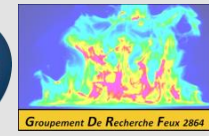


# Propagation de fumées dans une galerie

Par O. Vauquelin et R. Mehaddi



# Sommaire

1. Généralités sur les feux en tunnel
2. Description d'un feu en tunnel
3. Phase instationnaire: courants de gravités
4. Phase stationnaire: décroissance de la température
5. Vitesse critique

# Généralités sur les feux en tunnel

# Généralités sur les feux en tunnel

## Définitions

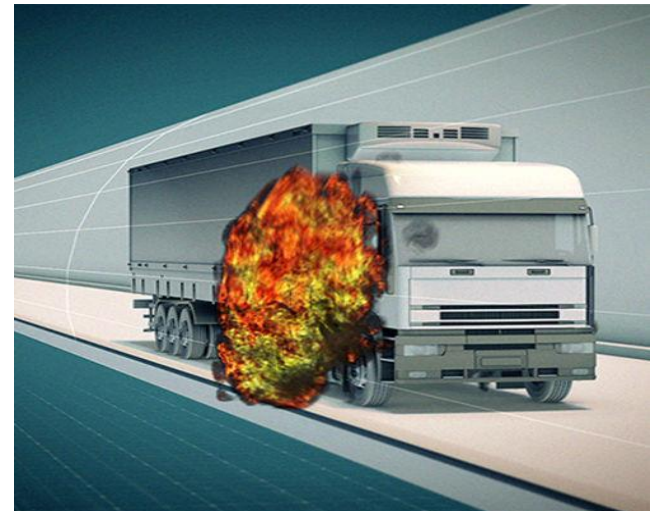
Un tunnel est une galerie souterraine servant de voie de passage.

Différents types de tunnels suivant leurs utilisations

- Tunnels Ferroviaires
- Tunnels routiers
- Tunnels pour piétons
- Tunnels monodirectionnels
- Tunnels bidirectionnels

# Généralités sur les feux en tunnel

- **Dangerosité des incendies en tunnel:**
- Incendies rares mais destructeurs
- **exemple: tunnel routier**
- Tunnel du mont Blanc
  - Puissance maximale : 190 MW
  - Température de l'ordre de 1000°C
  - Durée de 53 heures
  - 39 morts



# Généralités sur les feux en tunnel

## Autre exemple: Tunnel ferroviaire

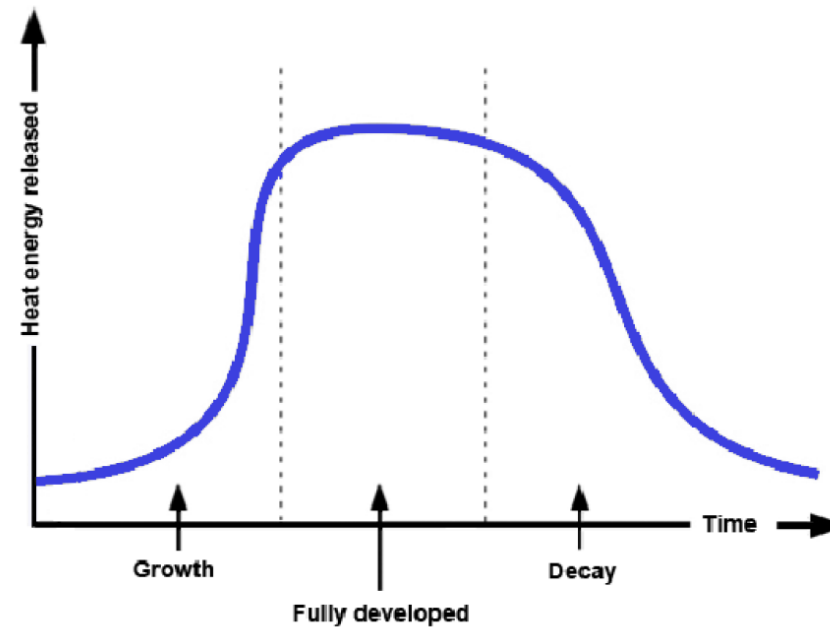
- Incendie de Daegu en Corée du sud
- Incendie criminel
- 198 morts



# Généralités sur les feux en tunnel

## Puissance du feu:

- Le développement d'un feu est séparé en trois phases distinctes :
  - Montée en puissance du feu.
  - Feu pleinement développé
  - phase de décroissance et d'extinction



# Généralités sur les feux en tunnel

## Puissance du feu:

- Deux situations:
  - Feu contrôlé par la quantité de combustible.
  - Feu contrôlé par la ventilation (sous ventilé).



# Généralités sur les feux en tunnel

## Puissance du feu:

- Feu contrôlé par la quantité de combustible, oxygène abondant.

$$Q = \dot{m}_f \chi \Delta H_c ,$$

$\dot{m}_f$  : Débit massique de combustible

$\Delta H_c$ : Energie dégagée par unité de masse de combustible

$\chi$  : Coefficient d'efficacité de la combustion

# Généralités sur les feux en tunnel

## Puissance du feu:

- Feu contrôlé par la ventilation (sous ventilé).
- Une quantité importante: la masse d'air entrant par les ouvrants lors d'un incendie.
- Quintiere propose la relation suivante:  $\dot{m}_a = C \rho_a A_0 \sqrt{gh_0}$   
Avec  $C = 0.08 - 0.13$ .



## Généralités sur les feux en tunnel

### Puissance du feu:

- Feu contrôlé par la ventilation (sous ventilé).

Sur la base de la quantité d'air disponible pour le feu on écrit:

$$Q_{max} = 3000\dot{m}_a ,$$



$$Q_{max} = 1500A_0\sqrt{h_0} .$$

$$Q_{max} = 3000C\rho_a A_0\sqrt{gh_0} ,$$

Avec  $\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$  et  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

## Généralités sur les feux en tunnel

### Exercice d'application:

- La rame contient 7 fenêtres des deux cotés de dimension  $1.2 \times 1.2 \text{ m}^2$  et une porte de  $1 \times 2 \text{ m}^2$ . Quelle est la puissance maximale?



## Généralités sur les feux en tunnel

### Exercice d'application:

- $A_{0_{fenetres}} = 1.2 \times 1.2 \times 14 = 20.2 \text{ m}^2$
- $A_{0_{porte}} = 1 \times 2 = 2 \text{ m}^2$
- $Q_{max} = 1500 * (20.2 \times \sqrt{1.2} + 2 \times \sqrt{2}) = 37 \text{ MW}$
- Dans un tunnel, Ingason montre que la puissance sera plus grande et devra être multiplié par un facteur 1.72. On obtient une puissance de 64MW.

# Généralités sur les feux en tunnel

- **Ventilation dans les tunnels:**
- Fonctionnement normal:
  - Renouvellement d'air : ventilation sanitaire
  - Applications particulières: réduction des ondes de chocs dans les tunnels pour TGV.



# Généralités sur les feux en tunnel

## Ventilation en cas d'incendie:

- **Les facteurs influents:**

- la géométrie du tunnel : section, hauteur, longueur, Pente.
- Mono ou bidirectionnel.
- Routier ou ferroviaire.
- Nombre de véhicules qui empruntent le tunnel.

- **Types de ventilations:**

- Naturelle
- Longitudinale
- Transversale

# Généralités sur les feux en tunnel

- **Ventilation naturelle:**
  - Différence de pression entre l'entrée et la sortie du tunnel.
  - Effet piston induit par le passage des voitures.
  - Tunnels de courtes dimensions longitudinales.



## Généralités sur les feux en tunnel

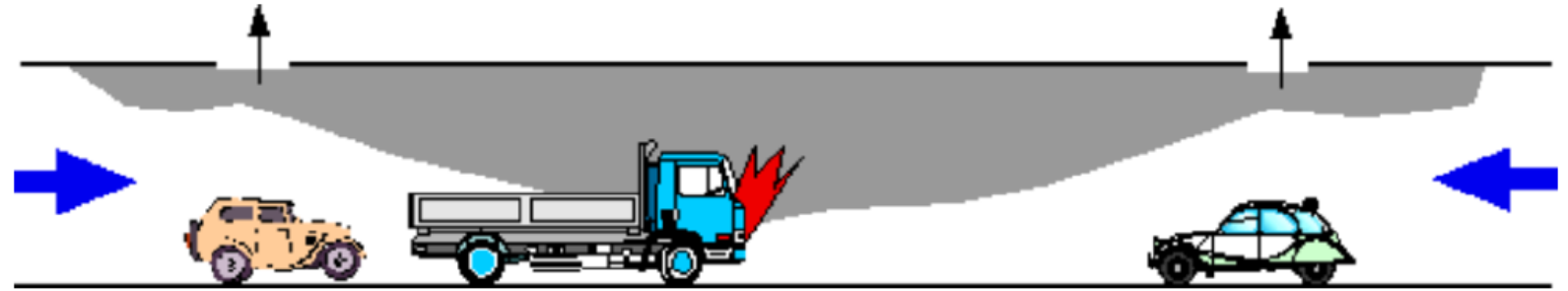
- Ventilation longitudinale:



- Utilisation de ventilateurs (accélérateurs).
- Adéquat pour les tunnels monodirectionnels et non congestionnés.

## Généralités sur les feux en tunnel

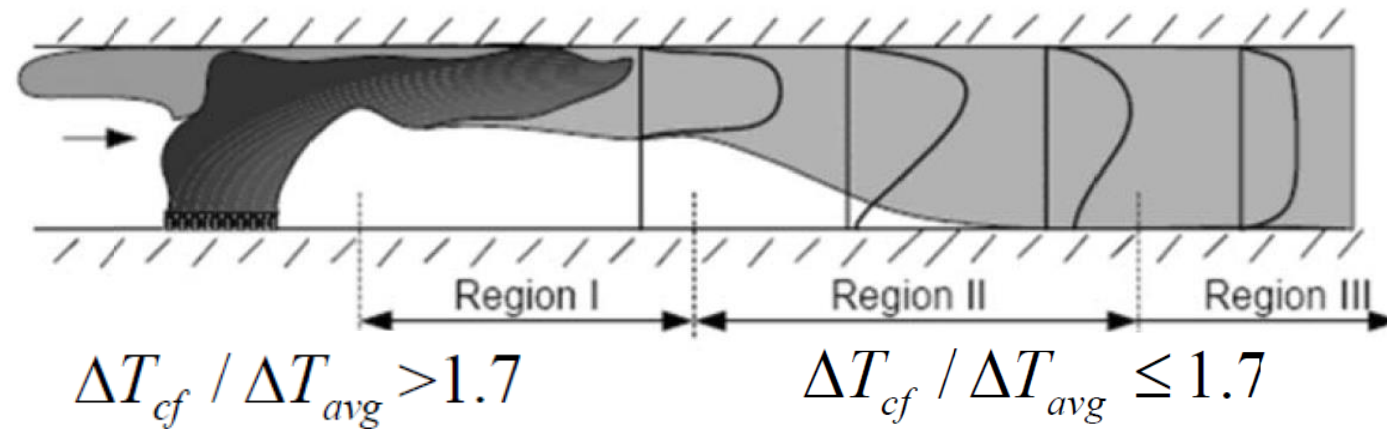
- Ventilation transversale:



- Réseau de gaines d'extraction au plafond.
- Adéquat pour les tunnels mono et bidirectionnels.
- Favorise la stratification des fumées.

# Généralités sur les feux en tunnel

- Notions de stratification: Critère de Newman



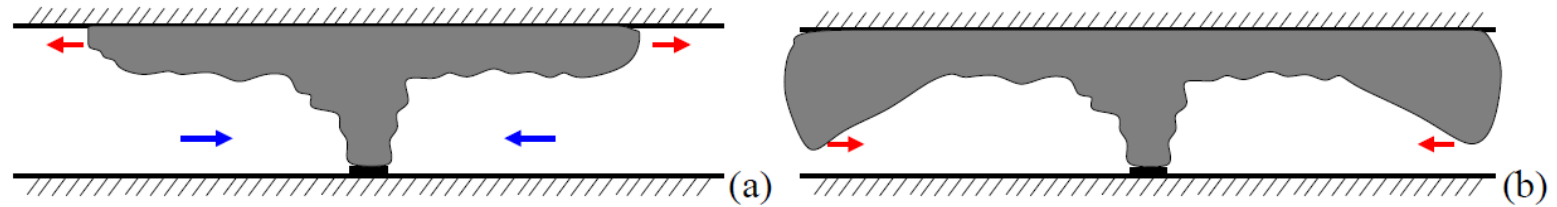
$\Delta T_{cf} = T_c - T_f$  : différence de température entre les points  
 $T_f = 0.12 H$  et  $T_c = 0.88 H$

$\Delta T_{avg} = T_{avg} - T_a$  : différence entre la température moyenne dans la section considérée et la température ambiante

# Description d'un feu en tunnel

## Description d'un feu en tunnel

- Cas du feu ventilé naturellement:



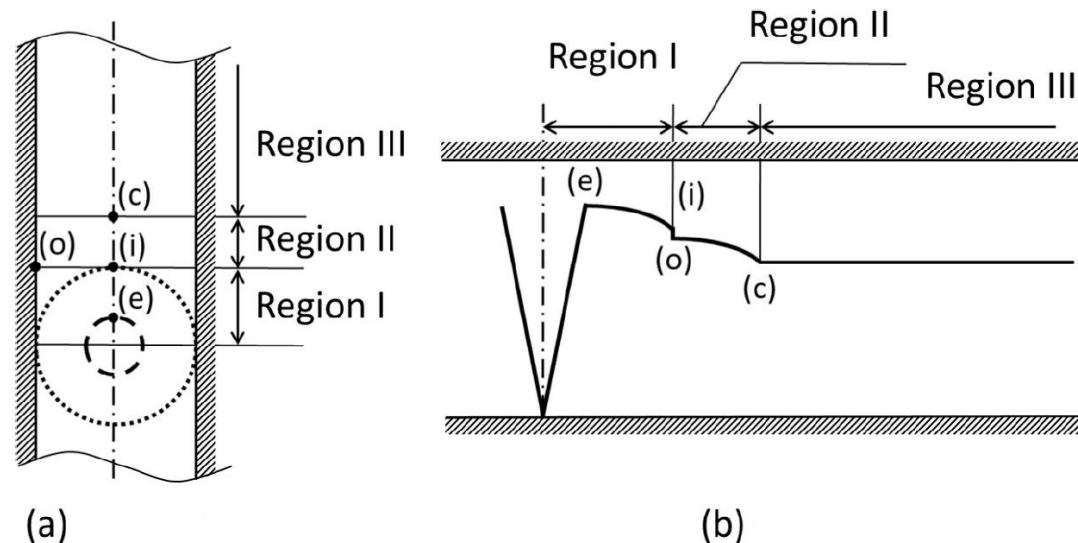
- Développement d'un courant de fumées sous plafond
- Développement du plafond de fumées sur de longues distances
- Refroidissement, ralentissement et dé-stratification graduelle des fumées.

