

## Sur la thermique et la dynamique de la convection naturelle à grand nombre de Rayleigh dans des cavités différentiellement chauffées.

D. Saury\*, N. Rouger\*, F. Djanna\*, et F. Penot\*

\* Laboratoire d'Études Thermiques (LET),  
ENSMA - Université de Poitiers - UMR CNRS 6608,  
1 Avenue Clément Ader, BP 40109, 86961 Futuroscope Cedex, France.

**Résumé** — Dans le cadre du programme de recherche COCORACOPHA, soutenu par le PIE2 du CNRS, une expérience de convection naturelle a été mise en place pour aider à la connaissance des écoulements et à la maîtrise des transferts thermiques aux grandes valeurs du nombre de Rayleigh, de l'ordre de  $1,2 \cdot 10^{11}$ . Ceci doit se faire pour des écarts de température de l'ordre de la dizaine de degrés pour rester dans le cadre de l'hypothèse du fluide de Boussinesq et des applications aux habitacles (bâtiments ou autres volumes). Il en résulte la réalisation d'une cavité de 3,84 m de hauteur et de  $0,86 \text{ m}^2$  de section droite horizontale. Deux parois verticales en vis-à-vis sont maintenues à température constante grâce à des bains thermostatés, régulés avec précision. Les quatre autres faces sont constituées d'isolant thermique, pouvant être recouvert intérieurement d'un mince film de faible émissivité.

La caractérisation des écoulements de convection naturelle à grand nombre de Rayleigh ( $\approx 10^{11}$ ) est abordée ici. Dans un premier temps, la stratification thermique, dans le cœur notamment, est donnée pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh comprises entre  $0,56 \cdot 10^{11}$  et  $1,2 \cdot 10^{11}$ . A partir de mesures de vitesse par LDV bidimensionnelle, les profils des composantes verticales et horizontales moyennes et fluctuantes de vitesse sont fournis. Une analyse spectrale des composantes de vitesse, permet entre autres, de discuter de la répartition énergétique en différents points de la couche limite montante. Enfin une caractérisation thermique de la couche limite montante est proposée au travers de profils de température réalisés à différentes altitudes ( $0,76 < Z = z/H < 0,95$ ) à l'aide d'un micro-thermocouple. A partir de ces profils de températures, les flux pariétaux locaux moyen sont déduits (Nusselt locaux) en ces diverses altitudes.

### Nomenclature

$g$  accélération de la pesanteur,  $m \cdot s^{-2}$   
 $H$  hauteur de la cavité, longueur de référence,  $m$  ( $H = 3,84 \text{ m}$ )  
 $L$  largeur de la cavité ( $L = 1 \text{ m}$ )  
 $\ell$  profondeur de la cavité ( $\ell = 0,86 \text{ m}$ )  
 $Nu(Z)$  Nombre de Nusselt local (à la cote  $Z$ ),  
$$Nu(Z) = \frac{H}{\Delta T} \left[ \frac{\partial T}{\partial y} \right]_Z = \left[ \frac{\partial T_{adim}}{\partial Y} \right]_Z$$
  
 $Ra_H$  nombre de Rayleigh =  $g\beta\Delta TH^3/(\alpha\nu)$   
 $S$  paramètre de stratification de la cavité  
 $T_{adim}$  température adimensionnée =  $(T - T_m)/\Delta T$   
 $T_c$  température de la paroi chaude,  $^{\circ}C$   
 $T_f$  température de la paroi froide,  $^{\circ}C$

$T_m$  température moyenne =  $\frac{T_c + T_f}{2}$ ,  $^{\circ}C$   
 $y, z$  coordonnées cartésiennes,  $m$   
 $Y, Z$  coordonnées cartésiennes sans dimension

### Lettres grecques :

$\alpha$  diffusivité thermique,  $m^2 \cdot s^{-1}$   
 $\beta$  coefficient de dilatation thermique,  $K^{-1}$   
 $\Delta T$  différence de température entre les parois actives,  $^{\circ}C$   
 $\varepsilon$  émissivité des parois  
 $\lambda$  conductivité thermique,  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$   
 $\nu$  viscosité cinématique,  $m^2 \cdot s^{-1}$

