

Contrôle de la fumée dans un tunnel équipé d'un système de ventilation transversale

Présenté par :

Fateh CHAABAT

Collaborateurs:

Pietro SALIZZONI

Mathieu CREYSSELS

Massimo MARRO

Horacio CORREIA

Antoine MOSS

Vendredi 07 juin 2019

PLAN DE LA PRÉSENTATION

1. Introduction générale
2. Etude expérimentale
3. Résultats
4. Conclusions

INTRODUCTION GÉNÉRALE

STRATÉGIES DE VENTILATION

- Ventilation longitudinale



Figure 1: Contrôle longitudinal de la fumée d'incendie (Vauquelin, 2008).

- Ventilation transversale

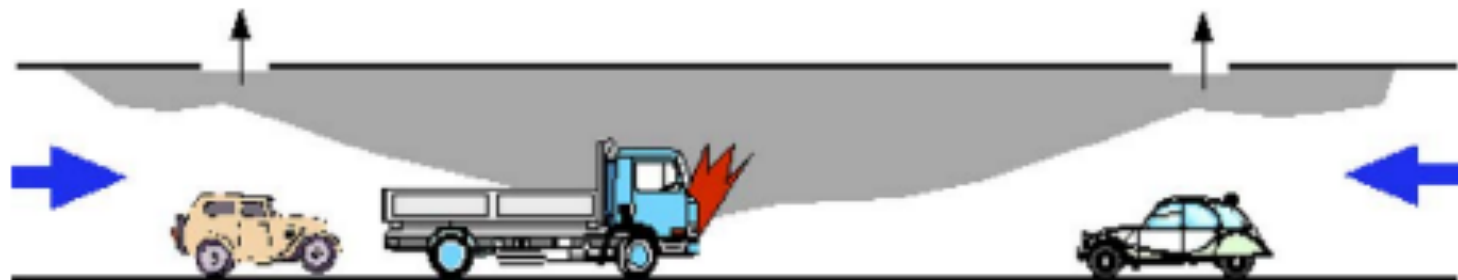
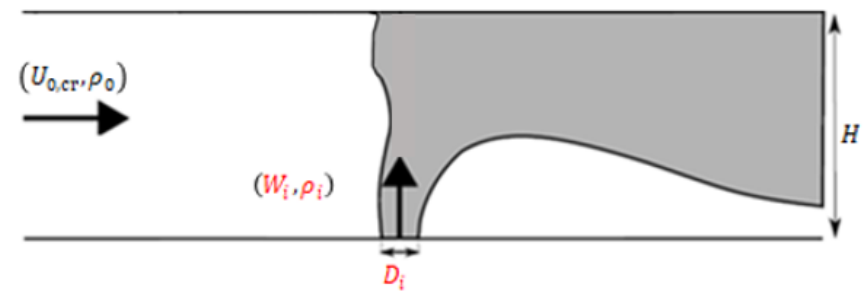
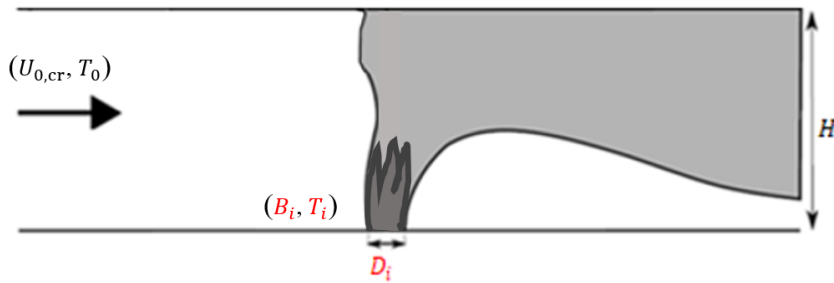


Figure 2: Contrôle transversal de la fumée d'incendie (Vauquelin, 2008).

VENTILATION LONGITUDINALE: Études précédentes



Vitesse critique, $U_{0,cr}$: $\Gamma_i \gg 1$

$$\frac{U_{0,cr}}{W_i} = f\left(\Gamma_i, \frac{\rho_0}{\rho_i}, \frac{D_i}{H}\right) \propto \Gamma_i^{1/3}$$

$$\frac{U_{0,cr}}{(B_i/H)^{1/3}} = \text{cst} = Fr_{cr} \approx 1$$

avec $\Gamma_i = \frac{5}{4\alpha\pi} \frac{B_i}{D_i W_i^3}$ et $B_i = gq_i \frac{\rho_0 - \rho_i}{\rho_0}$

Vitesse critique, $U_{0,cr}$:

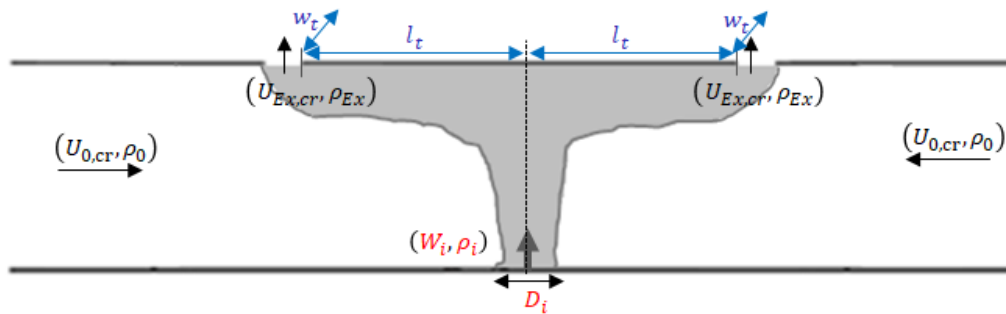
$$U_{0,cr} = f(\rho_i, W_i, D_i, \rho_0, g, H)$$

$$\frac{U_{0,cr}}{W_i} = f\left(\Gamma_i, \frac{\rho_0}{\rho_i}, \frac{D_i}{H}\right)$$

avec $\Gamma_i = \frac{5}{4\alpha\pi} \frac{B_i}{D_i W_i^3}$ et $B_i = gq_i \frac{\rho_0 - \rho_i}{\rho_0}$

- 1: Jiang et al 2018, Fire Safety. J.
- 2: Jiang et al 2019, J. of Fluid Mechanics.

