Aéraulique des fumées

Rabah Mehaddi – LEMTA, Université de Lorraine

Olivier Vauquelin – IUSTI, Aix-Marseille Université

INTRODUCTION

Objectifs

Mots-Clés :

- *Théorie des panaches*
- *Ecoulements non-Boussinesq*
- *Remplissage/vidange*
- *Ventilation*
- *Désenfumage*

Un aperçu des modèles et corrélations utilisés en ingénierie de l'incendie

— D'où viennent ces modèles ?

— Sur quelles hypothèses reposent-ils ?

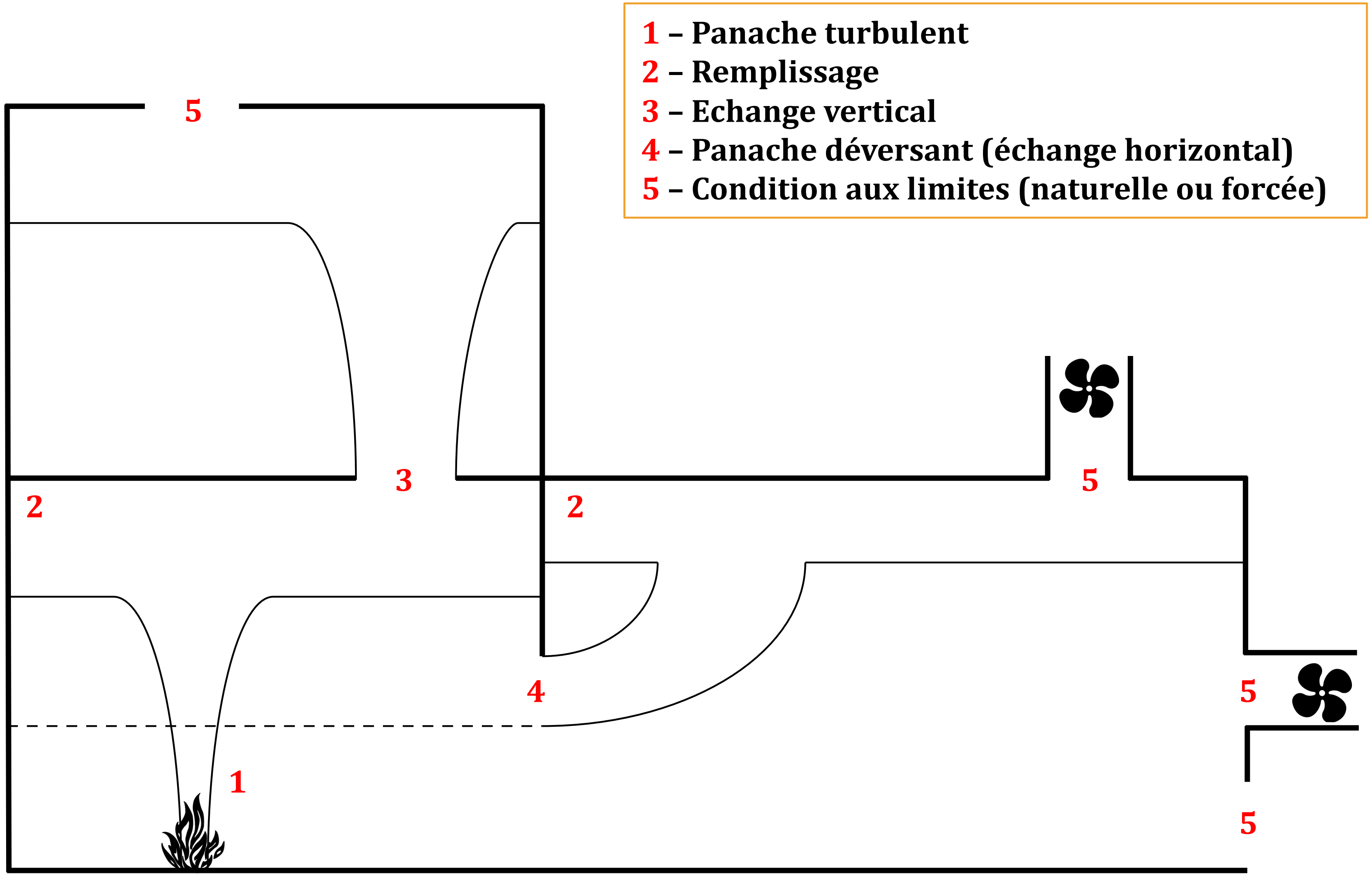
— Quelles sont leurs limites ?

— Quels travaux récents ?

— Comment peut-on aller plus loin ?

