour suivre la trajectoire d'un drone, nous avons utilisé 50 haut-parleurs, répartis suivant une grille de Lebedev [23], pour synthétiser une trajectoire réaliste de drone par Ambisonie d'ordre 5 [24]. Le suivi de cette trajectoire par le capteur est réalisé par la répétition de la localisation sur des trames de 10 ms avec un recouvrement de 50%. La pondération utilisée en 5.1 est ré-utilisée pour obtenir une direction par trame. Un filtrage médian sur une seconde des positions trouvées au cours du temps permet d'obtenir la trajectoire présentée sur la figure 7. Celle-ci pourra être améliorée par la mise en place d'un filtrage particulière [25, 26].

La trajectoire est globalement bien identifiée. Une erreur angulaire moyenne de 8.6 degrés est obtenue. Cette valeur est

6. Les parois de la salle contenant la sphère sont partiellement recouvertes de matériau absorbant. En particulier, un matériau absorbant de taille réduite est disposé au plafond au dessus de la sphère. Mais ses dimensions et son positionnement indiquent qu'il ne couvre le trajet des premières réflexions au plafond que des ondes émises depuis les haut-parleurs d'angle d'élévation à partir de 50 degrés.

légèrement supérieure à celle obtenue pour les haut-parleurs fixes (voir section 5.1). Deux explications sont possibles : soit la prise en compte du mouvement perturbe la méthode (peu probable), soit la trajectoire synthétisée par méthode de spatialisation ambisonique s'écarte légèrement de la trajectoire réelle visée. Contrairement à ce qui est observé en milieu semi-anéchoïque où seul le sol est réfléchissant, des erreurs absolues moyennes similaires en azimuth et en élévation (7.6 degrés et 6.1 degrés respectivement) sont observées. L'utilisation d'un seuil énergétique d'activation de la localisation dans chaque bande de fréquence permet d'obtenir une trajectoire dont les instants de début et de fin coïncident parfaitement avec les instants de début et de fin de la synthèse.

## 6 Conclusions et travaux futurs

Une approche multimodale multi-capteurs pour la détection/classification et de suivi de cibles mobiles a été introduite, utilisant un capteur optronique et un réseau de capteurs acoustiques compacts.

La méthode de localisation utilisée a été présentée. Son originalité réside dans l'association des quatre principes suivants :

- la reproduction du comportement d'un capteur pression-vitesse 3 axes avec des capteurs de pression uniquement,
- la captation à l'aide de microphones MEMS numériques,
- la délocalisation des mesures de vitesse,
- une estimation large bande dans le domaine temporel, ne faisant pas d'hypothèse sur le signal émis et pouvant s'appliquer à tout type de signature acoustique.

Des premiers essais de localisation ont montré le potentiel de la méthode. La précision de localisation est satisfaisante en hautes fréquences, et permettrait l'orientation du capteur optronique développé à l'ISL. Les causes d'erreurs de localisation en basses fréquences sont à étudier.

L'algorithme utilisé fait l'hypothèse qu'une seule source est présente. Il peut être étendu à la localisation de sources multiples en adaptant le nombre, la fréquence centrale et le facteur de qualité des filtres utilisés pour concentrer les efforts de localisation dans les zones fréquentielles où la cible est prédominante.

Une campagne de mesures acoustiques de drones en vol permettra la constitution d'une base de données, à partir de laquelle des algorithmes d'apprentissage automatique seront entraînés à la détection de drone.

L'application proposée dans le cadre de ce projet est la détection et le suivi de drones aériens, mais celle-ci peut être étendue à d'autres types de cibles par adaptation de l'étape de détection/classification.

## Remerciements

Nous remercions la Direction Générale de l'Armement d'avoir rendu possible la réalisation de cette étude. Ce travail est soutenu financièrement par le ministère de la défense - Direction Générale de l'Armement (thèse DGA 2015361).

Nous remercions Isabelle Carel, Jean-Baptiste Doc, Christophe Langrenne, Pierre Lecomte, Guillaume Mahenc et Sarah Poirée pour les discussions intéressantes au sein du Laboratoire.

Le premier auteur voudrait remercier Eric Bavu, Alexandre Garcia et Sébastien Hengy pour le soutien et les précieux conseils apportés tout au long du projet.

