



**HAL**  
open science

## Suivi d'insectes volants à l'aide de radars à ondes millimétriques

A Dore, D Henry, M Lihoreau, Hervé Aubert

► **To cite this version:**

A Dore, D Henry, M Lihoreau, Hervé Aubert. Suivi d'insectes volants à l'aide de radars à ondes millimétriques. XXIIèmes Journées Nationales Microondes, Jun 2022, Limoges, France. hal-03698566

**HAL Id: hal-03698566**

**<https://laas.hal.science/hal-03698566>**

Submitted on 18 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.

## Suivi d'insectes volants à l'aide de radars à ondes millimétriques

A. Dore<sup>1</sup>, D. Henry<sup>2</sup>, M. Lihoreau<sup>1</sup>, H. Aubert<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CRCA-CBI ; CNRS, Université Paul Sabatier, 118 route de Narbonne, 31062 Toulouse

<sup>2</sup> LAAS-CNRS, 7 avenue du Colonel Roche, 31400 Toulouse  
dhenry@laas.fr

**Résumé** – Cet article propose une nouvelle méthode d'acquisition de trajectoires en 3D d'insectes volants non munis de tags en utilisant des radars FM-CW à ondes millimétriques, pour des applications à forts enjeux en éthologie. La méthode est illustrée par l'acquisition de vols en 3D de bourdons à l'aide de deux radars FM-CW fonctionnant à 77GHz et dont les volumes de détection ont été estimés.

### 1. Introduction

L'enregistrement des déplacements d'insectes volants comme les pollinisateurs (abeilles, bourdons, frelons, ...) est un enjeu majeur en éthologie [1]. Il permet notamment de comprendre comment ces insectes traitent les informations visuelles et arrivent à s'orienter dans des environnements naturels complexes. Plusieurs techniques d'enregistrement de trajectoires de vol d'insectes existent aujourd'hui. Une de ces techniques est basée sur l'utilisation d'un radar harmonique et permet la détection à des distances allant jusqu'à 900m [2]. Ce suivi radar requiert néanmoins de munir les insectes de tags (transpondeurs) dont la masse peut influencer le comportement des insectes. L'ajout de tags peut être aussi difficile et chronophage en pratique. Par ailleurs, la résolution temporelle (3s) et les données obtenues uniquement en deux dimensions par le radar harmonique peuvent s'avérer insuffisantes lorsque des analyses fines de trajectoires sont requises. Une autre technique d'enregistrement de trajectoires couramment utilisée repose sur la détection optique à l'aide de caméras [3]. Ici, les tags ne sont pas nécessaires pour détecter les bourdons, et la trajectoire en 3D peut être enregistrée par des caméras stéréo. En revanche, les détections sont sensibles à la luminosité et aux obstacles présents dans la scène, et par ailleurs, la portée est limitée à quelques mètres seulement.

Dans cet article, une nouvelle méthode d'acquisition de trajectoires 3D d'insectes volants non-tagués est proposée en utilisant des radars FM-CW à ondes millimétriques ( $f=77\text{GHz}$ ,  $\lambda=3.9\text{mm}$ ). Cette technologie est susceptible d'augmenter les volumes de détection proposés par les solutions optiques, tout en évitant les problèmes de calibration posés par la luminosité ambiante. De plus, l'utilisation de tags n'est pas nécessaire, la détection reposant uniquement sur la rétrodiffusion par l'insecte des ondes millimétriques émises par le radar. Cette méthode de détection présentée

initialement avec un seul radar [4] est illustrée dans cet article en utilisant deux radars pour augmenter le volume de détection. Une estimation du volume de détection est proposée et les deux radars FM-CW sont utilisés pour l'enregistrement de trajectoires en 3D de vol de bourdons non-tagués.

