

# Caractérisation dynamique et thermique de la convection naturelle turbulente dans une cavité différentiellement chauffée comportant un linteau.

Nicolas ROUGER<sup>1</sup>, Patrice JOUBERT<sup>2</sup>, François PENOT<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> LET, ENSMA, UMR CNRS 6608, Avenue C. Ader, BP 40109, 86961 Futuroscope Cedex.

<sup>2</sup> LEPTAB, Université de La Rochelle, 17026 La Rochelle cedex 01

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

**Résumé** – On présente une étude expérimentale ayant pour but de caractériser l'écoulement d'air dans une cavité de section droite verticale de  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  et de  $0,32\text{ m}$  de profondeur. Deux parois verticales en vis-à-vis sont différentiellement chauffées et l'écart de température est fixé à  $15^\circ\text{C}$ , pour atteindre un régime d'écoulement de convection naturelle faiblement turbulente, caractérisé par une valeur du nombre de Rayleigh de l'ordre de  $1,5 \cdot 10^9$ . Une séparation (un linteau) de  $30\text{ cm}$  de hauteur, faite d'un matériau thermiquement isolant est positionnée au centre du plafond de cette cavité. Des cartographies de température d'air, réalisées à l'aide de deux micro-thermocouples, ainsi que des mesures des composantes horizontale et verticale de la vitesse, effectuées par LDV, permettent d'obtenir des champs thermique et dynamique dans le plan vertical médian. Ces mesures sont comparées aux résultats correspondants, obtenus dans une cavité non partitionnée afin de caractériser l'influence du linteau.

## Nomenclature :

$g$  : accélération de la pesanteur [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ].

$H$  : hauteur de la cavité, longueur de référence ( $H = 1\text{ m}$ ).

$Ra$  : nombre de Rayleigh =  $g\beta\Delta TH^3/(\alpha\nu)$ .

$S$  : paramètre de stratification au centre de la cavité ( $S = \partial\theta/\partial Y$ ).

$T$  : température locale de l'air [ $^\circ\text{C}$ ].

$T_m$  : demi-somme des températures des parois actives [ $^\circ\text{C}$ ].

$U, V$  : composantes sans dimension de la vitesse

$V_{ref}$  : vitesse de convection naturelle de référence ( $V_{ref} = \alpha\sqrt{Ra}/H = 0,84\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

$X, Y, Z$  : coordonnées cartésiennes sans dimension.

## Lettres grecques :

$\alpha$  : diffusivité thermique [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ].

$\beta$  : coefficient de dilatation thermique [ $\text{K}^{-1}$ ].

$\Delta T$  : différence de température entre les parois actives [ $^\circ\text{C}$ ].

$\varepsilon$  : émissivité [].

$\lambda$  : conductivité thermique [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ].

$\nu$  : viscosité cinématique [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ].

$\theta$  : température adimensionnée =  $(T - T_m)/\Delta T$ .

## 1. Introduction

Du fait des progrès de l'isolation thermique des bâtiments, les pertes par renouvellement d'air prennent une place de plus en plus grande dans la thermique du bâtiment, et une meilleure connaissance des circulations internes est nécessaire. Dans l'habitat, les mouvements d'air sont essentiellement dus aux forces de pesanteur et conduisent à des écoulements de convection naturelle plus ou moins turbulents. De ce fait, des expériences de références sont nécessaires, comme celles concernant la convection naturelle en cavité partitionnée [1 à 3] ou non [4 à 9].

Le but de cette étude expérimentale de convection naturelle est de caractériser l'écoulement d'air dans une cavité différentiellement chauffée possédant un obstacle au

niveau du plafond (linteau) et d'analyser cet effet d'obstacle en particulier par une comparaison des résultats avec ceux obtenus dans le cas d'une cavité sans linteau [7 et 8].

Dans un premier paragraphe, le dispositif expérimental est rapidement décrit, à savoir la cavité réalisée à cet effet et la métrologie utilisée. Les résultats des mesures sont discutés ensuite.

