

Mesures de température et de flux thermique instantané en convection naturelle à grand nombre de Rayleigh en espace confiné.

Didier SAURY^{*,1}, Francis DJANNA¹, François PENOT¹, Patrice JOUBERT²

¹ Institut P² UPR 3346, Département Fluide Thermique Combustion (FTC)
CNRS – Université de Poitiers – ENSMA

1 Avenue C. Ader, BP 40109, 86961 Futuroscope Cedex, France.

² LEPTIAB

Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle Cedex 1, France.

* (auteur correspondant : didier.sauray@ensma.fr)

Résumé – Des premiers résultats de mesures de température et de vitesse dans une cavité à grand nombre de Rayleigh ont été présentés au congrès SFT 2008 montrant qu'en moyenne l'écoulement est bidimensionnel. On présente ici des résultats détaillés de mesures de température dans les couches limites verticales qui permettent de mieux caractériser thermiquement l'écoulement. Les profils de température ainsi que les flux locaux moyens à la paroi (Nusselt) seront présentés pour un nombre de Rayleigh de $1,2 \times 10^{11}$. On évoquera enfin les tentatives de mesure de flux thermique pariétal instantané à l'aide d'un dispositif (thermocouple différentiel) en cours de développement au laboratoire.

Nomenclature

H hauteur de la cavité, longueur de référence, m ($H = 3,84 m$)
 L largeur de la cavité ($L = 1 m$)
 ℓ Profondeur de la cavité ($\ell = 0,86 m$)
 $Nu(Z)$ Nombre de Nusselt local à la cote Z
 Nu_g Nombre de Nusselt global
 Ra_H nombre de Rayleigh = $g\beta\Delta TH^3/(\alpha\nu)$
 S paramètre de stratification de la cavité
 Θ température adimensionnée $(T - T_m)/\Delta T$
 Θ' fluctuations RMS de θ
 t_{aq} durée totale d'acquisition, s
 T_c température de la paroi chaude, $^{\circ}C$
 T_f température de la paroi froide, $^{\circ}C$

T_m température moyenne = $\frac{T_c + T_f}{2}$, $^{\circ}C$

x, y, z coordonnées, m

X, Y, Z coordonnées sans dimension

Lettres grecques :

α diffusivité thermique, $m^2 \cdot s^{-1}$

β coefficient de dilatation thermique, K^{-1}

ΔT écart de température, $(T_c - T_f)$, $^{\circ}C$

ε émissivité des parois

φ_z densité de flux à la cote z , $W \cdot m^{-2}$

λ conductivité thermique, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

ν viscosité cinématique, $m^2 \cdot s^{-1}$

1. Introduction

L'étude des écoulements de convection naturelle en milieu confiné est bien documentée par des études numériques et expérimentales pour des nombres de Rayleigh allant jusqu'à 10^9 ([1-3] par exemple). Depuis quelques années, l'augmentation des capacités de calcul a conduit les numériciens à explorer des nombres de Rayleigh plus élevés et des écoulements turbulents [4-6]. Cependant aucune validation de ces résultats de calcul n'a été pour l'instant réalisée, d'où la nécessité de fournir une base de données expérimentales pour des valeurs du nombre de Rayleigh plus important (10^{10} - 10^{12}). Dans cet objectif, une cavité différentiellement chauffée permettant d'atteindre de tels nombres de Rayleigh en restant dans le cadre de l'approximation de Boussinesq est mise en place [7]. En imposant un écart de température entre les deux parois actives (de l'ordre de $20^{\circ}C$ au maximum, soit $Ra_H = 1,2 \times 10^{11}$, pour rester dans le cadre de l'hypothèse de Boussinesq), il s'établit dans la cavité un écoulement basse vitesse turbulent [8] présentant des caractéristiques thermiques qu'il est nécessaire d'étudier.

On se propose dans ce travail d'analyser dans les détails les couches limites thermiques ainsi que les profils de température dans une cavité différentiellement chauffée à un nombre de Rayleigh de $1,2 \times 10^{11}$. On présente ensuite les flux locaux moyens à la paroi (Nusselt) et les premiers résultats de mesure de flux pariétal instantané obtenue à l'aide d'un micro-fluxmètre (thermocouple différentiel) développé au laboratoire.

