

Mesures de vitesse, de température et de flux thermique en convection naturelle en espace confiné.

Didier Saury*, Nicolas Rouger, Francis Djanna, François Penot

Laboratoire d'Études Thermiques (LET),

ENSMA – Univ. Poitiers - UMR CNRS 6608, 1 Av. C. Ader, BP 40109, 86961 Futuroscope Cedex, France.

* (auteur correspondant : didier.saury@let.ensma.fr)

Résumé – Une expérience de convection naturelle dans une enceinte fermée de grande taille et comportant 2 parois verticales maintenues à des températures imposées constantes, fait l'objet d'une investigation poussée. On présente ici les résultats de campagnes de mesures de vitesse et de température dans une zone particulièrement turbulente (quart supérieur du domaine). Le champ de vitesse est ainsi caractérisé donnant le comportement dynamique de l'air en mouvement avec le développement de couches limites et la formation de zones de recirculations inattendues. Outre les résultats donnant les profils, les difficultés propres aux mesures ponctuelles de température et instantanées de flux thermique pariétal, sont évoquées.

Nomenclature

| | | | |
|-------------------|---|---------------------------|---|
| e | distance entre les 2 thermocouples, m | T_m | température moyenne = $\frac{T_c + T_f}{2}$, °C |
| H | hauteur de la cavité, longueur de référence, m ($H = 3,84 m$) | y, z, Y, Z | coordonnées en m et sans dimension |
| L | largeur de la cavité ($L = 1 m$) | <i>Lettres grecques :</i> | |
| ℓ | profondeur de la cavité ($\ell = 0,86 m$) | α | diffusivité thermique, $m^2 \cdot s^{-1}$ |
| $Nu(Z)$ | Nombre de Nusselt local (à la cote Z) | β | coefficient de dilatation thermique, K^{-1} |
| Ra_H | nombre de Rayleigh = $g\beta\Delta TH^3/(\alpha\nu)$ | ΔT | écart de température, ($T_c - T_f$), °C |
| S | paramètre de stratification de la cavité | ΔT_{jct} | différentiel de température des 2 micro-thermocouples, °C |
| T_{adim} | température sans dimension $(T - T_m)/\Delta T$ | ε | émissivité des parois |
| T_c | température de la paroi chaude, °C | λ | conductivité thermique, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ |
| T_f | température de la paroi froide, °C | ν | viscosité cinématique, $m^2 \cdot s^{-1}$ |

1. Introduction

La convection naturelle dans les cavités différentiellement chauffées constitue un excellent exercice pour l'amélioration des connaissances des écoulements si riches et si particuliers s'y produisant et s'avère un cas de référence difficile pour la validation de codes de calcul. Ce travail s'appuie sur de nombreuses études antérieures tant expérimentales que numériques, notamment Mergui [1,2], Salat [3,4], Lankhorst [5], Tian [6], Ampofo [7], ont étudié expérimentalement des écoulements de convection naturelle faiblement turbulents dans les cavités de petite taille. De nombreuses études numériques ont également été menées avec des cavités de dimension modeste, soit $Ra_H < 10^9$, [8-12]. Au-delà ($Ra_H > 10^{10}$), les calculs sont plus délicats et nécessitent d'énormes moyens en informatique [13]. Actuellement, il existe une base de données fiables pour un nombre de Rayleigh $Ra_H < 10^9$. Cependant pas (ou très peu) de données expérimentales, relatives aux cavités de grande dimension ($Ra_H > 10^{10}$), sont disponibles. Cette étude tente de combler ce vide grâce à l'exploitation d'un dispositif expérimental qui a été réalisé dans le cadre du projet CoCoRaCoPHa soutenu par le PIE2 du CNRS. Il s'agit d'une cavité de 4 m de hauteur et de 1 m² de section droite horizontale. Deux parois verticales sont maintenues à des températures constantes, avec un écart de l'ordre de 10 à 20 °C. Ce dispositif et la métrologie associée sont présentés plus en détails ci-dessous.

