

Analyse thermique d'un écoulement de convection mixte en canal horizontal

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 - Dans cette communication, nous décrivons une technique non intrusive de mesure de température dans le fluide dans le cas d'un écoulement de convection mixte dans un canal rectangulaire horizontal chauffé uniformément par le bas. 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 nous permet la détermination du coefficient de transfert convectif dans ce type de configuration.

1. Introduction

Les écoulements secondaires induits par la gravité dans un écoulement interne forcé contribuent à l'accroissement des transferts de chaleur par convection. Ainsi, la convection mixte se trouve plus favorable à l'échange de chaleur que la convection forcée pure. La mesure du coefficient de transfert de chaleur passe par la détermination du champ de température dans le fluide. Les mesures classiques intrusives (thermocouples, anémomètres à fil chaud, etc ...) restent des mesures très locales et ne sont pertinentes que dans le cas où la répartition de la température dans le fluide est homogène. Dans le cas de la convection mixte la distribution de la température est tridimensionnelle [1,2].

L'objectif de ce travail est une investigation expérimentale des champs de température pour 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). Cette dernière est utilisée surtout pour la mesure de température dans des phases liquides [3]. Ainsi, un traceur fluorescent dissout dans le fluide est excité grâce à une source lumineuse [4].

En théorie, une combinaison judicieuse de la molécule fluorescente, du système d'imagerie et du post-traitement, permet l'acquisition simultanée de la température ainsi que d'autres grandeurs scalaires. La technique de mesure est détaillée dans certains travaux dont on peut en citer [4,5,6,7]. Le fluide (l'eau) estensemencé par une faible concentration de Rhodamine B dont l'intensité de fluorescence dépend de la température. Dans le cas de la convection naturelle (Rayleigh-Bénard), Sakakibara et al. [4, 6] ont introduit dans leur fluide un deuxième traceur dont la fluorescence est indépendante de la température. L'intensité lumineuse émise par chaque traceur est capturée par une caméra différente. Le rapport des deux intensités conduit à une estimation de la température [8, 9, 10, 11]. Certains auteurs montrent que cette technique peut être utilisée en considérant un unique traceur, pour plus de détails le lecteur est renvoyé aux références suivantes [12,13].

Se basant sur ces références, nous avons développé cette technique en utilisant comme unique traceur la Rhodamine B. Cette dernière a un pic d'excitation autour de 560 nm et un pic d'émission autour de 585 nm comme c'est montré sur la figure 1.

L'absorption de la Rhodamine B est indépendante du PH de la solution pour des solutions

dont le $PH > 6$ [14]. 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 (kgm^{-3}), excité par une densité volumique de flux d'intensité I_0 (Wm^{-3}), l'intensité fluorescente émise par unité de volume I (Wm^{-3}), est : $I = I_0 C \Phi \epsilon$

Où ϵ est le coefficient d'absorption du traceur et Φ son rendement quantique. Pour la majorité des traceurs organiques, la variation de I avec la température est essentiellement attribuée à la variation de Φ avec la température même si pour certains traceurs ϵ peut également varier avec la température. Donc, théoriquement si on peut maintenir I_0 et C constants, la température de la solution peut être mesurée à travers $\Phi \epsilon$. Dans la suite, on décrira le dispositif expérimental ainsi que quelques résultats obtenus.

2. Description du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental a déjà été présenté par ailleurs [15], dans ce qui suit nous ferons un bref rappel du dispositif utilisé. Nous considérons l'écoulement de l'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 à la paroi basse du canal (Ra). La mesure de la température du fluide est réalisée grâce à la thermofluorescence. Un échangeur de chaleur externe permet de maintenir la température de la solution (eau + Rhodamine B) constante à l'entrée du canal. L'équipement de base pour réaliser cette technique est constitué de quatre parties: (1) la source lumineuse (un laser Argon émettant en continu dans la gamme 488-514 nm); (2) un dispositif optique (ensemble de lentilles et de miroirs); (3) le traceur fluorescent (Rhodamine B); (4) un système d'acquisition (une caméra couleur 3 CCD et un ordinateur). Les images acquises sont stockées et ensuite traitées pour obtenir le champ de température. Cette opération nécessite, au préalable, un étalonnage de la solution utilisée (eau + Rhodamine). Ainsi, pour une concentration donnée de la Rhodamine dans l'eau, la solution est portée à une certaine température; la mesure de la température de la solution par un thermocouple ainsi que la mesure de l'intensité émise par la solution permettent d'établir une courbe d'étalonnage (voir figure 2).

