

# Débits de ventilation créés par un panache forcé dans une enceinte ventilée

A.Ngondiep<sup>a</sup>, M.Gonzalez<sup>a</sup>, M.Lebey<sup>b</sup>, P.Paranthoën<sup>a</sup>

a. CNRS UMR 6614 CORIA, Boulevard de l'Université 76801 Saint Etienne du Rouvray

b. CNRS UMR 6294 LOMC, Bâtiment COREVA 53 rue de Prony 76058 Le Havre Cédex

## Résumé :

*On étudie expérimentalement les débits massiques et calorifiques au niveau des ouvertures haute et basse d'une enceinte ventilée alimentée à sa base par un panache forcé de débit volumique  $Q_0$  et de température  $T_0$ . Dans cette situation où trois régimes d'écoulements sont possibles, nous nous intéressons aux variations de ces débits quand le nombre de Froude densitométrique  $Fr_H^*$  varie.*

## Abstract :

*We study experimentally mass and thermal flow rates through upper and lower openings of a ventilated enclosure when a constant source volume flux  $Q_{m0}$  and temperature  $T_0$  is operating at its bottom. In this situation where three flow regimes may occur, interest is focused on variations of these mass flow rates when the densitometric Froude number  $Fr_H^*$  evolves.*

**Mots clefs:** convection mixte, ventilation, nombre de Froude

## 1 Introduction

Nous étudions le cas d'une enceinte alimentée à sa base par une source de gaz chaud et en communication avec l'extérieur par deux ouvertures S et E situées respectivement en parties haute et basse, Figure 1. Cette situation se rencontre, par exemple, dans la ventilation des habitations, dans le refroidissement des équipements électroniques ou la dynamique des écoulements présents dans les situations d'incendie, [1]. La source d'air chaud est un panache forcé de débit volumique  $Q_0$  et de température  $T_0$  injecté verticalement par une buse rectangulaire de section  $A_0$ . Quand ce panache chauffe progressivement l'intérieur de l'enceinte, cela modifie les conditions de pression de part et d'autre des ouvertures E et S et favorise les échanges gazeux entre l'intérieur et l'extérieur. Quand une situation stationnaire est atteinte, des études antérieures ont montré que deux ou trois régimes d'écoulements pouvaient apparaître: naturel, bloqué et intermédiaire, [2], [3]. Le régime naturel est caractérisé par un écoulement entrant par E et sortant par S et le régime bloqué par des écoulements sortants à la fois par E et S. Entre ces deux régimes, quand la hauteur de E n'est pas négligeable devant la hauteur H de l'enceinte, il peut exister un régime intermédiaire où l'écoulement est toujours sortant par S mais de l'air extérieur pénètre dans l'enceinte par la partie basse de E et de l'air chaud intérieur en sort par sa partie haute. Par une approche analytique, basée sur les principes de l'hydrostatique et de Bernoulli, nous avons pu montrer que chacun de ces régimes était caractérisé par des valeurs particulières du nombre de Froude densitométrique  $Fr_H^* = Q_0^2 / [\beta\gamma(\overline{\Delta\rho_H} / \rho_{ext})gH (C_s A_s)^2]$ , [4]. Dans cette expression,  $\overline{\Delta\rho_H}$  est la différence de masse volumique moyenne sur la hauteur H entre l'intérieur et l'extérieur de l'enceinte,  $C_s A_s$  la section effective de l'ouverture supérieure,  $\beta = \rho_s / \rho_0$ ,  $\gamma = \rho_{ext} / \rho_0$  ou de  $\delta = \rho_E / \rho_0$ . Les indices E, S et 0 correspondent aux conditions rencontrées respectivement au niveau des ouvertures E et S et de la

buse. Le régime intermédiaire, transition entre les régimes naturel et bloqué, apparaît pour une valeur de  $Fr_H^* \approx 2$ . Dans cette communication, nous nous intéressons aux débits massiques et calorifiques sortants et entrants au niveau des ouvertures E et S pour ces trois régimes. Nous souhaitons comparer les valeurs des débits données par le modèle aux valeurs expérimentales.