VENTILATION TRANSVERSALE



Vitesse de confinement, $U_{0,cr}$:

$$U_{0,cr} = f(\rho_i, W_i, D_i, \rho_0, g, H, w_t, l_t)$$

$$\frac{U_{0,cr}}{W_i} = f\left(\Gamma_i, \frac{\rho_0}{\rho_i}, \frac{D_i}{H}, \frac{w_t}{W_i}, \frac{l_t}{H}\right) \text{ pour } \Gamma_i > 1$$

$$\frac{U_{0,cr}}{W_i} = f\left(\frac{w_t}{W_i}, \frac{l_t}{H}\right) \Gamma_i^{1/3}$$

$$Fr = \frac{U_{0,cr}}{(B_i/H)^{1/3}} = f\left(\frac{w_t}{W_i}\right) \text{ si } l_t = \text{cst.}$$

OBJECTIF DE CETTE ETUDE

Etudier l'effet de la forme et de la position des trappes sur la propagation de la fumée:

- Deux formes de trappes: carré et rectangulaire (section constante).
- Deux positions pour les trappes carrées: au centre et sur le côté du plafond du tunnel.

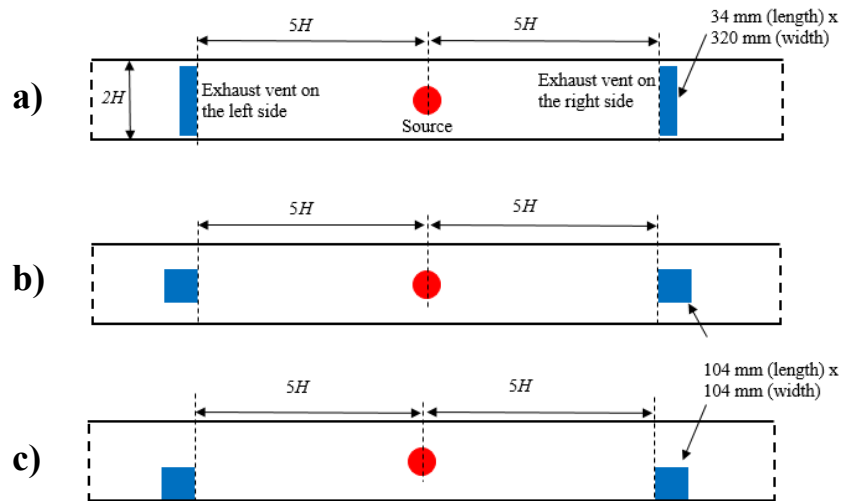


Figure: Schéma des différents événements avec leur emplacement au plafond du tunnel. **a)** Trappes rectangulaires. **b)** et **c)** Trappes carrées placées au centre et sur l'un des côtés de plafond du tunnel.

Évaluation:

- ✓ La vitesse de confinement.
- ✓ La stratification de la couche de fumée.

$$1 < \Gamma_i < 40; \frac{\rho_0}{\rho_i} = 0.7; \frac{D_i}{H} = 0.56$$

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

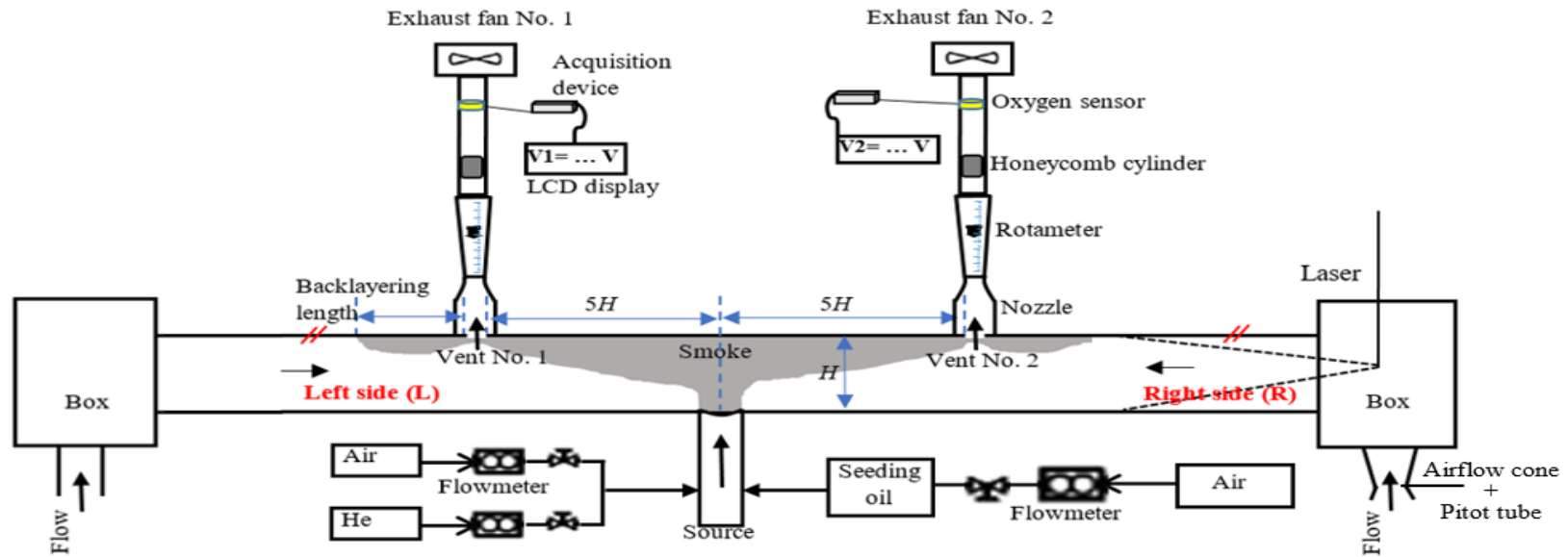


Figure : Schéma du modèle réduit de tunnel en ventilation transversale.

Maquette de tunnel à échelle réduite (LMFA, Ecole Centrale de Lyon):

- Conduite droite: 8.4 m x 0.36 m x 0.18 m.
- Source: rejet d'un mélange d'air et d'hélium.
- Source circulaire: $D_i = 0.1$ m.
- Débitmètres: Contrôle de débits d'air et d'hélium.
- Paroi latérale du tunnel: verre transparent.
- 2 ventilateurs: extraction des fumées.
- 2 rotamètres: mesure des débits d'extraction.
- 2 capteurs d'oxygène: concentration d'O₂.