## 1 Introduction

La connaissance des écoulements en convection naturelle turbulente d'air reste un enjeu majeur pour de multiples applications, pourtant peu de travaux sont consacrés à la description des champs dynamiques et thermiques turbulents. Les raisons en sont que la simulation numérique sérieuse est difficile à entreprendre pour des raisons de convergence spatiale des calculs. Les expériences et les simulations en géométries ouvertes (plaques verticales ou cavités ouvertes) sont beaucoup plus difficiles qu'en espaces confinés, c'est pourquoi nous nous limiterons ici à cette dernière géométrie. Des résultats sont bien disponibles depuis longtemps. Certains, bien connus, ne concernent que des cavités de très petite taille ( $[1,2]$ ,  $Ra < 10^7$ ) d'autres des cavités déjà plus réalistes ( $[3-5]$ ,  $Ra \approx 10^9$ ). Au-delà, les calculs sont encore possibles  $[6]$ , mais on peut émettre des doutes sur leur validité. Les

expériences rigoureuses ne dépassent jamais des nombres de Rayleigh de l'ordre de  $10^9$  [7-11], car les domaines à explorer sont vastes à l'échelle du laboratoire.

Dans le cadre du projet CoCoRaCoPHa soutenu par le Programme Interdisciplinaire Énergie 2 du CNRS, il a été décidé d'explorer les écoulements et transferts pour des nombres de Rayleigh 100 fois plus grand, dépassant  $10^{11}$  donc, avec une instrumentation de type laboratoire. Une maquette de grande dimension a été mise en place au Laboratoire d'Études Thermiques de Poitiers. On se propose de présenter ici les premiers résultats de l'exploration dynamique et thermique de cette convection naturelle à grands nombres de Rayleigh. Cette caractérisation expérimentale s'appuie sur des mesures de vitesse LDV et des mesures locales et instantanées de température à l'aide de micro-thermocouples. Des résultats concernent seulement la partie supérieure d'une enceinte de 4 m de hauteur environ, différentiellement chauffée entre 10 et 20 °C sur 2 faces verticales en vis-à-vis. Des résultats originaux obtenus expérimentalement et relatifs à la stratification thermique et aux couches limites dynamiques et thermiques sont exposés ci-dessous.

## 2 Description du dispositif expérimental

Une expérience aux conditions aux limites entièrement contrôlées a été réalisée. Elle comporte un volume d'air sec ( $\%h < 50\%$ ) confiné et différentiellement chauffée de  $3,3\text{ m}^3$  de volume, soit une hauteur  $H = 3,84\text{ m}$  une largeur  $L = 1\text{ m}$  et une profondeur  $\ell = 0,86\text{ m}$ . Ce volume conséquent est limité par deux parois verticales montées en vis à vis dites « parois actives » et qui sont maintenues à des températures uniformes et constantes :  $T_c$  et  $T_f$ . Ces plaques sont en fait des échangeurs de chaleur en duralumin (AU4G de 8 mm en façade,  $\varepsilon = 0,15 \pm 0,03$ ) dans lesquels circule de l'eau glycolée dont la température est contrôlée par des cryothermostats (Régulation à  $\pm 0,02\text{ °C}$ ). Ceci permet d'assurer une température homogène et constante sur toute la surface de la plaque active (à  $\pm 0,1\text{ °C}$ ). Le plancher, le plafond et les deux autres faces verticales de la cavité entourant ce volume d'air sont constituées de panneaux de polystyrène extrudé ( $\lambda \approx 0,035 \pm 0,005\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) de 8 cm d'épaisseur et encastrés entre les parois actives. Leurs faces intérieures sont intégralement recouvertes d'un film polyester aluminisé ultra fin (épaisseur totale  $36\text{ }\mu\text{m}$ ) de basse émissivité ( $\varepsilon = 0,10 \pm 0,05$ ). Leur face extérieure ( $\varepsilon = 0,60 \pm 0,02$ ) suffisamment ventilée est à la température du hall d'essai (contrôlée par une climatisation à  $\pm 0,5\text{ °C}$ ). Une photographie de ce dispositif est présentée sur la figure 1. Des joints de mousse, collés sur les tranches des panneaux isolants, assurent enfin l'étanchéité du volume d'air étudié. Pour parfaire l'isolation thermique, toute la cavité a ensuite été entourée de panneaux de polystyrène extrudé de 3 cm d'épaisseur. La température des parois actives (chaude et froide) est imposée de telle sorte que la température moyenne  $T_m = \frac{1}{2}(T_c + T_f)$  soit égale à la température ambiante. On réalise ainsi un banc test de convection naturelle pour lequel les conditions aux limites thermiques sont de type Dirichlet, donc des températures imposées et parfaitement connues, si l'on considère l'enceinte formée par les parois actives et les faces externes des 4 autres parois.

