

Mesure de température dans un écoulement renversé à la sortie d'un thermosiphon vertical chauffé à flux constant.

Sandrine SAMOT^{1*}, Frédéric DUPONT¹, François PENOT²

¹Groupe de Recherche sur les Énergies Renouvelables

Université des Antilles et de la Guyane. Campus de Fouillole – 97450 Pointe à Pitre Cedex

²Laboratoire d'Étude Thermique

1 avenue Clément Ader - BP 40109 – 86961 Futuroscope Chasseneuil cedex

* (auteur correspondant : ssamot@univ-ag.fr)

Résumé - Nous présentons les résultats d'une étude expérimentale des fluctuations de la température dans un canal d'air plan vertical en convection naturelle dont la couche limite est alimentée par un écoulement renversé. Les conditions aux limites imposent une densité de flux uniforme sur une paroi, la paroi en vis-à-vis est chauffée par rayonnement de la première. Les mesures de température s'effectuent au moyen de thermocouples fins de 12 μm . L'étude s'intéresse à l'influence du nombre de Grashof et du rapport d'allongement du canal sur les caractéristiques des fluctuations de la température de l'alimentation du thermosiphon par la section de sortie.

Nomenclature

b	Ecartement entre les deux parois du canal, m	y	Abscisse, m
Gr_b	Nombre de Grashof $Gr_b = g\beta qb^4/\lambda\nu^2$	x	Ordonnée, m
Ra_H	Nombre de Rayleigh $Ra_H = Gr_H \cdot Pr \cdot (b/H)$	Y	Abscisse sans dimension $Y = y/b$
Pr	Nombre de Prandtl	X	Ordonnée sans dimension $X = x/H$
Nu	Nombre de Nusselt	<i>Symboles grecs</i>	
H	Longueur du canal, m	λ	Conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
l	Largeur du canal, m	ν	Viscosité cinématique, $m^2.s^{-1}$
T	Température, K	<i>Indices et exposants</i>	
q_e	Densité de flux de chauffage, $W.m^{-2}$	0	référence
T^*	Température sans dimension $T^* = \lambda(T-T_0)/bq_e$		

1. Introduction

L'exploitation des propriétés thermiques des écoulements de convection naturelle se révèle très utile quand il s'agit de trouver des solutions de refroidissement de réacteurs nucléaires, de pièces électroniques ou encore dans l'habitat.

Afin de mettre à profit ces propriétés, des études préalables sur les transferts thermiques dans un thermosiphon vertical ont été effectuées, que ce soit d'un point de vue expérimental ou numérique ([1], [2], [3], [4]...)

Nous portons plus particulièrement notre attention sur un travail effectué par F. Dupont et al. [1]. Ces derniers effectuent une étude expérimentale dans le cas d'un écoulement de convection naturelle dans un canal d'air chauffé de manière asymétrique à flux constant.

Ils ont pu mettre en évidence, lors de visualisations, pour différentes conditions de chauffage et de rapport d'allongement, l'apparition d'un écoulement particulier : l'écoulement inverse. Ce renversement de l'écoulement a également été observé par E.M Sparrow et al. [2].

En effet, en fonction des conditions aux limites, on constate une alimentation partielle du thermosiphon par la section de sortie du canal.

Il s'agit donc, dans un premier temps, d'établir une zone d'existence de cet écoulement, puis de le caractériser en effectuant des séries de mesure de température à l'intérieur du canal.

Les résultats présentés dans ce travail permettent d'effectuer une première analyse comparative de la turbulence dans le canal dans les cas avec ou sans écoulement inverse.

2. Dispositif et conditions expérimentales

Les expériences s'effectuent dans un canal constitué de deux plaques planes parallèles en résine époxy inclinables par rapport au champ de pesanteur (Fig.1).

L'une des plaques est chauffée à flux électrique imposé. Dans le cas où le canal est incliné, la plaque chaude constitue la paroi supérieure. Cependant, dans ce travail, nous ne traitons que le cas vertical.

