Simulation expérimentale des modes de ventilation dans les parois double-peau

S. Fohanno — A. Tribech — C.V. Popa — G. Polidori

Laboratoire de Thermomécanique, Université de Reims Champagne-Ardenne, Moulin de la Housse, B.P. 1039, F-51687 Reims cedex 2. stephane.fohanno@univ-reims.fr, cv.popa@univ-reims.fr, guillaume.polidori@univ-reims.fr

RÉSUMÉ. Une étude expérimentale d'un canal plan vertical chauffé, représentatif des parois de type double-peau, a été menée. L'étude s'est focalisée sur la dynamique de l'écoulement de convection naturelle résultant du chauffage uniforme d'une des parois sur sa moitié centrale. Seuls les aspects convectifs liés à la ventilation naturelle sont étudiés en réalisant les expériences dans de l'eau afin de négliger les aspects radiatifs. Les techniques de visualisations mises en œuvre ont permis de montrer le caractère fortement instationnaire et tridimensionnel de l'écoulement résultant et d'observer la présence d'un écoulement de retour de longueur variable sur la gamme de nombres de Rayleigh modifiés étudiée ($10^6 \leq Ra^* \leq 2 \times 10^7$).Les résultats de cette étude confirment la difficulté de la prédiction du comportement thermo-aéraulique de telles parois par les outils de simulation numériques.

ABSTRACT. An experimental study of a heated vertical plane channel, representative of doubleskin façades, was undertaken. The study was focused on the dynamics of the natural convection flow resulting from the uniform heating of one of the walls on its central half. Only the convective aspects related to natural ventilation are studied by carrying out the experiments in water in order to neglect radiation. Flow visualization techniques made it possible to show the strongly unsteady and three-dimensional character of the resulting flow and to observe the presence of a reverse flow of variable length on the studied range of modified Rayleigh numbers ($10^6 \le Ra^* \le 2 \times 10^7$). Results of this study confirm the difficulty of the prediction of the flow behaviour in heated vertical plane channels by means of numerical simulation.

MOTS-CLÉS : canal vertical, paroi double-peau, ventilation, étude expérimentale, visualisation d'écoulement.

KEYWORDS: vertical channel, double-skin façade, ventilation, experimental study, flow visualization.

Revue. Volume X – n° x/année, pages 1 à X

2 Revue. Volume X – n° x/année

1. Introduction

Ce travail expérimental s'inscrit dans le cadre d'études menées par le réseau national de laboratoires AMETH (AMélioration des Echanges THermiques) soutenu par le CNRS. L'un des thèmes de recherche du réseau concerne la diminution des surchauffes des toitures en période estivale, via l'étude des écoulements au sein d'enveloppes de type double-peau. La prédiction du comportement thermo-aéraulique de telles parois par des outils de simulation numériques fiables nécessite le développement de montages expérimentaux permettant de fournir les données thermiques et dynamiques nécessaires à leur validation. L'étude de la convection naturelle dans un canal plan chauffé, représentatif de ces parois, constitue donc l'essentiel de notre contribution expérimentale au réseau.

Les transferts thermoconvectifs dans un canal vertical chauffé ou refroidi ont été très largement étudiés depuis près de cinquante ans. Les régimes d'écoulements dans un canal vertical ont été observés expérimentalement par Elenbaas (1942). L'apparition des régimes peut être déterminée à partir d'un nombre de Rayleigh modifié (Ra*) basé sur l'épaisseur du canal et sur le rapport d'allongement entre cette largeur et la hauteur chauffée. Deux principaux modes d'écoulements ont été observés : un régime où l'écoulement est pleinement développé dans le canal (pour de faibles nombres de Rayleigh) et un régime où l'écoulement est de type couche limite le long des parois chauffées (nombres de Rayleigh élevés avec chauffage des deux parois). Dans le cas d'un chauffage asymétrique (une seule paroi chauffée) et pour des nombres de Rayleigh suffisamment élevés, le régime de type couche limite est toujours observé sur la paroi chauffée, mais un écoulement de retour est alors également observé du côté de la paroi non chauffée (Webb et Hill, 1989).

Cependant, bien qu'un grand nombre d'études expérimentales concernant le canal plan vertical aient été menées (Elenbaas, 1942, Wirtz et Stutzman, 1982, Sparrow *et al.*, 1984, Webb et Hill, 1989), beaucoup se sont limitées à des mesures thermiques (flux et températures pariétaux). Très peu d'entre elles se sont intéressées à la dynamique de l'écoulement (Sparrow *et al.*, 1984). L'objectif de notre travail est de reproduire des conditions d'écoulement similaires à celles des expériences de Webb et Hill (1989), relativement bien documentés du point de vue thermique, afin de caractériser la dynamique de l'écoulement. Seuls les aspects convectifs liés à la ventilation naturelle sont étudiés. Pour cela, afin de négliger les aspects radiatifs, l'étude est effectuée dans l'eau.

