

DESCRIPTIF DU PROJET DE THESE

Endurance Drone for Pollution Measurement

Contact : Renaud.kiefer@insa-strasbourg.fr

Sujet proposé	ÉDroPoMe (Endurance Drone for Pollution Measurement)
NOM du candidat	
Spécialité du doctorat (discipline)	Sciences et Technologie, Robotique
Université d'inscription	Université de Strasbourg
Ecole doctorale	ED 269, Ecole doctorale de Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur (MSII)
Encadrement (directeur de thèse, co-encadrant...)	Directeur de Thèse : <i>Edouard Laroche</i> Co-encadrant : <i>Renaud Kiefer, Sylvain Durand</i>
Laboratoire(s) d'accueil	ICube
Cofinanceur(s)	ADEME et Région Grand Est

Résumé	<p>Le changement climatique engendre des étés de plus en plus chauds et des périodes de sécheresses plus longues et prononcées. Ces phénomènes ont tendance à générer des incendies de grandes ampleurs qui touchent des forêts, des zones habitées voire des sites industriels.</p> <p>Les pompiers disposent de moyens limités de mesures des fumées qui se font actuellement seulement au niveau du sol. La quantification et l'identification des polluants dans le panache de fumées, avant leurs retombées au sol permettrait d'évaluer au mieux le danger et de prendre des décisions rapides et pertinentes (informer les autorités, protéger les populations). Un drone est un outil parfaitement adapté pour effectuer ces missions de surveillance et de mesures en cas d'incendie. Mais, à ce jour, seuls des petits drones de faibles autonomies sont envisagés pour ce genre d'applications.</p> <p>Le projet vise à développer un outil de cartographie 3D rapide et temps réel de l'évolution des polluants d'un panache de fumées d'incendies, grâce à un drone de grande endurance à propulsion à hydrogène non polluante (5h d'autonomie) embarquant des capteurs de pollution. Des techniques de commande avancée permettront une planification de trajectoire en temps réel afin que le drone vole à la frontière du panache de fumée, évitant ainsi la saturation des capteurs embarqués et maximisant la pertinence des données récoltées. Les données serviront à affiner les prédictions fournies par un modèle d'écoulement des fumées à l'aide d'outils d'intelligence artificielle. Le projet débouchera sur un démonstrateur en vue d'une validation expérimentale, en collaboration avec les professionnels du métier avec lesquels nous travaillons (pompiers du SIS67).</p>
---------------	---

Mots clés	Observation robuste et évènementielle Pilotage automatique de drone Intelligence artificielle Sciences de l'atmosphère Instrumentation
------------------	---

1 Contexte et enjeux scientifiques

Le réchauffement climatique mondial entraîne de grands bouleversements climatiques. Les sécheresses extrêmes ont entraîné de nombreux incendies même dans des zones habituellement pas ou peu touchées, notamment le Grand Est ces dernières années. Ces incendies de grandes ampleurs peuvent toucher non seulement les forêts, mais également des zones habitées voire des sites industriels avec les conséquences dramatiques pour l'environnement et les riverains que cela peut engendrer. Ces incendies entraînent le dégagement d'un cocktail de polluants incluant les particules en suspension et des polluants gazeux tels que les oxydes d'azote (NOx), le monoxyde de carbone (CO), des Composés Organiques Volatils (COV), etc.

Le relevé des polluants atmosphériques lors d'incendies fait l'objet de demandes croissantes, selon nos contacts auprès des autorités compétentes. Cela a notamment conduit à la création d'un groupe d'experts dédié au sein du Groupe de Travail Environnement de la Conférence du Rhin Supérieur (<https://www.conference-rhin-sup.org/fr/entraide-en-cas-de-catastrophe/groupe-de-travail.html>). Du côté de la Région Grand Est, une Force d'Intervention Rapide (FIR) s'organise. Dans le cadre de la phase de planification, un potentiel élevé a été identifié pour l'utilisation de véhicules aériens sans pilote tel que celui proposé dans le cadre de ce projet.