## 2. Description du dispositif expérimental

### 2.1 La cavité

L'étude a été réalisée dans une cavité différentiellement chauffée de  $1\text{m}^3$  ( $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ ) montrée sur la *Figure 1*. Les parois actives sont les parois latérales (la paroi gauche est chauffée, la paroi droite est refroidie). Leur température est fixée avec un écart,  $\Delta T$ , de  $15^\circ\text{C}$  de telle sorte que la moyenne,  $T_m$ , soit égale à la température ambiante de la salle d'expérience. Dans ces conditions, le problème est caractérisé par une valeur du nombre de Rayleigh de  $1,5 \cdot 10^9$ . Les parois sont maintenues en température grâce à une circulation d'eau glycolée, dans des échangeurs, régulée par deux cryothermostats. Le plancher et le plafond sont réalisés en panneaux de mousse de polyuréthane ( $\lambda = 0,03 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) de 10 cm d'épaisseur encastrés entre les parois actives. De plus, afin de rendre les parois avant et arrière adiabatiques, la cavité a été divisée en trois cavités identiques séparées par de fines feuilles de polycarbonate (épaisseur = 1mm). La cavité de mesure, représentée sur la *Figure 2*, est la cavité centrale, de 32 cm de profondeur. Enfin, un linteau de polystyrène extrudé, de 5 cm de large et de 30 cm de haut, a été collé au centre du plafond de chaque cavité. Pour minimiser le rayonnement entre parois, ces linteaux, ainsi que le plancher et le plafond, sont recouverts d'un revêtement de faible émissivité ( $\varepsilon = 0,1 \pm 0,05$ ).

### 2.2 Métrologie

Les mesures de température sont réalisées par deux micro-thermocouples de type Chromel-Alumel fixés au bout d'une canne coudée creuse en graphite. La canne coudée n'est donc pas dans le plan de mesure, ce qui limite son caractère intrusif. Elle se déplace à l'aide d'un robot programmable précis (résolution de  $10 \mu\text{m}$ ) de type *CharlyRobot* sur une hauteur et sur une largeur de 1m avec un pas réglable suivant le gradient local. Du fait de la nature fortement bidimensionnelle des conditions aux limites et de la tendance naturelle vers l'uniformisation des températures dans la direction horizontale parallèle aux parois actives, toutes les mesures de température ont été effectuées dans le plan vertical médian ( $Z = 0,5$ ).

Les mesures de vitesse sont réalisées également dans le plan vertical médian, par LDV-2D, en rétrodiffusion, avec un laser Argon de 1,2 W éclairant dans les longueurs d'onde de 514,5 nm et 488 nm. L'ensemencement est réalisé en introduisant une demi-heure avant l'expérience un petit volume de gouttelettes d'environ  $2 \mu\text{m}$  de diamètre d'huile de silicone.

## 3. Résultats.

### 3.1 Allure générale de l'écoulement

Une représentation des circulations d'air dans le plan vertical médian est donnée, *Figure 3*, à travers les vecteurs vitesse obtenus à partir des deux composantes dans le plan vertical. Globalement, ces vecteurs diffèrent assez peu des vecteurs 3D réels dans la mesure où, dans

ce problème, les gradients horizontaux de température sont faibles et donc les mouvements horizontaux transverses sont en général du second ordre.

On observe immédiatement que la circulation d'air se caractérise essentiellement par des écoulements qui suivent les parois, sans aucun décollement appréciable. L'écoulement descendant le long de la paroi froide fait apparaître un développement de couche limite qui s'épaissit dans la partie basse. La partie inférieure de la cavité est le siège de l'épanouissement d'un jet pariétal horizontal accompagné, au-dessus, d'une recirculation bien visible à travers les vecteurs. Le long de la paroi verticale chaude, la couche limite montante se développe même au-delà de  $Y = 0,7$  (cote inférieure du linteau), sans que l'on puisse distinguer un échappement horizontal important à cette même cote, comme cela est observé dans les cas tests de simulations numériques à plus haut nombre de Rayleigh [1]. Il n'y a donc apparemment pas de zone morte dans la partie supérieure gauche de la cavité, l'écoulement principal longe les parois et contourne sans décollement le linteau qui, normalement, n'est qu'un obstacle passif (adiabatique). Si des recirculations existent dans les parties semi-confinées, elles sont du second ordre par rapport à l'écoulement principal.

Les lignes isothermes présentées sur la Figure 4 donnent une idée des stratifications thermiques rencontrées en dehors des couches limites. Le linteau introduit des différences de température entre l'amont et à l'aval car l'alimentation de l'espace semi-confiné en aval du linteau se fait principalement par de l'air à une température adimensionnée de l'ordre de 0,15 et qu'il n'y a plus aucun apport de chaleur en aval du linteau.

Une analyse plus détaillée est réalisée en comparant les résultats obtenus avec et sans linteau.

### **3.2 Influence du linteau**

#### **3.2.1 Sur le champ dynamique**

Différents profils de vitesse ont été détaillés en différentes sections et comparés aux résultats expérimentaux obtenus dans la même cavité mais en l'absence de linteau [8].

