

# Étude expérimentale des conditions d'apparition d'écoulements inverses en sortie d'un thermosiphon en convection naturelle d'air.

Frédéric DUPONT<sup>1\*</sup>, Ted SOUBDHAN<sup>1</sup>, Ruddy BLONBOU<sup>1</sup>, Rudy CALIF<sup>1</sup>  
Jean-Louis TUHAULT<sup>2</sup>, François PENOT<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Groupe de Recherche sur les Énergies Renouvelables

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

<sup>2</sup>Laboratoire d'Étude Thermique

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

\*(auteur correspondant : [fdupont@univ-ag.fr](mailto:fdupont@univ-ag.fr))

**Résumé** - Un dispositif expérimental a été élaboré pour effectuer l'étude systématique d'un écoulement d'air en convection naturelle dans un canal plan ouvert. 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. L'étude s'intéresse à l'influence du nombre de Rayleigh et du rapport d'allongement du canal sur l'apparition d'une alimentation du thermosiphon par la section de sortie. Cet écoulement inverse est visualisé par tomographie laser et quantifié par des profils de vitesse mesurés par vélocimétrie laser.

## Nomenclature

$b$	Ecartement entre les deux parois du canal, m	$q_e$	Densité de flux de chauffage, $W.m^{-2}$
$Ra_H$	Nombre de Rayleigh	$x$	Abscisse, m
	$Ra_H = (g\beta q H^4 / \lambda \nu^2) Pr$	$y$	Ordonnée, m
$Pr$	Nombre de Prandtl	<i>Symboles grecs</i>	
$H$	Longueur du canal, m	$\lambda$	Conductivité thermique, $W.m^{-1}K^{-1}$
$l$	Largeur du canal, m	$\nu$	Viscosité cinématique, $m^2.s^{-1}$
$T$	Température, K		

## 1. Introduction

Une méthode de protection de l'habitat en milieu tropical vis-à-vis des apports dus à l'ensoleillement est l'utilisation d'une enveloppe double peau dans laquelle est aménagé un canal permettant une circulation d'air en convection naturelle. Un autre champ d'application des écoulements de convection naturelle est, dans le cas où l'enceinte externe du bâtiment est pourvue de capteurs photovoltaïques, le refroidissement de ces derniers. En effet, le rendement d'un capteur photovoltaïque est une fonction décroissante de la température. L'utilisation de la convection naturelle pour ces domaines d'application nécessite une connaissance précise des champs de vitesse et de température dans l'air convecté.

Bien que de nombreuses études expérimentales se soient intéressées aux écoulements de convection naturelle en canal [1-5], une seule a mis en évidence, par visualisation, l'existence d'un écoulement inverse en sortie de canal vertical et ce pour certaines configurations seulement [6]. Le fluide utilisé alors était de l'eau, le chauffage était à température imposée et l'écoulement inverse n'a pas été quantifié par des mesures de vitesse.

L'étude expérimentale présentée ici concerne l'écoulement de convection naturelle dans un canal bidimensionnel ouvert aux extrémités, chauffé de manière asymétrique par un flux pariétal imposé. Ce canal peut être soit vertical soit incliné par rapport au champ de gravité.

Toutefois, l'étude présentée ici ne concerne que la position verticale. Le fluide considéré est de l'air.

Deux paramètres contrôlent l'écoulement de convection naturelle d'air en canal ouvert vertical : le nombre de Rayleigh et le rapport d'allongement du canal. L'objectif de notre étude est de préciser l'influence de ces deux paramètres sur l'apparition d'un écoulement inverse en faisant varier l'épaisseur du canal et le flux de chaleur imposé. L'étude présentée ne concerne que des états stationnaires pour ce qui est des températures pariétales. Ces dernières sont mesurées au moyen de thermocouples. Des visualisations des écoulements par tomographie laser et des mesures de vitesse par velocimétrie laser doppler sont présentées. Les nombres de Rayleigh correspondant aux différentes conditions aux limites imposées se situent dans la gamme  $5,9 \cdot 10^9 < Ra_H < 5,9 \cdot 10^{10}$ .