Une étude du champ de température et de la stratification thermique dans le cœur au repos de cette cavité a été présentée antérieurement [14]. Une caractérisation dynamique des

couches limites, réalisée par LDV bidimensionnelle, à été entreprise dans la partie haute de la cavité (quart supérieur) [15]. Les vitesses (composantes horizontale et verticale) moyennes, les fluctuations RMS ont été mesurées dans le haut de la couche limite montante (dernier mètre) et de la couche limite descendante (premier mètre). L'analyse spectrale (basée sur les données de LDV) a été aussi discutée. Elle laisse entrevoir la présence d'ondes de gravité entraînant des oscillations du cœur de la cavité à la fréquence de Brünt-Väisälä (soit 0,04 Hz pour une différence de température de 20 °C) [15]. On se focalise ici sur la caractérisation thermique de l'écoulement, en s'appuyant sur des mesures locales et instantanées de température au voisinage des parois actives. On présente les difficultés expérimentales rencontrées et on discute de l'interaction des champs dynamiques et thermiques dans ces écoulements fortement chaotiques.

2. Dispositif expérimental

Le dispositif (fig. 1) est constitué d'une enceinte de 3,3 m³ de volume intérieur. Deux parois verticales montées en vis-à-vis, dites « parois actives », sont des boîtes à eau maintenues à des températures uniformes et constantes T_c et T_f , par une circulation d'eau glycolée contrôlée par un cryothermostat à $\pm 0,02$ °C. Le plancher, le plafond et les deux faces verticales latérales, sont constituées de panneaux de polystyrène extrudé de 8 cm d'épaisseur, encastrés entre les parois actives. Un soin tout particulier a été pris pour imposer des propriétés radiatives des surfaces les plus basses possibles. Ainsi, la face avant des parois actives est en aluminium AU4G, $\varepsilon = 0,15 \pm 0,03$, un film aluminium ultra fin (40 μm) et de basse émissivité ($\varepsilon = 0,10 \pm 0,05$) est collé sur toutes les autres faces internes. Pour parfaire l'isolation thermique, toute la cavité a ensuite été entourée de panneaux de polystyrène de 3 cm d'épaisseur. Les températures des parois chaude et froide sont imposées pour avoir T_m égale à la température ambiante du hall d'essais, elle-même contrôlée à $\pm 0,5$ °C.

3. Métrologie – moyens d'investigation

Des capteurs de la pression atmosphérique, de l'humidité relative ambiante, ainsi que des capteurs des températures aux entrées et sorties des échangeurs, des parois actives et de l'ambiance en 4 points répartis dans le hall, sont acquis en continu par une centrale Agilent 34970A, via une carte 34901A.

Le système de mesure LDV 2D est composé de deux BSA (Burst Spectrum analyser), de marque Dantec, à deux longueurs d'onde (faisceau vert (514,5 nm) et bleu (488 nm)), en coïncidence, sont utilisées pour les mesures. Le système optique en rétrodiffusion comporte une lentille convergente frontale de 600 mm de distance focale et une cellule de Bragg à 40 MHz. Pour minimiser les perturbations, les faisceaux laser traversent une fenêtre de visualisation de taille réduite (20 x 30 cm²), faite d'un double vitrage, avec une paroi interne très mince constitué d'un film polyane (épaisseur 50 μm), monté sur un panneau amovible de la face verticale avant. Les particules proviennent d'une fumée froide générée à partir d'huile de paraffine sublimée. Leur durée de vie dans l'enceinte est supérieure à 24 h. Afin d'équilibrer et optimiser le comptage (coïncidence) des BSA, les faisceaux laser sont orientés à $\pm 45^\circ$ par rapport à la verticale et la torche frontale est légèrement tournée d'un petit angle dans le plan horizontal pour mieux s'approcher des parois.

Si les mesures de vitesse sont non-intrusives, il n'en est pas de même pour les températures. Il faut faire pénétrer un capteur dans le volume à explorer et le déplacer finement. Une canne de support de sonde de plus de 2 m de longueur, coudée suivant 2 angles droits perpendiculaires a ainsi été réalisée. Notons que cette canne, en fibres de carbone, est creuse pour ne pas créer de pont thermique dans les zones stratifiées. Elle traverse le plafond à

