Régimes d'écoulements générés par une source de gaz chauds dans une enceinte ventilée

Pierre Paranthoën, Michel Gonzalez, Béatrice Patte-Rouland LTH CNRS UMR 6614 Coria

Remerciements à Armand NGondier, Amélie Danlos, Daniel Allano

Sommaire

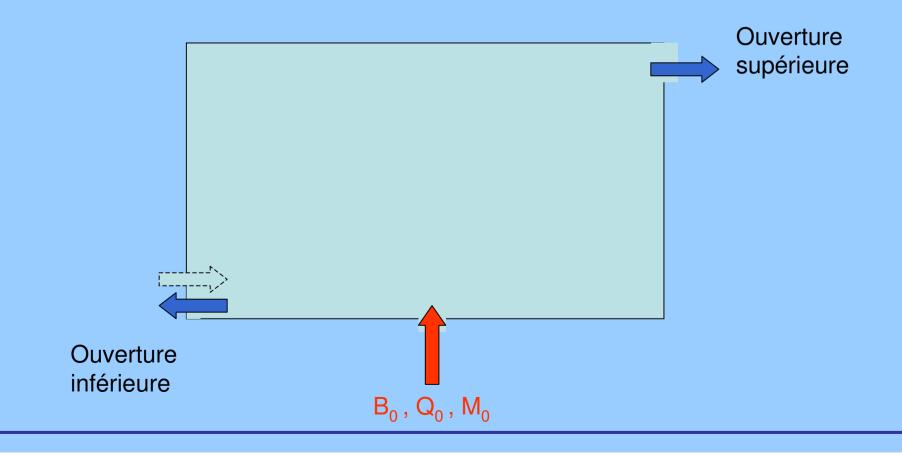
- Introduction
- Problème étudié
- Rappels bibliographiques
- Approche analytique
- Dispositif expérimental
- Résultats expérimentaux
- Conclusion

Introduction

- Physique du mouvement des fumées produites par un feu dans une enceinte ventilée
- Approche purement aérolique (fumées simulées par de l'air chauffé, source de flottabilité et de quantité de mouvement)
- Dynamique et Thermique de ces écoulements quand les caractéristiques du panache forcé (forces de flottabilité et forces d'inertie) et la géométrie de l'enceinte varient.

Problème étudié

Etude des phénomènes apparaissant dans une enceinte semi confinée en présence de sources de flottabilité, de quantité de mouvement ou de masse.

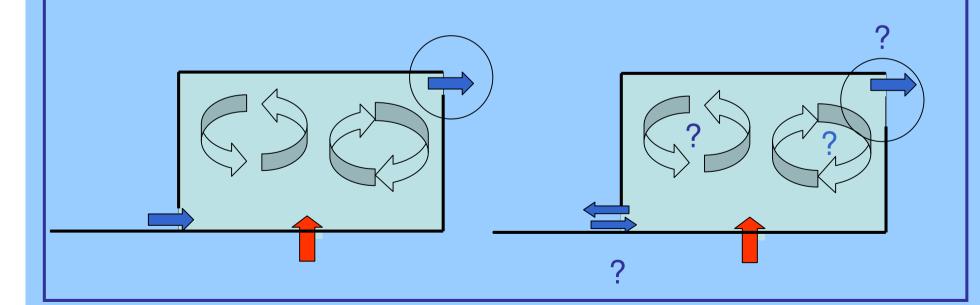


Etude de régimes stationnaires de référence

- Connaissance des régimes d'écoulements, champs de vitesse et de température, (B₀, Q₀, géométrie fixée).

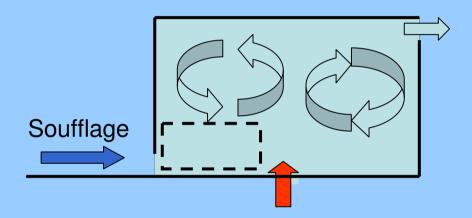
Etude de régimes instationnaires

- Evolution de ces régimes stationnaires en modifiant un paramètre géométrique (ouverture).



Etude de régimes instationnaires

Prise de contrôle de l'écoulement interne par un soufflage extérieur localisé au niveau de l'ouverture inférieure.



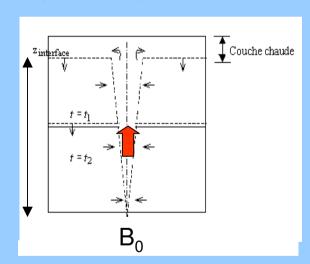
Travail en liaison avec nos collègues du Havre (M.Lebey, E.Lambert)

Etudes 2D et 3D menées pour des niveaux de température de plus en plus importants, valeurs de Fr et $\Delta \rho/\rho$ réalistes.

