

Titre en français : Solutions stationnaires en simulations Boltzmann sur réseaux d'écoulements turbulents : une méthode basée sur l'amortissement sélectif

Titre en anglais : Steady solutions in Lattice-Boltzmann computations of turbulent flows: a method based on selective frequency damping

Nom du directeur de thèse : Christophe Friess (directeur), Jérôme Jacob (co-encadrant)

Tel : 04.13.94.67.42

E-Mail : christophe.friess@univ-amu.fr , jerome.jacob@univ-amu.fr

Laboratoire : M2P2

Financement : demandé

Type de financement : bourse MESRI

Résumé en français :

La méthode Boltzmann sur réseaux (LBM) est une approche issue de la théorie cinétique des gaz proposée par Boltzmann permettant de résoudre les équations de la dynamique des fluides. Elle s'appuie sur un algorithme de collision-propagation assez simple permettant de déterminer les fonctions de distribution de particules en chaque point du maillage à chaque instant. Les variables macroscopiques habituelles (densité et vitesse) sont ensuite directement obtenues en calculant les moments d'ordre zéro et un de ces fonctions de distribution.

Les avantages de la LBM sont ses très bonnes propriétés de parallélisation (basées sur la compacité de la méthode), sa simplicité de codage et son faible niveau de dissipation. L'utilisation de maillages cartésiens emboîtés simplifie également fortement la mise en donnée de configurations géométriques complexes. C'est pourquoi cette méthode est de plus en plus utilisée. Cependant, la méthode LBM est naturellement instationnaire et de ce fait elle converge assez lentement lorsqu'elle est utilisée pour résoudre des écoulements stationnaires, ce qui la rend moins compétitive sur ce genre d'applications que les méthodes CFD conventionnelles comme les méthodes Navier-Stokes stationnaires.

Des approches assez sophistiquées pour contourner ce problème ont été proposées, par exemple [DR17] s'appuyant un préconditionnement du solveur. Dans le présent projet, nous prenons une voie alternative, avec la méthode d'amortissement sélectif (SFD), initialement introduite par [ABH+06] pour améliorer la convergence d'une solution LBM vers un état stationnaire. Le défi réside dans le fait que la méthode SFD a été initialement développée dans le cadre de solveurs Navier-Stokes et que son efficacité reste à prouver lorsque combinée avec les méthodes LBM.

La SFD consiste à ajouter une force volumique entraînant la vitesse vers sa moyenne. Cette force agit comme un dispositif de contrôle actif, et son paramètre clé est un gain proportionnel. Des tests préliminaires de cette méthode ont été réalisés dans le cas de l'écoulement autour d'un cylindre, à différents nombres de Reynolds [JF22], avec des résultats encourageants. Par exemple, la figure 1

montre que, en fixant la vitesse cible, le forçage SFD parvient à conduire le calcul vers un état stationnaire, dont la précision varie cependant avec le gain proportionnel du forçage.

