

Titre en anglais : Global linear stability analysis with lattice-Boltzmann Methods

Titre en français : Analyse de stabilité linéaire globale par la méthode lattice-Boltzmann

Nom du directeur de thèse : Pierre Boivin

Tel :

E-Mail : pierre.boivin@univ-amu.fr

Co-encadrant : Grégoire Varillon

E-mail : gregoire.varillon@univ-amu.fr

Laboratoire : M2P2

Financement : demandé

Type de financement : école doctorale

Résumé en anglais :

Context:

Coherent structures in turbulent flows appears as an organized behavior dynamical structures among the chaotic flow motion. The role of coherent structures in many applications is paramount as they are linked to unstable flow behavior (e.g., vortex shedding), acoustic interactions, low frequency noise or fluid-structure interactions. Their development can be detrimental – e.g., structural vibrations – or beneficial, as a small initial fluctuation can be largely amplified by flow instabilities.

The **Linearized mean-fields method** is an efficient computational methods for identifying them: the most energetic structures appear as the dominant eigenmodes, or *global modes*, of the Navier-Stokes Equations linearized (LNSE) around a mean flow. In the frequency domain, the *resolvent analysis* identifies the dominant flow structures and amplification mechanisms at a given frequency. These eigenmodes are often computed with the *adjoint eigenmodes* that contain gradient information used for sensitivity analysis or optimisation. The resolvent modes also provide forcing locations for optimal control, and yield a factorization of the evolution operator for coherent structures into a *low-order model*.

Scientific bottleneck and objective of the thesis:

However, applying these methods to large geometries is out of reach due to memory and computational time limitations. This thesis will leverage direct-adjoint looping and matrix-free strategies together with the efficiency of lattice Boltzmann methods (LBM) for achieving Linearized mean-field methods on large and complex geometries. The outcome of the thesis are:

- A well-posed and robust methodology for performing resolvent analysis and global mode analysis with LBM,
- An efficient workflow for computing these modes on large configurations,
- A flow control method via optimal forcing for large configurations with LBM.

Résumé en français :

Contexte : Les structures cohérentes dans les écoulements turbulents se manifestent par des comportements dynamiques organisées au sein du mouvement chaotique de l'écoulement. Leur rôle est primordial dans de nombreuses applications, car elles sont liées à des instabilités (par exemple, le détachement de tourbillons), aux interactions acoustiques, au bruit basse fréquence ou aux interactions fluide-structure. Leur développement peut être préjudiciable (par exemple, les vibrations structurelles) ou bénéfique, car une faible fluctuation initiale peut être fortement amplifiée par les instabilités de l'écoulement.

La méthode des champs moyens linéarisés est une méthode de calcul efficace pour les identifier : les structures les plus énergétiques apparaissent comme les modes propres dominants, ou modes globaux, des équations de Navier-Stokes linéarisées (LNSE) autour d'un écoulement moyen. Dans le domaine fréquentiel, l'analyse en résolvante identifie les structures d'écoulement dominantes et les mécanismes d'amplification à une fréquence donnée. Ces modes propres sont souvent calculés conjointement avec les modes propres adjoints, qui contiennent des informations sur le gradient utilisées pour l'analyse de sensibilité ou l'optimisation. Les modes résolvents fournissent également des emplacements de forçage pour un contrôle optimal et permettent une factorisation en un modèle d'ordre réduit.

Verrou scientifique et objectif de la thèse : Cependant, l'application de ces méthodes à des géométries complexes est actuellement impossible en raison des limitations de mémoire et de temps de calcul. Cette thèse exploitera les techniques d'intégration direct-adjoint et matrix-free, ainsi que l'efficacité des méthodes de Boltzmann sur réseau (LBM), pour obtenir des méthodes de champ moyen linéarisées sur des géométries complexes et de grande taille. Les objectifs de la thèse sont :

- Une méthodologie robuste et bien posée pour réaliser l'analyse en résolvante et l'analyse modale globale avec LBM,
- Un workflow efficace pour le calcul de ces modes sur des configurations complexes,
- Une méthode de contrôle d'écoulement par forçage optimal pour les configurations complexes avec LBM.

Profil du candidat recherché :

You earn a M.Sc. degree in fluid dynamics, or with a significant training in fluid mechanics, specifically with advanced knowledge on turbulent flows and their modeling.

Technical skills:

- Must-have: an experience in Computational Fluid Dynamics (CFD) and good knowledge in numerical methods applied to CFD,
- Must-have: scientific computing, experience in code development and good coding practice,
- Nice-to-have: experience or knowledge in linear stability analysis or optimization algorithm, experience with C++.

Soft skills: proficiency in English, synthetic writing, eager to communicate on your topic orally and written, motivation and independence for problem solving.

Your preferences: numerical method development, code development, physics-based modeling.

Publications sur le sujet :

On resolvent analysis and its application:

L. V. Rolandi, J. H. M. Ribeiro, C.-A. Yeh, and K. Taira. An invitation to resolvent analysis. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, Aug. 2024. ISSN 0935-4964, 1432-2250. doi: 10.1007/s00162-024-00717-x.

M. Casel, K. Oberleithner, F. Zhang, T. Zirwes, H. Bockhorn, D. Trimis, and T. L. Kaiser. Resolvent-based modelling of coherent structures in a turbulent jet flame using a passive flame approach. *Combustion and Flame*, 236:111695, Feb. 2022. ISSN 00102180. doi: 10.1016/j.combustflame.2021.111695

On LBM:

I. Cheylan, G. Fritz, D. Ricot, and P. Sagaut. Shape Optimization Using the Adjoint Lattice Boltzmann Method for Aerodynamic Applications. *AIAA Journal*, 57(7):2758–2773, July 2019. ISSN 0001-1452, 1533-385X. doi: 10.2514/1.J057955.

E. Vergnault and P. Sagaut. An adjoint-based lattice Boltzmann method for noise control problems. *Journal of Computational Physics*, 276:39–61, Nov. 2014. ISSN 00219991. doi: 10.1016/j.jcp.2014.07.027.

On useful numerical methods:

E. Martini, D. Rodríguez, A. Towne, and A. V. Cavalieri. Efficient computation of global resolvent modes. *Journal of Fluid Mechanics*, 919:A3, July 2021. ISSN 0022-1120, 1469-7645. doi: 10.1017/jfm.2021.364

J.-C. Loiseau, M. A. Bucci, S. Cherubini, and J.-C. Robinet. Time-Stepping and Krylov Methods for Large-Scale Instability Problems. In A. Gelfgat, editor, *Computational Modelling of Bifurcations and Instabilities in Fluid Dynamics*, pages 33–73. Springer International Publishing, Cham, 2019. ISBN 978-3-319-91494-7. doi:10.1007/978-3-319-91494-7_2

Insertion professionnelle après thèse : publique et/ou privée