

Régimes d'écoulements dans une enceinte ventilée alimentée par des gaz chauds

Pierre PARANTHOËN*, Michel GONZALEZ, Daniel ALLANO, Amélie DANLOS, Béatrice PATTE-ROULAND

CNRS UMR 6614 CORIA

Bd de l'Université – 76801 Saint Etienne du Rouvray

* (auteur correspondant : Paranthoen@coria.fr)

Résumé - Nous étudions expérimentalement et analytiquement l'écoulement de convection mixte produit par une source de chaleur et de masse dans une enceinte présentant avec l'extérieur deux ouvertures basse E et haute S. Dans cette configuration, trois principaux régimes d'écoulements sont possibles selon la valeur d'un nombre de Froude densitométrique calculé à partir du débit volumique injecté, de la température moyenne sur une verticale proche de E et de la section de l'ouverture supérieure S.

Nomenclature

B	débit de flottabilité, $m^4.s^{-3}$	<i>Indices et exposants</i>	
H	hauteur, m	E	entrée
Q	débit volumique, $m^3.s^{-1}$	S	sortie
U	vitesse, $m.s^{-1}$	∞	extérieur
<i>Symboles grecs</i>		0	buse
ΔT	écart de température, K	$\frac{1}{2}$	mi-hauteur ($H/2$)

1. Introduction

L'écoulement de convection naturelle, mixte ou forcée produit par une source de chaleur dans un espace confiné a été souvent étudié en raison de son intérêt fondamental et pratique. C'est une situation que l'on rencontre, par exemple, dans la ventilation naturelle ou forcée des habitations ou la dynamique des écoulements présents dans les situations d'incendie. Ce problème a été tout d'abord abordé en considérant l'effet d'une source de flottabilité B_0 placée dans une enceinte étanche [1], [2] ou communicant avec l'extérieur par une ou deux ouvertures [3], [4]. Le cas d'une source mixte de flottabilité B_0 et de débit volumique Q_0 placée dans une enceinte ventilée donne lieu à des écoulements plus variés, [5], [6]. Deux principaux régimes de ventilation sont observés: le régime naturel où l'écoulement est entrant par l'ouverture inférieure de hauteur H_E et sortant par l'ouverture supérieure de hauteur H_S ou le régime forcé quand les deux écoulements à travers les ouvertures sont sortants. Après avoir étudié le seul effet de la dimension des ouvertures sur ce phénomène, nous étudions dans cette communication, par une approche analytique puis expérimentale le cas où B_0 , Q_0 , H_S varient.

2. Modèle analytique

Comme le montre la Figure 1, l'enceinte parallépipédique (longueur L , largeur l et hauteur H) est en communication avec l'extérieur par deux ouvertures rectangulaires verticales haute de section $A_S = l \times H_S$ et basse de section $A_E = l \times H_E$. Cette enceinte est alimentée par un panache forcé (B_0, Q_0) injecté verticalement à la base de l'enceinte par une buse rectangulaire (longueur l , largeur D_0). Cet écoulement possède une vitesse initiale U_0 et se trouve à une température ΔT_0 au-dessus de la température extérieure T_∞ .

