



HAL
open science

Convection naturelle à grand nombre de Rayleigh dans une couche horizontale de fluide, approche expérimentale

Abdelmadjid Benkhelifa, Catherine Fuentes, Jean-Louis Tuhault, François
Penot

► **To cite this version:**

Abdelmadjid Benkhelifa, Catherine Fuentes, Jean-Louis Tuhault, François Penot. Convection naturelle à grand nombre de Rayleigh dans une couche horizontale de fluide, approche expérimentale. JITH 2007, Aug 2007, Albi, France. 5p. hal-00160334

HAL Id: hal-00160334

<https://hal.science/hal-00160334>

Submitted on 29 Aug 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONVECTION NATURELLE A GRAND NOMBRE DE RAYLEIGH DANS UNE COUCHE HORIZONTALE DE FLUIDE, APPROCHE EXPÉRIMENTALE

Abdelmadjid BENKHELIFA, Catherine FUENTES, Jean-Louis TUHAULT
et François PENOT

LET, UMR 6608 CNRS, ENSMA, Poitiers
francois.penot@let.ensma.fr

Résumé : On présente ici les résultats d'une caractérisation expérimentale, par la tomographie laser et la PIV-2D, de la convection naturelle dans une cavité parallélépipédique remplie d'air et de rapport de forme vertical (longueur/hauteur) égal à 4. Quand le gradient de température est dirigé vers le bas, on observe une solution de conduction pure. En revanche, lorsque ce gradient est orienté vers le haut, la convection de Rayleigh-Bénard fortement turbulente s'installe. Pour des valeurs du nombre de Rayleigh Ra_H comprises entre $1,65 \times 10^6$ et $6,61 \times 10^6$, on constate que les fluctuations de vitesse sont grandes et du même ordre au moins que les vitesses moyennes. Pourtant, en moyenne, une structure très cohérente s'organise autour de trois rouleaux contrarotatifs. Enfin, une investigation dans la troisième direction a permis de quantifier l'énergie cinétique turbulente 3D et les effets tridimensionnels secondaires.

Mots-clés : Convection de Rayleigh-Bénard, turbulence, instabilités, PIV-2D

1. INTRODUCTION

Les écoulements de convection naturelle en espace confiné ont fait l'objet de beaucoup d'investigations justifiées par leur présence et leur implication dans de nombreux phénomènes naturels et processus industriels (le refroidissement des circuits électroniques et des réacteurs nucléaires, la thermique du bâtiment, les systèmes thermiques solaires, etc.). En général, ces écoulements sont caractérisés par la présence d'instabilités hydrodynamiques ou thermiques. Si ces instabilités sont néfastes dans beaucoup de situations, elles peuvent, en revanche, avoir des effets positifs en améliorant les mélanges et les transferts de chaleur et de masse par exemple. Dans le cas d'enceintes fermées possédant deux parois en vis-à-vis différentiellement chauffées et suivant l'orientation de ces parois par rapport au champ de la pesanteur, on peut distinguer trois classes d'écoulement correspondant aux orientations verticales, inclinées et horizontales. Concernant cette dernière catégorie de problèmes, les premières expériences quantitatives remontent au début du XX^{ème} siècle [1, 2]. Depuis lors, beaucoup de travaux ont été menés. Néanmoins, la grande majorité de ces investigations s'est limitée aux études de stabilité pour des valeurs du nombre de Rayleigh de l'ordre de 10^4 [3-6]. Aux grandes valeurs du nombre de Rayleigh, peu des résultats sont disponibles, ce sont principalement des résultats numériques [7-9].

Pour compléter ce manque d'informations, on propose ici de présenter les résultats d'une étude expérimentale visant à caractériser, à l'aide de visualisations par tomographie laser et de la PIV-2D, les écoulements de convection naturelle se produisant dans une couche horizontale d'air, contenue dans une enceinte parallélépipédique. Dans une première partie de l'article, le montage expérimental et la métrologie utilisés sont décrits. Dans une seconde partie, le détail des résultats obtenus, concernant la caractérisation dynamique pour des valeurs du nombre de Rayleigh Ra_H allant de $1,65 \times 10^6$ à $6,61 \times 10^6$ (H : épaisseur de la couche d'air), est discuté.

