

# Détermination des échanges thermiques dans un écoulement Poiseuille-Bénard

Rani Taher, Adel Haddad, Marc Médale, François Papini et Chérifa Abid\*

Laboratoire IUSTI, Aix-Marseille Université

5 Rue Enrico Fermi, 13453 Marseille Cedex 13, France

\*(auteur correspondant : cherifa.abid@polytech.univ-mrs.fr)

**Résumé** - Cette étude permet, dans un premier temps, de démontrer l'intérêt de la PLIF comme voie de recherche pour effectuer des mesures bidimensionnelles de température dans le fluide dans le cas d'un écoulement de convection mixte dans un canal rectangulaire horizontal chauffé uniformément par le bas. Pour réaliser des mesures de PLIF en phase liquide (eau), nous avons sélectionné la Rhodamine B qui est une molécule jugée représentative en termes de fluorescence. Cette technique basée sur le phénomène de thermo fluorescence permet l'accès aux champs de température du fluide dans différentes sections droites du canal. L'exploitation de ces mesures permet la détermination du coefficient de transfert convectif dans ce type de configuration.

## 1. Introduction

La fluorescence induite par plan laser (« Planar Laser Induced Fluorescence ») est une technique non-intrusive de mesure du champ de concentration et de température notamment en phase liquide [1]. Une première méthode de mesure de température par fluorescence est la LIF à une couleur, c'est-à-dire utilisant un unique traceur. En appliquant cette technique sur la Rhodamine B (RhB), Nakajima et al. [2] ont été les premiers à utiliser la LIF pour une mesure locale, ensuite Sakakibara et al. [3, 4], entre autres, ont réalisé des mesures de champs de température d'écoulements dans un canal thermiquement stratifié et dans la zone de stagnation d'un jet impactant. Par la suite, certains auteurs [5, 6, 7], ont utilisé la LIF à deux couleurs ; dans ce cas, nous avons deux traceurs dont l'un est sensible à la température (RhB) et un autre insensible.

L'objectif de ce travail est une investigation expérimentale des champs de température d'un écoulement dans un canal horizontal, uniformément chauffé par le bas. La méthode de mesure utilisée est une technique basée sur la fluorescence induite par laser (LIF), en utilisant la Rhodamine B comme traceur fluorescent.

L'absorption de la Rhodamine B est indépendante du PH de la solution pour des solutions dont le PH>6 [8]. L'équation reliant la température à l'intensité de la fluorescence de la Rhodamine B dans l'eau est donnée dans la référence [9]. Ainsi, dans le cas d'un traceur de concentration  $C$  ( $\text{kgm}^{-3}$ ), excité par une densité volumique de flux d'intensité  $I_0$  ( $\text{Wm}^{-3}$ ), l'intensité fluorescente émise par unité de volume  $I$  ( $\text{Wm}^{-3}$ ), est :

$$I = I_0 C \Phi \varepsilon \frac{\lambda_e}{\lambda_f}$$

Où  $\varepsilon$  est le coefficient d'absorption du traceur,  $C$  est la concentration de la solution ( $\text{mol.m}^{-3}$ ) et  $\Phi$  son rendement quantique. Le rapport des longueurs d'ondes est la perte d'énergie dans l'état excité. Pour la majorité des traceurs organiques, la variation de  $I$  avec la température est essentiellement attribuée à la variation de  $\Phi$  avec la température même si pour certains traceurs  $\varepsilon$  peut également varier avec la température. Donc, théoriquement si on peut

maintenir  $I_0$  et  $C$  constantes, la température de la solution peut être mesurée à travers  $\Phi\varepsilon$ . Dans la suite, on décrira le dispositif expérimental ainsi que quelques résultats obtenus.

## 2. Description de la procédure expérimentale

Le dispositif expérimental a déjà été présenté par ailleurs [10], dans ce qui suit nous ferons un bref rappel du dispositif utilisé. Nous considérons un écoulement d'eau ( $Pr=7$ ) dans un canal horizontal, rectangulaire de rapport d'aspect  $\Gamma=10$ , uniformément chauffé par le bas. Dans ce dispositif, nous contrôlons la vitesse du fluide (nombre de Reynolds) et le flux imposé sur la paroi basse du canal ( $Ra$ ).

