

# Champs dynamiques et thermiques dans une enceinte ventilée en régimes naturel, intermédiaire et bloqué ; cas stationnaire

Pierre PARANTHOËN\*, Béatrice PATTE-ROULAND, Armand NGONDIEP, Daniel ALLANO, Michel GONZALEZ

CNRS UMR 6614 CORIA  
Bd de l'Université – 76801 Saint Etienne du Rouvray  
\*(auteur correspondant : [Paranthoen@coria.fr](mailto:Paranthoen@coria.fr))

**Résumé** - Nous étudions analytiquement et expérimentalement l'écoulement produit par une source de gaz chaud dans une enceinte présentant avec l'extérieur deux ouvertures basse E et haute S. Dans cette configuration, trois régimes d'écoulements sont possibles selon la valeur d'un nombre de Froude densitométrique. Quelques résultats expérimentaux de vitesse et de température sont présentés.

## Nomenclature

|                                |                                     |                             |                                    |
|--------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| $A$                            | section d'une ouverture, $m^2$      | $\rho$                      | masse volumique, $kg \cdot m^{-3}$ |
| $C$                            | coefficient de débit                | $\Delta T$                  | écart de température, $K$          |
| $H$                            | hauteur de l'enceinte, $m$          | <i>Indices et exposants</i> |                                    |
| $Q$                            | débit volumique, $m^3 \cdot s^{-1}$ | $E$                         | ouverture inférieure               |
| $T$                            | température, $K$                    | $S$                         | ouverture supérieure               |
| $U$                            | vitesse, $m \cdot s^{-1}$           | $ext$                       | extérieur                          |
| <i>Symboles grecs</i>          |                                     | $int$                       | intérieur                          |
| $\alpha = C_S A_S / C_E A_E$   |                                     | $H$                         | moyenné sur la hauteur H           |
| $\beta = \rho_{int} / \rho_0$  |                                     | $0$                         | buse                               |
| $\gamma = \rho_{ext} / \rho_0$ |                                     | $m$                         | massique                           |

## 1. Introduction

L'étude que nous proposons concerne les régimes d'écoulements générés par une source de gaz chauds dans une enceinte ventilée. C'est une situation que l'on rencontre, par exemple, dans la ventilation naturelle ou forcée des habitations, dans le refroidissement des équipements électroniques, la dynamique des écoulements présents dans les situations d'incendie ou de fuites de gaz légers. Cette situation relativement peu étudiée expérimentalement donne lieu à des régimes d'écoulement variés, [1], [2]. Cette étude expérimentale est réalisée dans une enceinte parallélépipédique en communication avec l'extérieur par deux ouvertures rectangulaires verticales S et E, de sections  $A_S$  et  $A_E$ , situées respectivement en parties haute et basse de l'enceinte, Figure 1. Cette enceinte est alimentée à sa base par un panache forcé de débit volumique  $Q_0$  et de température  $T_0 = T_{ext} + \Delta T_0$  injecté verticalement par une buse rectangulaire de section  $A_0$ . Quand ce panache forcé se développe, il chauffe progressivement l'intérieur de l'enceinte et modifie les conditions de pression entre l'intérieur et l'extérieur de celle-ci. Selon les valeurs de  $Q_0$ ,  $\Delta T_0$  et des dimensions des ouvertures on peut observer, quand le régime stationnaire est atteint, différents régimes d'écoulements. Le régime naturel avec un écoulement entrant par E et sortant par S, le

régime bloqué avec des écoulements sortant à la fois par E et S, le régime intermédiaire où l'écoulement est toujours sortant par S mais est entrant par le bas de E et sortant par le haut de E.