## 2 Modèle analytique (rappel)

On considère sur la Figure 1, l'enceinte parallélépipédique (longueur  $L$ , largeur  $l$  et hauteur  $H$ ) en communication avec l'extérieur par deux ouvertures rectangulaires verticales haute et basse de sections respectives  $A_S = l \times H_S$  et  $A_E = l \times H_E$ . Cette enceinte est alimentée à sa base par un panache forcé injecté verticalement par une buse rectangulaire (longueur  $l$ , largeur  $D_0$ ) de débit massique  $Q_{m0}$  et température  $T_0$  constants dans le temps. Le modèle analytique décrit dans une étude précédente a permis de mettre en évidence que les régimes d'écoulement étaient contrôlés par le nombre de Froude densitométrique  $Fr_H^*$ . Il a également montré que les débits adimensionnels  $q_{mE}^* = Q_{mE} / Q_{m0}$  et  $q_{mS}^* = Q_{mS} / Q_{m0}$  pouvaient être calculés à partir de la connaissance de  $Fr_H^*$  et des rapports  $\alpha^2 \beta / \gamma$ ,  $\alpha^2 \beta / \delta$  où  $\alpha = C_S A_S / C_E A_E$ .

$$\text{Pour } Fr_H^* \leq 2, \quad q_{mE}^* = \frac{-1 + \sqrt{1 - \left(1 + \frac{\alpha^2 \beta}{\gamma}\right) \left(1 - \frac{2}{Fr_H^*}\right)}}{1 + \frac{\alpha^2 \beta}{\gamma}} \quad \text{et} \quad q_{mS}^* = \frac{\frac{\alpha^2 \beta}{\gamma} + \sqrt{1 - \left(1 + \frac{\alpha^2 \beta}{\gamma}\right) \left(1 - \frac{2}{Fr_H^*}\right)}}{1 + \frac{\alpha^2 \beta}{\gamma}} \quad (2.1)$$

$$\text{Pour } Fr_H^* > 2 \text{ si } \frac{\alpha^2 \beta}{\delta} \neq 1 \quad q_{mE}^* = \frac{1 - \sqrt{1 - \left(1 - \frac{\alpha^2 \beta}{\delta}\right) \left(1 - \frac{2}{Fr_H^*}\right)}}{1 - \frac{\alpha^2 \beta}{\delta}} \quad \text{et} \quad q_{mS}^* = \frac{-\frac{\alpha^2 \beta}{\delta} + \sqrt{1 - \left(1 - \frac{\alpha^2 \beta}{\delta}\right) \left(1 - \frac{2}{Fr_H^*}\right)}}{1 - \frac{\alpha^2 \beta}{\delta}} \quad (2.2)$$

Il faut noter que la détermination de  $Fr_H^*$  ne peut être faite qu'après l'expérience car il est nécessaire de connaître les valeurs de  $\overline{\Delta \rho_H}$ ,  $\beta = \rho_S / \rho_0$ ,  $\gamma = \rho_{ext} / \rho_0$  ou de  $\delta = \rho_E / \rho_0$ .

## 3 Dispositif expérimental

La maquette utilisée a pour dimensions : (500x225x180mm<sup>3</sup>). L'ouverture inférieure E a une hauteur  $H_E=30$ mm et une largeur  $l=225$ mm. La seconde ouverture S située sur la partie supérieure de la face latérale opposée a même largeur et une hauteur  $H_S=27,5$ mm. Cette enceinte est alimentée en air chaud par une buse rectangulaire de largeur  $D_0=30$ mm et de longueur  $l_0=225$ mm. Le débit massique  $Q_{m0}$  et la différence de température  $\Delta T_0 = T_0 - T_{ext}$  en sortie de buse sont contrôlés par un débitmètre Alicat et deux thermocouples de type T reliés à une centrale d'acquisition GL1. Les parois verticales en plexiglas permettent des visualisations et des mesures PIV qui sont réalisées en ensemençant l'écoulement de panache avec de fines gouttelettes d'huile. Le système d'éclairage se compose d'un Laser Yag double pulse (8Hz) et d'un système optique comprenant deux lentilles sphérique et cylindrique permettant d'obtenir une nappe laser de moins d'1mm d'épaisseur qui éclaire à la fois l'intérieur de l'enceinte et les deux zones extérieures situées près des ouvertures inférieure et supérieure. L'ensemble de la maquette peut se déplacer sur deux rails dans la direction z pour permettre de positionner ce plan laser vertical fixe à différentes valeurs de  $z/l = (0; \pm 1/8; \pm 1/4; \pm 3/8)$ . Les images PIV sont enregistrées simultanément par trois caméras La Vision Imager Prox4M (2048x2048 pixels) dans trois plans verticaux (8x8cm<sup>2</sup>) situés au niveau des ouvertures et de la buse. Les vitesses sont ensuite calculées à l'aide du logiciel Davis-La Vision à partir de 200 couples d'images par inter corrélation (mailles de 32x32 pixels avec recouvrement de 50% entre les mailles). Cette résolution est suffisante pour la mesure des profils de vitesse moyenne en sortie de chaque ouverture. Des mesures des écarts de température moyennes ont été réalisées au moyen de thermocouples de type T. Afin de pouvoir calculer  $Fr_H^*$  des mesures de température sont également réalisées sur une verticale proche de l'ouverture E au moyen d'un peigne de thermocouples de type T. Les trois régimes d'écoulement que nous étudions sont induits par les panaches forcés suivants:  $Q_{m0}=100$  NI/min,  $\Delta T_{0max}=55$  K,  $Fr_H^*=1,57$  (régime naturel),  $Q_{m0}=135$  NI/min,  $\Delta T_{0max}=48$  K,  $Fr_H^*=2,75$  (régime intermédiaire),  $Q_{m0}=250$  NI/min,  $\Delta T_{0max}=32$  K,  $Fr_H^*=9,5$  (régime bloqué) et des nombres de Reynolds initiaux compris entre 1050 et 1700.

