

## PROPOSITION DE SUJET DE THESE

**Intitulé : Modélisation et contrôle en boucle fermée d'écoulements résonateurs stationnaires.**

Référence : **TIS-DTIS-2026-19**

(à rappeler dans toute correspondance)

**Début de la thèse : 01/10/2026**

**Date limite de candidature : 30/06/2026**

Mots clés Commande des systèmes dynamiques, contrôle d'écoulement, algorithmes d'optimisation et d'apprentissage (IA/RL)

### Profil et compétences recherchées

Profil automatique et optimisation. Langage de programmation Python et Matlab.

### Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

**Projet doctoral :** Les écoulements fluides jouent un rôle déterminant dans la performance des véhicules terrestres et aéronautiques. La traînée générée par leur mouvement constitue en effet une source majeure de dépense énergétique. Le développement de stratégies efficaces de contrôle des écoulements représente ainsi un enjeu scientifique et technologique essentiel, tant pour répondre aux défis actuels que pour anticiper les besoins futurs. Si l'étude des équations de Navier–Stokes a considérablement enrichi notre compréhension des mécanismes de la dynamique des fluides, la mise au point de méthodes de contrôle réellement opérationnelles et à fort impact industriel demeure un défi ouvert. Cette difficulté s'explique par la nature intrinsèquement complexe et fortement non linéaire des phénomènes d'écoulement.

La thèse se déroulera à l'ONERA Toulouse, plus spécifiquement au DTIS (Département Traitement de l'Information et Systèmes) en étroite collaboration avec NTNU (Université norvégienne de sciences et technologie) et DAAA (Département Aérodynamique, Aéroélasticité, Acoustique).

La thèse sera encadrée par un directeur de thèse, Fabrice Demourant (ONERA/DTIS).

William Jussiau (NTNU), Adrien Chan Hon Tong (ONERA/SAPIA) et Pierre Nibourel (ONERA/DAAA) participeront à l'encadrement.

Le profil du candidat est un profil orienté automatique, ayant de bonnes connaissances en commande et en optimisation. Des connaissances en identification sont souhaitables. Une connaissance de base en mécanique des fluides serait un plus. La connaissance de Matlab est souhaitée pour l'automatique, et la connaissance de Python serait un plus, notamment pour la simulation des écoulements.

**Contexte :** Le contrôle des écoulements fluides se heurte à deux obstacles majeurs : la dimension infinie et la forte non-linéarité des équations de Navier–Stokes. Leur résolution impose généralement une discrétisation spatiale fine qui génère des modèles de taille considérable, atteignant fréquemment plusieurs millions de variables d'état. Cette complexité rend la mise en place de stratégies en boucle fermée particulièrement difficile. Dans une approche traditionnelle, la synthèse de lois de commande s'appuie sur des modèles réduits, dont l'obtention demeure délicate pour les écoulements fluides. À l'inverse, les approches basées sur les données permettent de concevoir directement les contrôleurs à partir des réponses de l'écoulement, sans passer par un modèle explicite. Ces approches n'échappent pas aux limitations numériques, car

l'exploration des paramètres et la validation des résultats nécessitent toujours l'utilisation de simulateurs complexes et coûteux en temps de calcul.

**Objectifs :** Trois axes pourront être investigués :

- Le premier axe s'appuie sur de la commande basée modèles. L'objectif est de rendre les écoulements accessibles aux méthodes de commande en construisant des modèles linéaires simplifiés. Ceux-ci sont obtenus par linéarisation autour d'un état d'équilibre ou à partir du champ moyen. Ces représentations, bien que dérivées de systèmes non linéaires, capturent les principales dynamiques et sont ensuite réduites pour donner des modèles compacts (moins d'une centaine d'états), exploitables pour la synthèse de correcteurs classiques (Jussiau, Leclercq, Demourant, & Apkarian, 2024). Pour mieux traiter les régimes instationnaires, la thèse mobilisera entre autres des outils comme la théorie de Floquet (Leclercq & Sipp, 2023), le *Best Linear Approximation* (Schoukens, Lataire, Pintelon, Vandersteen, & Dobrowiecki, 2009) et l'opérateur de Koopman (Mezić, 2013), afin de construire des représentations adaptées et de concevoir des stratégies de commande validées sur des cas académiques (oscillateur de Van der Pol, cylindre, cavité, *fluidic pinball*) ;
- Le deuxième axe explore la commande basée données, une alternative intéressante pour les écoulements résonateurs (Sipp & Schmid, 2016), souvent difficiles à modéliser par des équations réduites. Plutôt que de s'appuyer sur un modèle explicite, cette approche utilise directement les réponses numériques ou expérimentales de l'écoulement pour concevoir des correcteurs (Jussiau, Demourant, Leclercq, & Apkarian, 2025). L'idée est de commencer par stabiliser un régime simple (par exemple en deçà du seuil d'instabilité), puis d'utiliser la continuation numérique (Allgower & Georg, 2012) pour réajuster progressivement le correcteur vers des régimes plus complexes et non linéaires. Ce processus pose des questions scientifiques importantes liées à la continuité des solutions et à la présence possible de bifurcations globales, qui pourront limiter ou réorienter la stratégie de stabilisation.
- Le troisième axe prolonge naturellement l'approche basée données en explorant l'apport des méthodes issues de l'intelligence artificielle. Suite aux succès marquants de l'apprentissage par renforcement (RL) dans des environnements complexes de type « jeu » (AlphaGo en 2016, AlphaStar en 2019, Deep-Nash pour Stratego en 2022), de nombreux travaux ont cherché à transposer ces techniques aux problèmes de contrôle. Dans le domaine de l'aérodynamique, certaines études ont déjà appliqué le RL au contrôle des écoulements oscillants (Paris, Beneddine, & Dandois, 2021). Toutefois, ces démarches restent souvent déconnectées des cadres théoriques de la commande classique. L'hybridation de ces méthodes avec les équations physiques et les outils de la théorie du contrôle constitue encore un champ largement ouvert, et représentera un axe original et prometteur de la thèse.

