

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé (français) : Jumeau numérique en temps réel pour la dynamique du vol en soufflerie : combinaison des modèles d'ordre réduit et d'expériences via l'assimilation de données à la volée.

Intitulé (anglais) : Real-time digital twin for flight dynamics in wind tunnels : combining reduced-order models and experiments via on-the-fly Data Assimilation

Référence : **MFE-DAAA-2024-09**

Début de la thèse : 01/10/2024

Date limite de candidature : 31/03/2024

Mots clés

Dynamique du vol, Assimilation de données, Jumeau numérique, Apprentissage automatique.

Profil et compétences recherchées

Diplôme : Master2 ou un diplôme d'ingénieur

Compétences recherchées : Dans les domaines suivants :

- Mécanique des fluides
- Systèmes dynamiques
- Sciences de données

La dynamique du vol est le domaine d'étude se concentrant sur la prédiction de la trajectoire et de l'attitude d'un aéronef au cours du temps. Pour une géométrie d'aéronef donnée, la connaissance des forces et des moments exercés par le fluide sur l'aéronef est nécessaire afin d'effectuer les simulations. Les coefficients aérodynamiques, formes adimensionnées des forces et des moments exercés par le fluide sur l'aéronef, dépendent de différentes grandeurs, comme l'angle d'incidence, l'angle de dérapage, les taux de rotation de l'aéronef, ainsi que des différents paramètres de contrôle, comme les positions angulaires des gouvernes. Les coefficients aérodynamiques, l'angle d'incidence α et l'angle de dérapage β sont visibles sur la Figure 1.

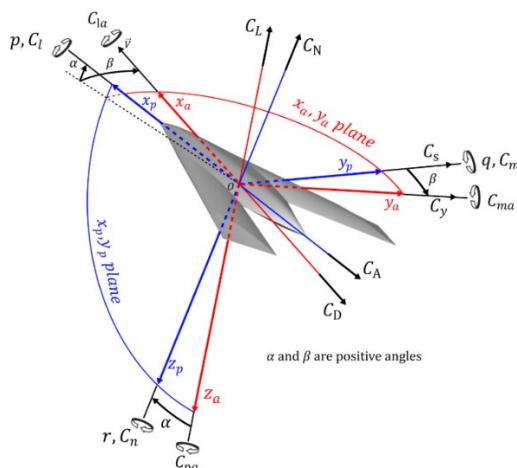


Figure 1 – Schéma d'un aéronef et des référentiels utilisés en dynamique du vol (issu de [1])

Les valeurs des actions aérodynamiques peuvent être calculées analytiquement, peuvent être déterminés à l'aide de simulations numériques, ou un modèle simplifié des coefficients peut être construits en utilisant de méthodes orientées données [2]. Les solutions analytiques reposent sur des simplifications et hypothèses fortes sur l'écoulement autour du système et ne sont donc que très peu précises pour les écoulements complexes. Les simulations numériques permettent d'obtenir une description précise des écoulements autour des surfaces de l'aéronef et donc de la valeur des actions aérodynamiques, mais leur coût peut s'avérer trop élevé. Les méthodes orientées données ont pour but de créer un modèle mathématique plus simple des coefficients aérodynamiques à l'aide d'un ensemble de données Entrée-Sortie. Ce modèle traduit alors la dépendance des coefficients aérodynamiques par rapport aux variables d'état et de contrôle. Ces données peuvent provenir d'expériences en soufflerie sur une maquette à l'échelle réduite, de simulations numériques ou de données de vol libre. Les modèles peuvent être de deux types : non-paramétriques (boîte noire) ou paramétrique (boîte grise). Les modèles paramétriques ont une structure donnée reposant sur une connaissance partielle du phénomène. Pour apprendre les paramètres qui le composent, des méthodes hors ligne ou des méthodes en ligne peuvent être utilisées [3,4]. Les méthodes hors ligne ont pour objectif de déterminer les paramètres du modèle une fois que l'ensemble complet des données est obtenu. À l'inverse, les méthodes en ligne ont pour but de construire le modèle au fur et à mesure que les données deviennent disponibles. Dans la littérature, ces dernières sont utilisées principalement avec des données de vol libre [4].

