

Sensibilité de la stratification thermique de l'air à des conditions aux limites radiatives et à des variations géométriques dans une cavité en convection naturelle à haut nombre de Rayleigh

F. Djanna^{1,2*}, N. Rouger², D. Saury², P. Joubert³ et F. Penot²

¹ Département Génie Thermique et Energie, Institut Universitaire et Technologie, 'IUT' Université de Douala, BP 8698 Douala, Cameroun

² Laboratoire d'Etudes Thermiques, Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique UMR CNRS 6608, Av. Clément Ader, B.P. 40109, 86961 Futuroscope Chasseneuil Cedex, France

³ Laboratoire d'Etude des Phénomènes de Transfert Appliqué au Bâtiment, 'LEPTAB' Université de la Rochelle, Avenue Marillac, 17042 La Rochelle, France

(reçu le 20 Juin 2010 – accepté le 26 Septembre 2010)

Résumé - Dans le cadre du programme de recherche COCORACOPHA (COnduction COnvection RAYonnement COndensation Pour l'HABitat), 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 $1,2 \times 10^{11}$. 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. Il en résulte la réalisation d'une cavité remplie d'air ($H = 3,84$ m; $L = 1$ m; $l = 0,86$ m). Deux parois verticales en vis-à-vis différentiellement chauffées 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 stratification thermique, dans le cœur notamment, est comparée à celles déjà obtenues dans des cavités de plus petites tailles et dans des cavités carrées (de rapport de forme vertical égal à 1). L'influence de l'émissivité des parois est examinée et une comparaison est effectuée avec les calculs numériques DNS-3D publiés par [Trias et al., 2010].

Abstract - Within the context of program research COCORACOPHA (COnduction COnvection RAYonnement COndensation Pour l'HABitat), supported by the PIE2 of CNRS, an experiment of natural convection was conducted to contribute for the knowledge of the flows and the control of the heat transfers to the larger Rayleigh numbers close to 1.2×10^{11} . This must be done for the temperature difference around a few of tens degrees in order to stay within the Boussinesq fluid approximation and the applications to the building structures. This led to the realization of one air filled cavity ($H = 3,84$ m; $L = 1$ m; $l = 0,86$ m). Two opposing differentially heated vertical walls are maintained at uniform temperature by the thermostated water chambers, controlled with precision. The four others faces consist of heat insulator, being able to be covered internally with a thin film of low emissivity. The thermal stratification, in the core region, is compared with those already obtained in cavities moreover small size and square cavities (vertical aspect ratio 1). The effect of the surface radiation is examined and a comparison is carried out with numerical calculations DNS-3D published by [Trias et al., 2010].

Mots clés: Convection naturelle turbulente - Cavité différentiellement chauffée - Stratification thermique - Rayonnement de parois - Rapport de forme - Hypothèse de Boussinesq.

* djannaf@yahoo.com

1. INTRODUCTION

Les écoulements de convection naturelle dans les espaces confinés et, en particulier, dans les cavités différentiellement chauffées, continuent de faire l'objet de nombreuses études tant expérimentales que numériques. Mergui [1] et Salat [4] ont étudié expérimentalement les écoulements de convection naturelle faiblement turbulents dans les cavités de petite taille.

Si à ce jour, nous disposons d'une base de données fiables pour caractériser la convection naturelle dans les cavités de petite taille, il n'en est pas de même pour celles de grandes dimensions. On peut, dès lors, comprendre le regain d'intérêt porté ces dernières années par les chercheurs sur l'étude des écoulements d'air dans des configurations de type habitat afin de mieux maîtriser les échanges thermiques et bien prévoir la dynamique des écoulements dans les habitacles. C'est dans cet objectif qu'un dispositif expérimental est développé au Laboratoire d'Etudes Thermiques et permet d'explorer, entre autre, la stratification thermique dans une cavité différentiellement chauffée de grandes dimensions (environ 4 mètres de hauteur) et siège d'écoulements de convection naturelle turbulents.