En effet, l'analyse des polluants en temps quasi-réel est un enjeu majeur pour les pompiers en cas d'incendie, d'une part pour la protection des agents et des personnes sur place, mais également pour les prises de décisions opérationnelles et l'information des autorités en charge de la protection des populations. Il est en effet important de pouvoir avertir, confiner ou évacuer le plus rapidement possible la population dans les zones à risques.

Actuellement, il n'existe pas de système capable de mesurer les pollutions de fumées d'incendie sur de grandes étendues en 3 dimensions (3D), et de transmettre des données en temps réel sur un serveur dédié. Les pompiers se contentent de faire des relevés de pollution au sol, en deux dimensions. Un service de cartographie 2D rapide par images satellites (via le service régional de traitement d'image et de télédétection, ICube/SERTIT), associé à des relevés aériens, peuvent apporter une aide précieuse à la décision quant à l'orientation des panaches de fumées, mais cela ne suffit pas pour définir le degré de pollution d'un nuage d'incendie. De plus, les relevés au sol pendant les incendies ne suffisent pas toujours pour appréhender pleinement un évènement et ne tiennent pas compte des retombées futures des polluants présents en altitude.

Pour apporter l'autonomie nécessaire, notre projet se basera sur un drone de grande endurance capable de survoler une zone de plusieurs kilomètres pendant une durée de plusieurs heures pour l'observation de nuages de fumées de grands incendies. Plus précisément, nous nous appuierons sur le drone de grande endurance et non polluant *Stork* (5h d'autonomie, 250 km de rayon d'action, propulsion électrique à base de pile à hydrogène) développé au laboratoire ICube/INSA Strasbourg dans le cadre du projet Interreg ELCOD (www.elcod.eu 2017-2020). L'objectif du projet est de parvenir à un démonstrateur permettant aux utilisateurs (sapeurs-pompiers du SIS67 de Strasbourg avec qui l'équipe collabore déjà, autorités publiques, organismes d'étude des polluants atmosphériques comme ATMO Grand Est) de suivre en temps réel et en 3 dimensions le développement d'un panache de fumée pendant l'incident. Pendant et après l'incendie, le système sera capable de fournir l'évolution temporelle du panache. Les

pompiers du SDIS possèdent les qualifications de pilote de drone et des autorisations pour voler en condition de feux.

2 Description du travail de thèse

2.1 Objectifs scientifiques/problématique de recherche

Plusieurs problématiques scientifiques seront traitées pour atteindre l'objectif fixé.

D'une part, des techniques d'observation d'état et d'apprentissage seront développées et mises en œuvre afin de corriger les trajectoires fournies par un modèle d'écoulement gazeux avec les données récoltées. Des approches de commande robuste seront mobilisées pour le réglage de l'observateur dans le but d'assurer une faible sensibilité par rapport aux incertitudes. Des techniques événementielles seront également envisagées dans le but de limiter la puissance de calcul nécessaire à la collecte de données et à la navigation du drone afin d'augmenter son autonomie. La masse de données récoltées en fin de vol permettra d'affiner l'estimation des trajectoires grâce à des techniques d'apprentissage automatique (outils de l'IA). Les modèles d'écoulement et de répartition aérienne des panaches de fumées seront repris de la littérature ou développés en collaboration avec les collègues mécaniciens des fluides d'ICube. Il existe d'ores-et-déjà des modèles de simulation pour modéliser les écoulements d'air et de fumée (ex. code Saturne développé par EDF) sur lesquels le travail s'appuiera pour une première estimation des trajectoires.

Lors du vol, et en s'appuyant sur la bordure du panache de fumées et les résultats de simulation d'écoulement des fumées, le drone devra planifier sa trajectoire à la volée de manière à optimiser la prise des mesures des polluants en 3 dimensions et suivre l'évolution du nuage (fig1). Il devra notamment s'assurer de ne pas voler au cœur du panache afin de ne pas saturer les capteurs de pollution.



