

Titre en français : Etude de l'impact des variations de densité sur la structure fine du mélange dans un jet turbulent

Titre en anglais : Impact of density variations on the fine structure of turbulent jets

Nom du directeur de thèse : Malek Abid

Nom de la co-directrice de thèse : Laurence Pietri

Tel : 04 13 55 20 76 - 04 13 55 20 74

E-Mail : malek.abid@univ-amu.fr – laurence.pietri@univ-amu.fr

Laboratoire : IRPHE

Financement : demandé

Type de financement : bourse Ecole Doctorale

Résumé en français :

Les écoulements à masse volumique variable sont à la base de nombreuses applications industrielles (mélange et dispersion de fluide lourd ou léger, combustion en milieu turbulent, sécurité liée à l'usage de l'hydrogène, ...). L'objectif du travail de thèse est d'analyser l'impact de variations de masse volumique sur la structure fine de la turbulence dans un jet d'hélium s'épanouissant dans l'air ambiant. L'étude initiée par les travaux de Amielh et al. et Pietri et al. [1, 2] par des mesures couplées entre la vitesse et le scalaire a permis en 2012 [3] et 2018 [4] de développer des diagnostics optiques couplant vélocimétrie par images de particules (PIV) et fluorescence induite par laser (LIF) afin de caractériser simultanément champ dynamique et champ scalaire et d'accéder aux flux turbulents de vitesse et de concentration en champ proche dans un jet d'hélium.

Le travail de thèse proposé sera composé de deux volets : un volet expérimental prenant la suite des travaux expérimentaux de Moutte [4] et un volet numérique qui s'appuiera sur la simulation numérique directe des jets à masse volumique variable comme celle développée par Di Pierro et al. [5]. Dans un premier temps, le doctorant aura à optimiser la technique LIF. En effet, les images LIF acquises souffrent d'un faible rapport signal sur bruit. Une piste possible d'optimisation serait de développer un programme de traitement de l'image basé sur une technique d'apprentissage (ou *machine learning*) qui permettrait de diminuer le bruit des images LIF [6]. Des améliorations du dispositif expérimental pourraient aussi être proposées afin d'améliorer la qualité des mesures de concentration. Moutte a montré, en comparant le cas d'un jet où le scalaire est actif (jet d'hélium dans de l'air) et celui d'un jet où le scalaire est passif (jet d'air porteur de vapeurs d'acétone dans de l'air), que des différences sur les propriétés de mélange existaient plus spécifiquement dans la région d'intermittence de frontière. Le doctorant s'intéressera plus particulièrement à cette zone d'intermittence où des comparaisons avec des simulations numériques pourront enrichir l'analyse. A cette fin, le doctorant développera des simulations numériques directes du jet, ce qui constituera le deuxième volet du travail de thèse. Il s'appuiera sur les travaux déjà réalisées par Ravier et al. et Di Pierro et al. [5, 7].

La simulation numérique directe ouvre également la voie au développement de modèles réduits pour les écoulements turbulents à masse volumique variable. Ces modèles réduits seront obtenus par le biais de la décomposition orthogonale aux valeurs propres (POD) ainsi que par l'utilisation de

techniques d'apprentissage automatique fondées sur les réseaux de neurones (Machine Learning). Ils permettront ensuite de prédire le comportement potentiel des équations complètes régissant le problème étudié (équations de Navier-Stokes pour les écoulements à masse volumique variable), offrant ainsi un gain de temps considérable par rapport au temps requis pour résoudre ces équations directement [8].

Résumé en anglais :

Variable density flows are fundamental to numerous industrial applications (mixing and dispersion of heavy or light fluid, turbulent combustion, safety related to hydrogen usage, etc.). The objective of this thesis work is to analyze the impact of density variations on the fine structure of turbulence in an helium jet expanding into the surrounding air. The study, initiated by the works of Amielh et al. and Pietri et al. [1, 2], through coupled measurements of velocity and scalar, enabled the development of optical diagnostics combining Particle Image Velocimetry (PIV) and Laser-Induced Fluorescence (LIF) in 2012 [3] and 2018 [4] to characterize both the dynamic field and scalar field simultaneously and to access turbulent velocity and concentration fluxes in the near-field of an helium jet.