ETALONNAGE DE ROTAMÈTRES ET DE CAPTEURS D'OXYGÈNE



Rotamètre "Plastic float-type flow meter":

- Fiable, simple et précis (Précision de mesure +/-2.5 %)
- Large gamme de mesure
- Limites de pression et de température: 0 à 10 bar et -10 à +60 ° C.
- Direction d'écoulement: verticalement vers le haut



Capteur d'oxygène "Grove-Gas Sensor (O₂)":

- Capteur haute précision pour tester la concentration d'oxygène
- Compatible avec Arduino
- Plage de mesure : 0-30%vol
- Sensibilité : 0,10 à 0,25 mA (dans l'air)
- Temps de réponse : ≤15s

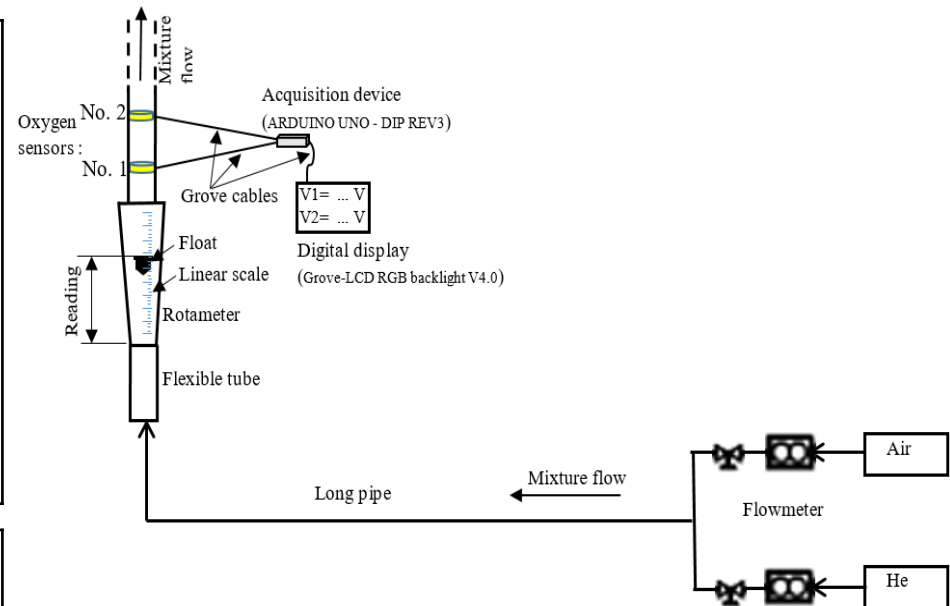


Figure: Schéma de la ligne de calibration de rotamètres et de capteurs d'oxygène.

Tests d'étalonnage:

- $\frac{\rho_0}{\rho_i} = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ et 1.
- $5 < q_i = q_{he} + q_0$ (m³/h) < 45.
- 2 rotamètres: 6,4 – 64 m³/h et 16 – 160 m³/h.

COURBES DE CALIBRATION DE ROTAMÈTRES ET DE CAPTEURS D'OXYGÈNE

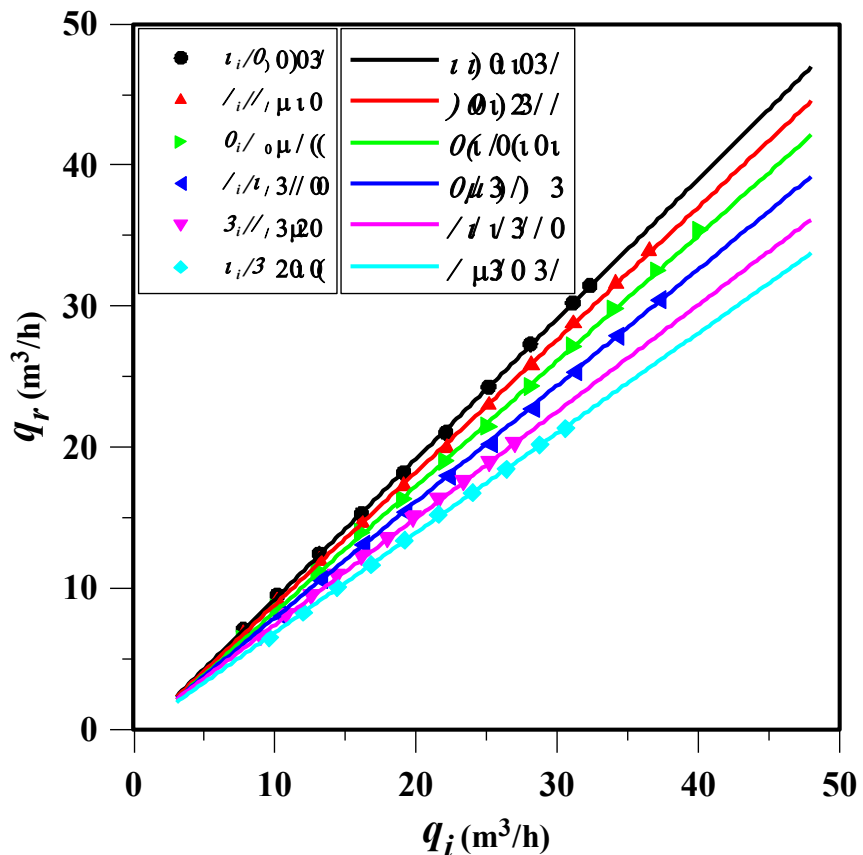


Figure 1: Le débit mesuré q_r vs. le débit imposé q_i pour $0.5 \leq \rho_i/\rho_0 \leq 1$ (Rotamètre: 6,4 – 64 m³/h).