2. Dispositif expérimental et métrologie

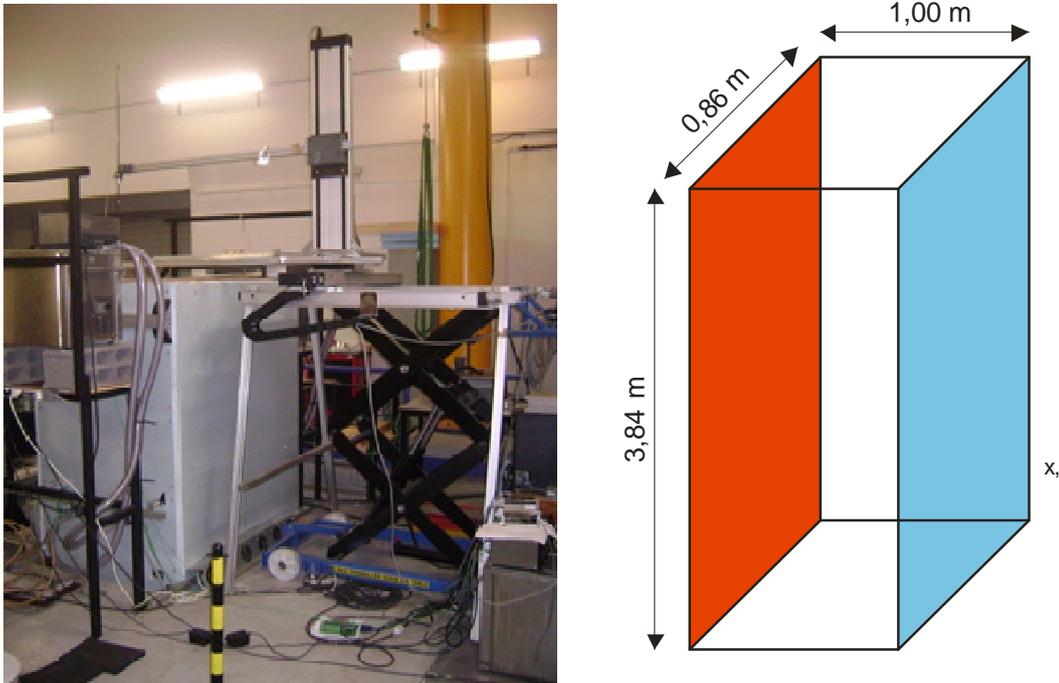


Figure 1 : Vue de la partie haute de la cavité et géométrie de la cavité complète

L'étude a été réalisée dans une cavité différentiellement chauffée de $3,3 \text{ m}^3$ de volume intérieur ($H=3,84 \text{ m}$; $L=1 \text{ m}$; $l=0,86 \text{ m}$), présentée sur la figure 1. Cette cavité est composée de deux parois verticales montées en vis à vis dites « parois actives », maintenues à des températures uniformes et constantes : T_c et T_f . Chacune de ces parois est maintenue en position verticale par des profilés rigides en aluminium. L'arrière de ces plaques est isolé avec des panneaux de styrodur ($\varepsilon = 0,60 \pm 0,02$; $\lambda \approx 0,035 \pm 0,005 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) de 3 cm d'épaisseur. Chaque paroi active est un échangeur de chaleur en duralumin (AU4G, $\varepsilon = 0,15 \pm 0,03$) dans lequel circule de l'eau glycolée dont la température est contrôlée par un cryothermostat à $\pm 0,02 \text{ }^\circ\text{C}$. Ceci permet d'assurer une température homogène et constante sur toute la surface de la plaque active ($\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$). La cavité étudiée se compose donc de ces deux échangeurs, d'un plancher, d'un plafond et de deux faces latérales. Ces quatre dernières parois sont constituées de panneaux de polystyrène extrudé (styrodur®) de 8 cm d'épaisseur encastrés entre les parois actives. Un film aluminium ultra fin ($40 \text{ }\mu\text{m}$) basse émissivité ($\varepsilon = 0,10 \pm 0,05$) a en outre été collé sur les faces internes de la cavité (parois « passives ») afin de minimiser les échanges par rayonnement. Des joints mousses assurent l'étanchéité de la cavité ainsi constituée. Pour parfaire l'isolation thermique, toute la cavité a ensuite été entourée de panneaux de styrodur® de 3 cm d'épaisseur. La température des parois « actives » est imposée de sorte que $\frac{1}{2}(T_c+T_f)$ soit égale à la température ambiante, elle-même contrôlée à $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Ceci permet également de réduire les déperditions avec le milieu extérieur.

