

Offre de stage de fin d'étude (6 mois) niveau master à l'Ecole Centrale de Nantes : Analyse physique de données de très grande taille de simulation numérique en mécanique des fluides



- **Lieu :** École Centrale de Nantes, GeM – Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique
- **Encadrant :** Lucas Lestandi (Maître de conférences)
- **Contact :** lucas.lestandi@ec-nantes.fr
- **Rémunération :** ~630 €/mois selon le dernier décret du “Journal Officiel”.
- **Durée:** 6 mois
- **Dates:** Démarrage entre janvier et mars 2025

Contexte

Comprendre la dynamique des écoulements turbulents avec des gradients de densité reste un défi à ce jour. Il est essentiel de progresser dans ce domaine pour faire avancer à la fois les connaissances théoriques et les applications pratiques (aérospatiale, prévision météo, ...). Pendant ce stage, nous nous concentrerons sur deux problèmes académiques : 1. L'instabilité de Rayleigh-Taylor (RTI) et 2. L'instabilité de Kelvin-Helmholtz Rayleigh-Taylor (KHRTI). Ils offrent un aperçu détaillé de ces interactions fluides complexes. Cependant, le niveau de précision requis par ces simulations fait que la taille des données devient un défi en soi, que ce soit pour la visualisation ou l'interprétation.

L'*Instabilité de Rayleigh-Taylor (RTI)* se produit lorsque deux fluides de densités différentes interagissent, le fluide le plus lourd pénétrant dans le fluide plus léger. Cette instabilité est courante en astrophysique, en océanographie et dans la recherche sur la fusion nucléaire, où des fluides de densité variable se heurtent ou interagissent sous l'influence de la gravité. Les simulations RTI permettent aux chercheurs de modéliser l'interaction complexe entre ces fluides et d'étudier comment les instabilités évoluent dans le temps, comme le montrent [1,2,3].

L'*Instabilité de Kelvin-Helmholtz Rayleigh-Taylor (KHRTI)* est une extension de la RTI, où le cisaillement de vitesse ajoute une autre couche de complexité à l'interaction fluide. Cela se produit lorsqu'il y a une différence de vitesse à l'interface entre deux fluides, créant des vagues de Kelvin-Helmholtz qui intensifient l'instabilité. Le phénomène KHRTI est crucial pour comprendre la turbulence atmosphérique ou le comportement des plasmas dans des contextes astrophysiques.

Les données utilisées durant ce stage sont obtenues par la simulation numérique directe (DNS) des équations de Navier-Stokes. Elle résout directement toutes les échelles de turbulence en calculant explicitement toutes les structures de vortex potentiels jusqu'à une seule cellule de maillage. Par conséquent, la simulation nécessite d'utiliser une taille de maillage très petite pour assurer une précision suffisante et résoudre l'instabilité sans

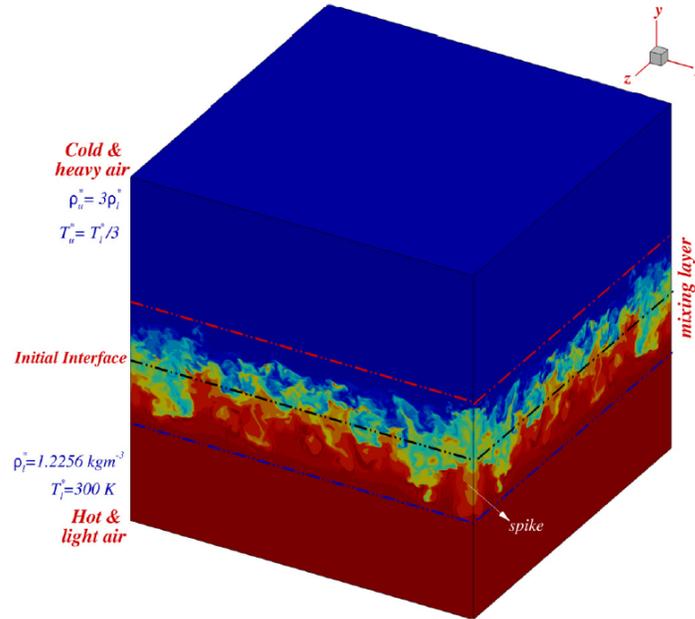


Figure 1: Représentation schématique du domaine de calcul. Reproduit de [1]

recourir à des modèles de turbulence. Cela signifie que le coût de calcul des DNS est extrêmement élevé, même à faible nombre de Reynolds, et que la quantité de données produites peut être très importante. Pour la simulation RTI, chaque pas de temps produit 157 Go de données (2,34 milliards de points de maillage) pour stocker les champs de pression, de vitesse et d'énergie. La figure 1 montre le champ de température pour l'ensemble du domaine de calcul pour la RTI.