## 3 Moyens de mesure

Différents capteurs de température ont été utilisés pour explorer ce volume d'air. Tout d'abord, un thermocouple de type K de  $200\text{ }\mu\text{m}$  de diamètre a été utilisé pour sonder les températures dans le cœur du volume sur l'axe vertical central, donnant en particulier la stratification thermique sur toute la hauteur et permettant la validation du montage par le contrôle de la température au centre, très sensible à l'étanchéité et à la centrosymétrie des écoulements (hypothèse de Boussinesq).

Ensuite un micro-thermocouple de fabrication locale, de type K de  $12,7\text{ }\mu\text{m}$  de diamètre, monté sur une canne verticale solidaire d'un système de déplacement motorisé et piloté par ordinateur avec une résolution spatiale de  $0,1\text{ mm}$  a été instrumenté pour réaliser les profils de température. Ce capteur est également utilisé pour les mesures aux voisinages des parois permettant la détermination

des densités de flux locales. Ce thermocouple est branché en opposition avec un thermocouple de référence plongé dans un bain à température connue par l'acquisition de la température d'une sonde PT100 située dans son voisinage immédiat. La tension amplifiée à l'aide d'un amplificateur (FEMTO DLPVA-100-B Series) de gain 1000 (60 dB) est alors mesurée à l'aide d'une carte d'acquisition National Instrument PCI-6128 M Series (résolution de 18 bits). Au final, la température locale et instantanée est obtenue avec une précision de 0,01 °C. Une fente d'environ 1 cm d'épaisseur a été réalisée dans le plafond à 25 cm de la façade pour permettre le passage de la canne support de sonde (en matériau composite creux pour éviter les ponts thermiques) et la réalisation de profils de température dans un plan vertical normal aux 2 parois « actives » situé au quart de la profondeur de la cavité. Des glissières entraînées assurent l'étanchéité de cette fente.

Des mesures LDV 2D ont également été réalisées dans cette cavité. Le système de mesure est composé par deux BSA (Burst Spectrum analyser), de marque Dantec, utilisés en coïncidence. Deux longueurs d'ondes sont utilisées pour les mesures (faisceau vert (514,5 nm) et bleu (488 nm)). Le système optique comporte une lentille convergente de 600 mm de distance focale et une cellule de Bragg (40 MHz). La difficulté des mesures réside dans le fait que les écoulements de convection naturelle qui sont générés uniquement par des gradients faibles de température sont très sensibles aux perturbations. De nombreuses précautions expérimentales doivent donc être prises. Par exemple, pour laisser passer le faisceau laser, une fenêtre de visualisation de dimensions réduites (20 x 30 cm<sup>2</sup>) a été aménagée sur une des parois passive et positionnée devant la zone à investiguer. Cette fenêtre doit induire un défaut d'isolation minimale. Elle se compose d'une double paroi (une vitre de 5 mm d'épaisseur et un film de 500 µm d'épaisseur, côté intérieur, transparent dans le visible et peu émissif dans l'IR,  $\varepsilon < 0,70 \pm 0,05$ ). De même, la fumée injectée doit être « froide » (à la température de l'écoulement) mais également de densité voisine de celle de l'air. Elle est générée à partir d'huile de paraffine sublimée. Sa durée de vie dans l'enceinte est supérieure à 24 h, ce qui traduit une bonne étanchéité de la cavité et permet d'assurer que la fumée suit correctement l'écoulement de très faible vitesse en certains endroits. Afin de pouvoir réaliser les mesures de vitesse en proche paroi, la torche est légèrement tournée d'un angle  $\alpha$  (quelques degrés) dans le plan horizontal. Ceci permet d'accéder aux vitesses pariétales sans fausser la mesure ( $\cos(\alpha) \approx 1$ ). L'écoulement étant principalement montant le long de la paroi chaude et descendant du côté de la paroi froide, on observe une très grande différence d'amplitude des composantes de vitesse : la composante verticale est dominante alors que les composantes de vitesses horizontales sont d'ordre secondaire. Afin d'équilibrer et optimiser le comptage (coïncidence) des BSA, les faisceaux incidents sont positionnés à + 45° et - 45° par rapport à la verticale.