- Rappels bibliographiques

Source de flottabilité dans une enceinte étanche

- « Filling box » Baines et Turner (1969) Source B₀
- Remplissage progressif en fluide chaud de l'enceinte après impact du panache sur le plafond



$$\frac{z_{\text{interface}}}{H} = \left[\frac{4\alpha}{5} \left(\frac{18\alpha}{5\pi}\right)^{1/3} \frac{H^{2/3} B_0^{1/3}}{R^2} t + 1\right]^{-3/2}$$

α coefficient d'entrainement

Temps de remplissage

$$t_{fb} = \frac{\pi R^2}{CH^{2/3} B_0^{1/3}}$$

Situation réaliste pour des rapports d'aspect : Φ =R/H très grands

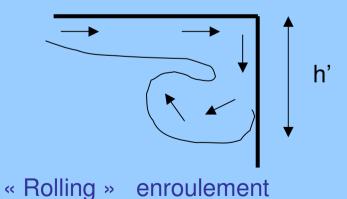
Lucchesi (2009) expériences air-hélium

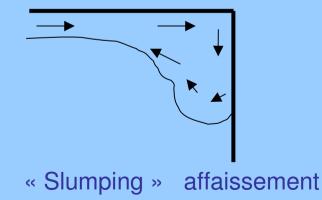
Influence du rapport d'aspect Φ=R/H sur l'impact de l'écoulement de plafond sur les parois latérales

KAYE et HUNT (2007):

η=h'/H où h' est l'épaisseur verticale de la couche initiale

- \square Panache bloqué pour Φ <0.25, BARNETT(1991): Φ <0.17
- □ « Rolling » $\eta \approx 0.33 \Phi^{-1/3}$, 0.25 < Φ <2/3
- □ « Slumping » η ≈ 0.38, Φ>2/3
- □ Vraie « filling box » Φ>4





Influence des caractéristiques de la source sur l'impact de l'écoulement de plafond sur les parois latérales

« Filling box » Baines et Turner (1969) Source Bo

Source B₀ et M₀ Hunt, Cooper, Linden (2001), Morton (1959)

$$Q_0 = U_0 A_0$$
 $M_0 = U_0^2 A_0$ $B_0 = U_0 g \frac{\Delta \rho}{\rho_0} A_0$

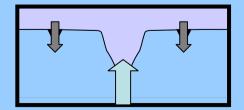
Longueur de jet :

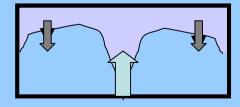
$$L_{j} = \frac{M_{0}}{B_{0}^{1/2}}^{3/4}$$

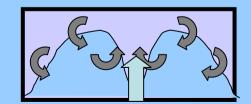
$$L_{j} = \frac{M_{0}}{B_{0}^{1/2}}^{3/4} \qquad \qquad \frac{L_{j}}{H} \rightarrow \infty \quad jet \ pur$$

$$L_{j} = \frac{L_{j}}{H} \rightarrow 0 \quad panache$$

$$\frac{L_j}{H} \to 0$$
 panache



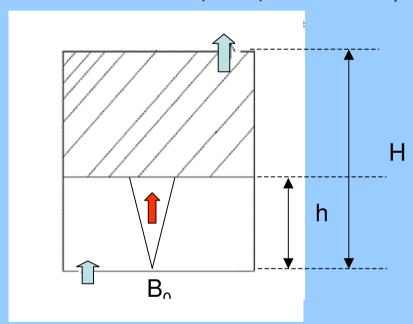




Lj/H croissant de gauche à droite

Source de flottabilité dans une enceinte semi confinée

LINDEN, LANE-SERFF et SMEED (1990): « The emptying-filling box »



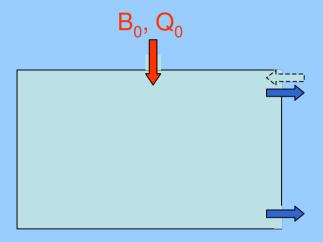
$$\frac{A^*}{C^{3/2}H^2} = \left(\frac{\xi^5}{1-\xi}\right)^{1/2} \quad \text{où} \quad \xi = h/H$$

$$g'(h \le y \le H) = G'(y = h, B_0) = \left(B_0^2 h^{-5}\right)^{1/3}/C$$

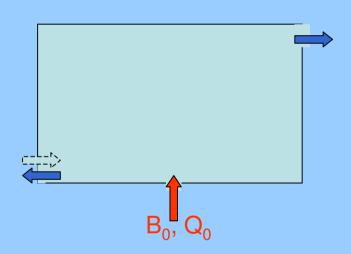
 $\frac{A^*}{C^{3/2}H^2}$ représente le rapport des temps de vidange et de « filling box », KAYE et HUNT (2004)

