

## PROPOSITION DE SUJET DE THESE

**Intitulé :** Coordination multi-objectifs d'un essaim de drones pour la recherche et localisation de source électromagnétique

**Référence :** TIS-DTIS-2025-46

(à rappeler dans toute correspondance)

**Début de la thèse :** Dernier trimestre 2025

**Date limite de candidature :**

**Mots clés :** Essaim de drone ; Commande et estimation collaborative ; Propagation d'incertitudes ; Localisation de source ; Robotique expérimentale

### Profil et compétences recherchées :

Master 2 Recherche ou Diplôme d'ingénieur avec spécialisation en robotique, automatique, traitement du signal et des images.

Compétences : Automatique, Robotique, Traitement du Signal, Théorie des graphes

Outils : ROS2, Gazebo, Programmation Objet (Python ou C++)

Bon niveau rédactionnel, bon niveau d'anglais, expérience et goût pour la recherche appliquée.

### Présentation du projet doctoral, contexte et objectif :

Le contexte de ce sujet de thèse est le développement d'un système modulaire à base de drones de petite taille pour détecter et localiser de manière autonome dans un environnement inconnu les émetteurs électromagnétiques tels que les télécommandes de drones, téléphones, objets connectés, balises de secours. Ce système pourra être exploité dans le domaine civil ou défense afin d'assurer la sécurité des personnes et des biens, ainsi que par les industriels de l'énergie, de la gestion des données, des télécommunications, ou encore du transport (aérien, souterrain ou aérospatial).

La tâche considérée nécessite une planification dynamique des trajectoires d'un essaim de drones pour maximiser les chances de détection et localisation de l'émetteur, tout en respectant des contraintes dynamiques, de mesure et de communication. Les travaux s'appuieront sur une modélisation de la mesure des signaux électromagnétiques en jeu et sur une algorithmie d'estimation collaborative développée en parallèle dans le cadre du projet. Le développement d'un algorithme de localisation des drones de l'essaim n'est pas dans le périmètre des travaux, on considérera cependant des hypothèses réalistes sur les incertitudes associées. Le sujet ambitionne une validation expérimentale réaliste sur un essaim de drones avec calculs réalisés à bord.

L'objectif scientifique principal est ainsi la **planification de trajectoires optimales coopératives pour la localisation d'une source électromagnétique**. Il s'agit de développer une méthode de définition des trajectoires optimales en embarqué pour chaque drone de l'essaim afin de maximiser la probabilité de détection et localisation du signal cible, en tenant compte notamment des contraintes suivantes :

- L'intermittence éventuelle de l'émission du signal cible. L'essaim ou une partie des drones peuvent être amenés à alterner entre des périodes de détection du signal et d'exploitation de celui-ci au sein d'un algorithme de localisation agrégeant les informations recueillies.
- Les contraintes de positionnement relatif à la fois vis-à-vis de la source à localiser (formation de faisceau, goniométrie) et vis-à-vis des autres drones de l'essaim pour éviter la collision
- La propagation et la minimisation des incertitudes liées à la localisation des drones eux-mêmes.
- La communication entre les drones de l'essaim : contraintes de proximité et limitation des échanges.

En ce qui concerne la **commande des drones**, de nombreux travaux ont été publiés sur la planification de trajectoires pour la localisation et le suivi à l'aide de capteurs de vision. Les approches les plus simples considèrent des trajectoires planifiées en début de mission [NJM+21, Yan23]. Lorsque les trajectoires sont actualisées en ligne, l'objectif est de déplacer les drones vers des zones non encore explorées, éventuellement en évitant des obstacles, comme dans [Paul2017] qui considère un champ de potentiel 2D et une estimation de la distance entre drones à voilure fixe par RSSI. [LZXL21] utilise également un champ de potentiel dans un environnement 3D. [Iben2021] exploite une approche de type commande prédictive avec des estimées ensemblistes. Dans [Dam20], chaque drone met à jour sa trajectoire avec le nouveau centre pondéré des cellules de Voronoï obtenu une fois que les ensembles finis aléatoires décrivant les emplacements cibles possibles sont mis à jour. Dans [KWK+20] des trajectoires optimales permettant de maximiser la probabilité de détecter les objets surveillés ont été proposées. Les trajectoires sont décrites à l'aide de polynômes de Bernstein, ce qui permet de transformer une optimisation fonctionnelle en une optimisation paramétrique. Les trajectoires sont conçues dans [AS20, HZZ+23, ZLZ+24] via des techniques