## 4 Résultats expérimentaux

Afin de pouvoir de calculer les débits massiques  $Q_{m0}$ ,  $Q_{mE}$  et  $Q_{mS}$  et les puissances calorifiques  $P_0$ ,  $P_E$  et  $P_S$  pour les trois régimes d'écoulements au moyen de relations du type

$$Q_{mE} = \int_0^{H_E/2} \int_{-1/2}^{1/2} \rho_E(y,z) U_E(y,z) dy dz \quad \text{et} \quad P_E = \int_0^{H_E/2} \int_{-1/2}^{1/2} \rho_E(y,z) c_p U_E(y,z) \Delta T_E(y,z) dy dz, \quad \text{nous avons}$$

mesuré les profils des écarts de température moyenne et des vitesses moyennes de la composante normale à chaque ouverture (buse de sortie, E et S) dans sept plans de mesure ( $z/l = (0; \pm 1/8; \pm 1/4; \pm 3/8)$ ) afin de prendre en compte les effets 3D.

### 4.1 Profils de vitesse au niveau des ouvertures pour les trois régimes

Les profils de vitesses moyennes sont tracés sur les Figures 2a-b-c. En sortie de buse, Figures 2a, nous remarquons que l'écoulement est quasiment plan en régime bloqué, et présente une symétrie par rapport au centre de la buse. En régime intermédiaire, les maxima se décalent légèrement du côté de l'ouverture inférieure créant ainsi une légère dissymétrie des profils. On note un léger effet 3D, sur les profils des plans 1/8 et 7/8 du côté de l'ouverture inférieure. En régime naturel, l'écoulement en sortie de buse n'est plus plan et on note une importante dissymétrie des profils. Ceci paraît dû à l'interaction entre le panache et l'air extérieur qui pour ce régime pénètre dans l'enceinte par l'ouverture inférieure. Dans ce cas les profils des plans 1/8 et 7/8 sont également déformés. Ces résultats montrent qu'en raison du confinement, dès son origine, l'écoulement injecté dans l'enceinte est très différent d'un panache ou d'un jet en milieu libre.

Au niveau de l'ouverture supérieure, les profils présentent la même allure quel que soit le régime d'écoulement considéré. Les vitesses sont nulles au niveau des parois inférieure et supérieure de cette ouverture. Entre les deux, les vitesses atteignent un maximum  $U_{s,max}$  situé dans le haut de l'ouverture. Pour les trois régimes, les profils de  $U_s(y,z)$  se composent de trois parties bien marquées. Pour  $0 < y_s/H_s < 0,2-0,25$  les valeurs de  $U_s(y,z)$  augmentent rapidement jusqu'à environ  $0,6-0,7U_{s,max}$  puis pour  $0,2-0,25 < y_s/H_s < 0,83-0,9$  le gradient de vitesse est toujours positif mais moins grand. Ici  $y_s = y - (H - H_s)$ . Dans la partie supérieure du profil pour  $0,83-0,9 < y_s/H_s < 1$  les vitesses diminuent fortement. On peut noter également que bien que les débits  $Q_{m0}$  soient très différents pour les trois régimes, les vitesses maximales  $U_{s,max}$  observées pour ces trois situations ne sont pas très différentes en raison de la conservation de la masse.