La réalisation de la technique LIF nécessite trois grands éléments : le laser et le système optique correspondant, l'espèce fluorescente et le système d'imagerie. Un laser (Argon Ion 400 mW) émet un faisceau laser horizontal en mode continu. Un système optique, constitué de miroirs et de lentilles, permet de générer une nappe transversale verticale. La lumière du laser de longueur d'onde 470-514 nm excite les molécules de Rhodamine B en solution dont la lumière de fluorescence émise est filmée par une caméra couleur CCD. A titre illustratif, la figure 1 montre le montage du dispositif expérimental.

Avant d'effectuer l'étalonnage, nous avons procédé à un débruitage du signal en se servant de séquences de référence à température uniforme au sein du fluide. Une soustraction pixel par pixel de l'image de référence ( $NR_{référenceii}$ ) à celle de mesure ( $NR_{mesuréii}$ ) permet de s'affranchir du bruit de fond. Nous avons ainsi mesuré le niveau de rouge NR moyen de ces images et écrit :

$$NR_{ii} = NR_{mesuréii} - NR_{référenceii}$$

L'étalonnage se basera par la suite sur les images débruitées ( $NR_{ii}$ ). Pour ce faire, nous avons porté un volume fluide à une température donnée, cette dernière a été mesurée à l'aide d'un thermocouple. À l'aide du système LIF, nous avons enregistré l'image débruitée et relevé l'intensité  $NR_{ii}$ . La correspondance entre la mesure par thermocouple  $T(x,y)$  et la mesure de l'intensité de fluorescence  $NR_{ii}(x,y)$  permet d'obtenir la courbe d'étalonnage comme illustré sur la figure 2. Il faut préciser que la résolution spatiale est de 0,2 mm/pixel dans la direction de  $z$  (hauteur de la section droite) et de 0,1 mm/pixel dans la direction  $y$  (largeur de la section droite).

## 3. Résultats expérimentaux

Nous avons montré par ailleurs [10] que dans la gamme de fonctionnement ( $\Gamma = 10$ ,  $Pr = 7$ ,  $50 \leq Re \leq 100$ ,  $0 \leq Ra \leq 10^6$ ), la structure de l'écoulement est constituée essentiellement de rouleaux longitudinaux. Pour les faibles valeurs du nombre de Rayleigh, les rouleaux sont initiés le long des parois latérales et se propagent progressivement jusqu'à envahir toute la section droite (figure 3 gauche :  $Ra=1,28 \cdot 10^4$ ). Au-delà d'une valeur critique du nombre de Rayleigh, de nombreuses paires de rouleaux apparaissent simultanément à une même abscisse, dans la zone centrale de la section droite, indépendamment du premier mécanisme (figure 3 droite :  $Ra=5,13 \cdot 10^4$ ). Ces résultats ont été obtenus numériquement.

Le premier mécanisme d'initiation peut être observé pour des nombres de Rayleigh faibles ou modérés, les rouleaux longitudinaux sont tout d'abord initiés près des parois latérales et se développent ensuite progressivement vers le centre du canal. La trace thermique des rouleaux longitudinaux forme un V dans la zone d'établissement thermique. On peut observer que l'écoulement est stationnaire et qu'il est constitué de six paires de rouleaux au-delà de  $X=50$  ( $X=x/H$  où  $x$  est coordonnée axiale et  $H$  la hauteur de la section droite). La déformation des

rouleaux à la sortie du canal le long des parois latérales est due à une périodicité de révolution des rouleaux.