INTRODUCTION

Problématique



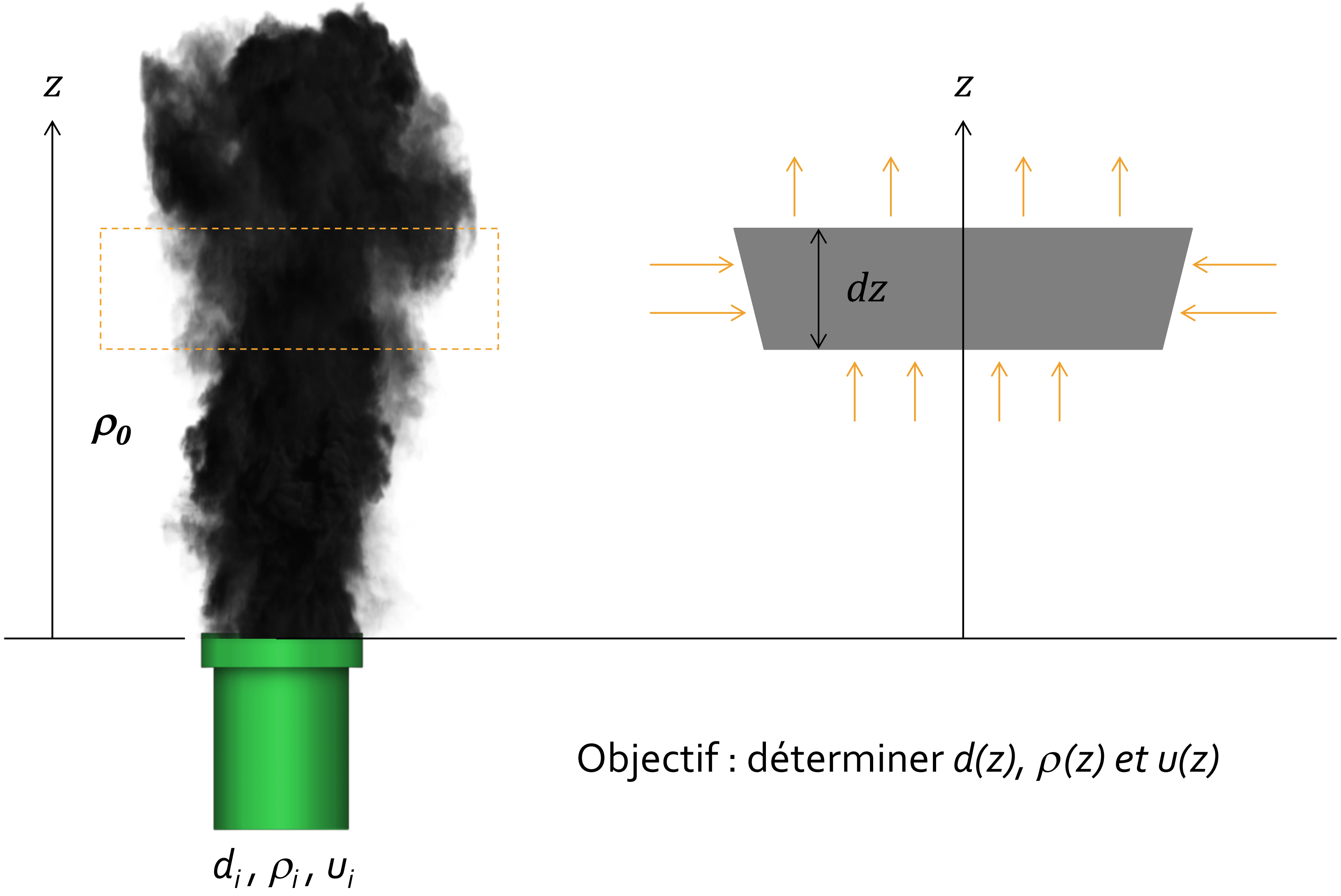
INTRODUCTION

Sommaire

PANACHE TURBULENT

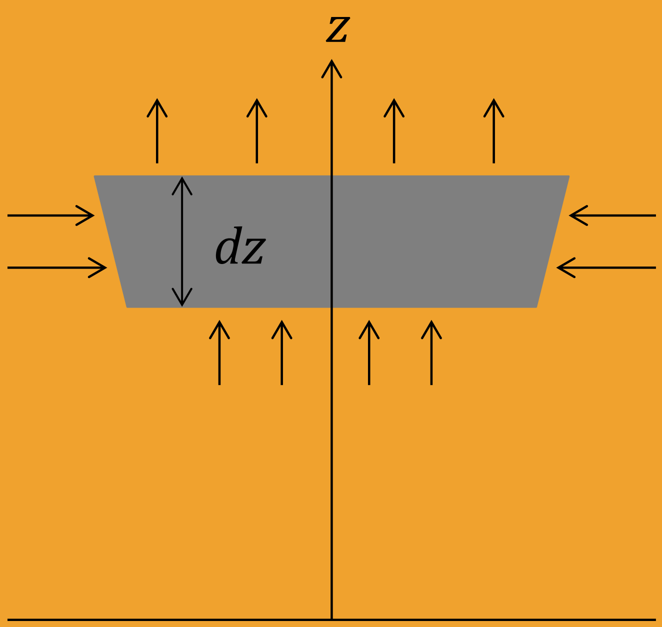
PANACHE TURBULENT

Données & variables



Objectif : déterminer $d(z)$, $\rho(z)$ et $u(z)$

PANACHE TURBULENT

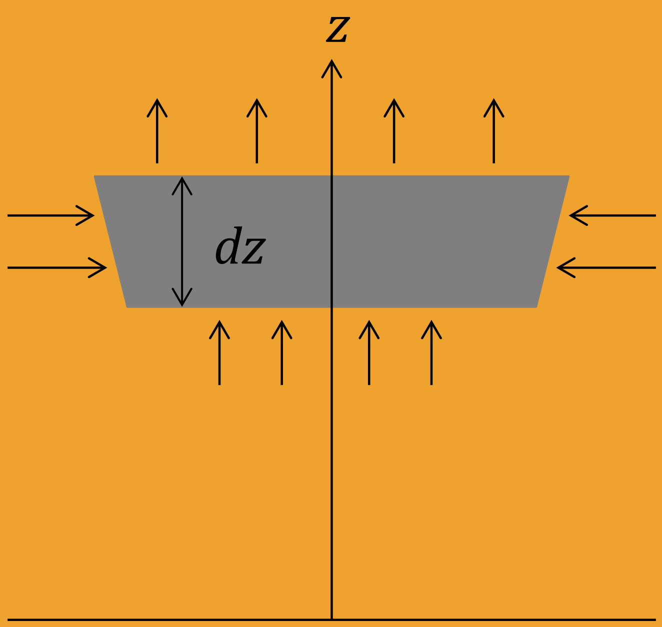


Conservation du débit massique

$$\left(\rho u \frac{\pi d^2}{4}\right)_z - \left(\rho u \frac{\pi d^2}{4}\right)_{z+dz} + \rho_0 u_e \pi d\, dz = 0$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dz}\left(\rho u d^2\right) = 4 \rho_0 u_e d \qquad \textbf{1}$$

PANACHE TURBULENT



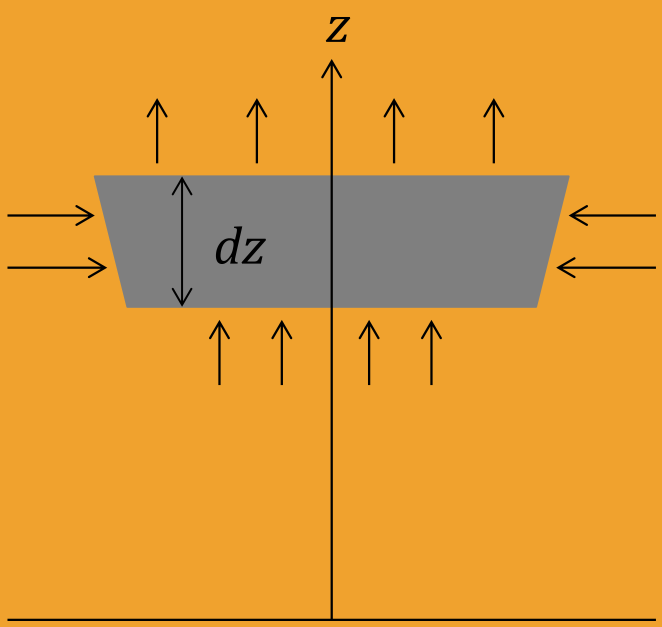
Conservation du débit volume

$$\left(u\frac{\pi d^2}{4}\right)_z - \left(u\frac{\pi d^2}{4}\right)_{z+dz} + u_e \pi d \, dz = 0$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dz}\left(ud^2\right) = 4u_e d$$

2

PANACHE TURBULENT



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

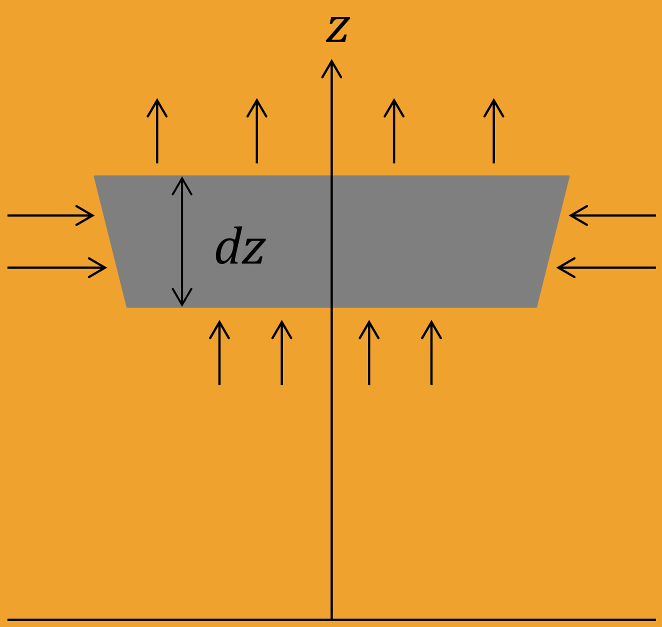
$$\frac{d}{dz}\left(\rho_0 u d^2\right) = 4\rho_0 u_e d$$ 2