Ainsi, les dimensions du canal sont les suivantes : longueur $H = 0,64$ m, épaisseur variable $b = 0,01$ et $0,15$ m, largeur $l = 0,304$ m. A l'entrée et à la sortie du canal des convergents (divergents) en forme de quart de rond de rayon $0,05$ m ont été mis en place.

Le chauffage est assuré par un courant électrique traversant une piste de cuivre de $35 \mu\text{m}$ d'épaisseur collée sur la plaque en résine. Cette piste de cuivre est en contact avec l'écoulement. Les faces arrières de la plaque de cuivre et de la plaque non chauffée sont isolées de l'extérieur par une boîte en polystyrène extrudé contenant de la laine de verre sur une épaisseur de l'ordre de 10cm de sorte que le flux de chaleur vers l'arrière est négligeable. L'émissivité des plaques est $\varepsilon = 0,26$.

Chacune des plaques est instrumentée au moyen de 34 thermocouples de type K de $100 \mu\text{m}$ de diamètre noyés dans chaque plaque. La température de l'air à l'entrée du canal est mesurée avec un thermocouple de $500 \mu\text{m}$. Dans une ambiance isotherme, les différences de température entre les différents thermocouples n'excèdent pas $\pm 0,1$ K. Un schéma du dispositif expérimental est présenté sur la figure 1.

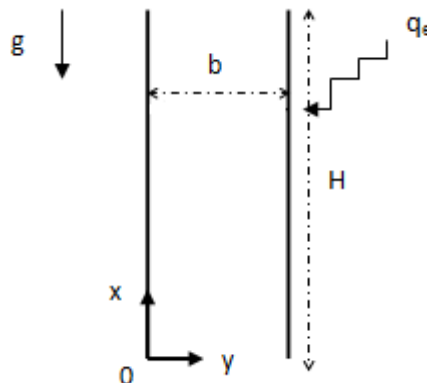


Figure 1 : Schéma du dispositif

Les températures dans l'écoulement ont été mesurées à l'aide d'un thermocouple fin de $12 \mu\text{m}$ placé sur une canne en céramique de 6 mm de diamètre.

Un système de déplacement mécanique permet de déplacer la canne à l'intérieur du canal dans toutes les directions. Le mouvement de la canne ne se fait que sur deux dimensions : x et y (Fig. 1).

Les expériences ont été faites pour une gamme du nombre de Rayleigh Ra_H comprise entre $2,97 \cdot 10^9$ et $5,94 \cdot 10^{10}$ et pour différents rapports de forme $H/b = 32 ; 25,6 ; 21,33 ; 18,29 ; 16 ; 12,8 ; 10,67 ; 9,14 ; 8$ ($b = 0,02 ; 0,025 ; 0,03 ; 0,035 ; 0,04 ; 0,05 ; 0,06 ; 0,07 ; 0,08$ m).

On distingue trois modes d'écoulement :

- I : écoulement inverse permanent
- II : écoulement inverse intermittent
- III : pas d'écoulement inverse

La valeur minimale du flux de chauffage imposé est de 5 W.m^{-2} . Elle permet d'obtenir un gradient de température suffisant afin que l'écoulement de convection naturelle dans la pièce ait une influence négligeable sur l'écoulement dans le canal.

Des mesures des profils de température du fluide à l'intérieur du canal ont été effectuées à trois positions suivant la direction longitudinale : en entrée ($X = 0$), au milieu ($X = 0,49$) et en proche sortie ($X = 0,96$).

3. Résultats et analyses

3.1. Zone d'existence de l'écoulement inverse

Les visualisations par tomographie laser effectuées par F. Dupont et al. [1] ont été complétées afin d'établir une zone d'existence de l'écoulement inverse. Cette dernière est représentée dans un plan (Ra_H , H/b) (Fig. 2). Les points pour lesquels un écoulement de retour a été observé sont indiqués par des ronds tandis que ceux où il n'y a pas d'écoulement inverse sont symbolisés par des croix. La figure 2 montre que dans le plan (Ra_H , H/b) l'écoulement inverse est circonscrit dans une zone définie par $9,14 < H/b < 16$ et $Ra_H < 4,46 \cdot 10^{10}$.