## 2. Dispositif et conditions expérimentales

Le canal est constitué de deux plaques planes parallèles en résine époxy, inclinables par rapport au champ de gravité (Fig.1-a), l'une est chauffée électriquement avec une densité de flux uniforme et imposée. Dans le cas où le canal est incliné, la plaque chaude constitue la paroi supérieure. 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 directement en contact avec l'air. 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  $10\text{cm}$ , si bien que le flux de chaleur vers l'arrière est considéré comme négligeable. L'émissivité des plaques est  $\epsilon = 0,26$ . 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 mêmes caractéristiques. Dans une ambiance isotherme, les différences de température entre les différents thermocouples n'excèdent pas  $\pm 0,1$  K. Une photographie du dispositif expérimental est présentée sur la figure 1-b.

Les expériences ont été conduites en régime stationnaire du point de vue des températures pariétales. Celui-ci est considéré comme atteint dès que la variation maximale, au cours du temps, des écarts entre chaque température pariétale et le milieu extérieur, reste inférieure à l'incertitude de mesure,  $\pm 0.1$  K, sur une période de 100 minutes. La température considérée alors est la valeur moyenne sur cette même période.

Une campagne de visualisation des écoulements a été effectuée avec le canal en position verticale. Les plans laser nécessaires aux visualisations ont une épaisseur de  $2\text{mm}$  et ont été obtenus à partir d'un faisceau laser de  $400\text{mW}$  traversant une lentille cylindrique puis une demi lune en verre. L'ensemencement est assuré par de la fumée d'encens issue d'un diffuseur. Un camescope numérique a permis l'acquisition des images.

Les profils de vitesse ont été mesurés par un vélocimètre laser doppler Dantec de  $400\text{mW}$ . La lentille frontale a une distance focale de  $500\text{mm}$  et est prolongée par un élargisseur de faisceau présentant un rapport de  $1,38$ . Un système de déplacement, piloté par ordinateur, permet de parcourir l'ensemble du canal avec un pas de  $5\mu\text{m}$ . Le local expérimental a alors été entièrement ensemené à l'aide de fumée de spectacle (la taille des particules, de l'ordre du micron convient bien aux mesures).

Les résultats présentés ont été obtenus pour différentes valeurs :

- du rapport d'allongement  $H/b$  : 32 ; 21,3 ; 16 ; 12,8 ; 10,7 (seul l'écartement  $b$  entre les deux parois est modifié ( $b=0,02$  ;  $0,03$  ;  $0,04$  ;  $0,05$  et  $0,06$  m),
- de la densité de flux électrique imposée à la plaque chauffée  $q_e$ :  $10$  ;  $50$  et  $100 \text{ W.m}^{-2}$ .

### 3. Résultats et analyses

#### 3.1. Condition d'apparition de l'écoulement inverse

La campagne de visualisation de l'écoulement d'air dans le canal a permis de mettre en évidence, pour certaines configurations expérimentales, l'existence d'une alimentation partielle du thermosiphon par la section de sortie. Ces résultats sont les premiers obtenus avec l'air comme fluide d'étude. L'existence de cette solution est illustrée sur les instantanés présentés sur la figure 2. Les photographies Fig 2 a) et b), prises à des instants différents, correspondent à la même configuration :  $Ra_H = 5,9 \cdot 10^9$  ,  $H/b=10,7$ . On remarque que la pénétration dans le canal se fait du côté de la paroi froide, l'air ressort du côté chaud. L'observation sur des longues périodes a mis en évidence un caractère instationnaire de ce type d'écoulement, caractérisé par des profondeurs de pénétration variant au cours du temps.