Depuis quelques décennies, le paramètre de stratification thermique constitue un point de désaccord entre les expérimentateurs et les numériciens qui étudient la convection naturelle en espace confiné. Si expérimentalement, la valeur obtenue se situe autour de 0.5, les calculs qui traitent des configurations idéales (parois passives adiabatiques) prédisent une valeur proche de l'unité. La prise en compte du rayonnement de parois par certains auteurs [6, 7] a modifié de façon notable la stratification thermique.

Nous menons une étude expérimentale dont le but est de déterminer l'influence du rayonnement de parois et des paramètres géométriques sur la stratification thermique dans une cavité à haut nombre de Rayleigh.

2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

L'étude a été réalisée dans une cavité différentiellement chauffée de $3,3 \text{ m}^3$ ($H = 3.84 \text{ m}$; $L = 1 \text{ m}$; $l = 0.86 \text{ m}$). Une photographie de ce dispositif est 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 (Fig. 1).

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 (à $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$). 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 dites passives sont constituées de panneaux de styrodur extrudé de 8 cm d'épaisseur encastrés entre les parois actives.

Un film aluminium ultra fin (feuille de Mylar® de $40 \text{ }\mu\text{m}$ d'épaisseur) 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 mous 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 (chaude et froide) est imposée de telle sorte que la température moyenne $T_m = 1/2(T_c + T_f)$ soit égale à la température ambiante, elle-même contrôlée à ± 0.5 °C. Ceci permet également de réduire les déperditions avec le milieu extérieur.

Les mesures des températures de contrôle (température des entrée-sortie d'échangeur, d'ambiance, etc.) sont réalisées à l'aide de thermocouples de type K de 100 μm de diamètre. Ceci permet d'assurer une bonne adéquation entre la fiabilité des mesures et le temps de réponse du capteur. Ces thermocouples sont reliés à une centrale Agilent 34970A via une carte 34901A. En outre, un contrôle de la pression atmosphérique et de l'humidité relative est réalisé pour chaque série de mesure. Le suivi des conditions ambiantes est donc assuré en permanence.

Pour la stratification au centre de la cavité, les mesures de température sur l'axe vertical de la cavité sont effectuées avec un thermocouple de type K de 25 μm de diamètre fixé sur l'axe vertical médian à l'aide d'un moteur pas-à-pas et d'un système de poulies (Fig. 1).

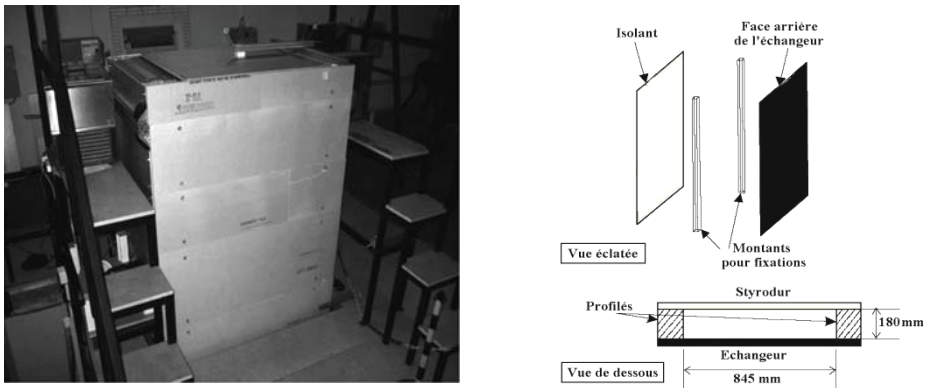


Fig. 1: Vue de la partie haute de la cavité

3. RESULTATS

Des mesures ont été réalisées pour des écarts de température $\Delta T = T_c - T_f$ de 10; 15; 17,4 et 20 K. Ceci correspond respectivement à des valeurs du nombre de Rayleigh de 0.58×10^{11} ; 0.86×10^{11} ; 1.0×10^{11} et 1.2×10^{11} . Dans un premier temps, des mesures sont effectuées avec des faces intérieures latérales et horizontales constituées de polystyrène extrudé sans revêtement de basse émissivité ($\varepsilon = 0.60 \pm 0.02$). Toutes ces surfaces sont ensuite recouvertes de feuilles du film aluminium ($\varepsilon = 0.10 \pm 0.05$; $e = 40$ μm).

