

# Convection naturelle dans un canal vertical en eau avec chauffage pariétale : influence de la stratification

C. Daverat<sup>a,b</sup>, H. Pabiou<sup>a,b</sup>, H. Bouia<sup>c</sup>, S. Xin<sup>a,b</sup>, C. Ménézo<sup>d</sup>

a. Université de Lyon, CNRS

b. INSA-Lyon, CETHIL, UMR5008, F-69621, Villeurbanne, France

c. Enerbat, EDF R&D, Les Renardières, 77818 Moret sur Loing

d. Chaire INSA-EDF « Habitats et Innovations Énergétiques »

## Résumé :

*Un dispositif expérimental original a été développé afin d'étudier la convection naturelle en canal vertical dans l'eau. Le canal est ouvert en haut et en bas, les parois latérales sont adiabatiques et un flux uniforme et constant est imposé sur les deux grandes parois. Le banc d'essai est équipé d'un système permettant la mesure couplée de vitesse par LDV et de température par microthermocouple. Des profils de vitesse et de température dans le canal sont présentés, et l'influence de la stratification du milieu extérieur est étudiée.*

## Abstract :

*A new experimental set-up is developed to study natural convection flow in a vertical channel. An original approach is taken, using water as the working fluid to avoid radiative heat transfer and obtain a pure convective flow. The channel is opened at the top and the bottom, its two heated plates are kept at uniform heat flux and the two other sides are adiabatic. The coupling between water flow and heat transfer is studied by using a LDV system and a microthermocouple to measure velocity and temperature at the same place. This paper shows velocity and temperature profiles in the channel and deals with the consequences of the water tank stratification on the convective flow.*

**Mots clefs :** Convection naturelle ; Stratification ; Écoulement en canal

## 1 Introduction

Le développement à grande échelle de l'énergie solaire photovoltaïque (PV) passe par l'intégration de surfaces PV aux bâtiments, ce qui nécessite une maîtrise du comportement de ces installations. Or le rendement électrique d'une cellule en silicium cristallin (qui représente la grande majorité du marché) chute en moyenne de 0,5% relativement à sa valeur nominale pour une augmentation d'un degré Celsius. Dans les configurations d'intégration en double-peau, une lame d'air située entre l'enveloppe primaire du bâtiment et la façade PV permet une ventilation par convection naturelle et assure le rafraîchissement des cellules. La compréhension de l'écoulement au sein d'une telle lame d'air qui, pour une intégration en façade, s'apparente à un canal vertical, est donc essentielle à la maîtrise thermique de ce type d'installation.

De nombreux travaux ont porté sur une modélisation du comportement dynamique et thermique de ce type de système pour des applications telles que les séchoirs solaires, les murs Trombe et plus récemment les façades double-peaux ([1], [2]). En ce qui concerne des études au niveau des phénomènes physiques sur des canaux verticaux, les premiers à traiter de ce sujet sont d'une part Elenbaas en 1942 [3] pour un travail expérimental dans un canal d'air avec des parois à température constante, et Bodoia et Osterle [4] d'autre part qui présentent la première étude numérique sur le sujet. En 1972, Hugot [5] est parmi les tous premiers à montrer des mesures de températures et de vitesses dans le canal ; jusqu'à