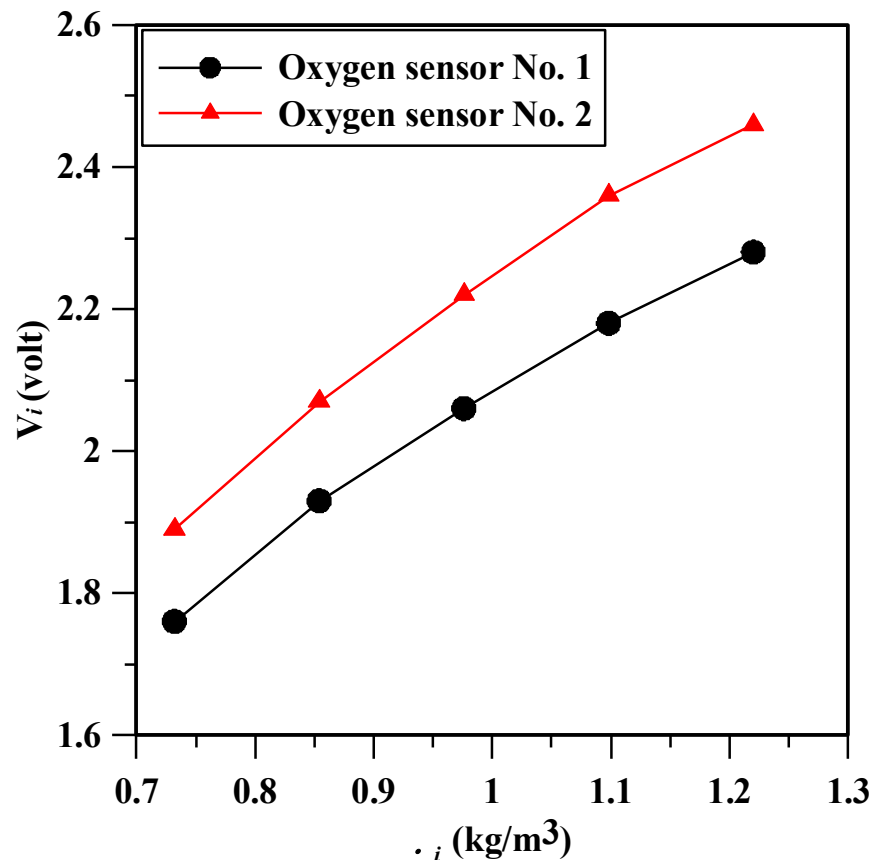


Figure 2: La concentration d'oxygène (exprimée en volt) vs. la densité du mélange.

MÉTHODE: VISUALISATION ET MESURE DE LA VITESSE LONGITUDINALE INDUITE PAR EXTRACTION

■ Visualisations

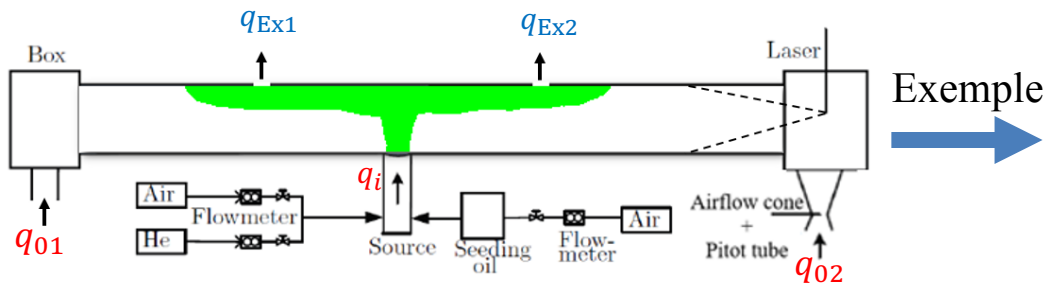


Figure 1: Schéma du modèle réduit de tunnel en ventilation transversale.

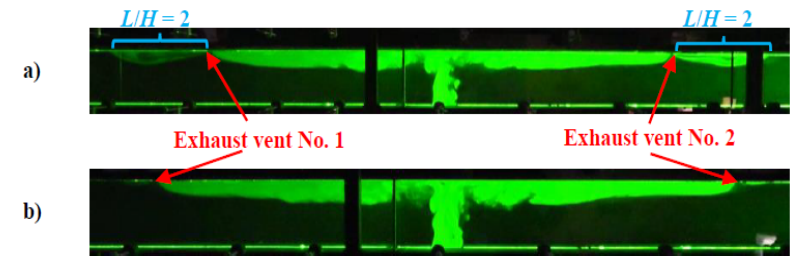


Figure 2: Visualisation de l'écoulement (trappes de forme rectangulaire, $L/H=8$). a) Non confinement. b) confinement.

■ Vitesse longitudinale

- $q_{Ex1} = q_{Ex2}$
- Hypothèse: $q_{01} = q_{02}$
- Bilan de masse: $q_0 = q_{Ex} - q_i/2$

RÉSULTATS

VITESSE DE CONFINEMENT

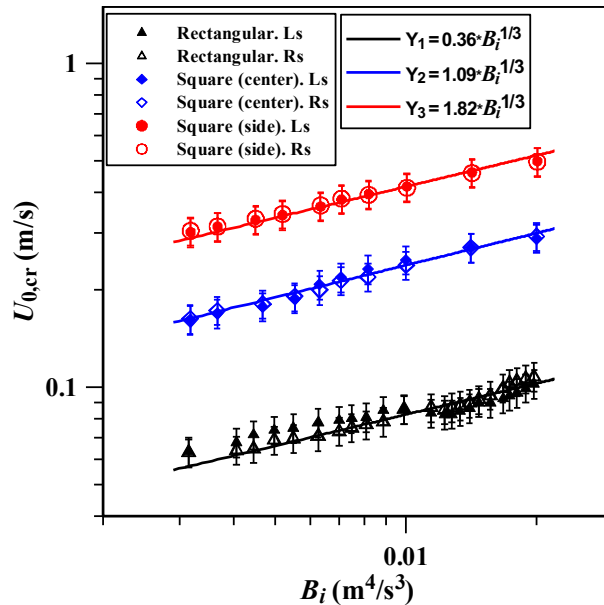


Figure 1: Vitesse de confinement, $U_{0,cr}$, en fonction du flux de flottabilité, B_i .

Résultats:

- Les courbes Ls et Rs sont similaires
- $U_{0,cr} \sim a \cdot B_i^{1/3}$
- $U_{0,cr} \propto Q_c^{1/3}$ car $Q_c = B_i (C_p \rho_0 T_0) / g$
- La trappe de forme rectangulaire est plus efficace pour le contrôle des fumées.

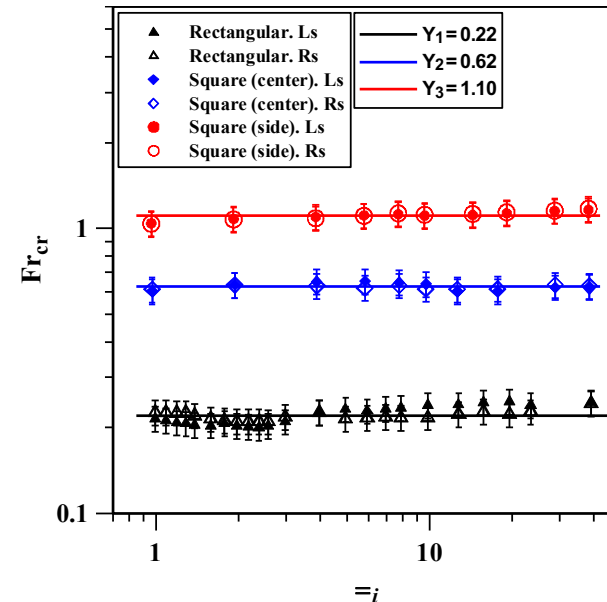


Figure 2: Nombre de Froude critique, Fr_{cr} , en fonction du nombre de Richardson, Γ_i .