Nous avons déterminé pour chaque cas étudié un paramètre de stratification adimensionnel S caractéristique des écoulements en espace confiné et nous avons mis en évidence l'influence du rayonnement de surface et du facteur de forme sur la

stratification thermique. Ce paramètre de stratification traduit l'évolution du gradient vertical sans dimension de température. Il est défini par:

$$S = \frac{H}{\Delta T} \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial \theta}{\partial Y} \tag{1}$$

3.1 Stratification dans la cavité avec rayonnement de parois passives important

Dans ce cas, les parois latérales, le plancher et le plafond sont laissés bruts. Des profils verticaux de température au centre de la cavité ont été obtenus pour plusieurs écarts de température, et donc pour différents nombre de Rayleigh.

Ils sont présentés sur la figure 2 qui donne l'évolution de la température adimensionnée $\theta = (T - T_m) / \Delta T$ en fonction de la hauteur adimensionnée $Y = y / H$. On constate, sur cette figure, que l'évolution de la température sur l'axe vertical de la cavité est relativement linéaire au cœur de la cavité, et on retrouve la tendance centro-symétrique caractéristique de ce type d'écoulement. Cette linéarité disparaît lorsque l'on s'approche du plafond ou du plancher et l'on observe une dispersion des températures. Ceci s'explique en partie par un rayonnement de paroi non négligeable. Ce point sera discuté dans le paragraphe 3.3 ci-dessous.

L'évolution du paramètre de stratification, en fonction de l'écart de température entre les deux parois actives ou en fonction du nombre de Rayleigh, est reportée dans le **Tableau 1**. On note une légère tendance à la diminution de la stratification thermique lorsque le nombre de Rayleigh augmente. En effet, une augmentation de l'écart de température de 100 % a entraîné une diminution de 13 %.

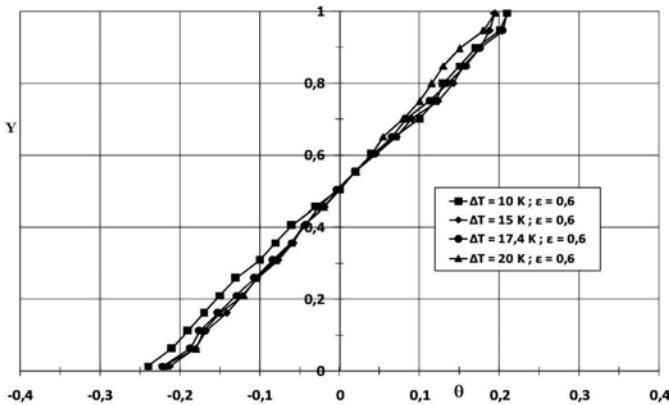


Fig. 2: Stratification thermique avec des parois d'émissivité importante pour différents ΔT

Tableau 1: Evolution du paramètre de stratification en fonction du Rayleigh pour ε = 0.6

ΔT	10.0	15.0	17.4	20
Ra	5.8×10^{10}	8.6×10^{10}	1.0×10^{11}	1.2×10^{11}
S	0.473	0.435	0.444	0.408
ΔS	0.005	0.005	0.003	0.004

3.2. Stratification dans la cavité avec émissivité des parois passives faible

Les parois avant et arrière, le plancher et le plafond sont maintenant recouverts des feuilles d'aluminium de très faible émissivité ($\varepsilon = 0.10 \pm 0.05$) et d'épaisseur $40 \mu\text{m}$. Comme précédemment, des profils verticaux de température ont été obtenus pour plusieurs différences de température, et donc pour différents nombre de Rayleigh. Ils sont présentés sur la figure 3.

On constate, sur cette figure, que comme dans la configuration précédente et quel que soit l'écart de température entre les parois actives, l'évolution de la température reste linéaire au cœur de la cavité.

On remarque que, d'après la figure 3, avec des parois peu émissives ($\varepsilon = 0.10$), comme avec des parois assez émissives ($\varepsilon = 0.6$), les écarts entre les courbes sont faibles, mais une très légère tendance est à noter. En effet, la pente semble diminuer (mais cette fois bien moins) quand l'écart de température augmente. Cette constatation est confirmée par le **Tableau 2**. Une augmentation de l'écart de température de 100 % induit une diminution de la stratification de 8 %.