## 4 Résultats.

A des fins exploratoires, différentes grandeurs ont été quantifiées pour caractériser ces écoulements *a priori* si particuliers. Ainsi, sont présentées l'évolution de la température suivant la verticale dans le cœur de la cavité pour en déduire les évolutions de la stratification thermique. Différents profils de vitesse sont aussi présentés pour caractériser les couches limites turbulentes ou non, le long des parois chaudes et froides. Différents profils de température ont pu être effectués en partie haute le long de la paroi chaude, déterminant ainsi des caractéristiques, dont l'épaisseur de la couche limite thermique. Quelques approximations donnant un ordre de grandeur du nombre de Nusselt en sont déduites.

### 4.1 Température dans le cœur de la cavité

On ne présente ici que l'évolution de la température mesurée sur la ligne verticale centrale du volume fluide, obtenue avec toutes les parois recouvertes intérieurement du film mince faiblement émissif ( $\varepsilon = 0,10 \pm 0,05$ , épaisseur 36 µm). Sur la figure 2, on note que le paramètre de stratification

$S (= H/\Delta T \times \partial T/\partial z = \partial T_{\text{adim}}/\partial Z)$  prend des valeurs proches de 0,55 et est pratiquement insensible à l'écart de température imposé (Tab. 1). Cette évolution linéaire est tout à fait semblable à celle qui avait été mise en évidence pour des cavités de taille bien moindre [7, 8, 12].

#### 4.2 Profils de vitesse à $Z = 0,70$ et $Z = 0,85$ et caractérisation de l'écoulement.

Pour se faire une idée des écoulements circulants et en particulier des couches limites le long des parois, différents profils ont été effectués. L'évolution de la projection du vecteur vitesse dans le plan vertical est ainsi donnée figure 3, pour un nombre de Rayleigh  $Ra_H$  de  $1,2 \cdot 10^{11}$  ( $\Delta T = 20$  °C). On peut noter que l'intensité du mouvement est paradoxalement faible : le maximum de vitesse ne dépasse pas 20 cm/s, pour une vitesse de référence de convection de 1,6 m/s. Par ailleurs, on note la présence de couches limites chaudes particulièrement épaisses, elles peuvent atteindre 140 mm à la cote  $Z = 0,70$ , ce qui compense les faibles vitesses pour donner un débit circulant augmentant avec la taille de la cavité. Les couches limites froides sont beaucoup plus minces et les premières approximations sur les débits indiquent l'existence d'effets 3D probables. Des écoulements secondaires importants ont été découverts en bordure de couche limite chaude qui n'ont jamais, semble-t-il, été observés précédemment. Ceux-ci se traduisent par un écoulement descendant créant un fort cisaillement. Leur origine et leur cheminement complet ne sont pas encore connus. Par ailleurs, les valeurs RMS (non détaillées ici) de la composante verticale de vitesse dépassent 30 % de la valeur maximale, les fluctuations de la composante transverse sont elles aussi du même ordre et représentent alors plus de 200% du maximum de la composante horizontale moyenne.

