

Ventilation naturelle d'une enceinte soumise à une injection de gaz chauds.

Daniel Allano, Amélie Danlos, Béatrice Patte-Rouland, Michel Gonzalez, Pierre Paranthoën*

UMR 6614 CNRS CORIA

Bd de l'Université – 76801 Saint Etienne du Rouvray

*(auteur correspondant : Paranthoen@coria.fr)

Résumé - Nous étudions expérimentalement l'écoulement de convection naturelle produit par une source de chaleur et de masse dans une enceinte présentant avec l'extérieur deux ouvertures basse et haute. Nous montrons que lorsque les débits volumiques et de flottabilité et la section de l'ouverture inférieure sont constants, deux régimes d'écoulements sont possibles selon la valeur de la section de l'ouverture supérieure.

Nomenclature

B débit de flottabilité, $m^4 \cdot s^{-3}$
 H hauteur d'une ouverture, m
 P puissance, W
 Q débit volumique, $m^3 \cdot s^{-1}$
 U vitesse, $m \cdot s^{-1}$

Symboles grecs

ΔT écart de température, K
 ΔP différence de pression, Pa
Indices et exposants
 e entrée, s sortie, θ extérieur

1. Introduction

L'écoulement de convection naturelle produit par une source de chaleur dans un espace confiné est une situation souvent étudiée [1] en raison de son intérêt fondamental et pratique. Ce problème est important si l'on s'intéresse à la compréhension de problèmes comme la ventilation naturelle des constructions ou la dynamique des écoulements présents dans les situations d'incendie. Si cette situation a été souvent abordée en considérant une source de flottabilité dans une enceinte parfaitement étanche [2], d'autres études considèrent ce problème en présence d'une ouverture [3] ou deux ouvertures avec l'extérieur [4], [5]. Ces études ont mis en évidence l'existence de régimes de ventilation de mélange ou de déplacement. Dans le premier cas, l'air froid et l'air chaud se mélangent au sein de l'enceinte tandis que dans le second cas l'absence de mélange se traduit par une forte stratification. Ces approches ont été menées en supposant de pures sources de flottabilité. Toutefois dans certaines situations réelles, la source de masse associée à la source de flottabilité, peut avoir une influence importante sur le mélange [6]. C'est dans cette configuration que nous nous plaçons, en recherchant dans une première étape la structure des écoulements présents au sein de l'enceinte. Nous étudierons dans le futur la structure du champ thermique.

2. Dispositif expérimental et méthodes de mesures

Cette étude est réalisée au moyen d'une maquette de forme parallélépipédique représentée sur la Figure 1 et de dimensions suivantes : longueur $L=500\text{mm}$, largeur $l=250\text{mm}$, hauteur $H=200\text{mm}$. Une première ouverture E , située en partie basse, a une hauteur $H_e=36\text{mm}$ et une largeur $l_e=225\text{ mm}$ en raison des montants. La seconde ouverture S , l'exutoire, située sur la partie supérieure de la face latérale opposée a une largeur $l_s=l_e$ et une hauteur H_s pouvant être ajustée aux valeurs suivantes : 0, 6, 16, 26, 36 et 46mm. Ces ouvertures permettent de relier 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 et des mesures de vitesse par PIV. Cette enceinte est alimentée en air chaud par une buse rectangulaire de largeur $D_p=30\text{mm}$ et de longueur $l_p=250\text{mm}$ au moyen d'un écoulement généré par des résistances chauffantes placées dans un convergent vertical ouvert à sa base. En maintenant une puissance constante $P=300\text{W}$, la vitesse U_0 et la différence de température ΔT_0 en sortie de buse sont respectivement de $78\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ et de 45K et les débits volumique $Q_0=ID_pU_0$ et de flottabilité $B_0=Q_0g\Delta T_0/T_0$ ont pour valeurs respectives $5,26 \cdot 10^{-3}\text{m}^3\text{s}^{-1}$ et $8,08 \cdot 10^{-3}\text{m}^4\text{s}^{-3}$. Le nombre de Froude $Fr=U_0^2/gH(\Delta T_0/T_0)$ est de l'ordre de 2. Cet écoulement peut être considéré comme un panache forcé, [7]. Le système d'axes utilisé est présenté sur la Figure 1.

