

# Sujet de thèse

## Techniques de fusion de données et d'intelligence artificielle pour le diagnostic de défauts capteur appliqué aux avions de prochaines générations

Collaboration LAAS-CNRS & ANITI / AIRBUS

Lieu : Toulouse

Contact académique : L. Travé-Massuyès ([louise@laas.fr](mailto:louise@laas.fr)) et Carine Jauberthie ([cjaubert@laas.fr](mailto:cjaubert@laas.fr))

Contact industriel : G. Alcalay ([guillaume.alcalay@airbus.com](mailto:guillaume.alcalay@airbus.com)) et P. Goupil ([philippe.goupil@airbus.com](mailto:philippe.goupil@airbus.com))

### 1. DESCRIPTION TECHNIQUE

#### Contexte

Aujourd'hui, de nombreuses fonctionnalités de l'avion dépendent de la disponibilité de paramètres de vol critiques tels que l'incidence ou la vitesse de l'avion. Néanmoins, des défaillances système des capteurs permettant de mesurer ces paramètres ou des phénomènes atmosphériques particuliers affectant ces capteurs peuvent entraîner une reconfiguration des modes de fonctionnement de l'avion. Il en résulte, dans certaines circonstances, une forte diminution de l'assistance au pilotage, pouvant conduire à l'interruption de la mission.

Dans l'objectif d'accroître l'autonomie des systèmes avioniques, comme par exemple de fonctionner avec un seul pilote, les défauts de ces capteurs doivent être clairement identifiés sans aucune intervention humaine, et des systèmes de reconfiguration doivent permettre à l'avion d'opérer en toute sécurité. De nombreuses études ont été initiées il y a maintenant plus d'une vingtaine d'années, et les avions actuellement en service disposent de solutions hybrides, alliant algorithmie et procédures pilotes pour y remédier. Avec les nouvelles générations d'avion comme l'A350 et l'A380, ces solutions ont pu être améliorées, intégrant davantage d'automatismes, grâce à des capacités de calcul accrues et des architectures de navigation et de contrôle adaptées.

Toutefois, ces solutions ont été introduites dans un contexte d'avion à 2 pilotes avec une assistance limitée. Les cas les plus critiques correspondant à la détection de défauts cohérents et simultanés liés aux paramètres air et inertiel restent à traiter [1].

La tendance du marché indique une potentielle émergence d'avions pouvant opérer à un seul pilote dans les prochaines décennies. Par ailleurs, l'introduction de nouvelles fonctionnalités conduit à une complexité accrue des systèmes aéronautiques. Il en découle un besoin de sécurisation des paramètres de vol devant s'adapter à des architectures de navigation et de contrôle en évolution. Concrètement :

- L'introduction d'avions à un seul pilote implique une capacité de reprise en main de l'avion 100% autonome en cas d'incapacité du pilote. Par exemple, il faut pouvoir opérer un atterrissage 100% automatisé tout en assurant le niveau de performance requis, et ce, quel que soit les capteurs disponibles,
- L'introduction de nouveaux capteurs, qui, grâce aux techniques de fusion de données, permettent une révision des architectures de navigation et la potentielle suppression de chaînes de mesure. Ce gain matériel conduit à une réduction des coûts récurrents de l'aéronef ainsi que de sa consommation induite par la suppression d'éléments pouvant atteindre plusieurs dizaines de kilogrammes.

## Objectif

Dans le contexte présenté précédemment, l'objectif de la thèse CIFRE proposée est d'étudier l'apport de techniques d'Intelligence Artificielle (IA) couplée aux estimateurs existants [1] et d'exploiter leurs synergies pour acquérir le niveau recherché en termes :

- De couverture des défauts multiples, notamment sur des capteurs de nouvelles technologies, et
- D'estimation des paramètres de vol recherchés, en particulier les paramètres air tels que l'incidence, la vitesse et l'altitude de l'avion.