Source de flottabilité et de masse dans une enceinte semi confinée

Injection de fluide dense



Injection de fluide léger



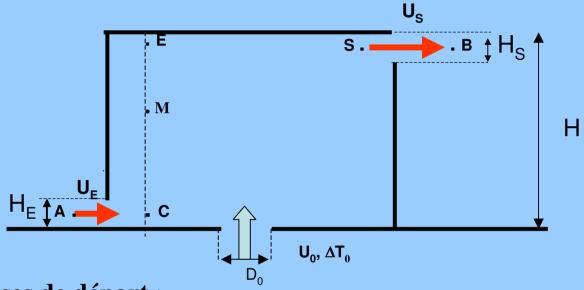
WOODS, CAUFIELD, PHILLIPS (2002)

$$Q_0^3 \le 2B_0 H c_1^2 A_1^2$$
 régime naturel

$$Q_0^3 \ge 2B_0 H c_1^2 A_1^2$$
 régime bloqué

ALLANO et al. (2008)

Approche analytique



Hypothèses de départ :

- H_S et H_F << H (écoulement unidirectionnel aux ouvertures E et S)
- Vitesse verticale négligeable (accélérations de V faibles devant g'=g $\Delta \rho/\rho$)
- Pression statique constante sur une horizontale (sauf dans le panache)
- Faibles variations de la masse volumique (hypothèse de Boussinesq)

Méthode de calcul

Equations de Bernoulli et distribution hydrostatique de pression Points A et C, S et B (Bernoulli)

Points C et E, A et B (Hydrostatique)

Régime naturel (entrant E et sortant S)

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

$$P(H) - P(0) = -\int_{0}^{H} \rho(y) g dy$$
 $P_{ext}(0) - P_{ext}(H) = \rho_{ext} g H$

$$\bar{\rho}_{H} = (1/H) \int_{0}^{H} \rho(y) dy$$

$$U_S^2 + U_E^2 = 2(\rho_{ext} - \overline{\rho_H})gH/\rho = -2\overline{\Delta\rho_H}gH/\rho$$

$$Q_E = C_E A_E U_E$$
 et $Q_S = C_S A_S U_S$

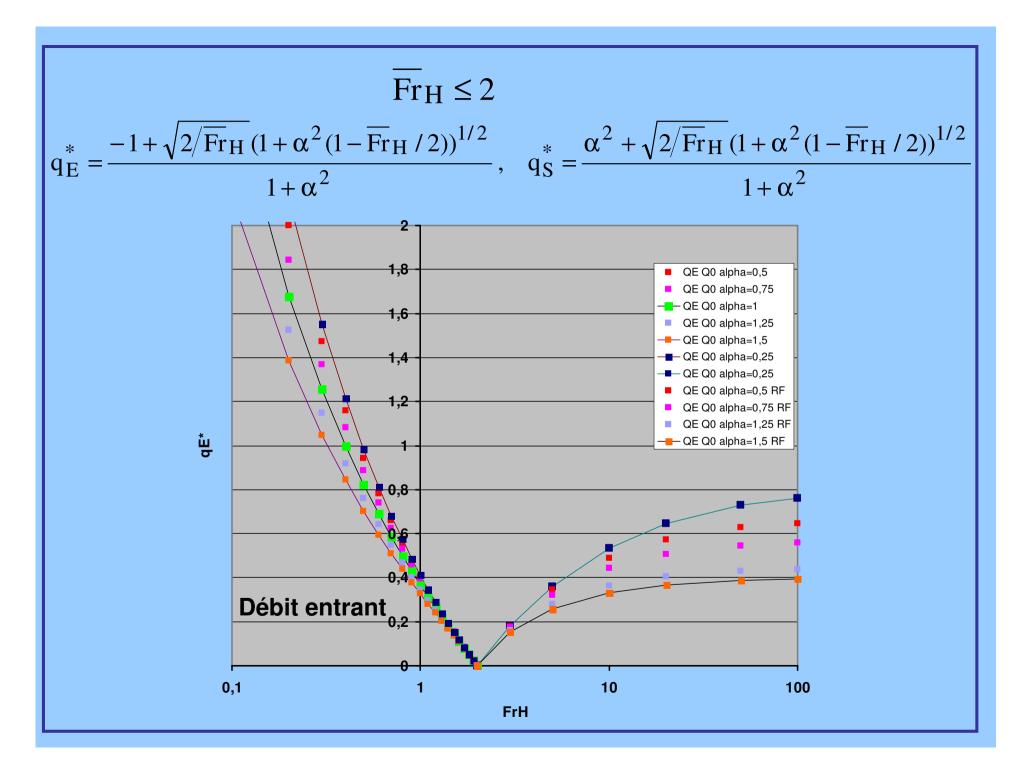
$$(Q_S/Q_0)^2 + (C_SA_S/C_EA_E)^2 (Q_E/Q_0)^2 = (2 \overline{\Delta \rho}_H/\rho) gH(C_SA_S)^2/Q_0^2$$

$$\alpha = C_S A_S / C_E A_E \text{ et } \overline{Fr}_H = Q_0^2 / (\overline{\Delta \rho}_H / \rho) g H (C_S A_S)^2$$