Au cours des visualisations, certaines zones n'ont pu être classées de manière précise car l'écoulement de retour observé apparaît de manière intermittente. Ces points sont représentés par des croix-ronds.

Deux zones de transition ont été relevées pour les valeurs $18,29 < H/b < 25,6$. On peut considérer ces nouvelles zones comme étant des zones de transition qui laissent supposer que la bifurcation de l'écoulement présente alors une grande sensibilité aux conditions aux limites.

Pour $H/b > 25,6$ l'écoulement inverse n'apparaît pas.

Ce renversement apparaît probablement dès lors que l'alimentation de la couche limite en air froid par l'entrée du canal est insuffisante et nécessite une alimentation supplémentaire.

Pour les rapports d'allongement $H/b > 25,6$, la vitesse de l'écoulement liée au confinement (effet cheminée) permet d'évacuer l'ensemble de l'énergie thermique fournie du fait de l'augmentation du coefficient d'échange convectif.

On remarque, par ailleurs, que pour des $H/b < 9$, l'écoulement inverse redevient intermittent. En effet, on tend alors vers un écoulement de convection naturelle le long d'une plaque isolée

Des mesures supplémentaires de vitesse permettraient d'affiner les conclusions sur les zones d'intermittence.

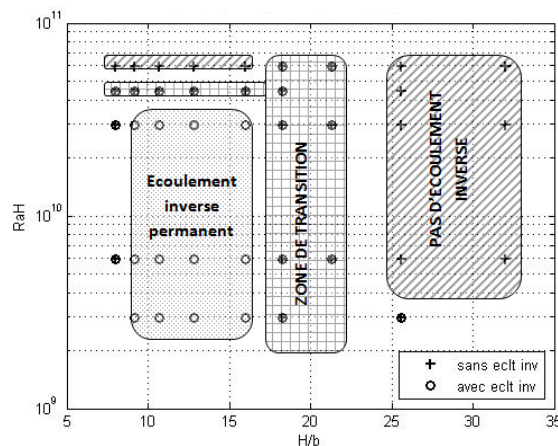


Figure 2 : Zone d'existence de l'écoulement inverse dans le plan (Ra_H , H/b)

3.2. Profils de température dans l'écoulement

Les profils de température adimensionnée T^* du fluide dans l'écoulement suivant la position transverse adimensionnée Y dans le canal sont présentés sur les figures 3a, 3b et 3c, pour chacun des cas (I, II et III). Les trois profils présentés se situent en entrée ($X = 0$), au

milieu ($X = 0,49$) et en sortie ($X = 0,96$) de canal. Les conditions aux limites correspondent à $H/b=9,1$ et Ra_H compris entre 3.10^{10} et 9.10^{10} .

A l'entrée du canal, on observe un profil plat pour Y compris entre 0 et 0,84. Au-delà, l'existence d'une couche limite thermique est clairement mise en évidence par l'augmentation de la température jusqu'à $Y = 1$.

Cette observation peut être faite quel que soit le cas considéré. On peut donc conclure que pour les cas considérés l'écoulement inverse n'a pas d'influence sur le profil de température à l'entrée du canal.

Au milieu et en sortie du thermosiphon, on remarque que les cas I et III présentent des épaisseurs de couche limite similaires au voisinage de la paroi chaude ($0,84 < Y < 1$) et ce malgré des valeurs de Ra_H variant d'un facteur 3. Ce résultat confirme, un écrasement de la couche limite thermique du fait de l'écoulement inverse. En ce qui concerne le cas II, ce dernier présente la couche limite la plus mince.