travers une fente pratiquée dans l'isolant, entre les parois actives et à proximité de la face verticale avant. Cette fente d'environ 1 cm de largeur est fermée par une glissière coulissante fixée au support de sonde et entraînée par le système de déplacement. Ce dernier est constitué de 3 axes orthogonaux motorisés de déplacement linéaire, chacun d'une course de 1 m, avec un pas de 2,5/400 mm et une garantie mécanique de positionnement de 50 μm par tour. Le réglage des parallélismes et des verticalités des dispositifs nécessite de nombreuses manipulations. A l'extrémité du support, un micro-thermocouple double de type K, de 12,7 μm de diamètre, a été installé. Ces deux thermocouples peuvent être montés en opposition pour avoir accès à une mesure approchée du gradient instantané de température qui, dans la sous-couche visqueuse, donne le flux de chaleur à la paroi, connaissant la distance entre les deux couples (300 \pm 10 μm pour la sonde utilisée). Pour les mesures directes de température, ces thermocouples sont branchés en opposition avec une référence plongée dans un bain à température connue par l'intermédiaire d'une sonde PT100 étalonnée. 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 18 bits National Instrument PCI-6128 M Series. Au final, la température locale et instantanée est obtenue à $\pm 0,025$ $^{\circ}\text{C}$ si les bruits électromagnétiques sont réduits au maximum par des blindages efficaces des couples et si les impédances sont bien adaptées à celles des entrées des amplificateurs ($< 100 \Omega$).

4. Résultats

4.1. Aéraulique dans la partie haute de la cavité

La figure 2 donne un premier aperçu de l'écoulement d'air se produisant dans le quart supérieur de la cavité (qui est la seule zone facilement accessible pour les mesures de vitesse). On observe un écoulement montant de type couche limite le long du mur chaud et la présence sur son bord extérieur d'un écoulement descendant inverse relativement important et qui n'avait pas été observé pour des expériences dans des cavités plus petites. Un courant de recirculation existait bien mais avec une amplitude de mouvement très faible. On note également que l'épaisseur de couche limite dynamique est très importante (environ 12 cm) de même que celle de la zone de recirculation (20 cm). Ceci induit un fort cisaillement au bord de la couche limite. Il pourrait s'agir là de la visualisation d'une forme de turbulence gérée par de très grosses structures (20 à 30 cm de diamètre) en rotation en bordure de couche limite avec une vitesse de phase très faible. La zone de « repos » de cœur de cavité est atteinte seulement à une distance d'environ 30 cm de la paroi chaude soit au tiers de la largeur. Du côté du mur froid, seul un écoulement de couche limite descendant est observé. A 50 cm du plafond, cette couche limite fait déjà presque 8 cm d'épaisseur et elle atteint 12 cm à une distance de 1 m du plafond. Les caractéristiques turbulentes de ces couches limites sont données par Saury *et al.* [15]. L'écoulement horizontal se produisant le long du plafond possède toutes les caractéristiques du jet pariétal. Par ailleurs, sous le jet, un fort courant de retour est observé (il est aussi présent dans des cavités plus petites), une partie du fluide sert à alimenter le jet pariétal dans sa partie amont [4], une partie pourrait servir à alimenter l'écoulement vertical redescendant en bordure de couche limite chaude. Des visualisations (extrêmement difficiles à réaliser) devraient pouvoir trancher la question.

4.2. Profils de température

Seule la partie haute de la paroi chaude a pu être examinée et seuls sont présentés les profils donnant, figure 3, l'évolution de la température adimensionnée à différentes altitudes ($Z = 0,76 ; 0,80 ; 0,85 ; 0,90$ et $0,95$) pour un écart de température caractéristique de 20 $^{\circ}\text{C}$. 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 de vitesse montre que les particules sortent en moyenne 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 volontairement plus courtes et sans conséquence sur les résultats. La superposition des profils de température et de la 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. 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.

