

Aéraulique des fumées d'incendie

Olivier Vauquelin (IUSTI, Aix-Marseille Université)



Sommaire

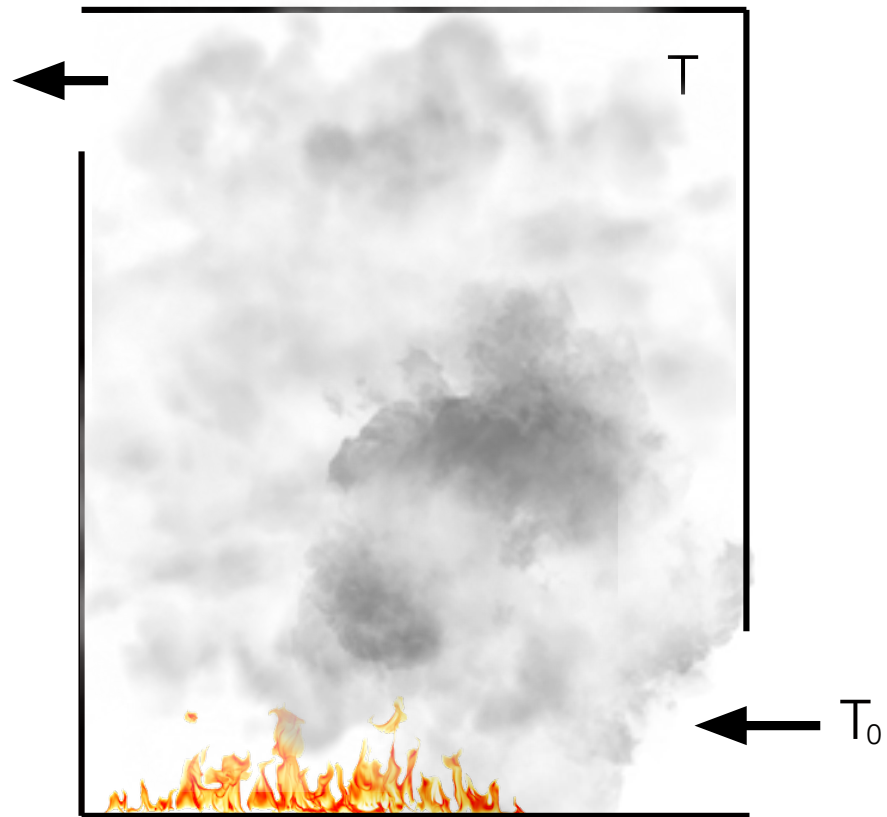
Approches stationnaires

- *Modèle type « réacteur mélangé »*
- *Modèle bi-couche*

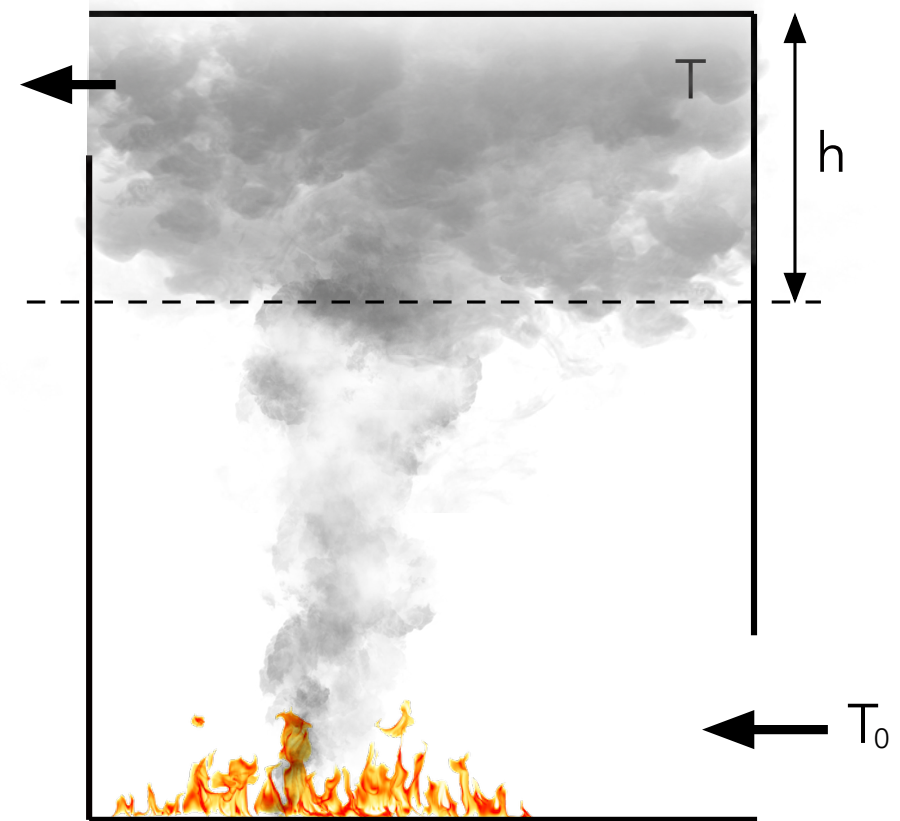
Approches transitoires

- *Remplissage d'un local*
- *Enfumage et désenfumage simultanés d'un local*

Règles de similitudes



Modèle de "réacteur bien mélangé"
température uniforme T dans le local



Modèle "bi-couche"
température uniforme T dans une
couche de fumées d'épaisseur h

Notations et hypothèses

$\dot{Q}_t$: puissance totale (du feu)

$\dot{Q}_c$: puissance convective (du feu)

m : débit massique (des fumées)

q_v : débit volumique (des fumées)

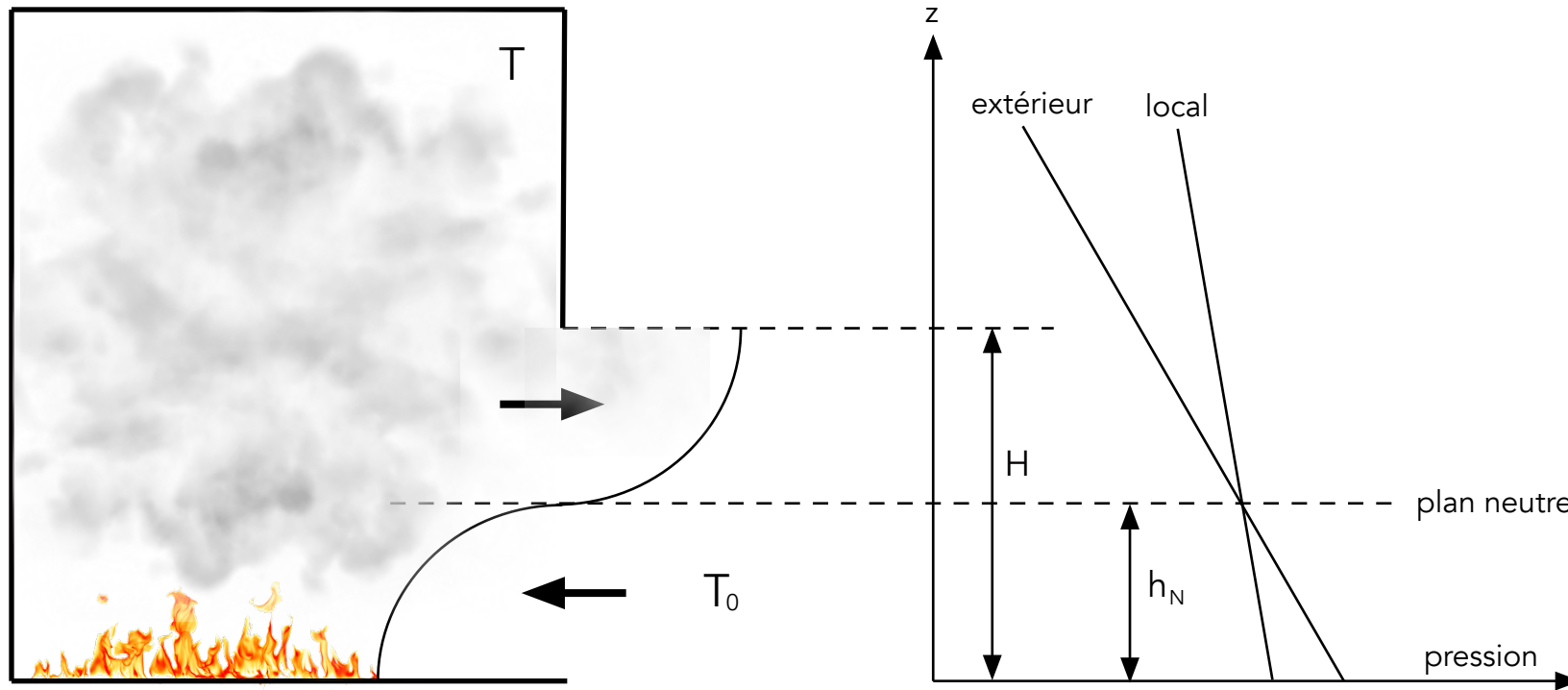
T_0 : température du milieu ambiant (20°C)

ρ_0 : masse volumique du milieu ambiant (1,2 kg/m³)

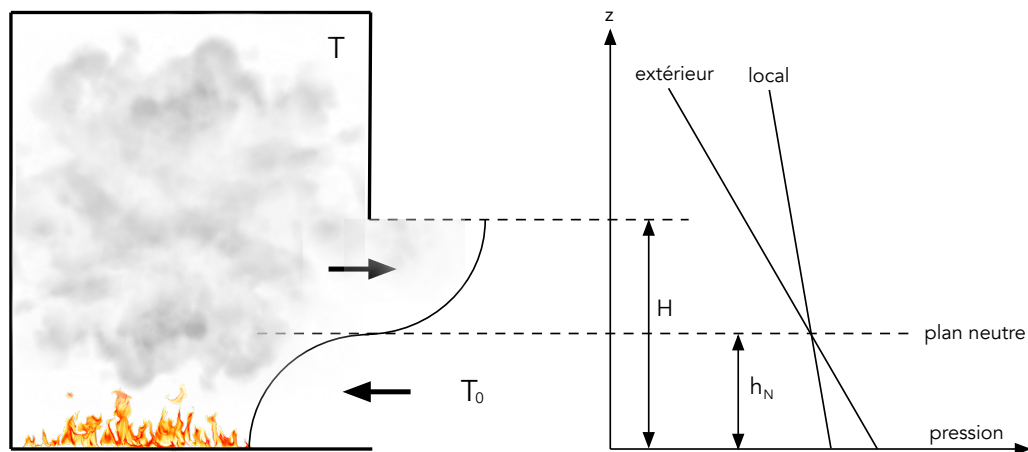
- ⊃ Le feu est bien ventilé
- ⊃ Les écoulements sont incompressibles mais dilatables
- ⊃ L'air et les fumées se comportent comme un gaz parfait
- ⊃ Les fumées sont assimilées à de l'air chaud
- ⊃ On se place hors cadre Boussinesq

Modèle type « réacteur bien mélangé »

Approches stationnaires — Réacteur mélangé



Approches stationnaires — Réacteur mélangé

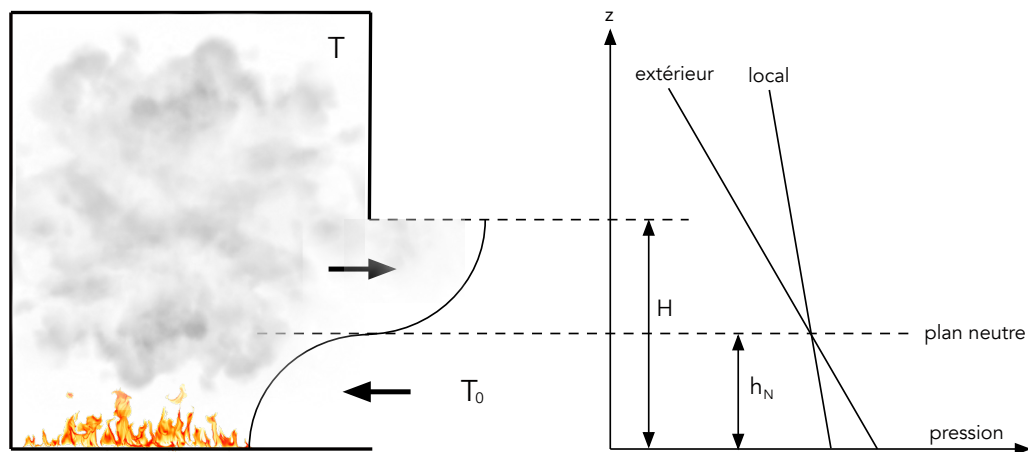


Conservation du débit massique : $m_{ext} = m_{int}$

$$m_{ext} = \rho W \int_{h_N}^H u_{ext}(z) dz \quad \text{avec : } \frac{1}{2} \rho \left[\frac{u_{ext}(z)}{C_D} \right]^2 = \Delta \rho g (z - h_N)$$

$$m_{int} = \rho_0 W \int_0^{h_N} u_{int}(z) dz \quad \text{avec : } \frac{1}{2} \rho_0 \left[\frac{u_{int}(z)}{C_D} \right]^2 = \Delta \rho g (h_N - z)$$