3. Résultats

Nous avons montré par ailleurs [15] 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 : $Ra=1,28 E+4$). 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 : $Ra=5,13E+4$). 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. Ainsi, comme le montre le champ de température à la paroi inférieure ($Z=0.2$) représenté sur la Figure 3 (gauche) où on y distingue la trace thermique des rouleaux longitudinaux qui forment un V dans la zone d'établissement thermique. On peut observer pour ces paramètres que l'écoulement est stationnaire et qu'il est constitué de six paires de rouleaux au-delà de $X=50$. 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 (figure 3 droite) 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 un champ thermique dans une section droite du canal, obtenu par thermofluorescence. On peut clairement distinguer les plumes, à l'origine des rouleaux, qui se mettent en place dans une section droite.

Ce champ thermique correspond à une coupe transversale, dans une section droite, obtenu par injection de traceurs (Fluoresceïne et la Rhodamine) dans l'écoulement (Figure 5). Les rouleaux sont clairement identifiés par visualisation et correspondent bien à leurs traces thermiques (plumes) dans le champ de température (figure 4 où sont représentés le champ de température dans une section droite ainsi que le profil vertical et horizontal de la température). Des améliorations doivent être apportées au logiciel de traitement pour pouvoir afficher les unités sur les grandeurs de la figure 4.

Du point de vue du transfert de chaleur, le coefficient de transfert de chaleur, à une cote X donnée, est obtenu en considérant la relation suivante : $h(X) = \{-k \partial T(X) / \partial z |_{z=0}\} / \{T_p(X) - T_f(X)\}$

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 . Nous avons représenté sur la figure 6 la variation selon X du nombre de Nusselt pour diverses valeurs du nombre de Rayleigh. A 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 [16]. 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 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 $X = 20$. Le second mécanisme intervient pour les deux autres valeurs du nombre de Rayleigh ($Ra = 6 \cdot 10^5$ 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 ($X = 5$ et $X = 10$ 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 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 : $50 \leq Re \leq 100$, $0 \leq Ra \leq 10^5$, $Pr=7$. La fluorescence induite par laser (LIF) est exploitée pour déterminer le champ thermique dans une section droite du canal. Pour un Reynolds donné et différentes valeurs du nombre de Rayleigh, nous avons évalué le nombre de Nusselt en différentes cotes longitudinales X. L'accroissement du nombre de Rayleigh contribue à une nette amélioration du coefficient d'échange. 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.

D'autres campagnes de mesure seront effectuées pour établir des corrélations du nombre de Nusselt en fonction des paramètres de contrôle.

Références

- [1] C. Abid, M. Médale, F. Papini, P. Cerisier, Mixed convection in a horizontal rectangular duct heated from below, *Int. J. Low Carbon Technol.* Vol.1 issue 3 (2006), 236-244.
- [2] C. Bonnefoi, C. Abid, M. Médale, F. Papini, Poiseuille-Bénard instability in a horizontal rectangular duct water flow, *Int. J. Thermal Sciences*, Vol. 43 N°8 (2004), 791-796.
- [3] J. Lout, T.M. Finegan, P. Mohsen, T.A. Hatton, P. Laibinis, Fluorescence based thermometry principles and applications, *Reviews in Analytical Chemistry*, Vol.18 N°4 (1999).
- [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] T. Nakajima, M. Utsunomiya, Y. Ikeda, R. Matsumoto, Simultaneous measurement of velocity and temperature of water using LDV and fluorescence technique, *Proc. 5th Int. Symp. on Appl. of laser Tech. to Fluid Mech.* (Lisbon, 1999), 261-266.
- [6] J. Sakakibara, K. Hishida, M. Maeda, Measurement of thermally stratified pipe flow using image-processing techniques, *Exp. Fluids*, Vol.16 (1993), 82-96.
- [7] K. Sato, N. Kasagi, Y. Suzuki, Combined velocity and scalar field measurement with the simultaneous use of PIV and scanning LIF, *Proc. 10th Int. Symp. of Transport Phenomenon in Thermal Science and Process Engineering* (Kyoto, 1997), 541-546.
- [8] F. Lemoine, Y. Antoine, M. Wolff and M. Lebouché, Simultaneous temperature and 2D velocity measurements in a turbulent heated jet using combined laser-induced fluorescence and LDA. *Experiments in Fluids* 26 (1999), pp. 315–323.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] M. Bruchhausen, F. Guillard, F. Lemoine, Instantaneous measurement of two-dimensional temperature distributions by means of two-color planar laser induced fluorescence (PLIF), *Exp. Fluids*, Vol.38 (2005), 123-131.
- [13] M. Coolen, R. Kieft, C. Rindt, A. Van Steenhoven, Application of 2-D LIF temperature measurements in water using a Nd-Yag laser, *Exp Fluids*, Vol.27 (1999), 420-426.

- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] F.P. Incropera, D.P. Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Wiley (2002).

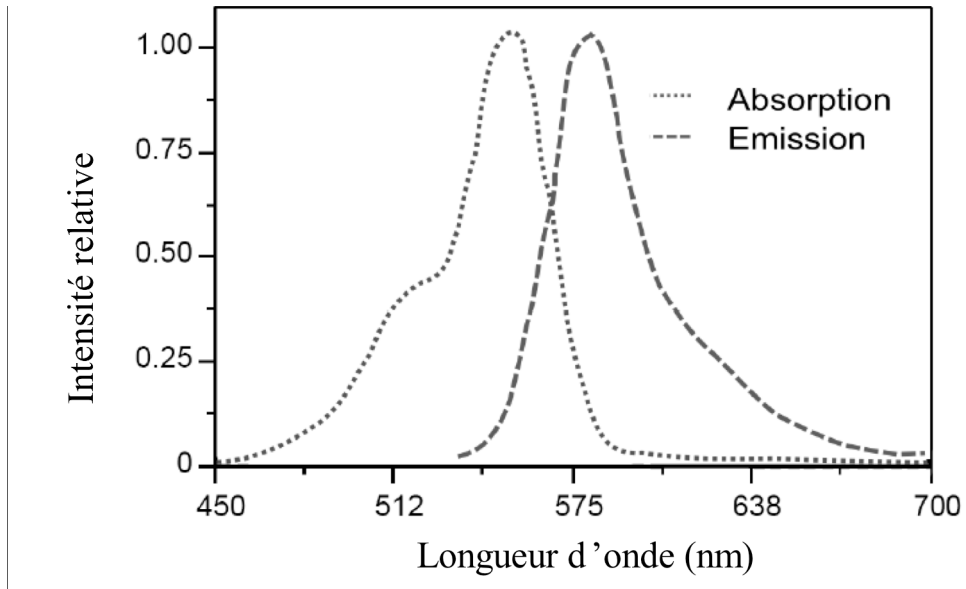


Figure 1 : Spectre d'émission et d'absorption de la Rhodamine B

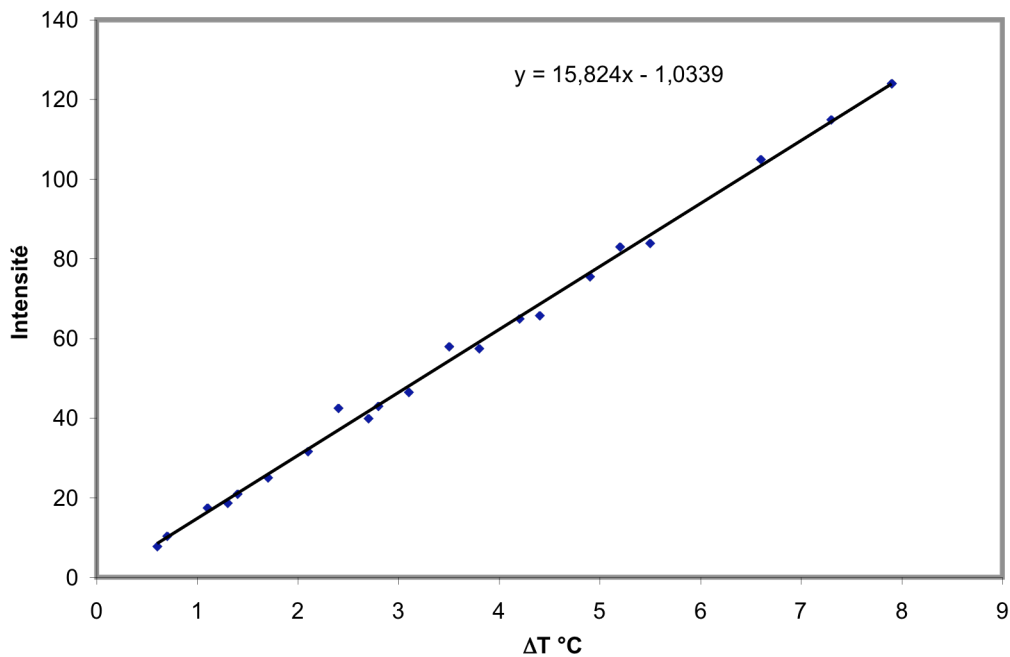


Figure 2 : Courbe d'étalonnage de la solution eau-RhodamineB

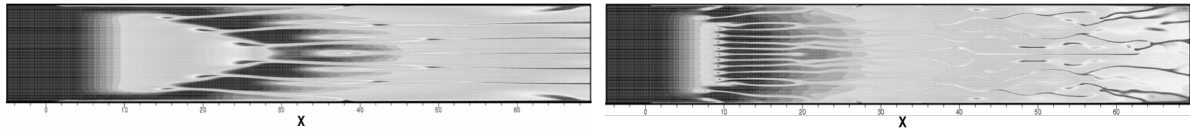