4.3. Mesure des flux pariétaux

L'obtention de valeurs fiables du flux pariétal et avec une incertitude relative acceptable ($< 10\%$) est relativement complexe. Les fluxmètres de paroi du commerce ne donnent pas de résultats satisfaisants en convection naturelle car les flux sont faibles. Une méthode d'obtention des flux pariétaux par l'intermédiaire des mesures dans le fluide est préférée. Dans son principe, elle s'appuie sur des mesures différentielles de température dans la sous couche visqueuse pour donner une estimation des termes de l'équation de transport diffusion de la chaleur. Des simplifications permettent d'éliminer les termes négligeables d'ordre 2 ou plus [16]. En convection naturelle, le plus souvent, on ne conserve que le terme de conduction car les vitesses sont faibles et les couches limites épaisses. Le flux pariétal instantané est alors approché par :

$$Nu(Z) = \frac{H}{\Delta T} \left[\frac{\partial T(Z)}{\partial y} \right]_{y=0} \approx \frac{H}{\Delta T} \frac{\Delta T_{jct}(Z)}{e} \quad (1)$$

Dans la présente expérience, un certain nombre de circonstances fâcheuses n'ont pas permis de produire immédiatement des résultats validés concernant cette mesure de gradient de température. On constate, en effet, sur les profils de vitesse, que c'est seulement en très proche paroi (< 1 mm) que celle-ci est négligeable. De même, c'est seulement dans les 2 derniers millimètres au voisinage de la paroi que les profils de température sont linéaires. La réalisation d'une sonde de conception nouvelle a permis d'effectuer des mesures sans erreurs importantes dues à des problèmes d'impédance d'entrée en utilisant un nanovoltmètre AGILENT 34420A ni de déviation des lignes isothermes en utilisant des broches inclinées et de grande longueur (1 cm). Dans ce cas, les profils de température en proche paroi sont bien linéaires (fig. 5). La température tend vers la température de paroi ($9,2$ °C dans le cas présent pour $Z = 0,125$, côté froid). Sur la figure 5 sont également superposées les valeurs minimale et maximale prises par la température au cours de la mesure. Elles donnent une bonne idée des fluctuations de température rencontrées. Logiquement, plus on est proche de la paroi, plus les fluctuations de température diminuent. Une telle approche a permis d'obtenir un bon ordre de grandeur des valeurs du nombre de Nusselt (fig. 6). Une comparaison avec des valeurs de Trias [17] obtenue par DNS est présentée dans la zone investiguée (quart supérieur côté froid).

5. Conclusion

Cette étude expérimentale a permis d'avoir une vision plus approfondie de la convection naturelle turbulente en cavités fermées de grandes tailles. L'analyse des champs de vitesse à la cote $Z=0,85$, soit à 58 cm du plafond, a conduit à l'obtention d'une vitesse maximale voisine de 0,27 m/s dans la couche limite froide et 0,18 m/s dans la couche limite chaude, soit des vitesses du même ordre de grandeur que celles obtenues dans des cavités quatre fois plus petites. De même, il ressort que la couche limite thermique est 3 à 5 fois moins épaisse que la couche limite dynamique qui occupe une largeur dépassant 30 cm du côté chaud, en tenant compte de la zone d'écoulement inversé et 10 cm du côté froid à la même altitude. Toutefois, si la caractérisation dynamique des couches limites a été menée sans trop de difficultés, ce ne fût pas le cas pour les couches limites thermiques. Après avoir surmonté un certains nombres de difficultés de mesure, des valeurs de température et les premières valeurs du nombre de Nusselt ont été obtenues expérimentalement et comparées à des valeurs obtenues en DNS.