Dans le domaine post-décroché, aux angles d'incidence élevés, les données de vol libre sont risquées à collecter. Classiquement, dans les études concernant ce domaine de vol, un modèle paramétrique est utilisé pour les coefficients aérodynamiques. Ce modèle consiste en une somme de sous-fonctions. Quand ce modèle est évalué lors des simulations, la valeur de chaque sous-fonction est obtenue par interpolation dans des bases de données obtenues à l'aide d'expériences en soufflerie [5,6]. Le plan d'expérience, la liste des différentes configurations (en terme d'angle

d'incidence, d'angle de dérapage, de taux de rotation et de positions des surfaces de contrôle) est donc sélectionné a priori.

L'étude de l'aérodynamique et de la dynamique du vol dans le domaine post-décroché est un des cœurs de métier de l'unité ELV (Expérimentation et Limite de Vol) du centre Onera Lille, l'une des tutelles du laboratoire LMFL – Kampé de Fériet. Forte de ses installations expérimentales de haute qualité, comme les souffleries horizontales basse vitesse L1 et L2, et la soufflerie verticale basse vitesse SV4, l'unité possède tous les outils expérimentaux et numériques pour la création de modèles de forces aérodynamiques et pour les études des comportements qui en découlent. Cette expertise a permis à l'unité de mener de nombreux travaux de recherche, comme l'étude des incertitudes du modèle ROM [6] et de leurs impacts sur les comportements prédits [10], ou encore le développement d'une méthode numérique permettant la modélisation d'effets instationnaires [1]. L'unité utilise de façon classique des méthodes hors-ligne sur des données provenant d'expériences statiques et dynamiques en soufflerie horizontale et verticale afin de créer un modèle de coefficients aérodynamique valable dans le domaine post-décroché. La Figure 2 est une photographie d'une maquette d'avion léger monté sur balance rotative dans la soufflerie verticale SV4 du centre ONERA Lille.



Figure 2 – Maquette d'avion léger monté sur balance rotative dans la soufflerie verticale SV4 du centre ONERA Lille ©Onera

Le plan d'expérience doit être assez large pour capturer l'ensemble des phénomènes qui auront un impact sur l'attitude de l'aéronef. Néanmoins, dans le domaine post-décroché, les écoulements autour des surfaces portantes de l'aéronef sont très complexes, et le besoin d'un guide dans ce plan d'expérience est exprimé.

Les bases de données expérimentales peuvent aussi être utilisées pour augmenter la précision des modèles numériques en combinaison avec des algorithmes venant de la statistique, afin d'intégrer l'information échantillonnée dans un cadre mathématique rigoureux. Ces approches rentrent dans la branche de la statistique commune comme assimilation des données [8]. Des applications récentes en mécanique de fluides par l'équipe d'encadrement ont permis de reconstruire des états physiques complets d'écoulements turbulents à partir de des modèles numériques d'ordre réduit et de quelques données haute-fidélité échantillonnées localement. Un exemple complètement numérique est montré pour une couche de mélange en évolution spatiale (Figure 3). La première simulation à gauche est une simulation numérique directe (DNS), c'est à

dire une expérience numérique haute-fidélité. Les ressources de calcul sont en revanche assez importantes. Au centre, une simulation avec un modèle d'ordre réduit est faite pour le même cas d'analyse. Dans ce cas, le coût de calcul est beaucoup moins important, mais on peut aussi observer que le modèle n'arrive pas à capturer la transition vers la turbulence. Les résultats sont donc erronés. Dans la figure à droite, un outil d'assimilation des données combine le modèle utilisé pour le cas présenté au centre avec des observations locales échantillonnées du cas de haute précision présenté à gauche. Malgré le fait que les données échantillonnées couvrent seulement le 0.3% du domaine physique, on peut observer que la précision des résultats est fortement améliorée pour ce dernier cas. De plus, les coûts de calcul sont pratiquement les mêmes que le cas central, et environs deux ordres de grandeur inférieur à la simulation numérique directe de gauche.