Une première approche analytique a été menée pour des écarts de température  $\Delta T_0$  relativement faibles permettant d'utiliser une hypothèse de type Boussinesq. Dans ces conditions, nous avons pu montrer que les régimes d'écoulement dans l'enceinte pouvaient être caractérisés par un nombre de Froude densitométrique  $\overline{Fr}_H = Q_0^2 / (\overline{\Delta\rho}_H / \rho_{ext}) g H (C_S A_S)^2$  où  $Q_0$  est le débit volumique injecté,  $H$  la hauteur de l'enceinte,  $\overline{\Delta\rho}_H$  la différence de masse volumique moyenne entre l'intérieur et l'extérieur de l'enceinte,  $A_S$  la section de l'ouverture supérieure et  $C_S$  le coefficient de contraction du débit sortant par l'ouverture supérieure, [3]. Cette analyse montre que la ventilation est naturelle pour  $\overline{Fr}_H < 2$  et bloquée pour  $\overline{Fr}_H > 2$ .

Dans cette communication, nous étendons cette approche analytique au cas non Boussinesq et nous présentons de nouveaux résultats concernant les champs de vitesse et de température.

## 2. Modèle analytique

Dans cette approche analytique, nous étudions uniquement les conditions d'existence du régime naturel pour déterminer les conditions de transition entre les régimes. Dans ce régime naturel, il existe un écoulement de vitesse  $U_E$  entrant par E et un écoulement de vitesse  $U_S$  sortant par S. On suppose que ces ouvertures sont espacées, dans la direction verticale, de  $H$  où  $H \gg H_S$  et  $H_E$ . Les différences de pression existant de part et d'autre de E et S s'expriment en fonction des vitesses  $U_E$  et  $U_S$  au moyen du principe de Bernoulli, puis celles à l'intérieur et à l'extérieur de l'enceinte sur deux verticales peuvent s'écrire au moyen du principe de l'hydrostatique.

$$P_{int}(H) - P_{ext}(H) = \frac{1}{2} \rho_{int} U_S^2 \quad P_{ext}(0) - P_{int}(0) = \frac{1}{2} \rho_{ext} U_E^2$$

$$P_{int}(H) - P_{int}(0) = - \int_0^H g \rho_{int}(z) dz = - \overline{\rho_{int H}} g H \quad P_{ext}(0) - P_{ext}(H) = \rho_{ext} g H$$

En décomposant  $(P_{int}(H) - P_{ext}(H))$  et en utilisant les relations précédentes on obtient :

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

équation qui permet de relier les débits massiques entrant  $Q_{mE}$  et sortant  $Q_{mS}$  en utilisant les relations  $Q_{mE} = \rho_{ext} C_E A_E U_E$  et  $Q_{mS} = \rho_{int} C_S A_S U_S$  où  $C_E$  et  $C_S$  sont des coefficients de débit.

$$(Q_{mS} / Q_{m0})^2 + (C_S A_S / C_E A_E)^2 (Q_{mE} / Q_{m0})^2 = (2 \overline{\Delta\rho}_H / \rho_{ext}) g H (C_S A_S)^2 / Q_{m0}^2$$

La relation de conservation permet d'écrire dans ce régime naturel:  $Q_{mS} = Q_{m0} + Q_{mE}$

En appelant  $q_{mE}^* = Q_{mE} / Q_{m0}$ , le système se limite à l'équation suivante pour  $q_{mE}^*$  :

$$(1 + \alpha^2 \beta / \gamma) q_{mE}^{*2} + 2 q_{mE}^* + (1 - 2 \beta \gamma / \overline{Fr}_H) = 0 \quad (2)$$

Où  $\alpha = C_S A_S / C_E A_E$   $\beta = \rho_{int} / \rho_0$   $\gamma = \rho_{ext} / \rho_0$   $\overline{Fr}_H = Q_0^2 / (\overline{\Delta\rho}_H / \rho_{ext}) g H (C_S A_S)^2$

En résolvant (2), on montre que la condition pour que le régime naturel existe se traduit par  $\overline{Fr}_H^* = \overline{Fr}_H / \beta \gamma \leq 2$  alors que dans le cas de l'hypothèse de Boussinesq il fallait que  $\overline{Fr}_H \leq 2$ . La prise en compte des variations de masse volumique étend ainsi le domaine du régime naturel.