2. MONTAGE EXPÉRIMENTAL ET MÉTROLOGIE UTILISÉE

2.1. Description

Le dispositif expérimental est détaillé en [10] (voir fig. 1). Il s'agit d'une enceinte de forme parallélépipédique, d'une longueur $L=480$ mm, d'une hauteur $H=120$ mm et d'une profondeur $P=420$ mm, soit un rapport de forme A_v (L/H) de 4. La cavité a été partagée en trois parties identiques suivant sa profondeur par des parois constituées de feuilles de polycarbonate transparentes dans le visible et opaques dans l'infrarouge (Leur conductivité thermique $\lambda \approx 0,20 \pm 0,2$ W m⁻¹ K⁻¹ et leur émissivité $\varepsilon \approx 0,97 \pm 0,05$). Les deux parois horizontales respectivement chaude en bas et froide en haut, sont constituées de deux plaques échangeurs planes en duralumin poli d'épaisseur 5 mm ($\varepsilon \approx 0,25 \pm 0,05$). Par une circulation d'eau depuis deux bains cryothermostatés, ces parois sont maintenues à une température uniforme et constante. Les mesures sont effectuées dans la cavité centrale. Les deux autres cavités dites "de garde" servent à créer des conditions de quasi-adiabaticité par symétrie. Les échanges radiatifs entre parois ne sont pas annihilés. Les parois verticales droite et gauche sont constituées de polystyrène extrudé d'épaisseur 90 mm ($\lambda = 0,03$ W m⁻¹ K⁻¹) inséré entre les deux parois isothermes. Une feuille d'aluminium d'épaisseur 95 μ m ($\varepsilon = 0,08$) a été collée sur leurs faces internes pour minimiser les échanges radiatifs. Les faces externes des isolants sont à la température ambiante maintenue constante et à $T_{\text{réf}}$ ($\approx 24^\circ\text{C}$) égale à la demi-somme des températures des deux parois actives.

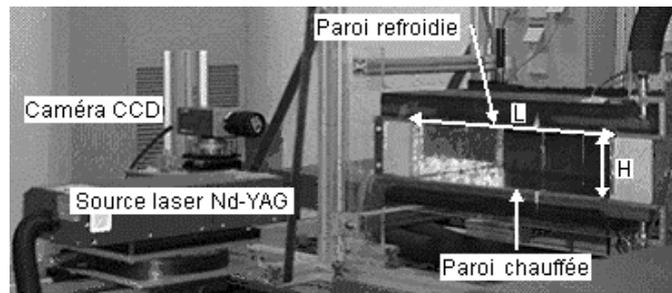


Figure 1 : Cavité expérimentale équipée de la chaîne de PIV.

2.2. Visualisations et mesures de vitesse des écoulements

Pour mieux appréhender les différents phénomènes rencontrés, des visualisations laser ont été réalisées. La fumée de cigarette introduite à faible vitesse et en petite quantité au niveau du plancher est éclairée par un plan lumineux résultant d'une source laser argon continue d'une puissance de 6 Watts. Concernant les mesures des deux composantes du vecteur vitesse instantanée dans un plan de l'écoulement donné, elles ont été réalisées à l'aide de la PIV-2D. Cette chaîne de mesure est constituée d'un laser à impulsions Nd-YAG et d'une caméra CCD **Hamamatsu HiSense** synchronisée avec les impulsions laser permettant de filmer et numériser l'écoulement préalablementensemencé en particules d'huile de glycérine. Pour remonter aux vecteurs vitesse, les images enregistrées sont analysées et traitées mathématiquement à l'aide du logiciel Flowmanager® V 4.3. Trois champs, de dimension 120×160 mm, constitués chacun de 42×63 vecteurs et juxtaposés ont été nécessaires pour visualiser un plan médian transverse complet. Des prises de vue suivant trois plans verticaux perpendiculaires aux parois actives correspondant respectivement au centre de deux rouleaux contrarotatifs et entre deux rouleaux ont aussi été réalisées. Un seul champ constitué de 61×72 vecteurs a suffi pour visualiser l'écoulement suivant chacun de ces plans.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Visualisations

Les figures 2 et 3 illustrent 2 situations extrêmes : sur la figure 2, cavité chauffée par-dessus, les équilibres mécanique et thermique sont réalisés, la fumée injectée par petites

bouffées ne se disperse pas, elle reste parfaitement immobile, donnant cette image figée de laquelle transparaît seulement les difficultés d'ensemencement. Dans le cas du plancher chaud (fig. 3), au contraire, de grosses structures grossissent depuis le plancher et le plafond puis se détachent et diffusent dans la partie centrale de la cavité, les mouvements sont particulièrement chahutés, cependant on arrive à distinguer un mouvement d'ensemble organisé autour de plusieurs cellules. Des mesures par PIV sont nécessaires pour quantifier ces mouvements.