De précédents travaux ont pu mettre en évidence l'apport des techniques de diagnostic basées sur des méthodes d'intelligence artificielle [11][16] . Elles ont été appliquées dans le cadre de l'atterrissage automatique avec des équipements de précision et de robustesse aux défauts dégradés par rapport aux capacités courantes.

Par ailleurs, les techniques d'estimation courantes des paramètres de vol longitudinaux [1][2][3][5] ont démontré des capacités de reconstruction de capteurs virtuels permettant le maintien des principaux paramètres utilisés par les commandes de vol, la navigation ou les systèmes d'affichage. Ces techniques ont également été déclinées sur des sujets connexes, tels que l'atterrissage automatique [7][8] pour s'adapter à des données capteur de différentes technologies. Lors de cette thèse, les méthodes d'estimation finalement utilisées pourront être choisies en fonction des capteurs mis à disposition (potentiellement ajout d'un LIDAR).

Ces techniques ont cependant montré leurs limites au regard :

- du niveau de complexité faisant suite aux déploiements de méthodes de fusion et de diagnostic similaires pour de multiples applications (atterrissage automatique, approche basée vision, auto-taxi). La variété des applications poussent à l'établissement d'une solution algorithmique *product-line* (tout avion) et générique (même structure algorithmique pour différentes applications)
- des précisions requises pour le déploiement de plusieurs fonctionnalités en conditions dégradées (défaut capteur), souvent induite par la non-uniformité des avions (en termes d'aérodynamisme, y compris sur 2 aéronefs sortant de la même chaîne d'assemblage), ou des phénomènes atmosphériques extérieurs comme l'apparition de formes de givre.

Cette thèse a donc pour but de continuer les travaux de recherche portant sur le diagnostic de défauts capteur. On cherchera à établir une solution générique, capable de s'adapter à chaque aéronef (MSN-centrique). La première application sur les capteurs mesurant les paramètres air (incidence, vitesse...) devra mettre en évidence le gain de précision induit par le couplage des méthodes d'estimation et d'IA en démontrant la capacité de détection des formes de givres. Par ailleurs, la recherche de la simplicité et lisibilité sera toujours de rigueur afin d'assurer une solution industriellement déployable.

Les travaux seront réalisés dans un environnement industriel permettant un prototypage rapide et une comparaison avec les algorithmes existants grâce aux outils de validation et vérification mis à disposition, déjà développés dans le cadre des précédents travaux de fusion de données. Ces outils permettent une intégration et une évaluation rapide des prototypes qui seront développés sur des milliers de vols en boucle ouverte, ainsi que la simulation de combinaisons de défauts capteurs en boucle fermée. Les outils ainsi utilisés, à savoir OLAF (Open Loop Assessment Framework), OSMA (Outil de Simulation des Mouvements Avions) et SRP (Soft Rapid Prototyping) sont maintenus par les équipes Système et Essais en vol d'Airbus. Ils sont en constante évolution, en particulier les modèles capteur, leur permettant ainsi de s'adapter rapidement en fonction du besoin du doctorant.

In fine, cette thèse permet une montée en compétence sur les domaines en pleine expansion que sont la fusion de données au travers de l'estimation basée modèles et l'IA. À notre connaissance, peu de travaux abordent l'exploitation des synergies entre ces deux classes de méthodes bien que l'on puisse citer quelques travaux desquels le projet tirera parti [4][6][17][18]. Leurs applications dans le cadre de l'aéronautique et le maintien des paramètres de vol permettront à la fois d'identifier les techniques pertinentes et compatibles avec les contraintes des systèmes de commande de vol, et d'identifier de potentielles futures fonctionnalités.

Cette thèse est également l'opportunité de former en interne un potentiel futur collaborateur sur les techniques d'IA appliquées à l'aéronautique, qui sont au cœur de la stratégie de transformation digitale d'Airbus et un des piliers de l'innovation qui doit contribuer à la pérennité d'Airbus. Bien que l'application directe concerne des techniques de diagnostic embarquées, une application portant sur de la maintenance prédictive peut également en résulter en fonction du niveau de performance qui sera atteint.