#### 4.3 Profils de température pour différentes altitudes

Seule la partie haute de la paroi chaude a pu être examinée et seuls sont présentés les profils donnant, figure 4, l'évolution de la température adimensionnée à différentes altitudes ( $Z = 0,76$  ;  $Z = 0,80$  ;  $Z = 0,85$  ; et  $Z = 0,90$ ) pour un écart de température entre la paroi chauffée et la paroi refroidie de 20 °C.

Sur cette figure, on note que l'épaisseur de la couche limite thermique est de l'ordre de 4 cm ( $y/H = 0,01$ ). Par ailleurs, on observe un léger infléchissement des profils en bordure des couches limites thermiques (pour  $0,01 < y/H < 0,035$ ), la température  $y$  est plus basse que la température du cœur à la même altitude. Ceci se produit dans les milieux stratifiés avec des couches limites rejetant du fluide. Les particules fluides montant et provenant de la couche limite vont se retrouver dans un environnement plus chaud du fait de la stratification. (La composante horizontale montre que les particules sortent de la couche limite). Plus loin dans le cœur ( $y/H > 0,05$ ), on observe une petite oscillation des profils autour de la ligne horizontale qui est due à la présence d'ondes de très grande période (de l'ordre de 20 s) qui modifie légèrement la valeur moyenne intégrée sur des durées trop courtes, mais sans conséquences sur les résultats. La superposition des profils de température et composante verticale de vitesse, donnée sur la figure 4, à la cote  $Z = 0,85$ , montre que la couche limite thermique est 3 à 5 fois moins épaisse que la couche limite dynamique, ce qui conduit à une estimation d'un nombre de Prandtl turbulent qui atteindrait ces mêmes valeurs. Cette grande différence n'est sûrement pas un effet attribué à la viscosité de l'air. Ce n'est probablement pas dû non plus à l'écoulement inverse de bordure de couche limite qui s'écoule à la température de cœur. Il y a homogénéisation de la température dans la zone externe de la couche limite dynamique du fait du brassage turbulent important.

#### 4.4 Nusselt pariétal : évolution avec l'altitude.

A partir de mesures resserrées en proche paroi pour réaliser les profils de température présentés sur la figure 4, on peut, à partir de la pente des profils à l'origine, déterminer un ordre de grandeur (tableau 2) du nombre de Nusselt,  $Nu(Z)$ . On obtient des valeurs plus élevées comparées aux

résultats connus [13] (de l'ordre de 20 à 50 % plus importantes avec un nombre de Rayleigh de  $1,2 \cdot 10^{11}$  pour  $10^{11}$  pour les simulations). Avec des gradients de température dépassant  $1,5 \text{ °C/mm}$ , il faut faire des mesures en des points très resserrés à la paroi. Une campagne de mesure rigoureuse doit être entreprise pour réduire l'incertitude sur ces valeurs, il n'est pas facile de scanner une sous couche de l'ordre du millimètre d'épaisseur avec une sonde suspendue au bout d'une canne de plus de 2 m de longueur et se déplaçant avec une résolution spatiale de quelques  $\mu\text{m}$ .

## 5 Conclusions

Une expérience de caractérisation des écoulements de convection naturelle dans un volume d'air parallélépipédique de grande taille, confiné par des parois contrôlées en température et différentiellement chauffé a été décrite. Les résultats relatifs à des campagnes exploratoires de mesure de vitesse et de température ont été présentés. Des comportements imprévus sont apparus. L'analyse du champ de vitesse (partiellement réalisée) a permis de mettre en évidence des couches limites dynamiques très épaisses, avec des vitesses beaucoup plus faible que prévu. Des circulations secondaires non négligeables sont apparues, notamment des écoulements inverses en haut de la couche limite chaude. Sur le plan thermique, les couches limites sont 3 fois moins épaisses que les couches dynamiques, avec un effet de stratification bien marqué. Une mesure des flux de chaleur pariétaux locaux, bien que délicate du fait des gradients importants a été possible et il en résulte une estimation du nombre de Nusselt local qui, à notre connaissance, n'avait jamais pu être déterminée pour des valeurs du nombre de Rayleigh dépassant  $10^{11}$ .