De plus, ces visualisations répétées pour différentes conditions de flux et largeurs de canal ont permis de proposer une zone d'existence des écoulements inverses. La figure 3 fait ressortir, dans le plan ( $Ra_H$  ,  $H/b$ ), les points pour lesquels il a été possible de distinguer un écoulement réentrant par la partie haute du canal (cercles) et les points pour lesquels il est sûr qu'aucun écoulement de retour n'existe (croix). Sont aussi répertoriés certains points pour lesquels il est difficile de conclure. Ces points semblent appartenir à une zone transitoire dans laquelle l'écoulement inverse peut apparaître de manière intermittente. Cette figure montre clairement que l'écoulement inverse n'existe de façon certaine que pour des valeurs de  $H/b \leq 16$  et  $Ra_H \leq 2,97 \cdot 10^{10}$ . De plus, pour un même rapport d'allongement, il existe une valeur seuil de  $Ra_H = 5,9 \cdot 10^{10}$  au delà de laquelle l'écoulement inverse n'apparaît plus. Ces premiers résultats permettent d'entrevoir l'existence d'une zone délimitée dans les plans ( $Ra_H$  ,  $H/b$ ) à l'intérieur de laquelle un écoulement de retour existe.

#### 3.2. Profils de vitesse

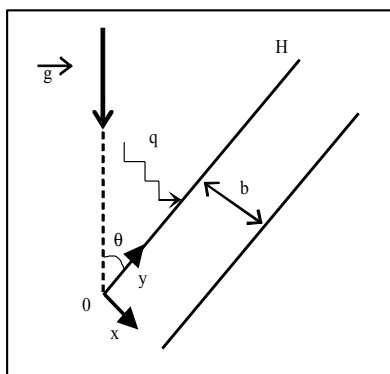
Pour des conditions aux limites identiques ( $Ra_H = 5,9 \cdot 10^9$  ,  $H/b=10,7$ ), deux profils de vitesse ont été mesurés, le premier en  $x/H = 0,078$  (au voisinage de l'entrée) et le second en  $x/H=0,859$  (proche de la sortie). Ces profils de vitesse adimensionnée par la vitesse débitante ( $U_q = 0,043 \text{ m.s}^{-1}$ ) sont présentés sur la figure 4. Au voisinage de l'entrée, le profil de vitesse a une allure parabolique, avec une vitesse maximale de l'ordre de 1,5 fois la vitesse débitante. Proche de la sortie, l'écoulement inverse est clairement mis en évidence, avec des vitesses négatives, du côté de la paroi non chauffée, de l'ordre de la vitesse débitante. Pour assurer la conservation du débit, on observe aussi une nette augmentation de la vitesse de sortie du côté de la paroi chaude, avec des valeurs 3 fois supérieures à la vitesse débitante.

### 4. Conclusion

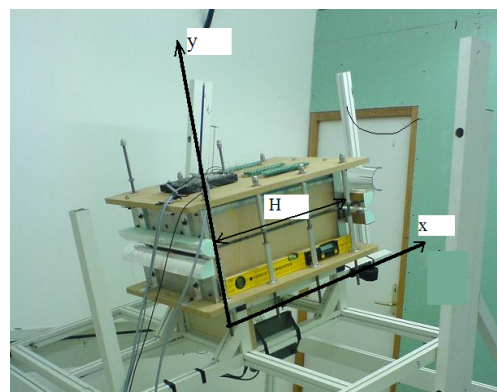
Cette étude a permis de caractériser pour la première fois semble-t-il dans le cas de l'air, différents types d'écoulements au voisinage de la sortie d'un canal plan vertical, chauffé sur une de ses parois avec une densité de flux constante. D'abord, des visualisations par tomographie laser ont mis en évidence l'existence ou non d'un écoulement réentrant du côté de la paroi non chauffée du thermosiphon. Ces écoulements inverses peuvent être regroupés dans la région du plan défini par le nombre de Rayleigh et le rapport de forme. Ces écoulements peuvent être, le plus souvent, de nature instationnaire, du fait de l'évolution dans le temps de la profondeur de pénétration. Des mesures de vitesse par vélocimétrie laser ont aussi permis de quantifier pour des conditions aux limites propices, l'amplitude de ces écoulements de retour qui induisent des vitesses descendantes voisines de la vitesse de débit du thermosiphon et des vitesses sortantes de l'ordre de 3 fois la vitesse débitante. Des mesures complémentaires doivent être entreprises pour mieux caractériser leur domaine d'existence et leurs caractéristiques temporelles. S'agit-il d'une bifurcation régissant le comportement global du thermosiphon vertical ou d'un changement progressif de l'écoulement induisant l'apparition « douce » de cet écoulement de retour ?