Résultats:

- Confinement est atteint avec un nombre de Froude constant, $Fr_{cr} = U_{0,cr} / (B_i / H)^{1/3}$.
- Fr_{cr} est indépendant du Γ_i .

INFLUENCE DE DÉBIT D'EXTRACTION SUR LA STRATIFICATION DE LA FUMÉE

▪ Trappes de forme rectangulaire

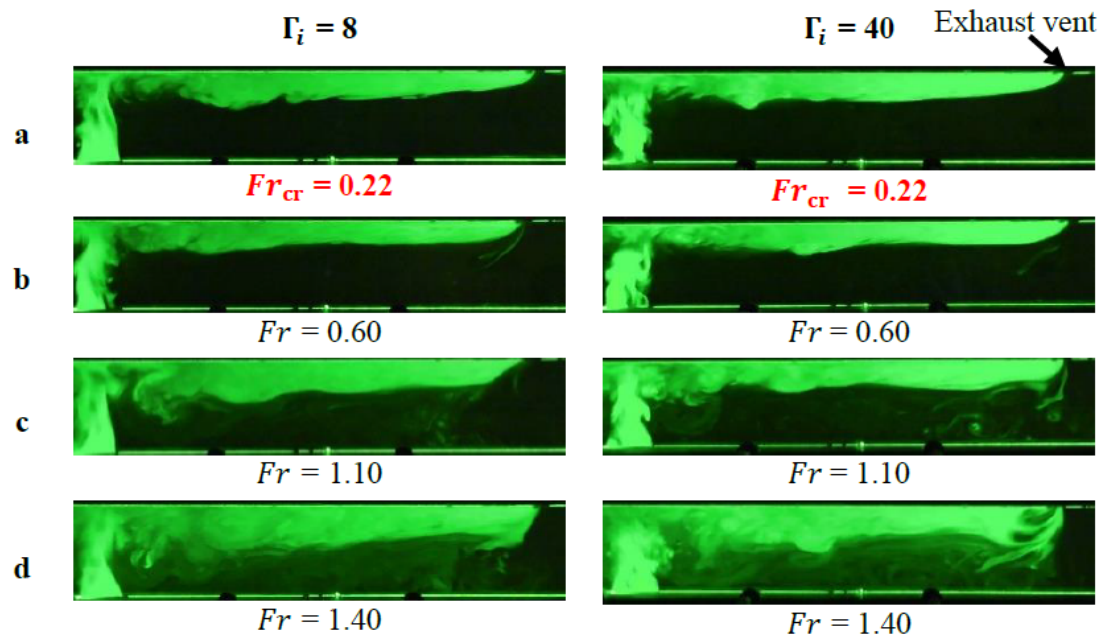


Figure: Visualisation des différents régimes de stratification des fumées dans le tunnel équipé de trappes rectangulaires. $Fr = U_0/(B_i/H)^{1/3}$.

Résultat:

- Régimes de stratification i) Stable: $Fr < 0.6$ ii) Transitoire: $0.6 < Fr < 1.1$ iii) Instable: $1.1 < Fr$.

INFLUENCE DE DÉBIT D'EXTRACTION SUR LA STRATIFICATION DE LA FUMÉE

▪ Trappes de forme carrée (centre)

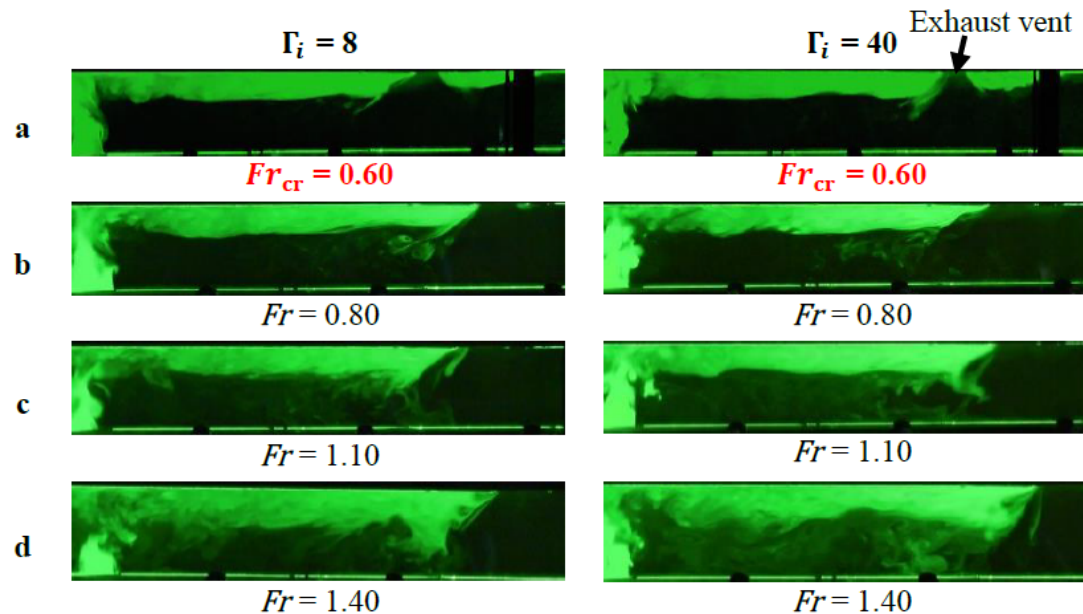


Figure: Visualisation des différents régimes de stratification des fumées dans le tunnel équipé de trappes carrées placées au centre. $Fr = U_0/(B_i/H)^{1/3}$.

Résultat:

- Régimes de stratification: i) Stable: $Fr < 0.6$ ii) Transitoire: $0.6 < Fr < 0.8$ iii) Instable: $0.8 < Fr$.
- Régime instable: $1.1 < Fr$ pour les trappes de forme rectangulaire.