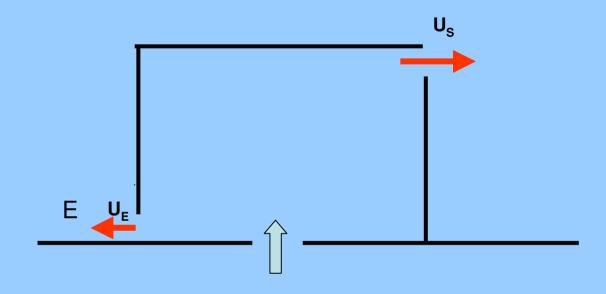
$$q_E^* = Q_E / Q_0 \text{ et } q_S^* = Q_S / Q_0$$

$$\begin{vmatrix} q_{S}^{*2} + \alpha^{2} q_{E}^{*2} = 2/\overline{Fr}_{H} \\ q_{S}^{*} = 1 + q_{E}^{*} & \text{où } q_{E}^{*} \text{ et } q_{S}^{*} \ge 0 \end{vmatrix}$$

$$(1 + \alpha^2) q_E^{*2} + 2q_E^* + (1 - 2/\overline{Fr_H}) = 0$$



Régime bloqué (sortant E et sortant S)

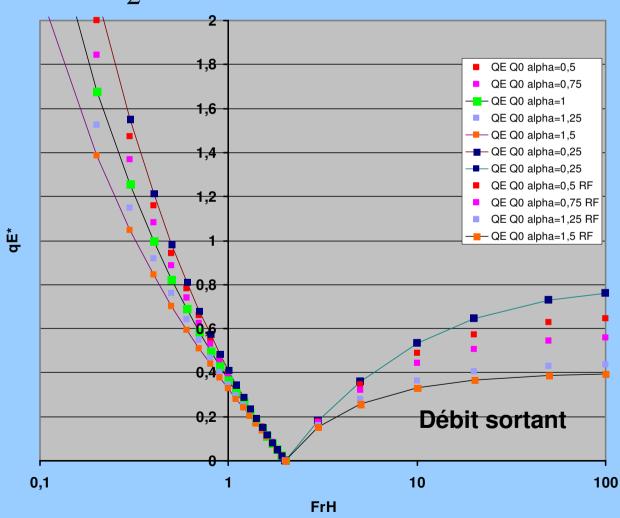


$$(1 - \alpha^2) q_E^{*2} - 2q_E^* + (1 - 2/\overline{Fr_H}) = 0$$

 $\overline{Fr_H} > 2$

$$q_{E}^{\alpha \neq 1} = \frac{1 - \sqrt{2/\overline{Fr_{H}}} (1 - \alpha^{2} (1 - \overline{Fr_{H}}/2))^{1/2}}{1 - \alpha^{2}} \text{ et } q_{S}^{*} = \frac{-\alpha^{2} + \sqrt{2/\overline{Fr_{H}}} (1 - \alpha^{2} (1 - \overline{Fr_{H}}/2))}{1 - \alpha^{2}}$$

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



Régimes d'écoulement fonctions d'un nombre de Froude densitométrique :

$$\overline{Fr}_{H} = Q_0^2 / (\overline{\Delta \rho}_{H} / \rho) g H (C_S A_S)^2$$

 Fr_H dépend du débit volumique de la source Q_0 , de la difference de masse volumique entre l'intérieur et l'extérieur de l'enceinte $\Delta
ho_H$, de la hauteur H de l'enceinte et de la section de l'ouverture supérieure A_s

Pour Fr_H <2 Régime naturel

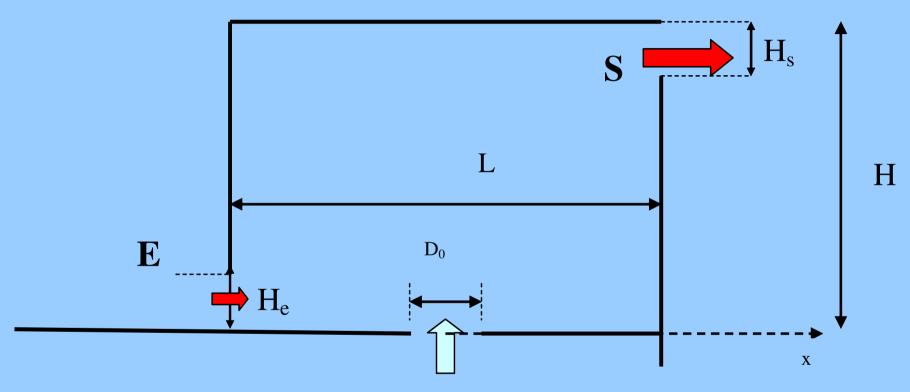
Pour Fr_H >2 Régime bloqué

En supposant $\frac{1}{\Delta \rho_H}/\Delta \rho_0 = 1$: Intérieur de l'enceinte parfaitement mélangé