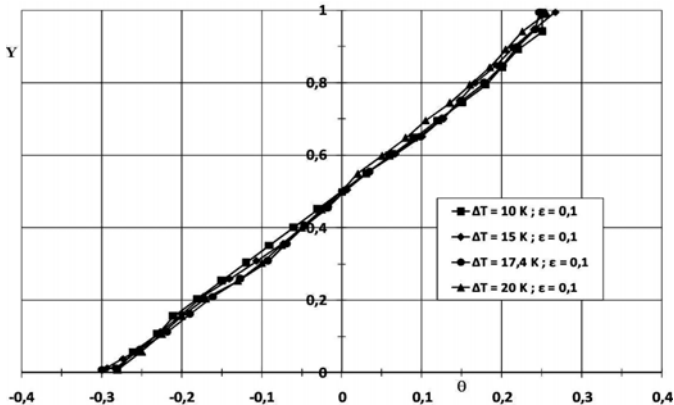


Fig. 3: Stratification thermique avec des parois de faible émissivité importante pour différents ΔT

Tableau 2: Evolution du paramètre de stratification en fonction du Rayleigh pour $\varepsilon = 0.10$

ΔT	10.0	15.0	17.4	20
Ra	5.8×10^{10}	8.6×10^{10}	1.0×10^{11}	1.2×10^{11}
S	0.590	0.569	0.566	0.542
ΔS	0.004	0.007	0.006	0.005

3.3 Influence du rayonnement des parois "passives" sur la stratification thermique

Afin d'étudier l'influence des parois 'passives' sur la stratification thermique, les profils verticaux de température mesurée dans le cas où les parois passives ont une émissivité faible ($\varepsilon = 0.10$) et dans le cas où elles ont une émissivité importante ($\varepsilon = 0.6$) sont comparés un à un sur la figure 4. On peut remarquer que, dans tous les cas, l'augmentation de l'émissivité fait baisser le paramètre de stratification. En effet, le

rayonnement de surface a tendance à intensifier les écoulements secondaires en-dehors des couches limites. Ces écoulements secondaires entraînent donc un mélange plus important du fluide dans le cœur de la cavité et donc, une meilleure homogénéisation de la température.

Par conséquent, plus le rayonnement surfacique est important, plus les écarts de température dans le cœur de la cavité sont faibles et donc, le paramètre de stratification (qui n'est autre que le gradient vertical de température adimensionné) diminue.

Le paramètre de stratification passe de 0,57 en moyenne dans le cas où le rayonnement des parois passives est faible ($\varepsilon = 0.10 \pm 0.05$) à 0,44 lorsque ce rayonnement devient plus important ($\varepsilon = 0.60 \pm 0.02$), soit une diminution d'environ 22 %.

Ces résultats sont à rapprocher de ceux obtenus par Salat [4] qui présente une diminution de l'ordre de 30 % lorsque l'émissivité passe de 0,10 à 0,95 (S passe de 0,72 \Rightarrow 0,54) avec un rapport de forme horizontal proche du cas étudié ici.