# Description d'un feu en tunnel

## Cas du feu ventilé naturellement:

On distingue trois régions au voisinage du feu

- Région I : écoulement radial au plafond
- Région II : zone de transition (ressaut hydraulique)
- Région III : écoulement unidirectionnel



# Description d'un feu en tunnel

## Ecoulement au plafond:

La théorie d'Alpert permet d'obtenir les conditions initiales de la couche de fumées stratifiée:

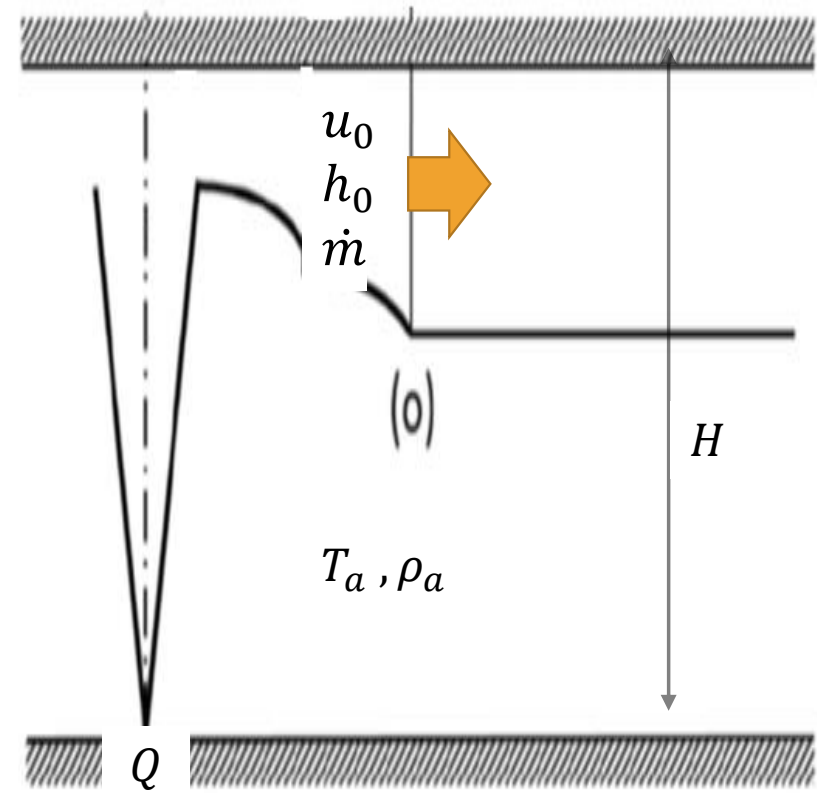
$$u_0 = 1.52 \sqrt{g H} \sqrt{\frac{Q_0^{2/3}}{1 + 6.13 Q_0^{2/3}}}$$

$$h_0 = 0.05 \frac{H^2}{W}$$

$$\frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_a} = \frac{3.52 Q_0^{2/3}}{1 + 6.13 Q_0^{2/3}}$$

$$\dot{m} = u_0 h_0 \rho_0$$

où 
$$Q_0 = \frac{Q}{\rho_a T_a c_p H^{5/2} \sqrt{g}}$$

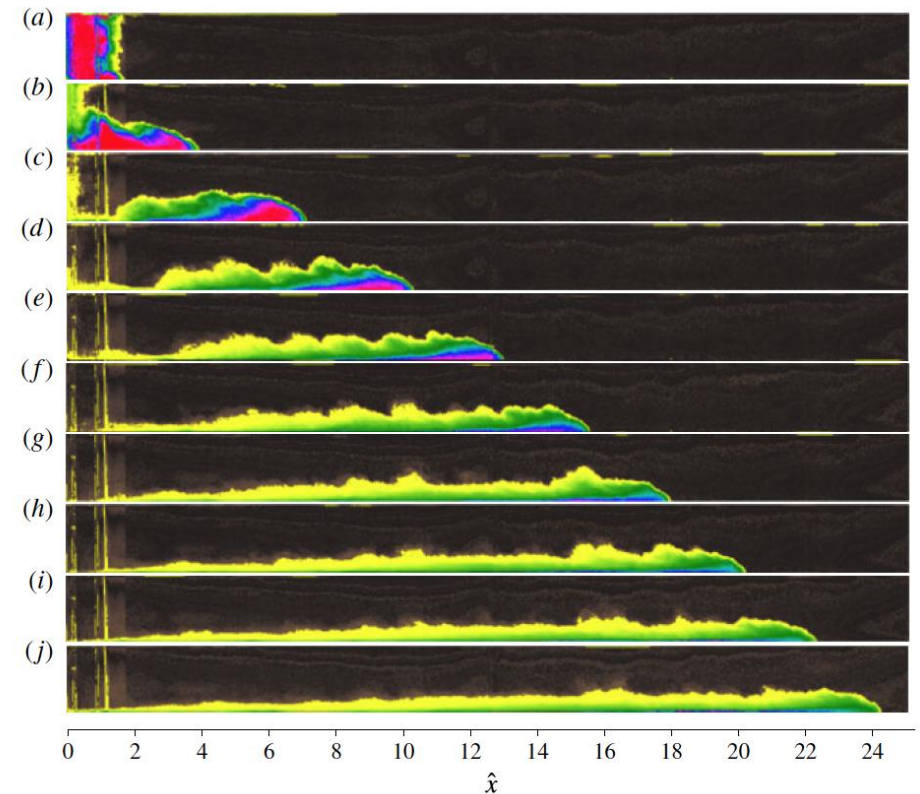


# Courants de gravités



# Courants de gravités

- **Définitions:**
- Un courant de gravité est un écoulement sur parois, mû par sa flottabilité.
- Domaines d'applications très larges:
  - Géophysique
  - Incendie en tunnel
  - Militaire
  - .....



# Courants de gravités

- Exemples:

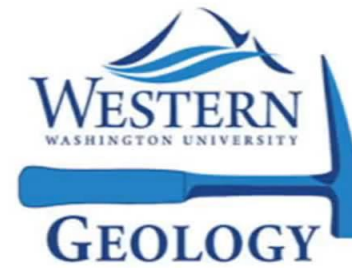


Vent de sable

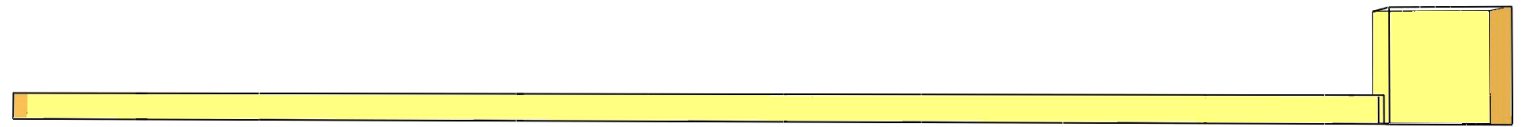


Couche de fumées  
dans un tunnel

# Courants de gravités



# Courants de gravités



Time: 1.2

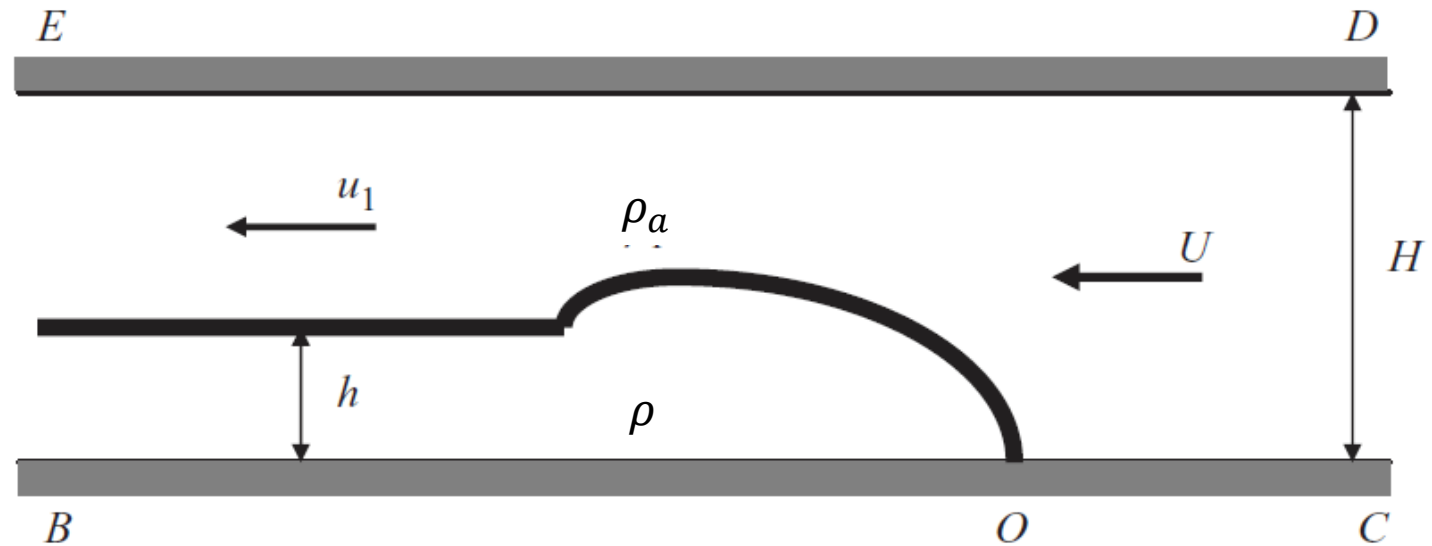


mesh: 1

# Courants de gravités

## Théorie de Benjamin:

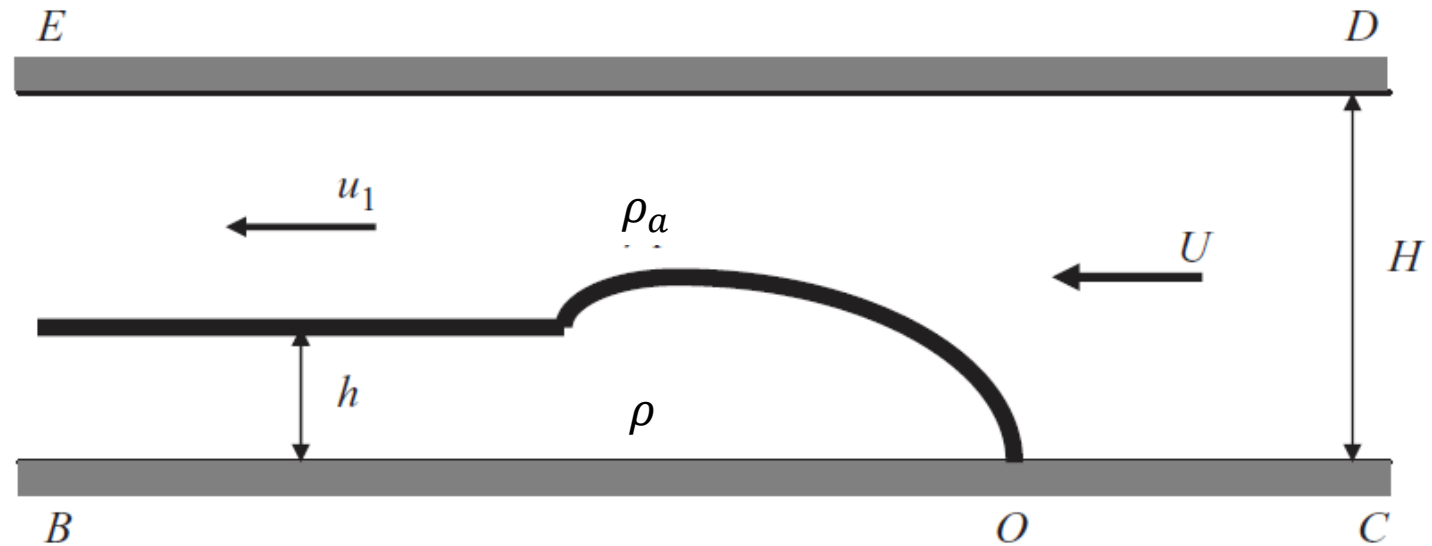
- Un ingrédient important, le nombre de Froude au front  $Fr = \frac{U}{\sqrt{g \frac{\Delta\rho}{\rho_a} h}}$