Approches stationnaires — Réacteur mélangé



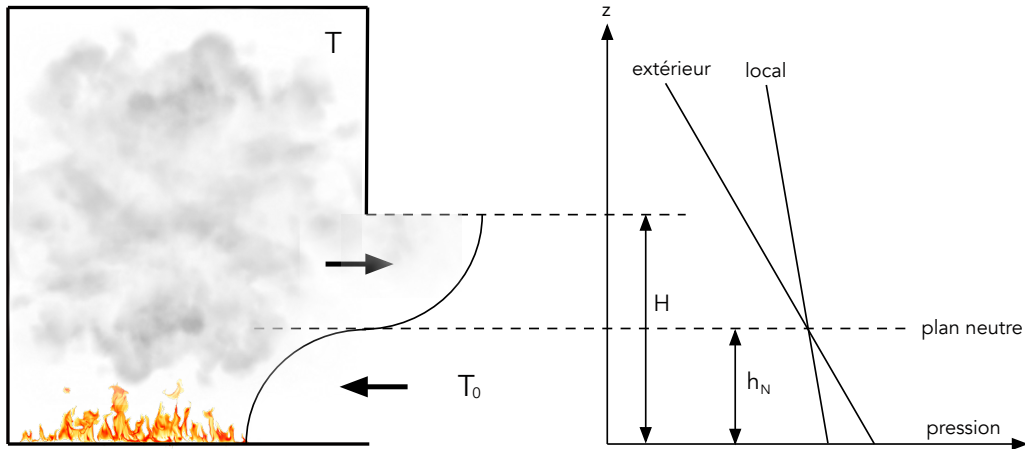
$$\text{Hyp. gaz parfait : } \rho_0 T_0 = \rho T \\ \Rightarrow \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta T}{T_0} \text{ ou } \frac{\Delta \rho}{\rho_0} = \frac{\Delta T}{T}$$

Conservation du débit massique : $m_{ext} = m_{int}$

$$\Rightarrow \frac{2}{3} \rho^{1/2} \Delta \rho^{1/2} g^{1/2} W (H - h_N)^{3/2} = \frac{2}{3} \rho_0^{1/2} \Delta \rho^{1/2} g^{1/2} W h_N^{3/2}$$

$$\Rightarrow h_N = \frac{H}{1 + (\rho_0/\rho)^{1/3}} = \frac{H}{1 + (T/T_0)^{1/3}}$$

Approches stationnaires — Réacteur mélangé

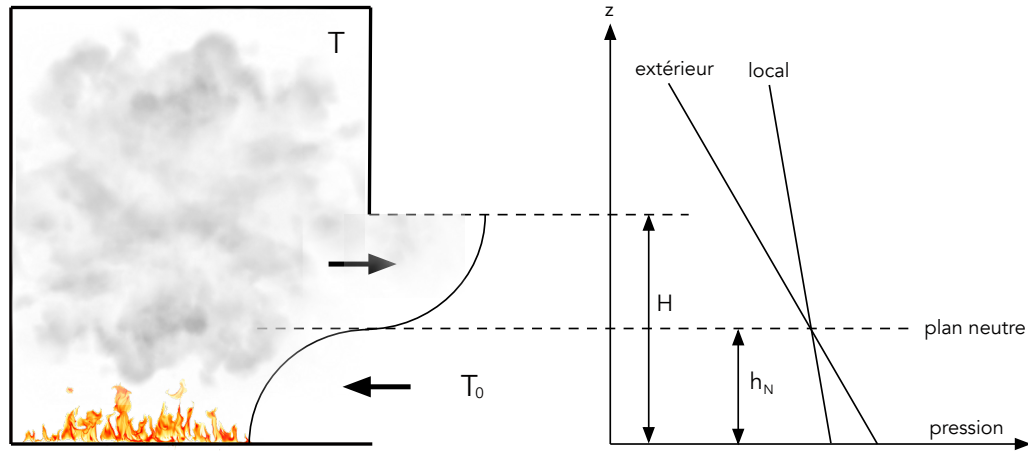


Conservation du débit massique : $m_{ext} = m_{int}$ $\approx 0,5$

$$m = m_{ext} = m_{int} = \left[\frac{2}{3} g^{1/2} \frac{[\rho_0 (\rho_0 - \rho)]^{1/2}}{[1 + (\rho_0/\rho)^{1/3}]^{3/2}} \right] W H^{3/2}$$

$$\Rightarrow m \approx 0,5 A H^{1/2} \quad (\text{formule de Kawagoe})$$

Approches stationnaires — Réacteur mélangé



débit massique
d'oxygène consommé

$$\dot{Q}_t = m_{O_2} \text{ (kg/s)} \times 13,1 \cdot 10^6 \text{ (J/kg}_{O_2}) = 0,23 \times 0,5 A \sqrt{H} \times 13,1 \cdot 10^6 \approx 1,5 A \sqrt{H} \text{ (MW)}$$

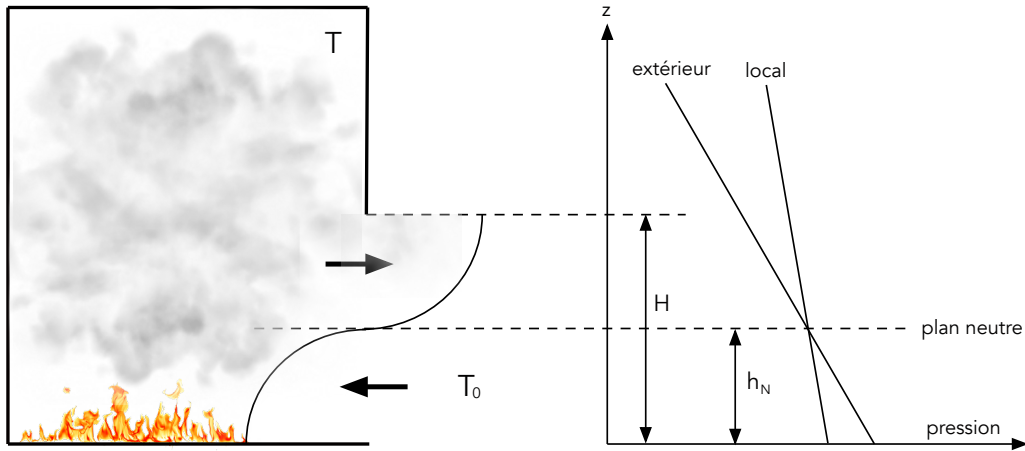
puissance
totale du feu

facteur de Thornton

$$H = 2 \text{ m et } W = 1 \text{ m } (A = 2 \text{ m}^2)$$

$$\dot{Q}_t \approx 4 \text{ MW}$$

Approches stationnaires — Réacteur mélangé



$$\dot{Q}_t = 0,23 m_{int} \times 13,1 \cdot 10^6$$

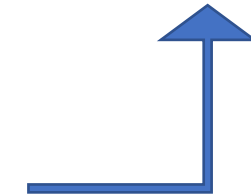
$$\dot{Q}_c = m_{ext} C_p(T) \Delta T \approx 0,7 \dot{Q}_t$$

↑
puissance
convective du feu

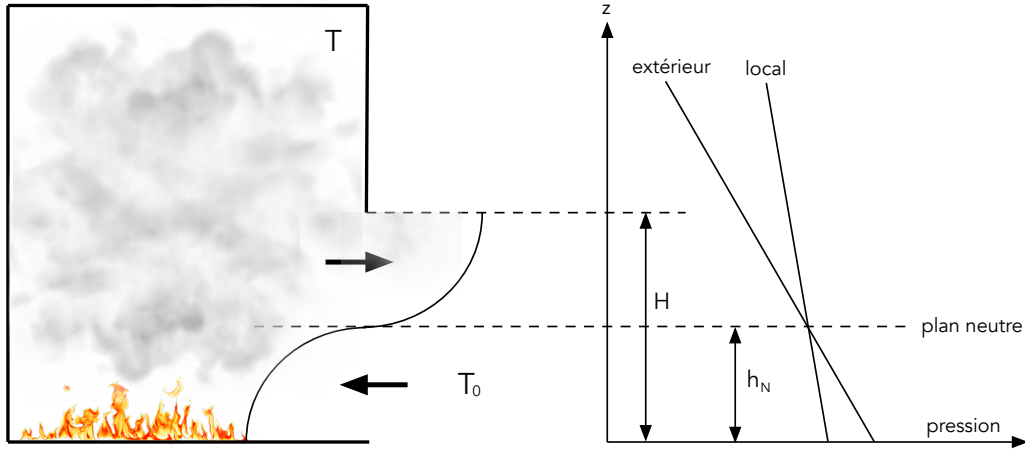
$$\dot{Q}_c = \cancel{m_{ext}} C_p(T) \Delta T \approx 0,7 \times 0,23 \times 13,1 \cdot 10^6 \times \cancel{m_{int}}$$

$$C_p(T) [T - T_0] \approx 2 \cdot 10^6$$

$$\Rightarrow T \approx 1900 \text{ K}$$



Approches stationnaires — Réacteur mélangé



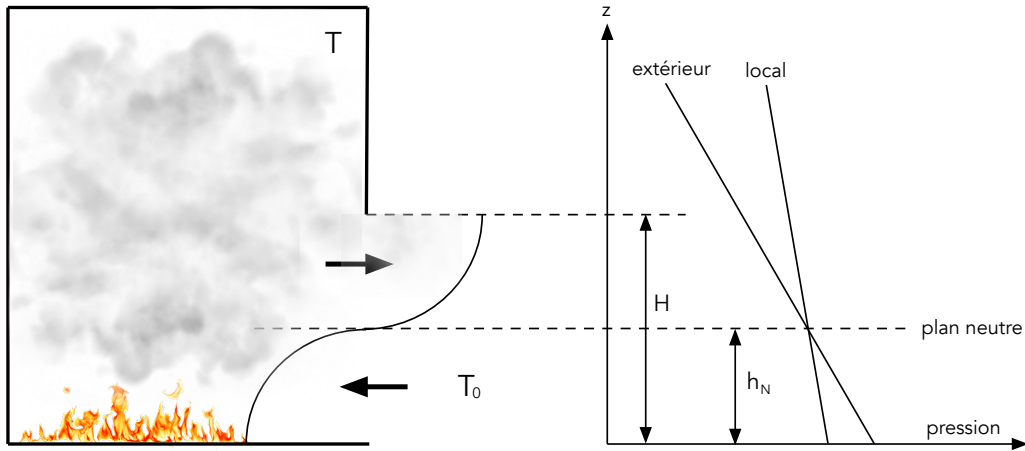
Si on fixe la valeur de la puissance convective du feu, quelle sera la température moyenne dans le local ?