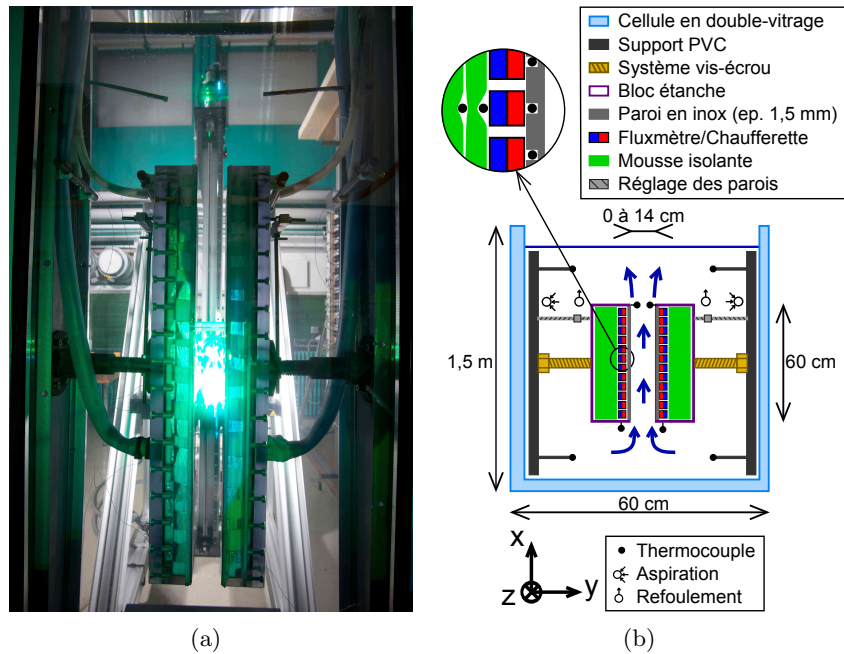


FIGURE 1 – 1(a) : photo du banc d'essai. 1(b) : schéma du canal et disposition des capteurs situés dans le plan de symétrie x-y.

présent seules des mesures de température aux parois étaient réalisées. Il utilise une fourche au bout de laquelle est tendu un thermocouple de  $200 \mu\text{m}$ , et un anémomètre à fil chaud. Il présente ainsi les tout premiers profils de vitesse en régime turbulent. En 1986, Miyamoto et al. [6] réalisent une étude plus poussée de l'écoulement de convection naturelle turbulente en canal vertical grâce à des mesures de vitesse et de température avec un système LDV (Laser Doppler Velocimetry) et un thermocouple de  $25 \mu\text{m}$ . Par la suite, d'autres auteurs ([7], [8], [9]) présentent des profils moyens de vitesse et/ou de température mais aucun ne souligne la forte instationnarité, et de plus, aucune d'entre elles ne parle de l'effet de la stratification ; aucune information n'est donnée sur la stratification éventuelle du milieu extérieur au canal.

Dans cette étude, nous présentons un dispositif expérimental original permettant d'étudier les interactions entre la cinématique et la thermique d'un écoulement de convection naturelle en canal vertical. L'originalité de ce dispositif provient d'une part de l'utilisation de l'eau comme fluide, ce qui permet de supprimer les transferts radiatifs entre parois ; et d'autre part, de l'utilisation d'un système, très proche de celui de Miyamoto et al. [6], de LDV couplé à une perche tenant un thermocouple de  $25 \mu\text{m}$ . La première partie de cet article sera consacrée à la présentation du dispositif expérimental et de son instrumentation ; et la seconde partie présentera des profils couplés vitesse/température ainsi qu'un reflexion sur l'influence de la stratification dans les écoulement de convection naturelle en canal vertical.

## 2 Présentation du dispositif expérimental

Le banc d'essai, présenté sur les figures 1, est un canal vertical de dimensions internes  $65,5 \times 23 \text{ cm}^2$  (selon x et z) et d'écartement variable (de 0 à 14 cm selon y) disposé dans une cellule d'eau de dimensions internes  $150 \times 60 \times 23 \text{ cm}^3$  (x, y et z).

### 2.1 Conception du banc d'essai

Le canal vertical est formé par deux blocs étanches qui contiennent des chaufferettes électriques et est fermé sur les cotés par les parois en double-vitrage de la cellule en eau. Chaque bloc est fixé en son centre, au moyen d'un système vis-écrou (cf. fig. 1(b)), sur une plaque support en PVC plaquée contre un bord de la cellule en eau. Les réglages de la verticalité et du parallélisme du canal sont