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

Conservation du débit de flottabilité

$$B = \frac{\Delta\rho}{\rho_0} u g \frac{\pi d^2}{4} \quad (m^4 / s^3)$$

PANACHE TURBULENT



Variation de la quantité de mouvement

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

$$\Rightarrow \frac{d}{dz}\left(\rho u^2 d^2\right) = \Delta\rho\, g\, d^2$$

4

PANACHE TURBULENT

Vitesse d'entrainement

$$\frac{d}{dz}\left(u d^2\right) = 4 u_e \pi d \quad \bullet \quad \frac{d}{dz}\left(\rho u^2 d^2\right) = \Delta\rho\, g\, d^2 \quad \bullet \quad \frac{d}{dz}\left(\Delta\rho\, u\, d^2\right) = 0$$

Modèle de Morton, Turner & Taylor (1956)

Approximation de Boussinesq avec le modèle de fermeture : $u_e = \alpha u$

$$\frac{d}{dz}\left(u d^2\right) = 4 \alpha u d \quad \bullet \quad \frac{d}{dz}\left(u^2 d^2\right) = \eta\, g\, d^2 \quad \bullet \quad \frac{d}{dz}\left(\eta u d^2\right) = 0 \qquad \left(\eta = \frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right)$$

Cas général non-Boussinesq

Avec le modèle de fermeture : $u_e = \alpha u \sqrt{\rho / \rho_0}$ $\qquad \left(\eta = \frac{\Delta\rho}{\rho}\ \mathit{et}\ \delta = \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}}\, d\right)$

$$\frac{d}{dz}\left(u \delta^2\right) = 4 \alpha u \delta \quad \bullet \quad \frac{d}{dz}\left(u^2 \delta^2\right) = \eta\, g\, \delta^2 \quad \bullet \quad \frac{d}{dz}\left(\eta u \delta^2\right) = 0$$

PANACHE TURBULENT

$$\frac{d}{dz}\left(u\delta^2\right) = 4\alpha u\delta$$

$$\frac{d}{dz}\left(u^2\delta^2\right) = \eta g \delta^2$$

$$\frac{d}{dz}\left(\eta u\delta^2\right) = 0$$

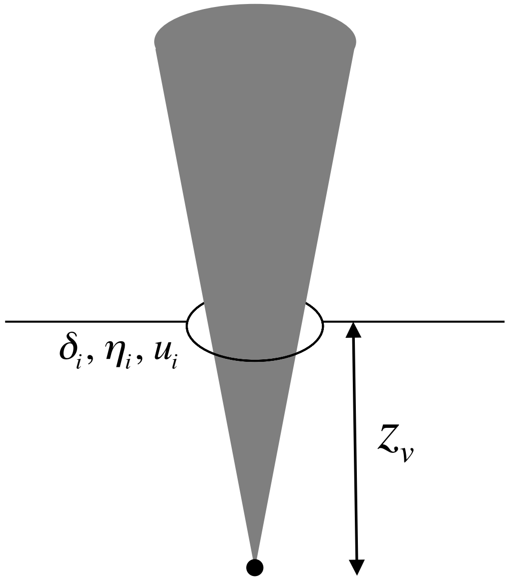
Recherche de solutions similaires :

$u = C_1 z^a$ • $\delta = C_2 z^b$ • $\eta = C_3 z^c$

$$\Rightarrow \begin{cases} u(z) = \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{25}{6\pi\alpha^2}\right)^{1/3} B^{1/3} z^{-1/3} \\ \delta(z) = \dfrac{12\alpha}{5} z \approx 0{,}24\, z \\ \eta(z) = \dfrac{1}{3g}\left(\dfrac{25}{6\pi\alpha^2}\right)^{2/3} B^{2/3} z^{-5/3} \end{cases}$$

PANACHE TURBULENT

Source virtuelle



$$u(z) = \frac{1}{2}\left(\frac{25}{6\pi\alpha^2}\right)^{1/3} B^{1/3}\left(z+z_v\right)^{-1/3}$$

$$\delta(z) = \frac{12\alpha}{5}\left(z+z_v\right)$$

$$\eta(z) = \frac{1}{3g}\left(\frac{25}{6\pi\alpha^2}\right)^{2/3} B^{2/3}\left(z+z_v\right)^{-5/3}$$

Modèle du « panache pur »
— Bon en champ lointain
— Mauvais en champ proche

PANACHE TURBULENT

Invariants
& fonction « panache »

Les 2 invariants tirés des solutions similaires sont :

$$B = \eta u g \frac{\pi\delta^2}{4} = \eta_i u_i g \frac{\pi\delta_i^2}{4} \quad (\textit{débit de flottabilité})$$

et

$$Ri = \frac{\eta g \delta}{u^2} = \frac{16\alpha}{5} = \textit{constante}$$

A partir de *Ri*, on définit la fonction Γ(z) :

$$\Gamma(z) = \frac{5}{16\alpha}\frac{\eta g \delta}{u^2}$$

- *qui vaut 1 pour le modèle de « panache pur »*
- *telle que* $\lim_{\infty} \Gamma(z) = 1$ *hors du cadre restrictif des solutions similaires*

PANACHE TURBULENT

Col & maximum de vitesse

Retour aux équations de conservation (non-Boussinesq) :

$$\frac{d}{dz}\left(u\delta^2\right) = 4\alpha u\delta \quad \bullet \quad \frac{d}{dz}\left(u^2\delta^2\right) = \eta g \delta^2 \quad \bullet \quad \frac{d}{dz}\left(\eta u \delta^2\right) = 0$$