$$h_N = \frac{H}{[1 + (T/T_0)^{1/3}]} \quad m_{ext} = \frac{2}{3} \rho_0 T_0^{1/2} \frac{\Delta T^{1/2}}{T} g^{1/2} W (H - h_N)^{3/2}$$

$$T = T_0 + \frac{\dot{Q}_c}{m_{ext} C_p(T)}$$

3 inconnues :
 $h_N ; m_{ext} ; T$

Approches stationnaires — Réacteur mélangé

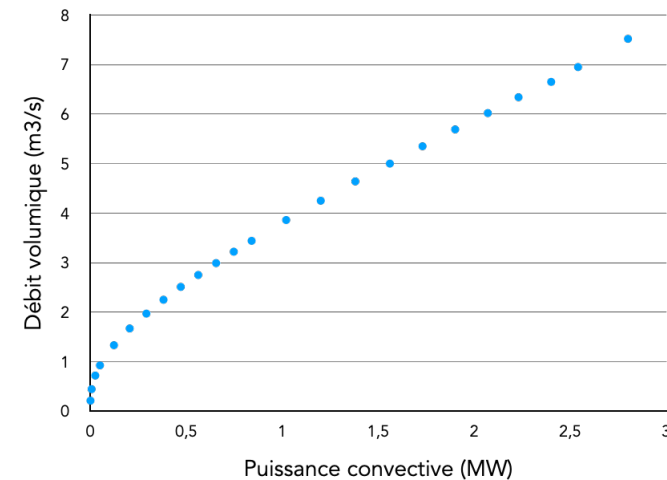
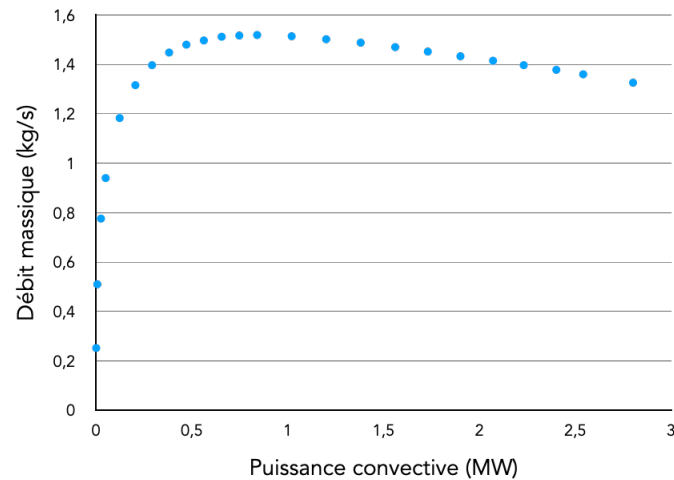
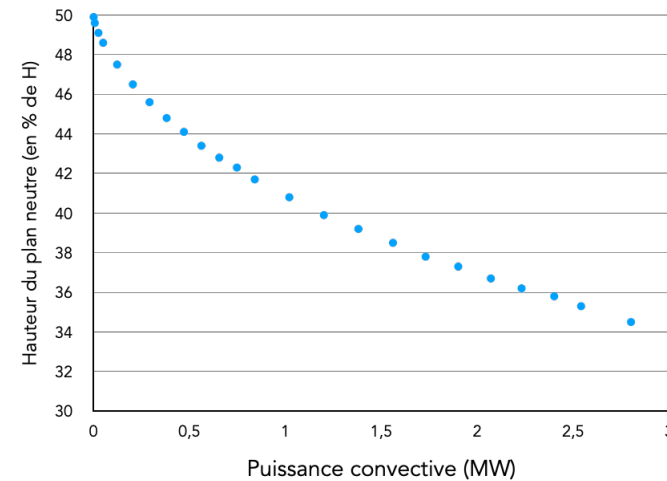
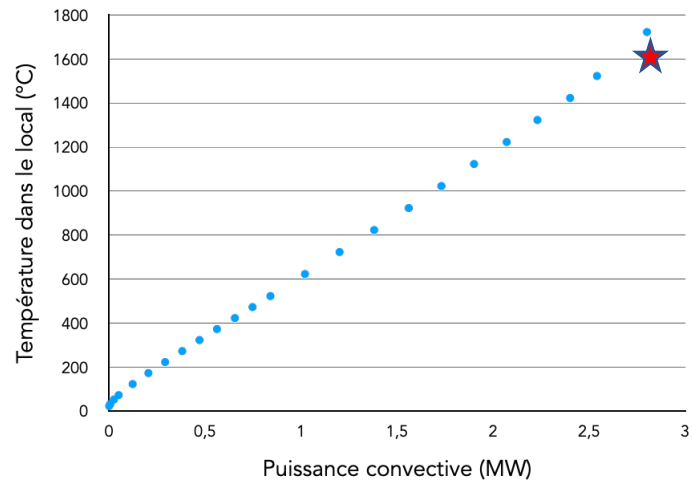


Si on fixe la valeur de la puissance convective du feu, quelle sera la température moyenne dans le local ?

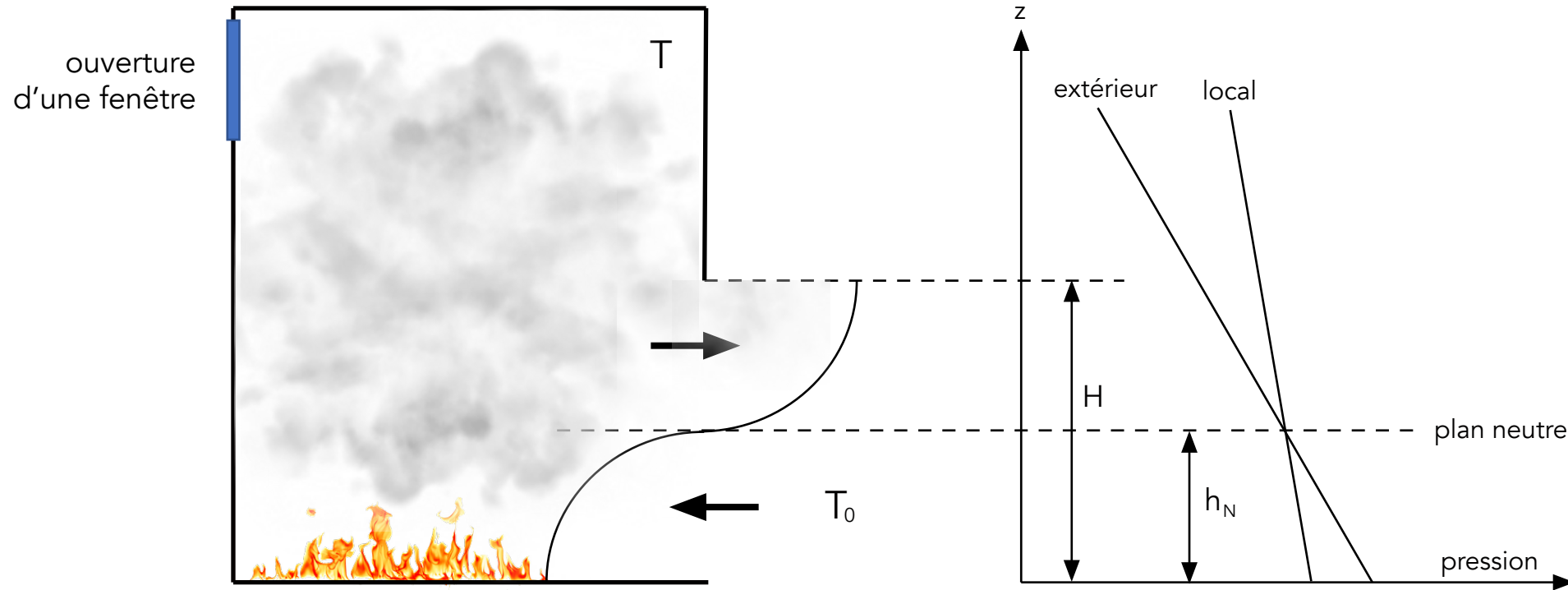
$$h_N = \frac{H}{[1 + (T/T_0)^{1/3}]} \rightarrow m_{ext} = \frac{2}{3} \rho_0 T_0^{1/2} \frac{\Delta T^{1/2}}{T} g^{1/2} W (H - h_N)^{3/2}$$
$$T = T_0 + \frac{\dot{Q}_c}{m_{ext} C_p(T)}$$

The diagram shows a red circle containing the variable T . Red arrows indicate the flow of information: one arrow points from the T circle to the h_N equation, and another points from the m_{ext} equation to the T equation in the second equation. A third red arrow points from the $\dot{Q}_c$ term in the second equation to the T circle.

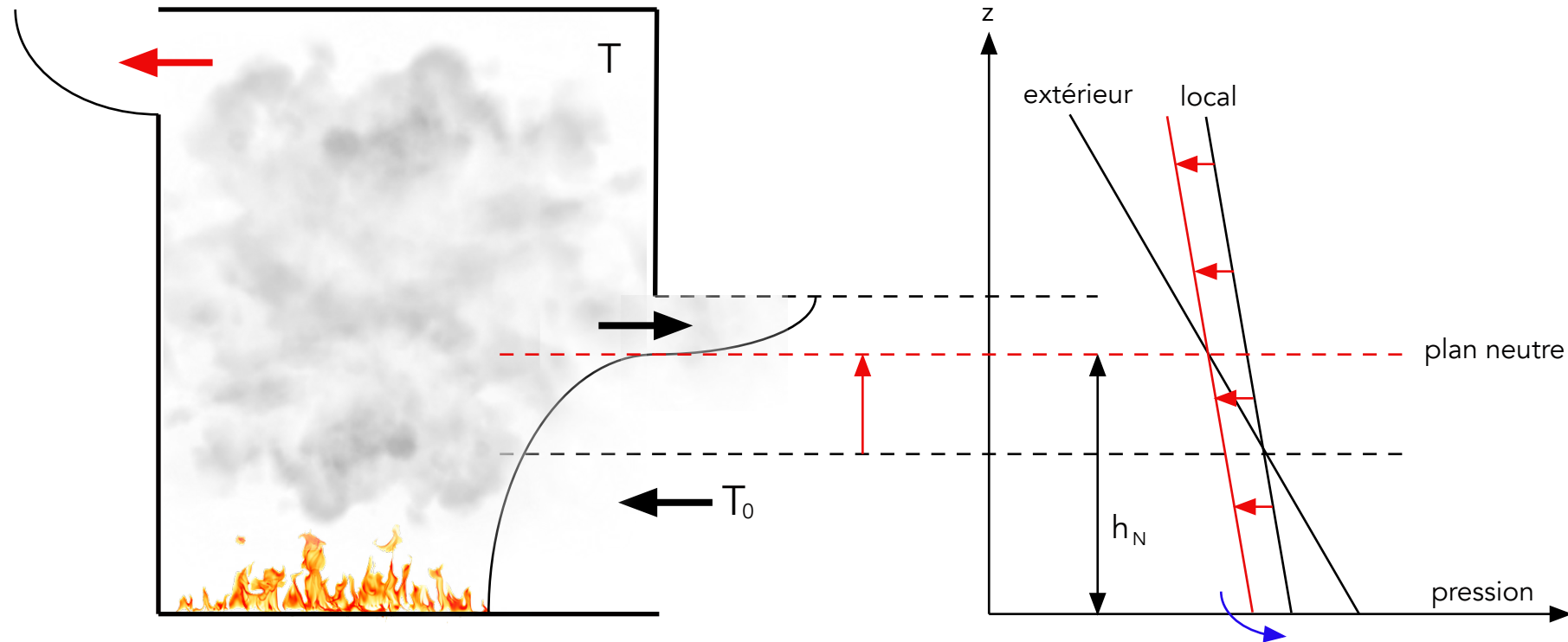
Approches stationnaires — Réacteur mélangé



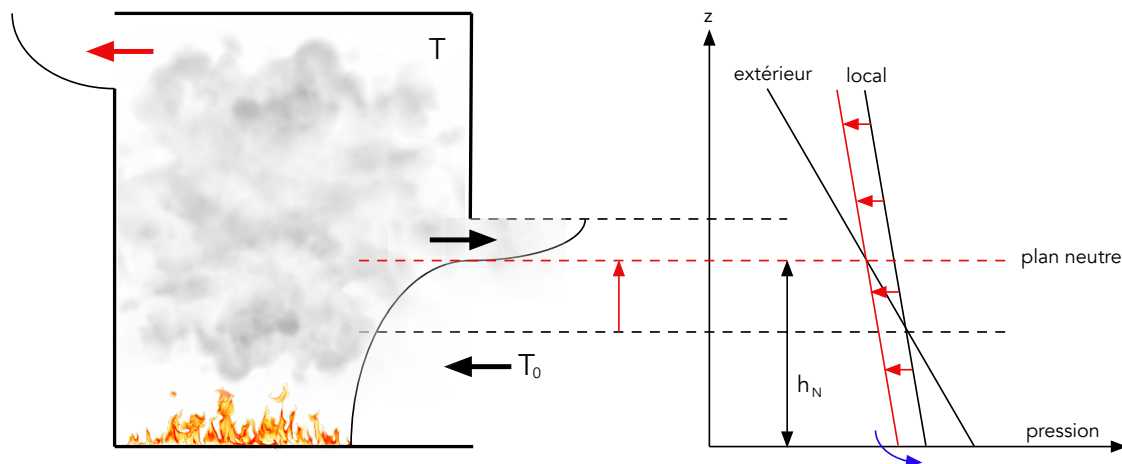
Approches stationnaires — Réacteur mélangé