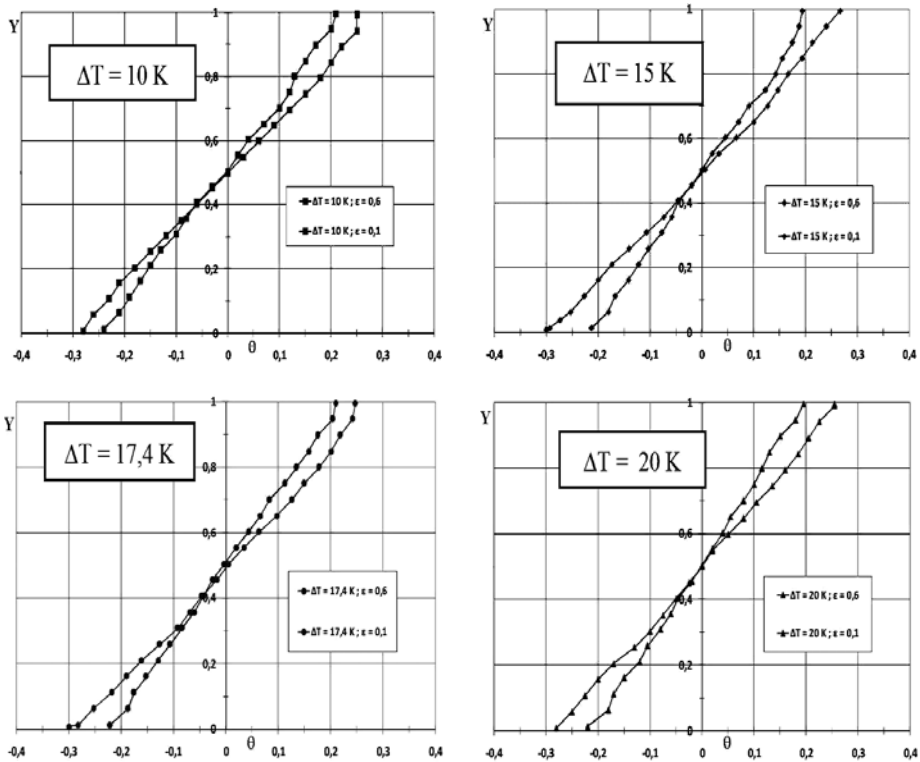


Fig. 4: Influence du rayonnement surfacique sur la stratification thermique pour $\Delta T = 10, 15, 17,4$ et 20 K

3.4 Influence du rapport de forme et du nombre de Rayleigh sur la stratification thermique

Le **Tableau 3** rassemble les résultats expérimentaux obtenus pour différentes configurations. Ce tableau confirme les observations précédentes, à savoir que pour une

configuration géométrique donnée, la stratification diminue lorsque l'émissivité des parois passives augmente.

L'étude des écoulements devrait permettre de confirmer les résultats thermiques, c'est-à-dire la présence d'écoulements secondaires non négligeables lorsque l'émissivité des parois passives augmente. On note également l'influence des rapports de forme.

En effet, il apparaît que si le rapport de forme vertical A_v n'influence pas de manière significative le paramètre de stratification thermique, le rapport de forme horizontal A_h a quant à lui une influence notable sur la stratification en température. Ceci peut s'expliquer par un effet de confinement et des écoulements secondaires tridimensionnels qui ne sont plus du second ordre lorsque la géométrie de la cavité varie.

Ces conclusions sont à modérer étant donné que les cavités étudiées ne sont pas de géométrie 'atypique' (cavité aplatie par exemple).

De plus, que ce soit avec des parois peu ou assez émissives, on constate, sur les figures 2 et 3, que l'écart de température ne modifie pas de façon significative l'évolution de la température au centre de la cavité.

La stratification évolue peu avec l'écart de température et donc avec le nombre de Rayleigh. En effet, une augmentation de l'écart de température de 100 % a entraîné une diminution de 13 et 8 % du paramètre de stratification pour une émissivité de paroi de 0.6 et 0.1 respectivement.

Tableau 3: Récapitulatif de quelques configurations étudiées

	Ra	A_v	A_h	ΔT	ε	S
Cas actuel	5.8×10^{10}	4	0.86	10.0	0.60	0.59
	8.6×10^{10}	4	0.86	15.0	0.60	0.57
	1.0×10^{11}	4	0.86	17.4	0.60	0.56
	1.2×10^{11}	4	0.86	20.0	0.60	0.54
	5.8×10^{10}	4	0.86	10.0	0.10	0.47
	8.6×10^{10}	4	0.86	15.0	0.10	0.44
	1.0×10^{11}	4	0.86	17.4	0.10	0.44
	1.2×10^{11}	4	0.86	20.0	0.10	0.41
S. Mergui [2]	1.69×10^9	1	0.29	20.0	0.10	0.37
J. Salat [4]	1.5×10^9	1	0.32	15.0	0.95	0.38
	1.5×10^9	1	0.32	15.0	0.10	0.44
	1.5×10^9	1	1.00	15.0	0.95	0.54
	1.5×10^9	1	0.80	15.0	0.10	0.72
	1.5×10^9	1	0.80	15.0	0.20	0.65
A. Ndamé [3]	1.01×10^6	4	1.33	14.2	0.04	0.71