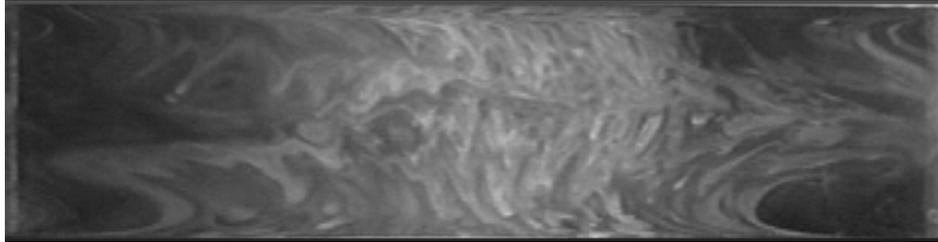


Figure 2 : Image obtenue pour $\Delta T = 20^\circ\text{C}$; cas où la paroi chaude est au-dessus

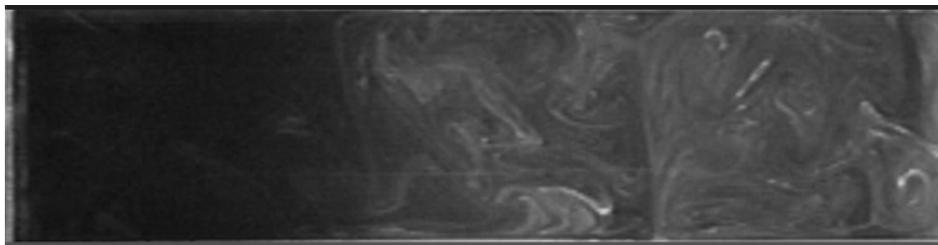


Figure 3 : Images obtenues pour $\Delta T = 8^\circ\text{C}$; cas où la paroi chaude est au-dessous

Il est à noter également que, pour la cavité chauffée par-dessous, les analyses spectrales des fluctuations de température mesurées dans la couche limite chaude, faites auparavant [10, 11], ont montré que les spectres ont une allure chaotique dès un écart de température de 1°C . Dans le cas contraire, il n'existe pas de fréquence émergente ; le régime conductif est solidement installé même à des écarts importants de l'ordre de 42°C .

3.2. Caractérisation dynamique

Des campagnes de mesure de vitesse, par PIV-2D, ont été effectuées dans le plan vertical médian à mi-profondeur de la cavité. L'examen du champ moyen, donné figure 4, montre que l'écoulement est caractérisé par un arrangement sous forme de trois rouleaux contrarotatifs. Cette structure persiste même à des écarts de température de l'ordre de 40°C [10]. On observe également deux petits tourbillons de coin respectivement au niveau du coin en haut à gauche et en bas à droite. Il est intéressant de constater que cette structure organisée fait apparaître trois rouleaux, alors que l'on aurait pu s'attendre à trouver une structure à quatre rouleaux comme il est usuel de trouver. En convection de Rayleigh-Bénard, les rouleaux sont plutôt de forme carrée. Il a été présenté par [7] et [9] que cette structuration pourrait être due à la non adiabaticité des extrémités verticales et l'influence, même faible, du rayonnement de parois. Par ailleurs, une analyse détaillée des résultats montre surtout que la composante verticale U prend de l'ampleur à l'intersection de deux rouleaux et à proximité des extrémités, alors que la composante horizontale W atteint des valeurs non nulles à proximité des parois horizontales, sauf aux bordures des rouleaux qui constituent des zones mortes. Les fluctuations de vitesse U' et W' (non représentées ici faute de place) sont particulièrement grandes dans pratiquement toute la cavité. Pour plus de détails, on pourra consulter [10, 12]. Des pics de valeurs RMS, de l'ordre de 0,17 pour U' avec U_{max} (valeur moyenne) de l'ordre de 0,2 et 0,15 pour W' pour W_{max} de l'ordre de 0,25, ont pu être enregistrés en différents endroits. Des résultats du même ordre ont été obtenus pour des écarts de température de 10°C et 40°C [10].

3.3. Effet 3D

La structure 3D des cellules a également été examinée en réalisant des mesures du champ de vitesse suivant trois plans verticaux à différentes positions Z ($P_1 : Z_1=0,17$, $P_2 : Z_2=0,33$ et $P_3 : Z_3=0,50$). Ces positions correspondent au plan médian d'un rouleau latéral, au plan vertical entre deux rouleaux et au plan médian du rouleau central.