Figure 3 : Champ thermique, obtenu numériquement à $Z=0.2$ pour $Re=50$ [15]

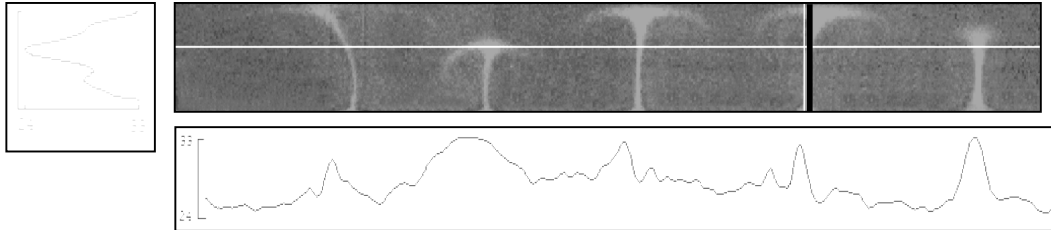


Figure 4 : Champ de température obtenu par LIF dans une section droite



Figure 5 : Visualisation des rouleaux dans la même section droite que la figure 4

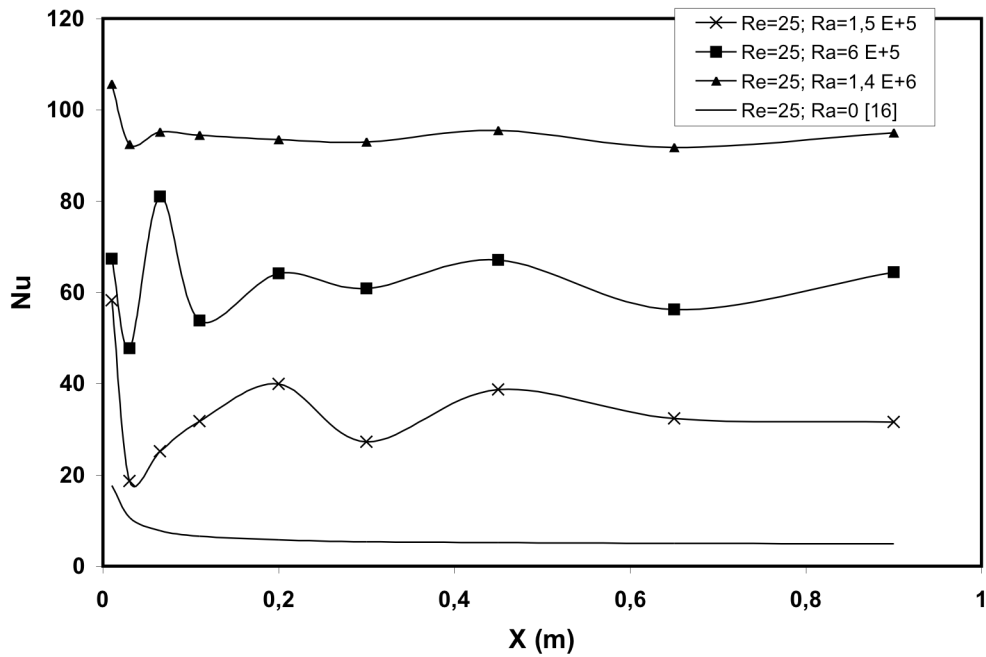


Figure 6 : Evolution du nombre de Nusselt dans la direction de l'écoulement X pour différentes valeurs de Rayleigh