Des visualisations ont été réalisées en ensemençant l'écoulement de panache avec de l'encens et en éclairant l'écoulement à l'intérieur de l'enceinte ou près des ouvertures au moyen d'une nappe laser de 1mm d'épaisseur. Les images sont enregistrées au moyen d'un système d'acquisition de la Société R&D Vision comprenant une caméra CCD 1280×1024 pixels et une centrale d'acquisition. Le même système a permis de faire de la PIV standard (cross corrélation, fréquence d'acquisition de 8Hz , décalage temporel de $600\mu\text{s}$, calcul itératif par mailles adaptatives de 64×64 à 32×32 avec recouvrement de 50%). Dans ce cas, l'écoulement de panache est ensemenché en amont de fines gouttelettes d'huile d'olive. Pour tenir compte de la divergence de la nappe laser à l'intérieur de l'enceinte, le champ de mesure a été limité à une moitié de l'enceinte. Pour chaque situation étudiée, cent champs PIV sont enregistrés. Des mesures de pression pariétale moyenne ont été également réalisées au moyen d'un micro manomètre Furness Control FC14.

3. Résultats expérimentaux

Les premiers travaux ont consisté à étudier, une fois le régime stationnaire atteint, l'écoulement dans l'enceinte en faisant varier la dimension verticale de l'exutoire S .

3.1 Influence de la hauteur de l'exutoire H_s sur la sortie des gaz de l'enceinte par l'entrée de hauteur $H_e = 36\text{mm}$

Dans cette étude, H_s prend les valeurs : 0, 6, 16, 26, 36 et 46mm. Nous avons noté que pour H_s égal à 36mm ou 46mm, les gaz chauds issus du panache sortent directement par l'exutoire S après avoir circulé dans l'enceinte. Simultanément du fluide extérieur pénètre par l'ouverture E de l'enceinte. Ce phénomène apparait clairement sur les visualisations de la Figure 2b où pour $H_s=46\text{mm}$ de l'air non ensemencé pénètre par l'ouverture E. Lorsque la hauteur de l'exutoire décroît, on note que le débit entrant par E diminue, s'inverse et devient sortant. L'air extérieur ne pénètre plus dans l'enceinte pour $H_s=26\text{mm}$ comme le montre la Figure 2a. En observant E de l'extérieur, on confirme sur les Figures 2c et 2d que l'écoulement est entrant pour $H_s=46\text{mm}$ et sortant pour $H_s=16\text{mm}$. Il existe ainsi deux régimes d'écoulement caractérisés soit par deux écoulements sortants ou par un écoulement sortant et un écoulement entrant. Pour des valeurs particulières de H_s il est également possible d'observer un écoulement instable entrant par le bas de E et sortant par le haut de E. Ces régimes sont ainsi contrôlés par les dimensions de l'ouverture supérieure S.

3.2 Champ de vitesse à l'intérieur de l'enceinte pour différentes hauteurs H_s

Les champs de vitesse moyenne et d'écart-type $(\overline{U_y^2})^{1/2}/U_0$ obtenus pour $H_e=36\text{mm}$, $H_s=16\text{mm}$ et 46mm sont présentés sur la Figure 3. Ces champs sont obtenus dans le plan xOy dans la moitié gauche de l'enceinte située du côté de l'ouverture E. Les écoulements mesurés montrent le développement du panache qui vient heurter le plafond de l'enceinte puis s'écoule le long de ce dernier. Il existe au centre de cette moitié gauche, une grande recirculation où les vitesses sont très faibles. On constate une inclinaison différente du panache en fonction de la valeur de H_s . Pour $H_s=16\text{mm}$, le panache reste vertical et pour $H_s=46\text{mm}$ le panache est incliné vers la paroi de l'ouverture supérieure S. Le niveau de l'intensité des fluctuations de vitesse longitudinale supérieur à 25% dans les deux situations étudiées atteste du caractère turbulent de ce panache forcé. Ces résultats ne permettent cependant pas de montrer clairement la nature de l'écoulement sortant ou entrant par l'ouverture E en raison du faible nombre de particules éclairées à proximité de E.

3.3 Champ de pression à l'intérieur de l'enceinte pour différentes hauteurs H_s

Afin de compléter les observations précédentes, nous avons mesuré les différences de pression $\Delta P_E = P(x=-225\text{mm}, y=25\text{mm}) - P_0$ et $\Delta P_S = P(x=225\text{mm}, y=190\text{mm}) - P_0$ en fonction de H_s quand $H_e=36\text{mm}$. Ces résultats, présentés sur la Figure 4, montrent que la différence de pression ΔP_S en S est toujours positive et confirment que l'écoulement est toujours sortant. En

revanche la différence de pression ΔP_E est positive uniquement pour $H_s < 29\text{mm}$ et devient négative pour les valeurs de H_s supérieures. Ce changement de signe explique que l'écoulement à l'entrée peut être entrant ou sortant. Notons toutefois que c'est l'ensemble de la distribution de pression $\Delta P_E(y)$ avec $0 < y < H_e$ qui contrôle l'écoulement à travers E.