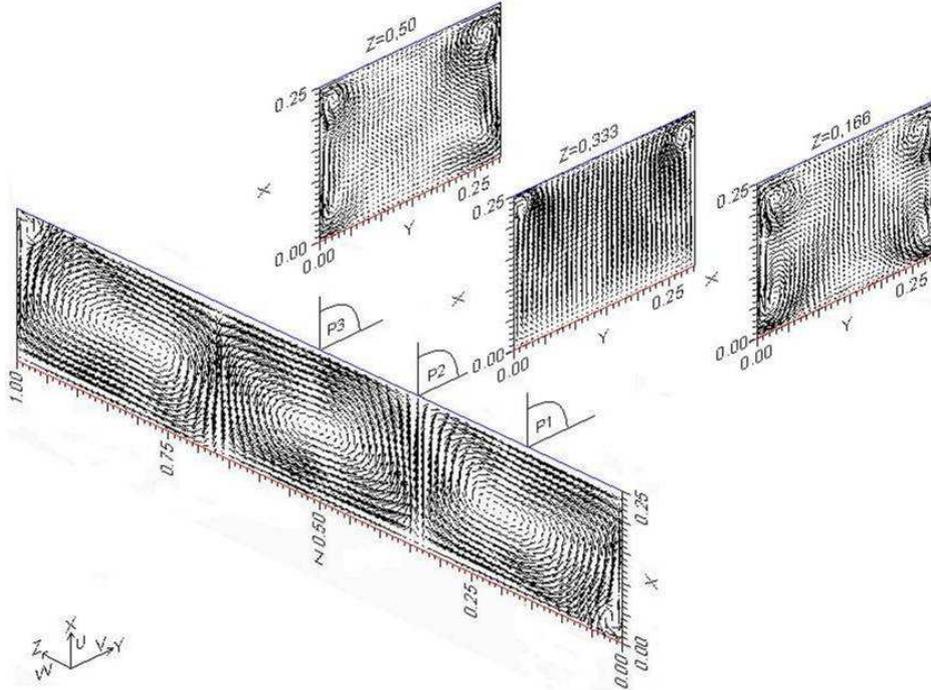
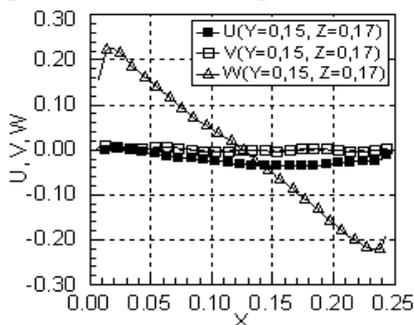
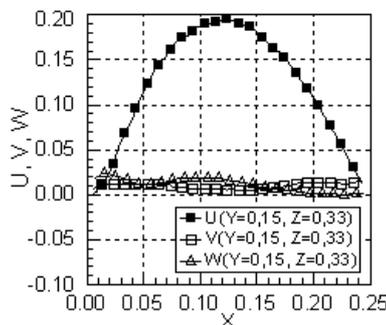


Figure 4 : Champs de vitesse moyenne dans différents plan pour $\Delta T = 20^\circ C$ ($Ra_H = 3,31 \times 10^6$)

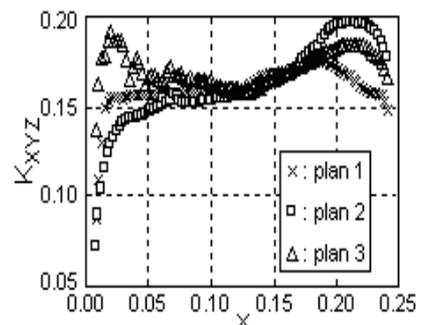
Les valeurs moyennes montrent des recirculations secondaires 3D dans les coins inférieurs et supérieurs au voisinage des parois verticales passives (voir fig. 4). Les échanges radiatifs entre les parois actives et ces parois transparentes dans le visible (mais d'émissivité trop grande, de l'ordre de 0,8, dans l'IR) induisent des petits écarts de température qui génèrent ces structures secondaires [13]. De ces PIV obtenues dans différents plans, il est alors possible d'extraire les profils verticaux du vecteur vitesse complet. L'examen de la figure 5 fait apparaître que, dans l'axe vertical de symétrie d'un rouleau, les vitesses U et V restent nulles, seule la composante W subsiste. Entre deux cellules, c'est U qui reste non nulle. Il n'y a donc pas d'effet 3D marqué.



