



# **Contrôle optimal sous incertitudes pour l'atterrissage vertical d'un premier étage de lanceur réutilisable**

## **Optimal control under uncertainties for the vertical landing of the first stage of a reusable launch vehicle**

Soutenance de thèse – Clara Leparoux

**Le 18 Septembre 2023 à 14h**

À l'ENSTA Paris, 828 Bd des Maréchaux, 91120 Palaiseau

### **Devant le jury composé de :**

Nicolas Petit	Professeur, Mines Paris, CAS	Rapporteur
Jean-Baptiste Caillau	Professeur, Université Côte d'Azur	Rapporteur
Hasnaa Zidani	Professeure, Insa Rouen Normandie	Examinatrice
Andrea Simonetto	Maître de Conférence, ENSTA Paris	Examineur
Éric Bourgeois	Ingénieur, CNES	Examineur
Frédéric Jean	Professeur, ENSTA Paris	Directeur de thèse
Bruno Hérisse	Ingénieur de recherche, Onera	Co-encadrant

### **Résumé :**

Les travaux de cette thèse portent sur la planification de trajectoire pour l'atterrissage d'un lanceur réutilisable, c'est-à-dire que nous cherchons à calculer une trajectoire de référence et un contrôle, qui sera appliqué en boucle ouverte pour réaliser l'atterrissage ou servira de référence à un algorithme d'asservissement (suivi de trajectoire). Nous traitons la planification de trajectoire comme un problème de contrôle optimal, cherchant le contrôle permettant d'atteindre une cible en position et en vitesse en minimisant un coût, la consommation de carburant, et en respectant des contraintes sur le contrôle et l'état. Deux approches sont possibles pour résoudre ce problème. D'une part, une modélisation déterministe permet de bénéficier des nombreux outils efficaces du contrôle optimal déterministe, mais elle ne permet pas d'assurer la robustesse voulue. D'autre part, une modélisation stochastique permet la modélisation de nombreux aléas à l'origine d'incertitudes, mais les méthodes numériques de résolution de problèmes de contrôle optimal stochastique manquent d'efficacité, en particulier si la dimension du système est élevée. Notre travail considère et compare ces deux approches. Dans un premier temps, nous étudions la solution optimale du problème déterministe et mettons en avant la persistance de la structure Max-Min-Max du contrôle avec des contraintes fortes sur le contrôle et l'état. Cette structure étant particulièrement sensible aux perturbations, nous en déduisons qu'il est nécessaire de prendre en compte la présence d'aléas pour calculer une solution robuste. Dans un second temps, nous proposons une formulation d'une méthode générale de planification robuste sous-optimale, basée sur la minimisation de la covariance et utilisant la linéarisation statistique. De plus, nous avons mis en œuvre cette méthode sur le problème de l'atterrissage et obtenu des résultats numériques montrant son efficacité. Enfin, nous procurons des justifications théoriques de la pertinence de la méthode de planification de trajectoire robuste proposée. Ces justifications concernent la contrôlabilité des systèmes linéarisés statistiquement, le calcul d'une estimée de l'erreur d'approximation par la linéarisation statistique et l'existence de solutions au problème de contrôle optimal formulé associé à une erreur d'approximation donnée.

**Mots clés:** contrôle optimal, contrôle stochastique, robustesse, aérospatial