### **Organisation des travaux de recherche**

Les travaux de recherche menés dans cette thèse se focaliseront dans un premier temps sur les méthodes de diagnostic et d'estimation existantes afin d'identifier leurs potentielles synergies. Ils s'articuleront autour des grandes étapes suivantes (planification des livrables en nombre de mois après le démarrage de la thèse à T0):

- 1) T0+6 : Etude bibliographique portant sur les méthodes d'IA permettant le diagnostic de défauts capteur dans le contexte présenté précédemment. Un premier état de l'art sera effectué. L'analyse se fera au regard des méthodes d'estimation mises à disposition. Par ailleurs, les principales exigences seront tracées afin d'assurer une complète compréhension des objectifs et des contraintes industrielles.
- 2) T0+9 : Première méthode innovante évaluée sur l'ensemble des moyens de simulation mis à disposition. Cette application a pour but la prise en main de ces outils d'analyse et d'identification au plus tôt des évolutions nécessaires.
- 3) T0+12 : Analyse des synergies entre méthodes d'IA et d'estimation permettant d'identifier une première architecture algorithmique.
- 4) T0+16 : Rapport de validation s'articulera sur la mise en évidence des principaux bénéfices de la méthode. Une analyse portant sur les différentes architectures capteurs complètera l'étude.
- 5) T0+24 : Optimisation des algorithmes grâce à la définition de métriques pertinentes permettant de comparer les différentes approches.
- 6) T0+28 : Comparaison des performances avec les algorithmes existants et écriture d'un rapport de validation.
- 7) T0+36: Rédaction du manuscrit et soutenance.

Une activité de dissémination académique sera réalisée tout au long de la thèse, précédée d'un dépôt de brevets si nécessaire. Par ailleurs, la conduite de cette thèse sera effectuée en parallèle du développement de la fonction de reconfiguration automatique en cas de défaut capteur. Un passage de jalons types TRL (Technology Readiness Level) pourra être réalisé dans le cadre d'un projet R&T.

#### **Equipe encadrante :**

- Laboratoire académique : Equipe DISCO (Diagnostic, Supervision et COnduite) du laboratoire du LAAS-CNRS. Cette équipe possède une expérience significative et

reconnue au niveau international sur ces sujets [11][16][9][10][14][15] (voir en complément la liste des publications : <https://hal.laas.fr/LAAS-DISCO>).

- Directrice de thèse : Prof. Louise Travé-Massuyès
- Co-directrice : Prof. Carine Jauberthie
- Encadrants industriels Airbus:
  - Guillaume Alcalay: spécialiste en fusion de données et analyse des paramètres de vol avion. Également responsable de projets liés aux diagnostics de défauts capteurs et à l'estimation de paramètres de vol pour les systèmes de commande de vol et la navigation.
  - Martin Delporte: expert en mécanique du vol et estimation/analyse de paramètres de vol. Également responsable de projets liés aux diagnostics de défauts capteurs et à l'estimation de paramètres de vol pour les systèmes de commandes de vol et la navigation. Encadrant d'une thèse CIFRE Airbus (2014-2018) [1].