### 2. Méthode

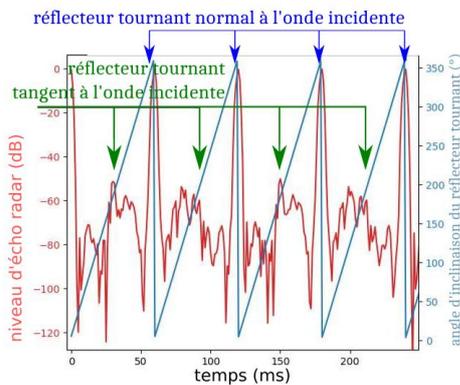
Les radars FM-CW sont commercialisés par l'entreprise INRAS GmbH et émettent une fréquence de base  $f_0=75.5\text{GHz}$  modulée par une bande de fréquence  $B=3\text{GHz}$  sur une rampe montante  $T_{up}=128\mu\text{s}$  en « dents de scie ». Il en résulte une résolution théorique en profondeur  $d=c/2B$  de 5cm ( $c=3e8\text{m/s}$  représente la vitesse de la lumière dans le vide). Un réseau d'antennes plaquées composé d'un seul canal de transmission (Tx, gain de 17.2dBi) et de huit canaux de réception (Rx, gain de 15.8dBi) constitue un front end qualifié de SIMO (Single Input Multiple Outputs). La puissance émise  $P_e$  est de 50mW. L'acquisition des huit signaux de réception par le radar est effectuée sur une période  $t_{res}=1\text{ms}$  définissant la résolution temporelle de la mesure radar. Le réseau antennaire est capable d'estimer l'angle d'arrivée d'une cible à l'intérieur d'un angle d'ouverture de  $51^\circ$  en azimut et de  $13.2^\circ$  en élévation.



Figure 1. Photographie de l'expérience effectuée dans un tunnel de vol au CRCA.

Afin de pouvoir estimer l'angle en élévation des cibles mobiles interrogées, une plaque métallique tournante est positionnée à 15cm au-dessus du front end (voir Figure 1). Ce réflecteur plan permet de balayer mécaniquement le faisceau antennaire dans un plan. L'angle variable en élévation (ou l'inclinaison)  $\theta$  du

faisceau est déduite du spectre de battement du signal radar en fonction du temps à la distance de 15cm, c'est-à-dire la hauteur entre le radar et le réflecteur (voir courbe rouge de la Figure 2). La période de ce signal permet d'estimer la durée d'un demi-tour du réflecteur tournant. La vitesse de rotation du réflecteur étant de 500rpm, cette durée, notée  $t_{res,3D}$ , est de 60ms. Il s'agit de la résolution temporelle de la mesure de trajectoire en 3D. Les maxima en amplitudes, annotés par des flèches bleues sur la Figure 2, sont obtenus pour une onde en incidence normale à la surface du réflecteur ( $\theta=0^\circ$ ), tandis que les pics d'amplitudes secondaires, annotés par des flèches vertes, sont obtenus pour une onde incidente tangentielle à cette surface ( $\theta=180^\circ$ ). La vitesse de rotation du moteur étant quasiment constante, l'angle d'inclinaison  $\theta$  peut alors être estimé par interpolation (courbe bleu clair sur la Figure 2) avec une précision de  $4^\circ$ . Pour chaque angle d'élévation, un algorithme basé sur la classification MUSIC [5] est appliqué pour estimer la distance R (précision de 3cm) et l'azimut  $\varphi$  (précision de  $0.9^\circ$ ) des cibles en mouvement.

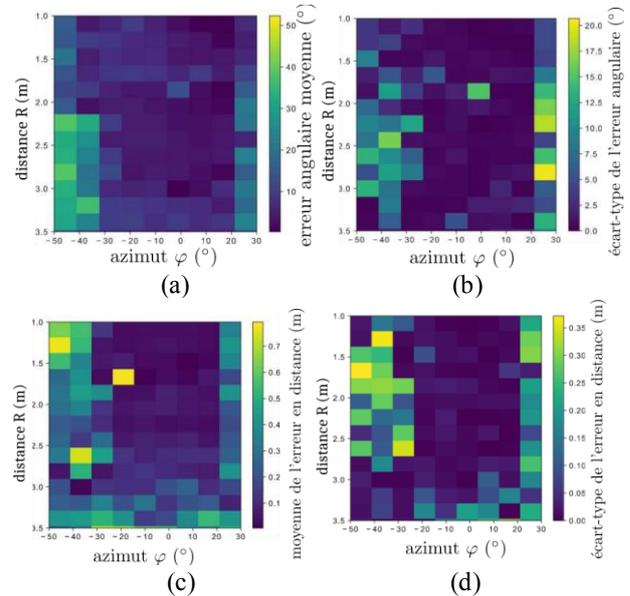


**Figure 2. Niveau d'écho radar mesuré à la distance radar-réflecteur (courbe rouge) et angle d'inclinaison (courbe bleue) en fonction du temps.**

L'expérience est effectuée dans un tunnel de vol dans laquelle est placée une colonie de bourdons (*Bombus terrestris*, voir Figure 1). Les bourdons sont entraînés plusieurs jours à se nourrir sur une fleur artificielle (réservoir en plastique rempli d'eau sucrée) située à quelques mètres de la ruche. À hauteur de la fleur artificielle sont positionnés « face-à-face » les deux radars SIMO (avec leurs réflecteurs tournants) à des distances de 1.70m et 1.87m de la fleur, respectivement. Juste avant les mesures radars, la fleur artificielle est retirée et les bourdons en quête de nourriture survolent la zone d'entraînement.