Des mesures des températures de contrôle (température des entrée-sortie d'échangeur, d'ambiance, pression atmosphérique, humidité relative) sont réalisées et enregistrées en continu.

Les profils de température sont réalisés à l'aide d'un micro-thermocouple type K de 12,5 μm de diamètre fabriqué *in situ*, monté sur une canne verticale solidaire d'un système de déplacement motorisé et piloté par ordinateur avec une résolution spatiale de 56 μm . Le micro-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 aux bornes du micro-thermocouple est mesurée et enregistrée à l'aide d'un nano-voltmètre AGILENT 34420A. Au final, la température locale et instantanée est obtenue avec une précision de 0,01 °C. Enfin, un micro-fluxmètre a été développé au laboratoire. Il est composé de 2 thermocouples type K de 12,5 μm de diamètre, montés en opposition et espacés de $500 \pm 10 \mu\text{m}$. Il permet de mesurer à chaque instant l'écart de température entre les deux sondes et de remonter au gradient de température instantané.

3. Résultats

Des mesures de température sont effectuées à plusieurs cotes dans la cavité et pour $Ra_H = 1,2 \times 10^{11}$. Une analyse des fluctuations de température dans les couches limites verticales est également réalisée. Ces mesures permettent d'estimer l'évolution du transfert de chaleur pariétal local. Les premières tendances sur le flux de chaleur instantané obtenu sont discutées.

3.1. Mesure de température

Les profils de température moyenne ainsi que des fluctuations correspondantes sont présentés sur la figure 2 pour différentes altitudes Z . On note une décroissance quasi-monotone de la température jusqu'à $Z = 0,4$ quand on s'éloigne de la paroi chaude. Au delà de $Z > 0,4$ la température atteint un minimum puis augmente pour atteindre la valeur de la température de cœur à cette altitude (milieu stratifié). Cette tendance est d'autant plus marquée que Z est grand. Elle est due à un entrainement vers le haut (coté chaud) d'air plus frais provenant les couches inférieures. Cet air plus froid est éjecté vers l'extérieur de la couche limite où il redescend pour rejoindre « son » isotherme (présence d'un écoulement descendant) [8]. L'examen à différentes altitudes dans la cavité montre que les couches limites thermiques sont assez épaisses (de l'ordre de 5 cm) mais environ 3 fois plus minces que celle de la couche limite dynamique [9].

Les fluctuations de température RMS dans la couche limite chaude augmentent lorsqu'on s'éloigne de la paroi pour atteindre une valeur maximale située à environ 8 mm de la paroi quelle que soit la cote. Cette distance à la paroi correspond à l'endroit où la température de l'air atteint approximativement la valeur de la température de cœur à cette même cote. Elle correspond également à la zone où la vitesse est maximale [8]. Au-delà, la température est proche de celle du cœur et les forces de poussée d'Archimède deviennent quasi-nulles. Toutefois du fluide continue de monter par entrainement visqueux générant des fluctuations de la température. Dans la partie haute de la cavité ($Z > 0,4$), du fluide plus frais est éjecté vers le cœur de la cavité et retourne (écoulement descendant) vers « son » isotherme. Cela génère un écoulement fortement cisailé et induit des fluctuations de température sur une zone relativement étendue (15 à 20 cm). Pour la partie basse ($Z < 0,4$), ce phénomène n'est pas observé. L'absence de cet écoulement fortement cisailé se traduit par une zone de fluctuation de température moins étendue ($< 8 \text{ cm}$). On notera que les côtes $Z < 0,3$ (coté chaud), peuvent être obtenues par centrosymétrie de ces écoulements entre les cotés chaud et froid. Ainsi le même raisonnement est applicable au coté froid en considérant $Z' = 1 - Z$.

