

Outils pour l'étude expérimentale de la convection naturelle entre plaques planes verticales différenciellement chauffées.

Yassine CHERIF^c, Annabelle JOULIN^{a,b,*}, Laurent Zalewski^{a,b} et Stéphane LASSUE^{a,b}

^a Univ Lille Nord de France, F-59000 Lille, France

^b UArtois, LGCgE, F-62400 Béthune, France

^c HEI, 13 rue de Toul, 59046 Lille.

* (auteur correspondant : annabelle.joulin@univ-artois.fr)

Résumé – Un dispositif expérimental a été conçu pour effectuer l'étude thermique et dynamique d'un écoulement d'air en convection naturelle dans un canal vertical (ou incliné) ouvert. L'une des deux parois verticales est chauffée à température constante, l'autre est isolée. La caractérisation dynamique de la convection s'effectue par PIV et les phénomènes thermiques sont analysés à l'aide d'une instrumentation fluxmétrique non intrusive. Cette étude s'intéresse à l'influence du nombre de Rayleigh sur les profils de vitesse verticale mesurés ainsi que sur les densités de flux thermique enregistrées le long de la paroi chauffée.

Nomenclature

A rapport de forme
 E épaisseur du canal, m
 H hauteur de la zone chauffée, m
 Nu nombre de Nusselt
 Ra nombre de Rayleigh
 T température, K
 V_y vitesse verticale, $m.s^{-1}$

Symboles grecs

α diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$
 β coefficient d'expansion thermique, K^{-1}
 ε émissivité des parois du canal
 φ densité de flux thermique, $W.m^{-2}$
 ν viscosité cinématique, $m^2.s^{-1}$

Indices et exposants

exp relatif aux mesures expérimentales
 T relatif au flux total

1. Introduction

L'objectif de notre travail est d'améliorer les connaissances sur les phénomènes de convection naturelle entre deux parois planes verticales. L'étude expérimentale exposée dans cet article s'intéresse à l'écoulement de convection naturelle dans un canal bidimensionnel ouvert. Le fluide est de l'air circulant librement dans la conduite en régime laminaire. Le canal étudié est composé de deux parois planes parallèles verticales ; l'une isolée et l'autre isotherme. Deux zones adiabatiques ont été ajoutées en amont et en aval de la paroi chauffée. Les deux parois sont recouvertes de peinture noire et ont par conséquent une émissivité proche de l'unité ($\varepsilon=0,95$).

Une des premières études est celle d'Elenbaas [1] qui a déterminé les différents modes d'écoulement en fonction d'un nombre de Rayleigh modifié : à faibles nombres de Rayleigh, le régime est pleinement développé tandis qu'à nombres de Rayleigh élevés, le régime est de type couche limite. De nombreux auteurs ont publié des résultats concernant ce problème de convection naturelle mais en utilisant des conditions aux limites diverses, telles qu'un chauffage symétrique des parois à température ou à flux imposé, des géométries différentes à l'entrée du canal (utilisation de quarts de rond, de convergents...), des émissivités de parois différentes rendant l'influence du rayonnement négligeable [2], [3], [4]. Par ailleurs, il est à

noter que la majorité des études s'est focalisée sur des mesures thermiques. Peu d'études à la fois thermiques (mesures de flux et de températures) et dynamiques (connaissances des débits) ont été réalisées [5]. Rares sont celles qui se sont penchées sur la dynamique de l'écoulement, alors qu'elles sont extrêmement importantes pour la validation des simulations numériques.

Deux paramètres sont variables dans cette étude : la température pariétale et l'épaisseur du canal. L'objectif est de préciser l'influence de ces paramètres sur les profils de vitesse verticale et sur les échanges thermiques à l'intérieur du canal.