4. Discussion

Woods et al. [6] ont montré dans une situation similaire à celle que nous considérons qu'il était possible d'obtenir deux régimes de ventilation. Dans leur situation, les sections A_H et A_S des ouvertures inférieures et supérieures étaient constantes et les débits volumiques Q_0 et de flottabilité B_0 étaient variables. En prenant en compte la modification de la pression hydrostatique due au chauffage, ils déduisaient que si Q_0 était inférieur à $(2 B_0 H')^{1/3} (c_s A_S)^{2/3}$ il existait entre l'enceinte et l'extérieur un échange naturel caractérisé par un écoulement sortant par l'ouverture supérieure et un écoulement entrant par l'ouverture inférieure. c_s est ici un coefficient de décharge de l'ordre de 0,6, [3] et H' est la distance verticale entre les ouvertures. Quand la condition précédente n'était pas respectée, l'échange naturel devenait bloqué et un écoulement sortant apparaissait à travers les deux ouvertures. La relation précédente utilisée avec Q_0 et B_0 constants montre que cet échange naturel existe lorsque la hauteur de l'ouverture supérieure H_s est plus grande qu'une hauteur critique $H_{sc} = (1/c_s l_s) Q_0^{3/2} / (2 B_0 H')^{1/2}$. En remplaçant c_s , l_s , Q_0 , B_0 et $H' = H - 1/2(H_s + H_e)$ par leurs valeurs, on obtient pour H_{sc} une valeur de l'ordre de 50mm. Cette valeur, supérieure à la valeur expérimentale de 29mm observée, pourrait s'expliquer dans notre expérience par l'influence des effets d'inertie dans la variation de pression, effet qui n'est pas pris en compte dans l'approche de Woods et al. [6].

5. Conclusion

Dans cette communication, nous avons présenté les premiers résultats d'une étude expérimentale consacrée au mouvement d'un fluide à l'intérieur d'une enceinte sous l'action d'un panache forcé turbulent quand cette enceinte est en contact avec l'extérieur au moyen de deux ouvertures verticales situées respectivement sur les parties supérieures et inférieures de deux parois latérales opposées. Pour des débits volumiques et de flottabilité du panache constants, au moins deux régimes d'écoulement peuvent apparaître entre l'enceinte et l'extérieur. Pour des valeurs élevées de la hauteur de l'ouverture supérieure H_s , il existe un régime naturel caractérisé par un écoulement entrant par l'ouverture inférieure et un écoulement sortant par l'ouverture supérieure. Quand on diminue H_s , on peut obtenir un régime forcé où les deux écoulements à travers les ouvertures sont sortants.

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. Bouzinaoui, P. Vallette, F. Lemoine, J. Fontaine, R. Devienne, Experimental study of thermal stratification in ventilated confined spaces, *Int. Journal of Heat Mass Transfer*, 48, (2005), 4121-4131.
- [6] 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.
- [7] B.R. Morton, Forced plumes, *Journal of Fluid Mechanics*, 5, (1959), 151-163.