assurés par des tiges filetées reliant les coins supérieurs de chaque bloc à leur support (voir fig. 1(b), non présent sur la photo 1(a)). La différence d'écartement entre le haut et le bas est, avec ce système, est inférieure au millimètre. Les parois du canal sont constituées de plaques en acier inoxydable de 1,5 mm d'épaisseur qui sont collées au bloc-paroi pour éviter toute aspérité sur la surface en contact avec l'eau. Afin d'assurer au mieux une condition de flux imposé, chaque paroi est chauffée au moyen de 12 chaufferettes identiques branchées en parallèle de dimension 5x20 cm selon x et z. La conduction de la chaleur dans la paroi entre deux zones chauffées est limitée par 11 rainures de 1x1x210 mm (selon x, y et z) usinées dans la plaque en acier inoxydable dans la face située à l'intérieur des blocs. Enfin, les blocs-parois sont remplis de mousse silicone isolante pour éviter les pertes de chaleur au dos des chaufferettes. Ce dispositif permet d'imposer un flux uniforme et identique sur les deux parois avec moins de 2% d'incertitude.

Les 160 litres d'eau distillée contenue dans la cellule sont maintenus à température constante grâce à un système de régulation. Celui-ci se compose d'une pompe de circulation qui prélève de l'eau directement dans la cellule et la fait circuler dans deux échangeurs coaxiaux à contre-courant avant de la réinjecter. La régulation au niveau des échangeurs est réalisée par un bain thermostaté pouvant extraire jusqu'à 1,6 kW. La figure 1(b) montre la position de l'aspiration et du refoulement qui se font au travers de diffuseurs en PVC afin de minimiser les perturbations et d'assurer une régulation relativement uniforme selon z.

## 2.2 Instrumentation

Le banc d'essai est équipé de 64 capteurs (voir fig. 1(b)) : 24 fluxmètres et 40 thermocouples de 125  $\mu\text{m}$  de diamètre. Un capteur de flux est collé au dos de chaque chaufferette et mesure les pertes de chaleur dans l'isolant des blocs-parois. Les 24 fluxmètres ont été étalonnés sur un banc fabriqué au CETHIL. L'incertitude sur la mesure est de 1,2 % sur le flux de chaleur perdu, soit une incertitude de 0,02 % sur le flux injecté dans le canal. Les 40 thermocouples sont répartis symétriquement par rapport à un plan x-z comme indiqué sur la figure 1(b). Ils ont été étalonnés au laboratoire, et mesurent la température avec une précision de  $\pm 0,05$  °C.

La vitesse dans le canal est mesurée à l'aide d'un système de LDV à deux composantes associé à un système de déplacement permettant de balayer l'écoulement sur toute sa hauteur et sur 25 cm selon y avec une précision de 10  $\mu\text{m}$ . Les particules utilisées pour l'ensemencement de l'écoulement sont des micro-billes de verre argentées de 10  $\mu\text{m}$  de diamètre. La densité de ces particules est de 1,4  $\text{g.cm}^{-3}$  et la vitesse de sédimentation associée est d'environ 30  $\mu\text{m.s}^{-1}$ . Nous pouvons donc conclure que pour des vitesses d'écoulement supérieures ou égales à 0,3  $\text{mm.s}^{-1}$ , la vitesse des particules mesurée correspond bien à la vitesse de notre écoulement. Une perche en laiton, fixée au système de déplacement du laser, permet d'approcher un thermocouple de 25  $\mu\text{m}$  de diamètre à 1 mm au dessus du volume de mesure, donnant ainsi accès à la mesure locale simultanée de vitesse et de température (en deux points relativement proches). Les mesures de vitesse et de température sont faites en même temps mais ne sont pas synchrones car on ne contrôle pas la fréquence d'acquisition de la LDV.

## 3 Résultats

L'objectif de cette première étude est de travailler sur l'influence de la stratification du milieu extérieur sur l'écoulement dans le canal. Les résultats présentés ici ont été obtenus pour un flux pariétal de 190  $\text{W.m}^{-2}$  avec un écartement, mesuré en haut du canal, de 49,5 mm. Le refoulement de l'eau régulée s'effectue en partie haute du canal, et la pièce dans laquelle se trouve le banc d'essai est climatisée à 22 °C. Par conséquent, dès que la température de régulation dépasse celle de la pièce, une stratification thermique se met en place dans la cellule de la même façon que dans un ballon de stockage d'eau chaude sanitaire. Les résultats présentés ici ont été obtenus pour 5 stratifications ( $S_T$ ) différentes : 0/0,4/2/4,6 et 9,1 °C.m<sup>-1</sup>.