1.1. Dispositif expérimental

Le canal vertical constitué de deux plaques planes parallèles verticales est situé à l'intérieur d'une chambre protégée des perturbations thermiques et aérodynamiques extérieures. Le canal est suffisamment éloigné du sol et du plafond pour que les perturbations de l'écoulement d'air en entrée et en sortie soient très faibles. Les dimensions du canal sont les suivantes : hauteur $2H = 1\text{ m}$, largeur $0,5\text{ m}$ et épaisseur E variable choisie pour cet article $E=2\text{ cm}$, $E=4\text{ cm}$ et $E=10\text{ cm}$. Le rapport de forme est donc respectivement $A=25$, $A=12,5$ et $A=5$. La configuration géométrique est simple, la paroi régulée thermiquement est constituée de trois parties, une zone d'entrée de longueur $H/2$ adiabatique suivie d'une plaque maintenue à température constante de longueur H et enfin d'une zone de sortie de longueur $H/2$ et adiabatique (figure 1). Cette géométrie est employée par Webb et Hill dans leur expérience¹ [6]. La plaque isotherme est en aluminium de $2,5\text{ cm}$ d'épaisseur, et est régulée en température par l'intermédiaire d'un bain thermostaté. L'arrière de cette plaque chauffée, ainsi que toutes les zones non chauffées, sont isolées. La paroi « adiabatique » en vis à vis de la paroi chaude est constituée d'une plaque de polystyrène de 9 cm d'épaisseur, tandis que les parois adiabatiques d'entrée et de sortie de la paroi chauffée sont en polystyrène de $4,5\text{ cm}$ d'épaisseur. L'émissivité des plaques est proche de l'unité, car elles sont entièrement recouvertes de peinture noire mate absorbante. Par conséquent, les transferts radiatifs et convectifs co-existent.

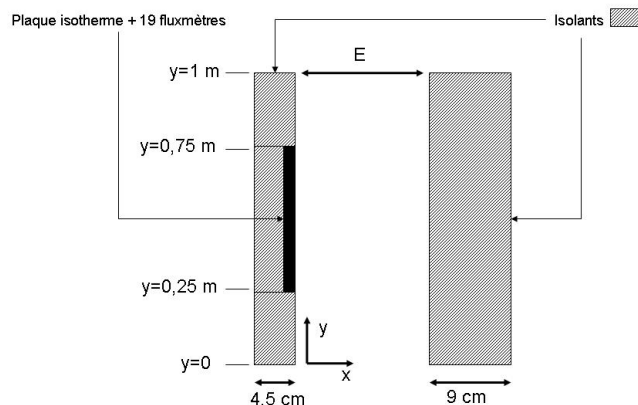


Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental

L'étude expérimentale de cet écoulement nécessite des techniques de mesures non intrusives, afin de pouvoir mesurer des grandeurs thermiques telles que la densité de flux et des grandeurs dynamiques tels que les champs de vitesse. Le dispositif expérimental est donc constitué de deux parties : une expérimentation fluxmétrique et un système de vélocimétrie par images de particules (PIV).

¹ La différence entre notre expérience et celle effectuée par Webb et Hill réside dans le fait que ces derniers ont utilisé une plaque régulée en flux au lieu d'une plaque régulée en température comme exposé dans ce présent article.

1.1.1. Mesures fluxmétriques

Dix-neuf capteurs de flux, de dimensions $2*10\text{ cm}^2$, sont positionnés sur la paroi chauffée, permettant ainsi d'obtenir des mesures de densités de flux sur toute la partie centrale de la zone chauffée. Ces fluxmètres sont rigoureusement intégrés à la paroi afin de limiter les effets de rugosité de paroi et la zone de décollement de la couche limite, rendant la mesure non intrusive. Les capteurs fluxmétriques utilisés dans ce travail ont été mis au point au laboratoire il y a plusieurs années. Ils sont qualifiés de capteurs de flux à gradient tangentiel car leur structure interne permet de générer des gradients de température entre jonctions thermoélectriques dans le plan du capteur. Ceci permet de réduire leur épaisseur (0,2 mm) tout en obtenant des sensibilités très intéressantes. Les détails de conception de ces fluxmètres sont décrits dans [4]. L'erreur sur la sensibilité des capteurs (environ 3%) obtenue lors de l'étalonnage peut-être raisonnablement calculée à l'aide de la méthode de Kline et McClintock [7] ceci en fixant soigneusement les incertitudes sur les variables primaires mesurées (tensions, courants, résistances électriques, et dimensions des capteurs).

Afin de ne pas perturber l'écoulement d'air entre les parois, nous avons positionné latéralement deux vitres en plexiglas de 5 mm d'épaisseur. Les effets de bord sont négligeables dans la zone de mesure. Dix-huit thermocouples de type T sont insérés à divers endroits du canal, notamment neuf sur la plaque chaude permettant de vérifier que celle-ci est bien isotherme, avec un écart relatif de moins de 0,5%. Ils sont fabriqués à l'aide d'un fil mono-brin, gainé de téflon d'environ 250 μm de diamètre. Leurs sensibilités moyennes est de 38 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ à 20 $^\circ\text{C}$.