Pour le même nombre de Reynolds et un nombre de Rayleigh plus fort, le deuxième mécanisme se met en place sous la forme de l'apparition simultanée, à une même abscisse  $X$ , de rouleaux longitudinaux dans la partie centrale de la paroi chauffée. Il apparaît nettement dix paires de rouleaux à une abscisse  $X \approx 10$  ainsi qu'une paire de rouleaux induite par les parois latérales comme précédemment. Ce second mécanisme n'apparaît qu'au-delà d'un seuil (comme pour l'instabilité de Rayleigh-Bénard).

Cette structure tridimensionnelle et complexe de l'écoulement affecte fortement la situation thermique et influence les transferts de chaleur par convection. Ainsi, on se propose de déterminer expérimentalement les coefficients d'échange convectif pour ce type d'écoulement. La détermination du champ de température dans le fluide permettra l'accès au coefficient de transfert. Ainsi, la figure 4 montre l'évolution temporelle du champ thermique, obtenu par thermo fluorescence, dans une section droite du canal. On peut clairement distinguer les plumes, à l'origine des rouleaux, qui se mettent en place dans une section droite. Les rouleaux sont clairement identifiés si nous les comparons aux structures d'écoulements obtenus par visualisation [11]. L'évolution temporelle permet de voir le développement tout d'abord de la couche limite thermique suivi par la formation des plumes ; le centre de ces dernières correspond à la montée du fluide pour former les deux rouleaux contrarotatifs.

Ces champs permettent l'accès aux profils de température dans une section droite (sur la demi-largeur de la section droite) pour différents instants (voir figure 5). Il ressort de cette représentation, comme il était prévisible, que les points les plus chauds correspondent au centre des plumes. Par ailleurs, pour ces conditions, le régime stationnaire est atteint au bout d'une quinzaine de minutes.

Pour évaluer les coefficients de transfert de chaleur, nous focalisons sur la couche limite en régime stationnaire. À une cote  $x$  donnée, le coefficient  $h(x)$ , moyennée sur la largeur de la section droite, est donné par :

$$h(x) = \frac{\left\{ -k \frac{\partial T(x)}{\partial z} \Big|_{z=0} \right\}}{\{T_p(x) - T_f(x)\}}$$

où  $k$  est la conductivité thermique du fluide (eau),  $T_p(x)$  est la température de paroi moyennée sur la largeur  $y$  de la section droite et  $T_f(x)$  est la température du fluide moyennée sur la section droite, à la cote  $x$ . la température de la paroi est prise égale à la température de la première couche fluide en contact avec la paroi. Par ailleurs, la détermination de la dérivée de la température se fera en considérant la régression linéaire du profil de température dans la couche limite fluide près de la paroi.

Pour un Reynolds donné ( $Re=25$ ) et pour diverses valeurs du nombre de Rayleigh nous avons représenté sur la figure 6 la variation du nombre de Nusselt (moyenné sur la largeur de la section droite) en fonction de  $x$ . À titre comparatif, nous avons reporté sur la même figure la valeur du nombre de Nusselt obtenue en convection forcée pure en se basant sur des corrélations de la littérature [12].

On peut observer que le nombre de Nusselt en convection mixte est toujours supérieur à la valeur obtenue en convection forcée pure d'un facteur 5 à 20 selon la valeur du nombre de Rayleigh. Dans le cas de la convection mixte, on retrouve la signature des deux mécanismes d'initiation [10] au travers du profil longitudinal du nombre de Nusselt. En effet, pour le premier mécanisme, illustré par  $Ra = 1,5 \cdot 10^4$ , le nombre de Nusselt décroît dans un premier temps puis augmente progressivement jusqu'à l'apparition de toutes les paires de rouleaux dans la section droite ; ceci se produit vers  $x = 0,2$  m. Le second mécanisme intervient pour les deux autres valeurs du nombre de Rayleigh ( $Ra = 6,0 \cdot 10^5$  et  $1,4 \cdot 10^6$ ) où on peut noter une brutale augmentation du nombre de Nusselt à l'abscisse où apparaissent simultanément les rouleaux centraux ( $x=0,05$ m et  $x=0,1$  m respectivement). Dans tous les cas, en régime établi, la valeur du nombre de Nusselt augmente avec celle du nombre de Rayleigh.