Critère donné par Woods et al (2003) :

$$(Q_0^3/B_0 H(C_S A_S)^2) = 2$$

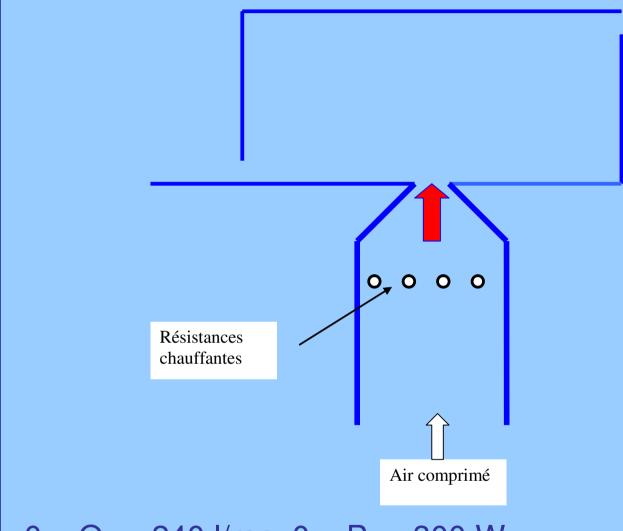
Dispositif expérimental



Enceinte parallélépipédique: L=500mm, I=250mm, H=200mm.

Ouvertures $0 < H_S < 46 \text{mm}$ $H_E = 36 \text{mm}$

Rapports d'aspect: L/2H=1,25, I/2H=0,625 et $D_0/L=0,15$



$$0 < Q_0 < 240 \text{ l/mn}, \ 0 < P_0 < 300 \text{ W}$$

 $0 < \Delta T_0 < 80 \text{K}$

Nombre de Reynolds: 350 < Re₀ < 1700

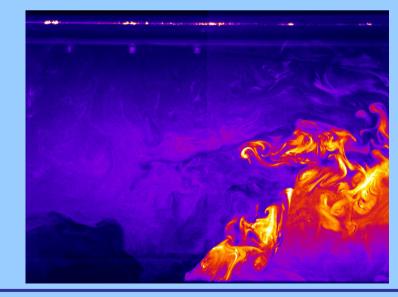
 $0,3 < Lj/H < \infty$

Techniques de mesures

 Visualisations de l'écoulement par nappe laser (1mm d'épaisseur), coupe longitudinale, ensemencement contrôlé (encens, gouttelettes d'huile).

 Images, enregistrement système Société R&D Vision (caméra CCD 1280x1024 pixels et centrale

d'acquisition).



Techniques de mesures

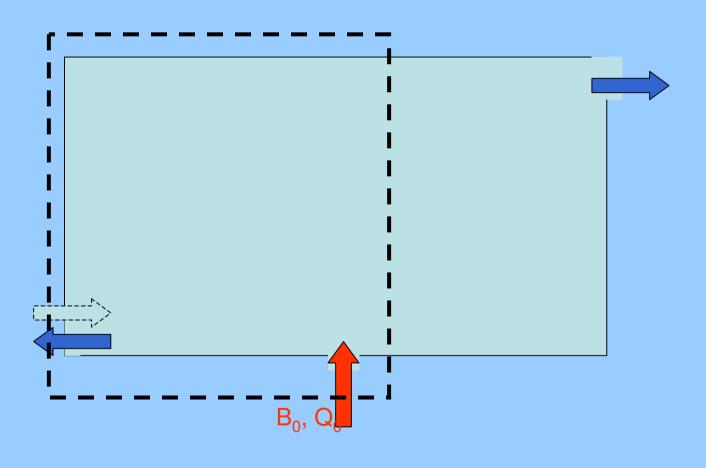
- Mesures de température:
- Thermocouples J, d=0,15mm
- Fil froid, $d=2.5\mu m$, $f_{3dB} > 300Hz$
- Mesures de pression pariétale moyenne réalisées au moyen d'un micro manomètre Furness Control FC14.

Résultats expérimentaux

- Régime stationnaire
- Mise en évidence des différents régimes d'écoulements
- Visualisations
- Mesures des champs de pression
- Mesures de température

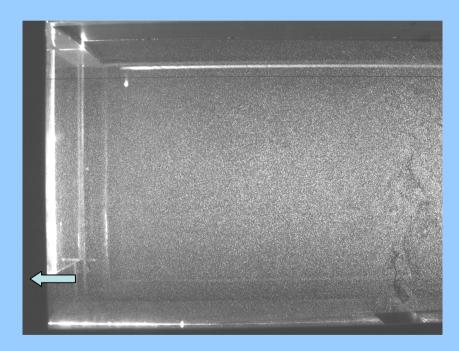
$$\overline{Fr}_{H} = Q_0^2 / (\Delta T_{1/2} / T_{\infty}) g H (C_S A_S)^2$$

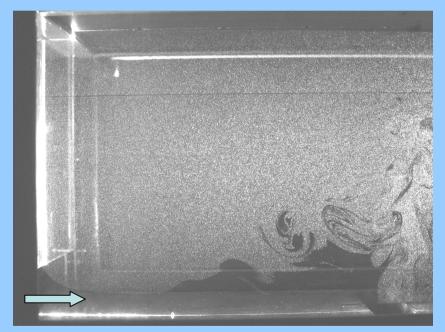
Visualisations de l'écoulement dans la moitié de l'enceinte située du côté de E