Figure 1 : Illustration d'un schéma de vol adaptatif (gauche) et photo du prototype de drone Stork Mk.I développé à ICube/INSA Strasbourg lors de vols d'essais (droite).

2.2 Positionnement par rapport à l'état de l'art

En France, les projets Interreg FIREDRONE et ANR DESIHR, dont ATMO Normandie est partenaire, visent à développer des systèmes de drones pour mesurer les particules ou les polluants liés aux fumées d'incendies. Cependant, ces projets se basent sur un drone multirotor muni de canister (relevé de polluant dans le nuage avec analyses en laboratoire, donc avec des résultats différés) ainsi que sur un essaim de drones multiroteurs. Ces derniers possèdent de faibles autonomies de vols et sont donc limités en termes de rayon et durée d'action.

Des travaux de recherche récents ont permis de développer de premiers algorithmes permettant d'effectuer des vols dans ou en bordure d'un nuage naturel (hygrométrie, température). A titre d'exemple, une équipe de l'ENAC a étudié l'exploration de nuages naturels [1]. Différentes stratégies ont été testées en simulation puis lors d'une campagne de vol à la Barbade. D'autres projets ont étudié en simulation la cartographie d'un nuage toxique avec un ou plusieurs drones [2], [3] et [4].

Lors de la thèse proposée, le candidat d'appuiera sur les données et résultats des travaux cités pour développer les algorithmes de commande du drone. La différence par rapport aux autres projets réside dans le fait de l'utilisation d'un drone de grande endurance pouvant embarquer davantage de charge utile sur de grande durée ou distance.

[1] T. Verdu, « Schémas de vol adaptatifs pour l'exploration de nuages par une flotte de drones : principe, mise en œuvre et expérimentations », PhD Thesis, 2020, Université de Toulouse (INSA Toulouse)

[2] G. S. Mani, « Mapping contaminated clouds using UAV- A simulation study », in Annual IEEE India Conference (INDICON), Mumbai, India, déc. 2013, p. 1-6.

[3] M. A. Kovacina, D. Palmer, Guang Yang, et R. Vaidyanathan, « Multi-agent control algorithms for chemical cloud detection and mapping using unmanned air vehicles », in IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, Lausanne, Switzerland, 2002, vol. 3, p. 2782-2788.

[4] M. Avvenuti, M. G. C. A. Cimino, G. Cola, et G. Vaglini, « Detection and Mapping of a Toxic Cloud Using UAVs and Emergent Techniques », in Mining Intelligence and Knowledge Exploration, Cham, 2018, p. 215-224.

2.3 Approche / Méthodologie

Le travail doctoral débutera par une étude bibliographique complète sur les systèmes de commande avancée associés aux véhicules autonomes en ne se contentant pas de rechercher du côté des applications de mesures de pollutions. Elle s'appuiera et complètera le travail bibliographique déjà mené lors du développement de cette thématique de recherche dans l'équipe.

En parallèle à ce travail bibliographique, il faudra s'intéresser aux modèles d'écoulement des fumées tel celui développé par EDF pour la surveillance de nuage lié aux centrales nucléaires (Code Saturn). Ce modèle pourra permettre une estimation de la position du nuage de fumées d'incendie pour compléter ou enrichir la base de données nécessaire au système de commande.

Un système de mesure de pollution atmosphérique ayant déjà été développé par des travaux de masters en coopération avec le laboratoire ICPEES du CNRS. Le doctorant devra également prendre en main ce système de mesure temps réel de manière à pouvoir l'interfacer avec le système de commande automatique de vol du drone. Il faudra aussi prendre en main le drone Stork, ceci se fera avec l'aide de l'équipe drone à l'INSA Strasbourg, et travailler à l'intégration du système de mesure sur ce drone. Lors de ce travail il faudra également apporter des modifications au système de mesure de pollution embarqué et le calibrer au laboratoire ICPEES.