## Références

- [1] G. De Vahl Davis, *Laminar natural convection in an enclosed rectangular cavity*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 11, pp 1675—1693 (1968).
- [2] H. Ozoe, H. Sayama, S.W. Churchill, *Natural convection in an inclined rectangular channel at various aspect ratios and angles – experimental measurements*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 18, pp. 1425—1431 (1975)
- [3] P. Le Quéré, *Étude de la transition à l'instationnarité des écoulements de convection naturelle en cavité verticale différentiellement chauffée par méthodes spectrales Chebyshev*, thèse de doctorat ès sciences physiques, Université de Poitiers, 1987.
- [4] S. Xin, *Simulation numérique de convection naturelle turbulente*, Thèse d'Université, Université de Paris VI, 1993.
- [5] S. Xin, P. Le Quéré, *Direct numerical simulation of two dimensional chaotic natural convection in a differentially heated cavity of aspect ratio 4*, J. Fluid Mech. **304**, 87—118, (1995).
- [6] F. X. Trias, M. Soria, A. Oliva, C. D. Pérez-Segarra, *Direct numerical simulations of two- and three-dimensional turbulent natural convection flows in a differentially heated cavity of aspect ratio 4*, Journal of Fluid Mechanics, 586, pp. 259—293 (2007)
- [7] J. Salat et F. Penot. *Approche expérimentale de la convection naturelle en transition turbulente dans une cavité cubique différentiellement chauffée*, VI<sup>e</sup> Colloque Inter-universitaire Franco-québécois Thermiques des Systèmes (26-28 mai 2003, Québec).
- [8] J. Salat. *Contribution à l'étude de la convection naturelle tridimensionnelle en cavité différentiellement chauffée*. Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers (2004).
- [9] Y.S. Tian, T.G. Karayiannis, *Low turbulence natural convection in an air filled square cavity. Part I : the thermal and fluid flow fields*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 43, pp 849—866 (2000)
- [10] F. Ampofo, T.G. Karayiannis, *Experimental benchmark data for turbulent natural convection in an air filled square cavity*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 46 (19) pp. 3551—3572 (2003).
- [11] A.M. Lankhorst, D. Angirasa, C.J. Hoogendoorn, *LDV measurements of buoyancy induced flows in an enclosure at high Rayleigh numbers*. Experimental Thermal and fluid science, 6, pp. 74—79 (1993)
- [12] A. Benkhelifa, *Contribution à l'étude expérimentale des bifurcations de convection naturelle dans une cavité en air différentiellement chauffée : influence de l'inclinaison*. Thèse de l'Université de Poitiers (2006).
- [13] F. X. Trias, "DNS 3D of natural convection in differentially heated cavity at  $Ra = 10^{11}$ ", private communication.

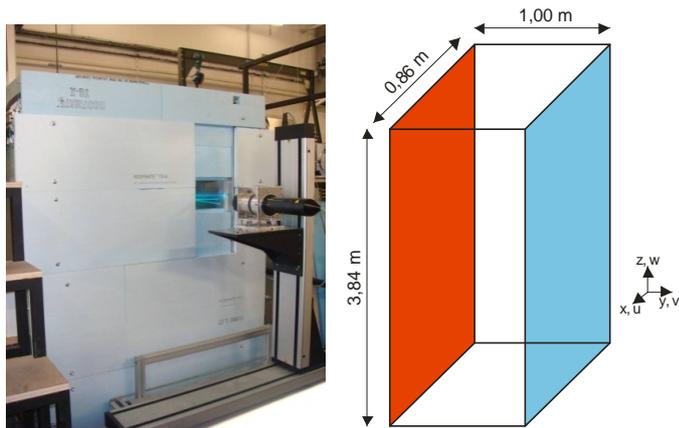


Figure 1 : Vue de la partie haute de la cavité, et schéma de la cavité (dimensions intérieures).