Visualisations de l'écoulement

 $U_0 = 0.8 \text{ m/s}, \Delta T_0 = 45 \text{ K}$ Lj/H~0,9 He=36mm

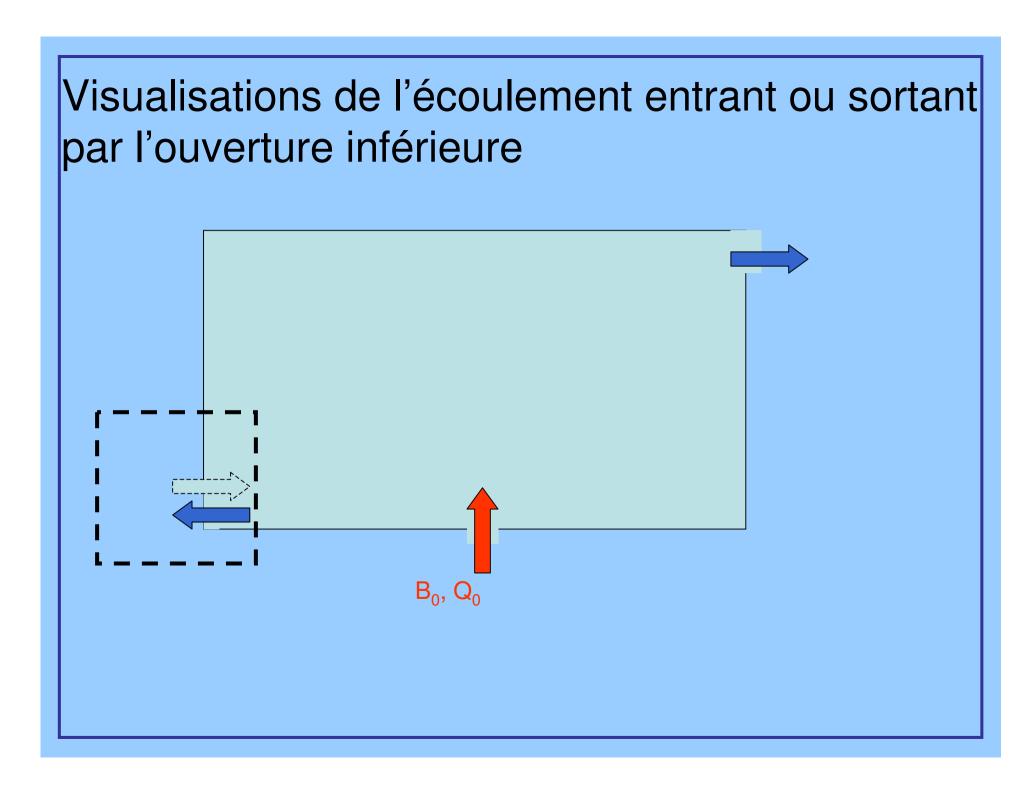




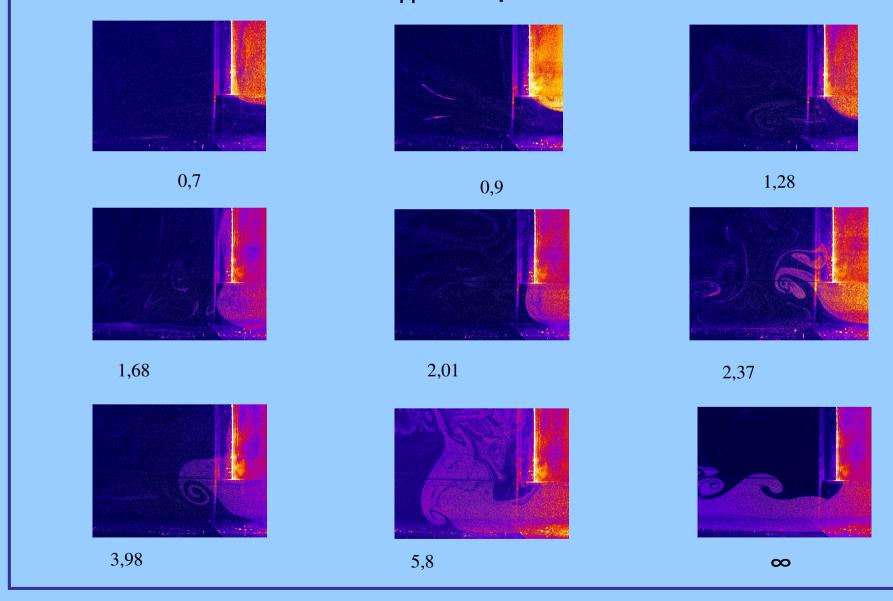
(a) $Hs=26 \text{ mm } Fr_{H}=5.8$

(b) Hs = $46 \text{ mm Fr}_{H} = 1.85$

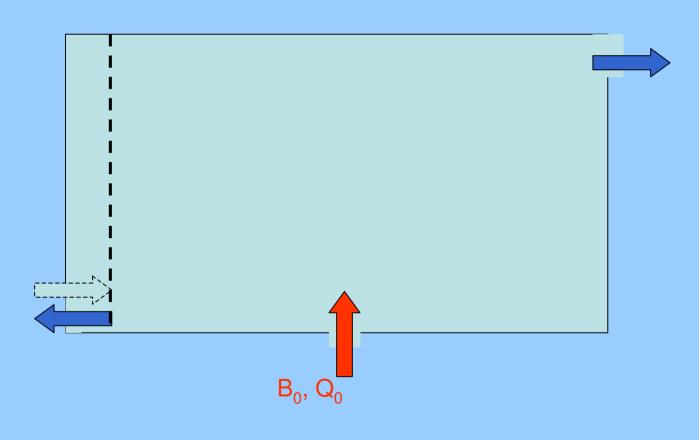
Pour Fr_H=1,85 (b) du fluide extérieur non ensemencé pénètre dans l'enceinte par l'entrée inférieure E. Cet écoulement s'inverse (a) quand Fr_H=5,8.