Références

- [1] 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).
- [2] S. Mergui. Caractérisation expérimentale des écoulements d'air de convection naturelle et mixte dans une cavité fermée, Thèse Doctorat de l'Université de Poitiers, (1993).
- [3] J. Salat et F. Penot. Approche expérimentale de la convection naturelle en transition turbulente dans une cavité cubique différentiellement chauffée, VIe Colloque Interuniversitaire Franco-québécois Thermiques des Systèmes (26-28 mai 2003, Québec).
- [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] A.M. Lankhorst, D. Angirasa, C.J. Hoogendoorn, *LDV measurements of buoyancy induced flows in an enclosure at high Rayleigh numbers*. *Exp. Thermal and fluid science*, 6, pp. 74—79 (1993).
- [6] Y.S. Tian, T.G. Karayiannis, *Low turbulence natural convection in an air filled square cavity. Part I : the thermal and fluid flow fields*. *IJHMT*, 43, pp 849—866 (2000).
- [7] F. Ampofo, T.G. Karayiannis, *Experimental benchmark data for turbulent natural convection in an air filled square cavity*, *IJHMT*, 46 (19) pp. 3551—3572 (2003).
- [8] G. De Vahl Davis, *Laminar natural convection in an enclosed rectangular cavity*, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 11, pp 1675—1693 (1968).
- [9] H. Ozoe, H. Sayama, S.W. Churchill, *Natural convection in an inclined rectangular channel at various aspect ratios and angles*, *IJHMT*, 18, pp. 1425—1431 (1975).
- [10] 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.
- [11] S. Xin, *Simulation numérique de convection naturelle turbulente*, Thèse d'Université, Université de Paris VI, 1993.
- [12] 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).
- [13] 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)
- [14] F. Djanna, N. Rouger, D. Saury, F. Penot, *Stratification thermique de l'air dans une cavité en convection naturelle à grand nombre de Rayleigh*. Actes Congrès SFT 2008, pp.169-174.
- [15] D. Saury, N. Rouger, F. Djanna, F. Penot, *Caractérisation des écoulements de convection naturelle turbulente à grand nombre de Rayleigh*. CFTL 2008, p. 167 – 174.
- [16] F. Penot, A. De Tilly, J-L. Tuhault, *Instantaneous heat transfer measurements between an unsteady flow and a wall: application to 2D-mixing tee*. IHTC13, paper EXP-08, pp 1–12, 2006.
- [17] F. X. Trias, *DNS en cavité différentiellement chauffée à $Ra = 10^{11}$* , communication privée, 2008

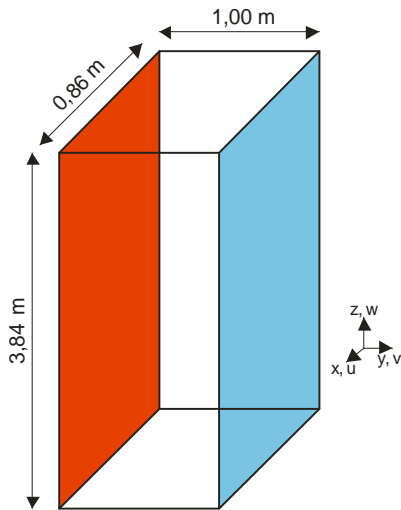


Figure 1 : Schéma de la cavité et zone de mesure

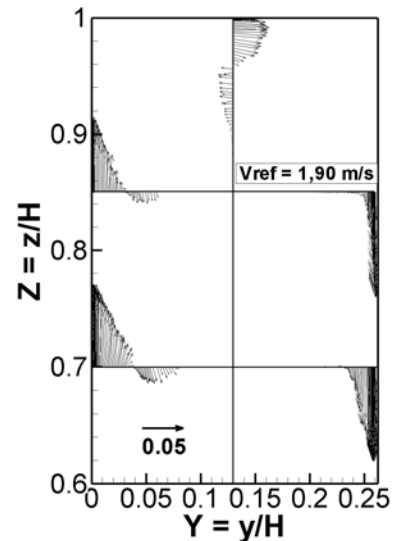


Figure 2 : Champ de vitesse en partie haute de la cavité, projeté dans un plan vertical

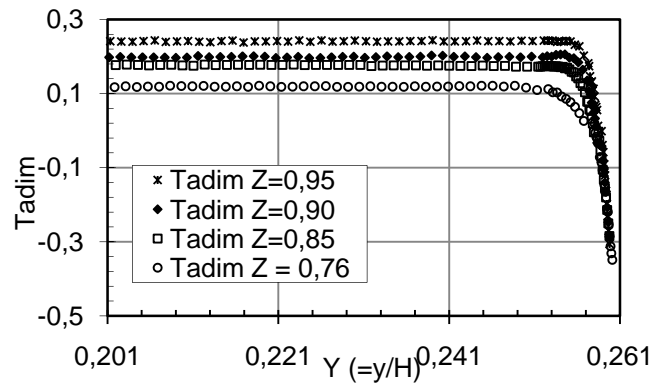
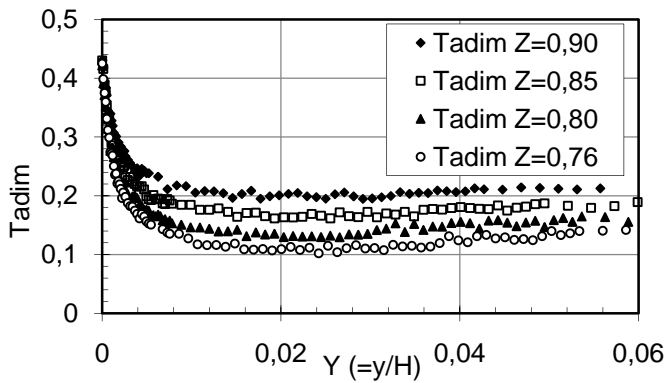