INFLUENCE DE DÉBIT D'EXTRACTION SUR LA STRATIFICATION DE LA FUMÉE

▪ Trappes de forme carrée (côté)

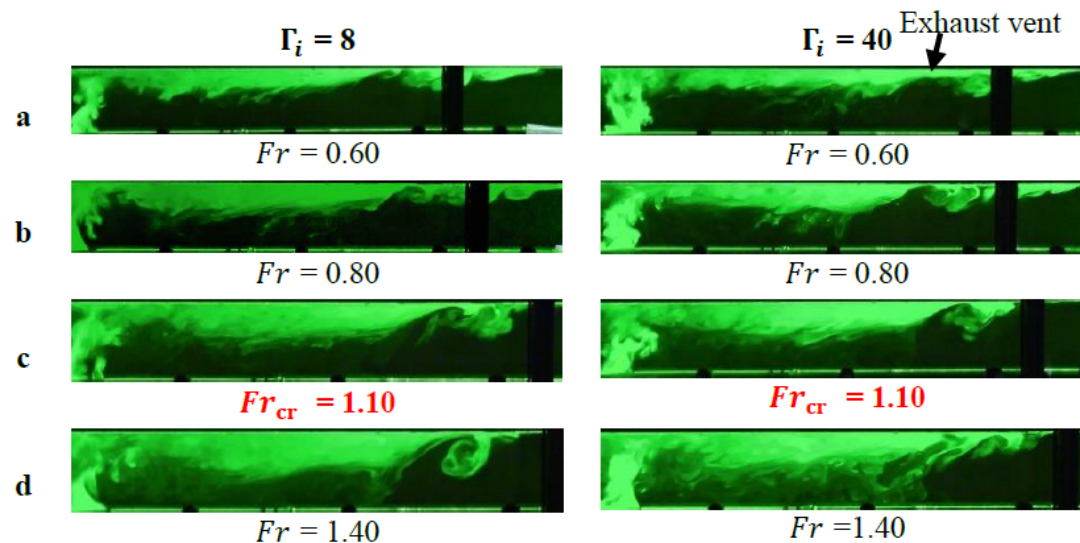


Figure: Visualisation des différents régimes de stratification des fumées dans le tunnel équipé de trappes carrées placées sur l'un des côtés du plafond. $Fr = U_0/(B_i/H)^{1/3}$.

Résultat:

- Régimes de stratification: i) Stable: $Fr < 0.6$ ii) Transitoire: $0.6 < Fr < 0.8$ iii) Instable: $0.8 < Fr$.

CONCLUSIONS

- La largeur des trappes est l'échelle pertinente pour le contrôle de fumée dans les tunnels équipés de systèmes de ventilation transversaux: le Froude critique montre une claire dépendance en fonction de la largeur de la trappe.
- L'emplacement des trappes au plafond du tunnel joue un rôle important sur le contrôle des fumées.
- Pour des trappes carrées positionnées sur l'un des côtés du plafond, la dé-stratification est atteinte avant même d'atteindre les conditions de confinement.

EFFETS DES BARRIÈRES SOLIDES SUR LA PROPAGATION DES FUMÉES



Barrières solides:

$$h = \frac{H}{4} \text{ et } h = \frac{H}{3}$$

 h : hauteur des barrières
 H : hauteur du tunnel

Objectifs:

- Contrôler la propagation des fumées (surtout le cas avec les trappes carrées).
- Préserver la stratification naturelle des fumées.
- ...

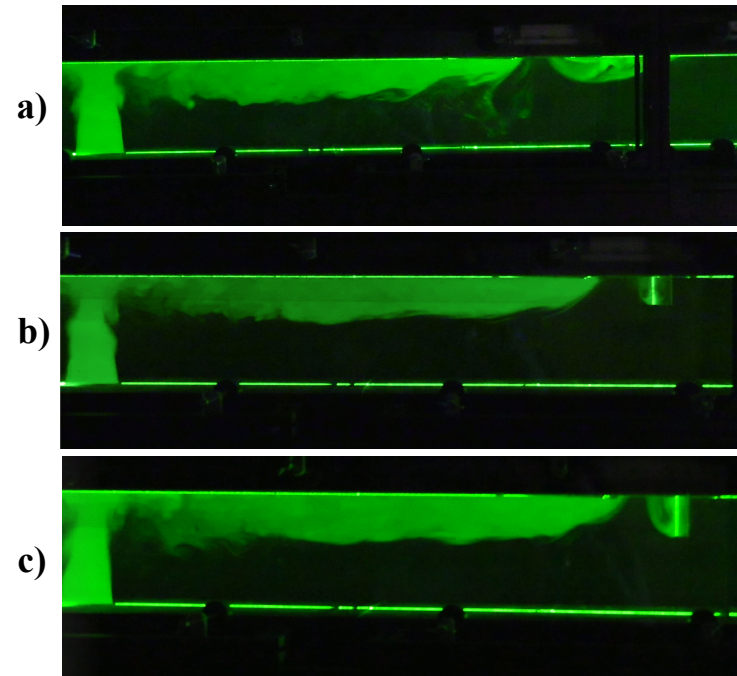


Figure: Visualisation, dans les conditions de confinement, de l'écoulement dans le tunnel avec des trappes carrées placées au centre ($I_i = 1$). **a)** Cas sans barrière ($U_{0,cr} = 0.29$ m/s). **b)** Cas avec barrière $H/4$ ($U_{0,cr} = 0.20$ m/s). **c)** Cas avec barrière $H/3$ ($U_{0,cr} = 0.16$ m/s).

EFFETS DES BARRIÈRES SUR LA VITESSE DE CONFINEMENT

Définition :

$R_c = \frac{U_{0,cr \text{ avec barrière}}}{U_{0,cr \text{ sans barrière}}}$ est le rapport des vitesses critiques.

$1 - R_c$ est la réduction de la vitesse critique sous l'effet e barrière.