$P_1, Z_1 = 0,17$



$P_2, Z_2 = 0,33$



$Y = 0,15$

Figure 5 : Évolution des trois composantes de vitesse moyenne en fonction de X à $\Delta T = 20^\circ C$

Figure 6 : Énergie cinétique turbulente k_{xyz} à $\Delta T = 20^\circ C$

L'énergie cinétique turbulente 3D k_{xyz} ($k_{xyz} = \sqrt{u'^2 + v'^2 + w'^2}$) a ainsi pu être mesurée suivant trois axes verticaux (fig. 6) ; ce qui constitue un résultat tout à fait original. Sauf au voisinage des parois, k_{xyz} est pratiquement constante dans les trois plans et prend une valeur voisine de

15% de l'énergie cinétique de convection naturelle V_{CN}^2 (V_{CN} vitesse de convection naturelle : $V_{CN} = \sqrt{g\beta H \Delta T}$). Ces valeurs, comparées à l'énergie cinétique moyenne qui, elle, est de l'ordre de 4%, sont donc très importantes.

4. CONCLUSION

Cette étude expérimentale originale de la convection de Rayleigh-Bénard à grand nombre de Rayleigh révèle que, bien que l'écoulement soit turbulent, une organisation autour de trois rouleaux contrarotatifs persiste en moyenne, même à des écarts de température importants (de l'ordre de 40°C). Les fluctuations de vitesse sont grandes et du même ordre que les vitesses moyennes. Des écoulements secondaires de coin, dus aux imperfections des conditions aux limites thermiques sur les parois non isothermes (rayonnement de parois principalement), ont été également décelés. D'autre part, dans la troisième direction, seules apparaissent des circulations secondaires de coin. Enfin, cette expérience originale a permis d'obtenir une première mesure de l'énergie cinétique turbulente 3D créée en convection de Rayleigh-Bénard turbulente.

Références bibliographiques

- [1] H. Bénard, "Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide," *Rev. Gén. Sci. Pures et appl.*, Vol. 11, pp. 1261-1227, 1309-1328 (1900).
- [2] L. Rayleigh, "On the convective currents in a horizontal layer of fluid when the higher temperature is on the under side," *Phil. Mag.* Vol. 32, pp. 529-546 (1916).
- [3] F. H. Busse, J. A. Whitehead, "Instabilities of convection rolls in a high Prandtl number fluid," *J. Fluid Mech.*, Vol. 47, pp. 305-320 (1971).
- [4] M. Dubois, P. Bergé, "Experimental study of the velocity field in Rayleigh-Bénard convection," *J. Fluid Mech.*, Vol. 85, pp. 641-653 (1978).
- [5] J. Zierp and H. Oertel Jr., "Convective Transport and Instability Phenomena," G. Braun Karlsruhe (1982).
- [6] A. V. GETLING, "Rayleigh-Bénard Convection, Structures and Dynamics," Advanced Series in Nonlinear Dynamics - Vol. 11, World Scientific Editor, (1998).
- [7] R. Kessler, "Nonlinear transition in three dimensional convection," *J. Fluid Mech.* Vol. 174, pp. 357-379 (1987).
- [8] F.B. Lipps, "Numerical simulation of three-dimensional Bénard convection in air," *J. Fluid Mech.*, Vol. 175, part 1, pp. 113-148 (1987).
- [9] A. Sergent, S. Xin, P. Joubert, P. Le Quéré, "Surface radiation effects on turbulent Rayleigh-Bénard convection in a parallelepipedic cavity," in Proceedings *Turbulence Heat and Mass Transf. 5* (Dubrovnik, 2006) pp 531-534H. Hanjalic and al. Editors (2006).
- [10] 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 Doctorat*, Université de Poitiers (2006).
- [11] A. Benkhelifa et F. Penot, "Etude expérimentale des mouvements de convection naturelle dans une cavité différentiellement chauffée inclinée, influence de l'inclinaison," 12^{èmes} Journées Internationales de Thermiques (Tanger, 2005) tome 1, pp. 117-120 (2005).
- [12] A. Benkhelifa et F. Penot, "Caractérisation des écoulements de convection de Rayleigh-Bénard turbulente par PIV," 10^{ème} Congrès Francophone de Techniques Laser (CFTL'2006, Toulouse, 19-22 septembre 2006), actes du congrès, pp. 347-354 (2006).
- [13] J. Salat, S. Xin, P. Joubert, A. Sergent, F. Penot, P. Le Quéré, "Experimental and numerical investigation of turbulent natural convection in a large air-filled cavity," *Experimental J. of Heat and Fluid Flow*, Vol. 25, pp. 824 - 832 (2004).