#### 4. Conclusion

Cette communication décrit une technique non-intrusive de mesure de température d'un fluide en convection mixte. La fluorescence induite par laser (LIF) est exploitée pour déterminer le champ thermique dans une section droite du canal. La configuration considérée concerne l'écoulement de l'eau dans un canal horizontal, à section rectangulaire, de grand rapport d'aspect transversal ( $\Gamma = 10$ ), chauffé uniformément par le bas à flux constant pour les paramètres de fonctionnement suivants :  $25 \leq Re \leq 100$ ,  $0 \leq Ra \leq 10^6$ ,  $Pr = 7$ . Pour un Reynolds donné et différentes valeurs du nombre de Rayleigh, nous avons évalué expérimentalement le nombre de Nusselt en différentes cotes longitudinales  $x$ . L'allure des courbes du nombre de Nusselt permet de retrouver les deux mécanismes d'initiation des rouleaux. Par ailleurs, la comparaison avec le nombre de Nusselt obtenu, à l'aide d'une corrélation, pour la convection forcée pure, montre que la convection mixte favorise fortement l'accroissement de l'échange convectif. Ceci est confirmé par le fait que l'accroissement du nombre de Rayleigh contribue à une nette amélioration du coefficient d'échange.

#### Références

- [1] Lout, J., Finegan, T. M., Mohsen, P., Hatton, T. A., and Laibinis, P. E., "Fluorescence-based thermometry principles and applications," *Reviews in Analytical Chemistry*, vol. 18, no. 4, 1999.
- [2] T. Nakajima, M. Utsunomiya, Y. Ikeda, R. Matsumoto, Simultaneous measurement of velocity and temperature of water using LDV and fluorescence technique, *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Symp. on Appl. of laser Tech. to Fluid Mech.* (Lisbon, 1990), 261-266.
- [3] J. sakakibara, K. Hishida, M. Maeda, Measurement of thermally stratified pipe flow using image-processing techniques, *Exp. Fluids*, Vol.16 (1993), 82-96.
- [4] J. Sakakibara, K. Hishida, M. Maeda, Vortex structure and heat transfer in the stagnation region of an impinging plane jet, simultaneous measurement of velocity and temperature fields by DPIV and LIF, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 40 N°31 (1997), 63-76.
- [5] J. Sakakibara, R.J. Adrian, Whole field measurement of temperature in water using two-color laser induced fluorescence, *Exp. Fluids*, Vol.26 (1999), 7-15.
- [6] J. Sakakibara, R.J. Adrian, Measurement of temperature field of Rayleigh-Bénard convection using two-color laser induced fluorescence, *Exp. Fluids*, Vol.37 (2004), 331-340.
- [7] P. Lavieille, F. Lemoine, G. Lavergne, M. Lebouché, Evaporating and combusting droplet temperature measurements using two-color laser induced fluorescence, *Exp. Fluids*, Vol.31 (2001), 45-55.

- [8] J. Coppeta, C. Rogers, Dual emission laser induced fluorescence for direct planar scalar behavior measurements, *Experiments in Fluids*, Vol.25 N°1 (1998), 1-15.
- [9] Berlman IB, Handbook of fluorescence spectra of aromatic molecules, 2<sup>nd</sup> edn. Academic Press (1971), London.
- [10] A. Benderradji, A. Haddad, R. Taher, M. Medale, C. Abid, F. Papini, Characterization of fluid flow patterns and heat transfer in horizontal channel mixed convection, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 44 (2008), 1465-1476.
- [11] R. Taher, A. Haddad, M. Médale, F. Papini, C. Abid, Analyse thermique d'un écoulement de convection mixte en canal horizontal, SFT 2009.
- [12] F.P. Incropera, D.P. Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Wiley (2002).