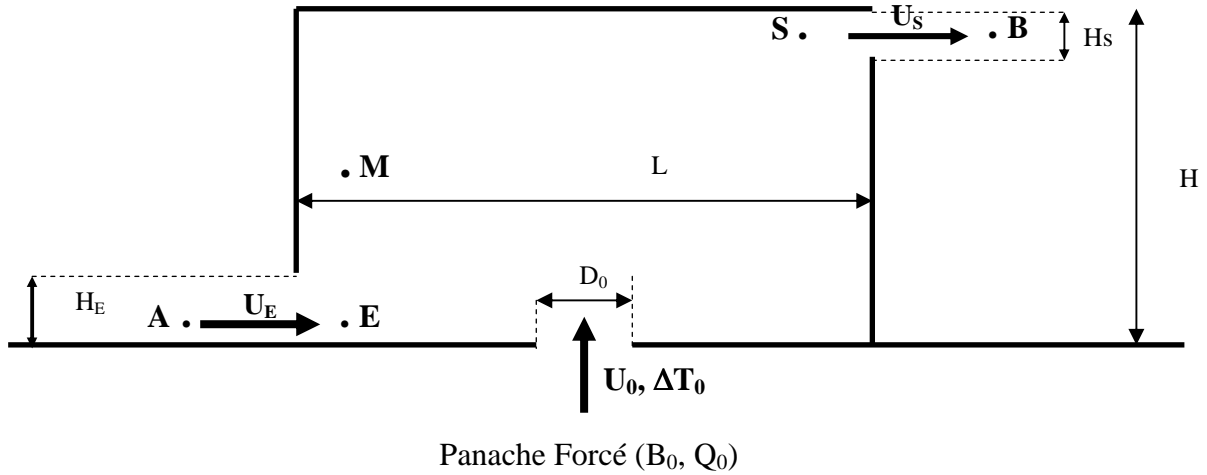


Figure 1 Dispositif expérimental

Dans cette approche analytique, nous étudions uniquement les conditions d'existence du régime naturel pour déterminer les conditions de transition entre les deux régimes. Dans ce régime naturel, on considère qu'il existe un écoulement de vitesse U_E entrant par l'ouverture inférieure E de section A_E et un écoulement de vitesse U_S sortant par l'ouverture supérieure S de section A_S . On suppose que ces ouvertures sont espacées dans la direction verticale de la hauteur H avec $H \gg H_S, H_E$.

On peut écrire les différences de pression existant de part et d'autre de ces deux ouvertures (points A et E et points B et S) en fonction des vitesses U_E et U_S au moyen du principe de Bernoulli, puis les différences de pression à l'intérieur et à l'extérieur de l'enceinte sur deux verticales passant par E et B au moyen du principe de l'hydrostatique.

$$P(H) - P_{\text{ext}}(H) = \frac{1}{2} \rho U_S^2 \quad P_{\text{ext}}(0) - P(0) = \frac{1}{2} \rho U_E^2$$

$$P(H) - P(0) = -\rho g H \quad P_{\text{ext}}(0) - P_{\text{ext}}(H) = \rho_{\text{ext}} g H$$

Par ailleurs, en décomposant la différence de pression ($P(H) - P_{\text{ext}}(H)$) entre l'extérieur et l'intérieur au niveau de l'ouverture S et en utilisant les relations précédentes on obtient :

$$U_S^2 + U_E^2 = 2(\rho_{\text{ext}} - \rho)g H / \rho \quad (1)$$

(1) permet de relier les débits entrant Q_E et sortant Q_S en utilisant les relations $Q_E = C_E A_E U_E$ et $Q_S = C_S A_S U_S$ où C_E et C_S sont les coefficients de débit associés aux ouvertures E et S.

$$(Q_S/Q_0)^2 + (C_S A_S / C_E A_E)^2 (Q_E/Q_0)^2 = (2\Delta\rho/\rho) g H (C_S A_S)^2 / Q_0^2$$

On peut définir deux nouveaux paramètres $\alpha = C_S A_S / C_E A_E$ et $\overline{Fr} = Q_0^2 / (\overline{\Delta\rho}/\rho) g H (C_S A_S)^2$ que l'on utilisera dans le reste de l'étude. Comme la valeur de $(\Delta\rho/\rho)$ n'est pas forcément constante sur la verticale considérée, on associe à \overline{Fr} la moyenne spatiale:

$$(\overline{\Delta\rho}/\rho) = (1/H) \int_0^H \Delta\rho/\rho dy .$$

En appelant $q_E^* = Q_E/Q_0$ et $q_S^* = Q_S/Q_0$, le système se limite aux équations suivantes :

$$\begin{aligned} q_S^{*2} + \alpha^2 q_E^{*2} &= 2/\overline{Fr} \\ q_S^* &= 1 + q_E^* \quad \text{où } q_E^* \text{ et } q_S^* \geq 0 \end{aligned}$$

qui conduisent à l'équation: $(1 + \alpha^2) q_E^{*2} + 2q_E^* + (1 - 2/\overline{Fr}) = 0$ (2)

En résolvant (2), on montre que le régime naturel existe pour $\overline{Fr} < 2$ car il y a au moins une solution positive qui correspond à la plus grande racine de (2). On obtient dans ce cas:

$$q_E^* = \frac{-1 + \sqrt{2/\overline{Fr}(1 + \alpha^2(1 - \overline{Fr}/2))^{1/2}}}{1 + \alpha^2} \quad \text{et} \quad q_S^* = \frac{\alpha^2 + \sqrt{2/\overline{Fr}(1 + \alpha^2(1 - \overline{Fr}/2))^{1/2}}}{1 + \alpha^2}$$