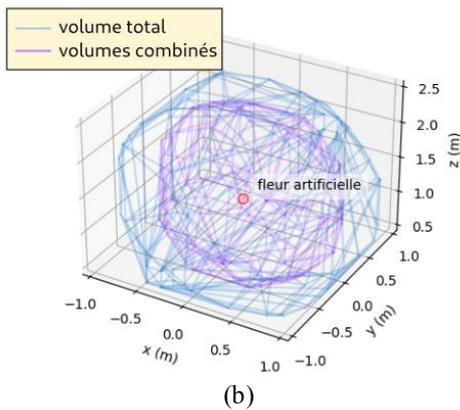
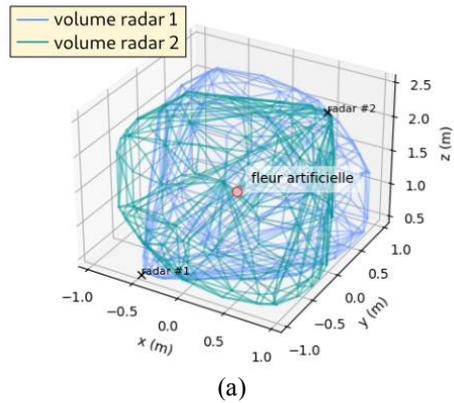
Les bourdons ne portant aucun tag ou transpondeur, l'enregistrement des trajectoires repose uniquement sur la rétrodiffusion par l'insecte volant des ondes millimétriques émises par le radar. Une série de mesures (non reportée ici) permet d'estimer que la surface équivalente radar (SER) d'un bourdon à 77.5GHz est de l'ordre de celle d'une sphère métallique de 5mm de diamètre, à savoir  $-47\text{dBsm}$  [4]. En considérant cette SER, le volume de détection du système radar est alors déterminé numériquement en effectuant une estimation de la position de la sphère en différentes positions en

azimut, élévation et distance. Sur la Figure 3 sont affichées les moyennes et les écart-types des erreurs de position de la sphère respectivement pour (a)-(b) l'angle en azimut, et (c)-(d) la distance au radar. Dans des intervalles  $\varphi=[-20^\circ; +20^\circ]$  et  $R=[0.3\text{m}; 2.5\text{m}]$ , l'erreur angulaire commise est inférieure à  $5^\circ$  et l'erreur en distance inférieure à 5cm. De la même manière, on estime la position de la sphère en élévation avec une erreur inférieure à  $5^\circ$  dans un intervalle  $\theta=[-30^\circ; +30^\circ]$ .



**Figure 3. Moyennes et écart-types des erreurs de position d'une sphère de 5mm de diamètre respectivement pour (a)-(b) l'angle en azimut et (c)-(d) la distance au radar.**

En considérant cette erreur de détection acceptable dans ces bornes de volume, le volume de détection d'un seul radar est estimé à  $3.4\text{m}^3$ . Il est illustré sur la Figure 4(a) pour les radars 1 et 2 positionnés de part et d'autre de la fleur artificielle (cercle rouge sur la Figure 4). Le volume total de détection de ces deux radars (en bleu sur la Figure 4(b)) est ainsi de  $4.8\text{m}^3$ . Le volume de détection commun aux deux radars (en violet sur la Figure 4(b)) est de  $1.9\text{m}^3$ .