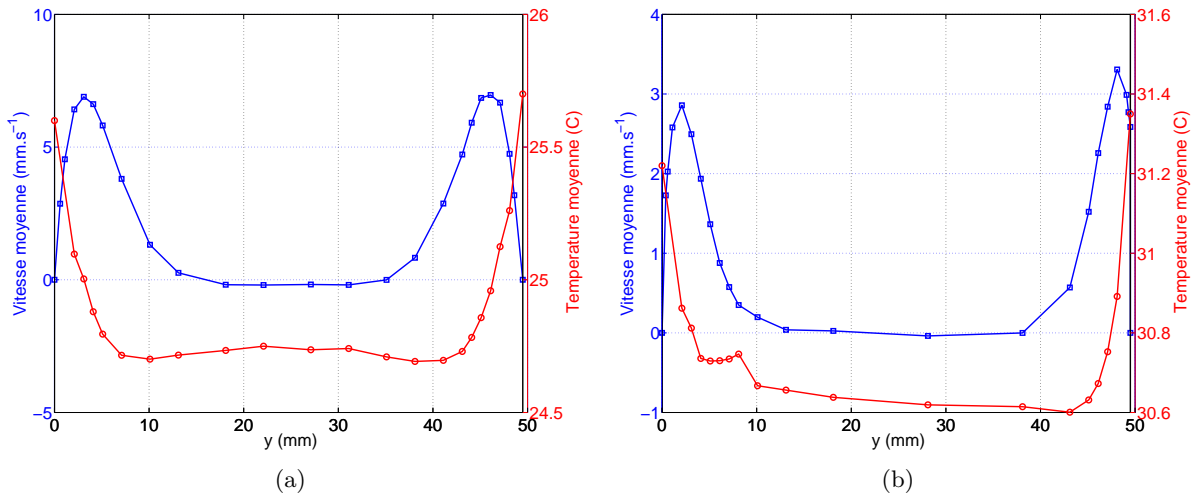


FIGURE 2 – Profils de vitesse (carrés) et de température (ronds) moyennes à la sortie du canal à hauteur du centre de la dernière chaufferette. Les traits noirs verticaux situés à  $x=0$  mm et à  $x=49,5$  mm représentent les parois du canal. La stratification est de  $0,4$   $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$  (a) et de  $4,6$   $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$  (b).

### 3.1 Profils simultanés de vitesse et de température

Des mesures faites avec et sans perche ont montré que l'amplitude des fluctuations est légèrement plus importante avec la perche (+26 % sur la déviation standard), mais que la vitesse moyenne reste inchangée. L'augmentation des fluctuations, qui peut être attribuées aux vibrations transmises dans l'eau par la perche, n'a donc pas d'incidence sur les résultats présentés ici. L'incertitude sur la valeur moyenne de la vitesse dépend principalement de la durée sur laquelle elle est calculée ; pour les profils présentés, nous estimons l'incertitude à 5%.

Des mesures couplées de vitesse et de température obtenues à l'aide du système LDV et de la perche associée sont présentées sur la figure 2 pour deux stratifications différentes :  $0,4$  (fig. 2(a)) et  $4,6$   $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$  (fig. 2(b)). Plusieurs remarques préliminaires sont à faire sur ces profils. Tout d'abord, il y a une incertitude sur la position exacte des parois à cause d'un défaut de parallélisme dans le plan  $x-z$  ; et d'autre part, le système de perche actuel ne permet pas une approche précise à moins de 2 mm des parois. Les températures aux parois ont été rajoutées à partir des mesures faites avec les thermocouples insérés dans celles-ci. Enfin, la cassure du profil de température à  $y=8$  mm (voir fig. 2(b)) est due au fait que le régime établi n'était pas atteint (diminution de quelques dixièmes de degrés par jour), et que la mesure a été faite de  $y=8$  mm à  $y=0$  mm, puis (six heures plus tard) de  $y=8$  mm à  $y=48,6$  mm. Cette évolution lente n'a pas d'influence sur la vitesse car c'est la température de l'ensemble de la cellule qui évolue lentement.