## 3. Dispositif expérimental et méthodes de mesures

La maquette utilisée est en plexiglas et de forme parallélépipédique ( $50 \times 22,5 \times 20 \text{cm}^3$ ). Les ouvertures E et S ont pour sections  $A_E = 3,6 \times 22,5 \text{cm}^2$  et  $A_S = 2,2 \times 22,5 \text{cm}^2$ . Cette enceinte est alimentée en air chaud par une buse rectangulaire de section  $A_0 = 3 \times 22,5 \text{cm}^2$ . L'air est chauffé en

amont dans la chambre de tranquillisation au moyen de deux résistances chauffantes. Le débit massique  $Q_{m0}$  et  $\Delta T_0$  sont contrôlés par un débitmètre Alicat et deux thermocouples de type T.

Des mesures de vitesse ont été réalisées par PIV en ensemençant à la fois l'écoulement de panache au moyen de fines gouttelettes d'huile issues d'un injecteur et l'extérieur de l'enceinte par de la fumée fournie par un générateur de fumée de spectacle. Les gouttelettes d'huile sont introduites dans l'écoulement principal en amont de la chambre de tranquillisation et chauffées lors de leur passage près des résistances chauffantes. La vitesse de sédimentation des plus grosses de ces gouttelettes ( $\sim 2\mu\text{m}$ ) est inférieure au mm/s et leurs constantes de temps dynamique et thermique, de l'ordre d'une dizaine de  $\mu\text{s}$ , leur permettent d'être à la même vitesse et à la même température que l'écoulement d'air chaud quand elles pénètrent dans l'enceinte, [4].

Les écoulements interne et externe sont éclairés au moyen d'une nappe laser de 1mm d'épaisseur par un laser pulsé de fréquence 8Hz fournissant deux impulsions dont le décalage temporel est réglable entre 600 $\mu\text{s}$  et 2,5ms. Les images obtenues au moyen d'une ou deux caméras CCD 1280x1024 pixels sont synchronisées et enregistrées par une centrale d'acquisition. Le champ de vitesse est obtenu par cross corrélation avec un calcul itératif par mailles adaptatives de 64x64 à 32x32 avec recouvrement de 50%.

Des mesures de température ont été réalisées au moyen d'un peigne de thermocouples de type T reliés à une centrale d'acquisition GL1. Ils permettent de déterminer simultanément les températures moyennes à huit hauteurs dans la veine avec une incertitude inférieure au °C.

## 4. Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux sont présentés pour trois situations correspondant aux régimes naturel ( $Q_{m0}=80\text{Nl/mn}$ ,  $\Delta T_0=68\text{K}$ ,  $\overline{Fr_H^*}=1,30$ ), intermédiaire ( $Q_{m0}=130\text{Nl/mn}$ ,  $\Delta T_0=40\text{K}$ ,  $\overline{Fr_H^*}=3,3$ ) et bloqué ( $Q_{m0}=200\text{Nl/mn}$ ,  $\Delta T_0=30\text{K}$ ,  $\overline{Fr_H^*}=7,88$ ). Ils montrent, dans le cas où le régime stationnaire est atteint, les champs de vitesse au niveau des différentes ouvertures et à l'intérieur de l'enceinte ainsi que les profils verticaux de température à l'intérieur de l'enceinte à proximité des ouvertures.

### 4.1 Profils de vitesse au niveau de la buse et des ouvertures

Les profils de la vitesse moyenne longitudinale  $V$  à la sortie de la buse sont à peu près symétriques pour les régimes bloqués et intermédiaires, Figure 2. Pour le régime naturel, on ne note pas de dissymétrie due à l'arrivée d'air en provenance de l'ouverture E. Les profils de vitesse moyenne longitudinale  $U$  à la sortie de l'ouverture supérieure présentent des formes identiques pour les trois régimes et sont caractérisés par un fort entraînement, Figure 3. La valeur croissante de la vitesse observée avec la hauteur est liée à l'augmentation de la différence de pression avec la hauteur. Les profils de vitesse moyenne longitudinale  $U$  mesurés à la sortie de l'ouverture inférieure caractérisent les trois régimes, Figure 4. Pour le régime naturel, les valeurs de  $U$  sont négatives dues à l'air entrant alors qu'elles sont positives pour le régime bloqué. Pour le régime intermédiaire, on note que l'air est entrant dans le bas de l'ouverture E et sortant dans sa partie supérieure.