2. Dispositif expérimental

2.1. Géométrie du canal

Le canal étudié est constitué d'une paroi chauffée sur sa moitié centrale (A=180mm) et comprend une extension adiabatique (de hauteur A/2) à l'entrée et à



la sortie du canal. La deuxième paroi est entièrement adiabatique et de hauteur 2A. Les deux parois sont séparées d'une distance b ajustable à l'aide de joues de dimensions variables (Figure 1).

Figure 1 : Caractéristiques du canal plan vertical

2.2. Dispositif de mesure et techniques de visualisation

L'étude préliminaire présentée ici concerne un canal plan vertical et se focalise uniquement sur l'aspect dynamique du problème. Les expériences sont conduites dans une cuve verticale remplie d'eau, de dimensions $50 \times 50 \times 100$ cm3, au sein de laquelle est immergé le canal. Pour simuler un flux solaire sur une paroi ou toiture, un tissu chauffant délivrant une densité de flux de chaleur uniforme est utilisé. La structure dynamique de l'écoulement est caractérisée à l'aide de deux techniques de visualisation par tomographies laser. La première consiste en l'utilisation de traceurs discrets que sont de fines particules quasi-sphériques de rilsan (1,06 g/cm³). Les visualisations obtenues fournissent le champ des vecteurs vitesses de l'écoulement matérialisé par les trajectoires des traceurs durant le temps d'exposition de l'appareil photographique (MINOLTA Dimage 7i) dont on peut déduire les lignes de courant (Figure 2). La seconde emploie deux traceurs fluorescents, la fluorescéine pour l'écoulement de type couche limite et la sulforhodamine pour l'écoulement de retour, sous excitation laser (Figure 3). De fait, il est alors possible de distinguer nettement ces deux écoulements et de les observer simultanément. Ces deux techniques permettent de fournir des données sur la dynamique de l'écoulement (telles que la longueur de la recirculation et l'allure de l'écoulement en entrée et en sortie) nécessaires aussi bien à la compréhension des mécanismes de ventilation des parois double-peau qu'à la validation de codes de simulation.

4 Revue. Volume $X - n^{\circ} x/année$



Figure 2 : Visualisation par particules à la sortie du canal (gauche) et structure de l'écoulement dans le canal (droite) pour $Ra^* = 8,2 \times 10^5$ et A/b=10.



Figure 3 : Visualisation par traceurs fluorescents permettant d'observer l'extension de la recirculation du côté de la paroi adiabatique (photo à gauche) et le détail des instabilités présentes (photos au centre et à droite). $Ra^* = 8,2 \times 10^5$ et A/b=10.

2.3. Déroulement des expériences

Les expériences ont été menées pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh modifié (Ra^*). Ce nombre, tenant compte à la fois de l'épaisseur du canal (b) et du rapport d'allongement de la partie chauffée (A/b), est défini par l'équation [1] ciaprès :

Ventilation des parois double-peau 5

$$Ra^* = \frac{g\beta\varphi_p b^4}{kv^2} \frac{b}{A} \Pr$$
[1]

avec g désignant l'accélération de la pesanteur, β , k, v et Pr désignant respectivement le coefficient de dilatation volumique, la conductivité thermique, la viscosité cinématique et le nombre de Prandtl du fluide, et φ_p désignant la densité pariétale de flux de chaleur. Cinq valeurs de Ra* ont été retenues (10^6 , 2×10^6 , 5×10^6 , 10^7 et 2×10^7) et obtenues en ajustant la puissance thermique délivrée par le tissu chauffant.

3. Résultats

3.1. Etude du régime transitoire

Dans un premier temps, nous nous intéressons à l'établissement de l'écoulement dans le canal après la mise en chauffe de la paroi. L'évolution de la dynamique de l'écoulement durant cette phase transitoire est observable au travers de visualisations par particules effectuées dans le plan médian du canal. La Figure 4 présente la structure de l'écoulement dans le canal entier pour cinq instants différents, l'origine des temps (t = 0s) correspondant au début du chauffage. Pour cette expérience, un nombre de Rayleigh modifié $Ra^* = 2 \times 10^7$ et un rapport d'allongement A/b = 5 ont été choisis.