1.1.2. Mesures PIV

Le dispositif de vélocimétrie utilisé est constitué :

- d'un laser continu YAG d'une énergie de 30 mJ pour 15 Hz, de marque NewWave® créant une source de lumière servant à éclairer les particules d'ensemencement. Dans les expériences, le laser est réglé pour générer deux impulsions, chacune d'elles a une durée de 0,01 μs , permettant d'étudier l'écoulement entre deux instants. Ce laser est doté d'une lentille divergente pour créer une tranche verticale lumineuse pour la visualisation des particules fluides.
- les particules traceurs sont des microparticules de paraffine d'environ 2,5 μm de diamètre et de masse volumique très proche de celle du fluide utilisé (air) produites par un générateur de fumée.
- d'une caméra Flowsense 2M de résolution spatiale 1600*1186 pixels synchronisée avec les impulsions laser. Sa fréquence d'acquisition est de 15 Hz. La caméra est placée dans un plan perpendiculaire à la tranche lumineuse. Le système de synchronisation permet d'ajuster le temps entre les mesures et l'énergie pour chaque impulsion lumineuse.
- d'un ordinateur, équipé d'une carte d'acquisition analogique, gérant la commande d'une mémoire de 512 Mo ; ce qui nous permet de récupérer uniquement 50 doublets d'images par essai.
- d'un logiciel de traitement des images PIV : le logiciel FlowManager® distribué par Dantec® permet le post traitement des données. Le logiciel analyse deux images successives pour connaître le déplacement des particules. La procédure consiste à découper chaque image en fenêtres d'interrogation de forme rectangulaire dont nous avons fixé la taille à 32*32 pixels. Suit une analyse mathématique d'inter-corrélation de la zone d'interrogation de la première fenêtre avec la zone « cible » de la seconde image. La connaissance du facteur de

grandissement des images et de l'intervalle de temps entre deux prises de vues permet de déduire les vecteurs vitesses dans le plan de visualisation (2D).

2. Résultats et interprétations

Les expériences ont été menées en régime stationnaire. Le nombre de Rayleigh modifié est utilisé pour caractériser l'influence de ces paramètres sur les densités de flux mesurés ainsi que sur les champs de vitesses.

$$Ra_m = \frac{g\beta\Delta TE^4}{\alpha\nu H} \quad (1)$$

Deux types de mesures sont effectuées pour la caractérisation thermique et dynamique du canal : la première vise à montrer l'évolution de la densité de flux thermique en fonction du nombre de Rayleigh, et la seconde montre les différents profils de vitesse verticale dans le canal.

2.1. Résultats fluxmétriques

La campagne de mesures consiste à modifier la température de la plaque chauffée dans un intervalle allant de 303 K à 343 K par pas de 10 K , pour un rapport de forme fixé ($A=5$). Notons que la figure présentée ci-dessous (figure 2) donne les valeurs de densités de flux total (convection + rayonnement) ϕ_r^{exp} pour chaque bande fluxmétrique placée sur la plaque chauffée, pour différents nombres de Rayleigh modifiés $Ra_m = Ra/A$.

On constate que lorsque la température de la plaque chauffée augmente, les densités de flux mesurées augmentent. L'évolution spatiale des densités de flux échangées est toujours sensiblement de la même allure ; les densités de flux décroissant vers une valeur stable (figure 2). Ces mesures fluxmétriques sont non intrusives et donnent d'excellents résultats. Les valeurs des Nusselt moyens, dont la longueur caractéristique est H , sont déterminées à partir des densités de flux mesurées. La figure 3 compare les valeurs des Nusselt moyens obtenus et ceux donnés par la corrélation de Bar-Cohen (chauffage asymétrique) [8] pour un canal vertical ouvert, différentiellement chauffé à température constante.

$$Nu_{\text{BarCohen}} = \left(\frac{144}{Ra_m^2} + \frac{2,873}{Ra_m^{0.5}} \right)^{-0.5} \quad (2)$$

A l'issue de cette comparaison (figure 3), on constate une très bonne concordance entre les Nusselt moyens.

2.2 Résultats de vélocimétrie par images de particules

Les différents profils de la composante verticale de la vitesse V_y sont présentés sur les figures 4-7, pour un écartement entre les deux parois $E=4\text{ cm}$ et $E=10\text{ cm}$, et pour deux températures $T=313\text{ K}$ et $T=343\text{ K}$. Ces profils sont établis à cinq niveaux différents du canal (figure 1): à l'entrée du canal ($Y=0\text{ m}$), à l'entrée de la zone chauffée ($Y=0,25\text{ m}$), au milieu du canal ($Y=0,50\text{ m}$), à la sortie de la zone chauffée ($Y=0,75\text{ m}$) et à la sortie du canal ($Y=1\text{ m}$). On peut ainsi suivre l'évolution de la vitesse verticale sur toute la hauteur du canal.