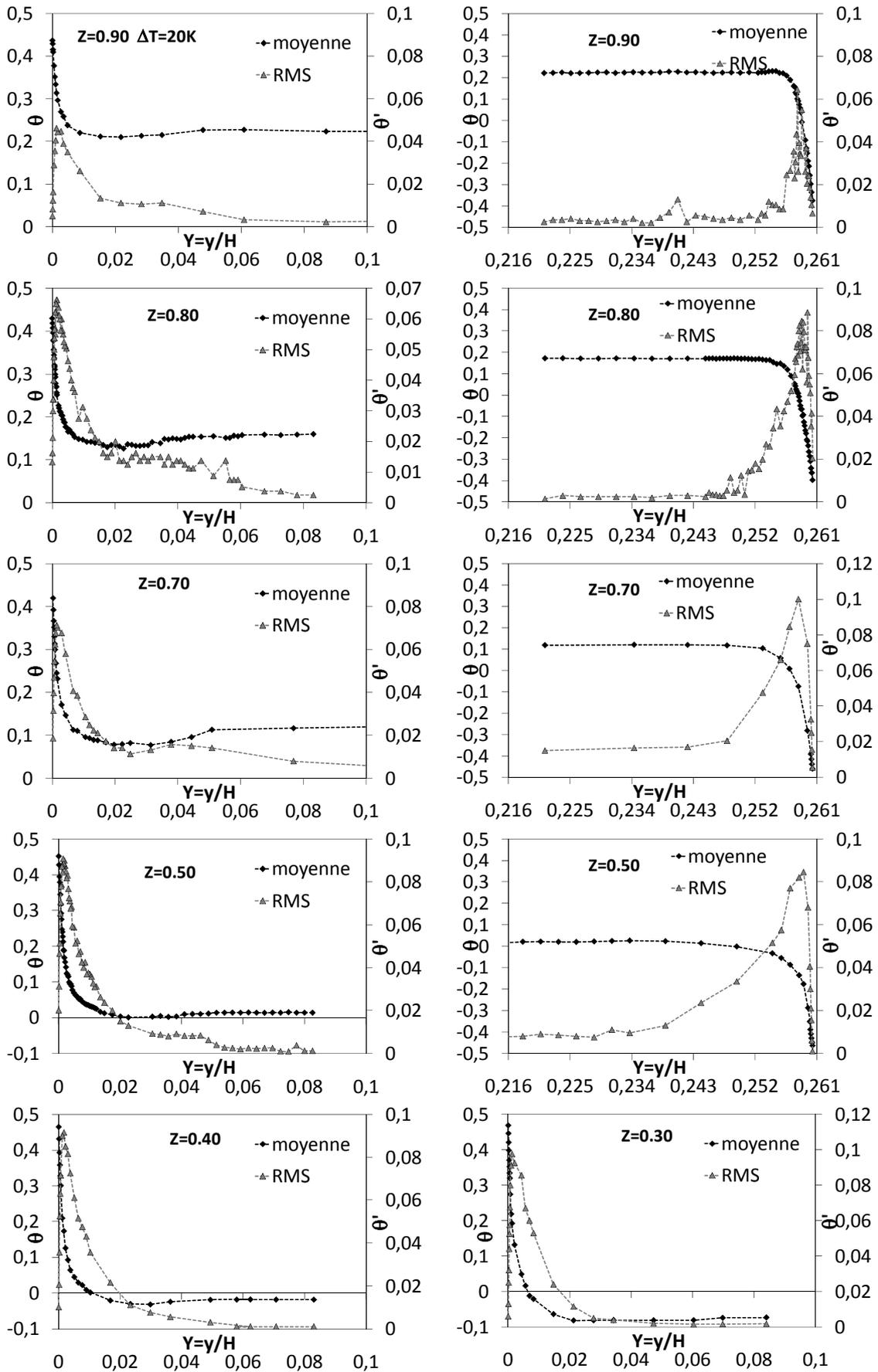


Figure 2 : Profils de température et fluctuations correspondantes dans les couches limites chaude ($0 \leq Y \leq 0,1$) et froide ($0,216 \leq Y \leq 0,261$) pour un nombre de Rayleigh égal à $1,2 \times 10^{11}$.