Nous avons ainsi mis en évidence que le régime naturel était possible pour $\overline{Fr} < 2$ où le nombre de Froude densitométrique est fonction des caractéristiques de l'ouverture S mais également de Q_0 , $(\overline{\Delta\rho}/\rho)$ et H. Les caractéristiques de l'ouverture E n'interviennent pas directement dans cette expression mais apparaissent toutefois par l'intermédiaire de α dans l'expression des débits. Dans le cas particulier où $\overline{\Delta\rho}/\Delta\rho_0 = 1$, en introduisant $B_0 = Q_0 g \Delta\rho_0/\rho$, on retrouve la relation donnée dans [5] prévoyant une transition entre les deux régimes pour $(Q_0^3/B_0 H (C_S A_S)^2) = 2$.

3. Dispositif expérimental et méthodes de mesures

La maquette utilisée a pour dimensions : (500x250x200mm³). L'ouverture E a une hauteur $H_E = 36$ mm et une largeur $l_E = 225$ mm en raison des montants. La seconde ouverture S située sur la partie supérieure de la face latérale opposée a même largeur $l_S = l_E$ et une hauteur H_S pouvant être ajustée aux valeurs suivantes : 0, 7, 17, 27, 37 et 46mm. Ces ouvertures relient l'intérieur de l'enceinte à un milieu extérieur au repos, à la pression atmosphérique P_0 et à la

température T_0 . Les parois verticales en verre permettent des visualisations. Cette enceinte est alimentée en air chaud par une buse rectangulaire de largeur $D_0=30\text{mm}$ et de longueur $l_0=250\text{mm}$ au moyen d'un écoulement issu d'un convergent vertical muni de grilles et de résistances chauffantes et alimenté par de l'air comprimé. Le débit volumique Q_0 et la différence de température ΔT_0 en sortie de buse sont contrôlés par un débitmètre Alicat et deux thermocouples de type J reliés à une centrale d'acquisition GL1. Des visualisations ont été réalisées en ensemençant l'écoulement de panache avec de l'encens. L'écoulement au voisinage de E est éclairé au moyen d'une nappe laser de 1mm d'épaisseur fournie par un laser pulsé à 16Hz. Les images sont enregistrées au moyen d'un système d'acquisition R&D Vision comprenant une caméra CCD 1280x1024 pixels et une centrale d'acquisition.

4. Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux présentés montrent, une fois le régime stationnaire atteint, des visualisations de l'écoulement apparaissant à l'ouverture E de l'enceinte quand on fait varier successivement, la dimension verticale de l'exutoire H_S , le débit volumique Q_0 et l'écart de température $\Delta T_{1/2}$ tout en gardant constante la hauteur $H_E = 36\text{mm}$. $\Delta T_{1/2}$ représente l'écart de température entre la température en M (point localisé à $H/2$ du côté ouverture E) et la température extérieure. Nous supposons que $\Delta T_{1/2}$ n'est pas trop différente de l'écart de température moyen ΔT calculé sur la verticale passant par M.

4.1 Influence de la hauteur de l'exutoire H_S sur l'écoulement en E

Dans ce cas, $Q_0 = 147\text{l/mn}$ et $\Delta T_{1/2}=24\text{K}$ et H_S prend les valeurs : 7, 17, 27, 37 et 46mm. Les visualisations sont présentées sur la Figure 2. Pour les plus grandes valeurs de H_S (37 et 46mm), on observe que les gaz chauds issus du panache ne sortent pas par E après avoir circulé dans l'enceinte, (Figure 2a). Simultanément du fluide extérieur non ensemenché pénètre à l'intérieur de l'enceinte. Pour les plus faibles valeurs de H_S (7 et 17mm), on note que l'air extérieur ne pénètre plus dans l'enceinte, (Figure 2c). Pour des valeurs intermédiaires de H_S (27mm), l'écoulement est plus instable et entrant par le bas de E et sortant par le haut de E, (Figure 2b).

