



*"Développement de techniques d'adaptation hp basées sur les méthodes de Galerkin discontinues avec application à des configurations aéronautiques"*

*"Development of hp-adaptive techniques based on discontinuous Galerkin methods with application to aeronautical configurations"*

Soutenance de thèse – Basile Francesca

**Vendredi 23 septembre 2022 à 14h00**

**En présentiel : Sorbonne Université - 4 Pl. Jussieu, 75005 Paris**

**En distanciel : Visioconférence : <https://meet.google.com/qwy-pmrm-suz>**

**Devant le jury composé de :**

**Directeur de Thèse :**

M. Pascal Frey Sorbonne Université SIM (Sciences, Ingénierie, Médecine)

**Examineur :**

M. Michel Visonneau Ecole Centrale de Nantes  
Mme Paola Cinnela Institut Jean le Rond d'Alembert Université Pierre et Marie Curie

**Rapporteur :**

Mme Héloïse Beaugendre Institut de Mathématique de Bordeaux-Université de Bordeaux  
M. Luca Bonaventura Politecnico di Milano

**Co-encadrant de thèse :**

M. Jean-Baptiste Chapelier ONERA

**Invité :**

M. Romain Laraufie Airbus Commercial Aircraft

## Résumé / Abstract

Dans cette thèse, de nouvelles stratégies adaptatives  $h$  et  $hp$  pour la formulation Galerkin discontinue des équations de Navier-Stokes compressibles sont établies dans le cadre du projet collaboratif européen CODA (CFD ONERA DLR Airbus). Les nouvelles stratégies adaptatives visent la simulation de configurations laminaires stationnaires (Navier-Stokes ou NS), turbulentes moyennées (Reynolds-Averaged Navier-Stokes ou RANS) et turbulentes avec résolution des grandes échelles (Zonal Detached Eddy Simulation ou ZDES). Une méthode de remaillage non structurée basée sur un champ de métrique a été développée en ce sens. La définition du champ de tailles caractéristiques des éléments ( $h$ ) et de la distribution des degrés polynomiaux ( $p$ ) est pilotée par un estimateur d'erreur a posteriori. Ce dernier combine la mesure de l'énergie associée aux modes d'ordre supérieur et les sauts entre les éléments. Le choix du raffinement en  $h$  ou en  $p$  est guidé par un indicateur de régularité basé sur la décroissance des modes polynomiaux dans chaque élément. La performance des algorithmes adaptatifs  $h$  et  $hp$  est premièrement évaluée pour des écoulements laminaires en 2D et 3D. Un gain de précision significatif des simulations adaptatives par rapport aux simulations uniformément raffinées est ainsi obtenu. La stratégie adaptative  $hp$  est ensuite étendue pour la prise en compte de couches limites, nécessitant des éléments anisotropes, afin de satisfaire les besoins de résolution des modélisations RANS et ZDES. En particulier, les prismes situés dans les couches limites sont enrichis en  $p$ , alors que les tétraèdres de la région extérieure sont à la fois soumis à un enrichissement en  $p$  et à un raffinement en  $h$ . Puis, l'algorithme adaptatif  $hp$  est étendu aux écoulements instationnaires et appliqué au jet turbulent 3D d'une tuyère, via une modélisation RANS et ZDES. Les simulations sont validées par des comparaisons avec les expériences et les résultats numériques de la littérature. Les simulations ZDES instationnaires permettent l'analyse aéroacoustique de l'écoulement en utilisant la méthode de Fowcs Williams-Hawkings (FW-H). Les résultats de la dynamique de l'écoulement fluide et de son champ acoustique montrent un bon accord avec les références pour un nombre réduit de degrés de liberté. La dernière partie de ce travail se concentre sur l'extension de la stratégie d'adaptation  $h$  aux écoulements transsoniques considérant des géométries complexes. À cette fin, la méthode d'adaptation est améliorée en ajoutant au processus la projection du maillage de surface adapté sur la CAD. La représentation exacte de la géométrie est alors assurée, ce qui est d'une importance fondamentale pour les applications industrielles complexes. L'estimateur d'erreur de l'adaptation  $h$  est de plus enrichi pour une meilleure capture des chocs, caractéristiques des écoulements transsoniques. L'algorithme développé est finalement évalué pour la simulation non visqueuse d'une aile isolée et d'une configuration d'avion aile-fuselage.

----

In this thesis, novel h- and hp-adaptive strategies suited for the discontinuous Galerkin formulation of the compressible Navier-Stokes equations are established in the framework of the European collaborative project CODA (CFD ONERA DLR Airbus). The novel adaptive strategies target unstructured grids, considering a metric-based simplicial remeshing approach, with application to steady laminar (Navier-Stokes or NS), steady turbulent (Reynolds-Averaged Navier-Stokes or RANS) and unsteady turbulent scale-resolving configurations (Zonal Detached Eddy Simulation or ZDES). The definition of the size field (h) and the polynomial degree distribution (p) is driven by an a posteriori error estimator, combining the measure of the energy associated with the highest-order modes and the inter-element jumps. The choice of refining either in h or p is driven by a smoothness indicator based on the decay of the modal coefficients in each element. The performance of the h- and hp-adaptive algorithms is firstly assessed for 2D and 3D laminar flows, demonstrating a significant gain in accuracy of the adaptive simulations with respect to uniformly refined simulations. The adaptive hp-strategy is then extended to mixed-element meshes to account for the anisotropy of the boundary layers for the RANS and ZDES turbulence modeling approaches. Namely, prisms located in the boundary layers can be p-enriched, while the tetrahedra discretizing the outer region of the flow can be both subject to p-enrichment and h-refinement. The adaptive hp-strategy is applied to a 3D turbulent jet issued from a nozzle, in both RANS and ZDES configuration (for which the adaptive algorithm is extended to unsteady flows), and validated through comparisons with the experiments and numerical results from the literature. The unsteady ZDES simulations are used to perform aeroacoustic analyses using the Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H) method. Both fluid flow and acoustic results are shown to provide good agreement with the references while adapting the mesh, with a reduced number of degrees of freedom. The last part of this work focuses on the extension of the h-adaptation strategy to transonic flows considering complex geometries. For this purpose, the adaptation strategy is improved by allowing the projection of the adapted surface mesh on the CAD. This allows the adaptive strategy to take into account the exact representation of the geometry, which is of fundamental importance for complex industrial applications. A modification of the error estimator for the h-adaptive algorithm is proposed to account for shock capturing and transonic simulations. The performance of the developed algorithm is finally assessed for inviscid simulations of an isolated wing and a wing-body aircraft configuration

### **Mots clés / Key words**

Adaptation hp, Méthode de Galerkin Discontinue, Estimation d'erreur a posteriori, Simulations hybrides RANS/LES, Ecoulements compressibles,

Hp-adaptation, Discontinuous Galerkin method, A posteriori error estimation, Hybrid RANS/LES simulations, Compressible flows,