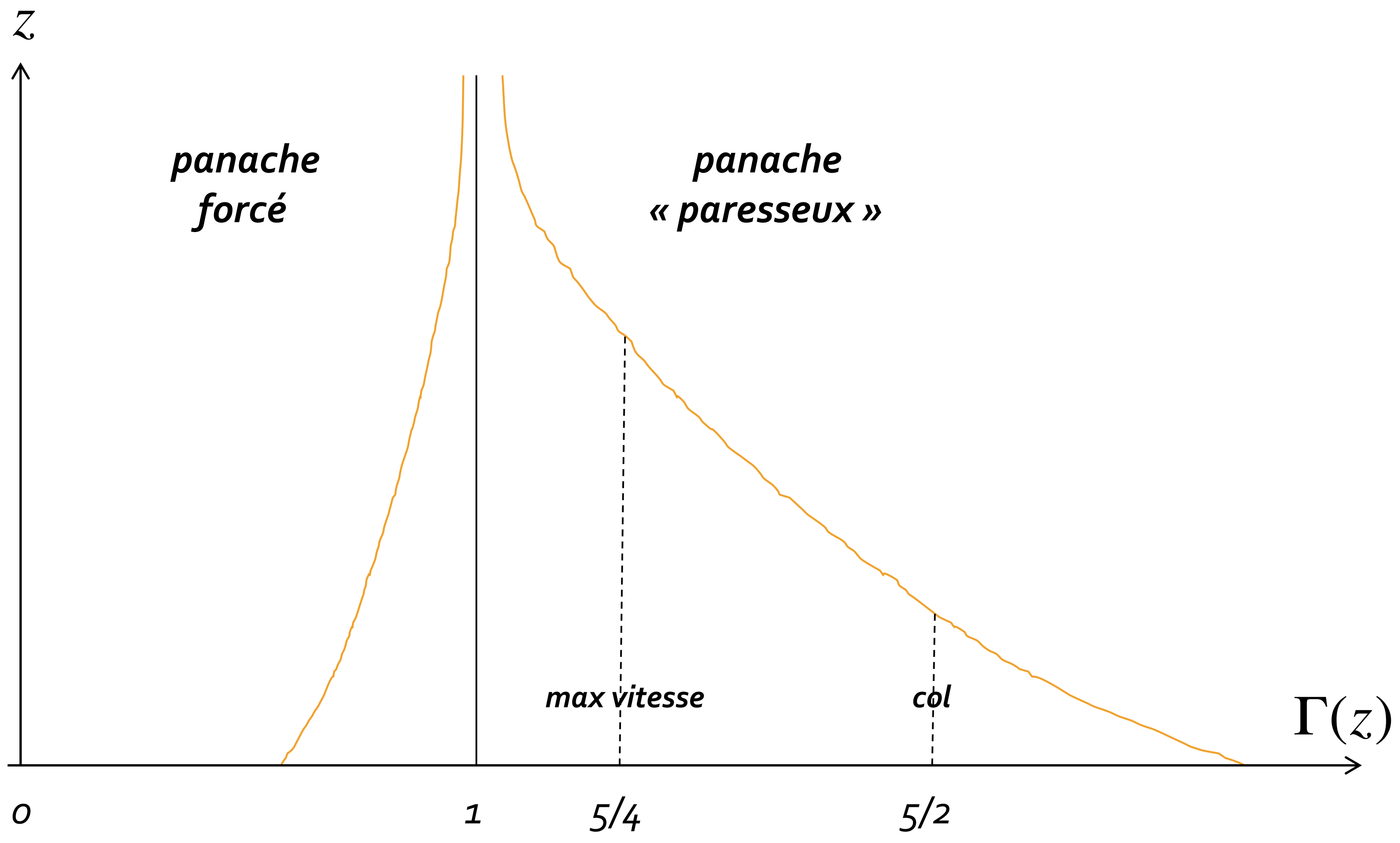
On explicite les dérivées premières :

$$\frac{du}{dz} = \frac{16\alpha}{5}\frac{u}{\delta}\left(\Gamma - \frac{5}{4}\right) \quad \bullet \quad \frac{d\delta}{dz} = -\frac{8\alpha}{5}\left(\Gamma - \frac{5}{2}\right) \quad \bullet \quad \frac{d\eta}{dz} = -\frac{64\alpha^2}{5g}\frac{u^2}{\delta^2}\Gamma$$

$$\Rightarrow \begin{cases} maximum\ de\ vitesse\ pour : \Gamma = {}^{5}\!/_{4} \\ minimum\ de\ "diamètre"\ (col)\ pour : \Gamma = {}^{5}\!/_{2} \end{cases}$$

PANACHE TURBULENT

Evolution de $\Gamma(z)$



PANACHE TURBULENT

Classification

Jet pur (pure jet)	$\Gamma_i \approx 0$
Panache forcé (forced plume)	
Panache pur (pure plume)	$\Gamma_i = 1$
Panache paresseux (lazy plume)	
Panache de convection naturelle (pure buoyant plume)	$\Gamma_i \to \infty$

Différents régimes de panaches en fonction de la valeur de Γ_i

PANACHE TURBULENT

Solutions exactes

La fonction Γ(z) est donnée par l'équation différentielle :

$$\frac{d\Gamma}{dz} = \pm\,\Lambda_i\,\Gamma^{1/2}\,\left|1-\Gamma\right|^{13/10}$$

Pas de solutions analytiques
=> Fonction « béta » à tabuler ou utilisation de <u>solutions asymptotiques raccordées</u>

… après un peu d'algèbre :

$$u(z) = u_i\left(\frac{\Gamma_i}{\Gamma}\right)^{1/2}\left(\frac{\Gamma-1}{\Gamma_i-1}\right)^{1/10} \quad \bullet \quad \delta(z) = \delta_i\left(\frac{\Gamma}{\Gamma_i}\right)^{1/2}\left(\frac{\Gamma_i-1}{\Gamma-1}\right)^{3/10} \quad \bullet \quad \eta(z) = \eta_i\left(\frac{\Gamma_i}{\Gamma}\right)^{1/2}\left(\frac{\Gamma-1}{\Gamma_i-1}\right)^{1/2}$$

PANACHE TURBULENT

Solutions exactes

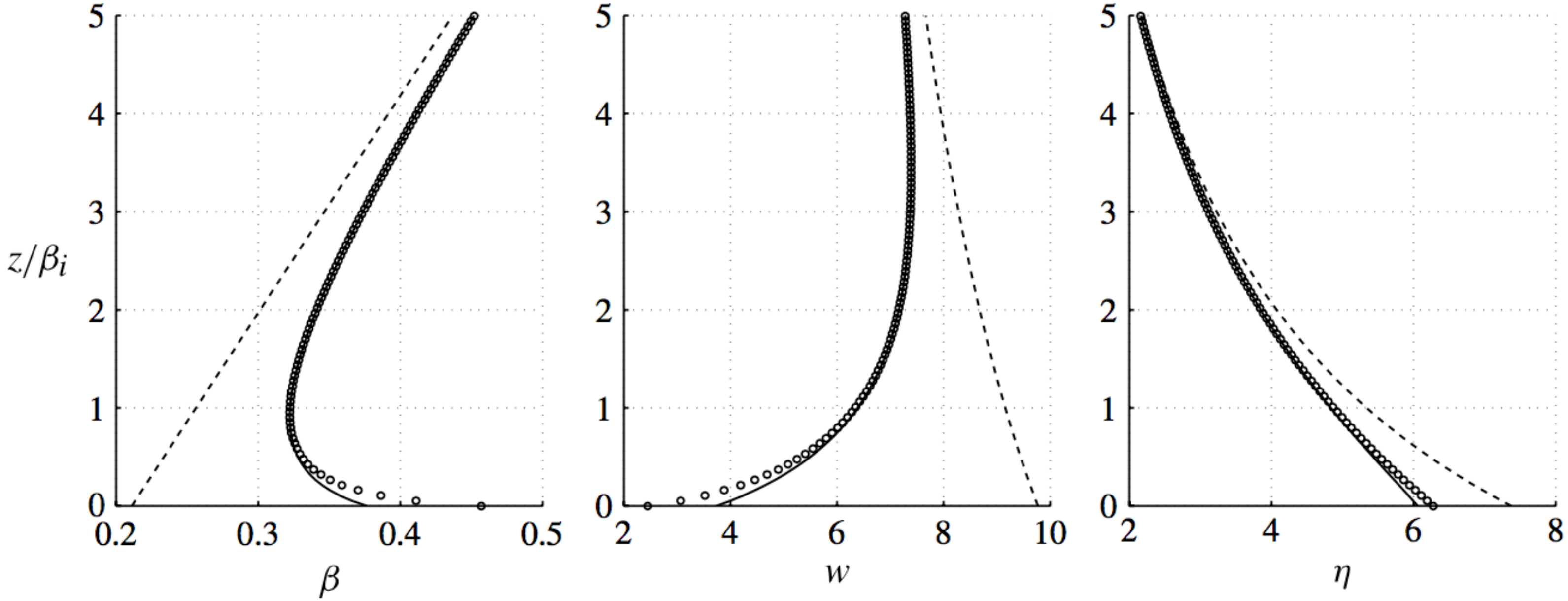


FIGURE 5. Vertical evolutions of the plume variables in a lazy case ($\Gamma_i = 10$, with $\beta_i = 0.3764$ m, $w_i = 3.7393$ m s^{-1} and $\eta_i = 6.0588$). Continuous line, numerical solutions. Symbols ∘, relations (1.3) obtained by using the outer solution (3.2). Dashed line, similarity solutions.