Ces figures montrent tout d'abord que les couches limites thermique et cinématique sont plus développées lorsque la stratification est plus faible ; elles sont plus épaisses et la vitesse maximale est plus grande. De plus, la vitesse est nulle au centre du canal pour une stratification de  $4,6$   $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ , alors qu'une vitesse négative est mesurée (vitesse moyenne de  $-0,2$   $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) à  $0,4$   $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ . À ce stade, nous ne pouvons pas assurer qu'il s'agisse d'un réel écoulement de retour car cela pourrait aussi être attribué à la sédimentation lente des particules d'ensemencement comme cela a été dit au paragraphe 2.2.

### 3.2 Influence de la stratification

Le premier effet constaté de la stratification est l'atténuation des fluctuations observées dans l'écoulement. Ceci a été observé sur la déviation standard des moyennes glissantes, sur des paliers d'une heure, qui est égale à  $0,3$   $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  pour une stratification nulle, et à  $0,1$   $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  pour  $4,6$   $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ .

De plus, la stratification a une grande influence sur le tirage thermique : nous constatons une suppression de l'effet cheminée et une diminution du débit. Ceci est illustré par les figures 3(a) et 3(b) qui présentent respectivement deux profils de vitesse en entrée de canal avec et sans stratification, et

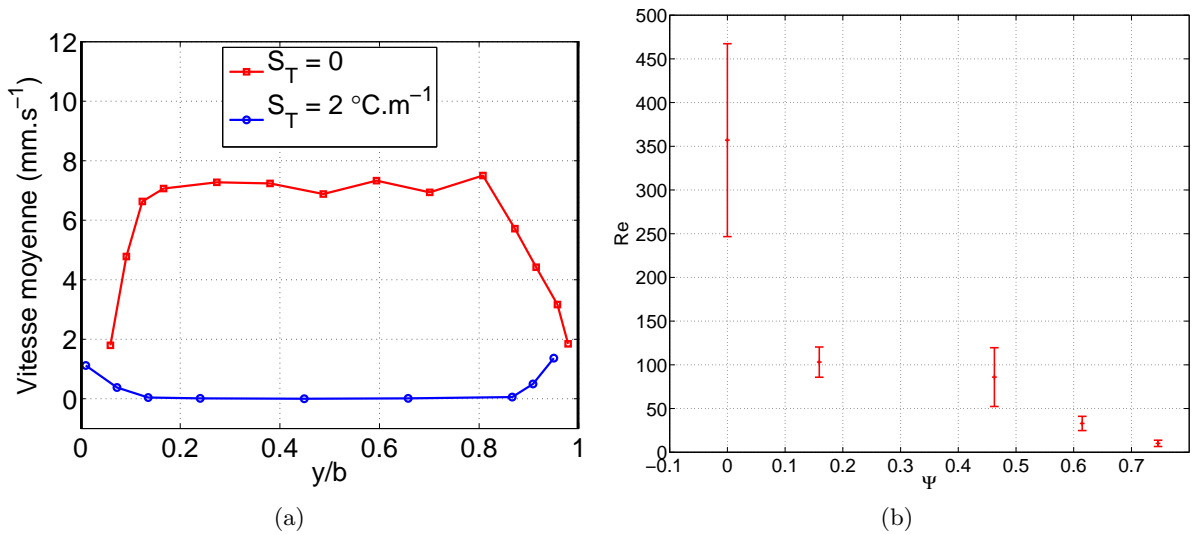


FIGURE 3 – 3(a) : profils de vitesse moyenne en entrée sans stratification (carrés) et sous une stratification de  $2 \text{ °C.m}^{-1}$ . 3(b) : nombre de Reynolds en fonction du nombre adimensionnel de stratification.