### Références

- [1] A-M. Dalbert, F. Penot, J-L. Peube, Convection naturelle laminaire dans un canal vertical chauffé à flux constant. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, vol. 24 (1981), n°9, p.1463-1473.
- [2] B. W. Webb, D. P. Hill, High Rayleigh Number Laminar Natural Convection in an Asymmetrically Heated Vertical Channel, *J. Heat Transfer* 111 (1989) 649-656.
- [3] 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)*.
- [4] F. Dupont, T. Soubdhan, R. Blonbou, J.L. Tuhault, F. Penot, Etude expérimentale de la convection naturelle en canal vertical chauffé à flux constant : Influence de l'angle d'inclinaison. *Congrès français de Thermique, SFT 2007, (Iles des Embiez Juin 2007)* .
- [5] F. Penot, A-M. Dalbert, Convection naturelle mixte et forcée dans un thermosiphon vertical chauffé à flux constant. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, vol. 26, n°11 (1983), p.1639-1648.
- [6] 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, *J. of Heat Transfer*, vol :106 (1984), 325-332,



a)



b)

Figure 1 : Schéma du canal a) et photographie b) du dispositif expérimental

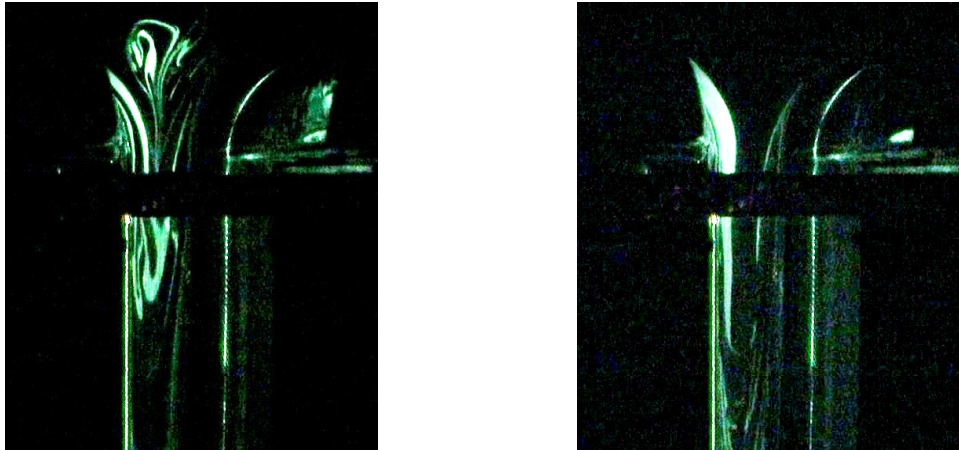


Figure 2 : Visualisations des écoulements inverses en sortie de canal  $Ra_H = 5,9 \cdot 10^9$  et  $H/b = 10,7$