d'apprentissage par renforcement, la récompense étant liée à la détection d'une source. Lorsqu'une position approximative est obtenue, une approche classique consiste à chercher le déplacement des drones qui va minimiser l'incertitude d'estimation évaluée à l'aide d'un critère exploitant la matrice d'information de Fisher de l'estimateur. Dans [MPMS19], des points d'observation successifs sont définis pour chaque drone de même que par [HMM+20], afin de déterminer les meilleures positions et orientations à rallier pour chaque drone en termes de maximisation de gain d'information ou minimisation d'incertitude d'estimation. Ensuite, des trajectoires polynomiales passant par ces points de vue sont construites tout en évitant les obstacles connus. Dans [Shah2016], des mesures TDoA sont exploitées par un filtre de Kalman étendu et des critères de type D-, A- et E-optimalité sont utilisés pour synthétiser la commande. Dans [Xu2016], la trace de la matrice de covariance de l'estimateur est utilisée pour réaliser une synthèse distribuée de trajectoire des drones en exploitant un modèle précis de leur dynamique. [Jiang2021] adopte une approche de type adaptive simulated annealing pour la synthèse de la commande de drones pour l'exploration de zone et la détection de sources RF. Dans [Rückin et al., 2025], une représentation unifiée est proposée afin d'intégrer des objectifs et contraintes multiples afin de construire une carte informationnelle sur laquelle la planification de trajectoires peut s'effectuer plus efficacement.

Au niveau de l'**optimisation des communications au sein de la flotte**, de nombreux travaux existent sur les problématiques de consensus entre agents avec limitation des communications. Ainsi, [Viel2022] considère une approche de type event-triggered afin d'atteindre un consensus en limitant les besoins de communication. [Chen2022] considère la localisation à base de RSS. Les communications sont limitées grâce à une approche utilisant la matrice d'information de Fisher de l'estimateur. Ainsi, un seul cycle de communication entre les UAVs périphériques et l'UAV centralisateur est nécessaire. Il s'agit de rechercher des structures nécessitant une information limitée permettant d'atteindre un niveau désiré de performances au niveau de la précision de la localisation et en garantissant la sûreté des vols [Liang21], [Milosz18]. Une approche possible est la modélisation sous forme de structures paramétriques (typiquement des gains) à optimiser.

Les travaux de définition de la **simulation et des expérimentations de validation** pourront s'appuyer sur le cadre proposé et les résultats de la compétition [AERPAW2023], dans laquelle les organisateurs fournissent un jumeau numérique pour l'évaluation de techniques aéroportées de localisation d'un émetteur au sol. Une partie des résultats de la compétition et de l'effort de simulation associé ont été publiés [Kudyba2024, Kudyba2024b].

Le plan de travail prévisionnel est le suivant :

- Revue de littérature et état de l'art des travaux existants sur la planification de trajectoires, l'estimation de la localisation et les systèmes multi-agents pour la localisation de source.
- Développement du simulateur et premiers tests de localisation et commande d'un essaim de drones en préparation de l'évaluation des performances du système, en lien avec un modèle de signaux électromagnétiques développé par ailleurs.
- Implémentation d'un choix de méthodes de l'état de l'art d'estimation et de planification de trajectoires de l'essaim répondant partiellement aux objectifs listés.
- Définition d'une méthode de planification de trajectoires des drones tenant compte de tous les objectifs et contraintes du problème. Dans un premier temps, la méthode cherchera à réaliser la mission en supposant une localisation et une communication parfaites.
- Vers plus de réalisme, on cherchera ensuite à prendre en compte les incertitudes de localisation et de la limitation des communications
- Validation expérimentale des composants développés sur plateformes réelles.

## Références

- [AS20] Y. Ajmera and S. Pratap Singh, Autonomous UAV-based Target Search, Tracking and Following using Reinforcement Learning and YOLOFlow, IEEE SSRR, 2020, pp. 15–20.
- [Chen2022] Cheng, X., Shi, W., Cai, W., Zhu, W., Shen, T., Shu, F. & Wang, J. (2022). Communication-Efficient Coordinated RSS-Based Distributed Passive Localization via Drone Cluster.. IEEE Trans. Veh. Technol., 71, 1072-1076.
- [Dam20] P. M Dames, Distributed multi-target search and tracking using the PHD filter, Autonomous robots 44 (2020), no. 3, 673–689.
- [HMM+20] G. Hardouin, J. Moras, F. Morbidi, J. Marzat, and El Mustapha Mouaddib, Next-Best-View planning for surface reconstruction of large-scale 3D environments with multiple UAVs, Proc. IEEE IROS, 2020, pp. 1567–1574.
- [HZZ+23] Y. Hou, J. Zhao, R. Zhang, X. Cheng, and L. Yang, UAV Swarm Cooperative Target Search: A Multi-Agent Reinforcement Learning Approach, IEEE Trans. Intelligent Vehicles 9 (2023), no. 1, 568–578.
- [Iben2021] J. Ibenhal, M. Kieffer, L. Meyer, H. Piet-Lahanier, S. Reynaud. Bounded-error target localization and tracking using a fleet of UAVs. Automatica, 132, pp. 1-13, 2021.

