

# Stratification thermique de l'air dans une cavité en convection naturelle à grand nombre de Rayleigh.

Francis DJANNA, Nicolas ROUGER, Didier SAURY, François PENOT\*

LET, ENSMA, UMR CNRS 6608, Avenue C. Ader, BP 40109, 86961 Futuroscope Cedex.

\* [francois.penot@let.ensma.fr](mailto:francois.penot@let.ensma.fr)

**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  $1,5 \cdot 10^{11}$ . 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 stratification thermique, dans le cœur notamment, est comparée à celles déjà obtenues dans des cavités de plus petite taille et dans des cavités carrées ou de rapport de forme égal à 1. L'influence de l'émissivité des parois, donc des effets radiatifs entre parois, est examinée et comparée aux résultats antérieurs obtenus dans des configurations de plus petite taille.

## Nomenclature

$g$	accélération de la pesanteur, $m \cdot s^{-2}$	$A_v$	rapport de forme vertical = $H/L$
$H$	hauteur de la cavité, longueur de référence ( $H = 3.84 \text{ m}$ )	$A_h$	rapport de forme horizontal = $l/L$
$L$	largeur de la cavité ( $L = 1 \text{ m}$ )	<b>Lettres grecques :</b>	
$l$	profondeur de la cavité ( $l = 0,86 \text{ m}$ )	$\alpha$	diffusivité thermique, $m^2 \cdot s^{-1}$
$Ra$	nombre de Rayleigh = $g\beta\Delta TH^3/(\alpha\nu)$	$\beta$	coefficient de dilatation thermique, $K^{-1}$
$S$	paramètre de stratification de la cavité	$\Delta T$	différence de température entre les parois actives, $K$
$T$	température locale de l'air, $^{\circ}C$	$\varepsilon$	émissivité des parois
$T_c$	température de la paroi chaude, $^{\circ}C$	$\lambda$	conductivité thermique, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$T_f$	température de la paroi froide, $^{\circ}C$	$\nu$	viscosité cinématique, $m^2 \cdot s^{-1}$
$T_m$	température moyenne des parois actives, $^{\circ}C$	$\theta$	température adimensionnée $= (T - T_m)/\Delta T$
$X, Y$	coordonnées cartésiennes sans dimension		

## 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 [1,2] et Salat [4,5] 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 fiable 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 LET et permet d'explorer, entre autre, la stratification thermique dans une cavité différentiellement chauffée

de grande dimension (environ 4 mètres de hauteur) et siège d'écoulements de convection naturelle turbulents.

## 2. Description du dispositif expérimental

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 (voir figure 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 ( $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ). 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 styrodur extrudé 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 (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, elle-même contrôlée à  $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ceci permet également de réduire les déperditions avec le milieu extérieur.

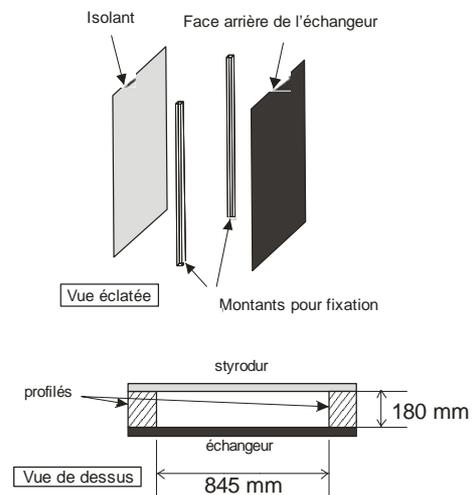


Figure 1 : *Vue de la partie haute de la cavité*

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  $100 \text{ }\mu\text{m}$ . 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 central de la cavité ont également été réalisées avec un thermocouple de type K de  $200 \text{ }\mu\text{m}$

(cette mesure devrait-être améliorée dans l'avenir avec une sonde double fabriquée avec du thermocouple de type K en 12,5  $\mu\text{m}$ ), accessible à la turbulence donc.

### 3. Résultats.

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  $0,58 \cdot 10^{11}$  ;  $0,86 \cdot 10^{11}$  ;  $1,0 \cdot 10^{11}$  et  $1,2 \cdot 10^{11}$ . 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 ( $\varepsilon = 0,10 \pm 0,05$  ;  $e = 40 \mu\text{m}$ ).

#### 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.

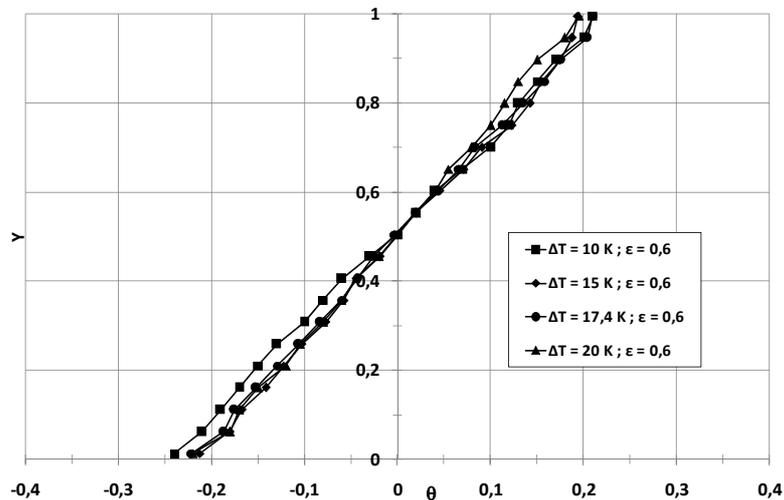


Figure 2 : Stratification thermique avec des parois d'émissivité importante pour différents  $\Delta T$