Volume de contrôle BCDE

# Courants de gravités

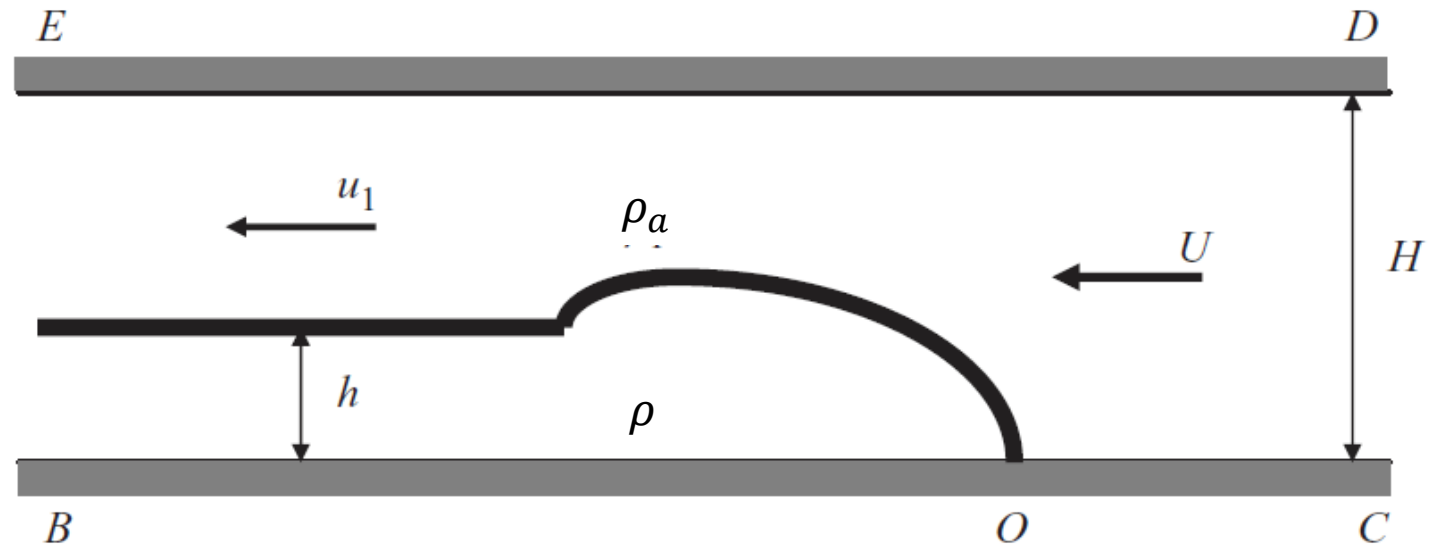
## Théorie de Benjamin:



Conservation du débit:  $UH = u_1(H - h)$

# Courants de gravités

## Théorie de Benjamin:

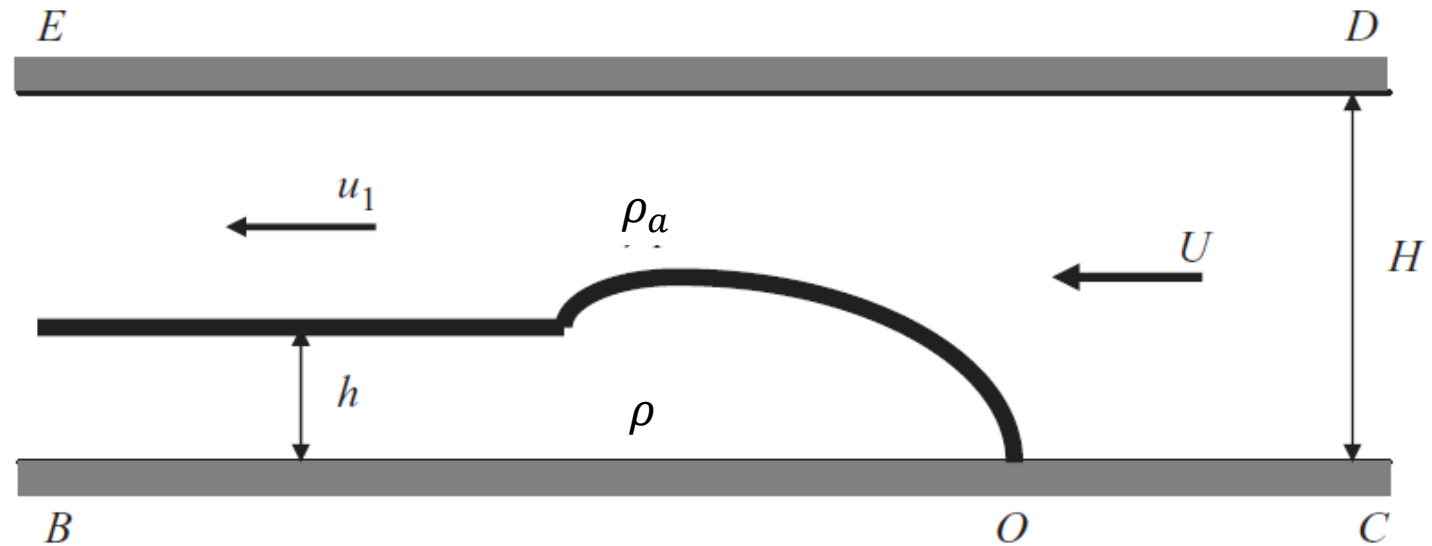


Conservation quantité de mouvement:

$$\int_B^E p \, dz + \int_B^E \rho u^2 \, dz = \int_C^D p \, dz + \int_C^D \rho_a U^2$$

# Courants de gravités

## Théorie de Benjamin:

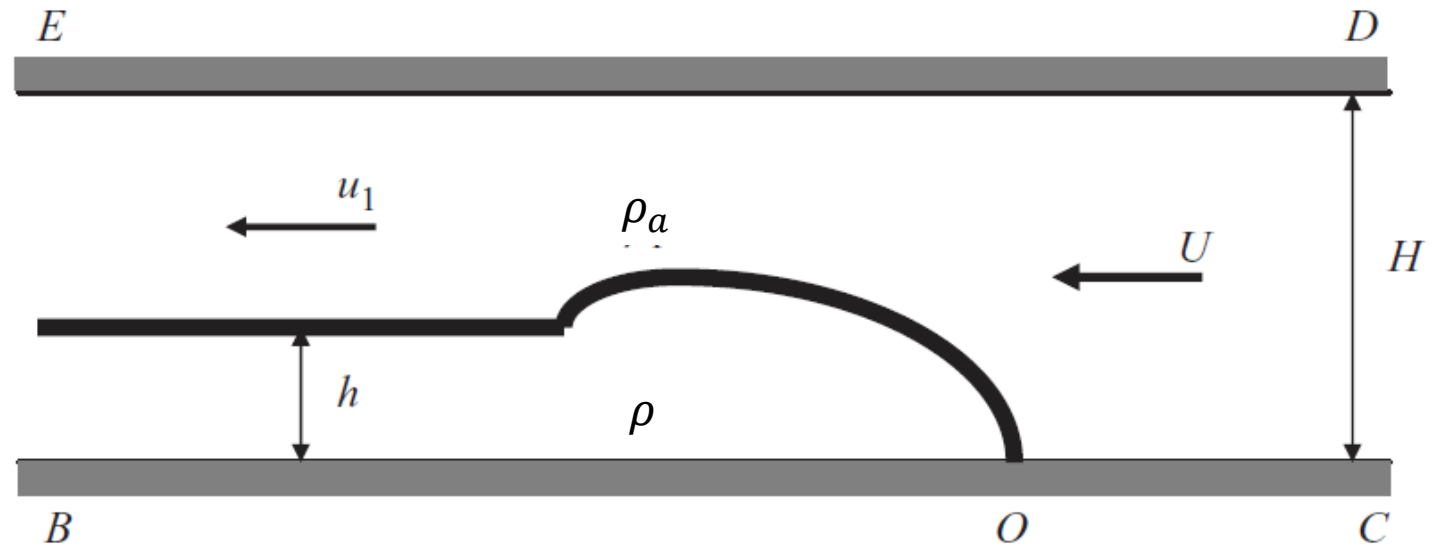


Pression BE: 
$$p = \begin{cases} p_B - g\rho z & 0 < z < h \\ p_B - g\rho h - g\rho_a(z - h) & h < z < H \end{cases}$$



# Courants de gravités

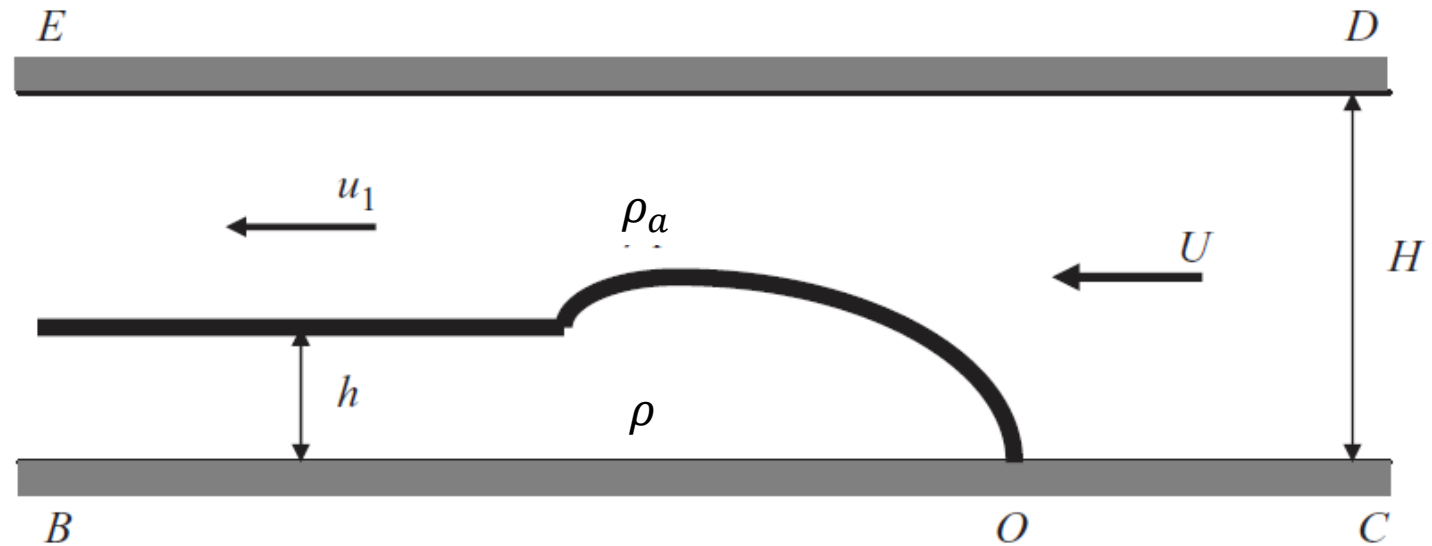
## Théorie de Benjamin:



Pression CD :  $p = p_c - g\rho_a z$

# Courants de gravités

## Théorie de Benjamin:



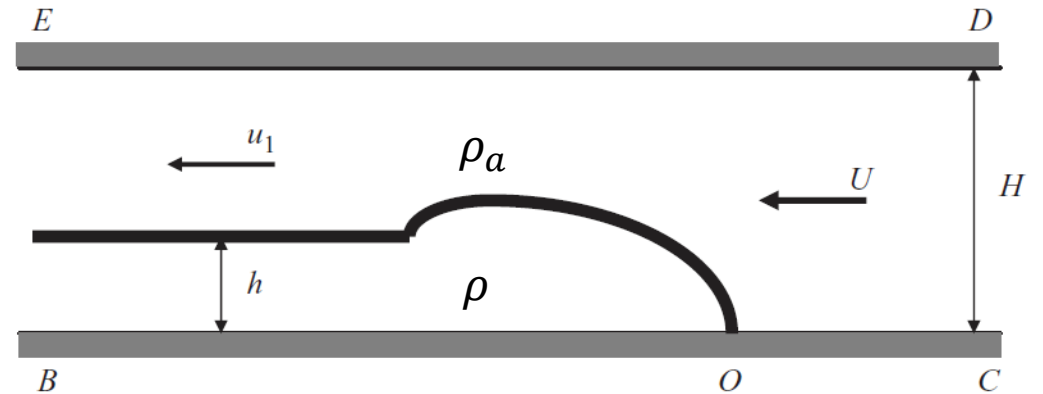
$$\text{Bernoulli: } P_c = P_o - \frac{1}{2} \rho_a U^2$$

$$P_B = P_O$$

# Courants de gravités

Théorie de Benjamin:

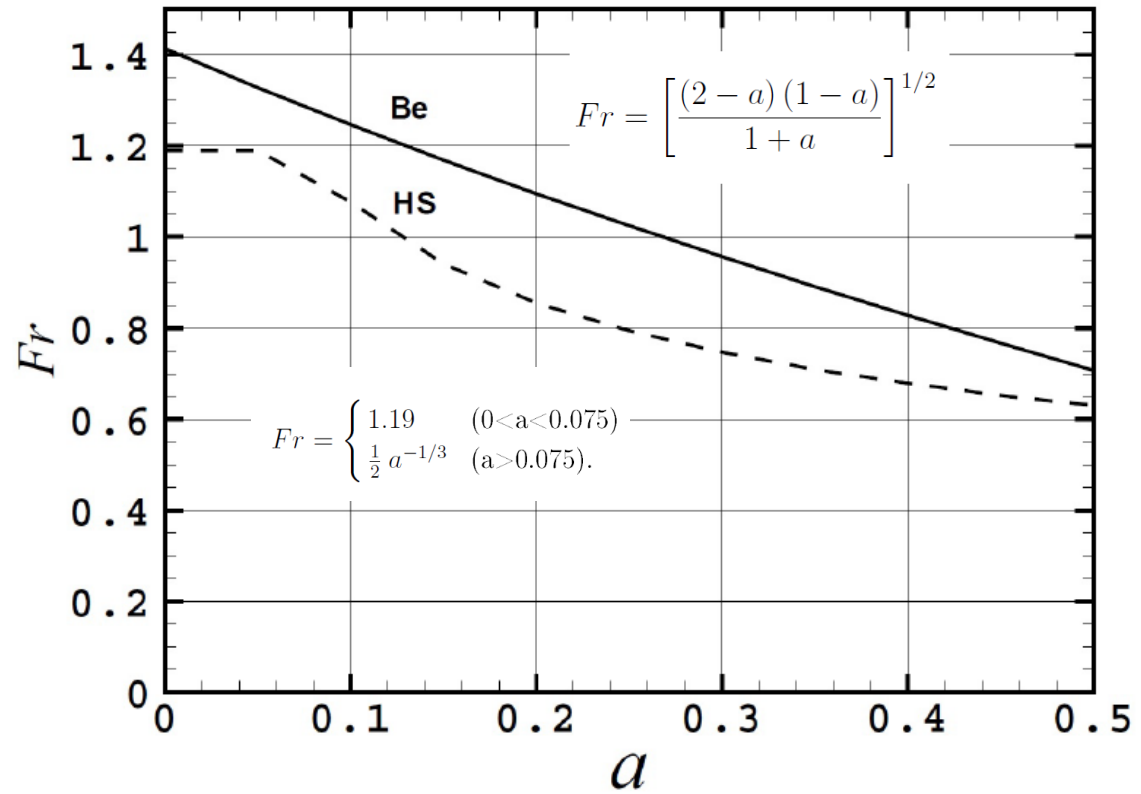
$$Fr = \left[ \frac{(2 - a)(1 - a)}{1 + a} \right]^{1/2}$$



• Où  $Fr = \frac{U}{\sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho_a} h}}$  et  $a = h/H$

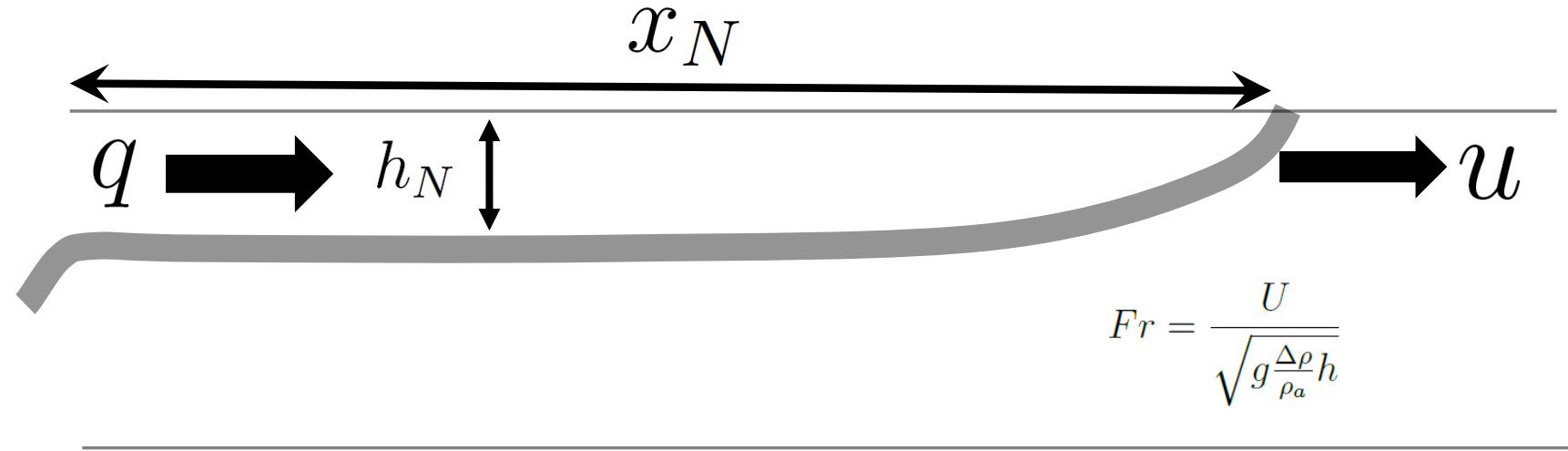
# Courants de gravités

## Théorie de Benjamin:



# Courants de gravités

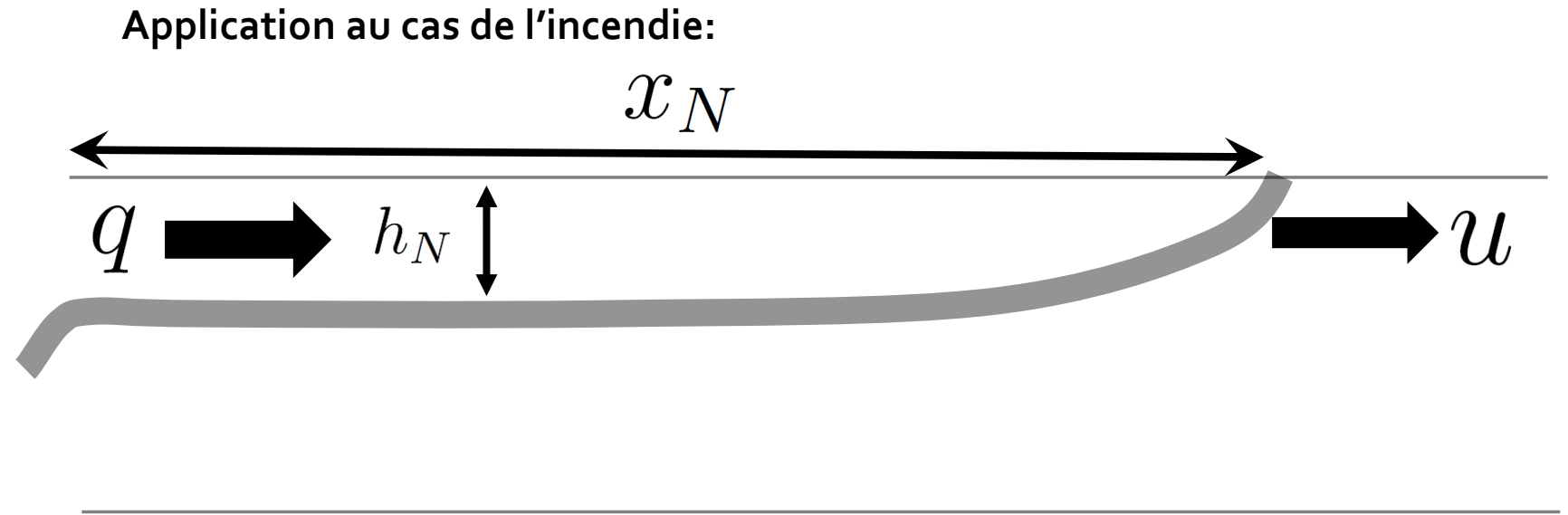
Application au cas de l'incendie:



Conservation du volume (pas d'entraînement):

$$x_N h_N = \frac{q t}{W} \quad \longrightarrow \quad \frac{dx_N}{dt} = u = Fr(a) \left( g \frac{\Delta \rho}{\rho_a} \right)^{1/2} h_N^{1/2}$$

## Courants de gravités



$$x_N = \left(\frac{q}{W}\right)^{1/3} Fr(a)^{2/3} \left(g \frac{\Delta\rho}{\rho_a}\right)^{1/3} t,$$
$$h_N = \left(\frac{q}{W}\right)^{2/3} Fr(a)^{-2/3} \left(g \frac{\Delta\rho}{\rho_a}\right)^{-1/3}.$$

# Courants de gravités

- Application au cas de l'incendie:

En utilisant les relations d'Alpert:

$$q = u_0 h_0 W = 0.075 \frac{\sqrt{g} Q_0^{1/3} H^{5/2}}{\sqrt{1 + 6.13 Q_0^{2/3}}}$$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_a} = \frac{3.52 Q_0^{2/3}}{1 + 6.13 Q_0^{2/3}}$$

- avec  $Q_0 = \frac{Q}{\rho_a T_a c_p H^{5/2} \sqrt{g}}$

# Courants de gravités

- Application au cas de l'incendie:

On obtient

$$x_n = \frac{0.55 \sqrt{g} Q_0^{1/3} H^{5/6}}{\sqrt{1 + 6.13 Q_0^{2/3} W^{1/3}}} t$$

$$h_n = \frac{0.136 H^{5/3}}{W^{2/3}}$$

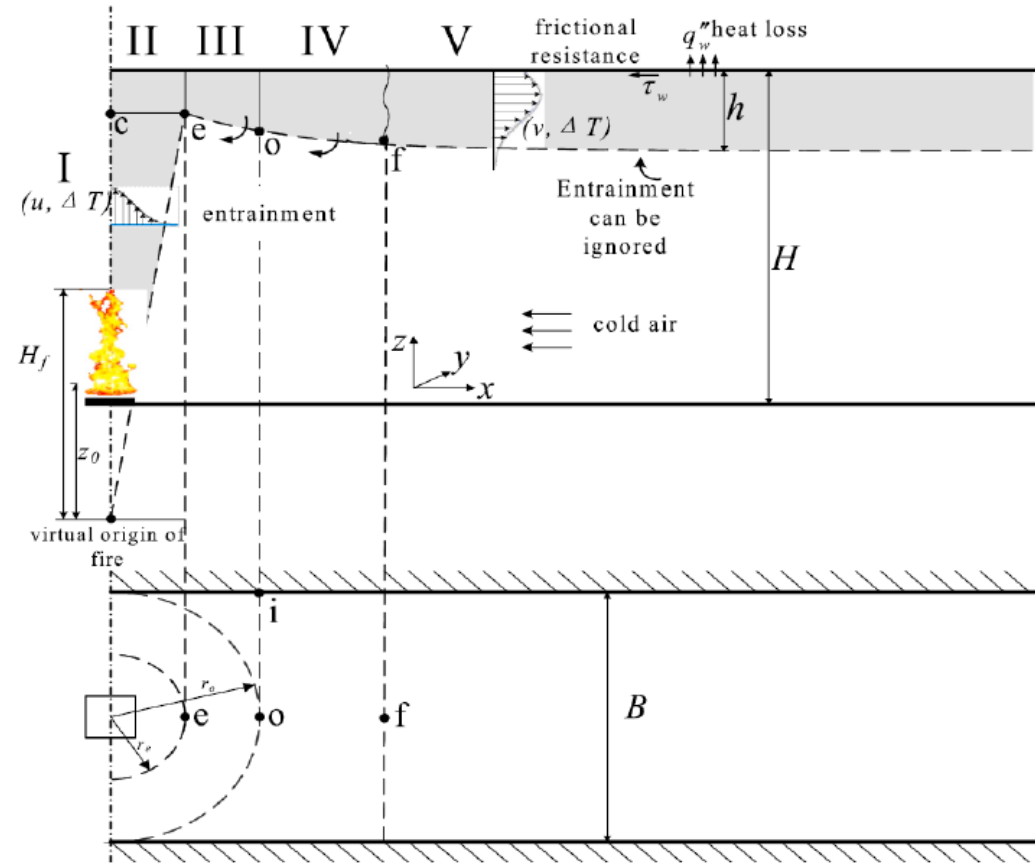
- Avec  $Fr=0.8$



# Phase stationnaire: Décroissance de la température

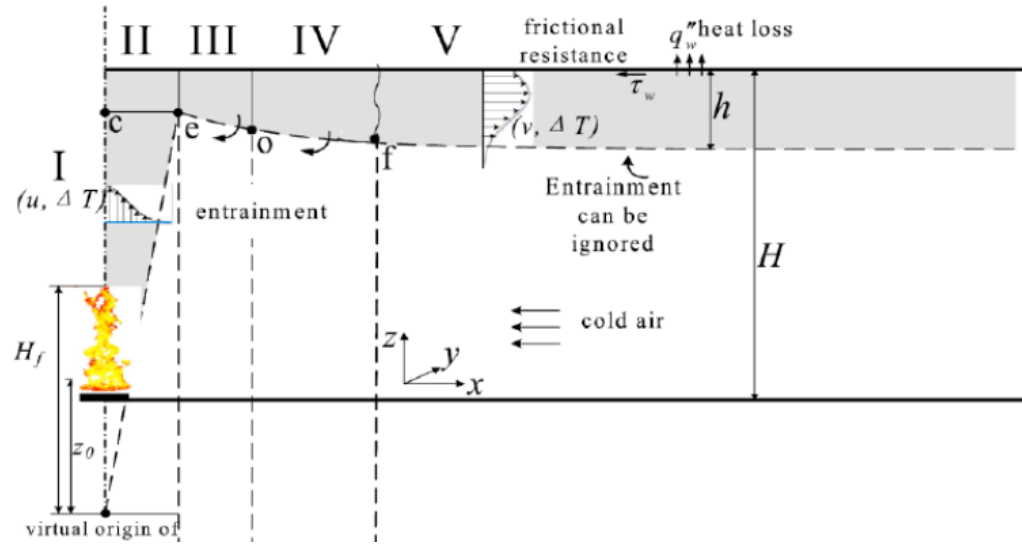
# Phase stationnaire

- Configuration:



# Phase stationnaire

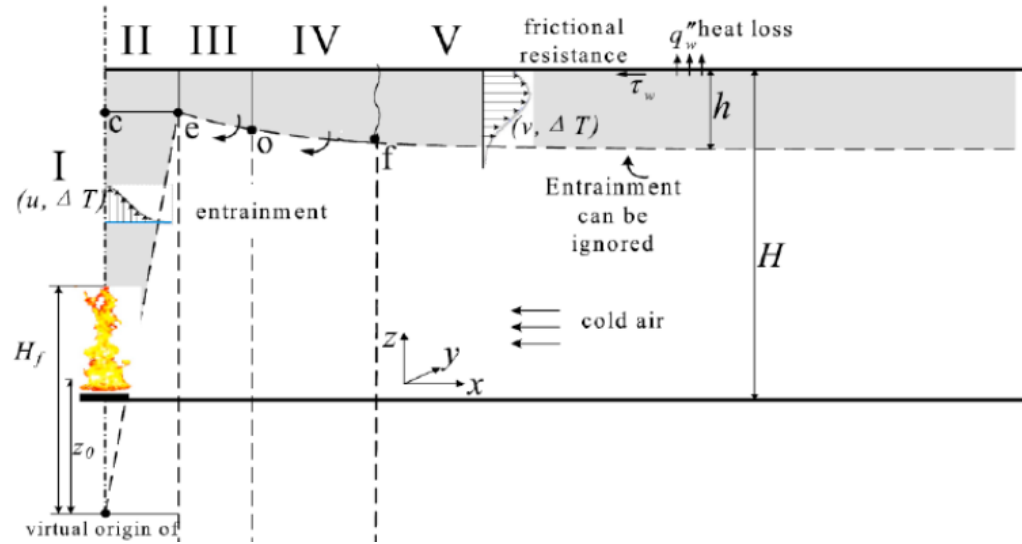
- Equations de conservations:



- Conservation de la masse: 
$$\frac{dm}{dx} = \beta u \rho_a ,$$

# Phase stationnaire

- Equations de conservations:

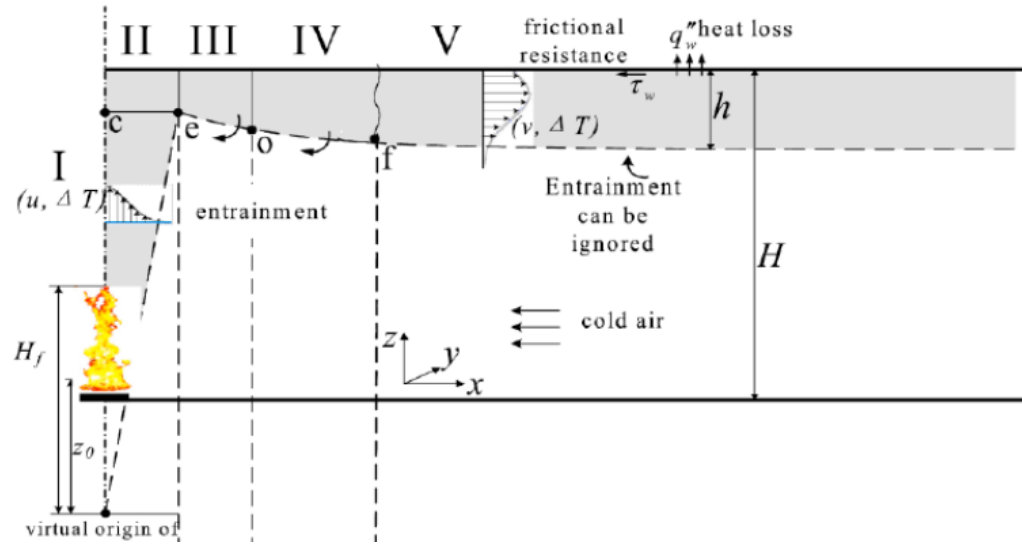


- Quantité de mouvement

$$\frac{d(\dot{m}u)}{dx} = - \frac{d}{dx} \left( \frac{1}{2} g \Delta \rho h^2 \right) - \frac{1}{2} c_f \rho u^2 \left( \frac{2h + W}{W} \right),$$

# Phase stationnaire

- Equations de conservations:



Conservation de l'énergie: 
$$\frac{d(\dot{m}c_p\Delta T)}{dx} = -h_c\Delta T\eta\left(\frac{2h+W}{W}\right),$$

$$\eta = \frac{T - T_w}{T - T_a},$$

## Phase stationnaire

- Equations de conservations:

Entrainement négligeable  $\longrightarrow \beta \approx 0$

$$\frac{d\dot{m}}{dx} = \beta u \rho_a \longrightarrow \dot{m} = Cste$$

Alors: 
$$\frac{d(\dot{m}c_p\Delta T)}{dx} = -h_c\Delta T\eta \left( \frac{2h+W}{W} \right),$$

$$\frac{d(\Delta T)}{dx} = -\frac{h_c\eta}{\dot{m}c_p}\Delta T \left( \frac{2h+W}{W} \right).$$

## Phase stationnaire

- Equations sur la température :
- En supposant que  $\eta = cste$

- Alors: 
$$\frac{d(\Delta T)}{dx} = -\frac{h_c \eta}{\dot{m} c_p} \Delta T \left( \frac{2h + W}{W} \right) .$$



$$\frac{\Delta T}{\Delta T_0} = \exp \left[ -\frac{h_c \eta}{\dot{m} c_p} \left( \frac{2h + W}{W} \right) (x - x_0) \right] .$$

## Phase stationnaire

- Equations sur la température :

- Relations d'Alpert :  $\frac{\Delta T_0}{T_a} = 6.1 Q_0^{2/3}$

$$\dot{m} = u_0 h_0 \rho_0 = \frac{(0.075 + 0.195 Q_0^{2/3}) \rho_a \sqrt{g H^5} Q_0^{1/3}}{W (1 + 6.13 Q_0^{2/3})^{3/2}}$$

On obtient:

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_0} = \exp \left[ -\frac{h_c \eta}{\dot{m} c_p} \left( \frac{2h + B}{B} \right) (x - x_0) \right].$$



$$\frac{\Delta T}{T_a} = 6.1 Q_0^{2/3} \exp \left[ -\frac{0.21 \eta h_c (H^2 + 10 W^2) (61 Q_0^{2/3} + 10)^{3/2} (x - x_0)}{\rho_a c_p \sqrt{g H^5} Q_0^{1/3} W (13 Q_0^{2/3} + 5)} \right]$$

- avec  $Q_0 = \frac{Q}{\rho_a T_a c_p H^{5/2} \sqrt{g}}$



# Vitesse critique

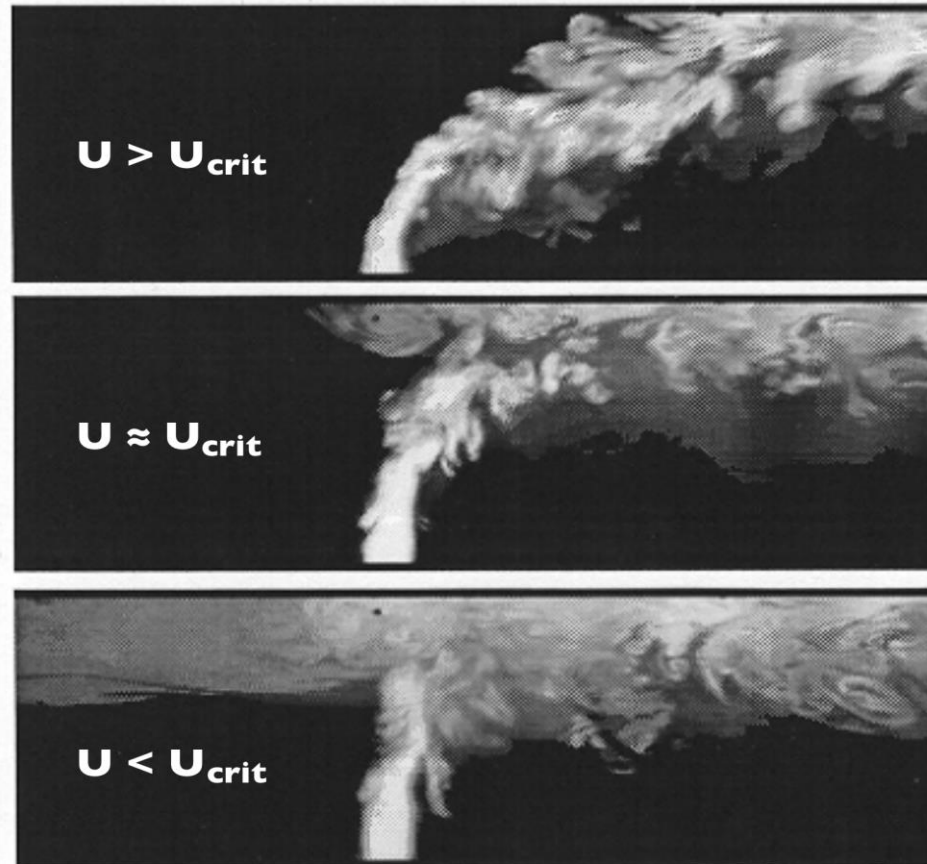
# Vitesse critique

- Ventilation longitudinale:



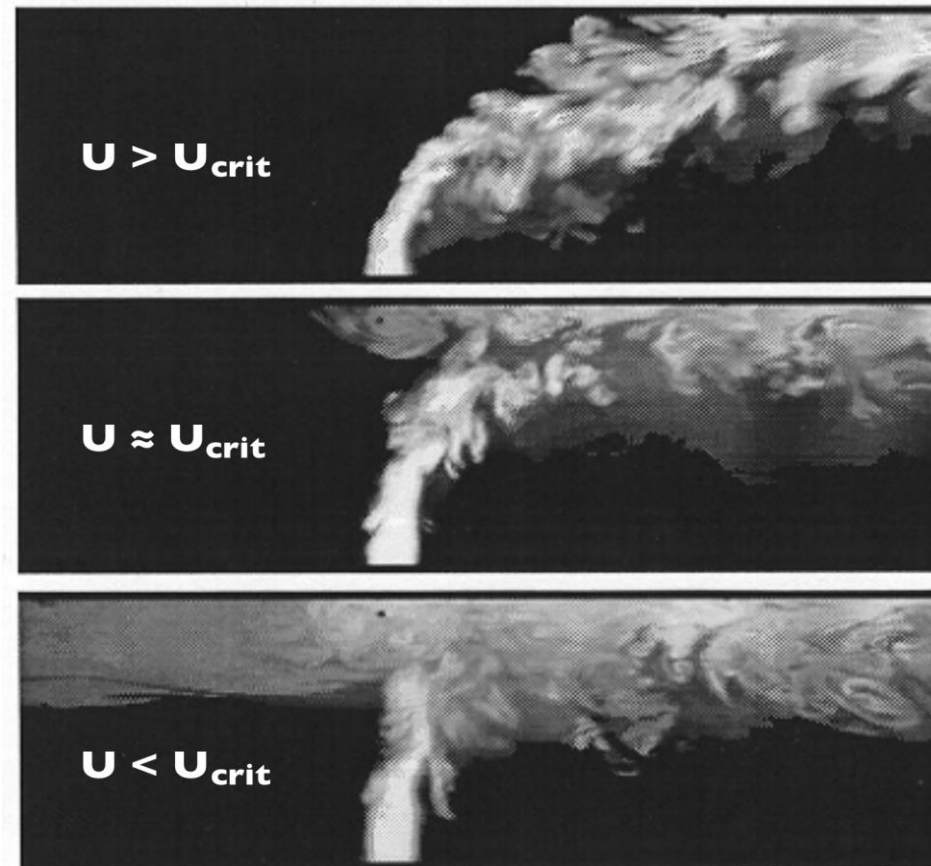
# Vitesse critique

- **Définition:**
- la vitesse minimale pour laquelle toutes les fumées sont repoussées au droit du foyer.



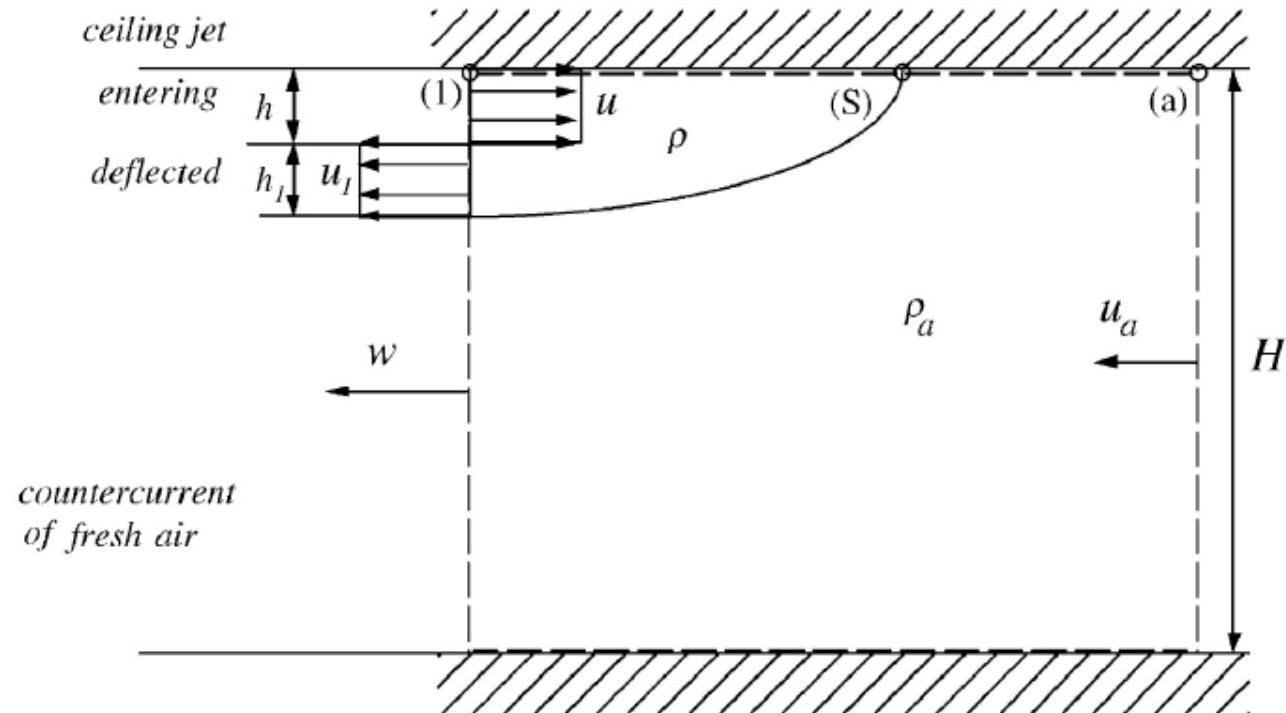
# Vitesse critique

- Pour une puissance et une géométrie données, quelle est la valeur de la vitesse critique?