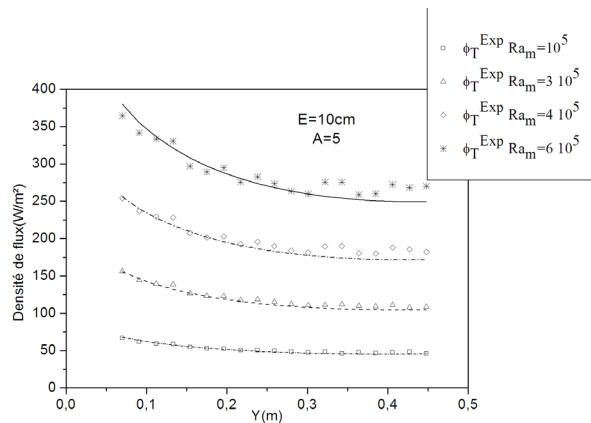


Figure 2 : Densité de flux thermique en fonction de la dimension longitudinale Y pour $E=10\text{ cm}$

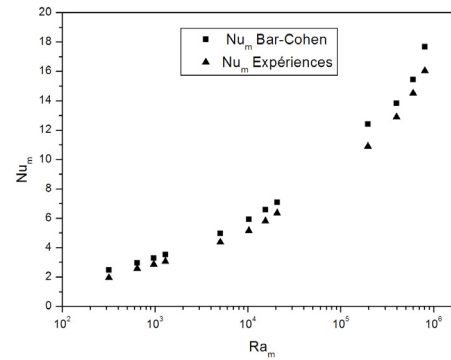


Figure 3 : Nombre de Nusselt moyen Nu_{moy} en fonction du nombre de Rayleigh modifié Ra_m

A l'entrée du canal, il est à noter que la vitesse verticale présente une uniformité et une symétrie, le profil étant plus plat lorsque le rapport d'aspect diminue, les pertes de charge affectant le profil de vitesse. On remarque aussi que le profil de cette composante verticale de la vitesse n'est plus parabolique à l'entrée de la zone chauffée, lorsque le nombre de Rayleigh devient élevé, de l'ordre de 10^6 . Ce profil change lorsqu'on s'éloigne de la zone d'entrée à cause des forces motrices se développant très près des parois. En effet, deux couches limites se sont formées le long des 2 plaques, où on observe une accélération du fluide, avec logiquement un maximum sur la paroi chaude. Les deux parois semblent se comporter comme deux parois planes indépendantes l'une de l'autre ($E=10\text{ cm}$). Deux principaux modes d'écoulements sont observés : un régime où l'écoulement est pleinement développé dans le canal (pour de faibles nombres de Rayleigh) et un régime où l'écoulement est de type couche limite le long de la paroi chauffée et le long de la paroi chauffée par rayonnement (nombres de Rayleigh plus élevés).

Par contre, au centre du canal, la vitesse décroît lorsque le fluide progresse dans la conduite vers la sortie, tout en restant assez élevée, de manière à satisfaire la condition de conservation du débit ($E=4\text{ cm}$). Lorsque le nombre de Rayleigh augmente ($E=10\text{ cm}$), une zone de recirculation dans laquelle les vitesses deviennent faiblement négatives se crée au centre du canal, plutôt vers la paroi adiabatique.

3. Conclusion

La convection naturelle entre deux parois parallèles, planes et verticales, chauffées asymétriquement, a été étudiée expérimentalement. La dynamique de l'écoulement a été étudiée à l'intérieur du canal à partir des champs de vitesse mesurés par vélocimétrie par images de particules. Ces résultats préliminaires obtenus sont prometteurs. Un grand nombre de configurations sont actuellement en test (E et T variables, lame d'air inclinée, chauffage à flux constant, ...).

Références

- [1] Elenbaas W., Heat dissipation of parallel plates by free convection, *Physica* 9, 9, (1942), 1-23.
- [2] Yilmaz T., Gilchrist A., Temperature and velocity field characteristics of turbulent natural convection in a vertical parallel-plate channel with asymmetric heating, *Heat Mass Transfer*, 43, (2007), 707-719.
- [3] Dalbert A.M., Penot F., Peube J.L., Convection naturelle laminaire dans un canal vertical chauffé à flux constant, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 24, 9, (1981), 1463-1473.