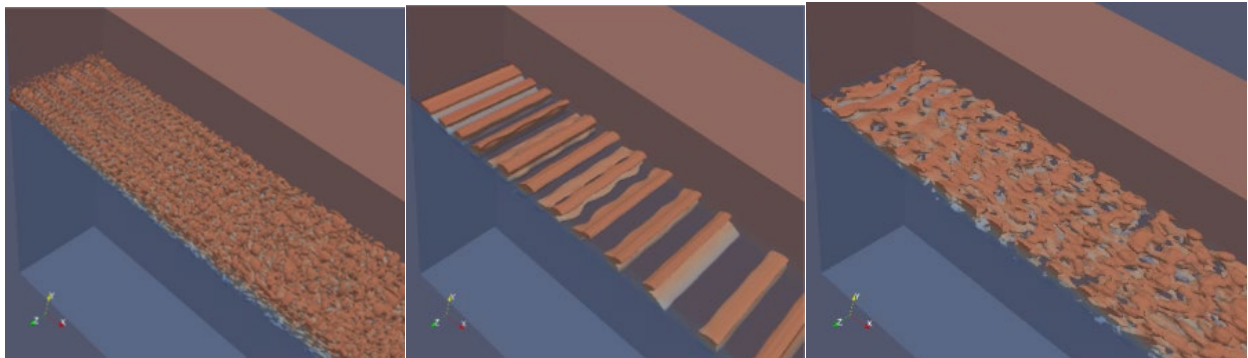


Figure 3 - Application d'un outil d'assimilation des données à l'analyse d'une couche de mélange turbulente. A gauche, une simulation numérique directe : haute précision, haut cout de calcul. Au centre, une simulation avec un modèle d'ordre réduit : basse précision, bas cout de calcul. A droite, calcul avec DA : bonne précision, bas cout de calcul.

Une famille de méthodes d'assimilation des données, les filtres de Kalman, sont adaptés aux applications en ligne. Ce type d'application est très intéressante pour la dynamique du vol, parce qu'elle a le potentiel d'enlever des verrous scientifiques qui limitent le transfert technologique des applications fondamentales vers l'industrie. Parmi ces méthodes, un nouvel outil développé par l'équipe du LMFL (Laboratoire de Mécanique des Fluides de Lille) l'ENSAM (École Nationale Supérieure des Arts et Métiers), reposant sur les filtres de Kalman d'ensemble [8], semble prometteur. La Figure 4 est un schéma de l'algorithme de filtre de Kalman d'ensemble utilisé dans le contexte de [8].

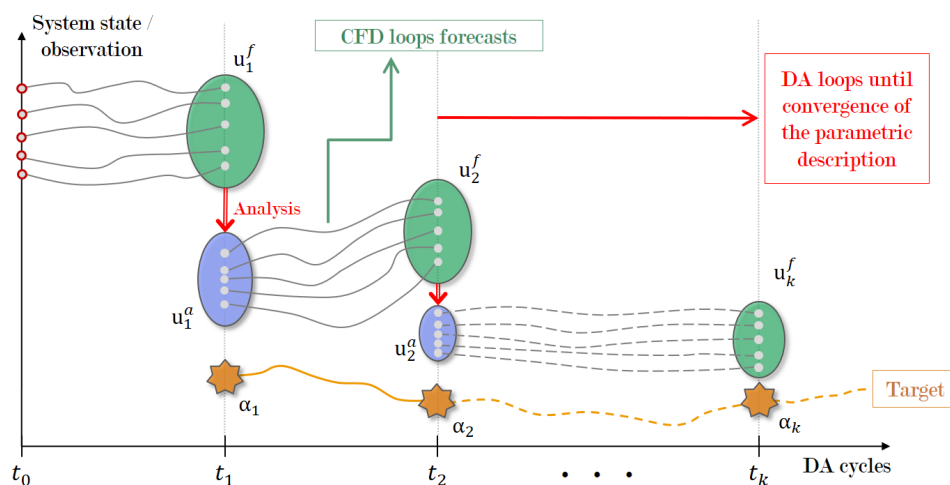


Figure 4 – Schéma de l'algorithme de filtre de Kalman d'ensemble utilisé dans le contexte de [8]