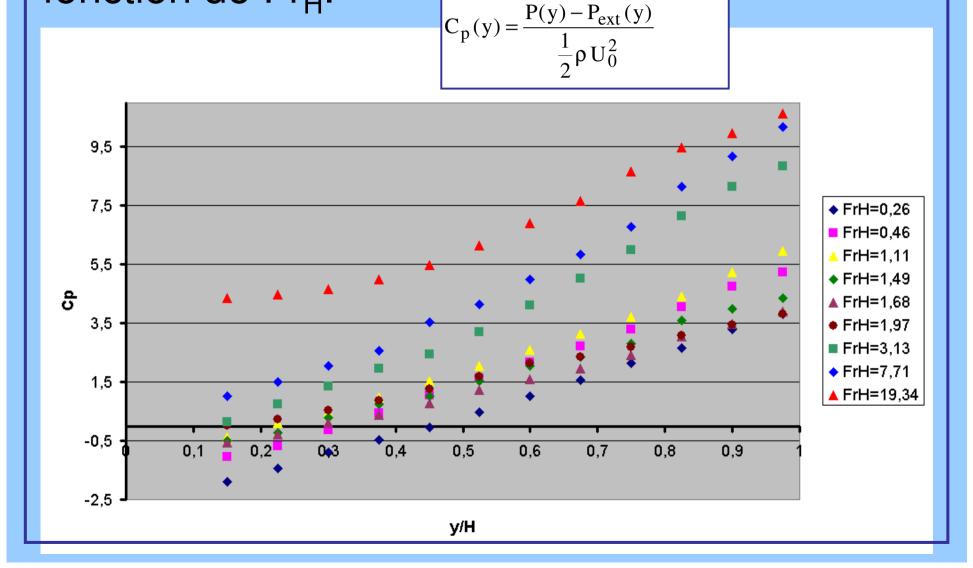
Visualisations de l'écoulement entrant ou sortant par l'ouverture inférieure Fr_H compris entre 0,7 et l'∞.



Mesures de pressions différentielles sur une verticale proche de l'ouverture inférieure

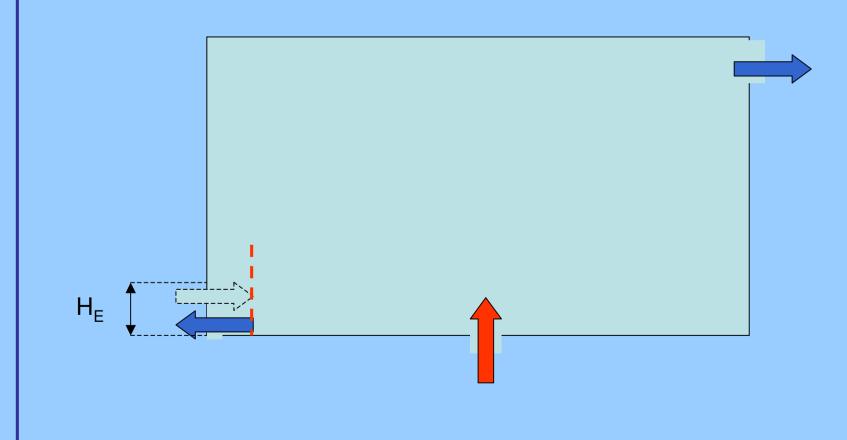


Mesures de pressions différentielles sur une verticale proche de l'ouverture inférieure en fonction de Fr_H.