### 4.2 Champs de vitesse dans l'enceinte

Les champs de vitesse mesurés dans l'enceinte pour les régimes naturels et bloqués sont présentés sur la Figure 5. Dans les deux cas, on observe une zone centrale contrôlée par le panache qui vient impacter le plafond, deux grandes zones de recirculation et une zone de sortie des gaz chauds par l'exutoire S. Pour le régime naturel, l'air extérieur pénètre dans l'enceinte, crée un fort

cisaillement et vient interagir fortement avec le panache. Pour le régime bloqué, une partie de l'air issu du panache contourne une des zones de recirculation avant de s'échapper par l'ouverture E.

### 4.3 Profils verticaux de température

Les profils de température mesurés sur des verticales proches des ouvertures E et S sont tracés sur la Figure 6 pour les trois régimes. Ils montrent une forte stratification dans le régime naturel, une situation mélangée dans le régime bloqué et une situation médiane pour le régime intermédiaire. La décroissance des températures à proximité du plafond indique la présence de conduction avec la paroi supérieure.

## 5. Conclusion

Dans cette communication, nous avons montré expérimentalement que l'écoulement produit par une source de chaleur et de masse placée dans une enceinte ventilée pouvait présenter trois principaux régimes : naturel (entrant E, sortant S), forcé (sortant E, sortant S) et intermédiaire (entrant-sortant E, sortant S) et être caractérisé par un nombre de Froude densitométrique  $\overline{Fr}_H^*$ . Ces résultats de vitesse confirment ceux déjà obtenus par visualisations et mesures de pressions différentielles. On observe un couplage des champs thermiques qui sont plutôt stratifiés dans le régime naturel et mélangés dans le régime bloqué.

### Références

- [1] 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.
- [2] 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*
- [3] P. Paranthoën, M. Gonzalez, Mixed convection in a ventilated enclosure, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 31, 2, (2010), 172-178
- [4] F. Weiss, P. Paranthoën, J-C. Lecordier, Frequency response of a cold-wire in a flow seeded with oil particles, *Experiments in Fluids*, 39, (2005), 935-940

### Remerciements

Le soutien financier de la Région Haute-Normandie (Réseau SER) est fortement remercié.

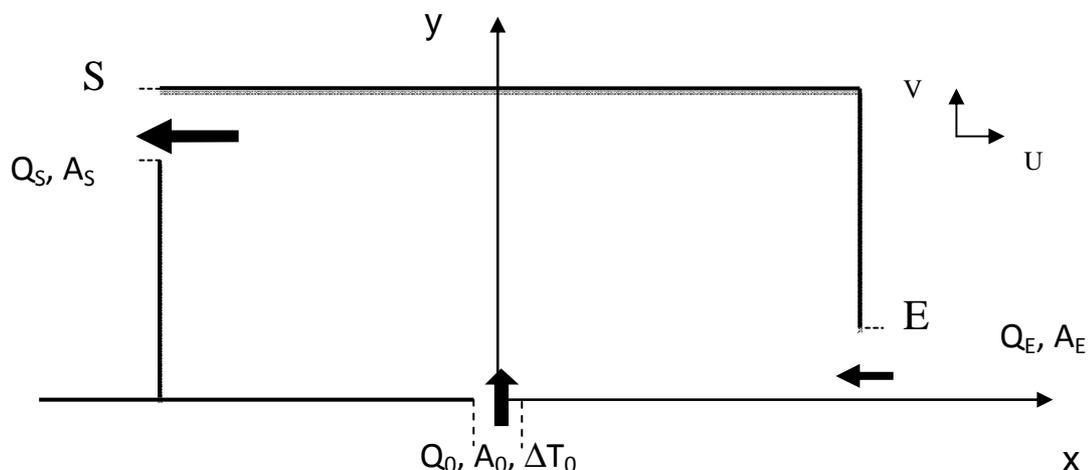
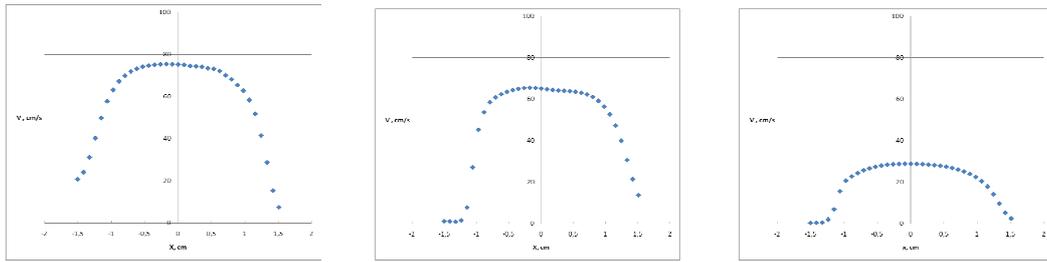