C'est au niveau de l'ouverture inférieure que les profils de vitesse se différencient le plus et que les effets 3D sont les plus visibles. En régime bloqué, où l'écoulement de gaz chauds est sortant, les vitesses passent par un maximum en haut de l'ouverture inférieure. En régime naturel, les vitesses mesurées sont en majorité négatives caractérisant une entrée d'air frais extérieur à travers l'ouverture inférieure. En régime intermédiaire, les vitesses sont en majorité négatives dans le bas de l'ouverture et positives dans le haut de l'ouverture inférieure. Cela signifie qu'il existe simultanément un écoulement d'air frais extérieur qui pénètre dans l'enceinte par le bas de l'ouverture et un écoulement de gaz chauds sortant par le haut de l'ouverture inférieure.

### 4.2 Profils de température au niveau des ouvertures pour les trois régimes

Les profils des écarts de température moyenne  $\Delta T(x) = T_0(x) - T_{ext}$  correspondants sont tracés sur les Figures 3 a-b-c.

En sortie de buse, ces profils présentent un maximum au centre de la buse alors que les valeurs minimales apparaissent en bordure du panache. En régime naturel, le champ thermique initial est à la fois fonction de  $x$  et de  $z$  avec des gradients de température plus importants pour les valeurs de  $x$  positives. Ceci s'explique par l'arrivée d'air extérieur qui pénètre dans l'enceinte par l'ouverture inférieure. En régime intermédiaire, les écarts de températures moyennes montrent des caractéristiques similaires à celles observées en régime naturel mais moins marquées. En régime bloqué, la distribution de température est relativement homogène, avec des écarts de température approximativement identiques sur les bords du panache. Cela signifie que dans ce cas les températures sont relativement voisines dans les deux régions de l'enceinte en dehors du panache.

Au niveau de l'ouverture supérieure, les profils montrent que la température au niveau de l'ouverture

supérieure est quasi homogène avec de très faibles différences entre les profils obtenus pour les 3 régimes d'écoulements. Cependant si, pour le régime bloqué les profils sont relativement symétriques et la valeur maximale est atteinte au centre de l'ouverture, il existe en revanche une forte dissymétrie pour les profils mesurés pour les régimes intermédiaire et naturel. Dans ces deux derniers cas, les maxima sont observés dans le haut de l'ouverture au voisinage du maximum de vitesse de  $U_s(y, z)$ .

En régime naturel, au niveau de l'ouverture inférieure, les écarts de températures sont nuls car l'écoulement entrant est à la température de l'air extérieur  $T_{ext}$ . On note cependant une légère augmentation de température à proximité de la paroi supérieure de l'ouverture E qui est chauffée par les gaz chauds internes. En régime intermédiaire, les écarts de température sont faibles mais pas nuls dans le bas de l'ouverture et augmentent progressivement vers le haut de l'ouverture. Ce résultat montre que, dans ce régime, les gaz entrants dans l'enceinte ont pu déjà échanger de la chaleur avec les gaz sortants ou qu'une partie des gaz chauds est ré-entraînée dans l'enceinte. En régime bloqué, les écarts de températures les plus importants sont observés près du plancher et marquent la présence des gaz chauds qui sortent principalement par le bas de l'ouverture. Ces écarts diminuent avec la hauteur car les gaz chauds sortants ne sont pas tous à la même température, certains ayant été au contact de la paroi verticale. La légère augmentation notée dans le haut de l'ouverture résulte également du chauffage de la paroi située au-dessus de cette ouverture.