Approches stationnaires — Réacteur mélangé



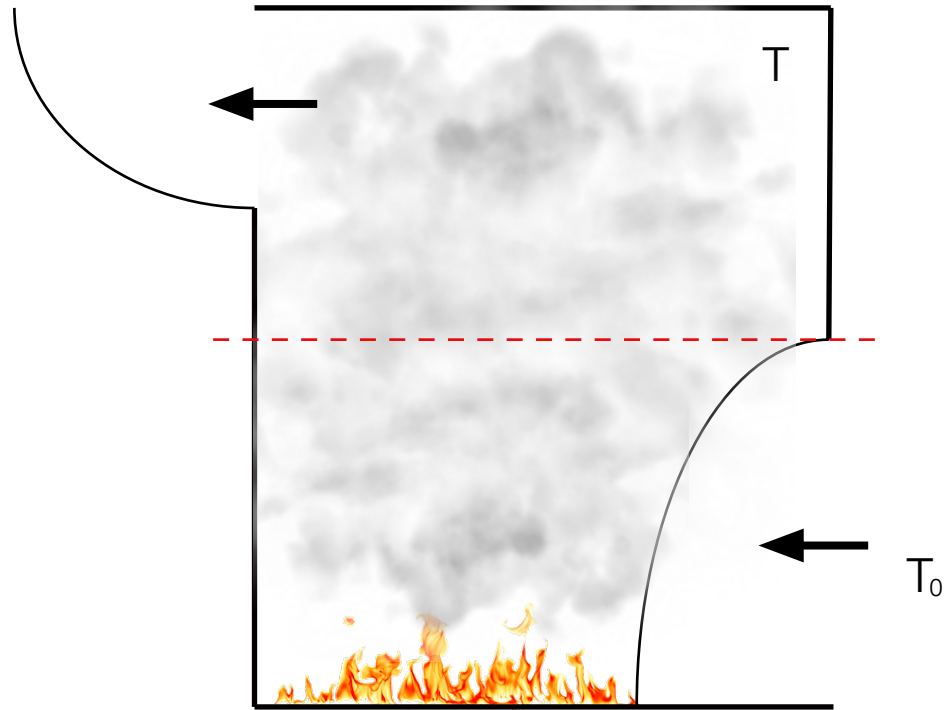
Approches stationnaires — Réacteur mélangé



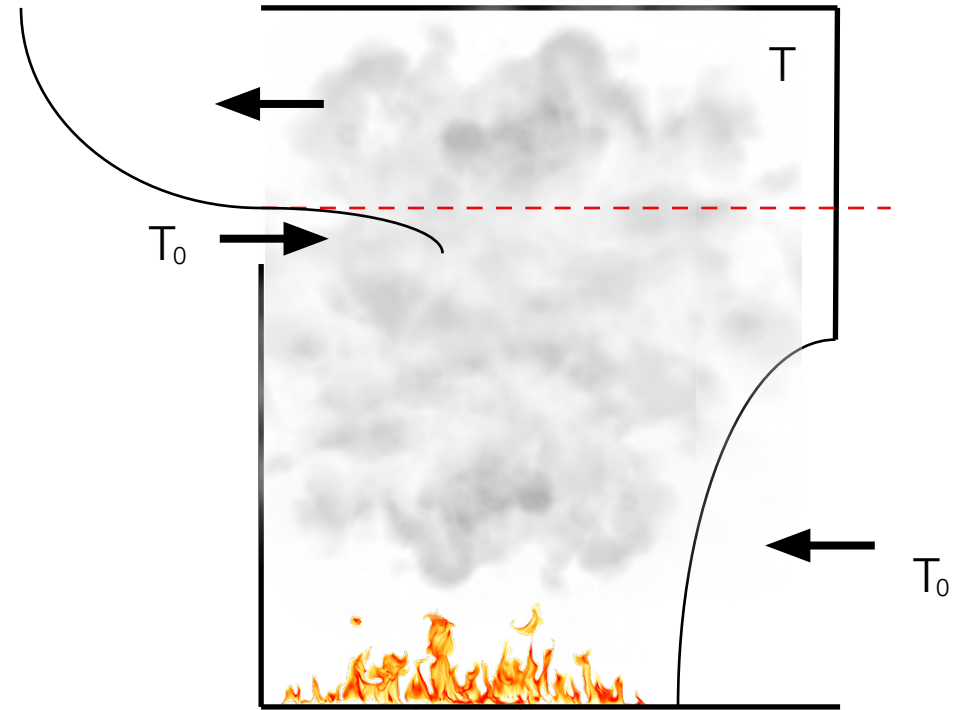
H_1 : Hauteur de la porte
 H_2 : Hauteur de la fenêtre
 H : Hauteur du local
 W : Largeur de la porte et de la fenêtre

$$\begin{aligned}
 & \rho_0^{1/2} (\Delta \rho^{1/2} g^{1/2} W) \int_0^{h_N} (h_N - z)^{1/2} dz = \\
 & \rho^{1/2} (\Delta \rho^{1/2} g^{1/2} W) \int_{h_N}^{H_1} (z - h_N)^{1/2} dz + \rho^{1/2} (\Delta \rho^{1/2} g^{1/2} W) \int_{H-H_2}^H (z - h_N)^{1/2} dz \\
 & \Rightarrow (H_1 - h_N)^{3/2} + (H - h_N)^{3/2} - (H - H_2 - h_N)^{3/2} = \sqrt{\frac{T}{T_0}} h_N^{3/2}
 \end{aligned}$$

Approches stationnaires — Réacteur mélangé



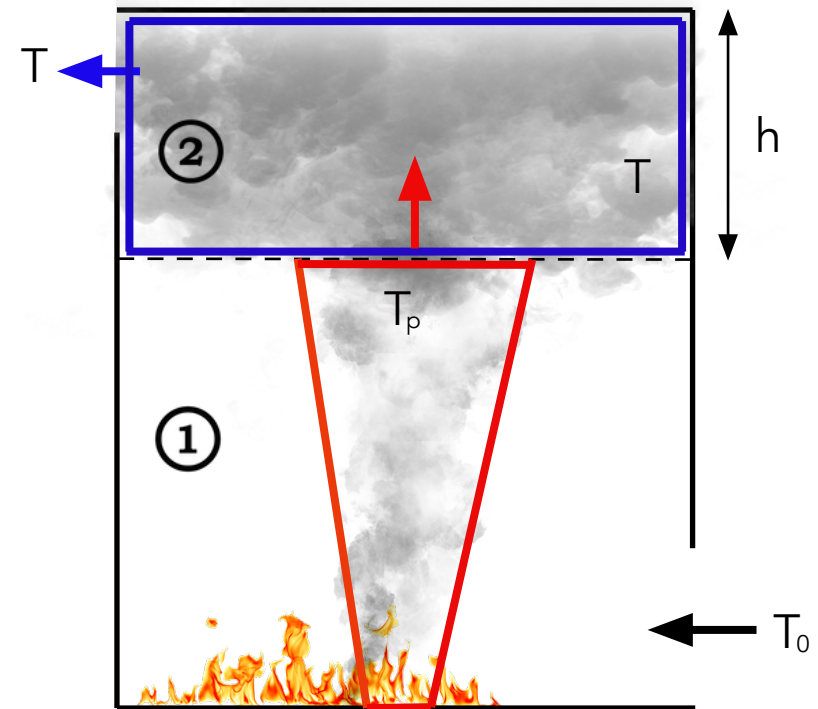
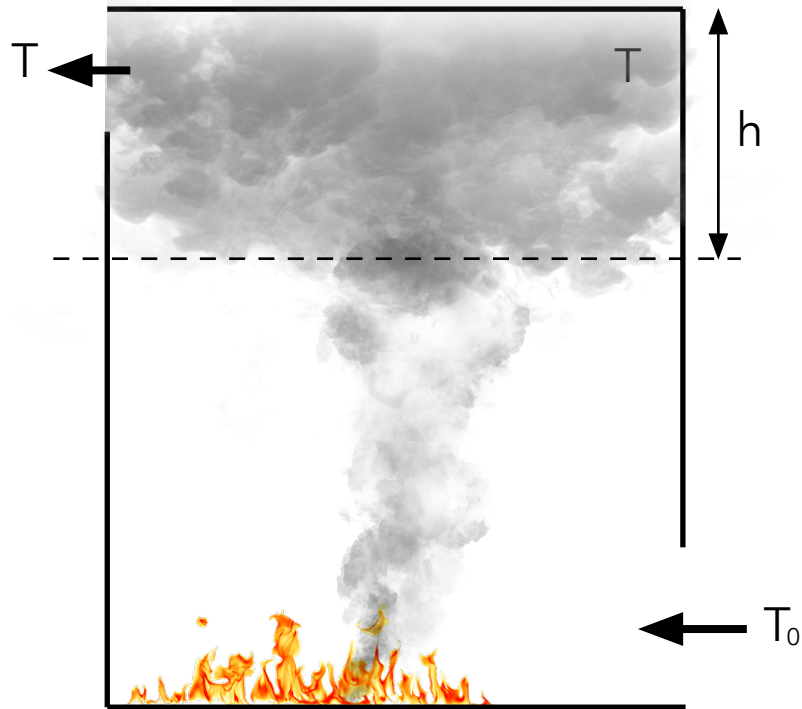
Ventilation de type « déplacement »



Ecoulement bidirectionnel
sur l'ouverture haute

Modèle bi-couche

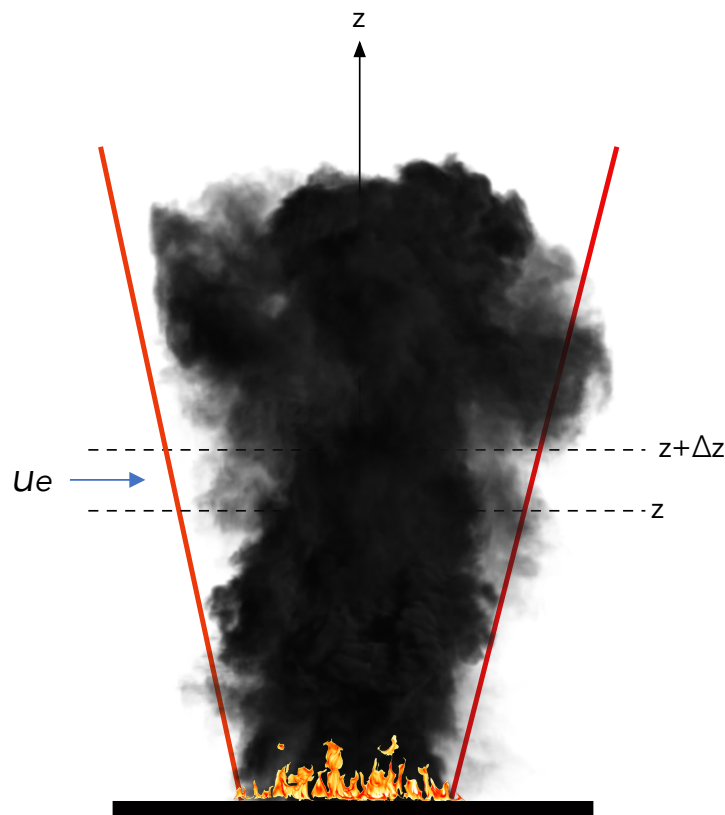
Approches stationnaires — *Modèle bi-couche*



Approches stationnaires — *Modèle bi-couche*

Modèle de panache

3 inconnues : $u(z)$; $d(z)$; $\rho(z)$



Masse

$$\Delta \left(\rho u \frac{\pi d^2}{4} \right) = \rho_0 u_e \pi d \Delta z$$

Quantité de mouvement

$$\Delta \left(\rho u^2 \frac{\pi d^2}{4} \right) = -\rho g \frac{\pi d^2}{4} \Delta z + \rho_0 g \frac{\pi d^2}{4} \Delta z$$

Energie

$$\Delta \left(\rho u \frac{\pi d^2}{4} C_p \Delta T \right) = 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta(u d^2 \Delta \rho) = 0$$