Aux tous premiers instants (t = 60s), on peut observer un écoulement ascendant dans tout le canal. Puis, l'écoulement ascendant n'occupe toute la largeur du canal que sur sa partie inférieure (t = 100s). Sur la partie supérieure, le jet ascendant est maintenant confiné du côté de la paroi partiellement chauffée, tandis qu'apparaît une alimentation du canal en fluide froid depuis sa partie supérieure du côté de la paroi adiabatique. Cet écoulement de retour est très net à partir de t = 115s. Le fluide froid descend le long de la paroi adiabatique sur plus de la moitié de la hauteur du canal, puis est réentraîné vers le haut du canal avec le jet chaud le long de la paroi chauffée. Ce phénomène est accompagné d'un décollement de l'écoulement ascendant au niveau de la paroi adiabatique. Pour les instants suivants (t = 170s et t = 300s), nous observons une dynamique d'écoulement en apparence stabilisée. Mais, bien que les écoulements présentent globalement des structures semblables à ces deux instants, des phénomènes fortement instationnaires sont observables sur la ligne de séparation jet chaud/écoulement de retour et dans l'écoulement de retour. Ce caractère instationnaire avait déjà bien été mis en évidence sur les visualisations par traceurs fluorescents (Figure 3) effectuées avec un rapport d'allongement double (A/b = 10). On peut noter, en particulier, la présence d'instabilités gravitationnelles et de type Kelvin-Helmoltz.

6 Revue. Volume $X - n^{\circ} x/année$

Toutes ces observations confirment la diversité et la complexité des phénomènes dynamiques à prendre en considération afin d'obtenir une prédiction fiable du comportement de l'écoulement.



Figure 4 : Visualisations par traceurs discrets de l'écoulement dans le canal entier à cinq instants du régime transitoire. $Ra^* = 2 \times 10^7$ et A/b = 5.

3.2. Etude du régime établi



Figure 5 : Visualisations par traceurs discrets de l'écoulement dans le canal entier en régime établi (t = 300s) pour $Ra^* = 10^6$, 2×10^6 , 5×10^6 , 10^7 et 2×10^7 et pour A/b = 5.

8 Revue. Volume $X - n^{\circ} x/année$

Dans le paragraphe précédent, nous avons pu observer que la structure de l'écoulement, bien que fortement instationnaire, était globalement stabilisée au bout de 300s. La même observation a pu être faite pour les quatre autres conditions expérimentales pour lesquelles seul Ra* a été modifié. Par contre, cette structure est très différente selon la valeur du nombre de Rayleigh. La Figure 5 permet une comparaison des caractéristiques dynamiques à t = 300s, toujours pour A/b = 5. On y observe des longueurs de recirculation différentes pour $Ra^* = 10^6, 2 \times 10^6, 10^7$ et 2×10^7 . L'entrée du fluide froid par la partie supérieure est bien visible. Le cas $Ra^* = 5 \times 10^6$ est singulier car on n'y observe pas de recirculation, n'y d'entrée de fluide froid par la partie supérieure. Par ailleurs, certaines des structures dynamiques observées pour les différentes conditions expérimentales suggèrent un comportement tridimensionnel, notamment la cellule tourbillonnaire présente au premier tiers inférieur du canal pour $Ra^* = 10^7$.

4. Conclusion

Une étude expérimentale du canal plan vertical chauffé, représentatif des parois de type double-peau, a été menée. L'étude s'est focalisée sur la dynamique de l'écoulement de convection naturelle résultant du chauffage uniforme d'une des parois sur sa moitié centrale. Les techniques de visualisations mises en œuvre ont permis de montrer le caractère fortement instationnaire tant dans la phase d'établissement (début du chauffage) de l'écoulement, qu'en régime établi. Ces visualisations ont confirmé la présence, pour la gamme de nombres de Rayleigh étudiés, d'un écoulement de retour de longueur variable sauf pour un cas singulier ($Ra^* = 5 \times 10^6$). Des structures dynamiques tridimensionnelles ont été observées pour les différents régimes d'écoulement, notamment des instabilités gravitationnelles et de type Kelvin-Helmoltz dans l'écoulement de retour et sur la ligne séparant cet écoulement et le jet chaud confiné au bord de la paroi chauffée. Les résultats de cette étude confirment la difficulté de la prédiction du comportement thermo-aéraulique de telles parois par les outils de simulation numériques.

5. Bibliographie

- Elenbaas W., « Heat dissipation of parallel plates by free convection », *Physica*, vol. 9, n°9, 1942, p. 1-23.
- Sparrow E.M., Chrysler G.M., Azevedo L.F., « Observed flow reversals and measuredpredicted Nusselt numbers for natural convection in a one-sided heated vertical channel », *ASME J. Heat Transfer*, vol. 106, 1984, p. 325-332.
- Webb B.W., Hill D.P., «High Rayleigh number laminar natural convection in an asymmetrical heated vertical channel », *ASME J. Heat Transfer*, vol. 111, 1989, p. 649-656.
- Wirtz R.A., Stutzman R.J., « Experiments on free convection between vertical parallel plates with symmetric heating », ASME J. Heat Transfer, vol. 104, 1982, p. 501-507.