[Jiang2021] Jiang X., Li N., Guo Y., Yu D., Yang S. Localization of Multiple RF Sources Based on Bayesian Compressive Sensing Using a Limited Number of UAVs with Airborne RSS Sensor (2021) IEEE Sensors Journal, 21 (5), art. no. 9268105, pp. 7067 - 7079, DOI: 10.1109/JSEN.2020.3040280

[KWK+20] Kragelund, S., Walton, C., Kaminer, I., and Dobrokhodov, V. (2020). Generalized optimal control for autonomous mine countermeasures missions. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 46(2), 466-496.

[LZXL21] J. Li, X. Zhai, J. Xu, and C. Li, Target search algorithm for AUV based on real-time perception maps in unknown environment, Machines 9 (2021), no. 8, 147–173.

[MPMS19] A. A. Meera, M. Popovic, A. Millane, and R. Siegwart, Obstacle-aware adaptive informative path planning for UAV-based target search, Proc. IEEE ICRA, 2019, pp. 718–724.

[NJM+21] T. Niedzielski, M. Jurecka, B. Mizinski, W. Pawul, and T. Motyl, First successful rescue of a lost person using the human detection system: A case study from Beskid Niski (SE Poland), Remote Sensing 13 (2021), no. 23, 4903–4921.

[Paul2017] M. Paulsson, High-Level Control of UAV Swarms with RSSI Based Position Estimation, Master's thesis, Lund University, 2017, <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/8929658/file/8929659.pdf>

[Shah2016] S. A. A. Shahidian, H. Soltanizadeh, Path planning for two unmanned aerial vehicles in passive localization of radio sources, Aerospace Science and Technology, Volume 58, 2016, 189-196, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2016.08.010>.

[Viel2022] C. Viel, M. Kieffer, H. Piet-Lahanier, and S. Bertrand. Distributed event-triggered formation control for multi-agent systems in presence of packet losses. Automatica, 141, 110215, 2022.

[Xu2016] S. Xu, K. Dogancay, and H. Hmam, "Distributed path optimization of multiple UAVs for AOA target localization," in Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Shanghai, China, 20-25 March, 2016, pp. 3141–3145.

[Yan23] E. Yanmaz, Joint or decoupled optimization: Multi-UAV path planning for search and rescue, Ad Hoc Networks 138 (2023), 103018– 103031.

[ZLZ+24] B. Zhang, X. Lin, Y. Zhu, J. Tian, and Z. Zhu, Enhancing Multi-UAV Reconnaissance and Search Through Double Critic DDPG With Belief Probability Maps, IEEE Trans. Intelligent Vehicles 9 (2024), no. 2, 3827–3842.

[Liang21] Liang, Y., Li, Y., Chen, S., Qi, G., & Sheng, A. (2021). Event-triggered Kalman consensus filter for sensor networks with intermittent observations. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 35(8), 1478-1497.

[Milosz18] Milosz, M., Murzabekov, Z., Tussupova, K., & Usabalieva, S. (2018). Optimisation of Discrete Processes with Bounded Control. Information Technology and Control, 47(4), 684-690.

[Rückin25] J. Rückin, D. Morilla-Cabello, C. Stachniss, E. Montijano and M. Popović, "Towards Map-Agnostic Policies for Adaptive Informative Path Planning," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 10, no. 5, pp. 5114-5121, May 2025, <https://doi.org/10.1109/LRA.2025.3557233>

[AERPAAW2023] <https://aerpaw.org/aerpaw-afar-challenge/>

[Kudyba2024] Paul S. Kudyba, Qin Lu, Haijian Sun, "Bayesian Optimization for Fast Radio Mapping and Localization with an Autonomous Aerial Drone", 2024 IEEE 100th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Fall), pp.1-5, 2024.

[Kudyba2024b] P. Kudyba, J. S. Mandapaka, W. Wang, L. McCorkendale, Z. McCorkendale, M. Kidane, H. Sun, E. Adams, K. Namuduri, F. Fund et al., "A UAV-assisted wireless localization challenge on AERPAAW," , arXiv:2407.12180, 2024

**Co-encadrement : L2S, CNRS CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, plateau de Moulon Gif**

**Laboratoire d'accueil à l'ONERA**

Département : Traitement de l'information et Systèmes

Lieu (centre ONERA) : Palaiseau

**Contact** : J Marzat, H. Piet-Lahanier

Tél. : 01 80 38 66 50 Email : [helene.piet-lahanier@onera.fr](mailto:helene.piet-lahanier@onera.fr)

**Directeur de thèse**

Nom : J. Marzat

Laboratoire : ONERA DTIS

Tél. : 01 80 38 66 50

Email : [julien.marzat@onera.fr](mailto:julien.marzat@onera.fr)

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>