The proposed thesis work will consist of two components: an experimental component following the experimental work of Moutte [4], and a numerical component which will rely on direct numerical simulation of variable density jets such as that developed by Di Pierro et al. [5].

Initially, the doctoral candidate will need to optimize the LIF technique. Indeed, acquired LIF images suffer from low signal-to-noise ratio. One possible optimization approach would be to develop an image processing program based on a machine learning technique, which could reduce the noise in LIF images [6]. Improvements to the experimental setup could also be proposed to enhance the quality of concentration measurements. Moutte demonstrated, by comparing a case where the scalar is active (helium jet in air) to a case where the scalar is passive (air jet carrying acetone vapors in air), that differences in mixing properties exist more specifically in the intermittency region of the boundary. The doctoral candidate will focus particularly on this intermittency zone where comparisons with numerical simulations can enrich the analysis. To this end, the candidate will develop direct numerical simulations of the jet, constituting the second component of the thesis work. They will build upon previous works by Ravier et al. and Di Pierro et al. [5, 7].

Direct numerical simulation also paves the way for the development of reduced models for turbulent flows with variable density. These reduced models will be obtained through Proper Orthogonal Decomposition (POD) and machine learning techniques based on neural networks. They will subsequently enable the prediction of the potential behavior of the complete equations governing the studied problem (Navier-Stokes equations for variable density flows), providing a considerable time-saving compared to the time required for solving these equations directly [8].

Profil du candidat recherché :

Le ou la candidat(e) aura une solide formation en mécanique des fluides et en turbulence. Il ou elle aura un goût prononcé pour l'expérimentation et un intérêt pour la simulation numérique directe. Une bonne maîtrise de l'anglais (lu, parlé, écrit) est souhaitée.

Publications sur le sujet :

- [1] M. Amielh, T. Djeridane, L. Fulachier, F. Anselmet, Velocity near-field of variable density turbulent jets, *Int. J. Heat Mass Transfer* (1996), vol. 39 (10), p. 2149-2164, [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)00294-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00294-4)
- [2] L. Pietri, M. Amielh, F. Anselmet, Simultaneous measurements of temperature and velocity fluctuations in a slightly heated jet combining a cold wire and laser doppler anemometry, *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 21, n° 1, p. 22-36, 2000
- [3] Ducasse M.-L., *Mélange d'un scalaire dans un jet turbulent : influence d'un obstacle*, Université Aix Marseille, 2012
- [4] Moutte A., *Etude de jets turbulents à masse volumique variable : impact de la variation de masse volumique sur la structure fine et le mélange*, Université Aix Marseille, 2018
- [5] B. Di Pierro, M. Abid, M. Amielh, Experimental and numerical investigation of a variable density swirling-jet stability, *Phys. Fluids* (2013) vol. 25, <https://doi.org/10.1063/1.4817070>
- [6] F. Gu, S. Discetti, Y. Liu, Z. Cao, D. Peng, Denoising image-based experimental data without clean targets based on deep autoencoders, *Experimental Thermal and Fluid Science* (2024), doi: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2024.111195>
- [7] S. Ravier, M. Abid, M. Amielh, F. Anselmet, Direct numerical simulations of variable-density plane jets, *J. Fluid Mech.* (2006) vol. 546 (1), pp.153-191
- [8] D. Xiao, C. E. Heaney, L. Mottet, *et al.*, A reduced order model for turbulent flows in the urban environment using machine learning. *Building and Environment*, 148, 323-337. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.035>

Insertion professionnelle après thèse :

- Publique : enseignement et/ou recherche (universités, écoles d'ingénieur, organismes de recherche)
- Privée : recherche & développement, bureau d'études du secteur industriel.