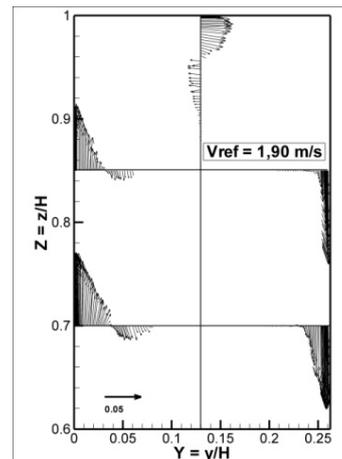


Figure 3 : Champ de vitesse en partie haute de la cavité, projeté dans un plan vertical.

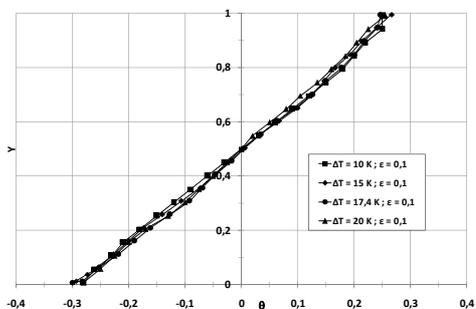


Figure 2 : Stratification thermique obtenue avec des parois de faible émissivité pour différents  $\Delta T$ .

$\Delta T$ (°C)	10,0	14,0	17,4	20,0
$Ra_H$	$5,8 \cdot 10^{10}$	$8,0 \cdot 10^{10}$	$1,0 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{11}$
S	0,59	0,57	0,56	0,54

Tableau 1 : Évolution du paramètre de stratification  $S$  avec l'écart de température (rayonnement des parois ( $0,1 < \epsilon < 0,2$ )).

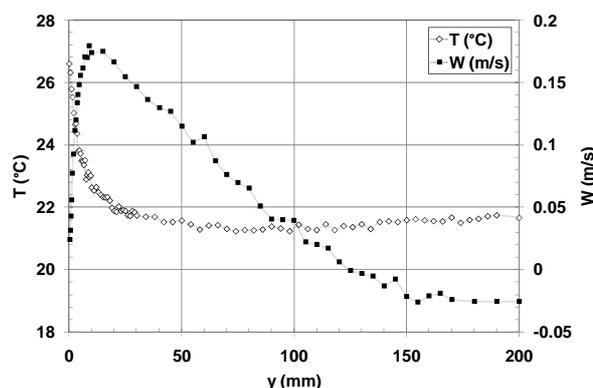
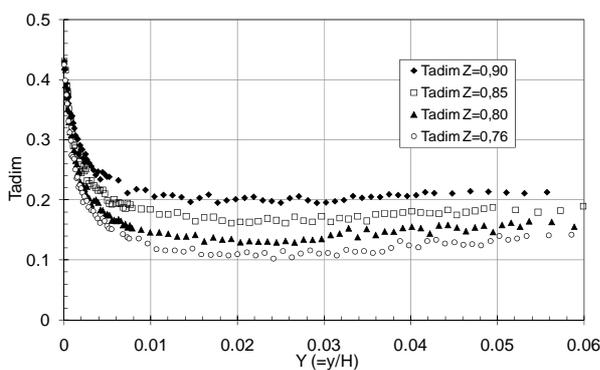


Figure 4 : Profil de température dans la partie haute de la couche limite montante pour diverses altitudes ( $0,76 \leq Z \leq 0,90$ ) pour un écoulement de convection naturelle. ( $Ra = 1,2 \cdot 10^{11}$  ;  $\epsilon = 0,1$  ;  $\Delta T = 20$  K). Evolution de la température et de la composante verticale de la vitesse à l'altitude  $Z = 0,85$  dans la couche limite chaude.

Z	0,76	0,80	0,85	0,90	0,95
Nu(Z)	$200 \pm 60$	$180 \pm 60$	$160 \pm 60$	$145 \pm 60$	$120 \pm 60$

Tableau 2 : Estimations grossières du nombre de Nusselt local dans la partie haute de la couche limite montante pour  $Ra = 1,2 \cdot 10^{11}$  ;  $\epsilon = 0,1$  ;  $\Delta T = 20$  °C.