

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

**Intitulé : Développement d'observateurs non-linéaires pour des systèmes multi-physiques
Application au moteur fusée régulé en boucle fermée**

Référence : **TIS-DTIS-2025-22**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : octobre 2025

Date limite de candidature : juin 2025

Mots clés Lanceur réutilisable, synthèse de correcteurs pour moteurs fusée, synthèse d'observateurs, méthode d'analyse de stabilité

Profil et compétences recherchées

Master Recherche ou école d'Ingénieur généraliste avec spécialisation en automatique, aéronautique/spatial

Méthodes de commande et d'estimation, traitement du signal, connaissances en physique / propulsion

Simulation de systèmes complexes, langages de programmation usuels (Matlab, C++ ou Python)

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Rendue possible par l'électrification des actionneurs de vanne, la régulation en boucle fermée du point de fonctionnement des moteurs fusée devient une technologie nécessaire pour concevoir des lanceurs réutilisables, en particulier pour la maîtrise des efforts propulsifs en phase d'atterrissage. [1].

Comme tout asservissement, un régulateur de moteur fusée doit répondre à deux types d'exigences contradictoires : assurer une bonne performance (précision, réactivité) d'une part, et d'autre part garantir un fonctionnement stable et une performance minimale sur un domaine de variabilité matérielle et environnementale donné. Si la performance est bien un objectif majeur pour assurer la capacité du lanceur à réaliser sa mission, la stabilité est un élément de confiance déterminant dans un contexte où peu d'essais peuvent être réalisés, et jamais dans des conditions totalement représentatives d'un vol. Or, les moteurs fusée ont une dynamique fortement non-linéaire, dérivée des équations de la thermodynamique. Cette non-linéarité conduit à des modèles physiques complexes, et à une diversité marquée des modèles linéaires que l'on peut identifier à chaque point. Elle affecte directement tant la synthèse d'un régulateur que la démonstration de stabilité du système régulé en boucle fermée, pour laquelle il existe actuellement peu de démarches adaptées [2].

Alors que la synthèse d'un régulateur performant en régime établi est bien maîtrisée à ce jour, la question de la démonstration de stabilité en boucle fermée s'appuie des méthodes de vérification en simulation temporelle, ou sur des méthodes fréquentielles SISO adaptées au cas MIMO.

Des travaux de thèse précédents ont permis de proposer des méthodes de synthèse de correcteurs garantissant la stabilité à partir de deux types d'approche, l'une s'appuyant sur la théorie de la contraction [3], et la deuxième utilisant une modélisation Port-Hamiltonienne du moteur [4]. Les deux types de lois de commande obtenues diffèrent en termes de structures et de paramétrage mais s'expriment toutes les deux sous forme d'un retour d'état. Cependant, l'ensemble des variables d'état nécessaire à l'élaboration de la loi de commande n'est en général pas disponible car non-mesurable. Il est donc indispensable d'introduire un estimateur ou un observateur pour reconstituer ces éléments, sachant que l'introduction de cette fonction a un effet sur la stabilité globale du système couplé. La synthèse de cet observateur devrait également tenir compte de la possibilité de fournir des informations permettant la surveillance de l'état du moteur.

Objectif :

L'objectif de la thèse proposée est le développement d'une méthodologie de synthèse d'estimateurs ou d'observateurs pour un modèle multi-physique pour la synthèse de lois de commande en boucle fermée de systèmes multi-physiques non linéaires.

En fonction du type de design utilisé pour la synthèse de lois de commande (contraction ou port-hamiltonien), différentes approches ont été suggérées [5-8], y compris pour des systèmes physiques complexes [9], et serviront de base aux développements envisagés .

Il s'agira dans un premier temps de déterminer les conditions d'observabilité associées à ces représentations et de définir une méthodologie permettant d'analyser en fonction des mesures disponibles la capacité de reconstituer l'état nécessaire pour la détermination de la loi de commande.

Les différents observateurs proposés devront être évalués en termes de leur impact sur la stabilité et les performances du système bouclé. Il s'agira également de déterminer leurs sensibilités à des méconnaissances et perturbations afin d'évaluer la démarche la plus adaptée pour l'application considérée de moteurs réallumables. L'adaptation de ces estimateurs pour la détection de défauts ou de dégradation de fonctionnement du moteur sera étudiée, en complément ou comparaison de travaux menés précédemment sur banc d'essai [10]. On s'attachera également à évaluer le comportement de ces observateurs pour des contrôleurs de référence développés indépendamment, par l'utilisation de méthodes classiques type PID et Hinfini.

Références

- [1] S. Colas, S. Le Gonidec, P. Saunois, M. Ganet, A. Rémy, V. Leboeuf, A point of view about the control of a reusable engine cluster, 8th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS), 2019.
- [2] S. Pérez-Roca, J. Marzat, H. Piet-Lahanier, N. Langlois, M. Galeotta, F. Farago, S. Le Gonidec, Model-based Robust Transient Control of Reusable Liquid-Propellant Rocket Engines, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020.
- [3] Gibart, J., Piet-Lahanier, H., Farago, F., & Galeotta, M. (2023). Regulation of a Liquid Propelled Rocket Engine using Contraction Theory. *IFAC-PapersOnLine*, 56(1), 307-312.
- [4] Gibart, J., Piet-Lahanier, H., Farago, F., (2024), Port-Hamiltonian Modelling of Complex Non-Linear Systems, Application to a Liquid Propelled Rocket Engine, 8th IFAC Workshop on Lagrangian and Hamiltonian Methods for Nonlinear Control.
- [5] Thenozhi, S., Sánchez, A. C., & Rodríguez-Reséndiz, J. (2021). A contraction theory-based tracking control design with friction identification and compensation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(6), 6111-6120.
- [6] Singh, B., Xiong, X., Dinh, T. N., Kamal, S., & Ghosh, S. (2022). Interval observer design for nonlinear systems using simplified contraction theory. *IET Control Theory & Applications*, 16(10), 935-944.
- [7] Toledo, J., Wu, Y., Ramírez, H., & Le Gorrec, Y. (2020). Observer-based boundary control of distributed port-Hamiltonian systems. *Automatica*, 120, 109130.
- [8] Sistla, P., Chemmangat, K., & Figarado, S. (2023). Design and implementation of passivity-based controller for active suspension system using port-Hamiltonian observer. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 237(14), 3367-3379.
- [9] Vincent, B., Hudon, N., Lefèvre, L., & Dochain, D. (2016). Port-Hamiltonian observer design for plasma profile estimation in tokamaks. *IFAC-PapersOnline*, 49(24), 93-98.
- [10] C. Sarotte, J. Marzat, H. Piet-Lahanier, G. Ordonneau, M. Galeotta, Model-based active fault-tolerant control for a cryogenic combustion test bench, Acta Astronautica, 2020.

Collaborations envisagées

CNES / Direction des Lanceurs – François Farago at cnes.fr, Pierre Belleoud at cnes.fr

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Traitement de l'information et Systèmes

Lieu (centre ONERA) : Palaiseau

Contact : J. Marzat, H. Piet-Lahanier, C. Sarotte

Tél. : 01 80 38 66 50 Email : julien.marzat@onera.fr

Directeur de thèse

Nom : J. Marzat ou H. Piet-Lahanier

Laboratoire : ONERA

Tél. : 01 80 38 66 50

Email : julien.marzat@onera.fr

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