3.5 Comparaison avec les résultats numériques

Une étude très récente de DNS-3D a été publiée par Trias *et al.* [8] et présente les résultats de simulation numérique de convection naturelle dans une cavité

différentiellement chauffée de rapport de forme 4 et caractérisée par un nombre de Rayleigh de 10^{11} . Cette étude est donc très proche de l'un des cas étudiés dans cet article. Les résultats obtenus à un ΔT de $17.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($Ra = 1.0 \times 10^{11}$) avec $\varepsilon = 0.10$ aux parois dites 'passives' ont été comparés à ceux obtenus numériquement par [Trias et al., 2010] sur la figure 5. On remarque bien sur cette figure que le comportement n'est pas le même.

Expérimentalement, la stratification est constante sur quasiment toute la hauteur, alors qu'en DNS où les conditions d'adiabaticité sont imposées sur les parois 'passives', ils trouvent 3 zones différentes, une dans la partie basse de la cavité (jusqu'à $Y = 0.4$) où la stratification est sensiblement la même que la notre (0,52 contre 0,57), une deuxième zone ($0.4 < Y < 0.6$) au cœur de la cavité où le paramètre de stratification est de 1.5, et la troisième zone dans la partie haute de la cavité (à partir de $Y = 0.6$) où la stratification est également comparable à celle trouvée expérimentalement (0,52 contre 0,57).

La différence observée sur les deux courbes était prévisible et confirme bien la grande sensibilité de la stratification thermique aux conditions limites dans les espaces confinés. En effet, réaliser une condition de flux nul expérimentalement sur les parois passives est quasiment impossible surtout quand le fluide d'étude est de l'air dont la conductivité est du même ordre de grandeur ($\lambda = 0.026\text{ W/mK}$) que les meilleurs isolants thermiques [2, 5].

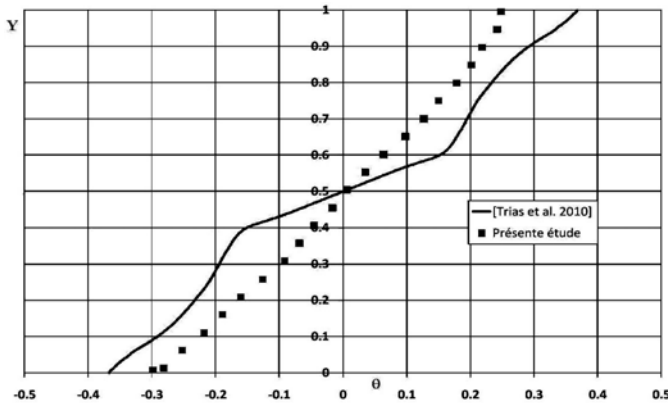


Fig. 5: Comparaison de la stratification thermique à $\Delta T = 17,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($Ra = 1.0 \times 10^{11}$) avec celle obtenue numériquement par [Trias et al., 2010] à $Ra = 10^{11}$

4. CONCLUSION

Cette présentation a permis de déterminer les premiers éléments caractérisant la convection naturelle dans les grands volumes (cavité différentiellement chauffée), à commencer par l'évolution de la stratification thermique et l'influence des conditions aux limites radiatives dans cette cavité.

Avec les conditions expérimentales imposées, l'étude a été menée pour de grandes valeurs du nombre de Rayleigh (5.8×10^{10} ; 8.6×10^{10} ; 1.0×10^{11} ; 1.2×10^{11}) tout en limitant les écarts de température (inférieurs à $30\text{ }^{\circ}\text{C}$) pour rester dans le cadre des

hypothèses des faibles écarts de température et compatible avec des applications à la thermique des habitacles.

Une investigation portant sur la contribution du rayonnement de parois à parois à la stratification thermique (sur 4 m de hauteur) a été soigneusement menée et montre que la prise en compte du rayonnement est incontournable pour l'évaluation correcte des champs de température dans la cavité.

Par des comparaisons avec des résultats de la littérature, il a pu être constaté, par ailleurs, que le rapport de forme hauteur/largeur joue un rôle secondaire sur la stratification thermique si l'on reste dans des facteurs raisonnables (de 1 à 4). De plus, le facteur d'échelle, caractérisé par le nombre de Rayleigh, ne semble pas modifier notablement le champ de température dans le cœur de la cavité.