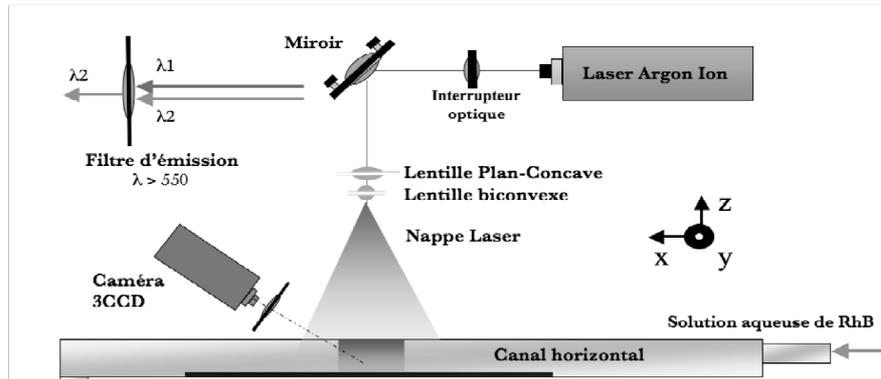


Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental

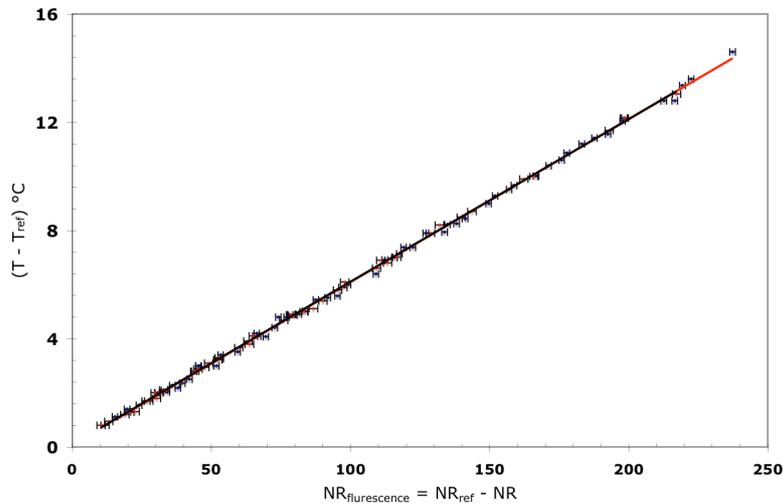


Figure 2 : Courbe d'étalonnage de la solution eau-Rhodamine B.

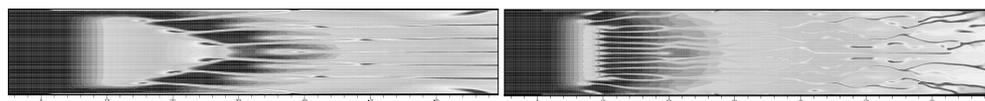


Figure 3 : Champ thermique, obtenu numériquement à  $Z=0.2$  pour  $Re=50$  [10].