- [4] Chérif Y., Contribution à l'étude expérimentale et modélisation des transferts de chaleur par convection dans une lame d'air différenciellement chauffée, thèse de doctorat de l'université d'Artois, novembre 2007.
- [5] Manca O., Morrone B., Naso V., A numerical study of natural convection between symmetrically heated vertical parallel plates, Proceedings XII Congresso Nazionale sulla Trasmissione, vol.1, UIT, , (1994), 379-390.
- [6] Webb B.W., Hill D.P., High Rayleigh number laminar natural convection in an asymmetrical heated vertical channel », ASME J. Heat Transfer, 111, (1989), 649-656.
- [7] Kline S.J. and F.A. McClintock, Describing Uncertainties in Single-Sample Experiment, Mech. Eng.,p3, January 1953
- [8] Bar-Cohen A., Rohsenow W.N., Thermally optimum spacing of vertical, natural convection cooled, parallel plates, J. of Heat Transfer, 106, (1984).

Remerciements

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une recherche sur les échanges thermiques couplés dans les murs solaires et parallèlement dans le thème intitulé « Optimisation des transferts dans les enveloppes du bâtiment » du Groupe De Recherche AMETH (Analyse, Maîtrise des Ecoulements et des échanges Thermiques). Les auteurs souhaitent exprimer leurs remerciements à l'ANR PREBAT qui a financé l'acquisition du matériel de PIV et au GDR pour les échanges qu'il permet entre les chercheurs.

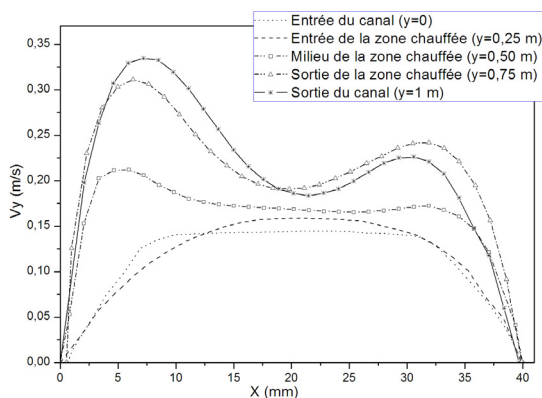


Figure 4 : Composante verticale de la vitesse V_y en fonction de la dimension transversale à l'écoulement X avec $E=4$ cm et $T=313$ K, $Ra_m=9,2.10^3$

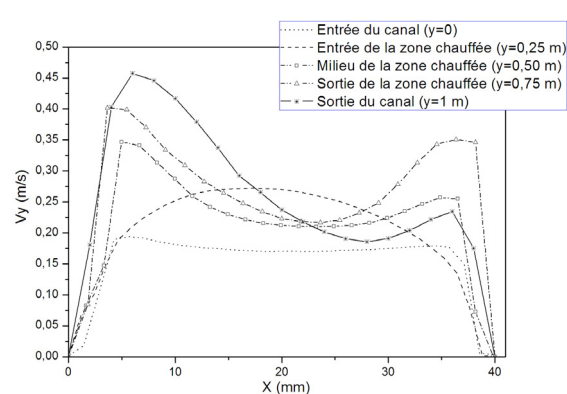


Figure 5 : Composante verticale de la vitesse V_y en fonction de la dimension transversale à l'écoulement X avec $E=4$ cm et $T=343$ K, $Ra_m=1,6.10^4$

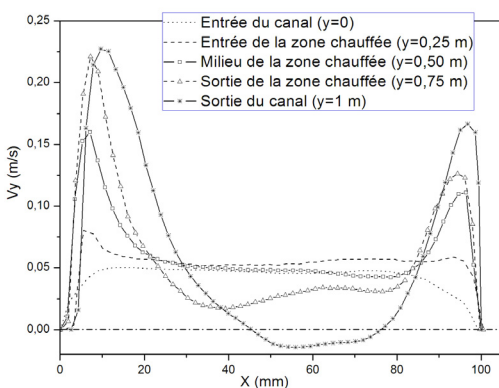


Figure 6 : Composante verticale de la vitesse V_y en fonction de la dimension transversale à l'écoulement X avec $E=10$ cm et $T=313$ K, $Ra_m=3,6.10^5$

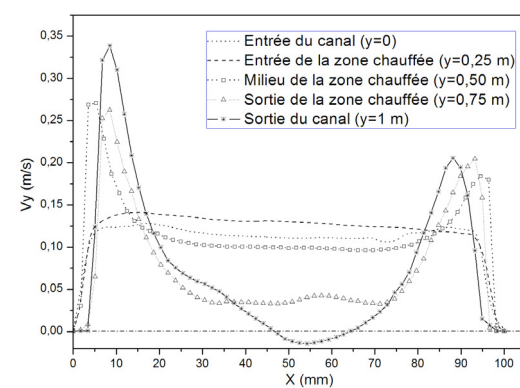


Figure 7 : Composante verticale de la vitesse V_y en fonction de la dimension transversale à l'écoulement X avec $E=10$ cm et $T=343$ K, $Ra_m=6,3.10^5$