3.2. Mesure du flux local et instantané.

La mesure du flux pariétal local est généralement obtenue en évaluant la pente à l'origine du profil de température. La difficulté de cette méthode réside dans le fait qu'il faut pour cela scruter le tout dernier millimètre à l'approche d'un mur vertical de 4 m de hauteur, par pas de déplacement de l'ordre de 300 μm d'une sonde fragile et souple montée à l'extrémité d'une canne de plus de 3 m de hauteur, coudée 2 fois. De plus, compte tenu des fluctuations importantes dans la sous couche visqueuse, un grand nombre de points est nécessaire pour obtenir une bonne estimation de la pente moyenne à l'origine. Plusieurs séries de mesures sont alors effectuées pour s'assurer de la reproductibilité de la mesure. Le flux pariétal peut alors s'exprimer par l'intermédiaire du nombre de Nusselt local moyen par :

$$\langle Nu_z \rangle = \frac{H}{\Delta T} \left(\frac{dT}{dy} \right)_p \quad (1)$$

Une deuxième méthode en cours de développement permet d'évaluer le flux instantané. Elle utilise un micro-fluxmètre composé de deux micro-thermocouples de type K de 12,5 μm de diamètre espacés d'une distance $e = 500 \pm 10 \mu\text{m}$ et montés en opposition. On peut ainsi à l'aide de ce capteur évaluer à la différence de température instantanée entre les deux couples et évaluer directement le flux instantané pariétal par :

$$\varphi_z(t) = \lambda \frac{\Delta T(z,t)}{e} \quad (2)$$

Le nombre de Nusselt est ensuite obtenu par :

$$Nu_z(t) = \frac{H}{\Delta T} \frac{\varphi_z(t)}{\lambda} \quad (3)$$

Soit en valeur moyenne :

$$\langle Nu_z \rangle = \frac{1}{t_{aq}} \int_0^{t_{aq}} Nu_z(t) dt \quad (4)$$

La mesure reste cependant très délicate car la différence de tension mesurée est de l'ordre du microvolt et l'approximation (2) n'est valable que si les sondes sont vraiment placées au voisinage de la paroi où la vitesse devient négligeable.

L'évaluation du Nusselt global (Nu_g) sur toute la hauteur s'obtient ensuite comme :

$$Nu_g = \frac{1}{H} \int_0^H Nu_z dz \quad (5)$$

Pour un écart de température de 20 °C, soit $Ra_H = 1,2 \pm 0,05 \times 10^{11}$, on obtient $Nu_g = 231 \pm 10$.