### 4.3 Bilans massique et calorifique

A partir de ces profils de vitesses et d'écarts de température moyens, il est possible de calculer les débits massiques  $Q_{m0}$ ,  $Q_{mE}$ ,  $Q_{mS}$  et les puissances calorifiques  $P_0$ ,  $P_E$ ,  $P_S$ . Les valeurs expérimentales des débits massiques réduits  $q_{mE}^*$  et  $q_{mS}^*$  sont portées dans le tableau 1. Ces valeurs montrent à la fois une conservation du débit massique qui valide les mesures et un accord relativement satisfaisant avec les valeurs calculées par le modèle (relations 2.1 et 2.2). Le meilleur accord est obtenu pour la plus faible valeur de  $Fr_H^*$  correspondant au régime naturel. Rappelons que c'est dans ce régime où les forces de flottabilité sont significatives devant les forces d'inertie que les hypothèses du modèle sont les plus respectées. Les valeurs expérimentales des puissances calorifiques adimensionnelles  $P_E^* = P_E / P_0$  et  $P_S^* = P_S / P_0$  sont également calculées. La puissance injectée perdue  $P_{cd}^* = 1 - (P_S^* + P_E^*)$  est également portée dans le tableau 1. Ces valeurs montrent que cette perte de chaleur est relativement constante pour les trois régimes étudiés et représente environ un tiers de la puissance  $P_0$  injectée. Cette perte de chaleur se fait principalement par conduction à travers les différentes parois de l'enceinte.

## 5 Conclusion

L'étude expérimentale des débits massiques et calorifiques au niveau des ouvertures haute et basse d'une enceinte ventilée alimentée à sa base par un panache forcé de débit volumique  $Q_0$  et de température  $T_0$  a confirmé l'existence de trois régimes d'écoulements (naturel, intermédiaire et bloqué) mis en évidence dans les expériences précédentes. Les résultats montrent qu'en situation stationnaire les débits massiques présents aux deux ouvertures peuvent être correctement prédits quand le nombre de Froude densitométrique  $Fr_H^*$  est connu et que dans la situation expérimentale étudiée environ un tiers de la puissance calorifique injectée est perdu par conduction.

## References

- [1] Karlsson B., Quintiere J.G., Enclosure Fire Dynamics, CRC Press, 2000.
- [2] Woods A.W., Caulfield C.P., Phillips J.C., Blocked natural ventilation: the effect of a source mass flux, Journal of Fluid Mechanics, 495, 119-133, 2003.
- [3] Paranthoën P., Gonzalez M., Mixed convection in a ventilated enclosure, Int.J.Heat Fluid Flow,31,172-178, 2010.
- [4] Ngondiep A., Gonzalez M., Godard G., Lebey M., Paranthoën P., Champs dynamiques et thermiques dans une enceinte ventilée en régimes naturel, intermédiaire et bloqué; cas instationnaire, 20<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, Besançon, 2011.

## Remerciements

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

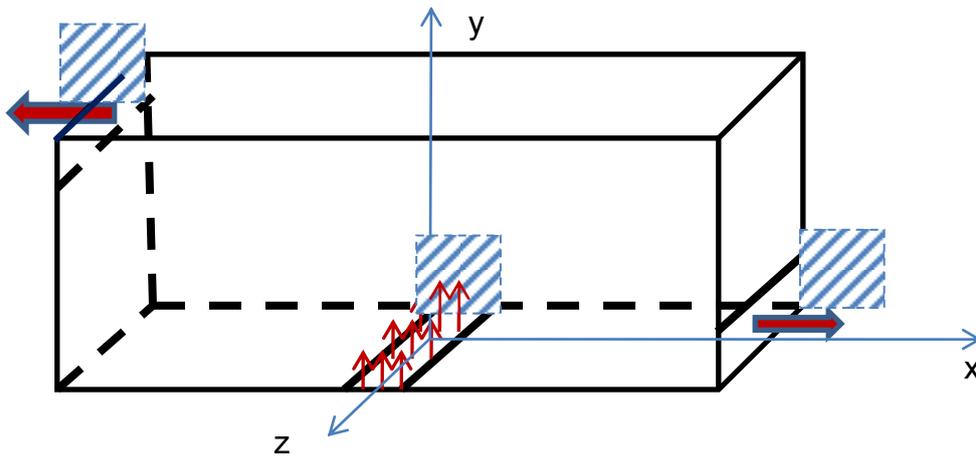


FIG. 1 – Schéma de l'enceinte ventilée. Exemple de trois plans PIV dans lesquels sont réalisées simultanément les mesures des composantes de vitesse moyenne normale aux ouvertures.