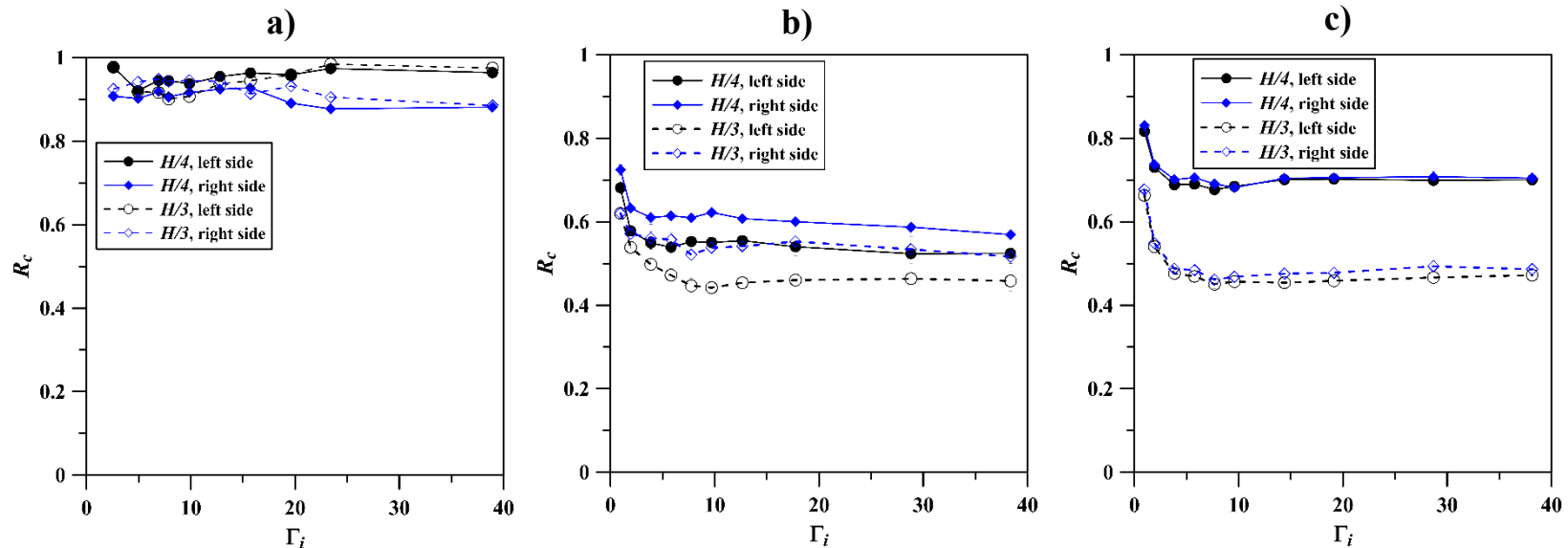
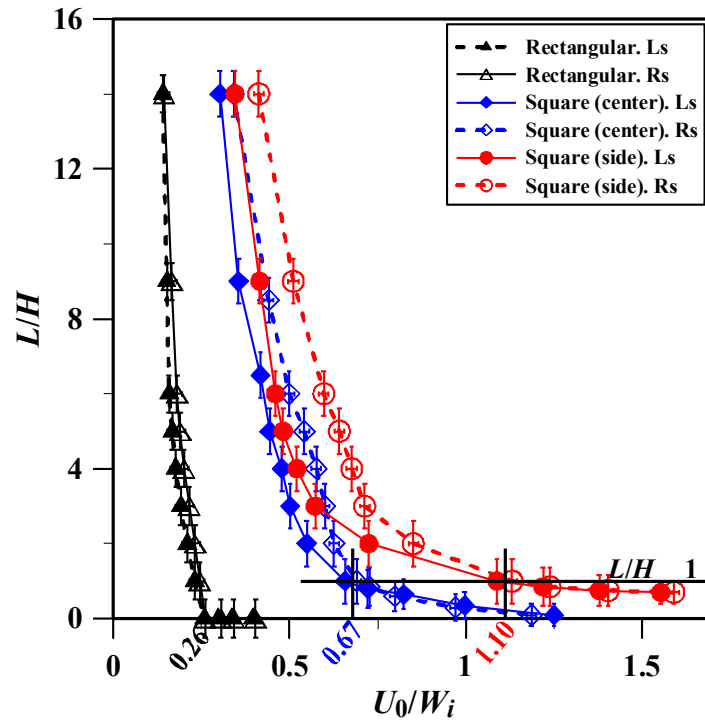


Figure: Rapport des vitesses critiques en fonction du nombre de Richardson. **a)** Trappes de forme carré. **b)** Trappe de forme carrée placées au centre. **c)** trappes de forme carrée placées sur l'un des côtés du plafond du tunnel.



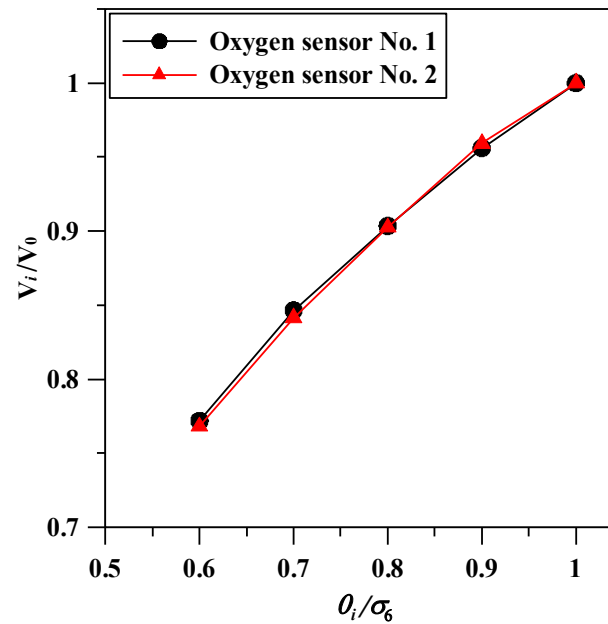
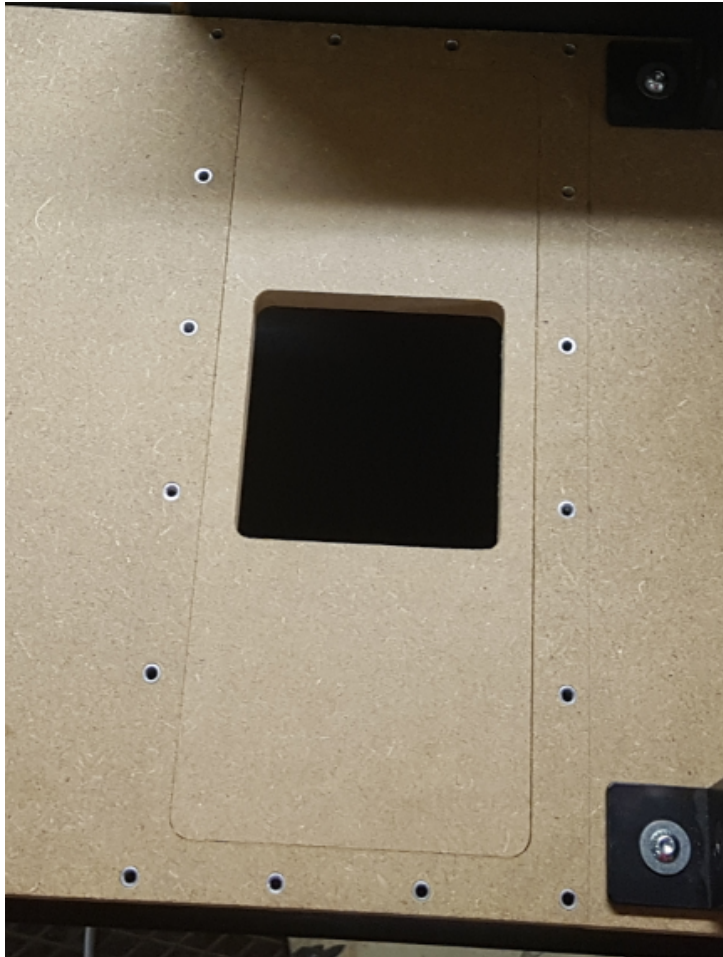


Figure: La tension sans dimension V_i/V_0 vs. la densité sans dimension ρ_i/ρ_0 .