Le sens physique peut être extrait des simulations existantes de plusieurs façons. Pour ce travail, nous nous concentrerons sur la caractérisation du déclenchement de l'instabilité. Pour ce faire, des calculs peuvent être appliqués à l'ensemble du champ, tels que l'extraction du champ de la perturbation de pression ou du terme baroclinique afin d'expliquer le comportement de l'écoulement. La visualisation de l'ensemble du champ ou de ses tranches intéresse également l'équipe de recherche afin d'évaluer visuellement la solution. Cependant, ces deux opérations nécessitent l'accès à l'ensemble du champ, ce qui peut demander un accès à un supercalculateur et des temps d'attente longs. Afin d'atténuer ce problème, nous proposons d'utiliser des techniques de décomposition telles que la POD/SVD pour extraire les *modes* qui pilotent l'évolution de l'écoulement. Les calculs de ces modes permettront un stockage et un accès aux données moins coûteux tout en permettant une analyse basée sur l'énergie du processus (voir [4]).

Présentation de l'équipe et du cadre de travail

Ce stage fait partie d'un projet international plus vaste financé par le CEFIPRA (Centre Franco-Indien pour la Promotion de la Recherche Avancée) intitulé *Réduction de données et modélisation de substitution pour la transition à la turbulence des données d'instabilité de Rayleigh-Taylor obtenues par DNS*. Le projet est dirigé par Lucas Lestandi, maître de conférences à l'École Centrale de Nantes (ECN, Laboratoire GeM) et la Aditi Sengupta (Assistant professor à IIT-ISM Dhanbad, Département de Génie Mécanique), qui a fourni les données et les solveurs DNS. Le stage se déroulera à l'École Centrale de Nantes (France) en collaboration avec Lucas Lestandi et Yassin Ajanif, qui est étudiant en deuxième année de doctorat. Il développe actuellement des outils pour permettre la décomposition des données de simulation RTI.

Votre travail durant ce stage

1. Phase initiale :

- Travailler en étroite collaboration avec Yassin pour apprendre à utiliser les ressources de supercalcul d'ECN.
- Se concentrer sur la réservation de ressources, la planification des tâches et l'utilisation efficace de l'infrastructure de calcul.

2. Analyse des sous-ensembles de données :

- Mettre en place des pipelines de traitement pour les sous-ensembles de données afin d'assurer une gestion et une visualisation appropriées.
- Développer des benchmarks pour valider la stabilité et l'efficacité des flux de travail.

3. Analyse des ensembles de données complets :

- Une fois les benchmarks stabilisés, passer à l'analyse de l'ensemble des données KHRTI (environ 2To).
- Si le temps le permet, étendre l'analyse au jeu de données RTI (environ 4Po).

Objectifs du stage

Pour vous

- Développer des compétences en calcul haute performance (HPC) : Apprendre à utiliser le supercalculateur de l'ECN, y compris la réservation de ressources, la planification des tâches et la gestion des tâches sur plusieurs CPU et GPU.
- Acquérir une maîtrise des logiciels existants : Se familiariser avec les outils d'analyse et de visualisation de données (matplotlib, ParaView, PyVista...).
- Découvrir de l'intérieur le monde de la recherche dans un projet international.

Pour le projet

- Mise en œuvre des processus de traitement de données : Configurer et automatiser les étapes de traitement nécessaires pour gérer et visualiser les ensembles de données KHRTI et RTI.
- Contribuer à une meilleure compréhension des KHRTI (et RTI) par l'analyse approfondie des données de simulation.

Profil du stagiaire

Le candidat idéal cherche un stage de 5 ou 6 mois dans un laboratoire de recherche pour compléter son master ou son diplôme d'ingénieur dans l'une des disciplines suivantes : calcul scientifique, mathématiques appliquées, génie mécanique.

Compétences requises

- **Langue** : La maîtrise de l'anglais écrit est nécessaire. Le français ou l'anglais pour la communication quotidienne.
- **Programmation** : Bonne connaissance de la programmation / programmation scientifique en **python** ou **C++**.
- **Génie mécanique / Dynamique des fluides** : Très apprécié.
- **Mathématiques appliquées** : Très apprécié.

Références:

-
- [1] P. Sundaram, A. Sengupta, and T. K. Sengupta, “A non-overlapping high accuracy parallel subdomain closure for compact scheme: Onset of Rayleigh-Taylor instability by ultrasonic waves,” *Journal of Computational Physics*, vol. 470, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.jcp.2022.111593.
- [2] A. Sengupta, P. Sundaram, V. K. Suman, and T. K. Sengupta, “Three-dimensional direct numerical simulation of Rayleigh-Taylor instability triggered by acoustic excitation,” *Physics of Fluids*, vol. 34, no. 5, May 2022, doi: 10.1063/5.0091109.
- [3] T. K. Sengupta, P. Sundaram, V. K. Suman, and S. Bhaumik, “A high accuracy preserving parallel algorithm for compact schemes for DNS,” *ACM Transactions on Parallel Computing*, vol. 7, no. 4, Nov. 2020, doi: 10.1145/3418073.
- [4] L. Lestandi, S. Bhaumik, T. K. Sengupta, G. R. Krishna Chand Avatar, and M. Azaïez, “POD Applied to Numerical Study of Unsteady Flow Inside Lid-driven Cavity,” *Journal of Mathematical Study*, vol. 51, no. 2, pp. 150–176, 2018, doi: 10.4208/jms.v51n2.18.03.