PANACHE TURBULENT

Modèle d'Heskestad

Aujourd'hui, <u>en ingénierie du feu</u>, on utilise les solutions similaires :

$$u(z)=\frac{1}{2}\left(\frac{25}{6\pi\alpha^2}\right)^{1/3}B^{1/3}\left(z+z_v\right)^{-1/3}$$

$$\delta(z)=\frac{12\alpha}{5}\left(z+z_v\right)$$

$$\eta(z)=\frac{1}{3g}\left(\frac{25}{6\pi\alpha^2}\right)^{2/3}B^{2/3}\left(z+z_v\right)^{-5/3}$$

Pour le passage du densimétrique au thermique :

$$B=\frac{g\dot{Q}_c}{\rho_0 C_p T_0} \quad \& \quad \eta=\frac{\Delta\rho}{\rho}=\frac{\Delta T}{T_0}$$

$\Rightarrow$ **Relations d'Heskestad**

$$u(z)=10{,}3\,\dot{Q}_c^{1/3}\left(z+z_v\right)^{-1/3} \bullet d(z)=0{,}24\sqrt{\frac{T}{T_0}}\left(z+z_v\right) \bullet \frac{\Delta T}{T_0}(z)=8{,}5\,\dot{Q}_c^{2/3}\left(z+z_v\right)^{-5/3}$$

$$avec\ \dot{Q}_c\ exprimé\ en\ MW\ et\ pour\ \rho_0=1{,}2\ kg/m^3, C_p=1000\ J/kgK\ et\ T_0=293K$$

PANACHE TURBULENT

Bibliographie sélective

Morton B. R., Taylor G. I. & Turner J. S., Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneaous Sources, *Proceeding of the Royal Society of London A*, 1956

Turner J. S., Buoyant plumes and thermals, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1969

Heskestad G., Engineering relations for fire plume, *Fire Safety Journal*, 1984

Rooney G. G. & Linden P. F., Similarity considerations for non-Boussinesq plumes in an unstratified environment, *Journal of Fluid Mechanics*, 1996

Hunt G. R. & Kaye N. B., Virtual origin correction for lazy turbulent plumes, *Journal of Fluid Mechanics*, 2001

Fanneløp T. K. & Webber D. M., On buoyant plumes rising from area sources in a calm environment, *Journal of Fluid Mechanics*, 2003

Hunt G. R. & Kaye N. B., Lazy plumes, *Journal of Fluid Mechanics*, 2005

Michaux G. & Vauquelin O., Solutions for plumes rising from circular sources, *Physcis of Fluids*, 2008

Candelier F. & Vauquelin O., Matched asymptotic solutions for turbulent plumes, *Journal of Fluid Mechanics*, 2012

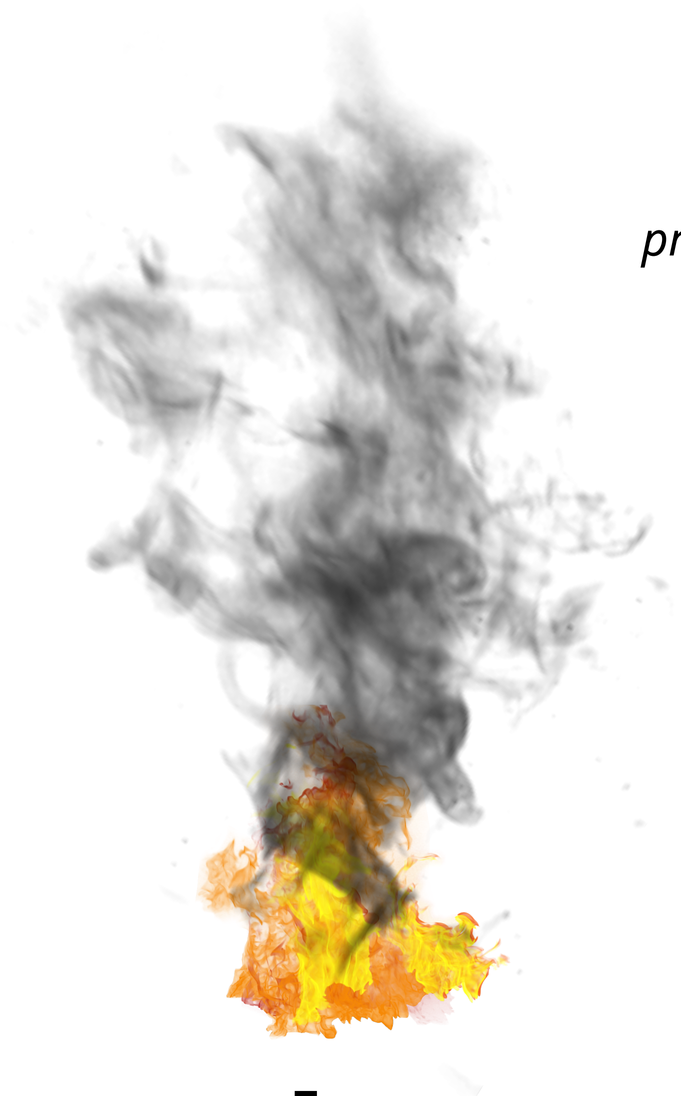
LES FUMEES

LES FUMEES

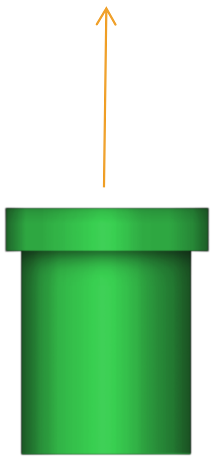
Définition

Panache de fumées

produits de combustion et air



débit ?
température ?