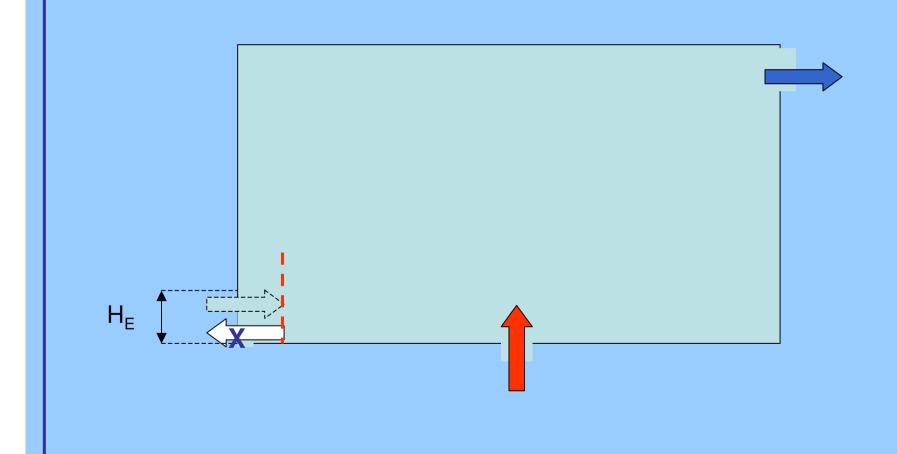
Mesures de pressions différentielles sur une verticale proche de l'ouverture inférieure

$$0 < y/H_E < 1.7$$



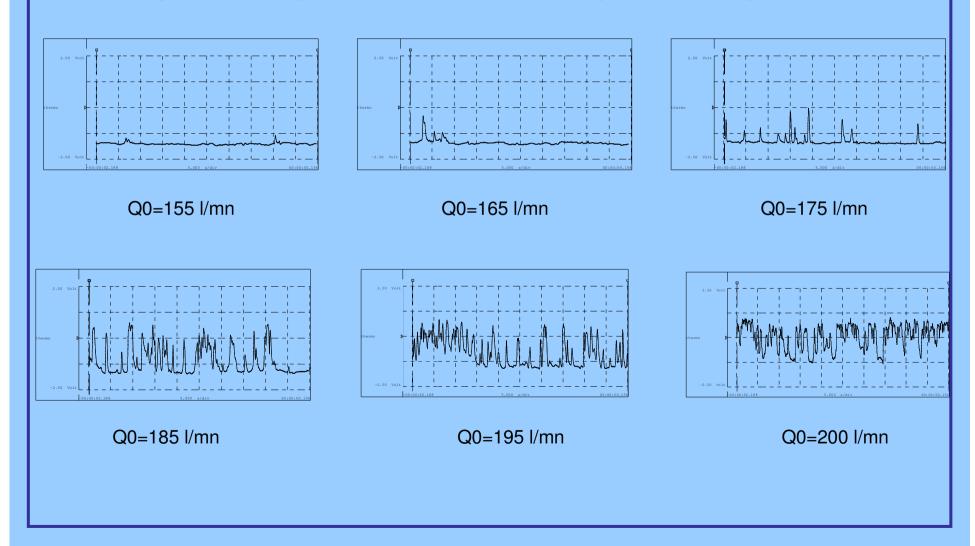
Mesures de pressions différentielles sur une verticale proche de l'ouverture inférieure ◆ FrH=0,35 =0,540,15 =0,77=0,98=1,20Cp =1,56 0,2 =1,74 =2,01 =2,15 -0,15 =2,51 =2,62 =5,30 y/H_E

Mesure de la température à y/H_E= 0,16 au niveau de l'ouverture inférieure



Mesures de la température à $y/H_E=0,16$ au niveau de l'ouverture inférieure quand Fr_H varie.

Passage du régime naturel au régime bloqué.



Conclusion

- Les écoulements produits par une source de gaz chauds à l'intérieur d'une enceinte ventilée ont été analysés et mesurés.
- L'analyse montre deux régimes d'écoulements possibles dependant d'un nombre de Froude Fr_H relié au débit de la source, à la masse volumique à l'intérieur de l'enceinte et à la section de l'ouverture supérieure.
- Pour Fr_H <2, régime naturel avec un écoulement entrant à l'ouverture inférieure et un écoulement sortant à l'ouverture supérieure.
- Pour Fr_H >2, régime bloqué avec deux écoulements sortants.

- Expériences basées sur des visualisations, des mesures de pression différentielle et de température.
- En exprimant Fr_H par :

$$\overline{Fr}_{H} = Q_0^2 / (\Delta T_{1/2} / T_{\infty}) g H (C_S A_S)^2$$

les expériences montrent un régime naturel pour Fr_H <2 et un régime bloqué dès que Fr_H >2,6. Il existe également un régime intermédiaire pour 2> Fr_H >2,6.

- Ce dernier régime où écoulements entrant et sortant sont simultanément présents à l'ouverture inférieure est lié à la taille non négligeable de l'ouverture.

Travaux en cours

Etude de la stratification et des champs de vitesse en fonction de Fr_H