Approches stationnaires — *Modèle bi-couche*

Modèle de panache

3 inconnues : $u(z)$; $d(z)$; $\rho(z)$

$$\frac{d}{dz} [\rho u d^2] = 4 \rho_0 u_e d$$

$$\frac{d}{dz} [\rho u^2 d^2] = \Delta \rho g d^2$$

$$\frac{d}{dz} [\Delta \rho u d^2] = 0$$

Modèle de fermeture

$$u_e(z) = \alpha \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} u(z)$$

Théorie de Morton
approx. de Boussinesq
 $u_e = \alpha u$ avec $\alpha \approx 0,1$

Recherche de solutions « auto-similaires »

$$u(z) = C_1 z^a \quad d(z) = C_2 z^b \quad \frac{\Delta \rho}{\rho}(z) = C_3 z^c$$



Modèle de panache

3 inconnues : $u(z)$; $d(z)$; $\rho(z)$

$$u(z) = A^{1/3} B^{1/3} z^{-1/3}$$

$$d(z) = \frac{12\alpha}{5} \sqrt{\frac{T}{T_0}} z$$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta T}{T_0} = \frac{4}{3g} A^{2/3} B^{2/3} z^{-5/3}$$

$$\text{avec : } A = \frac{25}{48\pi \alpha^2} \text{ et } B = \frac{g \dot{Q}_c}{\rho_0 C_p T_0}$$

$(z - z_v)$
avec z_v la position de la source virtuelle

Modèle de panache de Morton-Heskestad

$$u(z) \approx 7,7 \dot{Q}_c^{1/3} (z - z_v)^{-1/3}$$

$$d(z) = 0,24 \sqrt{\frac{T}{T_0}} (z - z_v)$$

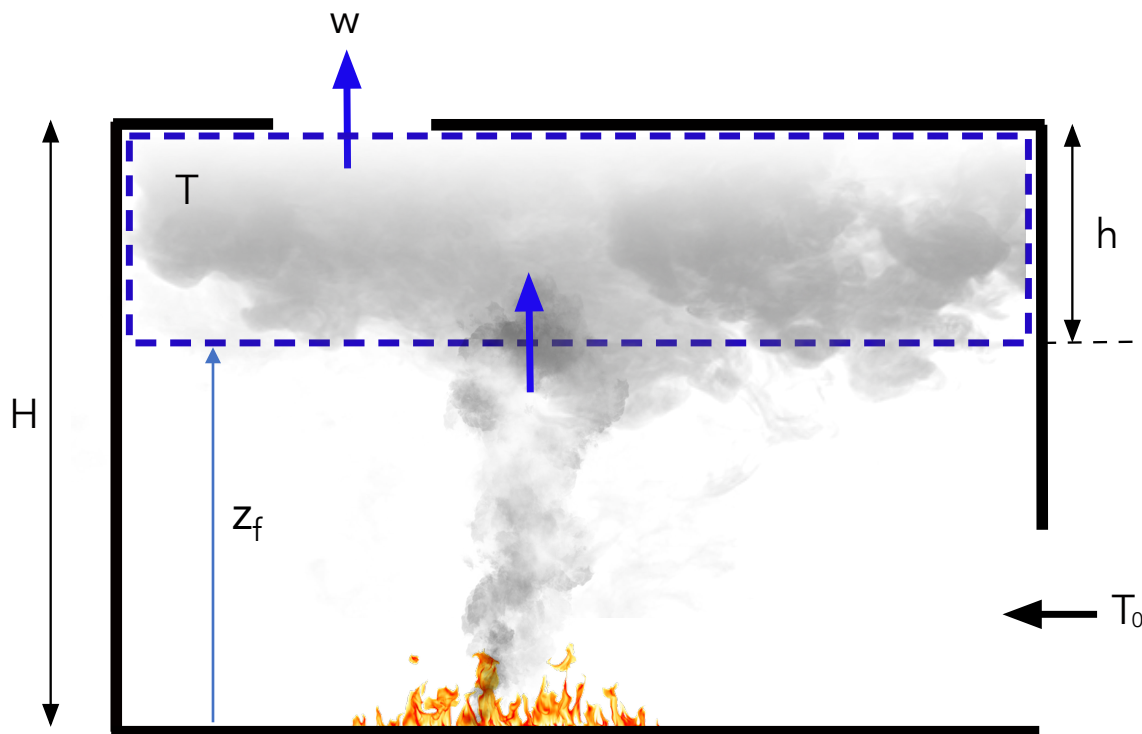
$$\frac{\Delta T}{T_0}(z) \approx 8,1 \dot{Q}_c^{2/3} (z - z_v)^{-5/3}$$

$$q_v(z) = u \frac{\pi d^2}{4} \approx 0,35 \frac{T}{T_0} \dot{Q}_c^{1/3} (z - z_v)^{5/3}$$

$$m(z) = \rho u \frac{\pi d^2}{4} \approx 0,42 \dot{Q}_c^{1/3} (z - z_v)^{5/3}$$

$$\dot{Q}_c = m C_p \Delta T \longrightarrow \dot{Q}_c$$

Approches stationnaires — *Modèle bi-couche*



Conservation de la masse

$$\rho w A = \dot{m}_p(z_f)$$

Relation de Bernoulli

$$\frac{1}{2} \rho \left(\frac{w}{C_d} \right)^2 = \Delta \rho g h$$

Hypothèses

- ↪ Désenfumage naturel par une ouverture de surface A au plafond
- ↪ Régime permanent
- ↪ Grande ouverture pour l'amenée d'air
- ↪ Température T uniforme dans la couche de fumées
- ↪ Parois adiabatiques

Approches stationnaires — *Modèle bi-couche*

Conservation de la masse

$$\rho w A = m_p(z_f) \quad \Rightarrow \quad \rho_0 w A = m_p(z_f) \left(1 + \frac{\Delta T}{T_0} \right)$$

Relation de Bernoulli

$$\frac{1}{2} \rho \left(\frac{w}{C_d} \right)^2 = \Delta \rho g h \quad \Rightarrow \quad w^2 = \frac{\Delta T}{T_0} g (H - z_f)$$

Relations d'Heskestad

$$m_p(z_f) = 0,42 \dot{Q}_c^{1/3} z_f^{5/3}$$

$$\frac{\Delta T}{T_0} = 8,1 \dot{Q}_c^{2/3} z_f^{-5/3}$$

Approches stationnaires — *Modèle bi-couche*

après quelques manipulations algébriques, on obtient :

$$A = 0,039 \frac{z_f^{5/6} (z_f^{5/3} + 8,1 \dot{Q}_c^{2/3})}{\sqrt{H - z_f}} \quad \sim \text{formule du « petit » feu IT 246 (déenfumage des ERP)}$$

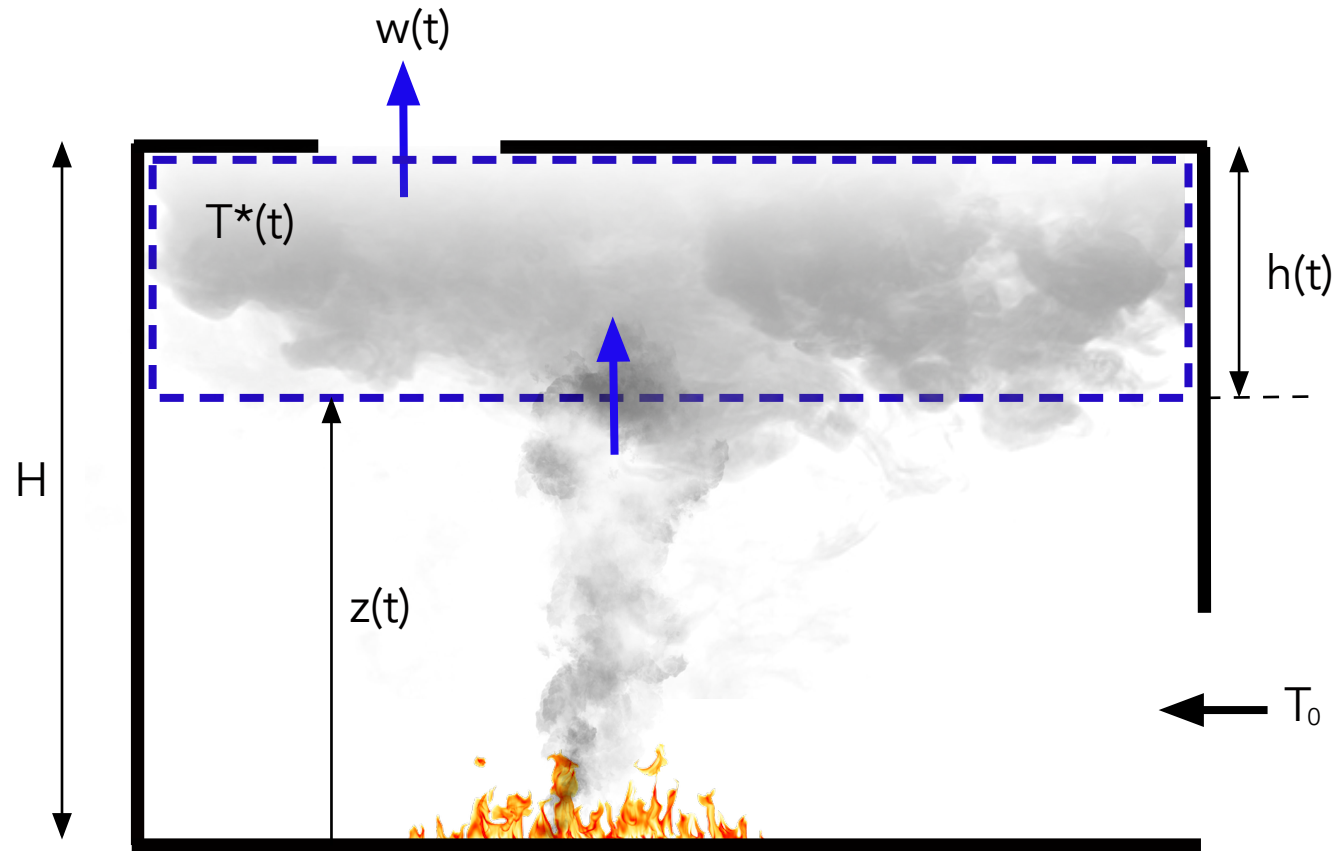
Inversement, si la surface A de l'exutoire est fixée :

$$z_f^{5/6} (z_f^{5/3} + 8,1 \dot{Q}_c^{2/3}) = 25,6 A \sqrt{H - z_f} \implies z_f$$

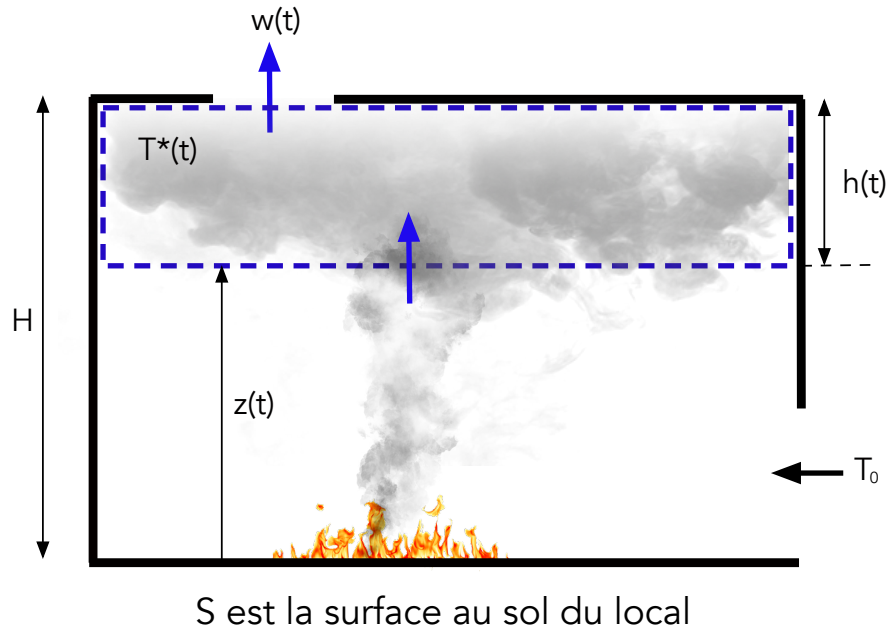
$$\frac{\Delta T}{T_0} = 8,1 \dot{Q}_c^{2/3} z_f^{-5/3} \quad w^2 = \frac{\Delta T}{T_0} g (H - z_f) \quad (q_{ext} = A w)$$

