

Développement instrumental pour une expérience de convection naturelle en Hélium

Proposition de stage 2026

Version: 01.00.00 22/10/2025

Contact: matthias.raba@cea.fr

Introduction

Le Département des Systèmes Basses Températures (D-SBT) du CEA Grenoble développe une recherche en cryogénie à caractère technologique et académique. Le Laboratoire de Réfrigération et de Thermo-Hydraulique (LRTH) [1] utilise la très faible viscosité cinématique de l'hélium liquide pour l'investigation des flux turbulents aux températures cryogéniques. Dans ce contexte, le laboratoire propose ce stage de fabrication et d'utilisation de nos propres anémomètres à fil chaud pour l'étude de la convection naturelle à très haut nombre de Rayleigh.

Résumé

La convection naturelle est un phénomène physique qui apparaît lorsqu'on observe un gradient de masse volumique d'un fluide dû à un gradient de température (présence d'une plaque verticale chauffée par exemple). Ce phénomène est caractérisé par un nombre adimensionnel, le nombre de Rayleigh, qui est défini comme étant le rapport entre deux temps caractéristiques et qui s'écrit :

$$Ra = \frac{\tau_{cond}}{\tau_{conv}(u)} = \frac{g\rho\beta\Delta TL^3}{\eta\alpha}$$

Où :

τ_{cond}	est le temps caractéristique pour le transport thermique via la conduction du fluide
$\tau_{conv}(u)$	est le temps caractéristique pour le transport thermique via la convection à la vitesse u
g	est l'accélération de pesanteur (9.81 m.s^{-2})
ρ	est la masse volumique du fluide
β	est le coefficient d'expansion du fluide à pression constante : $\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$
ΔT	est la différence de température entre le fluide chauffé et le fluide à l'infini
L	est la taille caractéristique de la zone de chauffe (par exemple hauteur de la plaque)
η	est la viscosité cinématique du fluide
α	est la diffusivité thermique du fluide

Dans le domaine des transferts thermiques, l'efficacité d'un échange thermique en présence d'un fluide est déterminée par le nombre de Nusselt, défini par :

$$Nu = \frac{\dot{Q}_{conv}}{\dot{Q}_{cond}} = \frac{hL}{k}$$

Où :

$\dot{Q}_{conv}$	est le flux de chaleur transmis au fluide par convection uniquement
$\dot{Q}_{cond}$	est le flux de chaleur transmis au fluide par conduction uniquement
h	est le coefficient de convection
L	est la taille caractéristique de la zone de chauffe (par exemple hauteur de la plaque)
k	est la conductivité thermique du fluide

Dans de nombreux domaines de la physique, la connaissance de la corrélation entre le nombre de Nusselt et le nombre de Rayleigh est essentielle. Jusqu'à aujourd'hui, de telles corrélations établies

expérimentalement existent jusqu'à des nombres de Rayleigh de l'ordre de 10^{12} [2]. Cependant, il est nécessaire de continuer cette étude à plus haut nombre de Rayleigh pour, par exemple :

- La compréhension fondamentale (existence ou non d'un régime ultime pour $Ra < 10^{16}$? [3])
- Une meilleure compréhension et modélisation de la fonte de la banquise si le régime ultime existe [4]
- Des applications industrielles telles que le refroidissement des SMR (Small Modular Reactors)

Aux vues des propriétés de l'hélium liquide, il est possible d'atteindre des Rayleigh de 10^{15} en exploitant les capacités de grande réfrigération du LRTH.

La mesure fine de la convection naturelle (profils de vitesse de l'écoulement et de la température du fluide, statistique eulérienne du champ turbulent etc.) dans l'hélium liquide se fera à l'aide de nouveaux anémomètres à fil chaud adaptés aux températures cryogéniques et fabriqués au laboratoire [5, 6].

Objectifs du stage

Les objectifs de ce stage expérimental relèvent principalement de la métrologie. Il s'agira de monter, calibrer et valider la chaîne de mesure des anémomètres à fils chauds, d'abord à température ambiante, puis aux températures cryogéniques avec le but ultime de préparer les expériences de large ampleur.

La logique du travail proposé est la suivante :

- Prise en main d'un anémomètre à fil chaud : montage et utilisation dans un cas simple (en air) des fils chauds, validation qualitative des mesures.
- Montage et calibration des fils chauds dans le cryostat (à 300 K puis 4.2 K).
- Validation du positionnement sub-micrométrique des fils chauds sur des déplaceurs piézo-électriques et leur validation à 300 K et 4.2 K.
- Ecriture de scripts pour l'automatisation des mesures.
- Mise en place d'une paroi chauffée dans le cryostat.
- Mesure de la convection (profils vitesse / température) à proximité de la paroi chauffée.
- Synthèse

Ce travail permettra au stagiaire d'acquérir des compétences en cryogénie, en instrumentation dédiée à l'étude des écoulements et aux montages d'expériences qui lui seront utiles pour une future carrière dans la Recherche Scientifique (études en mécanique des fluides, métrologie, cryogénie, etc...) ou dans l'Industrie (étude des SMR, installations cryogéniques, hydrogène liquide etc...).

Autres détails

Durée 5 – 6 mois.

Langue : Français et Anglais.

Possible suite du stage par une thèse.

Profil du candidat

La personne recherchée doit être en dernière année d'école d'ingénieur ou de master, autonome et avec un goût prononcé pour l'expérimentation, l'instrumentation scientifique, la métrologie, la

thermo-hydraulique et/ou la mécanique des fluides. Un intérêt pour la programmation en Python est apprécié. La personne doit posséder de bonnes connaissances en transfert thermique, cryogénie et mécanique des fluides.

Références

- [1] <https://www.d-sbt.fr/LRTH>
- [2] T. Tsuji & Y. Nagano, Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 31, No. 8, pp. 1723-1734, 1988
- [3] R. H. Kraichnan, Phys. Fluids 5, 1374–1389 (1962)
- [4] A. J. Wells & M. Grae Worster, J. Fluid Mech., Vol. 609, pp. 111-137 (2008)
- [5] J. Salort, F. Gauthier et al., 12th EUROMECH ETC, Sept. 2009
- [6] T. Nguyen et al., J. of Low Temp. Phys., 197, 348-356 (2019)