Feu

propriétés physiques, surface, puissance …

LES FUMEES

Estimation des débits

Feux de bac (Heptane)

C_7H_{16} + 52,36 (0,21 O_2 + 0,79 N_2) —> 7 CO_2 + 8 H_2O + 41,36 N_2

Masse de combustible : 7 x 12 + 16 x 1 = **100 g**
Masse d'air consommée : 52,36 x 24 = 1 257 litres, soit donc ~ **1 500 g**

Chaleur massique de combustion : ΔH_c = 44,6 MJ/kg
$\Rightarrow$ $\Delta T \approx$ 2 700 K
Avec 30 % de l'énergie rayonnée, on corrige : **$\Delta T \approx$ 1 800 K**

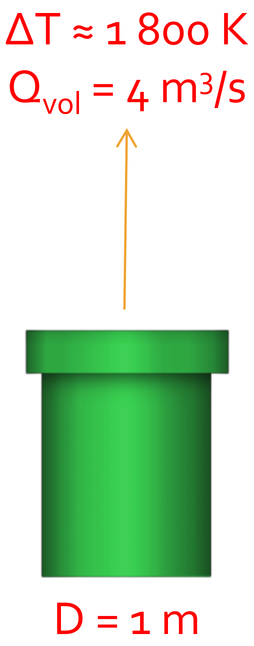
Débit massique de combustible ≈ $0{,}1\,(1 - e^{-0{,}8\,D})\,\pi D^2/4$ (pour l'heptane)

D = 1 m => Débit volumique (produits de combustion) ≈ **4 m³/s** *(1 MW)*
D = 2 m => Débit volumique (produits de combustion) ≈ **25 m³/s** *(6 MW)*
D = 5 m => Débit volumique (produits de combustion) ≈ **200 m³/s** *(50 MW)*

LES FUMEES

Estimation des débits

Quel est le Γ_i d'un feu ?



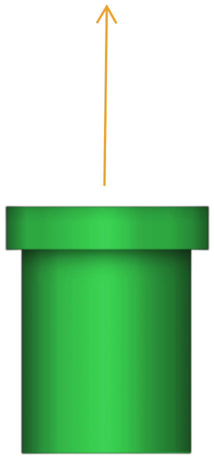
LES FUMEES

Estimation des débits

Quel est le Γ_i d'un feu ?

$\Delta T \approx 1\,800$ K

$Q_{vol} = 4$ m³/s



D = 1 m

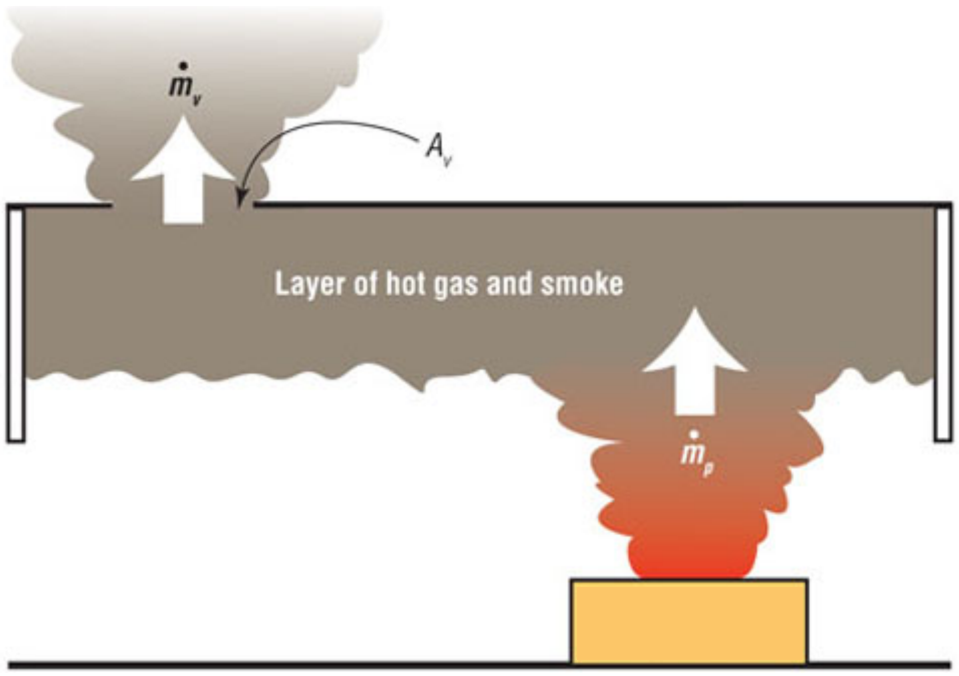
$\Rightarrow \Gamma_i \sim 2\text{-}3$

la question reste ouverte …

VENTILATION NATURELLE

VENTILATION NATURELLE

Principe



Un problème simple mais riche d'un point de vue phénoménologique :

— Processus de formation d'une couche,
— nature des écoulements aux ouvertures,
— dynamique transitoire (*overshoot* et oscillations) …

VENTILATION NATURELLE

Modèles et hypothèses

Un peu d'histoire …

Article pionnier pour le remplissage : Baines & Turner (1969)

« *Filling-box model* » basé sur les hypothèses suivantes :

- Panache pur (modèle Boussinesq)
- Fine couche à $t = 0$ à la température du panache à l'impact
- Pas d'*overturning* ($S^{1/2} > H$)
- Couche homogène à chaque instant
- Interface non perturbée par les écoulements entrants

Prise en compte de la vidange simultanée : Linden, Lane-Serff & Smeed (1990)

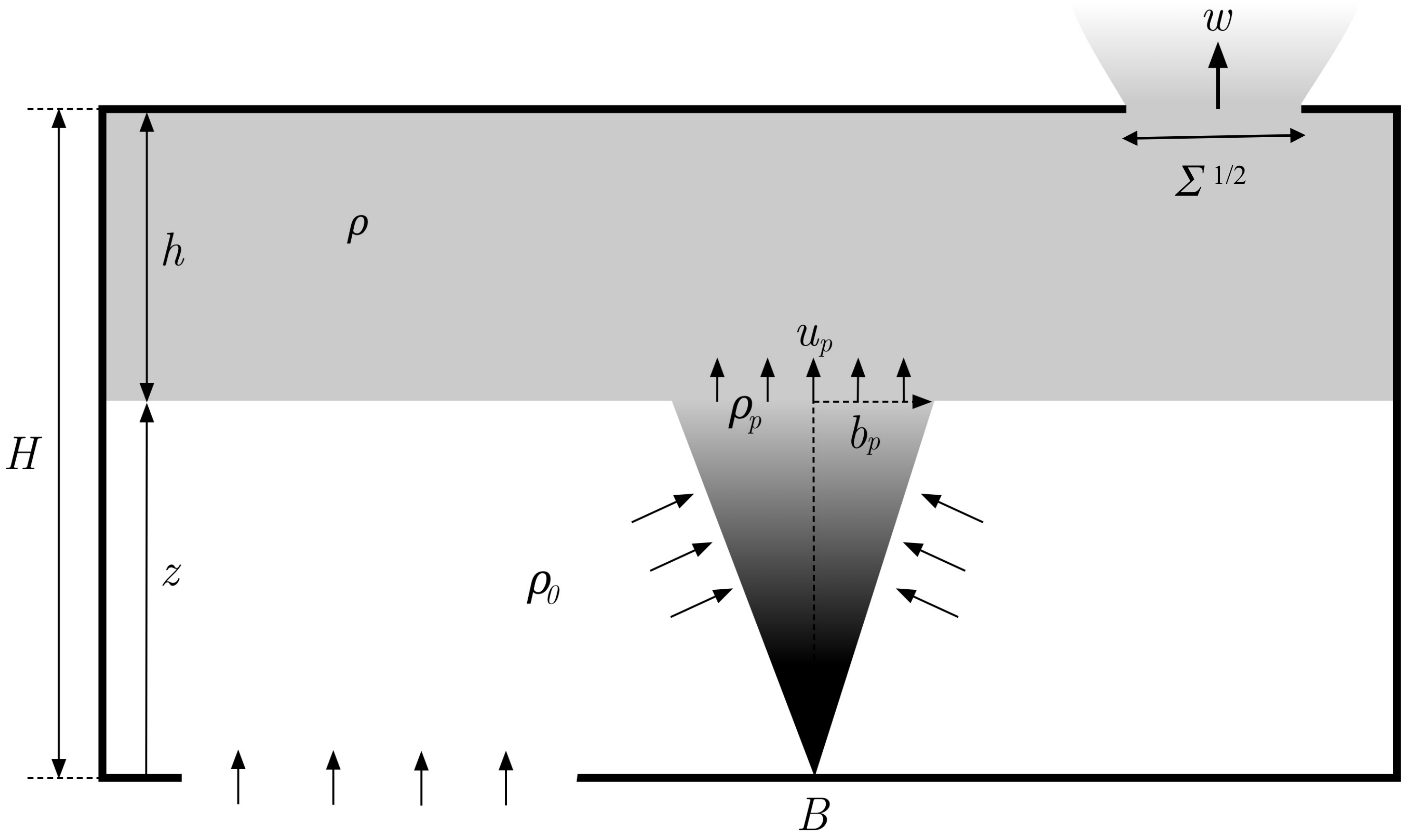
« *Filling-Emptying model* » basé sur les mêmes hypothèses et pour des écoulements monodirectionnels aux ouvertures (ventilation par déplacement)