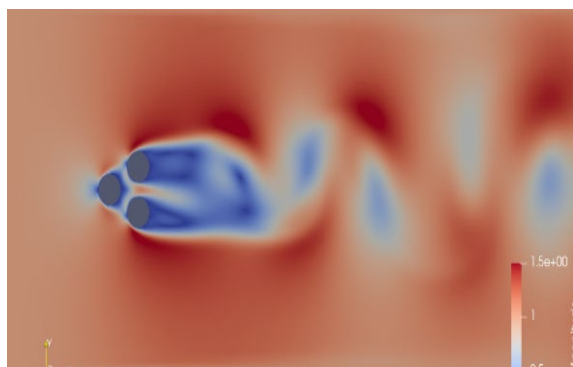
#### **Bibliographie**

- Sipp, D., & Schmid, P. J. (2016). Linear closed-loop control of fluid instabilities and noise-induced perturbations: a review of approaches and tools. *Applied Mechanics Reviews*, 68(2), 26.
- Allgower, E. L., & Georg, K. (2012). *Numerical continuation methods: an introduction*. Springer Science & Business Media.
- Leclercq, C., & Sipp, D. (2023). Mean resolvent operator of a statistically steady flow. *Journal of Fluid Mechanics*, A13.
- Mezić, I. (2013). Analysis of fluid flows via spectral properties of the Koopman operator. *Annual review of fluid mechanics*, 357-378.
- Paris, R., Beneddine, S., & Dandois, J. (2021). Robust flow control and optimal sensor placement using deep reinforcement learning. *Journal of Fluid Mechanics*, A25.

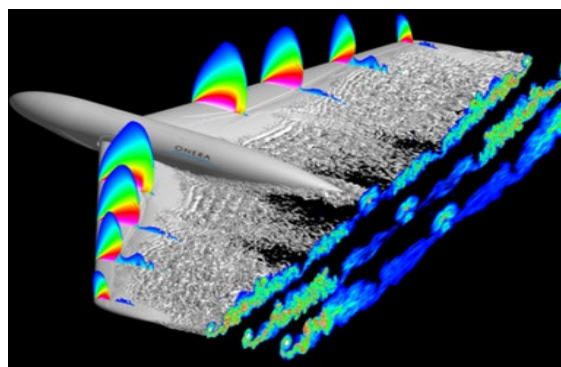
Schoukens, J., Lataire, J., Pintelon, R., Vandersteen, G., & Dobrowiecki, T. (2009). Robustness issues of the best linear approximation of a nonlinear system. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1737-1745.

Jussiau W, Leclercq C, Demourant F, Apkarian P. Data-driven stabilization of an oscillating flow with linear time-invariant controllers. *Journal of Fluid Mechanics*. 2024;999:A86.

W. Jussiau, F. Demourant, C. Leclercq and P. Apkarian, "Control of a Class of High-Dimensional Nonlinear Oscillators: Application to Flow Stabilization," in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 33, no. 5, pp. 1521-1531, Sept. 2025,



Ecoulement hors équilibre *fluidic pinball*  
( $Re=100$ )



Phénomène de « buffet »

#### Collaborations envisagées

DAAA, NTNU

#### Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Traitement de l'information et Systèmes

Lieu (centre ONERA) : Toulouse

**Contact** : Fabrice Demourant, Adrien Chan Hon Tong

Tél. : 05 62 25 29 22 Email : [fabrice.demourant@onera.fr](mailto:fabrice.demourant@onera.fr),

[adrien.chan\\_hon\\_tong@onera.fr](mailto:adrien.chan_hon_tong@onera.fr)

#### Directeur de thèse

Nom : DEMOURANT

Laboratoire : ONERA

Tél. : 05 62 25 29 22

Email : [fabrice.demourant@onera.fr](mailto:fabrice.demourant@onera.fr)

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