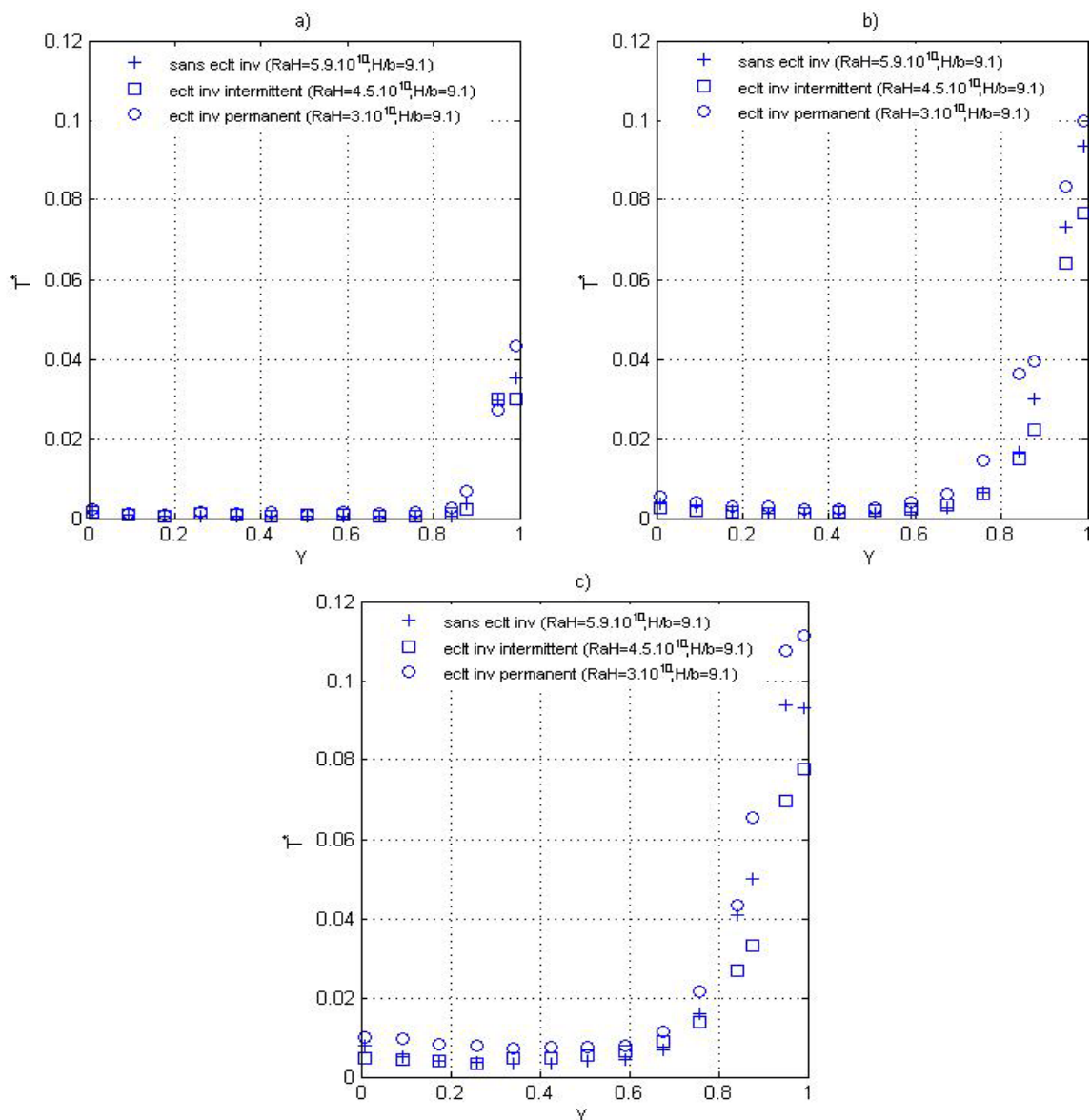


Figure 3 : Profils de température en $X = 0$ (a), $X = 0,49$ (b) et $X = 0,96$ (c)

3.3. Etude des fluctuations de la température dans le canal

Afin de déterminer l'influence de l'écoulement inverse sur les fluctuations de températures en différents points du canal, une étude comparative des intensités de turbulence pour les différents cas est effectuée (cas I, II et III).

Dans cette partie, seul le rapport de forme $H/b = 9,1$ ($b = 0.06$ m) est présenté, le cas $H/b = 10,7$ ($b = 0.07$ m) présentant les mêmes particularités.

Les Fig. 4a, 4b et 4c présentent les profils de l'intensité turbulente suivant la direction transverse pour trois positions : en entrée, au milieu et en sortie de canal.