la variation du nombre de Reynolds avec un paramètre de stratification. Le nombre de Reynolds est construit sur la vitesse moyenne et la largeur du canal. Le nombre adimensionnel de stratification, quant à lui, est défini par  $\Psi = \frac{S_T H}{\Delta T}$ , où  $S_T$  est le gradient de température extérieure mesurée entre le haut de la cellule et l'entrée du canal,  $\Delta T$  est la différence entre la température mesurée dans la paroi au niveau de la dernière chaufferette et celle mesurée à l'entrée du canal, et  $H$  est la distance entre les thermocouples mesurant  $\Delta T$ . Pour rappel, l'effet cheminée est une aspiration globale dans le canal qui se manifeste par un profil de vitesse plat en entrée. La figure 3(a) montre clairement que cet effet est supprimé pour  $\Psi = 0,46$  et ceci a aussi été observé pour toutes les autres stratifications. La figure 3(b) montre que le nombre de Reynolds diminue quand la stratification augmente. À ce stade, il faut noter que les mesures de vitesse et de température dans le plan de symétrie  $x-z$  ne montrent pas une conservation du débit massique. Ceci peut être attribué à la difficulté de mesure de vitesse en entrée de canal où la vitesse est faible ou à d'éventuels effets tridimensionnels. Ceci étant, la chute de vitesse est telle entre les cas stratifié ou non que l'on peut raisonnablement supposer que la diminution du Reynolds traduit bien une diminution du débit.

Comme le débit diminue et que le flux de chaleur à évacuer est le même, on assiste à une augmentation de la température des parois dans le canal, comme le montrent les figures 4. Ces figures présentent, pour différentes stratifications, l'écart entre la température de paroi et la température d'entrée (fig. 4(a)), ainsi que ce même écart auquel a été retranché le profil linéaire  $S_T x$  (fig. 4(b)). Cette dernière figure montre que la diminution du débit est compensé par une augmentation de la température de paroi pour évacuer la même puissance.

### 3.3 Analyse

La stratification entraîne trois phénomènes : la diminution du débit ; l'augmentation des températures et la suppression de l'effet cheminée. Cette influence n'est pas surprenante dans la mesure où le fait d'avoir un canal qui débouche dans une ambiance plus chaude que l'entrée limite la convection. Ce qui est à noter, c'est plutôt la sensibilité de l'écoulement par rapport à ce paramètre qui a une influence dès  $0,4 \text{ °C.m}^{-1}$  ( $\Psi = 0,15$ ). Or ce paramètre est rarement mentionné dans les études expérimentales. Ceci pose le problème de la réorganisation de l'écoulement pour différentes stratifications. En effet, lorsque l'effet cheminée est supprimé, l'écoulement est moins bien alimenté par l'entrée et des écoulements de retour en sortie de canal de part et d'autre du plan de mesure  $xy$  peuvent se produire. On aurait alors l'existence de cellules de convection en partie haute du canal. Ceci nécessite des études supplémentaires pour d'une part, déterminer le seuil de stratification qui conduit à la suppression de l'effet cheminée et d'autre part caractériser la réorganisation de l'écoulement qui en résulte.

