

Couplage Multi-Fidélité de Particules Tourbillonnaires avec Lignes Portantes et Méthode Eulérienne pour la Simulation d'Écoulements Aéronautiques 3D Visqueux
Multi-Fidelity Coupling of Vortex Particles with Lifting Lines and Eulerian Methods for the Simulation of 3D Viscous Aeronautical Flows.

Soutenance de thèse – Johan VALENTIN

Jeudi 12 décembre 2024 à 09 H 30

Salle AY-02-63 – ONERA Meudon

Jitsi : https://rdv.onera.fr/12_12_2024_soutenance_Johan_VALENTIN

Devant le jury composé de :

- **Directeur de Thèse :**
Elie RIVOALEN - Professeur des Universités - INSA Rouen, Rouen, France
- **Rapporteurs :**
Annie LEROY - Maître de Conférence HDR - École de l'Air, Salon-de-Provence, France
Iraj MORTAZAVI - Professeur des Universités - CNAM, Paris, France
- **Examineurs :**
Ivan DELBENDE - Professeur des Universités - Université la Sorbonne, Paris, France
Chloé MIMEAU - Maître de Conférence - CNAM, Paris, France
Paul MYCEK - Chercheur HDR - Cerfacs, Toulouse, France
- **Encadrant :**
Luis BERNARDOS - Ingénieur Chercheur - ONERA DAAA, Meudon, France

Résumé / Abstract

Cette thèse développe une approche multi-fidélité pour la simulation d'écoulements visqueux instationnaires et 3D autour de configurations aéronautiques complexes, en utilisant la Vortex Particle Method (VPM) Lagrangienne, couplée soit avec une méthode Ligne Portante et une méthode Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes (URANS) Eulérienne. L'objectif principal est de fournir une méthode à la fois efficace en termes de coût de calcul et suffisamment précise pour modéliser la dynamique des tourbillons, les interactions de sillage et le transport du fluide pour des applications aéronautiques.

La VPM est au cœur de cette méthode. Elle simule l'évolution des tourbillons et la dynamique du sillage sans avoir recours à un maillage et avec peu de dissipation numérique. Cela la rend idéale pour capturer les interactions complexes de sillage présentes dans les simulations aéronautiques. Cependant, la VPM seule est mal adaptée pour capturer les effets proches des parois. Pour remédier à cela, la VPM est d'abord couplée avec une méthode Ligne Portante afin de modéliser des surfaces portantes minces, permettant l'interaction entre un corps solide et le fluide. De plus, une méthode Eulérienne est intégrée afin de résoudre les effets visqueux et compressibles de façon détaillée près des parois. Cette approche hybride multi-fidélité entre la VPM et l'URANS permet ainsi de simuler à la fois le transport du sillage dans le champ lointain et l'évolution des interactions de la couche limite proche des surfaces solides, la rendant applicable à une grande variété d'écoulement.

Afin de pallier aux limitations inhérentes à la VPM, plusieurs contributions sont proposées. Un modèle de viscosité turbulente dynamique est ainsi développé pour la VPM, améliorant sa gestion de la diffusion visqueuse dans les écoulements à haut Reynolds. Pour maintenir sa stabilité numérique, une nouvelle technique de filtrage basée sur l'enstrophie est introduite, permettant de préserver la cohérence des tourbillons dans les écoulements très turbulents. La VPM, ainsi que son couplage avec les méthodes Ligne Portante ou URANS, est validée par des cas de référence analytiques, expérimentaux et numériques, incluant notamment des tourbillons analytiques, des ailes, des hélices, des éoliennes, des drones et des hélicoptères en

vol stationnaire. Ces résultats démontrent de la précision et de l'efficacité de cette approche dans la simulation d'une large gamme d'écoulements aérodynamiques complexes à un coût de calcul raisonnable, tout en étant capable de capturer les caractéristiques clés de l'écoulement. Cette thèse propose des méthodes couplées multi-fidélité capables de traiter un large éventail de configurations aéronautiques, positionnant la VPM comme un outil pertinent pour l'optimisation moderne de la conception aérodynamique, l'évaluation des performances et la simulation de vol.