Dans un second temps, le travail de thèse concernera le développement d'un système de commande du drone par observateur d'état dépendant des données du capteur de pollution et des réponses du simulateur d'écoulement des fluides. Il s'agira d'utiliser un modèle d'état interne du drone pour synthétiser le contrôleur de vol. Celui-ci devra permettre la navigation du drone en temps réel de manière à suivre l'évolution du nuage et optimiser la prise des mesures des polluants en 3D. En outre, la stratégie de navigation devra contraindre le drone de voler en bordure du panache de fumées, et ne puisse pas aller au cœur du panache, afin de ne pas saturer les capteurs de pollution. Des stratégies de commandes robustes, événementielles voire prédictives seront étudiées.

Des outils d'intelligence artificielle, telle que l'apprentissage machine, permettront également d'améliorer le système de commande du drone. Il s'agira d'associer les données des capteurs de polluants, les coordonnées GPS du drone, ainsi que les modèles de simulations d'écoulement des fumées et les estimateurs de trajectoires afin d'obtenir une cartographie 3D temps réelle du nuage de fumée. Ces données pourront également être utilisées pour affiner les stratégies de navigation.

La dernière partie du travail de thèse portera sur les validations en laboratoire et sur le terrain qui permettront une approche pratique sur la réponse des capteurs. La collaboration avec l'ICPEES permettra d'avoir des retours sur l'utilisation des capteurs de polluants. La collaboration avec les pompiers du SIS67 nous permettra d'avoir accès à

des boîtes à feu pour vérifier les réponses des capteurs à l'aide de drones de type multi-rotors dans un premier temps, plus simples à déployer mais limités en rayon d'action et en autonomie, puis sur le drone Stork de type avion pour la validation expérimentale finale.

2.4 Programme / échéancier prévisionnel

Plan de réalisation

0 - 6 mois	État de l'art sur les techniques d'observation et de planification de trajectoire Prise en main du drone et du système de capteurs de pollution existant Choix ou développement d'un modèle d'écoulement de fluide
6 - 12 mois	Développement des techniques de reconstruction du panache de fumée par observation d'état Choix, achat et intégration de nouveaux capteurs
12 - 18 mois	Développement des techniques de planification de trajectoire
18 - 24 mois	Validation expérimentale sur des panaches de fumées de cheminées d'une usine ou sur des sites d'entraînements des pompiers avec drones multi-rotors pour des tests préliminaires Évaluation des résultats Publication en conférence
24 - 30 mois	Développement des techniques d'estimation des trajectoires par apprentissage automatique Affinage des approches et des modèles en tenant compte des données
30 - 36 mois	Rédaction de la thèse et d'un article de revue Soutenance de la thèse

2.5 Moyens mis à disposition par le laboratoire d'accueil

Le projet de thèse proposé nécessite différentes compétences complémentaires d'où le choix des encadrants de ce travail :

Edouard Laroche est professeur à l'Université de Strasbourg depuis 2008. Il dispose d'une large expertise dans les domaines de l'observation [BOB18, LDL05] et de la commande robuste [CCL17] des systèmes électromécaniques et plus particulièrement des véhicules aériens autonomes [DMP19, PLK22, RGL18, RRL22, SLK17]. Il a déjà contribué sur la problématique de la cartographie dans le cadre d'un projet de robotique mobile avec un partenaire industriel [GKL17].

Renaud Kiefer est maître de conférences à l'INSA Strasbourg et ICube depuis 2005. Il s'occupe du développement des projets articulés autour de la thématique des applications de systèmes de drones et possède une expertise étendue dans ce domaine. Ses compétences s'étendent de la conception mécanique [LPK22] et aérodynamique jusqu'au système de commande [DMP19, SLK17, SOD19] et la gestion de l'hybridation des énergies de propulsion appliquées aux thématiques des drones [GPM22, PLK22]. Il a été le responsable du projet Interreg ELCOD.