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'écart de température ne modifie pas de façon significative l'évolution de la température au centre de la cavité. Cette évolution est d'ailleurs relativement linéaire au cœur de la cavité, et on retrouve la tendance centro-symétrique 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 l'étude comparative présentée ci-dessous.

Afin de mieux comparer, les phénomènes qui se produisent au centre de la cavité, le paramètre de stratification thermique  $S$  a été calculé pour chaque essai. Ce paramètre traduit l'évolution du gradient vertical sans dimension de température. Il est défini par :

$$S = \frac{H}{\Delta T} \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial \theta}{\partial Y} \quad (1)$$

L'évolution de ce paramètre, 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. Toutefois ce nombre reste quasiment constant quel que soit l'écart de température égal à une valeur de 0,45. L'étude de l'incertitude sur S montre que la dispersion sur ce paramètre ne dépasse pas 8 % avec peut être une tendance vers la diminution avec l'augmentation du nombre de Rayleigh.

$\Delta T$ (K)	10,0	15,0	17,4	20,0
Ra	$5,8 \cdot 10^{10}$	$8,6 \cdot 10^{10}$	$1,0 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{11}$
S	0,47	0,44	0,44	0,41

Tableau 1 : Paramètre de stratification mesuré avec rayonnement important des parois passives.

### 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.

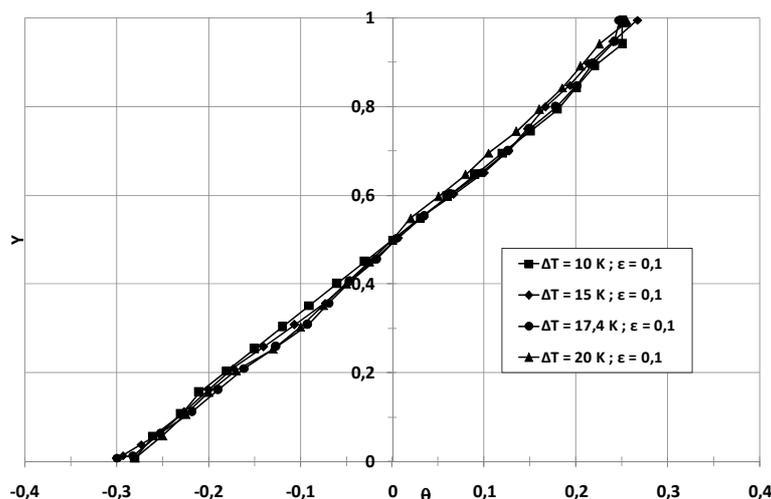


Figure 3 : Stratification thermique obtenue avec des parois de faible émissivité pour différents  $\Delta T$

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 note également la centro-symétrie des profils de température caractéristique de ce type de configuration. Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau 2 ci-dessous. L'étude d'incertitude montre que l'erreur commise sur ce paramètre ne dépasse pas 8 %. On peut donc conclure que le paramètre de stratification thermique est indépendant de l'écart de température.

$\Delta T$ (K)	10,0	15,0	17,4	20,0
Ra	$5,8 \cdot 10^{10}$	$8,6 \cdot 10^{10}$	$1,0 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{11}$
S	0,59	0,57	0,56	0,54

Tableau 2 : Paramètre de stratification avec rayonnement faible des parois passives.