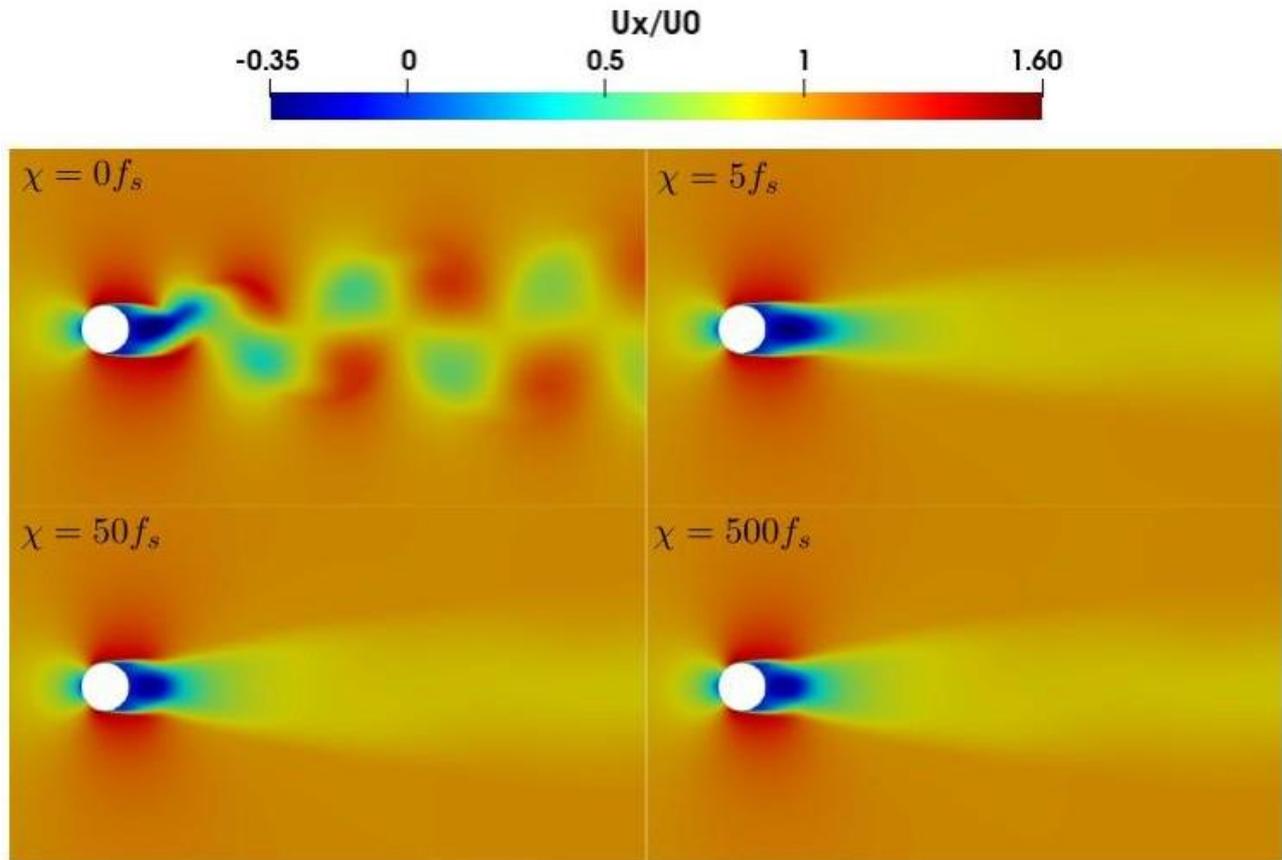


Figure 1 Visualisation of the normalized streamwise velocity field around the cylinder for various values of the proportional gain χ

Les principales questions soulevées par cette méthode et les défis cruciaux auxquels devra répondre le/la doctorant.e sont :

- L'estimation d'une moyenne temporelle dynamique appropriée des variables macroscopiques, via différentes techniques de filtrage.
- La prise en compte du forçage dans le bilan énergétique du mouvement turbulent. En effet, le forçage SFD dissipe l'énergie cinétique turbulente des grandes échelles résolues. Ceci devrait être réinjecté aux échelles non résolues, via le modèle de turbulence.
- La nécessité d'appliquer le forçage comme étant une fonction des variables macroscopiques ou, au contraire, des variables microscopiques.
- Son efficacité sur une grande variété d'écoulements.

D'autres idées, proposées par le/la doctorant.e, seront les bienvenues.

Prière de prendre contact au plus tard le **31 mars 2024**.

Résumé en anglais :

The lattice-Boltzmann method (LBM) is a kinetic approach for computational fluid dynamics. In LBM, flow variables, e.g. density, velocity, are directly obtained from microscopic particle properties. The advantages of the LBM are its parallelism, simple structure, simplicity in coding, and the straightforward incorporation of microscopic interactions. However, when applied to steady flows, the standard LBM usually converges rather slowly, and the time-consuming convergence progress prevents it from being as competitive as conventional CFD methods in practical applications.

Rather sophisticated approaches to circumvent this problem, have been proposed, e.g. [DR17] using a preconditioning of the solver. In the present project, we take an alternative path, by investigating the capability of the selective frequency damping (SFD) method, initially introduced by [ABH+06] to improve the convergence of an LBM solution towards its steady state. The challenge lies in the fact that the SFD method was initially developed in the framework of Navier-Stokes solvers.

SFD consists in adding a volume force driving velocity toward its average. This force acts like an active control device, and its key parameter is a proportional gain. Preliminary tests of this method, have been performed in the case of the flow around a cylinder, at various Reynolds numbers [JF22], with encouraging results. For instance, Figure 1 shows that, when fixing the target velocity, the SFD forcing manages to drive the computation toward a steady state, whose accuracy however varies with the proportional gain of the forcing.

The most crucial challenges faced by the method are :

- The computation of a proper dynamic time-average of the velocity. Kalman filtering will be considered in future work.
- The energy balance, which is modified by the proposed forcing. Indeed, the SFD forcing removes turbulent kinetic energy from the resolved large scales. This should be compensated in the turbulence model, which accounts for the unresolved scales.
- Whether the forcing should be applied as a function of velocity or the microscopic variables.
- Its efficiency over a broad variety of flows.

Other ideas, put forth by the PhD candidate, will be most welcome.

Please contact us before **March 31st, 2024**.

Profil du candidat recherché :

Master / diplôme d'ingénieur en Mécanique des fluides, Simulation Numérique, Mathématiques Appliquées.

Publications sur le sujet :

[ABH+06] Espen Akervik, Luca Brandt, Dan S Henningson, Jérôme Hoepffner, Olaf Marxen, and Philipp Schlatter. *Steady solutions of the Navier-Stokes equations by selective frequency damping*. *Physics of fluids*, 18(6):068102, 2006.

[DR17] Alessandro De Rosis. Preconditioned lattice boltzmann method for steady flows: A noncascaded central-moments-based approach. *Physical Review E*, 96(6):063308, 2017.

[JF22] J. Jacob and C. Friess. *Steady solutions in Lattice-Boltzmann computations of turbulent flows: a method based on selective frequency damping*. In proceedings of the 25ème Congrès français de mécanique, 2022.

Insertion professionnelle après thèse : publique et/ou privée