Modèle bi-couche en régime transitoire

Approches transitoires — *Modèle bi-couche*



Approches transitoires — *Modèle bi-couche*



$$\frac{d}{dt} [\rho^* h S] = m(z) - \rho^* w A$$

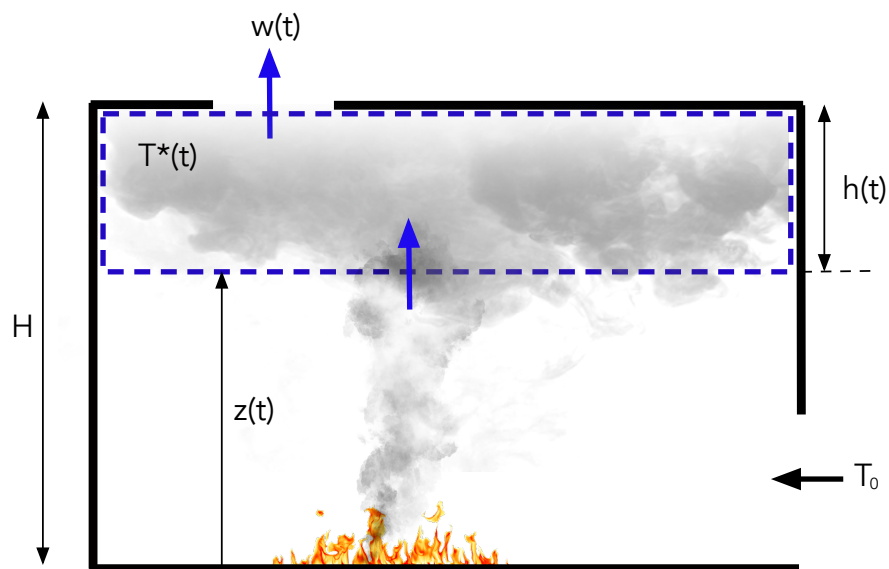
$$\rho^* w^2 = \Delta \rho^* g (H - z)$$

$$\frac{d}{dt} [\rho^* h S C_p \Delta T^*] = \dot{Q}_c - \rho^* w A C_p \Delta T^*$$

Adimensionnement des variables :

$$\zeta = \frac{z}{H} \quad \eta = \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad \omega = \frac{w}{\sqrt{g H}}$$

Approches transitoires — *Modèle bi-couche*



$$\theta = a \frac{\dot{Q}_c^{2/3}}{H^{5/3}}$$

a et κ sont des constantes pures

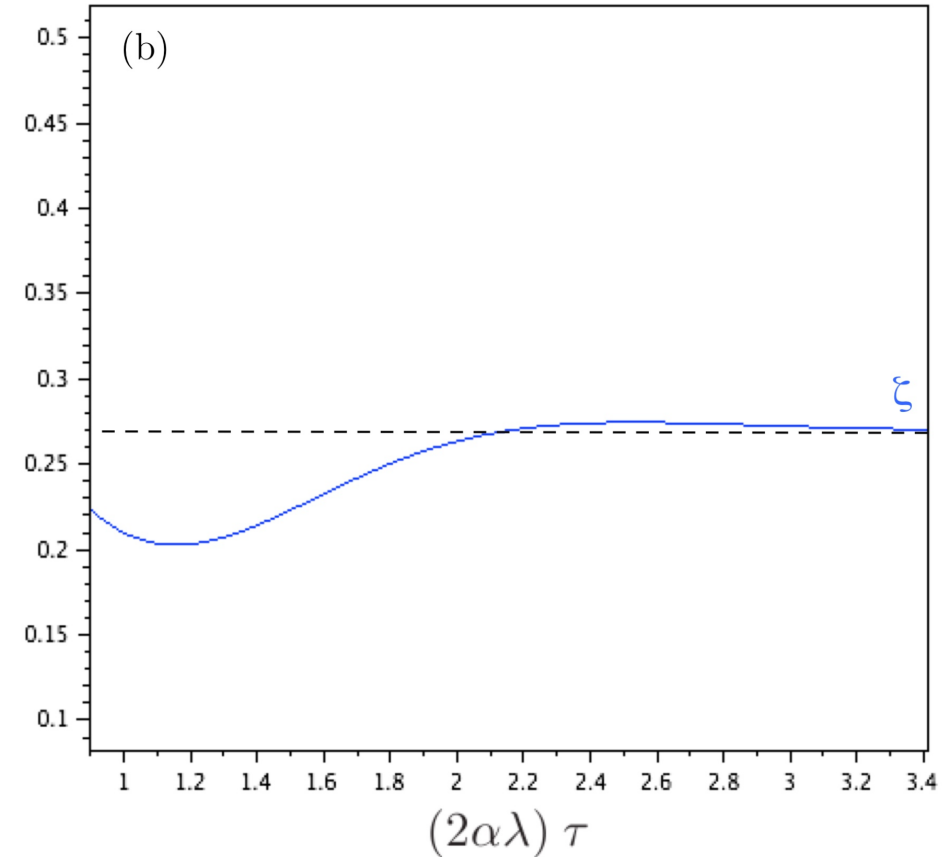
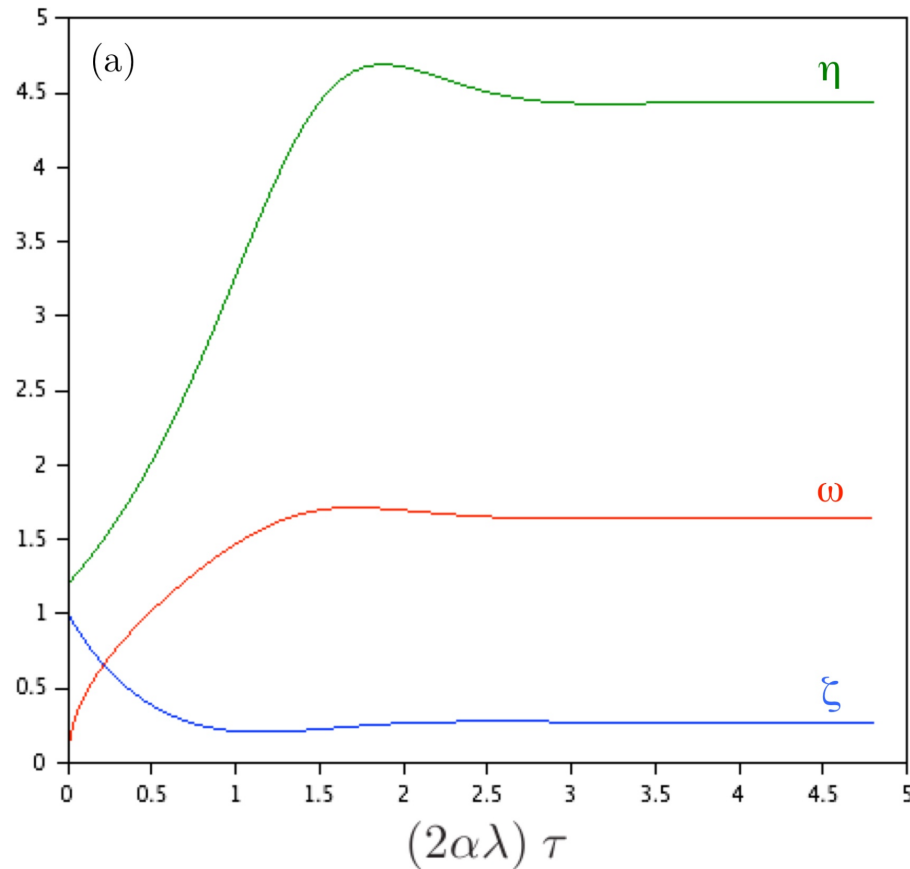
τ est le temps dimensionnel

Adimensionnement des variables :

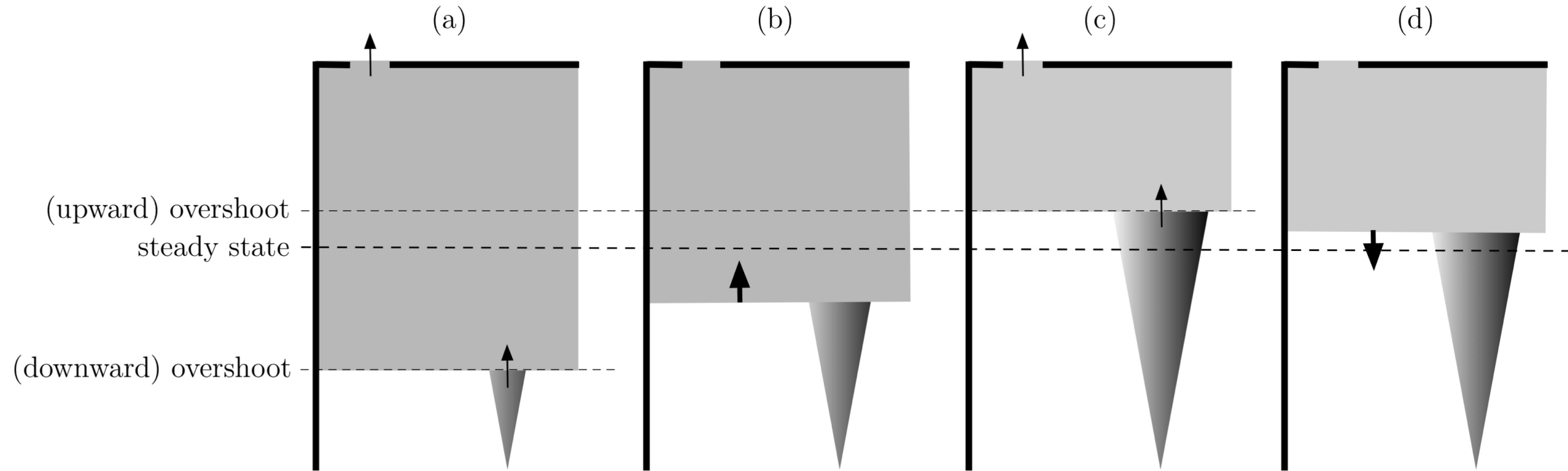
$$\zeta = \frac{z}{H} \quad \eta = \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad \omega = \frac{w}{\sqrt{g H}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\zeta}{d\tau} = \Lambda \omega - \kappa \theta^{1/2} (\zeta^{5/3} + \theta) \\ \omega = \sqrt{\eta (1 - \zeta)} \\ \frac{d\eta}{d\tau} = \frac{1 + \eta}{1 - \zeta} \kappa \theta^{1/2} (\theta - \eta \zeta^{5/3}) \end{array} \right.$$

Approches transitoires — *Modèle bi-couche*



Approches transitoires — *Modèle bi-couche*



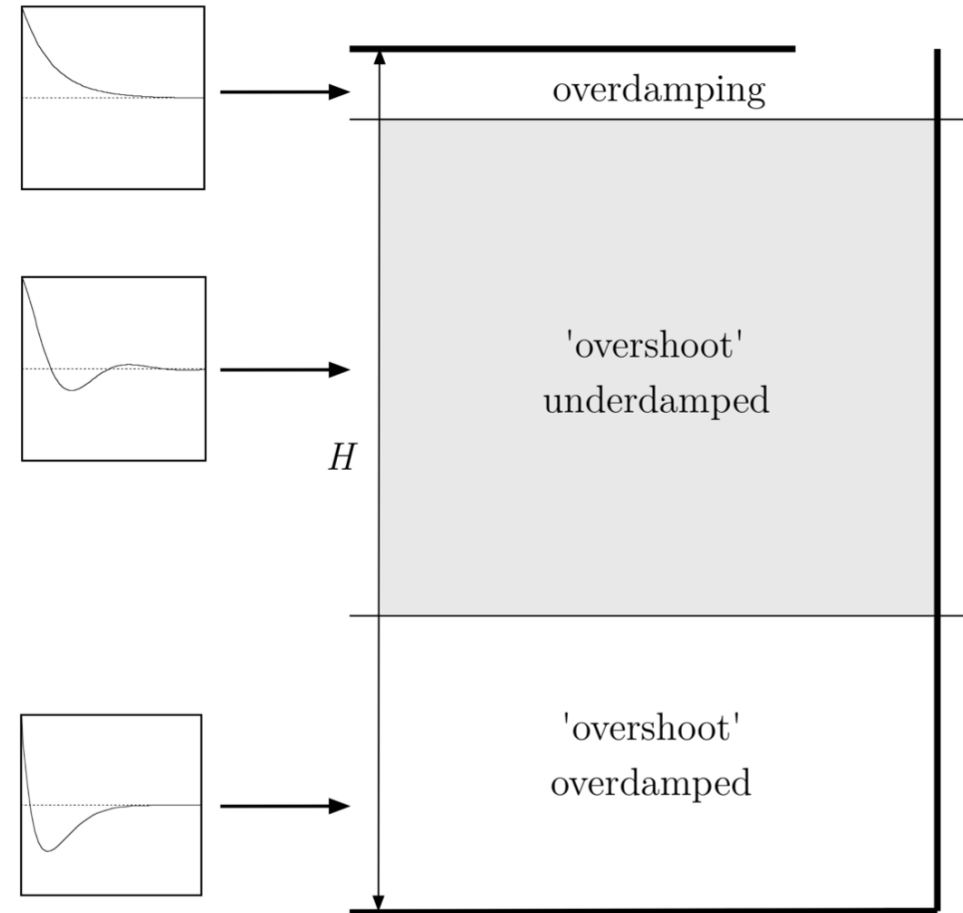
Approches transitoires — *Modèle bi-couche*

$$\zeta = \zeta_{ss} + \zeta' \quad \eta = \eta_{ss} + \eta' \quad \omega = \omega_{ss} + \omega'$$

