



**Analyse et mise en œuvre d'une méthode de raffinement de maillage
ciblé pour les écoulements compressibles**

*Analysis and application of a goal-oriented mesh refinement
method for compressible flows*

Soutenance de thèse – ANCOURT Kevin

**Mardi 2 décembre 2025 à 14h00
Salle AY-02-63 - ONERA Meudon**

Lien JITSI : https://rdv.onera.fr/Soutenance_de_these_Kevin_Ancourt
(Configuration recommandée : navigateur Chrome)

Devant le jury composé de :

Examineurs :

- DÉSIDÉRI Jean-Antoine, Directeur de Recherche INRIA (émérite)
- BELME Anca, Maître de conférences Sorbonne Université

Rapporteurs :

- CORRE Christophe, Professeur, Centrale Lyon
- DUVIGNEAU Régis, Directeur de Recherche, INRIA

Directeur de thèse :

- PETER Jacques, Directeur de Recherche, ONERA

Encadrant :

- BOURASSEAU Sébastien, Ingénieur, ONERA

Résumé / Abstract :

Au cours des dernières décennies, la simulation numérique en mécanique des fluides s'est imposée comme un outil essentiel de l'ingénierie et de la recherche. Les maillages de densité usuelle discrétisant le domaine fluide a priori, sans connaissance de l'écoulement à prédire, ne permettent malheureusement ni une bonne représentation des zones de fort gradient, ni une prédiction précise des forces sur l'objet solide. L'adaptation de maillage permet de concentrer l'effort de calcul là où il est nécessaire. Deux familles se distinguent : les méthodes dites "feature-based", qui raffinent automatiquement les zones de fortes variations du champ aérodynamique, et les méthodes "goal-oriented", qui ciblent les régions influençant directement une fonction d'intérêt. Ces dernières requièrent la résolution du problème adjoint associé à la fonction cible.

En adaptation ciblée, pour les écoulements stationnaires et les schémas volumes finis, les travaux de Pierce et Giles (publications de 1999 à 2003), Venditti et Darmofal (2001-2003), Dwight (2008), Alauzet, Loseille et al. (2010-), Fidkowski et Roe (2010-2014), Nguyen-Dinh et al. (2011-), Vivarelli, Shaphar et al. (2020-2021) sont les principales contributions. La présente thèse s'inscrit dans la continuité des travaux de Nguyen-Dinh et al., qui évitent l'introduction d'une grille plus fine que la grille courante, utilisent la dérivée totale de la fonction d'intérêt par rapport aux coordonnées du maillage volumique et tentent de relier la sensibilité de la fonction cible au raffinement local du maillage et sa sensibilité au déplacement des nœuds.

Dans ce cadre, un problème unidimensionnel scalaire linéaire, permettant de disposer de solutions analytiques complètes, a d'abord été analysé. On a comparé, analytiquement et pratiquement, le critère de Venditti et Darmofal et celui de Nguyen-Dinh et al., pour une discrétisation spatiale d'ordre deux. Pour ce problème elliptique, si la comparaison numérique est assez satisfaisante, la comparaison analytique fait apparaître des dérivées d'ordres distincts. On a ensuite proposé une borne adaptée à la méthode de Nguyen-Dinh et al., afin de borner rigoureusement la sensibilité au déplacement (des nœuds) de la fonction d'intérêt de ce problème scalaire.

Ensuite, en mécanique des fluides numérique, le travail a consisté à mettre en œuvre un raffinement ciblé utilisant des métriques, afin de dépasser les restrictions techniques antérieures liées à un seuil de raffinement et au découpage des cellules. Cette approche a été appliquée au profil NACA0012 sur des maillages non structurés avec raffinement anisotrope, pour des écoulements transsoniques et supersoniques de fluide parfait. Elle a par la suite été étendue à un écoulement transsonique autour du profil RAE2822 pour un écoulement turbulent (équations (RANS) et modèle de Spalart-Allmaras), en s'appuyant toujours sur le solveur code CFD elsA et le remailleur Refine de la NASA pour la gestion et l'adaptation des maillages.