Pour la problématique incendie

$\Rightarrow$ Généralisation de ces modèles au cas non-Boussinesq

VENTILATION NATURELLE

Configuration étudiée



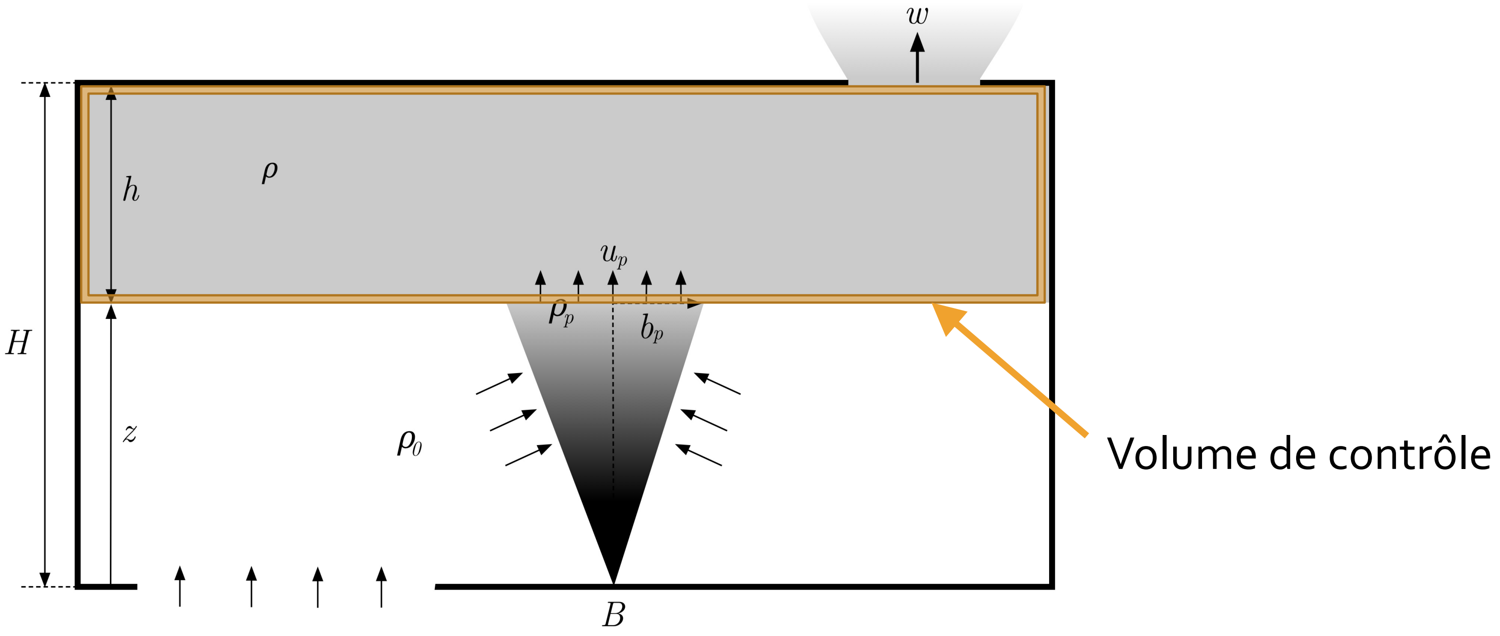
$$B(m^4 s^{-3}) = \frac{\Delta\rho}{\rho_0} g q$$

$$\dot{Q}(W) = \rho C_p q \Delta T$$

$$\left[B = \frac{g}{\rho_0 T_0 C_p} \dot{Q} \right]$$

VENTILATION NATURELLE

Mise en équations



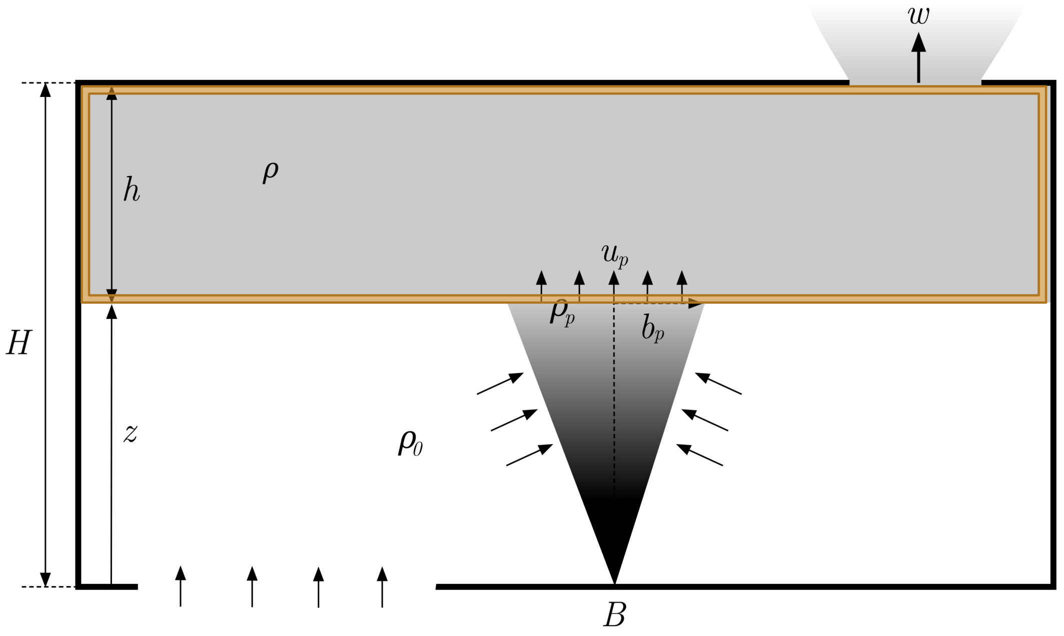
$$\frac{d\rho S h}{dt} = \rho_p \pi b_p^2 u_p\big|_{z=H-h} - \rho w \Sigma$$

$$\frac{d}{dt}\left[g\frac{\Delta\rho}{\rho_0}Sh\right] = B - g\frac{\Delta\rho}{\rho_0}w\Sigma$$