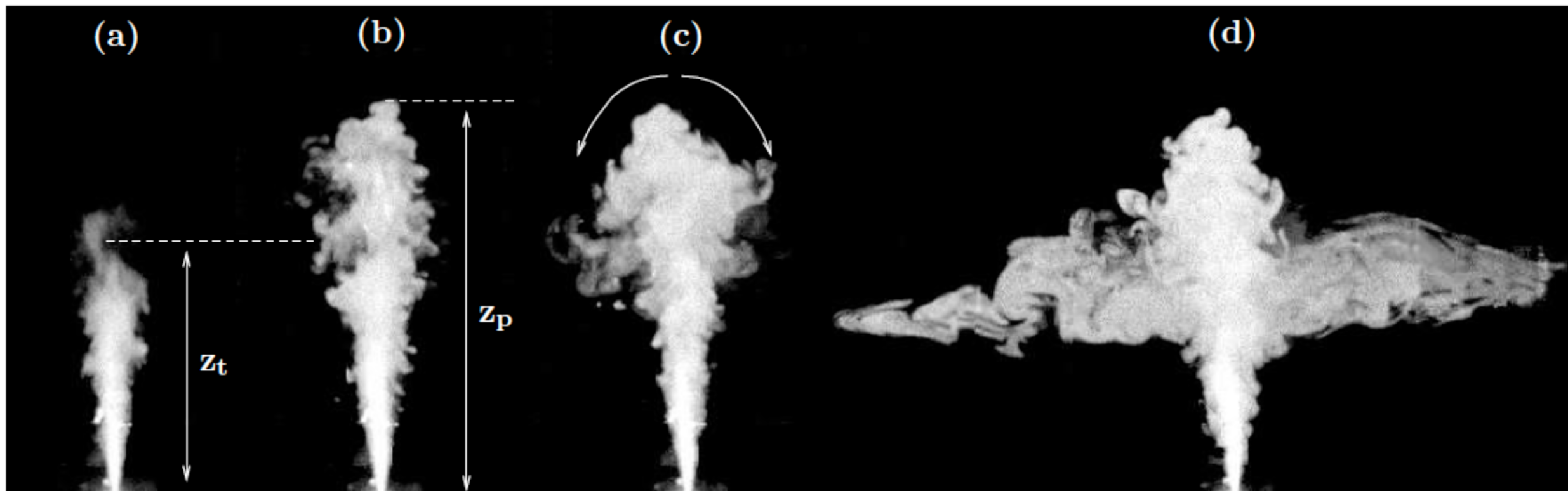
$$\frac{d^2}{d\tau^2} \begin{pmatrix} \zeta' \\ \eta' \\ \omega' \end{pmatrix} + A_1 \frac{d}{d\tau} \begin{pmatrix} \zeta' \\ \eta' \\ \omega' \end{pmatrix} + A_2 \begin{pmatrix} \zeta' \\ \eta' \\ \omega' \end{pmatrix} = 0$$

— A_1 et A_2 sont des fonctions de Λ , Θ et ζ_{ss}

— Le régime oscillant sous-amorti est obtenu si $A_1^2 < 4 A_2$

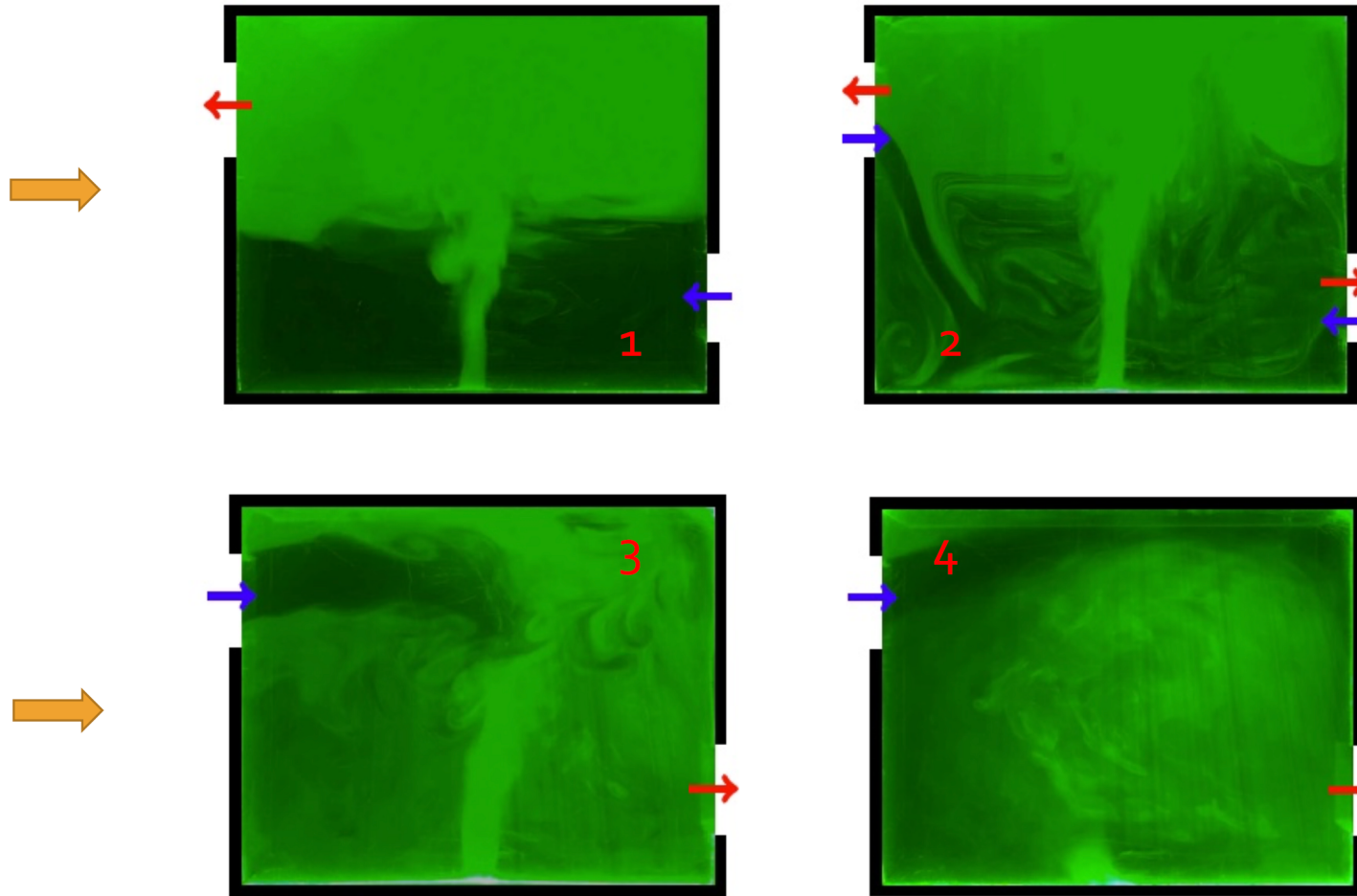


Panaches en atmosphère stratifiée



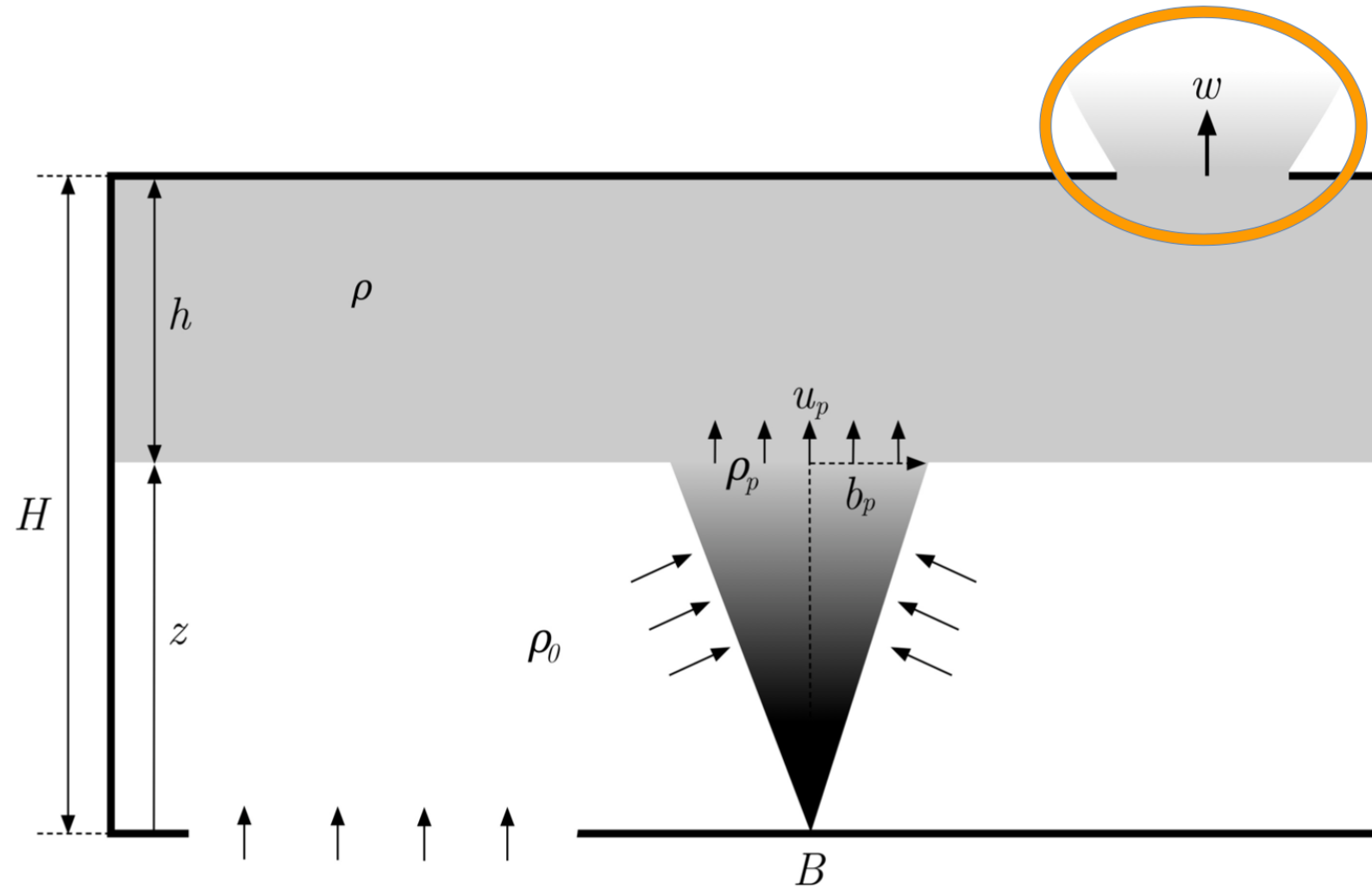
Expérience réalisée à l'IUSTI (Marseille) dans une enceinte stratifiée en densité (air-hélium)