$t=1$  mn



$t=3$  mn

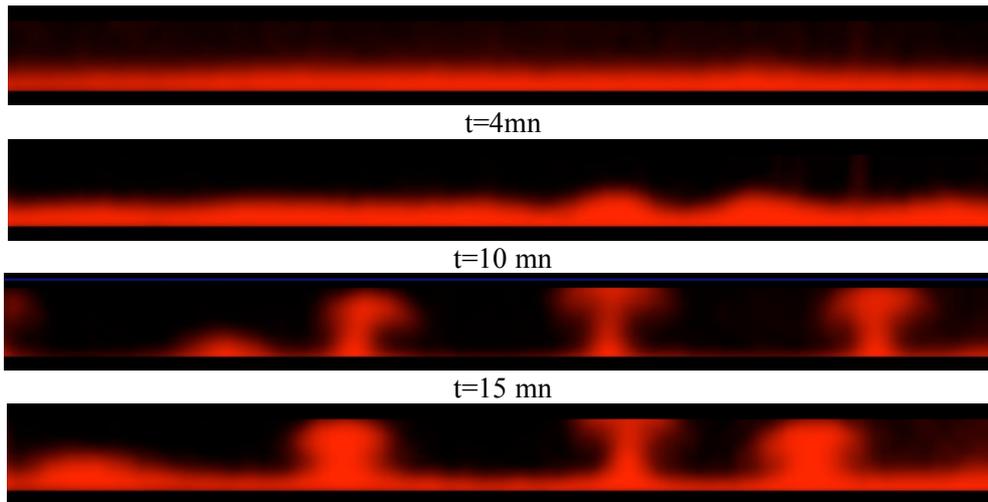


Figure 4 :  $Re = 25$ ,  $Ra = 9,35 \cdot 10^5$ ,  $x = 5$ .

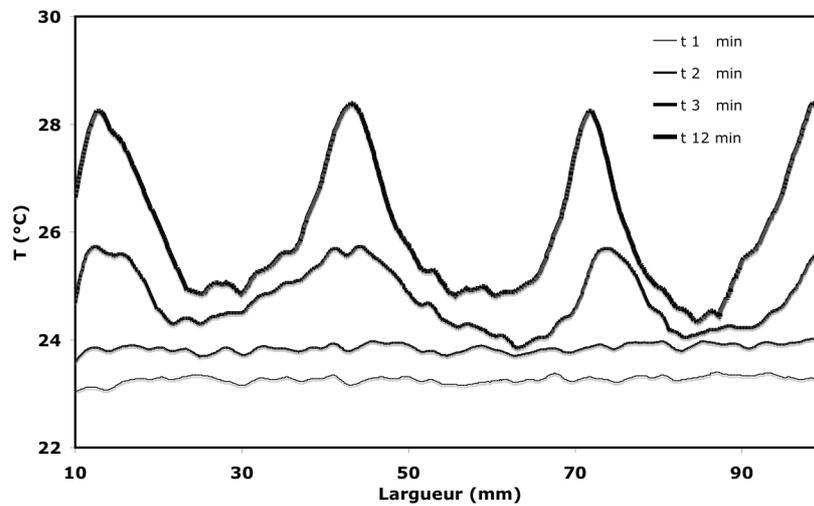


Figure 5 : Evolution des profils de la température dans le fluide près de la paroi du bas ;  $z = 2$  mm ;  $Re = 25$  ;  $Ra = 6 \cdot 10^5$  ;  $x = 50$  mm.

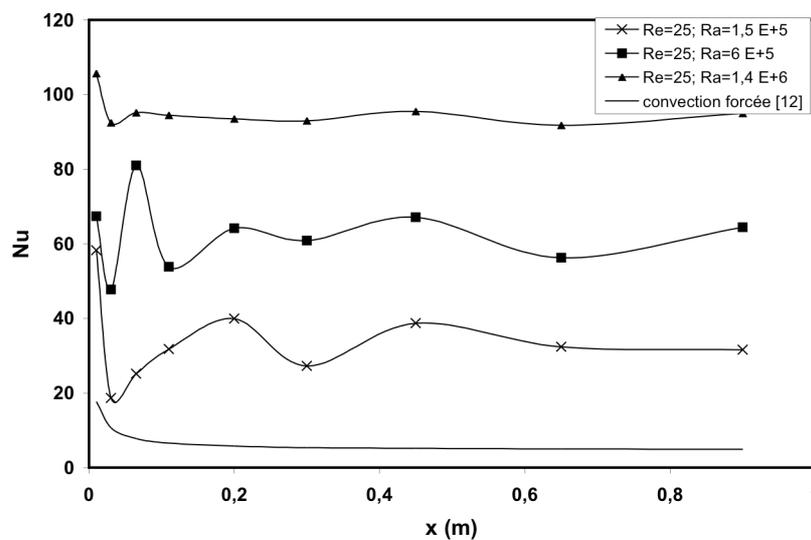


Figure 6 : Evolution du nombre de Nusselt dans la direction de l'écoulement  $x$  pour différentes valeurs de Rayleigh ( $Re = 25$ ).