Trappe carrée fixée au centre du plafond du tunnel

Simulation numérique

1) Le comportement des fumées en cas d'incendie dans les tunnels en ventilation transversale.

Etude préliminaire:

Les systèmes '**transversaux**' ont tendance à '**déstratifier**' la nappe de fumées pour des vitesses d'extraction élevées ce qui produit plus de mélange entre l'air frais et l'air pollué près de foyer.

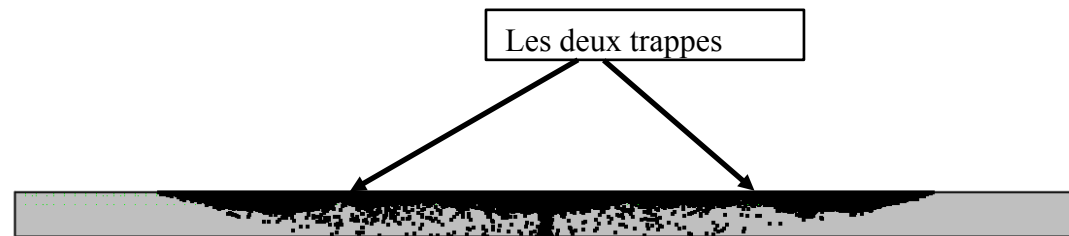


Figure 1: Débit d'extraction : 0.045 m³/s.



Figure 2: Débit d'extraction : 0.113 m³/s.

La zone noire indique le domaine rempli par la fumée.

Simulation numérique

2) Influence de la forme et de la position des trappes sur l'extension de la nappe de fumée.

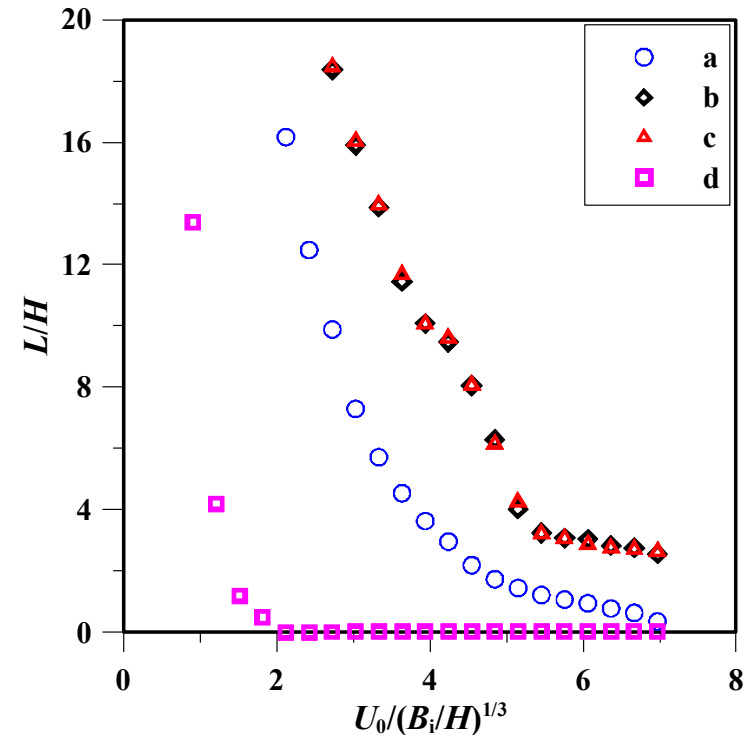
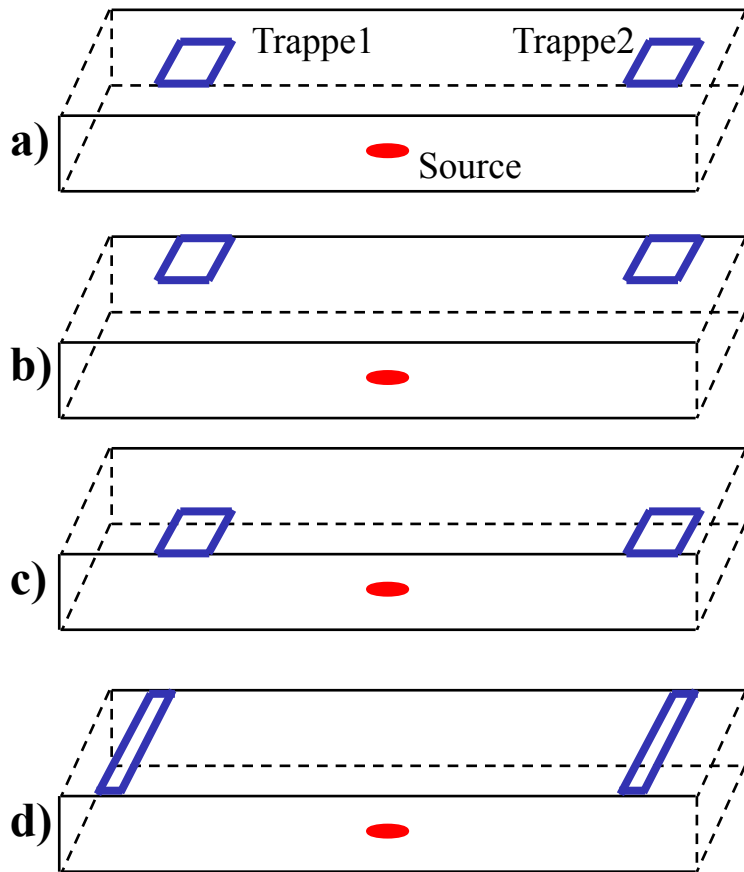


Figure: Evolution de la nappe de retour (exprimé en L/H) en fonction de la vitesse d'extraction (exprimé en $U_0/(B_i/H)^{1/3}$). Cas $\Gamma_i = 8$

Simulation numérique

3) Les effets de barrières dans les tunnels en ventilation transversale.



Figure 1: Cas sans barrières. Apparition de la nappe de retour en aval des trappes de l'extraction.



Figure 2: Cas avec barrières. Barrières empêchent le retour de la fumée en aval des trappes d'extraction sans déstratifier la nappe.