



Soutenance de thèse – Alexandre Suss

Couplage des méthodes lattice Boltzmann et Navier-Stokes
pour les simulations aérodynamiques instationnaires

A hybrid lattice Boltzmann - Navier-Stokes method
for unsteady aerodynamic applications

Mercredi 20 Décembre 2023 à 10 h00

ONERA/Châtillon – Salle Contensou

Par lien Jitsi : https://rdv.onera.fr/20_12_2023_soutenance_Alexandre_Suss

Devant le jury composé de :

Directeur de Thèse :

M. Simon Marié, Maître de conférences, CNAM

Rapporteurs :

M. Eric Lamballais, Professeur, Université de Poitiers

M. Jonas Latt, Professeur associé, Université de Genève

Examineurs :

M. Pierre Sagaut, Professeur, Université Aix-Marseille

Mme Paola Cinnella, Professeur, Sorbonne Université

M. François Dubois, Professeur, CNAM

Encadrants :

M. Ivan Mary, Ingénieur de recherche ONERA

M. Thomas Le Garrec, Ingénieur de recherche ONERA

Résumé/Abstract

La simulation numérique appliquée à la mécanique des fluides est devenue un outil de conception indispensable pour l'industrie aéronautique. Alors que la plupart des simulations industrielles sont réalisées à l'aide d'une approche RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), celle-ci montre ses limites dès lors qu'il s'agit de caractériser finement des écoulements turbulents instationnaires ou d'étudier des phénomènes aéroacoustiques large-bande. Ainsi, les industriels expriment un besoin grandissant d'outils de simulation haute-fidélité performants. Deux méthodes numériques se montrent particulièrement prometteuses pour la réalisation de telles simulations dans un futur proche : les méthodes Navier-Stokes et la méthode de Boltzmann sur réseau (LBM). Les travaux menés dans le cadre de cette thèse ont contribué à fournir une meilleure compréhension des avantages et des inconvénients respectifs de ces deux méthodes, démontrant que les méthodes de Boltzmann sur réseau et Navier-Stokes se complètent plutôt qu'elles ne se concurrencent. Pour cela, l'étude s'est divisée en deux grandes parties. En premier lieu, une comparaison exhaustive et rigoureuse des méthodes de Boltzmann sur réseau et Navier-Stokes a été réalisée. Différents aspects des méthodes numériques ont été discutés comme leur dissipation et dispersion intrinsèque, leur performance dans un environnement de calcul parallèle ainsi que leur capacité à simuler efficacement différents problèmes canoniques de la LES à un niveau de précision donné. Cette étude a permis d'apporter un nouveau regard sur les propriétés des méthodes de Boltzmann sur réseau et Navier-Stokes et de fournir des éléments d'aide à la décision afin d'orienter le choix des ingénieurs vers l'utilisation d'une méthode par rapport à l'autre selon le type d'application visée et le niveau de fidélité requis. Dans un second temps, la possibilité de la mise en place d'un couplage entre les méthodes de Boltzmann sur réseau et Navier-Stokes a été explorée. En effet, de nombreux aspects de la LBM posent encore problèmes ou restent peu efficaces. En particulier le traitement numérique de la zone de proche paroi reste mal défini due à la forme cartésienne des maillages imposée par la méthode. A l'inverse, les approches Navier-Stokes classiques sont particulièrement performantes dans le voisinage de la paroi de par l'utilisation de maillages curvilignes à très grand rapport d'aspect et de méthodes d'intégration temporelle implicites. Ainsi, une méthode numérique hybride innovante a été développée reposant sur un couplage zonal des méthodes de Boltzmann sur réseau et Navier-Stokes, puis étendu au cas de maillages recouvrants (approche Chimère). De nombreuses validations permettent de montrer l'intérêt de cette stratégie. Notamment, cette nouvelle méthode hybride permet de réduire le coût de simulations aéroacoustiques directes en offrant une précision optimale.

Mots-clés : méthode de Boltzmann sur réseau, Navier-Stokes, méthode des volumes finis, couplage, comparaison, aérodynamique, aéroacoustique.

Computational Fluid Dynamics has become an important design tool for the aero- nautical industry. While most industrial simulations are carried out using a RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) approach, this approach is showing its limitations when it comes to finely characterising unsteady turbulent flows or studying broadband aeroacoustic phenomena. In this context, manufacturers are increasingly looking for high-performance, high-fidelity simulation tools. Two numerical methods are showing particular promise for performing industrial-scale high-fidelity flow simulations in the near future: the Navier-Stokes method and the lattice Boltzmann method (LBM). These two approaches are often presented as competing, but each has its own specific features and requirements. The research carried out as part of this thesis has helped to provide a better understanding of the respective advantages and disadvantages of these two methods, revealing that the lattice Boltzmann and Navier-Stokes methods complement each other rather than compete. The study is divided into two main parts. Firstly, a comprehensive and rigorous comparison of the lattice Boltzmann and Navier-Stokes methods was conducted. The numerical methods were examined in various aspects, such as their intrinsic dissipation and dispersion, their performance in a parallel computing environment and their ability to efficiently simulate various canonical LES problems at a given level of accuracy. This study has offered a new perspective on the properties of the lattice Boltzmann and Navier-Stokes methods, providing several decision aids to help the CFD community choose one method over the other based on the type of application and the fidelity level required. Secondly, this PhD explored the possibility of coupling the lattice Boltzmann and Navier-Stokes methods. Indeed, while the LBM offers many benefits, there are still some issues and inefficiencies, especially regarding the numerical treatment of the near-wall zone. The Cartesian shape of the meshes imposed by the method is one of the main reasons for this problem. In contrast, classical Navier-Stokes approaches are particularly effective in the vicinity of the wall thanks to the use of curvilinear meshes with very high aspect ratios and implicit time integration methods. Therefore, an innovative hybrid numerical method was developed based on a zonal coupling of the lattice Boltzmann and Navier-Stokes methods. This approach was then extended to the case of overset meshes (Chimera approach). Numerous validations have demonstrated the value of this strategy. In particular, this new hybrid method makes it possible to reduce the cost of direct aeroacoustic simulations while maintaining optimum accuracy.

Keywords : lattice Boltzmann method, Navier-Stokes, finite-volume method, coupling, comparison, aerodynamics, aeroacoustics.