Figure 1 Dispositif expérimental

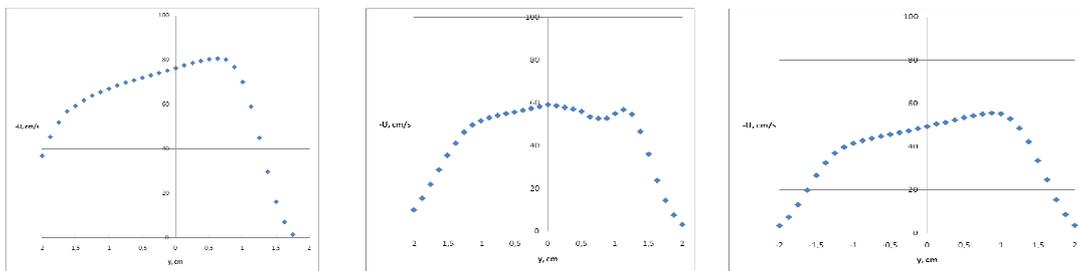


*Régime Bloqué*

*Régime Intermédiaire*

*Régime Naturel*

*Figure 2 Profils de vitesse en sortie de buse (centrés sur le milieu de la buse)*

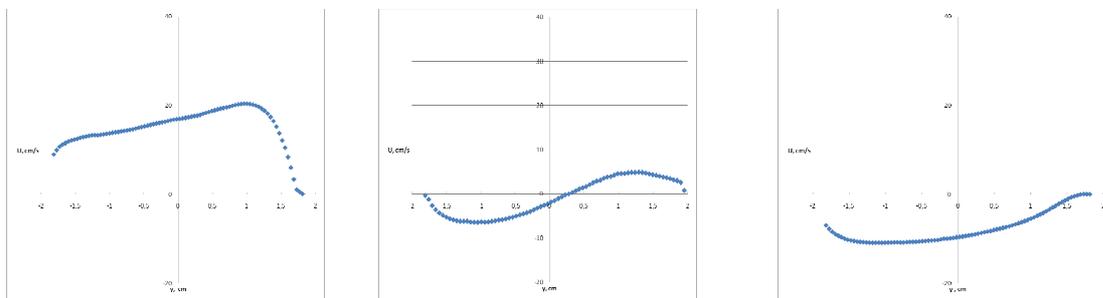


*Régime Bloqué*

*Régime Intermédiaire*

*Régime Naturel*

*Figure 3 Profils de vitesse en sortie de l'ouverture S (centrés sur le milieu de l'ouverture)*