4.2 Influence de Q_0 sur l'écoulement en E

Dans ce cas, $H_S = 27\text{mm}$ et $\Delta T_{1/2}=24\text{K}$ et Q_0 varie entre 100 et 250 l/mn. Les visualisations sont présentées sur la Figure 3. Pour les plus grandes valeurs de Q_0 , les gaz chauds issus du panache sortent par E après avoir circulé dans l'enceinte, (Figure 3c). Pour les plus faibles valeurs de Q_0 , on note que le débit s'inverse et que du fluide extérieur non ensemenché

pénètre à l'intérieur de l'enceinte, (Figure 3a). Pour des valeurs intermédiaires de Q_0 il est également possible d'observer un écoulement instable entrant par le bas de E et sortant par le haut de E, (Figure 3b).

4.3 Influence de ΔT_0 sur l'écoulement en E

Dans ce cas, $Q_0 = 147$ l/mn, $H_S = 27$ mm et l'écart de température $\Delta T_{1/2} = 11,4$ K, 27,6K. Les visualisations sont présentées sur la Figure 4. Pour le plus faible écart de température, on observe à la fois un écoulement entrant par la partie basse de l'ouverture et sortant par la partie haute, (Figure 4a). Si on diminue l'écart de température, l'écoulement est uniquement sortant, (Figure 4b).

5. Discussion

Les résultats précédents montrent clairement que trois régimes d'écoulement sont possibles dans la situation étudiée. Les régimes naturel et forcé ont déjà été mentionnés dans les études précédentes. Le régime intermédiaire est caractérisé par une entrée d'air extérieur par la partie basse de l'ouverture E et une sortie des gaz chauds par la partie supérieure de E. Pour caractériser les différentes situations étudiées nous avons approximé le nombre de Froude moyen défini au paragraphe $\alpha = C_S A_S / C_E A_E$ et $\overline{Fr} = Q_0^2 / ((\Delta\rho/\rho)gH(C_S A_S)^2)$ par $Fr = Q_0^2 /$. Les valeurs calculées de Fr en supposant $C_S = 0,7$ ont été mentionnées dans la légende des Figures 2 à 4. Il apparaît que la transition entre les régimes naturel et forcé correspondant au régime intermédiaire intervient dans chaque cas pour une valeur du nombre de Froude densitométrique voisine de 2. Cette valeur correspond à celle déterminée par le modèle analytique simple décrit au paragraphe 2.

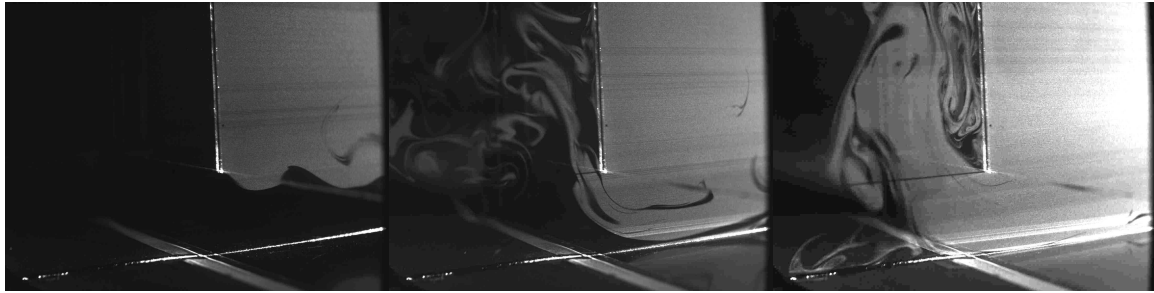
6. Conclusion

Dans cette communication, nous avons montré expérimentalement que l'écoulement produit par une source de chaleur et de masse placée dans une enceinte présentant avec l'extérieur deux ouvertures basse E et haute S pouvait présenter trois principaux régimes : naturel (entrant E, sortant S), forcé (sortant E, sortant S) et intermédiaire (entrant-sortant E, sortant S). Ces régimes dépendent de la valeur d'un nombre de Froude calculé à partir du débit volumique, de la température moyenne sur une verticale près de l'ouverture E et de la section de l'ouverture supérieure.

Références

[1] W.D. Baines and J.S. Turner, Turbulent buoyant convection from a source in a confined region, *Journal of Fluid Mechanics*, 37 (1969), 51–80.