Effet du vent

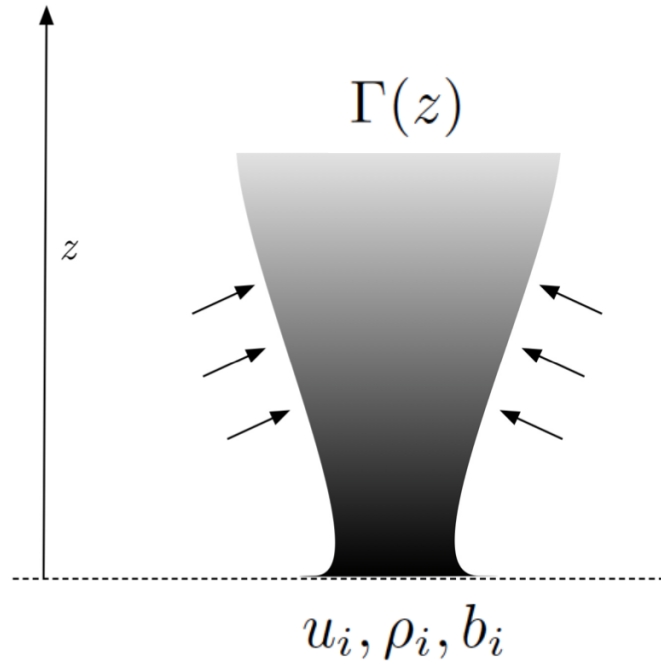


Expérience réalisée à l'IUSTI (Marseille) dans une soufflerie avec une source « air-hélium »

Nature du panache à l'exutoire



Nature du panache à l'exutoire



$$\Gamma_i = \frac{5}{8\alpha} \frac{\Delta\rho_i g b_i}{\sqrt{\rho_i \rho_0} u_i^2}$$

$\Gamma_i > 1$: panache paresseux

$\Gamma_i = 1$: panache pur

$\Gamma_i < 1$: panache forcé

Nature du panache à l'exutoire

$$\Gamma_{\text{exu}} = \frac{5}{8\alpha} \frac{\Delta\rho_{ss} g \sqrt{\Sigma}}{\sqrt{\rho_{ss}\rho_0} \omega_{ss}^2}$$

$$\frac{\zeta_{ss}^{5/3} (\zeta_{ss}^{5/3} + \Theta)^2}{1 - \zeta_{ss}} = \frac{\Lambda^2}{\kappa^2}$$

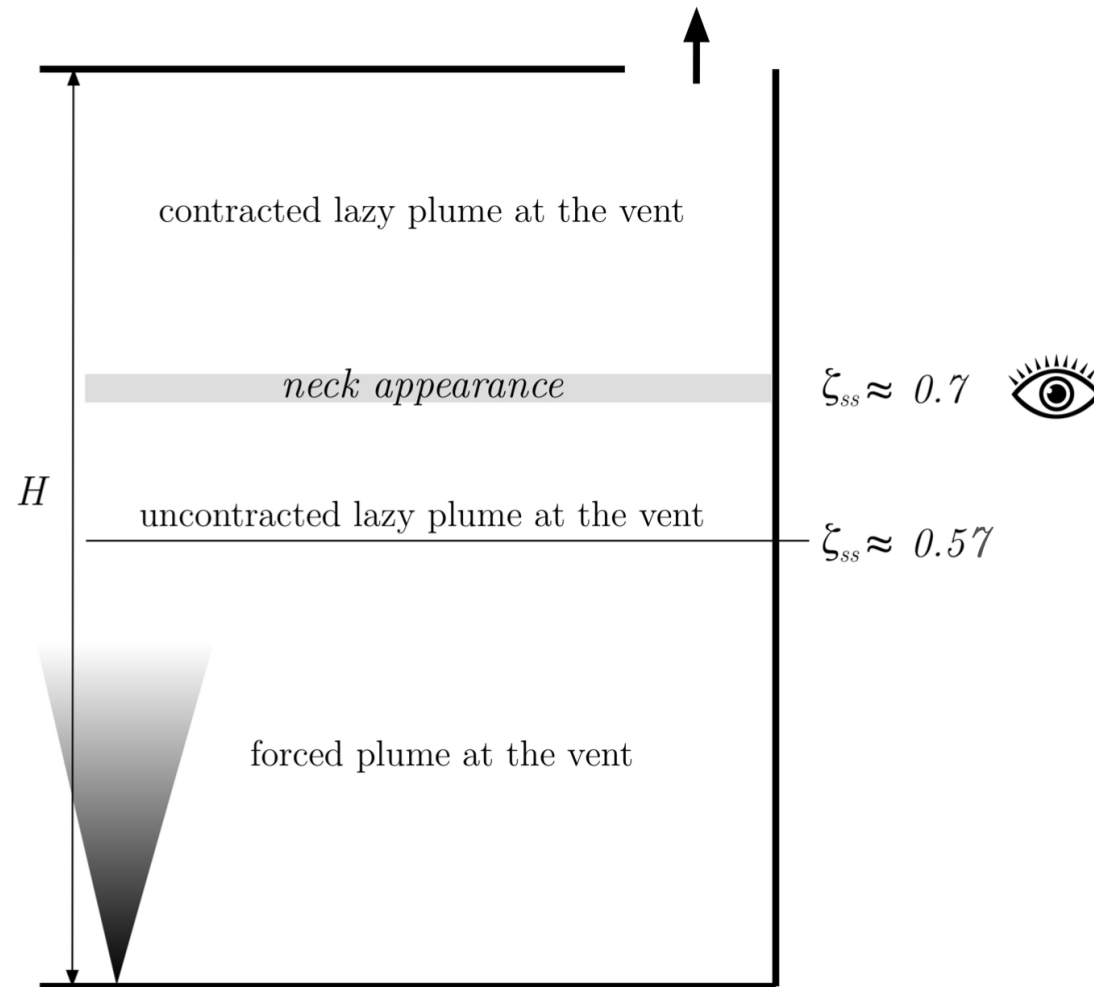
$$\eta_{ss} = \frac{\Theta}{\zeta_{ss}^{5/3}}$$

$$\omega_{ss} = \frac{\kappa \Theta^{1/2}}{\Lambda} (\zeta_{ss}^{5/3} + \Theta)$$

$$\Gamma_{\text{exu}} = \left(\frac{3}{4}\right)^{5/4} \left(\frac{\zeta_{ss}}{1 - \zeta_{ss}}\right)^{5/4}$$

$$\Rightarrow \zeta_{ss} = \frac{1}{1 + \frac{3}{4\Gamma_{\text{exu}}^{4/5}}}$$

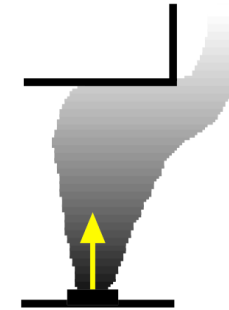
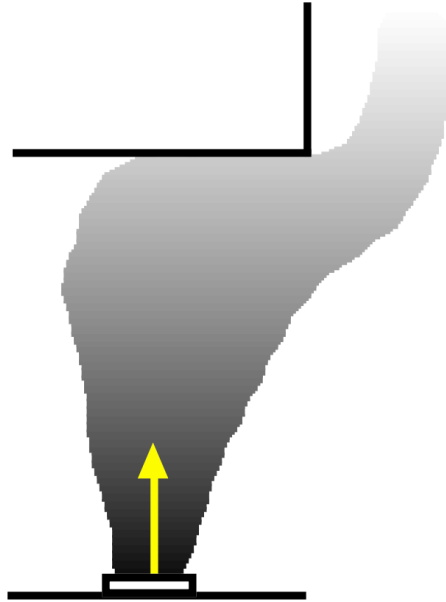
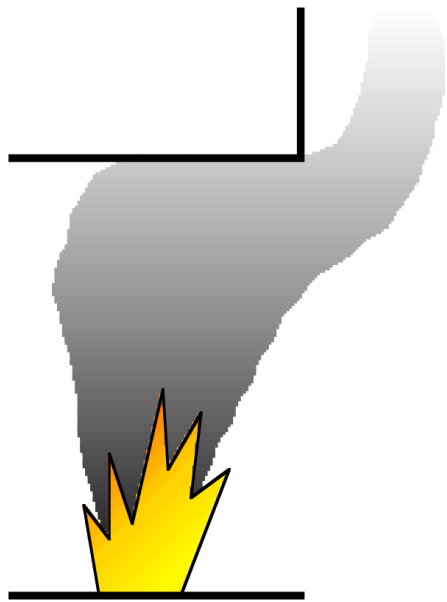
Nature du panache à l'exutoire



Similitudes

Similitudes

Simuler un panache d'incendie à échelle réduite (sans flamme, sans combustion et sans écart de température)



panache thermique >>>>>>>>>> jet de faible densité >>>>>>>>> réduction d'échelle

Similitudes

On souhaite représenter une feu de surface $S = 1 \text{ m}^2$ et de puissance $\dot{Q}_c = 1 \text{ MW}$



Plaque chauffante : $\dot{Q}_c = h S \Delta T$

$$h \sim 10^1 - 10^2 \quad \Rightarrow \quad T \sim 10^4 - 10^5$$



Souffleur d'air chaud à 100°C

$$\dot{Q}_c = \rho q_v C_p (T - T_0) \quad \Rightarrow \quad u_i \sim 12 \text{ m/s}$$



Injection d'hélium (masse volumique de $0,188 \text{ kg/m}^3$)

$$T_{\text{éq}} \sim 1900 \text{ K}$$

$$\dot{Q}_c = \rho_{\text{hél}} q_{\text{hél}} C_p [T_{\text{éq}} - T_0] \quad \Rightarrow \quad q_{\text{hél}} \approx 3,3 \dot{Q}_c (\text{MW})$$

Similitudes

Pour établir les conditions de similitudes, partons des équations de conservation du panache turbulent (masse, quantité de mouvement et flottabilité)

$$\frac{d}{dz} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^j u d^2 \right] = 4 u_e d \quad \text{1}$$

$$\frac{d}{dz} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^j u^2 d^2 \right] = \frac{\Delta \rho}{\rho_0} g d^2 \quad \text{2}$$

$$\frac{d}{dz} (\Delta \rho u d^2) = 0 \quad \text{3}$$

écrites sous forme généralisée : l'exposant $j = 0$ si on applique l'approximation de Boussinesq et on a $j = 1$ dans le cas général non-Boussinesq.

$$\begin{aligned} \textcircled{2} \quad \frac{d}{dz} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^j u^2 d^2 \right] &= \frac{\Delta \rho}{\rho_0} g d^2 \\ - \quad \frac{d}{dz} \left[\left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^j u^2 d^2 \right] &= \frac{d}{dz} (u^2 d^2) \end{aligned} \Rightarrow \frac{d}{dz} \left[u^2 d^2 \left(1 - j \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \right) \right] = \frac{\Delta \rho}{\rho_0} g d^2$$

On introduit les variables sans dimensions :

$$\tilde{z} = \frac{z}{d_i} \quad \bullet \quad \tilde{d} = \frac{d}{d_i} \quad \bullet \quad \tilde{u} = \frac{u}{u_i} \quad \bullet \quad \Delta \tilde{\rho} = \frac{\Delta \rho}{\Delta \rho_i}$$

$$\Rightarrow \frac{d}{d\tilde{z}} \left[\tilde{u}^2 \tilde{d}^2 \left(1 - j \frac{\Delta\rho_i}{\rho_0} \Delta\tilde{\rho} \right) \right] = \frac{\Delta\rho_i g d_i}{\rho_0 u_i^2} \Delta\tilde{\rho} \tilde{d}^2$$

En Boussinesq, le seul nombre à conserver est :

$$\frac{\Delta\rho_i g d_i}{\rho_0 u_i^2}$$

Dans le cas général non-Boussinesq, on doit conserver :

$$\frac{\Delta\rho_i}{\rho_0} \text{ et } \frac{g d_i}{u_i^2}$$

Similitudes

Grandeur réelle	Grandeur maquette
Longueur L_r	$L_m = a L_r$
Vitesse U_r	$U_m = a^{1/2} U_r$
Temps t_r	$t_m = a^{1/2} t_r$
Masse volumique ρ_r	$\rho_m = a^0 \rho_r$ (conservé)
Température T_r	$T_m = a^0 T_r$ (conservé)
Débit volumique q_r	$q_m = a^{5/2} q_r$
Débit massique Q_r	$Q_m = a^{5/2} Q_r$
Puissance convective HRR_r	$HRR_m = a^{5/2} HRR_r$
Débit de flottabilité B_r	$B_m = a^{5/2} B_r$

Aéraulique des fumées d'incendie

Olivier Vauquelin (IUSTI, Aix-Marseille Université)