L'étude s'achève par une comparaison du paramètre de stratification obtenu d'un calcul DNS-3D à celui que nous mesurons expérimentalement. Des études du champ dynamique et thermique sont en cours pour quantifier ces écoulements si particuliers.

NOMENCLATURE

g : Accélération de la pesanteur, m/s^2	L : Largeur de la cavité ($L = 1$ m)
H : Hauteur de la cavité, Longueur de référence ($H = 3.84$ m)	l : Profondeur de la cavité ($l = 0,86$ m)
Ra : Nombre de Rayleigh $Ra = g \beta \Delta T H^3 / (\alpha \nu)$	S : Paramètre de stratification de la cavité
T : Température locale de l'air, $^{\circ}C$	T_{fm} : Température moyenne des parois actives, $^{\circ}C$
T_c : Température de la paroi chaude, $^{\circ}C$	T_f : Température de la paroi froide, $^{\circ}C$
X, Y : Coordonnées cartésiennes sans dimension	ΔT : Différence de température entre les parois actives, K
A_v : Rapport de forme vertical $A_v = H/L$	A_h : Rapport de forme horizontal $A_h = l/L$
α : Diffusivité thermique, m^2s^{-1}	β : Coefficient dilatation thermique, K^{-1}
ε : Emissivité des parois	ν : Viscosité cinématique, m^2s^{-1}
λ : Conductivité thermique, $W/m.K$	θ : Température adimensionnée, $(T - T_m) / \Delta T$

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Jean Louis Tuhault, Ingénieur de recherche au Laboratoire d'Etudes Thermiques de Poitiers (devenu Institut P PRIME) pour son assistance technique dans la mise en place de la métrologie.

Les remerciements s'adressent également à Ruben Mouangue, enseignant-chercheur à l'Université de Ngaoundéré (Cameroun) pour ses suggestions.

REFERENCES

- [1] S. Mergui et F. Penot, 'Convection Naturelle en Cavité Carrée Différentiellement Chauffée : Investigation Expérimentale   $Ra=1.69 \times 10^9$ '. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 39, N 3, pp. 563 - 574, 1996.
- [2] S. Mergui et F. Penot, 'Analyse des Vitesse et Température de l'Air en Convection Naturelle dans une Cavité Différentiellement Chauffée   $Ra=1.69 \times 10^9$ ', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 40, N 14, pp. 3427 - 3441, 1997.
- [3] F. Penot and A. Ndam, 'Investigation of the Route to Turbulence in a Vertical Differentially Heated Cavity', Proceedings of the 6th International Heat Transfer Conference, Jerusalem, Vol. 2, pp. 417 - 422, 1990.
- [4] J. Salat et F. Penot, 'Approche Exp rimentale de la Convection Naturelle en Transition Turbulente dans une Cavité Cubique Diff rentiellement Chauff e', VI me Colloque Interuniversitaire Franco-québécois Thermiques des Systèmes, Quebec, Canada, 26 - 28 mai 2003.
- [5] J. Salat, S. Xin, P. Joubert, A. Sergent, F. Penot and P. Le Qu r . 'Experimental and Numerical Investigation of Turbulent Natural Convection in a Large Air-Filled Cavity', International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 25, N 5, pp 824 - 832, 2004.
- [6] H. Wang, S. Xin et P. Le Quéré, 'Etude Numérique du Couplage de la Convection Naturelle avec le Rayonnement de Surfaces en Cavité Carrée Remplie d'Air', Comptes Rendues Mécanique, Académie des Sciences, Vol. 334, N 1, pp. 48 - 57, 2006.
- [7] G. Lauriat, 'Combined Radiation-Convection in Gray Fluids Enclosed in Vertical Cavities', ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 104, pp. 609 - 615, 1982.
- [8] F.X. Trias, A. Gorobets, M. Soria and A. Oliva, 'Direct Numerical Simulation of a Differentially Heated Cavity of Aspect Ratio 4 with Rayleigh Numbers up to 10^{11} - Part I: Numerical Methods and Time averaged Flow', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53, N 4, pp. 665 - 673, 2010.