## Bibliographie

- [1] Alcalay, G. (2018). *Estimation de paramètres de vol avion et détection de pannes capteurs* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE DE TOULOUSE).
- [2] Alcalay, G., Seren, C., Hardier, G., Delporte, M., & Goupil, P. (2018). An adaptive Extended Kalman Filter for monitoring and estimating key aircraft flight parameters. *IFAC-PapersOnLine*, 51(24), 620-627.
- [3] Alcalay, G., Seren, C., Hardier, G., Delporte, M., & Goupil, P. (2017). Development of virtual sensors to estimate critical aircraft flight parameters. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 14174-14179.
- [4] Chen, Z., Heckman, C., Julier, S., & Ahmed, N. (2018, July). Weak in the NEES?: Auto-tuning Kalman filters with Bayesian optimization. In *2018 21st International Conference on Information Fusion (FUSION)* (pp. 1072-1079). IEEE. G. Alcalay., Estimation de paramètres de vol avion et détection de pannes capteurs. Performance et fiabilité [cs.PF]. Université de Toulouse, 2018.
- [5] Goupil, P., Delporte, M., Seren, C., Hardier, G., & Alcalay, G. (2022). Method and device for monitoring and estimating parameters relating to the flight of an aircraft. *U.S. Patent No. 11,287,283*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [6] Han, K., Lee, S., Song, Y. J., Lee, H. B., Park, D. H., & Won, J. H. (2021, September). Precise Positioning with Machine Learning based Kalman Filter using GNSS/IMU Measurements from Android Smartphone. In *Proceedings of the 34th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2021)* (pp. 3094-3102).
- [7] Ifqir, S., Combastel, C., Zolghadri, A., Alcalay, G., Goupil, P., & Merlet, S. (2021, June). Multi-Sensor Data Fusion for Civil Aircraft IRS/GPS/ILS Integrated Navigation System. In *2021 European Control Conference (ECC)* (pp. 10-16). IEEE.
- [8] Ifqir, S., Combastel, C., Zolghadri, A., Alcalay, G., Goupil, P., & Merlet, S. (2022). Fault tolerant multi-sensor data fusion for autonomous navigation in future civil aviation operations. *Control Engineering Practice*, 123, 105132.
- [9] Lu, Q. H., Fergani, S., & Jauberthie, C. (2021). A new scheme for fault detection based on Optimal Upper Bounded Interval Kalman Filter. *IFAC-PapersOnLine*, 54(7), 292-297.

- [10] Lu, Q. H., Fergani, S., Jauberthie, C., & Le Gall, F. (2019, December). Optimally bounded interval kalman filter. In *2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC)* (pp. 379-384). IEEE.
- [11] Mur, A., Travé-Massuyès, L., Chanthery, E., Pons, R., & Ribot, P. (2022). A Neural Algorithm for the Detection and Correction of Anomalies: Application to the Landing of an Airplane. *Sensors*, *22*(6), 2334.
- [12] Ramdani, N., Travé-Massuyès, L., & Jauberthie, C. (2018). Mode discernibility and bounded-error state estimation for nonlinear hybrid systems. *Automatica*, *91*, 118-125.
- [13] Tang, Y., Hu, L., Zhang, Q., & Pan, W. (2021, September). Reinforcement Learning Compensated Extended Kalman Filter for Attitude Estimation. In *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 6854-6859). IEEE.
- [14] Tran, T. A., Jauberthie, C., Le Gall, F., & Travé-Massuyès, L. (2017). Interval Kalman filter enhanced by positive definite upper bounds. *IFAC-PapersOnLine*, *50*(1), 1595-1600.
- [15] Tran, T. A., Jauberthie, C., Travé-Massuyès, L., & Lu, Q. H. (2021). An Interval Kalman Filter enhanced by lowering the covariance matrix upper bound. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, *31*(2).
- [16] Travé-Massuyès, L., Chanthery, E., Ribot, P., Pons, R., & Guerri, A. M. (2021). Machine learning algorithms for faulty sensor detection in the approach phase: methods and preliminary tests. S5.9.1.3 Deliverable, COCOTIER Project (COnccept de COckpit et Technologies Intégrées En Rupture, 2019–2022), Contract DGAC/DTA/SDC n°2019-08.
- [17] Ullah, I., Fayaz, M., & Kim, D. (2019). Improving accuracy of the Kalman filter algorithm in dynamic conditions using ANN-based learning module. *Symmetry*, *11*(1), 94.
- [18] Ullah, I., Fayaz, M., Naveed, N., & Kim, D. (2020). ANN based learning to Kalman filter algorithm for indoor environment prediction in smart greenhouse. *IEEE Access*, *8*, 159371-159388.