Sylvain Durand est maître de conférences à l'INSA Strasbourg et ICube depuis 2015. Ses activités de recherche concernent la commande des systèmes robotiques embarqués ayant des contraintes de ressources, avec un intérêt particulier pour la commande événementielle [DM09, MDG13, DBM18] et autres approches frugales de conception et de commande [YAC21, CAY23], des applications drones [SLK17, DBM18, SOD19, DMP19] et manipulateurs aériens [YAC21, CAY23].

L'équipe de l'INSA Strasbourg/ICube a d'ores et déjà développé un drone de grande endurance lors du projet Interreg ELCOD (www.elcod.eu). Ce drone sera utilisé dans ce projet pour mener à bien les travaux de thèse.

Le CNRS (ICPEES), partenaire du projet, possède de solides moyens de caractérisation de capteurs de pollution de l'air qui seront utiles lors du développement des algorithmes de commandes de vol associés aux données fournies par les capteurs de pollution.

2.6 Collaborations envisagées

Cette thèse permettra de conforter une collaboration d'ores et déjà établie entre l'équipe de recherche en drones du laboratoire ICube (équipes RDH, IPP), le CNRS (équipe ICPEES) et les pompiers du SIS67 (pôle d'analyse des risques et de l'organisation des secours).

Elle permettra à l'équipe de recherche d'améliorer ses connaissances dans le cadre des capteurs de pollutions embarqués et leur synchronisation avec le vol automatisé d'un drone via des algorithmes de gestion spécifiquement développés. Ce projet de thèse s'inscrit dans la continuité de plusieurs projets de fin d'études auxquels l'INSA de Strasbourg a déjà contribué, ainsi que d'autres projets de thèses en cours qui contribuent au développement de systèmes de propulsion de drone hybrides et à leur conception en matériaux biosourcés.

La direction du projet doctoral sera assurée par E. Laroche (équipe RDH) et co-encadrée par S. Durand (RDH) et R. Kiefer (IPP). Le doctorant travaillera dans les locaux de l'INSA et sera en contact régulier avec ses encadrants. L'expertise de S. Le Calvé du CNRS (ICPEES) permettra au doctorant la prise en main de l'optimisation et la calibration du système de capteurs embarqués sur le drone. En effet, l'ensemble de la stratégie intelligente de vol autonome dépendra des données capteurs. La collaboration avec le lieutenant-colonel P. Petit du SDIS67 permettra d'avoir une connexion avec les pompiers et leurs besoins en termes d'observation des fumées, ainsi qu'un accès aux terrains et autorisations pour voler en conditions de feux.

ATMO Grand Est, expert en relevés des conditions atmosphériques de la région GE, a d'ores et déjà montré son intérêt pour ce genre de travaux. Un tel système de drone permettrait également des relevés de polluants atmosphériques dans différents domaines comme l'agriculture (principalement lors d'épandage) et les domaines des transports terrestres et fluviaux (surveillance des pollutions atmosphériques liées aux trafics autoroutiers et fluviaux).

2.7 Liste des publications des encadrants (sélection)

[BOB18] M. Benallouch, R. Outbib, M. Boutayeb, **E. Laroche**. Robust observers for a class of nonlinear systems using PEM fuel cells as a simulated case study. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 26(1):291-298, 2018.

[CAY23] L. Cuvillon, M. Arpa Perozo, A. Yiğit, **S. Durand** and J. Gangloff. Offset-Free Nonlinear Model Predictive Control for Improving Dynamics of Cable-Driven Parallel Robots with Onboard Thrusters. Mechanism and Machine Theory, Elsevier, Volume 180, Article 105141. 2023.

[CCL17] R. Chellal, L. Cuvillon, **E. Laroche**. Model identification and vision-based H^∞ position control of 6-DoF cable-driven parallel robots. International Journal of Control, Informa UK (Taylor & Francis), Vol. 90(4):684-701, 2017.