On constate que l'intensité turbulente est faible en entrée avec des valeurs inférieures à 0,2.

Par ailleurs, il est important de noter que l'intensité turbulente la plus élevée est obtenue dans le cas d'un écoulement inverse intermittent. Ce résultat est en accord avec les profils de température. Les valeurs basses de l'intensité turbulente, dans le cas présentant un écoulement inverse, pourraient être liées à une laminarisation de l'écoulement du côté de la paroi chauffée par confinement de l'écoulement ascendant. Toutefois, il faut remarquer que les mesures de température du côté de la paroi non chauffée ne donne pas accès au degré de turbulence aéraulique. En effet, le fluide transporté par l'écoulement inverse est à une température proche de la température de la paroi non chauffée limitant ainsi l'amplitude des fluctuations. Les mesures de vitesse en cours nous permettront d'apporter des conclusions sur ce point.

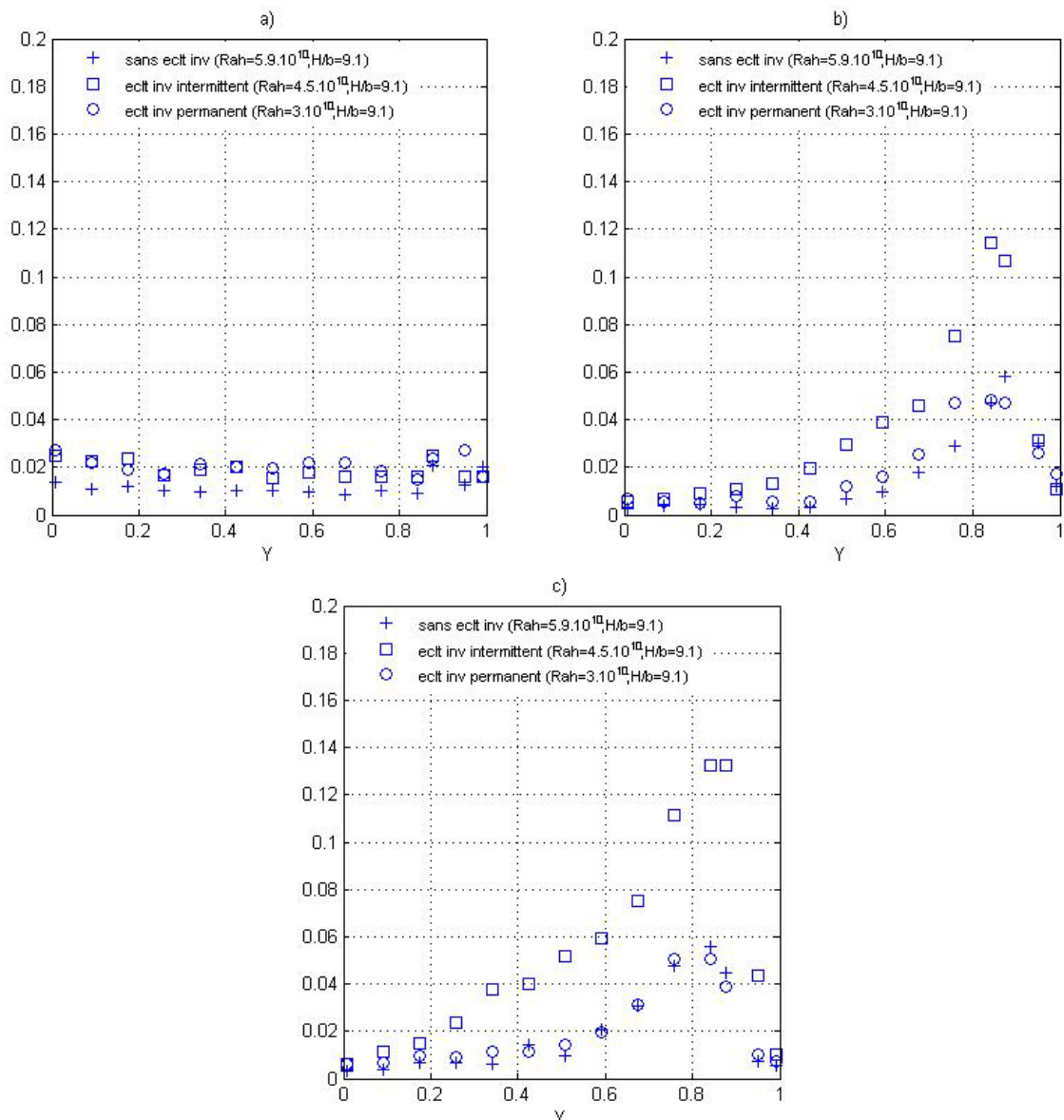


Figure 4: Intensité de turbulence en $X = 0$ (a), $X = 0,49$ (b) et $X = 0,96$ (c) de canal

4. Conclusion

Ce travail sur l'écoulement inverse de convection naturelle dans un canal vertical chauffé de manière asymétrique à flux constant a permis de dégager un certain nombre de conclusions majeures. Trois zones distinctes ont été observées. Tout d'abord, une zone d'écoulement de

thermosiphon ascendant correspondant aux plus grandes valeurs de Ra_H et aux plus grands rapports d'allongement H/b .

Ensuite, une zone d'existence d'écoulement inverse permanent caractérisé par $Ra_H < 4,46.10^{10}$ associé à des rapports de forme compris entre 9,14 et 16.

Enfin, autour de cette zone, un écoulement de transition avec une apparition intermittente de l'écoulement inverse a été constaté.

L'examen des fluctuations de température confirme ces observations et montre que les intensités turbulentes les plus importantes sont obtenues dans le cadre d'un écoulement inverse intermittent. De même, la couche limite au voisinage de la paroi chauffée est dans ce cas la plus mince.