# Vitesse critique

- **Modèle de Kunsch [FSJ, 2002]:** Similarités avec le modèle de Benjamin



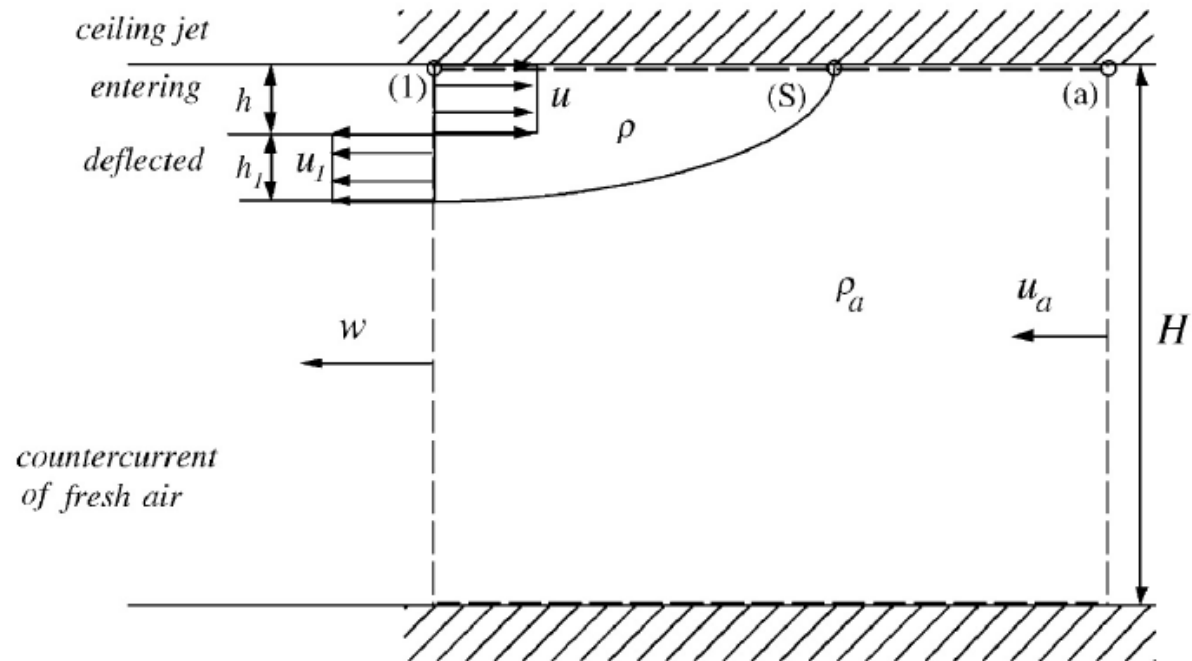
# Vitesse critique

- Equation de conservation:

$$u_1 h_1 = u h ,$$

Conservation de la masse:

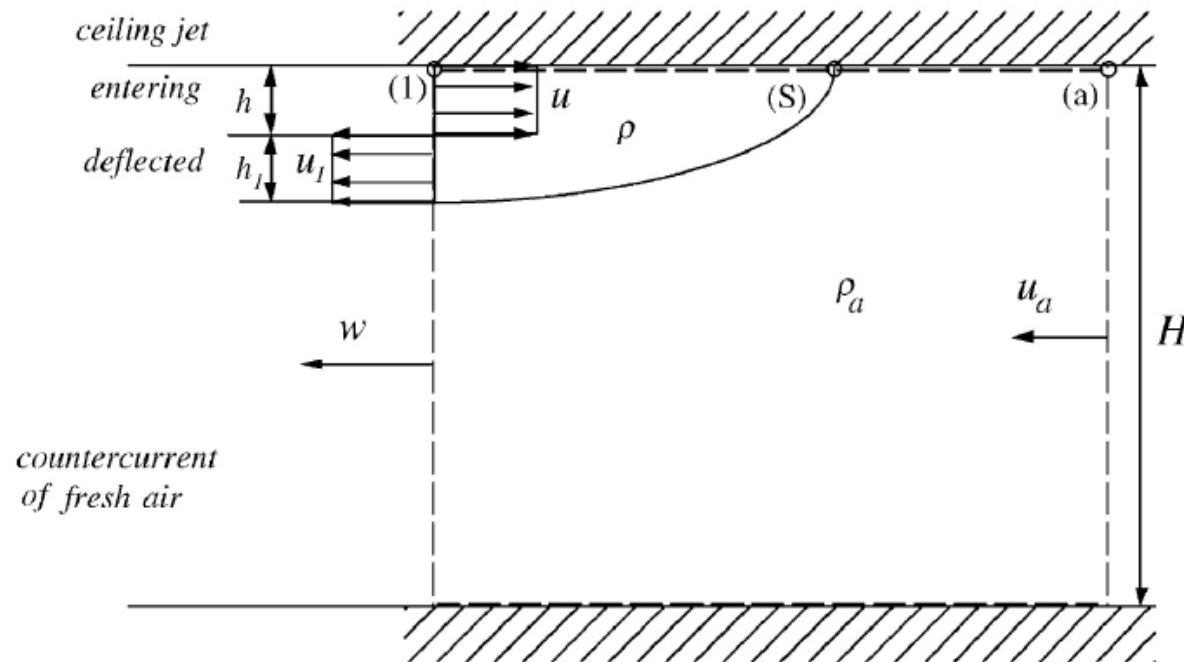
$$u_a H = w (H - (h + h_1)) ,$$



# Vitesse critique

- Equation de conservation:
- Quantité de mouvement

$$\rho_a u_a^2 H - \rho u^2 h^2 - \rho u_1^2 h_1^2 - \rho_a w^2 (H - (h + h_1)) = K_1 - K_a ,$$



## Vitesse critique

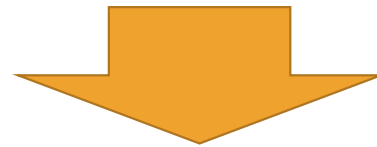
- Equation de conservation:

$$u_1 h_1 = u h ,$$

$$u_a H = w (H - (h + h_1)) ,$$

$$\rho_a u_a^2 H - \rho u^2 h^2 - \rho u_1^2 h_1^2 - \rho_a w^2 (H - (h + h_1)) = K_1 - K_a ,$$

$$K_1 - K_a = \left( \frac{1}{2} \rho_a u_a^2 - \frac{1}{2} \rho u^2 \right) H - \frac{1}{2} (\rho_a - \rho) g (h + h_1) (2H - h - h_1)$$



$$u_a^2 = \frac{1 - 2\phi\psi_1}{1 + 2\phi\psi_1} \left[ 4gh\psi_1 \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_a} \right) (1 - \phi\psi_1) + \left( \frac{\rho}{\rho_a} \right) u^2 (1 - 4\phi\psi_2) \right]$$

où  $\phi = h/H$ ,  $\psi_1 = (1 + h_1/h)/2$  et  $\psi_2 = \psi_1/(h_1/h)$ .



## Vitesse critique

$$u_a^2 = \frac{1 - 2\phi\psi_1}{1 + 2\phi\psi_1} \left[ 4gh\psi_1 \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_a} \right) (1 - \phi\psi_1) + \left( \frac{\rho}{\rho_a} \right) u^2 (1 - 4\phi\psi_2) \right]$$

où  $\phi = h/H$ ,  $\psi_1 = (1 + h_1/h)/2$  et  $\psi_2 = \psi_1/(h_1/h)$ .



$$\psi_1 \approx \psi_2 \approx 1,$$

$$u_a^2 = \frac{1 - 2\phi}{1 + 2\phi} \left[ 4gh \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_a} \right) (1 - \phi) + \left( \frac{\rho}{\rho_a} \right) u^2 (1 - 4\phi) \right]$$

## Vitesse critique

- Vitesse critique:
- Relations d'Alpert:

$$u_a^2 = \frac{1 - 2\phi}{1 + 2\phi} \left[ 4gh \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_a} \right) (1 - \phi) + \left( \frac{\rho}{\rho_a} \right) u^2 (1 - 4\phi) \right]$$



$$u_a^* \approx 1.44 \frac{\sqrt{1 + 3.6Q_0^{2/3}}}{1 + 6.1Q_0^{2/3}} Q_0^{1/3}$$

$$u_a^* = \frac{u_a}{(gH)^{1/2}}$$

$$Q_0 = \frac{Q}{\rho_a T_a c_p H^{5/2} \sqrt{g}}$$

**Note:** Les constantes 3.6 et 1.44 peuvent varier en fonction du rapport (H/W).

# Vitesse critique

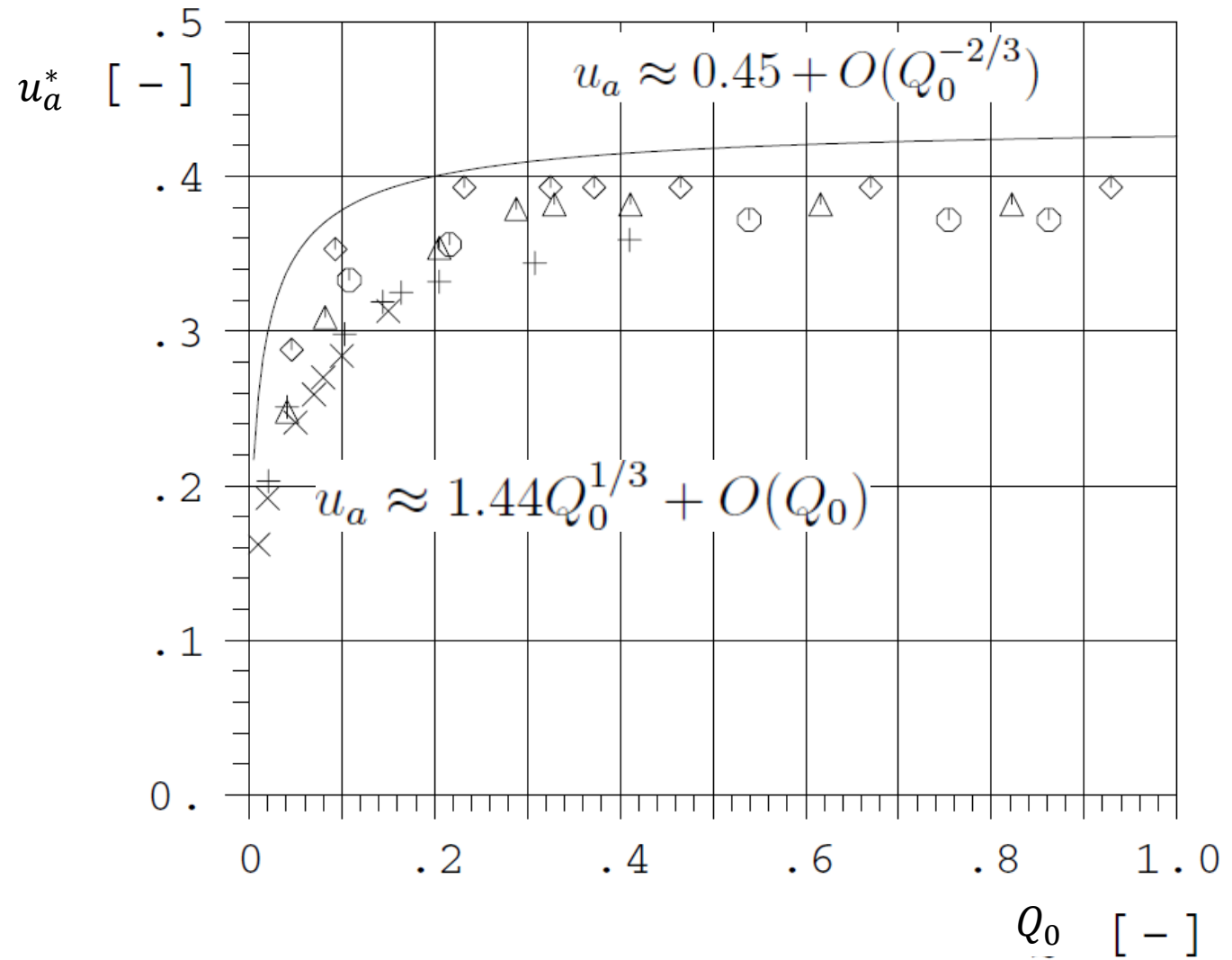
- Vitesse critique:

$$u_a^* \approx 1.44 \frac{\sqrt{1 + 3.6Q_0^{2/3}}}{1 + 6.1Q_0^{2/3}} Q_0^{1/3}$$