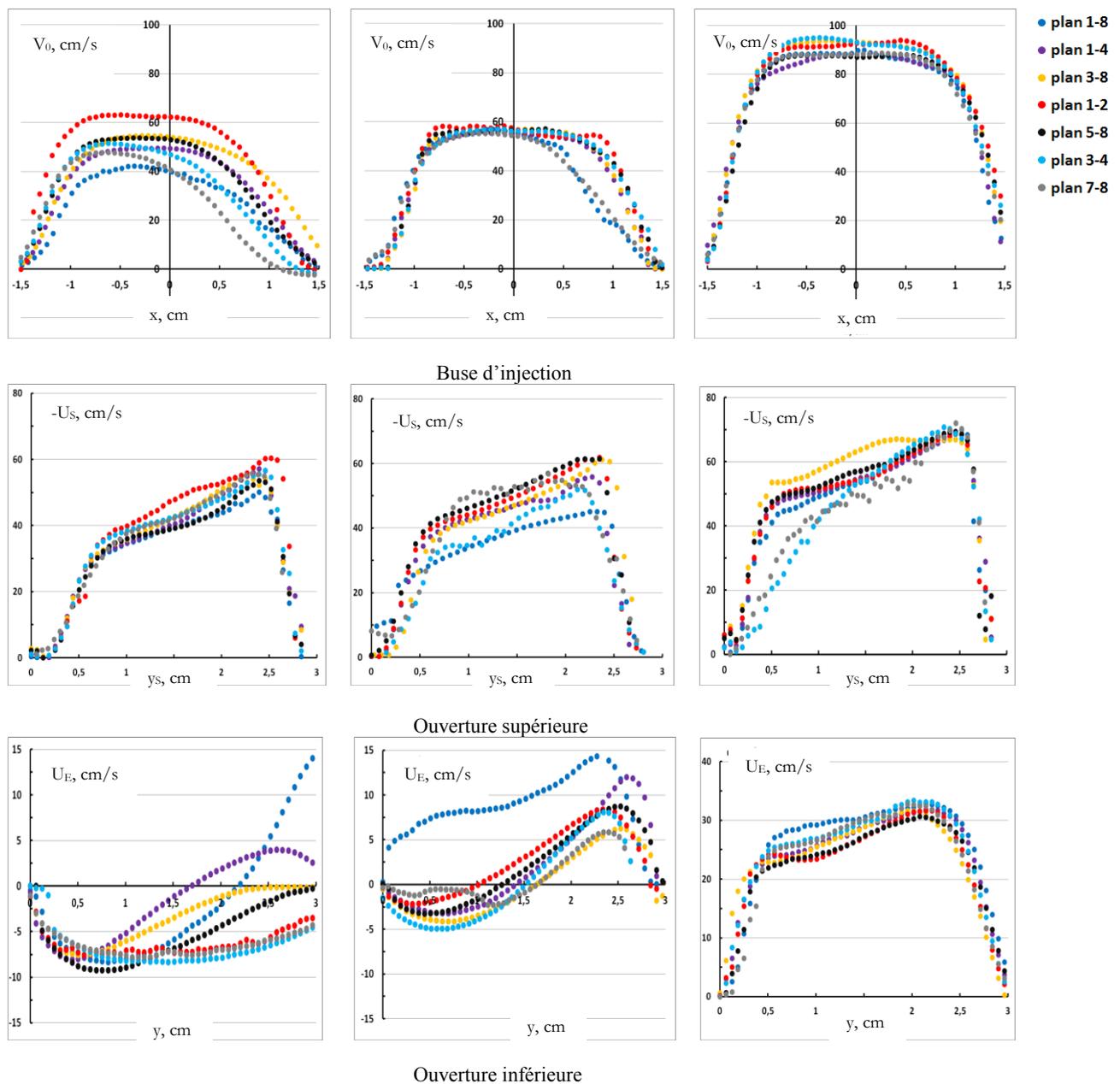


FIG. 2 – Profils de vitesse moyenne aux différentes ouvertures (composante perpendiculaire à la section de l'ouverture) ;  
 Colonne de gauche : régime naturel, colonne centrale : régime intermédiaire et colonne de droite : régime bloqué.