[DBM18] **S. Durand**, B. Boisseau, N. Marchand and J.F. Guerrero-Castellanos. Event-Based PID Control: Application to a Mini Quadrotor Helicopter. Journal of Control Engineering and Applied Informatics (CEAI), Volume 20, Issue 1, pages 36-47. 2018.

[DM09] **S. Durand** and N. Marchand. Further Results on Event-Based PID Controller. 10th European Control Conference (ECC'09). 2009.

- [DMP19] A. Dos Santos Paulino, A. Murie, T. Pavot, M. Lefebvre, **R. Kiefer**, **E. Laroche**, **S. Durand**. Experimental versus computational determination of the dynamical model of a glider. 11th International Micro Air Vehicle Competition and Conference, pp. 32–41, Computer Vision and Aerial Robotics Group (Eds.). 2019.
- [GKL17] L. Geneve, O. Kermorgant, **E. Laroche**. Limits of Trilateration-Based Sensor Placement Algorithms. IEEE Sensors Applications Symposium. 2017.
- [GPM22] Y. Ghoulam, T. Pavot, L. Mamouri, T. Mesbahi, **S. Durand**, C. Lallement, **R. Kiefer** and **E. Laroche**. Energy Management Strategy with Adaptive Cut-off Frequency for Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicles. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC'22). 2022.
- [LDL05] **E. Laroche**, C. Durieu, J-P. Louis. Parameter estimation accuracy analysis for an induction machine, European Transactions on Electrical Power, Wiley-Blackwell, Vol. 15(2):123-139, 2005.
- [LPK22] M. Lefebvre, T. Pavot, **R. Kiefer**, M. Vedrines, N. Bahlouli. Recyclable bio-based composite Flax/Elium for UAV applications. 13th International Micro Air Vehicle Conference. 2022.
- [MDG13] N. Marchand, **S. Durand** and J.F. Guerrero-Castellanos. A General Formula for Event-Based Stabilization of Nonlinear Systems. IEEE Transactions on Automatic Control (TAC), Volume 58, Issue 5, pages 1332-1337. 2013.
- [PLK22] T. Pavot, M. Lefebvre, **R. Kiefer**, T. Mesbahi, **E. Laroche**. Frequency based strategy for hybrid-powered unmanned aerial vehicle. 13th International Micro Air Vehicle Conference. 2022.
- [RRL22] V. Riss, E. Roussel, **E. Laroche**. Concurrent Airframe-Controller Optimization of a Guided Projectile fitted with Lifting Surfaces. AIAA SciTech Forum. 2022.
- [RGL18] E. Roussel, V. Gassmann, **E. Laroche**. Accuracy-simplicity trade-off for small-scale helicopter models: a comparative study based on flight data. Control Engineering Practice, Elsevier, Vol. 73:56-65, 2018.
- [SLK17] N.A. Santos-Ortiz, **E. Laroche**, **R. Kiefer** and **S. Durand**. Controller Tuning Strategy for Quadrotor MAV Carrying a Cable-suspended Load. 9th International Micro Air Vehicles Conference and Flight Competition (IMAV'17). 2017.
- [SOD19] E. Schermann, H. Omeran, **S. Durand** and **R. Kiefer**. Stochastic Trajectory Optimization for Autonomous Soaring of UAV. Joint 11th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems (NolCoS'19) and 8th IFAC Symposium on Mechatronic Systems (Mechatronics'19). 2019.
- [YAC21] A. Yiğit, M. Arpa Perozo, L. Cuillon, **S. Durand** and J. Gangloff. Novel Omnidirectional Aerial Manipulator with Elastic Suspension: Dynamic Control and Experimental Performance Assessment. IEEE Robotics and Automation Letters (RA-L), Volume 6, Issue 2, pages 612-619. 2021.