$u_a^* \approx 1.44Q_0^{1/3} + O(Q_0)$   
Petite puissance  
(loi de Thomas)

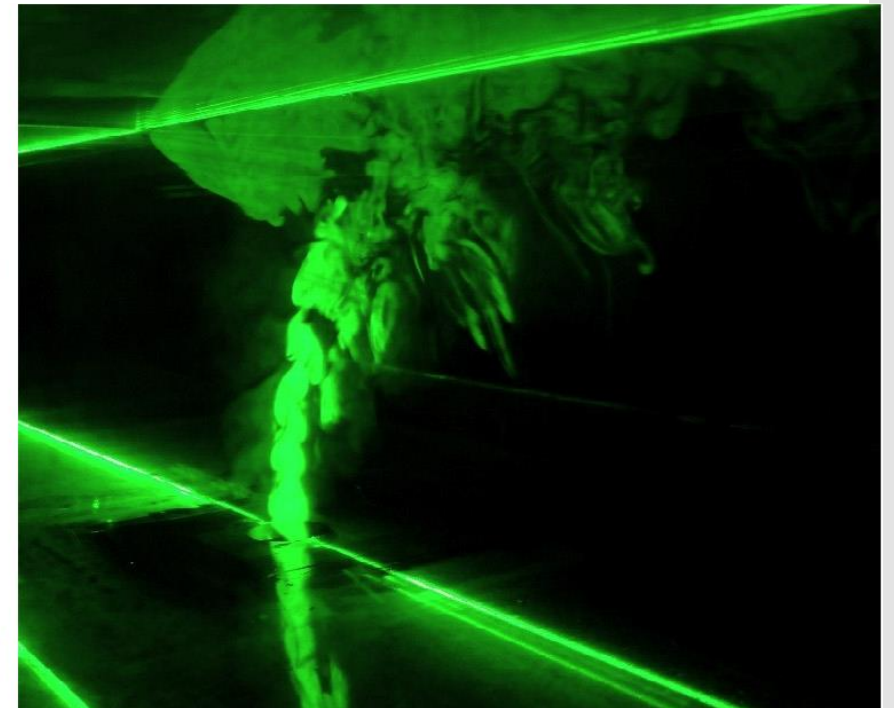
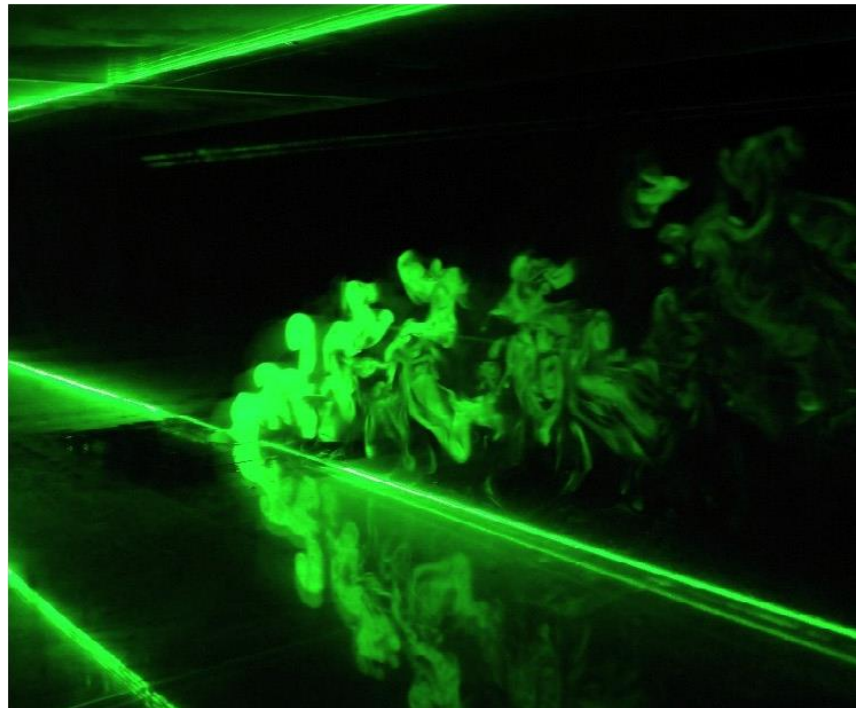
$u_a^* \approx 0.45 + O(Q_0^{-2/3})$   
Grande puissance  
(vitesse super-critique)

# Vitesse critique



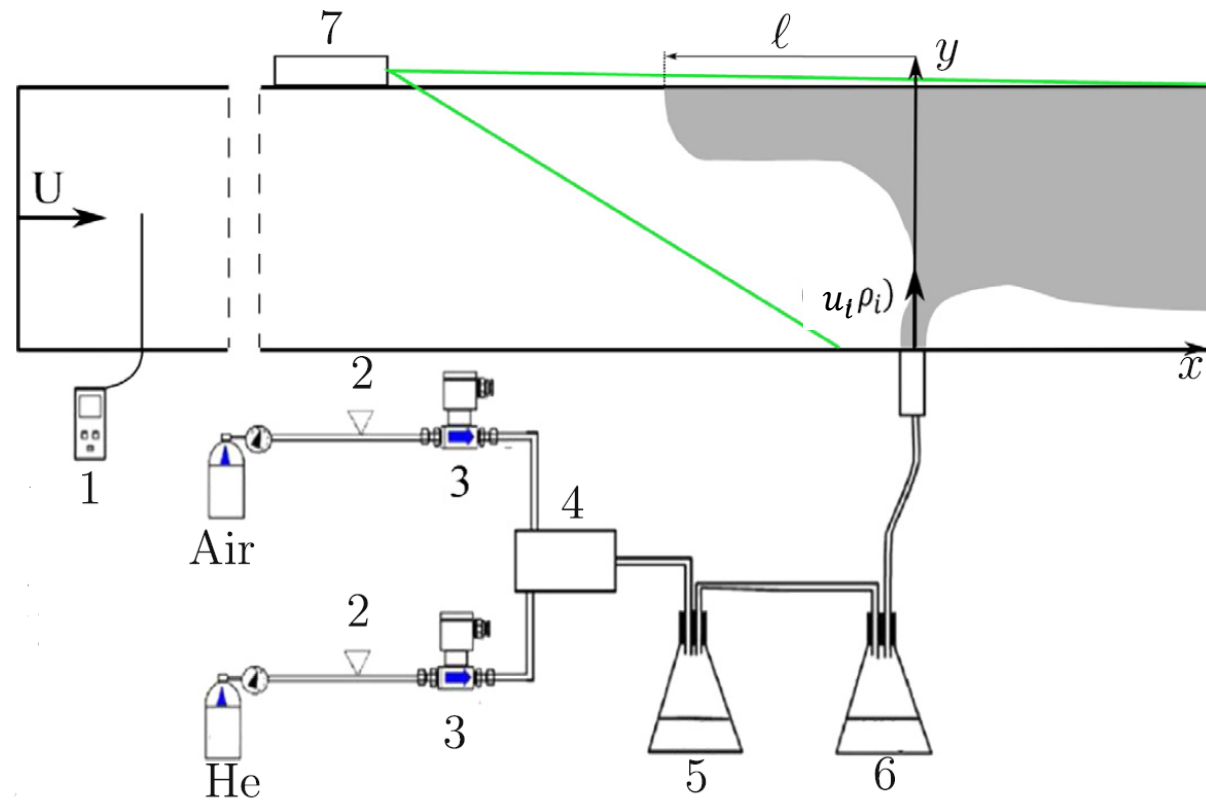
# Vitesse critique

- Rejet densimétrique:



# Vitesse critique

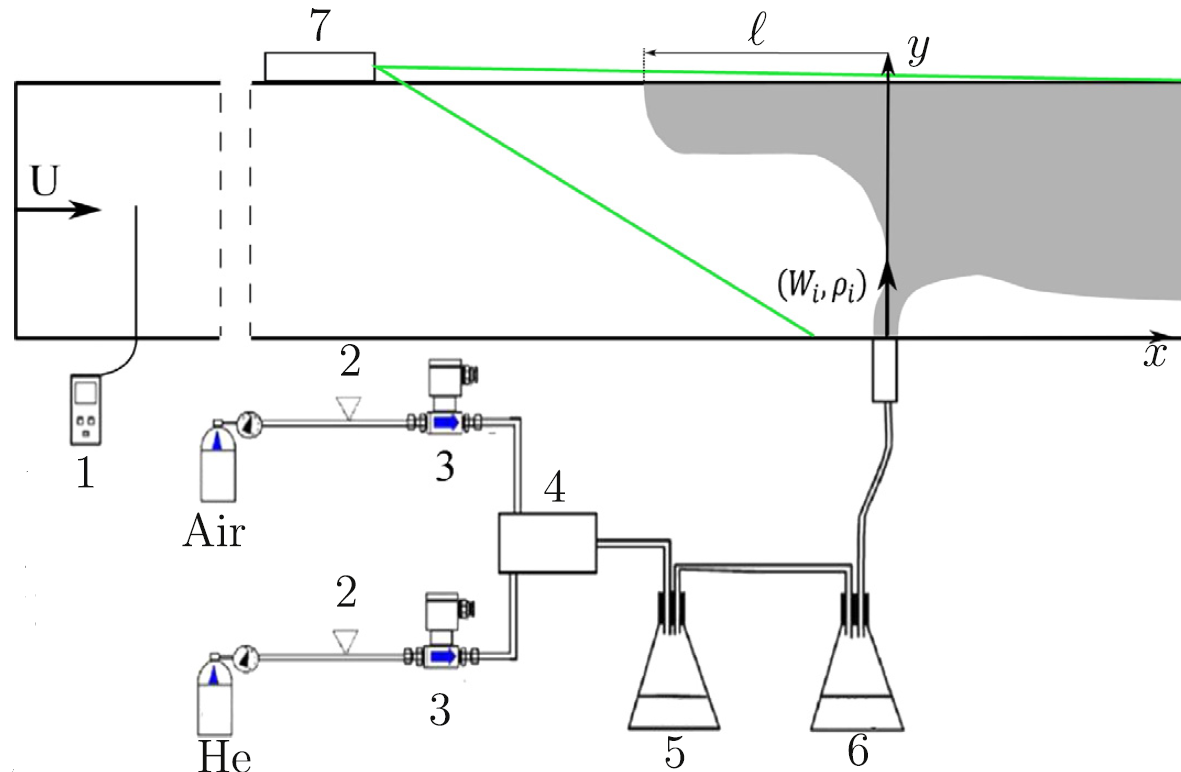
- Rejet densimétrique:



# Vitesse critique

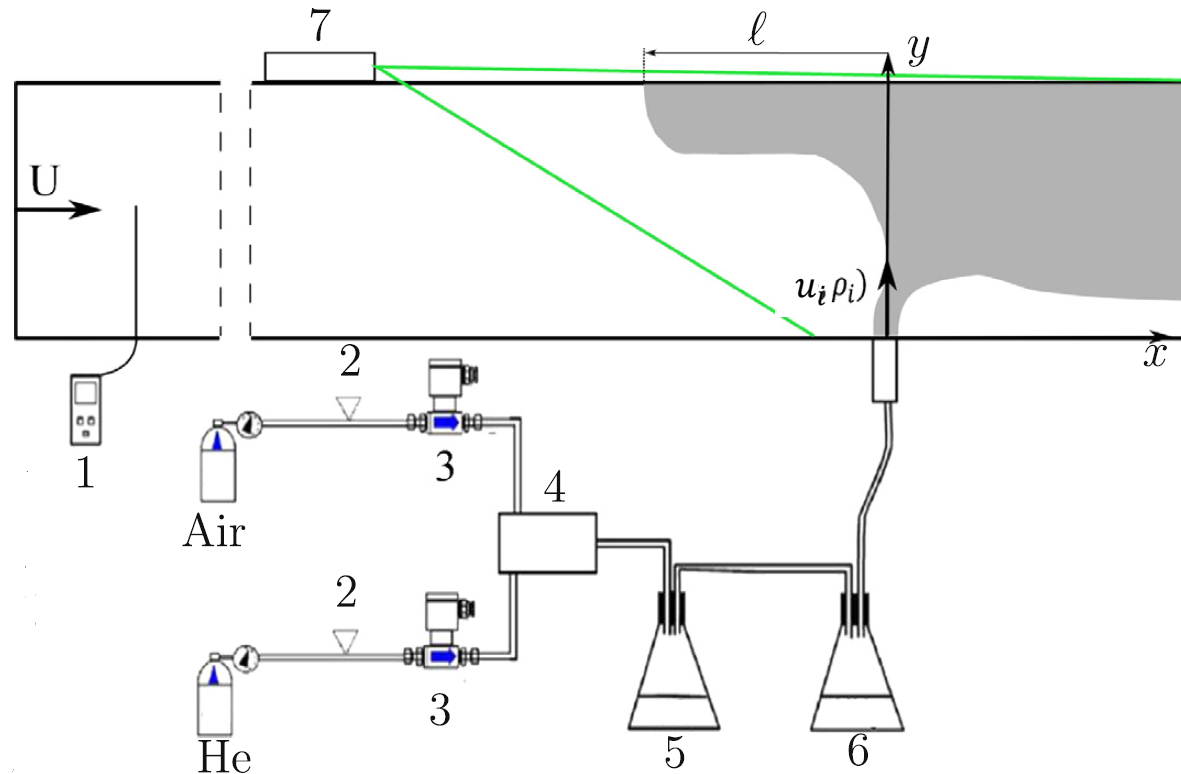
- Analyse dimensionnelle:

$$\ell = f(u_a, u_i, \rho_i, \rho_a, \nu, D_m, g, D_i, W, H) \longrightarrow \frac{\ell}{H} = f\left(\Gamma_i, Re, Sc, \frac{\rho_i}{\rho_a}, \frac{u_a}{u_i}, \frac{D_i}{H}, \frac{W}{H}\right)$$