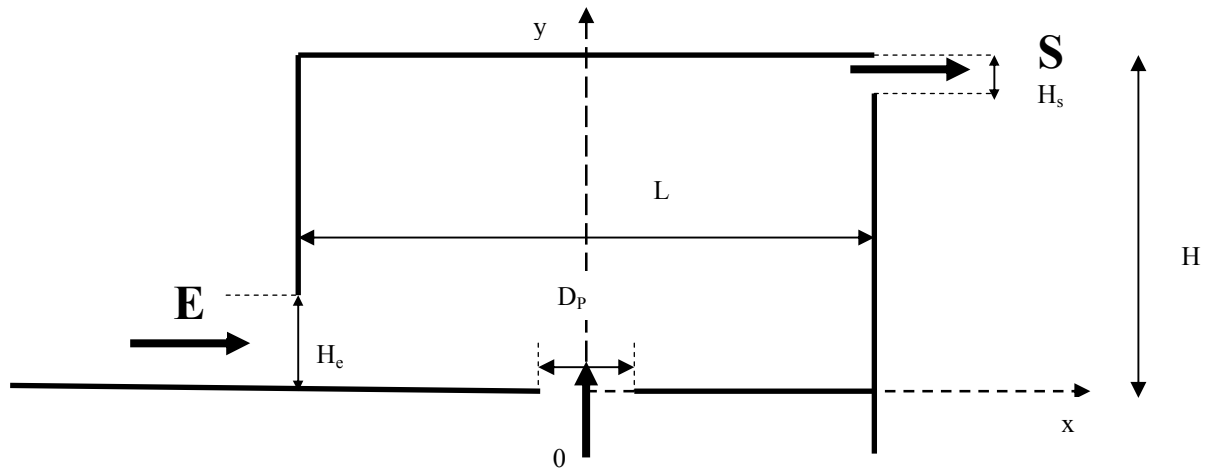


Figure 1 : Dispositif expérimental

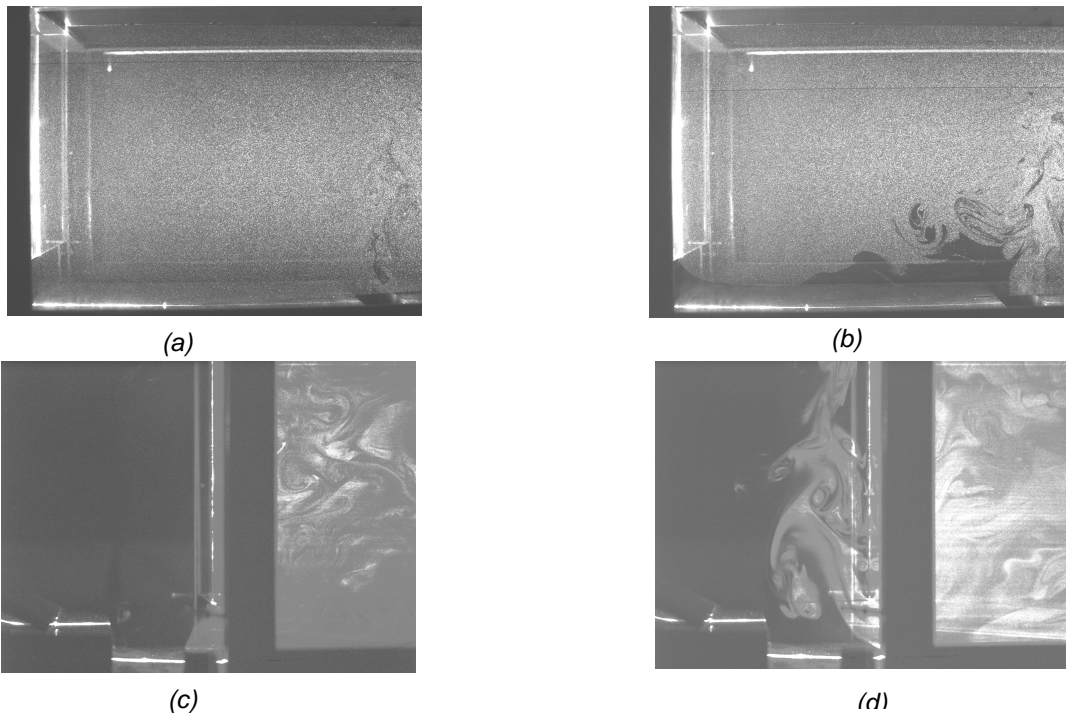


Figure 2 : Visualisations de l'écoulement dans la moitié de l'enceinte située du côté de E : (a) $H_s=26$ mm, (b) $H_s =46$ mm et en sortie de E : (c) $H_s=46$ mm , (d) $H_s =16$ mm ; $H_e=36$ mm