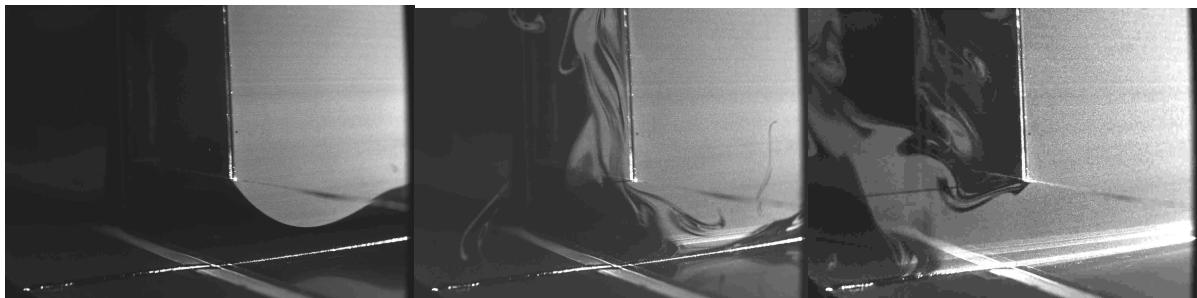
- [2] G. Cesini, M. Paroncini, G. Cortella and M. Manzan , Natural Convection from a Horizontal Cylinder in a Rectangular Cavity, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, 42, (1999), 1801-1811.
- [3] P.F Linden, G.F.Lane-Serff, D.A. Smeed, Emptying filling boxes: the fluid mechanics of natural ventilation, *Journal of Fluid Mechanics*, 212, (1990), 309-336.
- [4] C. Gladstone, A.W. Woods, On buoyancy-driven ventilation of a room with a heated floor, *Journal of Fluid Mechanics*, 441, (2001), 293-314.
- [5] A.W. Woods, C.P. Caulfield and J.C. Phillips, Blocked natural ventilation: the effect of a source mass flux, *Journal of Fluid Mechanics*, 495, (2003), 119-133.
- [6] D.Allano, A.Danlos, B.Patte-Rouland, M.Gonzalez, P.Paranthoën, Ventilation naturelle d'une enceinte soumise à une injection de gaz chauds, Congrès SFT08, Toulouse, Mai 2008



(a) $H_s=37\text{mm}$ ($Fr=1,29$) (b) $H_s=27\text{mm}$ ($Fr=2,16$) (c) $H_s=17\text{mm}$ ($Fr=4,71$)

Figure 2

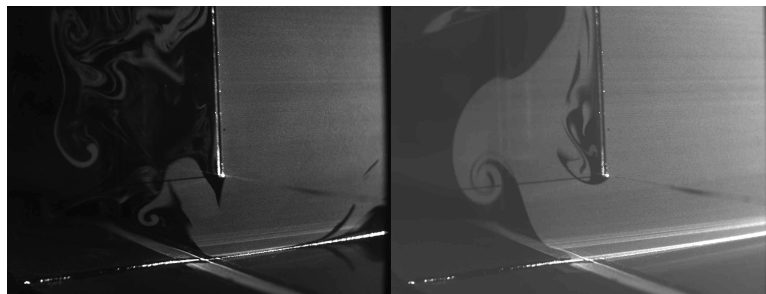
Influence de H_s sur le régime d'écoulement à l'entrée ($Q_0=147 \text{ l/mn}$, $\Delta T_{1/2}=24\text{K}$)



(a) $Q_0=107\text{l/mn}$ ($Fr=1,06$) (b) $Q_0=147 \text{ l/mn}$ ($Fr=2,01$) (c) $Q_0=226 \text{ l/mn}$ ($Fr=4,6$)

Figure 3

Influence de Q_0 sur le régime d'écoulement à l'entrée ($H_s=27\text{mm}$, $\Delta T_{1/2}=24\text{K}$)



(a) $\Delta T_{1/2}=27,6\text{K}$ ($Fr=1,95$) (b) $\Delta T_{1/2}=11,4\text{K}$ ($Fr=4,7$)

Figure 4

Influence de $\Delta T_{1/2}$ sur le régime d'écoulement à l'entrée ($H_s=27\text{mm}$, $Q_0=147 \text{ l/mn}$,)