# Vitesse critique

- Analyse dimensionnelle:  $\frac{\ell}{H} = f\left(\Gamma_i, Re, Sc, \frac{\rho_i}{\rho_a}, \frac{u_a}{u_i}, \frac{D_i}{H}, \frac{W}{H}\right)$
- Avec  $\Gamma_i = \frac{5}{16} \frac{\Delta\rho}{\rho_a} \frac{g D_i}{u_i^2}$ ,  $Re = \frac{u_i D_i}{\nu}$  et  $Sc = \frac{D_m}{\nu}$

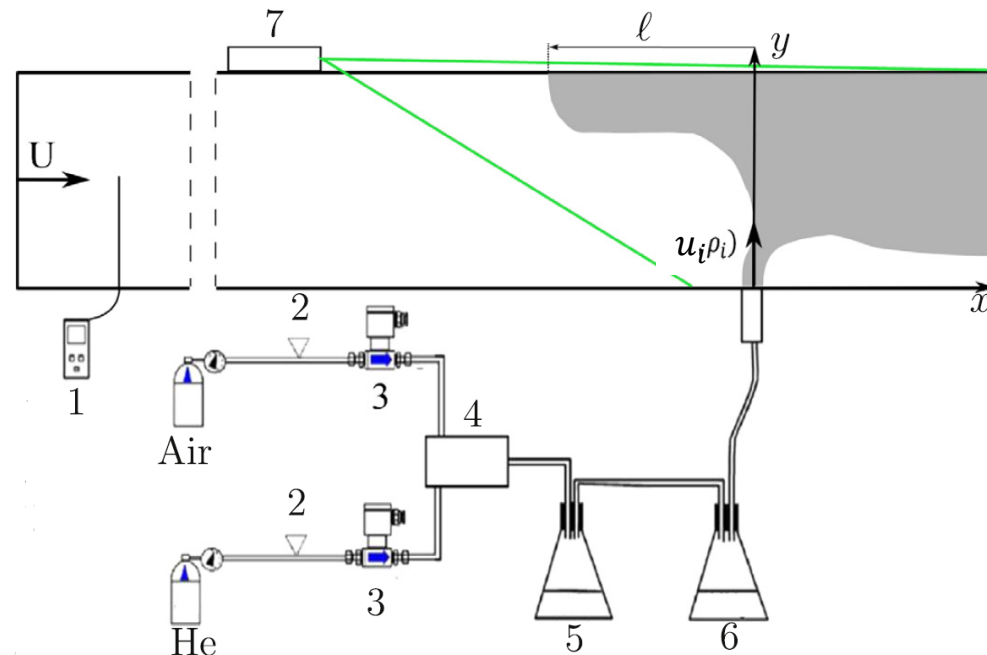




# Vitesse critique

- **Analyse dimensionnelle:**
- On néglige la diffusion, on suppose l'écoulement turbulent et rapport  $W/H = \text{cste}$ .

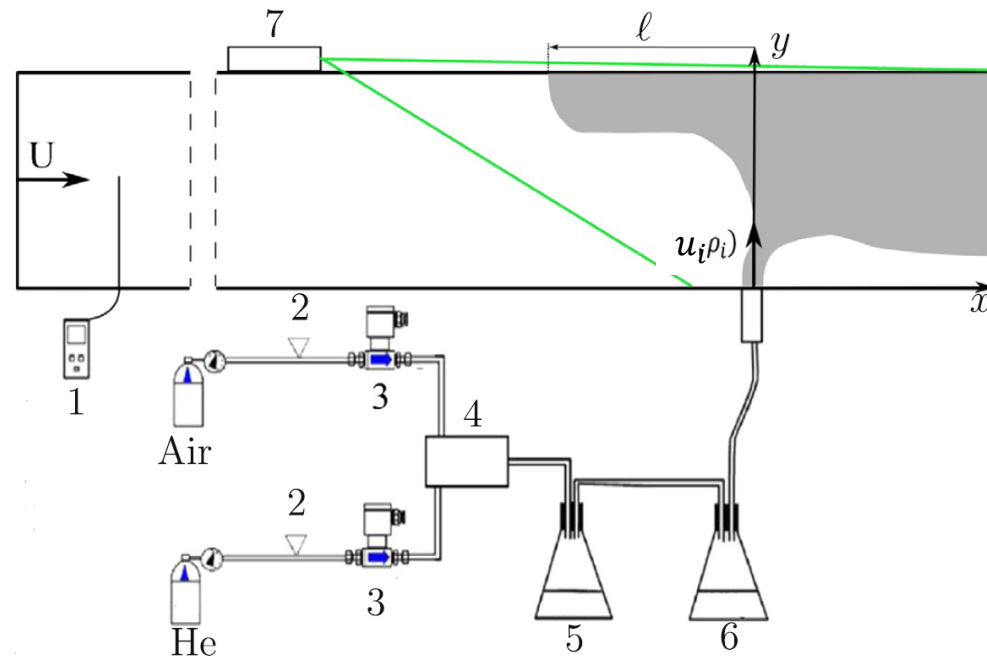
$$\frac{\ell}{H} = f\left(\Gamma_i, Re, Sc, \frac{\rho_i}{\rho_a}, \frac{u_a}{u_i}, \frac{D_i}{H}, \frac{W}{H}\right) \longrightarrow \frac{\ell}{H} = f\left(\Gamma_i, \frac{\rho_i}{\rho_a}, \frac{u_a}{u_i}, \frac{D_i}{H}\right)$$



# Vitesse critique

- Analyse dimensionnelle:
- On définit la vitesse critique pour  $\ell = 0$ .

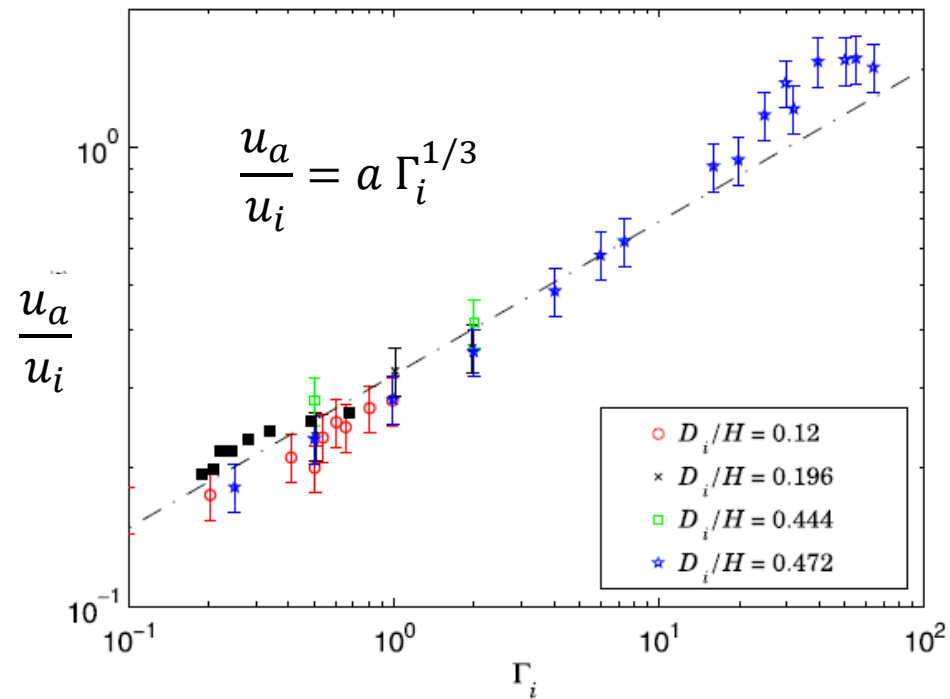
$$\frac{\ell}{H} = f\left(\Gamma_i, \frac{\rho_i}{\rho_a}, \frac{u_a}{u_i}, \frac{D_i}{H}\right) \quad \longrightarrow \quad \frac{u_a}{u_i} = f\left(\Gamma_i, \frac{\rho_i}{\rho_a}, \frac{D_i}{H}\right)$$



# Vitesse critique

- Analyse dimensionnelle:
- On définit la vitesse critique pour  $\ell = 0$ .

$$\frac{u_a}{u_i} = f\left(\Gamma_i, \frac{\rho_i}{\rho_a}, \frac{D_i}{H}\right) \quad \longrightarrow \quad \frac{u_a}{u_i} = f(\Gamma_i) = a\Gamma_i^{1/3}$$



# Vitesse critique

- Résultats des expériences:

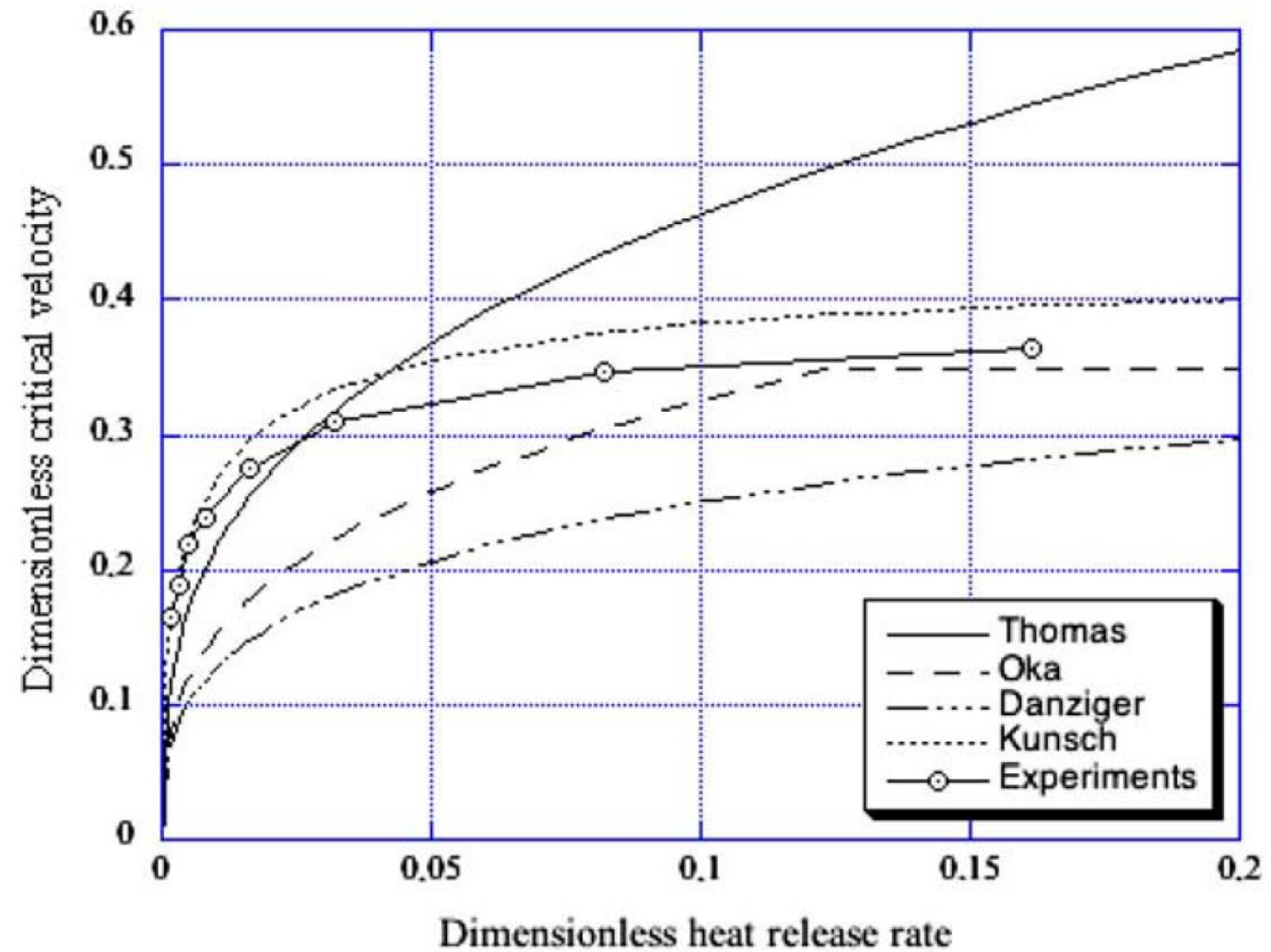
- Sachant que  $\Gamma_i = \frac{5}{16} \frac{\Delta\rho}{\rho_a} \frac{g D_i}{u_i^2}$  et  $B_i = \frac{\pi}{4} D_i^2 u_i g \frac{\Delta\rho}{\rho_a}$

$$\frac{u_a}{u_i} = a \Gamma_i^{1/3} \quad \longrightarrow \quad u_a = a \left( \frac{5}{4\pi\alpha} \right)^{1/3} \left( \frac{B_i}{D_i} \right)^{1/3}$$

- En utilisant l'analogie  $B_i = \frac{g Q}{\rho_a T_a c p}$

$$u_a = a \left( \frac{5}{4\pi\alpha} \right)^{1/3} \left( \frac{B_i}{D_i} \right)^{1/3} \quad \longrightarrow \quad u_a \propto \left( \frac{Q}{D_i} \right)^{1/3}$$

# Vitesse critique



# Conclusion

- **Possibilités d'amélioration des modèles:**
- Prise en compte de la géométrie circulaire d'un tunnel.
- Effet de la pente.
- Influence de l'aspersion sûr l'écoulement du plafond de fumées.