Figure 3 : Profils de température dans la partie haute de la cavité ($Ra = 1,2 \cdot 10^{11}$; $\Delta T = 20$ K).
A gauche : côté chaud, à droite : côté froid.

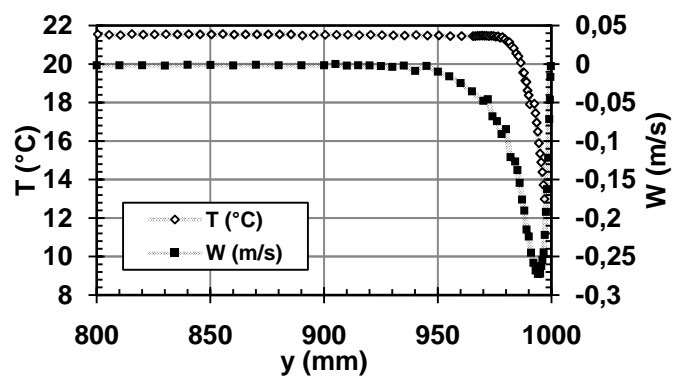
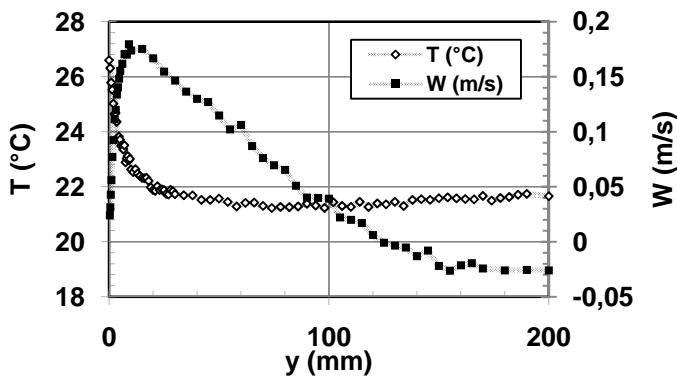


Figure 4 : Évolution de la température et de la composante verticale de la vitesse à l'altitude $Z = 0,85$ dans la couche limite chaude (côté gauche) et froide (côté droit).

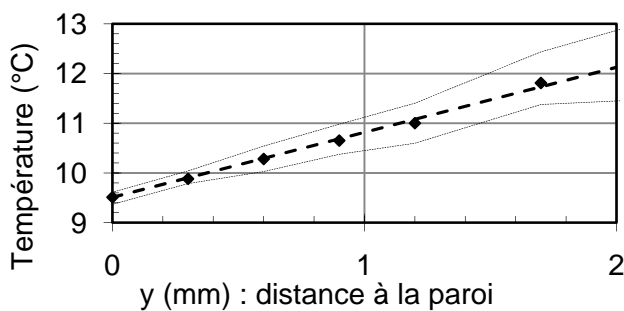


Figure 5 : Méthode de détermination du nombre de Nusselt : distribution de la température à la paroi froide pour $Z = 0,875$

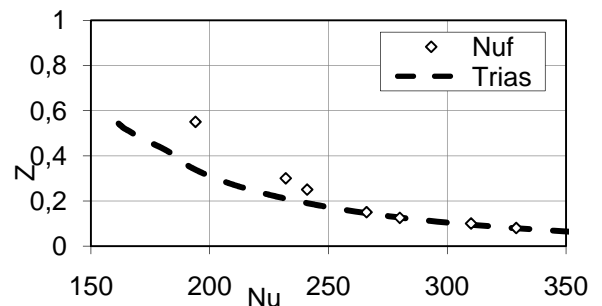


Figure 6 : Comparaison des valeurs du nombre de Nusselt obtenues expérimentalement avec des valeurs obtenues par DNS (Trias).