Par ailleurs, un travail théorique a été mené sur les équations caractéristiques des équations bidimensionnelles directes et adjointes de fluide parfait (Aerospace 2023 10(9) Ancourt et al.). Ce travail prolonge les recherches de Peter et Désidéri sur les équations caractéristiques adjointes. Les auteurs y proposent une démonstration concise et originale du nombre de relations indépendantes associées aux caractéristiques C^+ et C^- . La cohérence de ces résultats a été validée sur un cas d'écoulement interne, et les relations caractéristiques classiques des équations de fluide parfait 2D ont été retrouvées par la méthode applicable au système adjoint continu.

Mots clés :

écoulement compressible, écoulement visqueux, simulation numérique, maillage non structuré, adaptation de maillage, adaptation ciblée

Over the past decades, numerical simulation in fluid mechanics has become an essential tool in engineering and research. Conventional meshes, defined a priori to discretize the fluid domain without prior knowledge of the predicted flow, unfortunately fail to accurately capture regions of strong gradients and to provide a precise prediction of the forces acting on the solid body. Mesh adaptation makes it possible to concentrate computational effort where it is most needed. Two main families can be distinguished: so-called feature-based methods, which automatically refine regions of strong variations of the aerodynamic field, and goal-oriented methods, which target regions that directly influence a quantity of interest. The latter require solving the adjoint problem associated with the chosen output functional.

In the context of goal-oriented adaptation for steady flows and finite volume schemes, the main contributions are those of Pierce and Giles (1999–2003), Venditti and Darmofal (2001–2003), Dwight (2008), Alauzet, Loseille et al. (2010–), Fidkowski and Roe (2010–2014), Nguyen-Dinh et al. (2011–), and Vivarelli, Shaphar et al. (2020–2021). The present research builds on the work of Nguyen-Dinh et al., which avoids the introduction of a finer grid than the current one, relies on the total derivative of the functional with respect to the volume mesh coordinates, and seeks to link the sensitivity of the functional both to local mesh refinement and to node displacements.

Within this framework, a one-dimensional linear scalar problem, allowing for complete analytical solutions, was first investigated. The criteria of Venditti and Darmofal and of Nguyen-Dinh et al. were compared, both analytically and numerically, for a second-order spatial discretization. For this elliptic problem, while the numerical comparison proved reasonably satisfactory, the analytical comparison revealed derivatives of distinct orders. We then proposed a bound adapted to the method of Nguyen-Dinh et al., in order to rigorously bound the sensitivity of the quantity of interest of this scalar problem with respect to node displacements.

The subsequent work in computational fluid dynamics consisted in implementing goal-oriented mesh refinement using metric-based adaptation, thereby overcoming previous technical limitations related to refinement thresholds and cell splitting. This approach was applied to the NACA0012 airfoil on unstructured meshes with anisotropic refinement, for transonic and supersonic inviscid flows. It was later extended to the transonic flow around the RAE2822 airfoil for turbulent regimes (RANS equations with the Spalart–Allmaras model), using the elsA CFD solver and NASA’s Refine tool for mesh management and adaptation.

In parallel, a theoretical study was carried out on the characteristic equations of the two-dimensional direct and adjoint systems for inviscid flows (Aerospace 2023, 10(9), Ancourt et al.). This work extends the research of Peter and Désidéri on the adjoint characteristic equations. The authors proposed a concise and original derivation of the number of independent relations associated with the C^+ and C^- characteristics. These results were assessed on an internal flow case, and the classical characteristic relations of the two-dimensional Euler equations were retrieved by the method that is equally applicable to the continuous adjoint system.

Key words:

compressible flow, viscous flow, numerical simulation, unstructured mesh, mesh adaptation, goal-oriented mesh