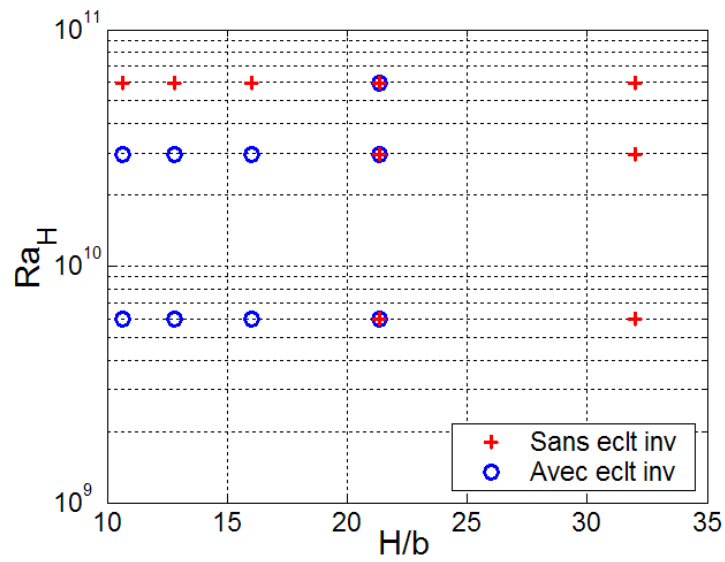


Figure 3 : Existence ou non d'un écoulement inverse dans le plan  $Ra_H(H/b)$

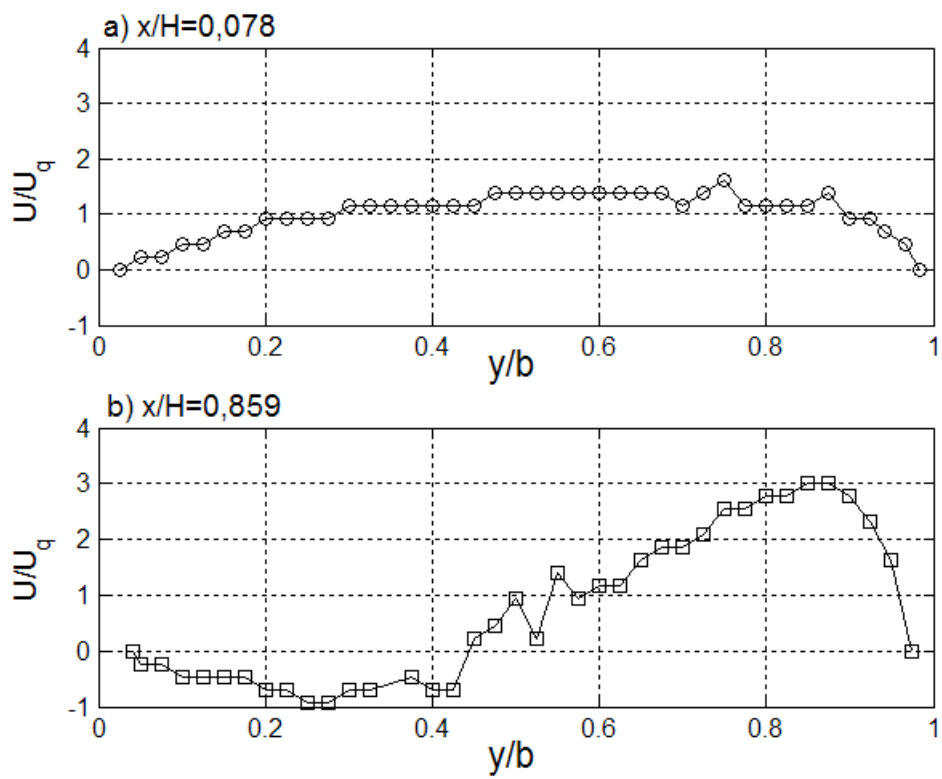


Figure 4 : Profils de vitesse adimensionnée pour  $Ra_H = 5,9 \cdot 10^{10}$  et  $H/b=10,7$  en  $x/H = 0,078$  a) et  $x/H = 0,859$  b)