L'examen du profil horizontal de la composante verticale, tracé à la cote  $Y = 0,8$  à droite du linteau et donné Figure 5, montre que les 2 couches limites descendantes sont similaires dans leur épaisseur et voisines au niveau du maximum de vitesse (écart de l'ordre de 15%). La petite différence est due à l'alimentation de la couche limite en fluide plus froid quand il y a un linteau. Celui-ci introduit aussi une recirculation supplémentaire dans la zone externe de cette couche limite avec la présence d'un pallier de vitesse non nul accompagné d'une zone avec écoulement montant faible.

Le profil de la composante horizontale de vitesse à l'abscisse  $X = 0,5$ , présenté Figure 6, montre que l'écoulement est pratiquement indépendant du linteau. En effet, les jets pariétaux le long du plancher et les deux zones de recirculation adjacentes et situées entre les cotes 0,1 et 0,3 sont quasiment superposées. Les débits circulant dans la cavité paraissent donc identiques dans les deux cas. De même, le profil de vitesse relevé sous le linteau est tout à fait semblable à celui du jet pariétal observé au niveau du plafond dans la cavité sans linteau. Cependant, on ne retrouve pas l'écoulement de retour du plafond sans linteau, mais seulement une petite recirculation à bien plus faible vitesse au-dessous du linteau.

La présence du linteau se fait sentir en examinant la couche limite ascendante le long de la paroi chaude. Le profil de la composante verticale de vitesse, tracé à la cote  $Y = 0,8$ , à gauche du linteau et présenté Figure 7, laisse apparaître maintenant une différence importante sur l'amplitude du mouvement avec une diminution de l'ordre de 30% de la vitesse maximale. La

couche limite se développe dans un milieu plus stratifié et donc les forces de poussée d'Archimède sont réduites et les vitesses résultantes plus faibles. Une partie du débit doit donc s'échapper dans la direction transverse.

### 3.2.2 Sur le champ thermique

De même que pour les aspects dynamiques, le profil de température tracé *Figure 8* à l'aplomb du linteau laisse apparaître les mêmes constatations. Le champ de température reste inchangé dans la moitié inférieure de la cavité. Le linteau introduit une cassure entre  $Y = 0,6$  et  $Y = 0,7$  dans la zone de son contournement par l'air. De plus, on constate entre  $Y = 0,5$  et  $Y = 0,6$  la présence de fluide plus froid du fait de l'écoulement de retour alimenté en air frais venant de la partie droite de la cavité.

La stratification introduite par le linteau est bien montrée sur la *Figure 9* où sont présentés les profils verticaux de température dans la partie gauche de la cavité. Jusqu'à mi-hauteur ( $Y = 0,5$ ), les profils avec et sans linteau se superposent ( $S = 0,37$  dans les 2 cas). Les différences apparaissent dans la partie supérieure confinée thermiquement en présence de linteau, où l'on observe un changement brutal du profil à l'approche de la cote du linteau et par la suite une augmentation plus importante de la température avec la verticale que pour le cas sans linteau.

## 4. Conclusion :

Cette étude expérimentale a permis de caractériser la convection naturelle dans une cavité différentiellement chauffée comportant un linteau. Les conditions expérimentales ont été imposées pour atteindre une valeur du nombre de Rayleigh de  $1,5 \cdot 10^9$  donc bien au-delà des premières instationnarités.

En premier lieu, on observe que, l'écoulement s'opérant préférentiellement dans les plans verticaux, le fluide suit véritablement les parois en laissant se développer les couches limites et en contournant le linteau. On n'observe pas de décollement important le long de la paroi chaude que ce soit au niveau du linteau ou autour de celui-ci. C'est une caractéristique forte de la convection naturelle en géométrie complexe.

La présence du linteau a des conséquences surtout visibles dans la moitié supérieure de la cavité. Localement, la stratification thermique est en effet modifiée, ce qui induit des écoulements un peu différents de ceux obtenus sans linteau, notamment dans le développement des deux couches limites verticales et la création de recirculations secondaires.

Si l'on se réfère maintenant au débit circulant mesuré le long du plancher dans l'axe vertical médian de la cavité, on n'observe aucune différence lorsqu'un obstacle est introduit. On aurait pu penser que les pertes de charges supplémentaires, dues au doublement du nombre de virages pris par le fluide pour contourner le linteau, auraient diminué ce débit. Ce n'est pas le cas, encore une fois, la convection naturelle s'optimise d'elle-même [9].

Des différences de comportement sont pourtant observées. Elles conduisent localement (bas de la couche limite froide par exemple) à des écarts de débit dans le plan vertical qui pourraient être dus à une structuration tridimensionnelle plus prononcée des écoulements lorsqu'il y a un linteau. On peut supposer que cet obstacle modifie la stratification thermique au cœur de la cavité avec la création de gradients horizontaux de température qui, en présence des parois avant et arrière, sont favorables à la génération d'écoulements secondaires tridimensionnels. Ce dernier point mériterait d'être approfondi dans l'avenir.