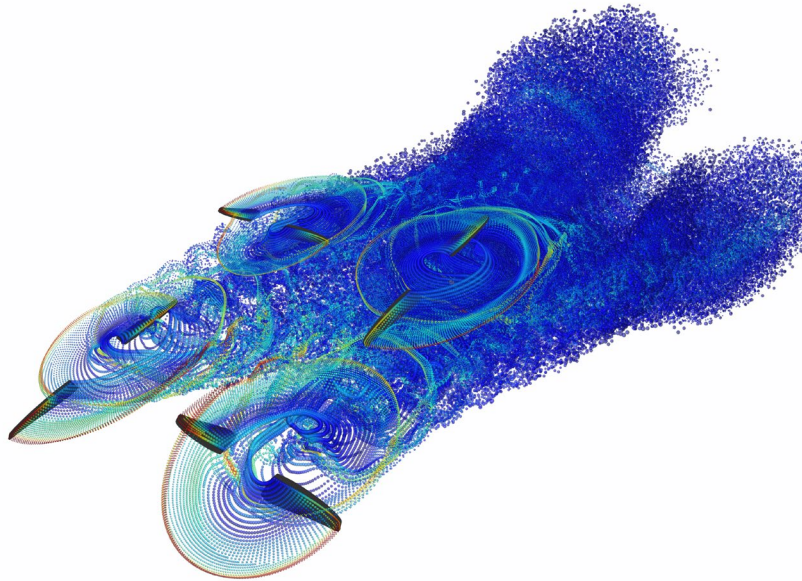


Figure 1 : Drone Quadcoptère simulé avec le couplage VPM – Ligne Portante

This thesis develops a multi-fidelity approach for simulating 3D unsteady viscous flow fields around complex aeronautical configurations, using the Lagrangian Vortex Particle Method (VPM) coupled with either a Lifting Line or an Eulerian Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes (URANS) method. The primary goal is to provide a computationally efficient yet accurate method to model vortex dynamics, wake interactions, and the evolution of vortex structures for aeronautical applications.

At the core of this method is the VPM, which simulates the evolution of vortices and wake dynamics with minimal numerical dissipation and without the need for the meshing of the fluid. This makes it ideal for capturing complex wake interactions present in aeronautical simulations. However, the VPM alone is ill-suited for capturing near-wall effects which are crucial for accurately predicting aerodynamic performance. To address this issue, the VPM is first coupled with the Lifting Line method to model thin lifting surfaces efficiently, allowing for the interaction between the fluid and solid bodies. Additionally, an Eulerian method is integrated to resolve detailed near-wall viscous and compressible effects. This hybrid multi-fidelity approach between the VPM and URANS allows for the simulation of both the transport of the wake in the far field and the evolution of boundary layer interactions near solid surfaces, making it adaptable to a large variety of flow conditions.

To alleviate known limitations inherent to the VPM, several contributions are brought forward in this thesis. A dynamic turbulent viscosity model is thus developed for the VPM, improving its handling of viscous diffusion in high-Reynolds flows. To maintain numerical stability, particularly in turbulent regimes, a novel enstrophy-based filtering technique is introduced, helping to preserve vortex coherence in highly dynamic flow fields. The VPM, as well as its coupling with either Lifting Lines or URANS is validated against analytical, experimental, and numerical reference cases, including, amongst others, analytical vortices, wings, propellers, wind turbines, drones and hovering rotorcrafts. These results demonstrate the accuracy and efficiency of this approach in simulating a large range of complex aerodynamic flows at a reasonable computational cost while being able to capture key flow characteristics. This thesis provides with multi-fidelity coupled methods able to tackle a broad range of aeronautical configurations, positioning the VPM as a powerful tool in modern aerodynamic design optimisation, performance evaluation, and flight simulation.

Mots clés / Key words

VPM - Vortex - Particule - Ligne Portante - URANS - Hybride - Couplage
VPM - Vortex - Particle - Lifting Line - URANS - Hybrid - Coupling