### 3.3 Comparaison des résultats : Influence du rayonnement des parois « passives » sur la stratification thermique.

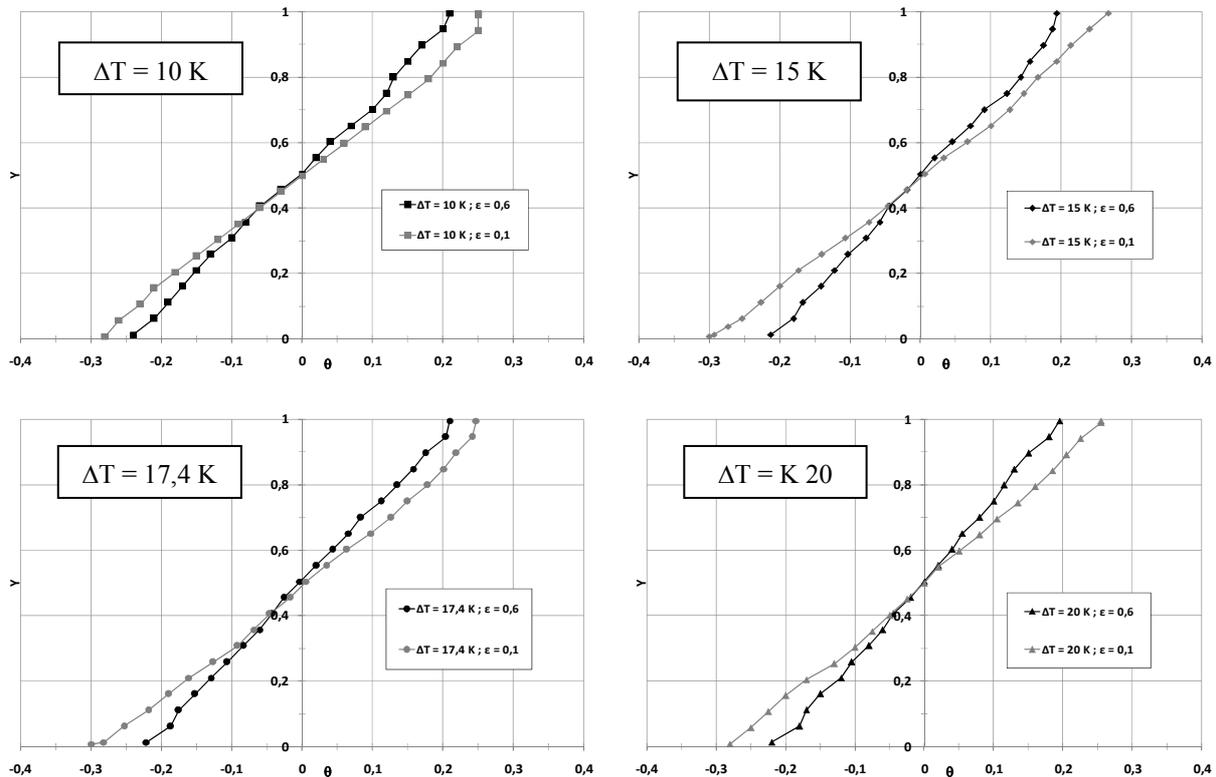


Figure 4 : Stratification thermique pour  $\Delta T=10, 15, 17,4$  et  $20$  K

Afin de 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 ( $\epsilon = 0,1$ ) et dans le cas où elles ont une émissivité importante ( $\epsilon = 0,60$ ) 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. Ceci peut s'expliquer par l'influence du rayonnement des parois actives qui n'est pas négligeable et intensifie les écoulements secondaires. Ainsi, l'augmentation du rayonnement à l'intérieur de la cavité se traduit par des écoulements secondaires non négligeables entraînant ainsi une homogénéisation de la température dans toute la cavité (y compris au cœur) et réduisant ainsi le gradient vertical de température. Ceci est observé sur tous les essais réalisés puisque le paramètre de stratification passe de 0,57 dans le cas où le rayonnement des parois passives est faible ( $\epsilon = 0,10 \pm 0,05$ ) à 0,45 lorsque ce rayonnement devient plus important ( $\epsilon = 0,60 \pm 0,02$ ) soit une diminution d'environ 22%. Ces résultats sont à rapprocher de ceux obtenus par J. Salat [4] (cf. Tableau 3) qui présente une diminution de l'ordre de 30 % lorsque l'émissivité passe de 0,10 à 0,95 ( $0,72 \Rightarrow 0,54$ ) avec un rapport de forme horizontal proche du cas étudié ici.

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).

	$Ra$	$A_v$	$A_h$	$\Delta T$	$\varepsilon$	$S$
Cas actuel	$5,80.10^{10}$	4	0,86	10,0	0,60	0,59
	$8,60.10^{10}$	4	0,86	15,0	0,60	0,57
	$1,00.10^{11}$	4	0,86	17,4	0,60	0,56
	$1,20.10^{11}$	4	0,86	20,0	0,60	0,54
	$5,80.10^{10}$	4	0,86	10,0	0,10	0,47
	$8,60.10^{10}$	4	0,86	15,0	0,10	0,44
	$1,00.10^{11}$	4	0,86	17,4	0,10	0,44
	$1,20.10^{11}$	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]	$1,50.10^9$	1	0,32	15,0	0,95	0,38
	$1,50.10^9$	1	0,32	15,0	0,10	0,44
	$1,50.10^9$	1	1,00	15,0	0,95	0,54
	$1,50.10^9$	1	1,00	15,0	0,10	0,72
	$1,50.10^9$	1	0,80	15,0	0,20	0,65
A. Ndamè [3]	$1,01.10^6$	4	1,33	14,2	0,04	0,71

Tableau 3. Récapitulatif de quelques configurations étudiées

#### 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. 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 20 °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. Une étude dynamique va être entreprise pour quantifier ces écoulements si particuliers.

#### Références :

- [1] S. Mergui et F. Penot. *Analyse des vitesse 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] A. Ndamè. *Etude expérimentale de la convection naturelle en cavité : De l'état stationnaire au chaos*. Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers (1992).
- [4] 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).
- [5] J. Salat. *Contribution à l'étude de la convection naturelle tridimensionnelle en cavité différentiellement chauffée*. Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers (2004).