

**Titre en français :** Forçage sélectif pour des solutions stationnaires en simulations Boltzmann sur réseaux d'écoulements turbulents

**Titre en anglais :** Selective forcing for steady solutions in Lattice-Boltzmann computations of turbulent flows

**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](mailto:christophe.friess@univ-amu.fr) , [jerome.jacob@univ-amu.fr](mailto: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.

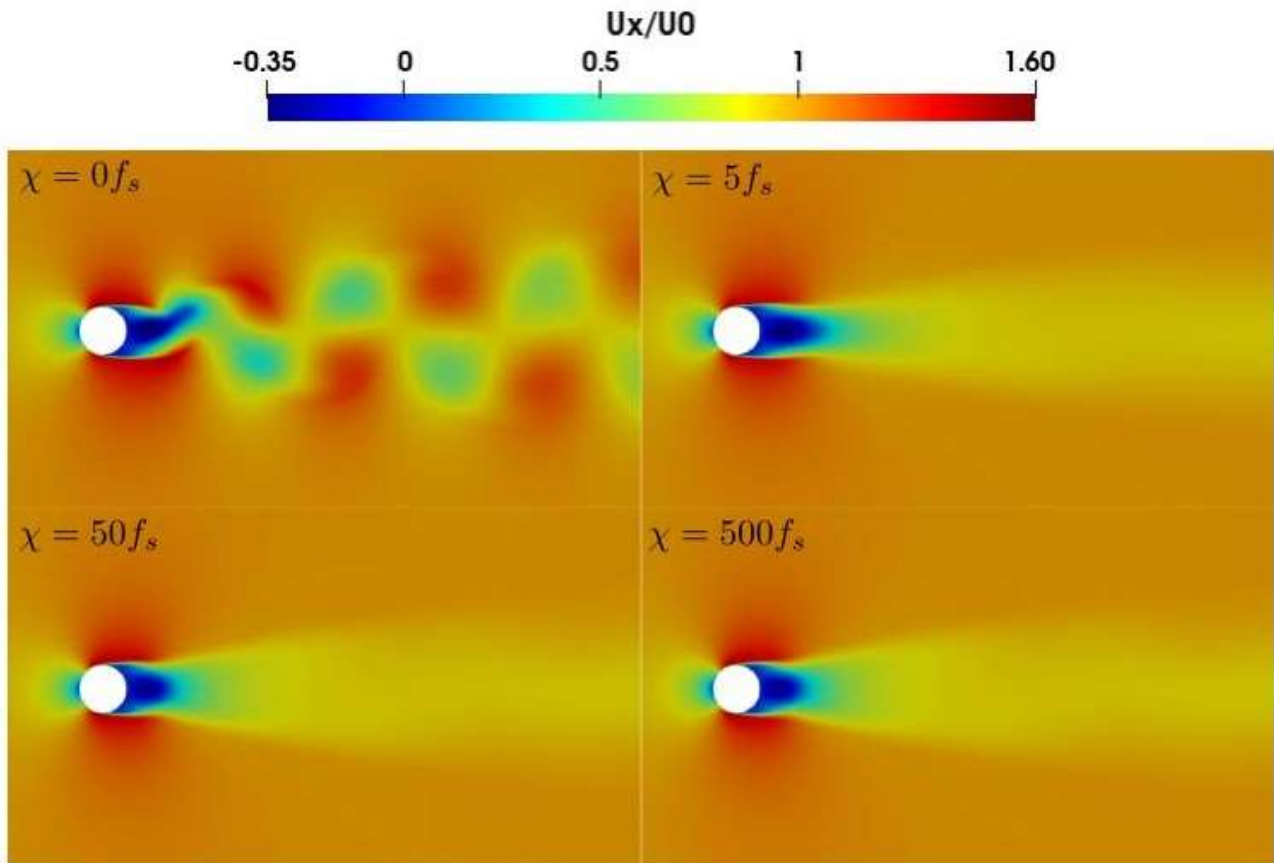


Figure 1 Visualisation of the normalized streamwise velocity field around the cylinder for various values of the proportional gain  $\chi$

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.

### Résumé en anglais :

The lattice Boltzmann method (LBM) is an approach derived from the kinetic theory of gases proposed by Boltzmann to solve the fluid dynamics equations. It is based on a simple collision-streaming algorithm which allows to determine the particle distribution functions at each point

of the mesh at each time step. The usual macroscopic variables (density and velocity) are then directly obtained by computing the zero- and first-order moments of these distribution functions.

The advantages of LBM are its very good parallelization properties (due to the compacity of the method), its simplicity of coding and its low dissipation level. The use of embedded Cartesian meshes also greatly simplifies the implementation of complex geometrical configurations. This is why this method is getting more and more used. However, the LBM method is naturally unsteady and therefore converges rather slowly when used to solve steady flows, which makes it less competitive than conventional CFD methods such as steady-state Navier-Stokes methods.

Sophisticated approaches to circumvent this problem have been proposed, for example [DR17] based on a preconditioning of the solver. In the present project, we choose an alternative path, with the selective damping method (SFD), initially introduced by [ABH+06] to improve the convergence of an LBM solution to a steady state. The challenge lies in the fact that the SFD method was initially developed in the framework of Navier-Stokes solvers and that its efficiency remains to be proven when combined with LBM methods.

The SFD consists in adding a volume force driving the velocity towards its average. This force acts as an active control device, and its key parameter is a proportional gain. Preliminary tests of this method have been carried out in the case of flow around a cylinder, at different Reynolds numbers [JF22], with encouraging results. For example, figure 1 shows that, when fixing the target velocity, the SFD forcing manages to drive the calculation towards a steady state, whose accuracy varies however with the proportional gain of the forcing.

The main questions raised by this method and the crucial challenges to be addressed by the PhD student are:

- The dynamic estimation of an appropriate time average of the macroscopic variables, via various filtering techniques.
- Accounting the forcing in the energy balance of the turbulent motion. Indeed, the SFD forcing dissipates the turbulent kinetic energy of the resolved large scales. This should be re-injected into the unresolved scales, via the turbulence model.
- The need to apply the forcing as a function of macroscopic variables or, on the contrary, of microscopic variables.
- Its effectiveness on a wide variety of flows.

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

### **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 Rosi. 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.



**Ecole Doctorale no. 353**  
**Sciences pour l'ingénieur :**  
**Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique**

**Insertion professionnelle après thèse :** publique et/ou privée