## Références :

- [1] P. Joubert et al. A numerical exercise for turbulent natural convection and pollutant diffusion in a two-dimensional partially partitioned cavity, *Int. J. of Thermal Sciences*. 44 (2005) 311-322.
- [2] F. Ampofo, Turbulent natural convection in an air filled partitioned square cavity, *Int. J. of Heat and Fluid Flow*. 25 (2004) 103–114.
- [3] K. Hanjalić, S. Kenjereš, F. Durst, Natural convection in partitionned two-dimensional enclosures at higher Rayleigh numbers, *Int. J. Heat Mass Transfer*. 39 (1996) 1407-1427.
- [4] V.A.F. Costa, Laminar natural convection in differentially heated rectangular enclosures with vertical diffusive walls, *Int. J. Heat Mass Transfer*. 45 (2002) 4217-4225.
- [5] H.N. Dixit, V. Babu, Simulation of high Rayleigh number natural convection in a square cavity using the lattice Boltzmann method. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 49 (2006) 727-739.
- [6] G. de Gassowski, S. Xin, O. Daube, Bifurcations et solutions multiples en cavité 3D différenciellement chauffée, *C. R. Mécanique*. 331 (2003) 705-711.
- [7] J. Salat et al. Experimental and numerical investigation of turbulent natural convection in a large air-filled cavity. *Int. J. of Heat and Fluid Flow*. 25 (2004) 824-832.
- [8] J. Salat, Contribution à l'étude de la convection naturelle tridimensionnelle en cavité différenciellement chauffée, Thèse de doctorat, Université de Poitiers (2005).
- [9] A. Benkhelifa, J. Salat, O.Skurtys, F. Penot, Nouvelles interprétations des écoulements de convection naturelle en cavité fermée, *Congrès SFT*. 12 (2004) 205-210.

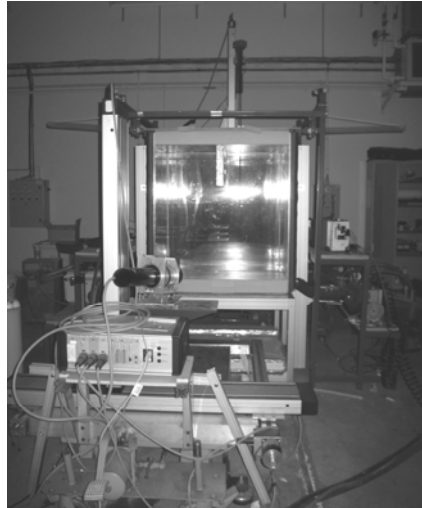


Figure 1 : Vue de la cavité et son linteau

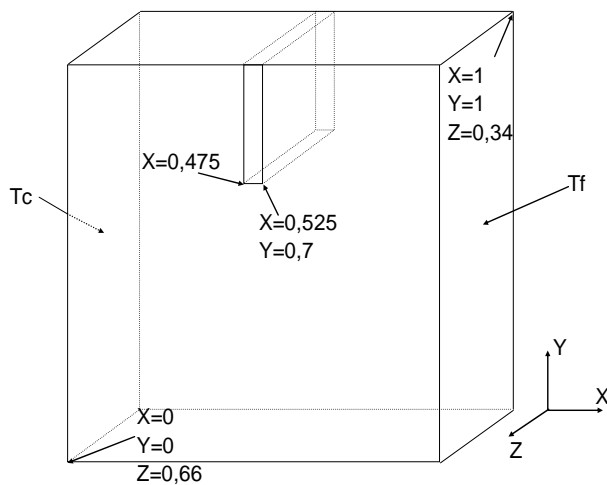


Figure 2 : Dimensions de la cavité de mesure

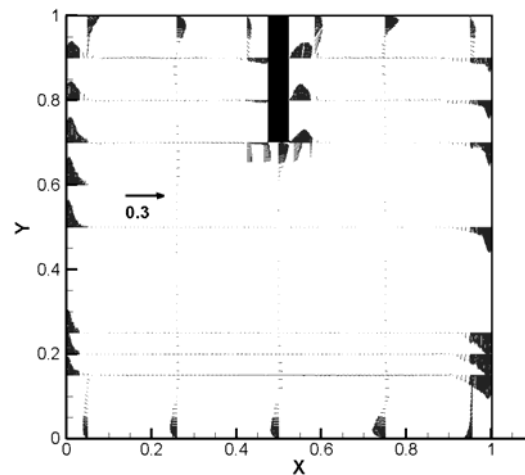


Figure 3 : Vecteurs vitesse dans la cavité avec linteau