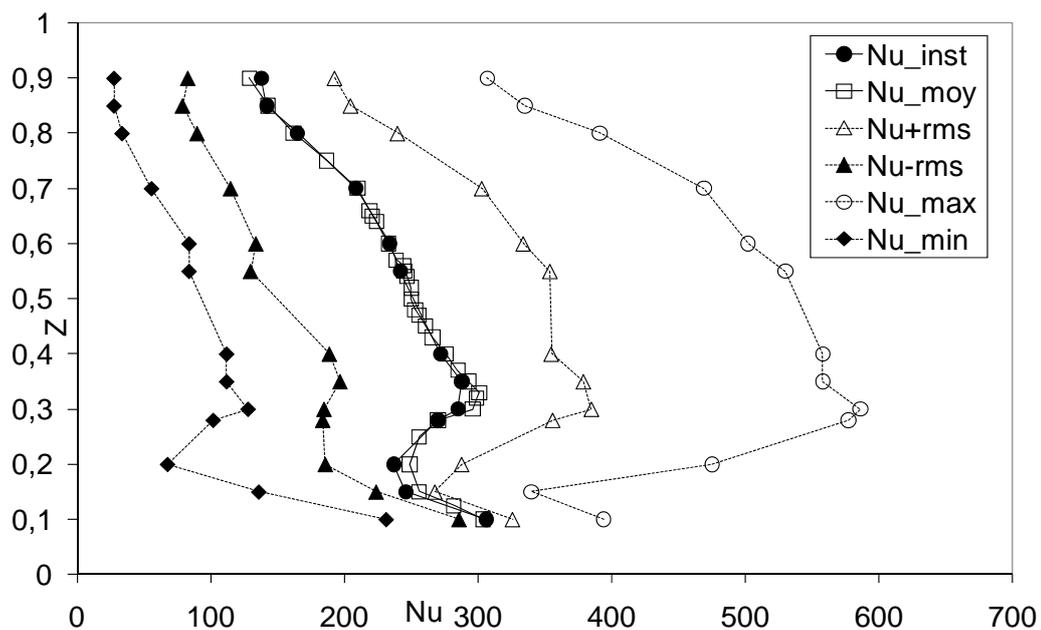


Figure 3 : Evolution du nombre de Nusselt en fonction Z pour $Ra_H = 1,2 \times 10^{11}$.

L'évolution des flux (Nusselt) locaux est présentée sur la figure 3. Ces flux sont obtenus à partir des deux méthodes décrites précédemment (équations 1 et 4). Quelle que soit la méthode de calcul utilisée pour l'évaluation du flux de chaleur local, on retrouve la même allure, ce qui valide la mesure du fluxmètre instantané. Trois zones distinctes apparaissent sur cette figure :

- 1 - $Z \in [0,3 ; 1]$: le flux de chaleur le long de la paroi chaude décroît quand Z augmente,
- 2 - $Z \in [0,2 ; 0,3]$: le flux de chaleur le long de la paroi chaude croît quand Z augmente,
- 3 - $Z \in [0 ; 0,2]$: le flux de chaleur le long de la paroi chaude décroît quand Z augmente.

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ces trois zones. Tout d'abord elles peuvent être dues au cheminement de l'écoulement vers la turbulence (zone laminaire, puis zone de transition et enfin zone turbulente). En effet, $Ra_H = 9 \times 10^8$ à $Z = 0,2$ et $Ra_H = 3 \times 10^9$ à $Z = 0,3$. Une autre explication possible vient de l'étude du champ de vitesse qui montre l'existence de zones de recirculation près du plafond et du plancher dont les hauteurs correspondent à peu près à celles des zones 1 et 3. Ces deux hypothèses sont en cours d'investigation.

Les mesures effectuées à l'aide de notre dispositif permettent également d'obtenir les valeurs minimale et maximale du flux instantané, reportées sur la figure. On note l'écart important entre ces valeurs et les valeurs moyennes du nombre de Nusselt, ce qui se traduit par des fluctuations RMS très importantes atteignant jusqu'à 50% de la valeur du flux moyen mesuré.

4. Conclusion

Dans cette étude on s'est attaché à explorer les couches limites thermiques turbulentes dans une cavité différentiellement chauffée pour un nombre de Rayleigh de $1,2 \times 10^{11}$. Les fluctuations de température sont très importantes dans les couches limites et sont essentiellement localisées dans le dernier centimètre près de la paroi. En convection naturelle les flux sont trop faibles pour être mesurés par des fluxmètres commerciaux et un dispositif permettant la mesure du flux de chaleur pariétal instantané a été développé pour cette étude. Ce micro-fluxmètre a d'ores et déjà montré sa pertinence mais nécessite encore quelques améliorations.

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] S. Mergui et F. Penot. *Analyse des vitesses et température de l'air en convection naturelle dans une cavité différentiellement chauffée à $Ra = 1,69.10^9$* , Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 40, N° 14, pp. 3427-3441, (1991).
- [3] 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).
- [4] J. Salat. *Contribution à l'étude de la convection naturelle tridimensionnelle en cavité différentiellement chauffée*. Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers (2004).
- [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] N. Rouger, *Sensibilité de la convection naturelle en cavité différentiellement chauffée à des variations de paramètres géométriques, thermiques et massiques*. Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers (2009).
- [8] D. Saury, N. Rouger, F. Djanna, F. Penot, *Sur la cavité différentiellement chauffée : étude expérimentale des écoulements de convection naturelle à grand nombre de Rayleigh*. Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois, CIFQ 2009, Poitiers, 18–20 mai 2009, p.51-56.
- [9] D. Saury, N. Rouger, F. Djanna, F. Penot, *Mesure de vitesse, de température et de flux thermique en espace confiné*. Actes Congrès SFT 2009, p. 129-134.