## Références

- [1] De Bree, H. E., Wind, J., Sadasivan, S., Broad banded acoustic vector sensors for passive monitoring of aircraft, *DLRK, Aachen, Germany* (2009).
- [2] Wind, J. W., Tijs, E., Bree, H. E., Source localization using acoustic vector sensors : A MUSIC approach, *Institute of Sound and Vibration Research, ISVR* (2009).
- [3] Sidiropoulos, N. D., Liu, X., Identifiability results for blind beamforming in incoherent multipath with small delay spread, *IEEE Transactions on Signal Processing*, **49**(1), 228-236 (2001).
- [4] Rienstra, S. W., Hirschberg, A., An introduction to acoustics, *Eindhoven University of Technology*, **18**, 1-12 (2003).
- [5] Davis, P. J., Rabinowitz, P., Methods of Numerical Integration, *Academic Press*, **53** (1984).
- [6] Parks, T. W., Burrus, C. S., Digital Filter Design, *John Wiley & Sons*, chapter 7, sec. 7.3.3 (1987).
- [7] Mitra, S. K., Digital Signal Processing, *McGraw-Hill*, **2** (2001).
- [8] Gustafsson, F., Determining the initial states in forward-backward filtering, *IEEE Transactions on Signal Processing*, **44**(4), 988-992 (1996).
- [9] Song, Y., Wong, K. T., Azimuth-elevation direction finding using a microphone and three orthogonal velocity sensors as a non-collocated subarray, *J. Acoust. Soc. Am.*, **133**(4), 1987-1995 (2013).
- [10] Rodriguez, M. A., Williams, R. H., Carlow, T., Signal delay and waveform estimation using unwrapped phase averaging, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, **29**(3), 508-513 (1981).
- [11] Wiens, T., Bradley, S., A comparison of time delay estimation methods for periodic signals, *Digital Signal Processing* (2009).
- [12] Duval, B., Études de techniques d'extraction de l'information spatiale dans une scène sonore multicanal, *Mémoire de Master ATIAM, UPMC, Paris* (2006).
- [13] ANSI S1.11-2004, Specification for Octave-Band and Fractional-Octave-Band Analog and Digital Filters (2009).
- [14] Bogue, R., Recent developments in MEMS sensors : A review of applications, markets and technologies, *Sensor Review*, **33**, 300-304 (2013).
- [15] Vanwynsberghe, C., Marchiano, R., Ollivier, F., Challande, P., Moingeon, H., Marchal, J., Design and implementation of a multi-octave-band audio camera for realtime diagnosis, *Applied Acoustics*, **89**, 281-287 (2015).
- [16] Zwyssig, E., Faubel, F., Renals, S., Lincoln, M., Recognition of overlapping speech using digital MEMS microphone arrays, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 7068-7072 (2013).
- [17] Wang, Z., Zou, Q., Song, Q., Tao, J., The era of silicon MEMS microphone and look beyond, *18th International Conference on Transducers, IEEE*, 1-7 (2013).
- [18] De Bree, H. E., Ostendorf, C., Basten, T., An acoustic vector based approach to locate low frequency noise sources in 3D, *Proceedings DAGA, Rotterdam, the Netherlands* (2009).
- [19] De Bree, H. E., Druyvesteyn, W. F., An acoustic vector sensor based method to measure the bearing, elevation and range of a single dominant source as well as the ground impedance, *Euronoise, Edinburg* (2009).
- [20] Liñares, A., Druyvesteyn, W. F., Wind, J., de Bree, H. E., Determination of the location of a sound source in 3d based on acoustic vector sensors on the ground, *ASA NoiseCon* (2010).
- [21] Welch, P. D., The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra : A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms, *IEEE Transactions on audio and electroacoustics*, **15**(2), 70-73 (1967).
- [22] Garcia, D., Robust smoothing of gridded data in one and higher dimensions with missing values, *Computational Statistics & Data Analysis*, **54**(4), 1167-1178 (2010).
- [23] Lecomte, P., Gauthier, P.-A., Langrenne, C., Garcia, A., Berry, A., On the use of a Lebedev grid for Ambisonics, *Audio Engineering Society, Convention 139* (2015).
- [24] Lecomte, P., Gauthier, P.-A., Real-Time 3D Ambisonics using Faust, Processing, Pure Data, And OSC, *Submitted at 15th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-15)* (2015).
- [25] Gustafsson, F., Particle filter theory and practice with positioning applications, *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, **25**, 53-82 (2010).
- [26] Hermes, C., Wohler, C., Schenk, K., Kummert, F., Long-term vehicle motion prediction, *Intelligent Vehicles Symposium, IEEE*, 652-657 (2009).