L'objectif principal de la thèse est de développer une méthode en ligne pour guider une expérience en soufflerie en temps réel. Lorsque l'expérience est en cours, le modèle en ligne agira

alors un « jumeau numérique » pour identifier les paramètres du modèle et pour prédire les prochaines configurations d'intérêt à la volée [7]. Ce couplage permettra d'optimiser et d'entraîner le modèle. Il permettra également d'anticiper l'occurrence d'événements intéressants ou au contraire désavantageux, ce qui permettra le contrôle du « jumeau physique » en conséquence. Comme les méthodes en ligne doivent être nourries de données provenant de réponses dynamiques, les expériences en soufflerie reproduiront des réponses dynamiques possédant un nombre de degrés de liberté permis par les contraintes cinématiques des dispositifs expérimentaux. Concrètement, ces réponses « pseudo-dynamiques » seront effectuées en mesurant les forces et les moments à chaque pas de temps, puis en utilisant les équations du mouvement issus de la dynamique du vol (contraintes cinématiques prises en compte) afin d'obtenir la configuration de l'aéronef au pas de temps suivant. Ces expériences seront alors en « temps réel » ou en « quasi temps réel » selon les temps de réponse des dispositifs.

En premier lieu, la méthodologie sera développée et testée sur des simulations numériques de vol libre et sur des simulations des expériences décrites au paragraphe précédent. Un modèle déjà existant développé à l'ONERA sera utilisé pour ces simulations. Selon les progrès du travail, le développement et la mise en place d'expériences réelles sur les dispositifs expérimentaux des souffleries L1 et/ou SV4 du centre ONERA Lille seront considérés.

Un certain nombre de méthodes en ligne, comprenant la méthode développée dans [8], seront testées pour répondre à l'objectif. La méthode optimale sera sélectionnée. Pour obtenir un modèle précis, les hyperparamètres de la méthode sélectionnée doivent être optimisés. Un des objectifs de la thèse sera alors d'étudier les méthodes d'optimisation des hyperparamètres de la méthode, en utilisant notamment les méthodes de machine learning modernes [9].

Le doctorant acquerra des compétences et des connaissances dans les domaines suivants :

- Dynamique du vol et étude des systèmes dynamiques en général.
- Assimilation de données
- Apprentissage automatique (Machine learning)

Références :

- [1] Isnard, B., Tanguy, G., Farcy, D., Dugeai, A., Garnier, E., & Foucaut, J. M. (2023). Comparison of Numerical Reduced Order Models of a Generic UCAV Configuration using a New Displacement Grid Method. In *AIAA AVIATION 2023 Forum* (p. 3269).
- [2] Kou, J., & Zhang, W. (2021). Data-driven modeling for unsteady aerodynamics and aeroelasticity. *Progress in Aerospace Sciences*, 125, 100725.
- [3] Koley, B., & Alexandra, C. A. (2021, August). Recent Trends in Aerodynamic Parameter Estimation: a Review of Different Methods along with Their Advantages and Disadvantages. In *2021 2nd International Conference on Range Technology (ICORT)* (pp. 1-5). IEEE.
- [4] Chowdhary, G., & Jategaonkar, R. (2010). Aerodynamic parameter estimation from flight data applying extended and unscented Kalman filter. *Aerospace science and technology*, 14(2), 106-117.
- [5] Murch, A. M. (2007). Aerodynamic modeling of post-stall and spin dynamics of large transport airplanes.
- [6] Farcy, D., Khrabrov, A. N., & Sidoryuk, M. E. (2020). Sensitivity of spin parameters to uncertainties of the aircraft aerodynamic model. *Journal of Aircraft*, 57(5), 922-937.
- [7] Rasheed, A., San, O. & Kvamsdal, T. Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective. *IEEE Access* 8, 21980–22012 (2020)
- [8] Villanueva, L., Valero, M. M., Glumac, A. Sarkic & Meldi, M. 2023 Augmented state estimation of urban settings using intrusive sequential data assimilation, arXiv: 2301.11195
- [9] Luo, X. & Xia, C. Continuous Hyper-parameter OPTimization (CHOP) in an ensemble Kalman filter. *Front. Appl. Math. Stat.*, 28 October 2022
- [10] Vauchel, N., Garnier, E., & Gomez, T. (2022, August). Estimation of Sobol indices with a multi-element polynomial chaos model: application to Flight Dynamics. In *25ème Congrès Français de Mécanique*

Collaborations envisagées

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : DAAA

Lieu (centre ONERA) : centre ONERA Lille

Contact : Vauchel Nicolas

Tél. : 03 20 49 69 71

Email : nicolas.vauchel@onera.fr

Directeur de thèse

Nom : Marcello Meldi

Laboratoire : LMFL

Tél. : 06 33 77 78 93

Email : marcello.meldi@ensam.eu

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