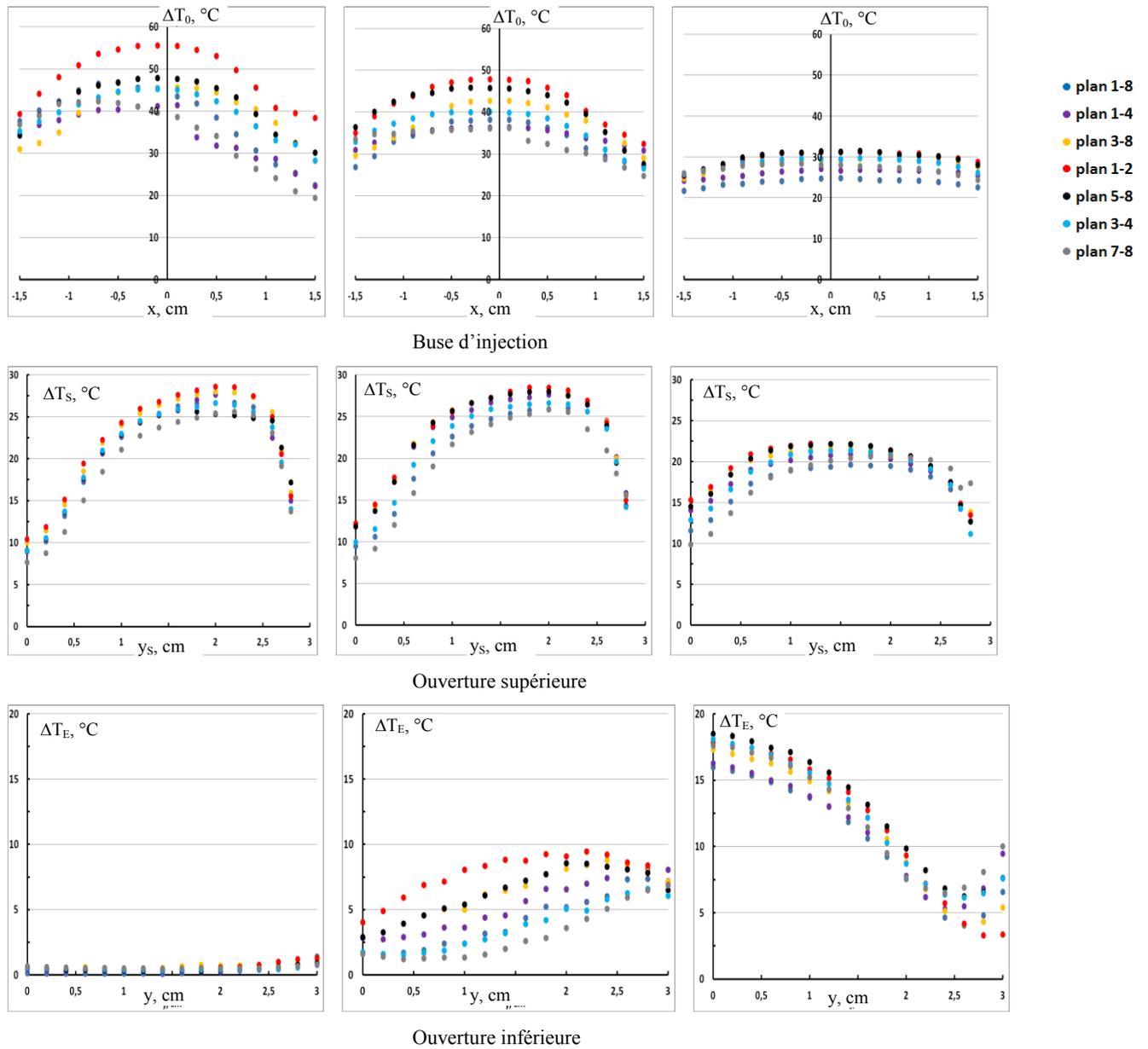


FIG. 3 –Profils des écarts moyens de température aux différentes ouvertures ;  
 Colonne de gauche : régime naturel, colonne centrale : régime intermédiaire et colonne de droite : régime bloqué.

Régime d'écoulement	$q_{mE}^*$ mesuré	$q_{mS}^*$ mesuré	$q_{mE}^*$ calculé	$q_{mS}^*$ calculé	$P_{cd}^* = 1 - (P_S^* + P_E^*)$ mesuré
Naturel $Fr_H^* = 1,57$	0,15	1,06	0,13	1,13	0,33
Intermédiaire $Fr_H^* = 2,75$	0,075	0,875	0,15	0,85	0,34
Bloqué $Fr_H^* = 9,5$	0,34	0,63	0,41	0,59	0,32

Tableau 1