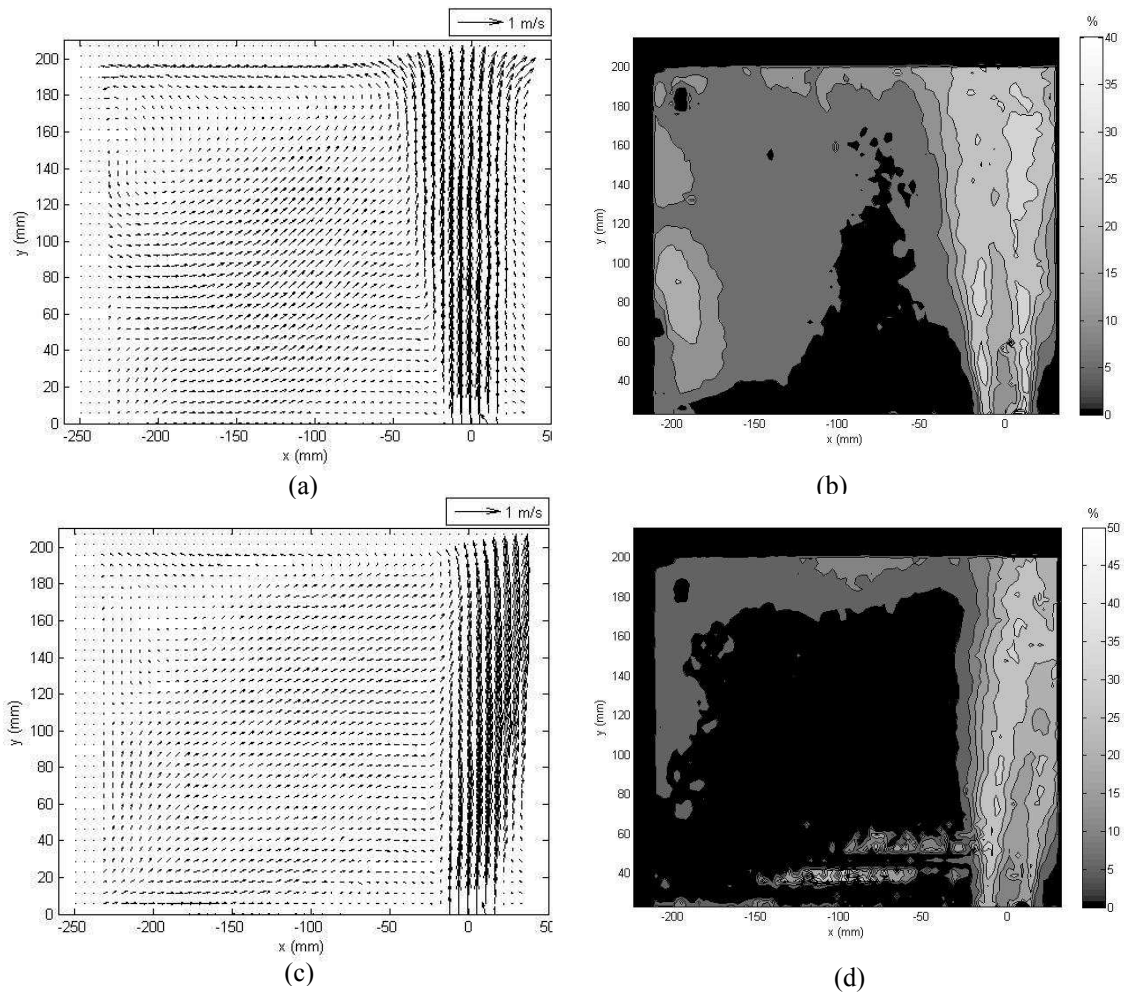


Figure 3 : Champs de vitesse et intensité des fluctuations de vitesse longitudinale dans la moitié de l'enceinte située près de l'ouverture E; $H_e = 36\text{mm}$; $H_s = 16\text{mm}$: (a) et (b) ; $H_s = 46\text{mm}$: (c) et (d)

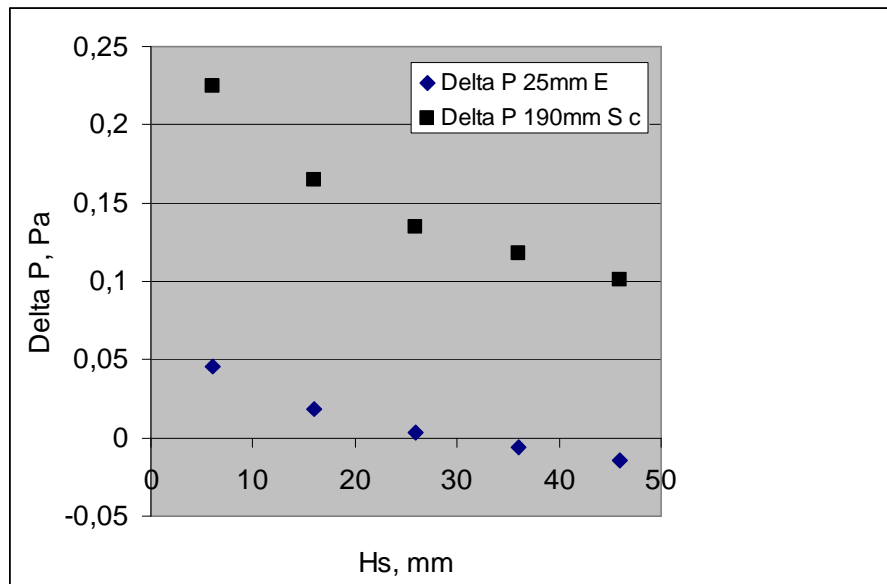


Figure 4 : Variation de la différence de pression de part et d'autre des ouvertures E et S en fonction de la hauteur de l'exutoire H_s .