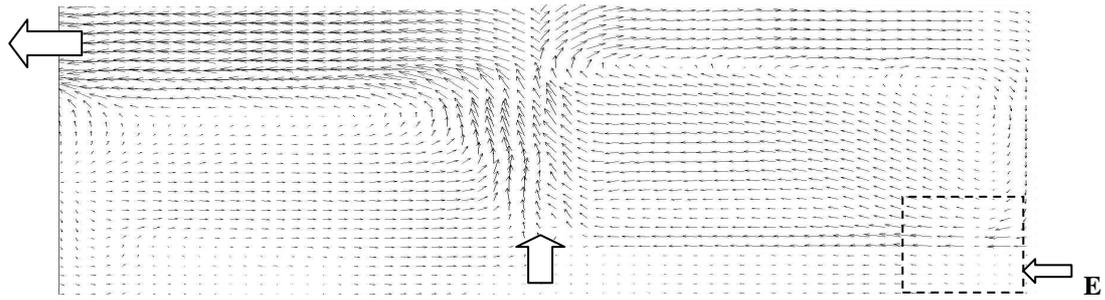


*Régime Bloqué*

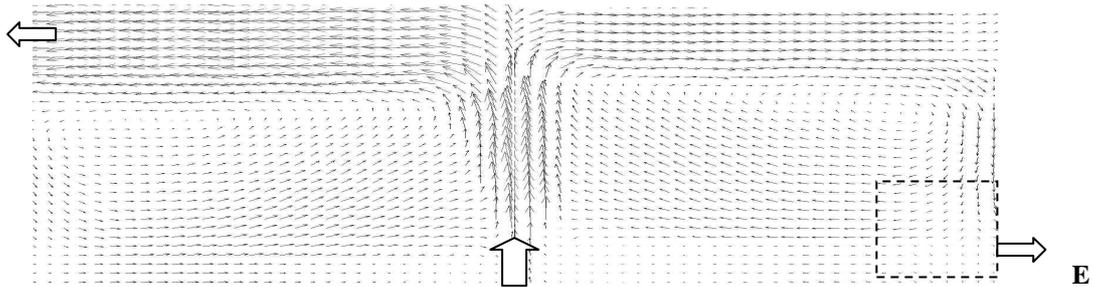
*Régime Intermédiaire*

*Régime Naturel*

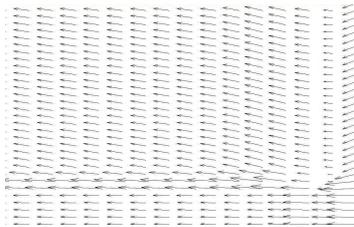
*Figure 4 Profils de vitesse en sortie de l'ouverture E (centrés sur le milieu de l'ouverture)*



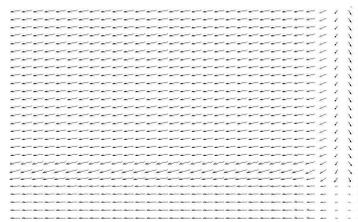
(a) Régime Naturel



(b) Régime Bloqué



(c) Régime naturel



(d) Régime bloqué

Figure 5 Champs moyens de vitesse dans l'enceinte  
(a et b: vues d'ensemble, c et d: zoom sur la zone proche de E)

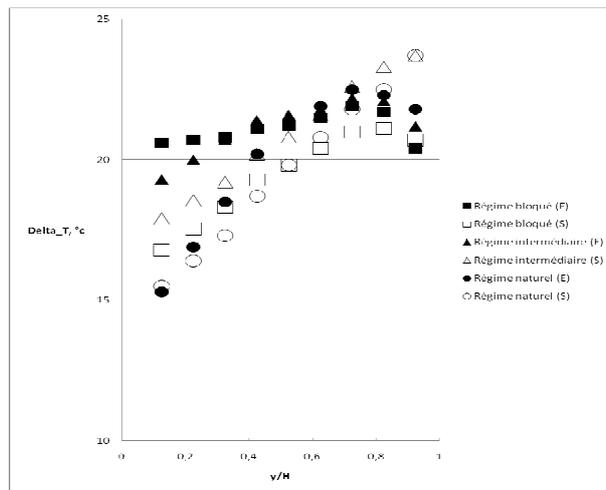


Figure 6 Profils des écarts de température moyenne dans l'enceinte pour les trois régimes sur des verticales proches des ouvertures E et S