

15 parvis René-Descartes
BP 7000, 69342 Lyon cedex 07
Tél. +33 (0)4 37 37 60 00
www.ens-lyon.fr

Proposition de thèse

Transfert de chaleur turbulent : étude expérimentale et analyse des mécanismes multi-échelles par apprentissage automatique

Direction de thèse Julien Salort et Francesca Chillà
Laboratoire Laboratoire de physique de l'ENS de Lyon, UMR 5672
Contact julien.salort@ens-lyon.fr
Financement Contrat doctoral ENS de Lyon financé par l'ANR (projet *THERMAL*)
Calendrier La thèse peut démarrer à la rentrée 2023

La convection thermique turbulente constitue un problème omniprésent dans de nombreuses situations naturelles. Elle peut être modélisée en laboratoire par la cellule de Rayleigh-Bénard. Il s'agit d'une couche de fluide confinée entre deux plaques horizontales. Le fluide est chauffé par le bas, et refroidi par le haut. Les couches limites thermiques se forment au voisinage des plaques. L'instabilité de flottabilité conduit à la germination de structures cohérentes, appelées *panaches thermiques*. Ces panaches et leur interaction donnent naissance à un mouvement global (la circulation grande échelle). Lorsque le forçage est suffisamment intense, l'écoulement peut devenir turbulent, et le comportement global est déterminé par la compétition entre les effets purement inertiels, le forçage thermique local et l'interaction entre panaches.

Un enjeu est la prédiction du flux de chaleur asymptotique (dans la limite des grands nombres de Rayleigh). En effet, les mesures expérimentales publiées sont particulièrement en désaccord pour $Ra > 10^{12}$: certains jeux de données ont une transition vers un régime plus efficace (nombre de Nusselt plus élevé), et d'autres jeux de données restent sur la même courbe qu'aux nombres de Rayleigh plus modérés. Une question est de déterminer ce qui déclenche ces instabilités, notamment de savoir s'il s'agit d'un mécanisme à grande échelle ou à petite échelle. Le problème est non-linéaire, complexe et multi-échelles : l'énergie est injectée à grande échelle mais aussi à l'échelle de structures plus petites, constituants élémentaires du transfert convectif, appelés *panaches thermiques*.

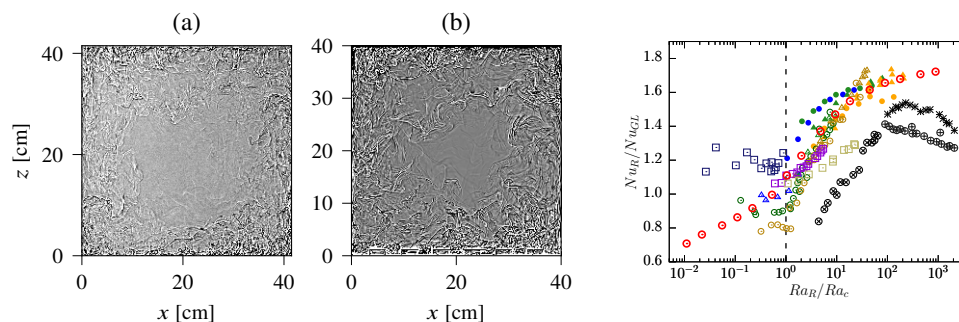


Image expérimentale d'ombroscopie à $Ra = 5.6 \times 10^{10}$; Ombroscopie synthétique par simulation numérique directe à $Ra = 1 \times 10^{10}$. Comparaison du flux de chaleur normalisé dans une cellule rugueuse obtenu par simulation numérique (cercles rouges) et mesures expérimentales. Nu_R est le modèle de Grossmann-Lohse.

Un des objectifs de cette thèse qui s'inscrit dans le projet collaboratif « THERMAL » avec nos collègues du Laboratoire Interdisciplinaire des Sciences du Numérique (LISN) à Orsay, est de caractériser les propriétés statistiques des panaches, leur nombre, la quantité de chaleur qu'ils transportent, leur interaction, la formation de superstructures, et leur rôle dans l'émergence de la circulation à grande échelle. Pour cela, nous nous appuyerons sur l'analyse des images expérimentales, et la comparaison avec des simulations numériques haute résolution mises en œuvre par nos collègues du LISN.

Une des nouveautés du projet est que nous tirerons profit de la complémentarité des informations fournies par les expériences et par les simulations numériques, en développant plusieurs techniques d'apprentissage automatique profond guidé par la physique, capables de reconstruire le champ instantané à partir de données partielles, et d'extraire des informations de basse dimensionnalité à partir d'un gros volume de données de haute dimensionnalité (quelques scalaires à partir d'une série de champs). En particulier, les expériences permettent d'obtenir des champs de vitesse (PIV ou suivi lagrangien), ou une information intégrée reliée au Laplacien de température (ombroscopie), ou des informations très locales sur les fluctuations de température (sonde miniature insérée dans l'écoulement), mais ceci dans des conditions stationnaires sur des temps longs. En comparaison, les simulations numériques directes fournissent des champs 3D complets, mais sur des temps courts par rapport à la période de la circulation globale.

Les algorithmes d'apprentissage automatique guidé par la physique vont permettre la reconstruction guidée par les champs expérimentaux (données parcellaires et bruitées). On prévoit notamment d'extraire les champs de température à partir de mesures de vitesse, ou de calculer les petites échelles inaccessibles à la PIV (super-résolution), ou de détricoter le champ 3D à partir de la mesure d'ombroscopie.

La mise en œuvre des techniques d'apprentissage automatique sera en collaboration étroite avec nos collègues du LISN, Anne Sergent et Dider Lucor qui sont spécialistes des simulations numériques et des réseaux de neurones. Deux classes d'apprentissage profond guidé seront considérées : des perceptrons multi-couches, et des réseaux de neurones convolutionnels.

La gamme de paramètres obtenus au laboratoire de physique à Lyon est large car nous pourrions nous appuyer sur plusieurs fluides de travail : eau et fluorocarbure à température ambiante, et hélium liquide dans un cryostat dédié pour l'étude aux très basses températures. Les propriétés de ces différents fluides permettent d'obtenir des gammes de nombre de Rayleigh très large, de l'ordre de $10^{10} - 10^{11}$ dans l'eau, $10^{11} - 10^{12}$ dans le fluorocarbure, et $10^{12} - 10^{13}$ dans l'hélium. La mise en œuvre de ces expériences à très haut nombre de Rayleigh, et du cryostat en verre, s'appuie sur les travaux de la thèse de Lucas Méthivier qui soutiendra en décembre 2022.

Le travail de thèse au laboratoire de physique portera en premier lieu sur le travail expérimental, mais en lien fort avec les résultats numériques. L'objectif est d'extraire des informations nouvelles utiles pour la modélisation physique de la turbulence dans les écoulements thermiques grâce à des techniques innovantes d'extraction de données utilisant des réseaux de neurones qui donneront accès à des informations physiques cachées.