



MAPPES DIFFÉOMORPHIQUES POUR LA RÉDUCTION DE MODÈLE APPLIQUÉ EN AÉRODYNAMIQUE

A Diffeomorphic Mapping Approach for Model Order Reduction in Aerodynamics

Soutenance de thèse –Jon Labatut

Jeudi 13 novembre 2025 à 14h00

Salle Contensou - ONERA Châtillon

Lien JITSi : <https://rdv.onera.fr/SoutenanceLabatut>
(Configuration recommandée : navigateur Chrome)

Devant le jury composé de :

Examineurs :

- DECOENE ASTRID, PROFESSEURE, UNIVERSITE DE BORDEAUX
- TRÉLAT EMMANUEL, PROFESSEUR, SORBONNE UNIVERSITE

Rapporteurs :

- LOMBARDI DAMIANO, DIRECTEUR DE RECHERCHE, INRIA
- SANDERSE BENJAMIN, DIRECTEUR DE RECHERCHE, CWI

Directeur de thèse :

- IOLLO ANGELO, PROFESSEUR, UNIVERSITE DE BORDEAUX

Co-Directeur de thèse :

- TADDEI TOMMASO, PROFESSEUR ASSOCIÉ, UNIVERSITE DE. ROME

Encadrant :

- CHAPELIER JEAN-BAPTISTE, CHARGÉ DE RECHERCHE, ONERA

Résumé / Abstract :

Les simulations paramétriques de dynamique des fluides présentent des défis computationnels significatifs en aérodynamique. Les modèles de dynamique des fluides computationnelle (CFD) de haute-fidélité impliquent des millions de degrés de liberté. Les modèles d'ordre réduit (ROM) résolvent cette charge computationnelle en construisant des approximations de faible dimension du système d'ordre complet. Cependant, les approches standards basées sur la projection linéaire des équations présentent de mauvaises performances pour les écoulements dominés par la convection. Une solution proposée consiste à s'appuyer sur des changements de coordonnées pour améliorer la compression des ROMs. Cette thèse aborde la question du calcul des transformations difféomorphes dans le cadre général afin d'aligner les structures aérodynamiques pour l'application de ROMs plus robustes. Pour répondre à ce problème, nous établissons d'abord les fondements mathématiques de la méthode. Pour cela, la transformation d'intérêt est définie comme le minimiseur d'une fonction objective. Ceci constitue le problème de recalage (ou d'alignement). La fonction objective combine un terme d'inadéquation des données, basé sur l'alignement d'ensembles de points de structures cohérentes, avec un terme de régularisation dérivé d'un opérateur différentiel. La transformation est définie à partir d'une paramétrisation d'un champ de vitesse. Ceci garantit des transformations difféomorphes dans les domaines CFD bornés grâce à des conditions aux limites tangentielles. Le problème de minimisation est résolu en utilisant une discrétisation par éléments finis, une optimisation basée sur le gradient, et un algorithme d'Espérance-Maximisation pour l'étiquetage automatique des structures cohérentes. La méthodologie est validée sur trois cas de test représentatifs de complexité croissante : (i) des mélanges gaussiens coalescents, pour illustrer l'alignement de structures fusionnantes ; (ii) un écoulement Euler transsonique autour d'un profil NACA0012, démontrant le recalage multi-structures ; et (iii) un écoulement RANS visqueux autour de l'aile ONERA M6, présentant l'alignement de chocs en lambda dans des géométries 3D. À travers ces cas, l'approche proposée améliore la précision des ROMs et démontre une robustesse aux problèmes aérodynamiques.

Mots clés : modèle d'ordre réduit, recalage d'image, modèles de substitution, optimisation non convexe, CFD paramétrique

Parametric fluid dynamics simulations present significant computational challenges in aerodynamics, where high-fidelity computational fluid dynamics (CFD) models involve millions of degrees of freedom. Reduced-order models (ROMs) address this computational burden by constructing low-dimensional approximations of the full-order system. However, standard projection-based approaches exhibit poor performance for advection dominated flows. A proposed solution is to rely on coordinate transformation mappings to enhance ROMs compression. This thesis addresses the issue of developing a general framework for diffeomorphic mappings to align aerodynamics structures for application in coordinate transformation based ROMs. To answer this problem, we first establish the mathematical foundations of the method. For this, the mapping of interest is defined as the minimizer of an objective function. This constitutes the registration problem. The objective function combines a data misfit term, based on point set alignment of coherent structures, with a regularization term derived from differential operators. The mapping is defined from a parametrization of a velocity field. This guarantees diffeomorphic transformations in bounded CFD domains under tangent boundary conditions. The minimization problem is solved using a finite element discretization, gradient-based optimization, and an Expectation-Maximization algorithm for automatic coherent structure labeling. The methodology is validated on three representative test cases of increasing complexity: (i) coalescing Gaussian mixtures, to illustrate the alignment of merging structures; (ii) transonic Euler flow around a NACA0012 airfoil, demonstrating multi-structure registration; and (iii) viscous RANS flow around the ONERA M6 wing, showcasing the alignment of complex 3D lambda shocks. Across these cases, the proposed approach enhances ROM accuracy, and demonstrates robustness to aerodynamic problems.

Keywords : reduced order model, registration, surrogate models, non convex optimization, parametric CFD