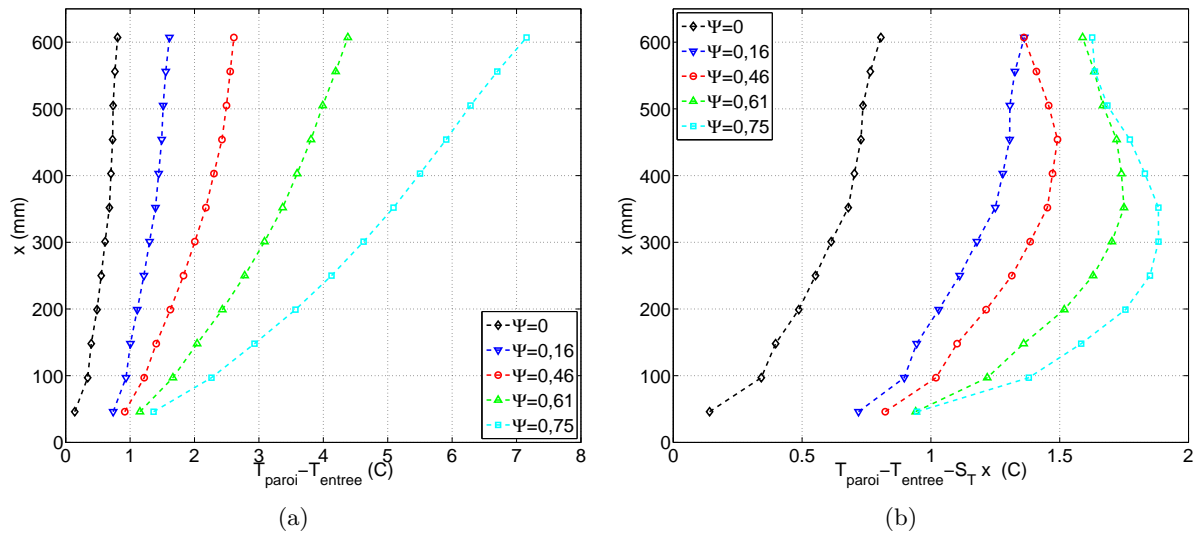


FIGURE 4 – Température moyenne mesurée dans les parois pour 5 configurations de stratification différentes. 4(a) : la température à l’entrée du canal a été retranchée à celle des parois. 4(b) : la température d’entrée et la stratification ( $S_T x$ ) ont été soustraites à la température des parois.

## 4 Conclusions

Cet article présente un dispositif original permettant d’étudier la convection naturelle dans un canal vertical en eau avec des parois chauffées à flux imposé. Un système de mesure de vitesse et de température a été mis en place pour étudier les couplages entre la dynamique et les transferts thermiques dans l’écoulement. Une première étude sur l’impact de la stratification sur l’écoulement a été présentée; celle-ci montre que la stratification limite les fluctuations de l’écoulement et contrôle le tirage thermique. Cependant, d’autres études restent à faire, et notamment caractériser un éventuel développement 3D de l’écoulement.

Ce travail bénéficie du soutien de l’ANR - Projet n° ANR-08-JCJC-0018-01.

## Références

- [1] Gan, G. 1998 A parametric study of trombe walls for passive cooling of buildings. *Energy and Buildings* **27** 37-43
- [2] Sandberg, M., Moshfegh, B. 2002 Buoyancy-induced air flow in photovoltaic facades. Effect of geometry of the air gap and location of solar cell modules. *Building and Environment* **37** 211-218
- [3] Elenbaas, W. 1942 Heat dissipation of parallel plates by free convection. *Physica IX* **1** 1-28
- [4] Bodoia, J. R., Osterle, J. F. 1962 The development of free convection between heated vertical plates. *Journal of Heat Transfer* **84** 40-44
- [5] Hugot, G. 1972 Étude de la convection naturelle entre deux plaques planes, verticales, parallèles et isothermes. *Enthropie* **46** 55-66
- [6] Miyamoto, M., Katoh, Y., Kurima, J., Sasaki, H. 1986 Turbulent free convection heat transfer from vertical parallel plates. *International Heat Transfer Conference* **4** 1593-1598
- [7] Azevedo, L. F. A., Sparrow, E. M. 1986 Natural convection in a vertical channel vented to the ambient through an aperture in the channel wall. *Int. J. Heat Mass Transfer* **29** 819-830
- [8] Auletta, A., Manca, O. 2002 Heat and fluid flow resulting from the chimney effect in a symmetrically heated vertical channel with adiabatic extensions. *Int. J. Thermal Sciences* **41** 1101-1111
- [9] Habib, M. A., Said, S. A. M., Ahmed, S. A., Asghar, A. 2002 Velocity characteristics of turbulent natural convection in symmetrically and asymmetrically heated vertical channels. *Experimental Thermal and Fluid Science* **26** 77-87