A contrario, les plus faibles valeurs du niveau de turbulence sont constatées en présence de l'écoulement inverse. Cela suggère une laminarisation de l'écoulement ascendant liée au confinement.

Des mesures de vitesse par vélocimétrie laser apporteront des compléments de réponse.

Références

- [1] F. Dupont, T. Soubdhan, R. Blonbou, R. Calif, J-L Tuhault, F. Penot, Etude expérimentale des conditions d'apparition d'écoulements inverses en sortie d'un thermosiphon en convection naturelle d'air
- [2] F. Bade, Simulation numérique de la convection naturelle dans les thermosiphons, Thèse de doctorat, 1994
- [3] F. Penot, A-M. Dalbert, Convection naturelle mixte et forcée dans un thermosiphon vertical chauffé à flux constant, *International journal of heat and mass transfer*, vol. 26, n°11, p.1639-1647, 1983.
- [4] E.M. Sparrow, G.M. Chrysler and L.F Azevedo, Observed Flow Reversals and Measured-predicted Nusselt Numbers for Natural Convection in a One-Sided Heated Vertical Channel, *Journal of Heat Transfer*, 1984.
- [3] A-M. Dalbert, F. Penot, J-L. Peube, Convection naturelle laminaire dans un canal vertical chauffé à flux constant, *International journal of heat and mass transfer*, vol. 24, n°9, p. 1463-1473, 1981.
- [6] L. F. A. Azevedo and E.M. Sparrow, Natural Convection in Open-Ended Inclined Channels, *J. Heat Transfer* 17, 893-901, 1985.
- [7] B. W. Webb, D. P. Hill, High Rayleigh Number Laminar Natural Convection in an Asymmetrically Heated Vertical Channel, *J. of Heat Transfer* 111, p. 649-656, 1989.
- [8] N. Miolard, B. Deshaies, M. Dupont, Etude expérimentale d'un écoulement de convection naturelle dans un canal incliné, *Congrès de la Société Française de Thermique*, 2003.
- [9] W. Aung Fully Developed Laminar Free Convection between Vertical Plates Heated Asymmetrically, *Int. J. Heat Mass Transfer* 15, p. 1577-1580, 1972

Remerciement

Ces travaux ont été en partie financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) au travers du programme Habitat intelligent et solaire photovoltaïque (projet 4C n°ANR-08-HABISOL- 019)