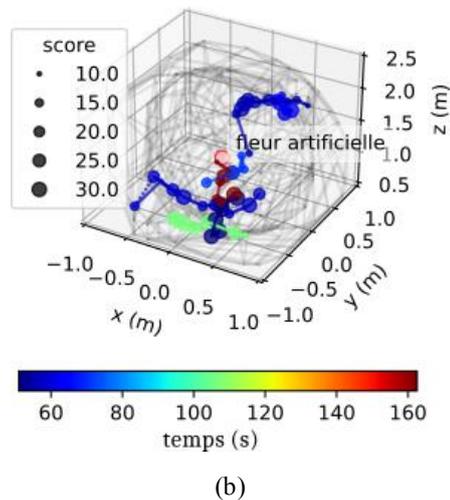
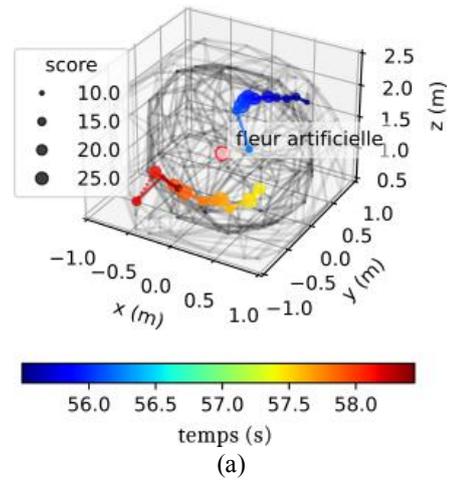


**Figure 4. Volumes de détection (a) individuels et (b) combinés obtenus deux radars positionnés à 1.70m et 1.87 m de part et d'autre de la fleur artificielle.**

### 3. Exemple de trajectoires 3D mesurées

Les trajectoires de bourdons non-tagués sont enregistrées en coordonnées  $(\theta, \varphi, R)$  par les deux radars après retrait de la fleur artificielle. Pour ce faire, l'algorithme d'estimation d'angle d'arrivée MUSIC (Multiple Signal Classification) est appliqué dans le plan de coupe  $(\varphi, R)$  pour chaque position du réflecteur tournant (i.e. pour différents angles en élévation  $\theta$ ). Un score basé sur la Probabilité de Fausse Alarme (PFA) est ensuite assigné à chaque détection. Plus le score est important, plus la probabilité qu'une cible soit détectée est élevée. Connaissant la position relative et absolue de chaque radar, un changement de coordonnées dans un repère cartésien  $(x, y, z)$  de référence est alors effectué pour combiner les trajectoires mesurées par les différents radars. Des exemples de trajectoires à l'intérieur du volume total de détection sont affichés sur la Figure 4 pour (a) un bourdon détecté dans le volume entre 55.5s et 58.5s et (b) plusieurs trajectoires détectées sur une durée totale de 100s. Ces trajectoires sont obtenues avec une résolution de  $0.9^\circ$  en azimut,  $4^\circ$  en élévation et 3cm en distance. Des absences de détection sont possibles, par exemple à 57s sur la Figure 5(a), et doivent s'expliquer par une analyse détaillée du clutter électromagnétique généré par l'environnement. La résolution temporelle est celle décrite dans la partie précédente ( $t_{res,3D}=60ms$ ). Si ces détections sont parfois courtes (moins d'une seconde), d'autres scénarios expérimentaux peuvent être

envisagés pour augmenter le temps de passage des bourdons dans les volumes de détection.



**Figure 5. (a) Trajectoires 3D d'un bourdon obtenues par détection radar ; (b) Plusieurs trajectoires 3D cumulées de bourdons sur une durée de 100s.**

### 4. Conclusion

L'utilisation de radars FM-CW à ondes millimétriques permet la mesure de trajectoires 3D de vol de bourdons non-tagués dans des volumes de détection de l'ordre de  $4.35m^3$ /radar. Plusieurs améliorations du système de détection sont à l'étude, notamment l'augmentation du volume de détection (augmentation de la sensibilité du radar, du nombre de radars), l'extraction des trajectoires individuelles lorsque plusieurs bourdons sont détectés simultanément, ainsi que la réduction du clutter électromagnétique (suppression de l'écho radar de cibles).

### Références

[1] Mola, J.M et al., "A review of methods for the study of bumble bee movement," *Apidologie* 50, 497–514 (2019)  
 [2] Riley, J.R. et al., "Tracking bees with harmonic radar," *Nature* 379, 29–30, (1996)

- [3] Ravi S. et al., "Bumblebees perceive the spatial layout of their environment in relation to their body size and form to minimize inflight collisions," Proceedings of the National Academy of Sciences 117, 31494-31499 (2020)
- [4] Dore, A. et al., "3D Trajectories of Multiple Untagged Flying Insects from Millimetre-wave Beamscanning Radar," IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, 1209-1210 (2020)
- [5] Belfiori, F. et al., "Application of 2D MUSIC algorithm to range-azimuth FMCW radar data," European Radar Conference, 242-245 (2012)