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

VENTILATION NATURELLE

Modèle de panache



$$\frac{d\rho S h}{dt} = \rho_p \pi b_p^2 u_p\Big|_{z=H-h} - \rho w \Sigma$$

$$\frac{d}{dt}\left[g\frac{\Delta\rho}{\rho_0}Sh\right] = B - g\frac{\Delta\rho}{\rho_0}w\Sigma$$

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

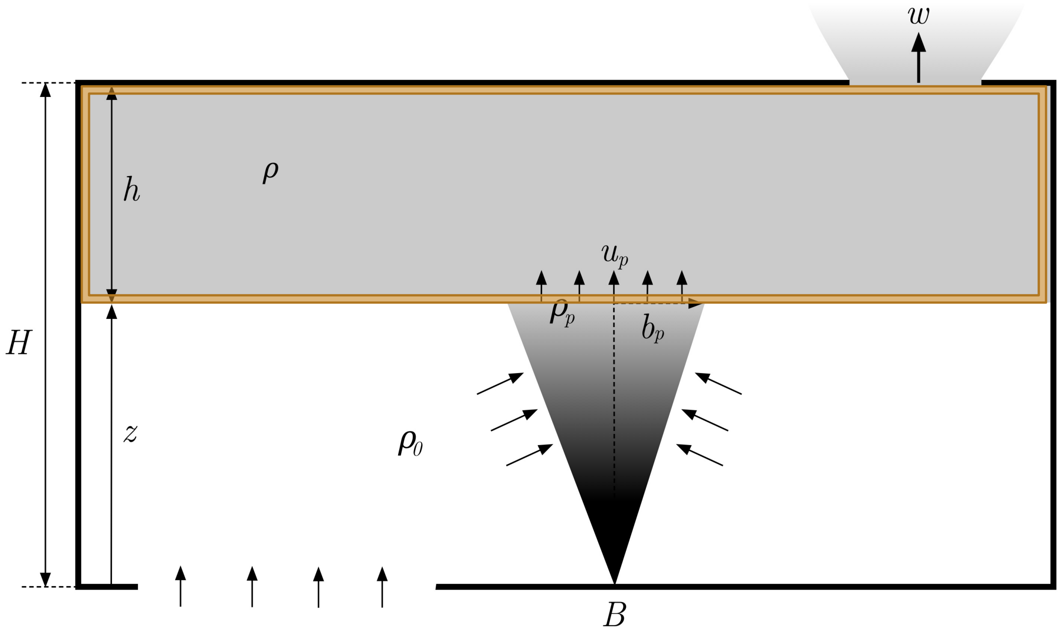
$$u_p(z) = A^{1/3}B^{1/3}z^{-1/3}$$

$$b_p(z) = \frac{6\alpha}{5}z\left[\frac{\rho_0}{\rho_p(z)}\right]^{1/2} = \frac{6\alpha}{5}z\sqrt{1+\eta_p(z)}$$

$$\eta_p(z) = \frac{\rho_0 - \rho_p(z)}{\rho_p(z)} = \frac{4}{3g}A^{2/3}B^{2/3}z^{-5/3}$$

VENTILATION NATURELLE

Adimensionnement



$$\frac{d\zeta}{d\tau} = \Lambda\,\omega - \kappa\,\Theta^{1/2}(\zeta^{5/3} + \Theta)$$

$$\frac{d\eta}{d\tau} = \frac{1+\eta}{1-\zeta}\kappa\,\Theta^{1/2}(\Theta - \eta\zeta^{5/3})$$

$$\omega = \sqrt{\eta(1-\zeta)}$$

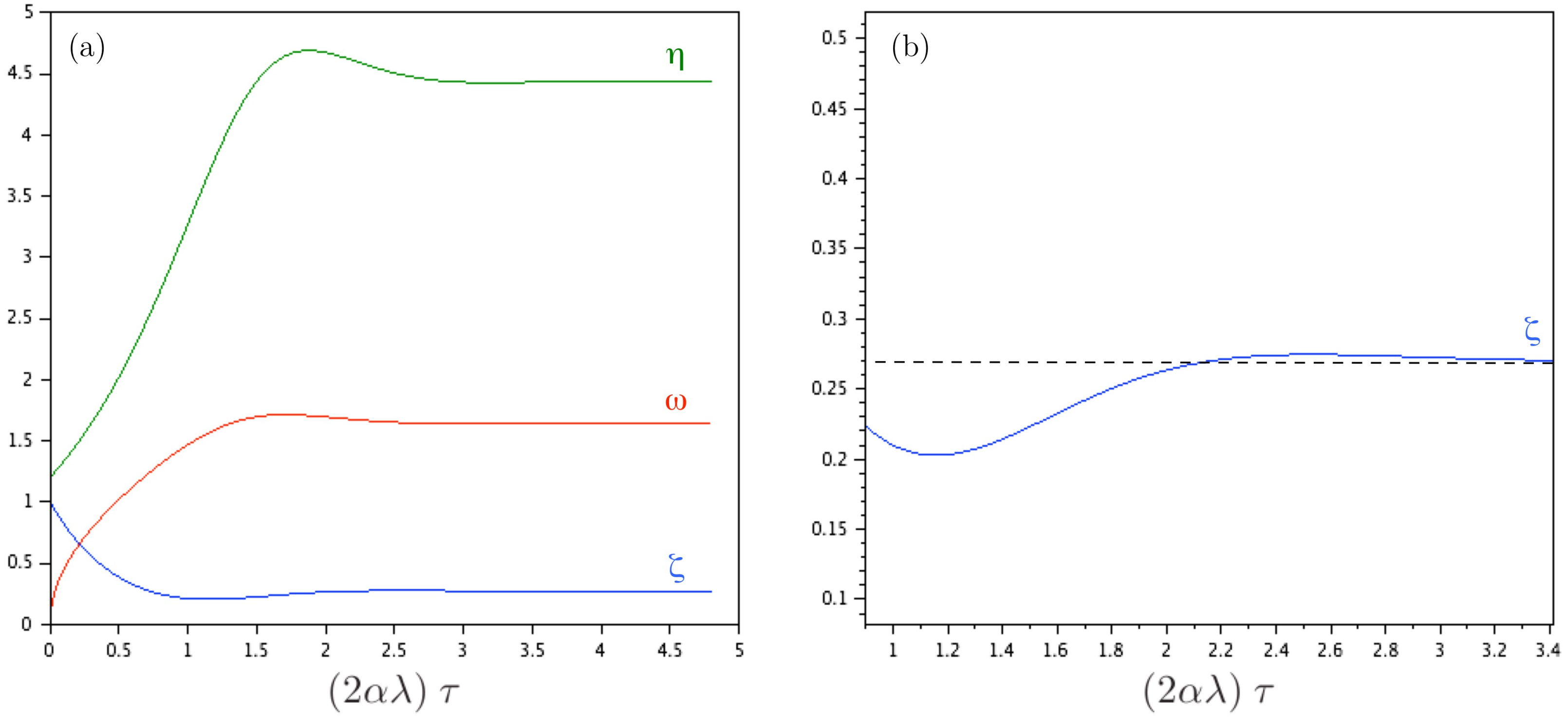
Variables sans dimension / Paramètres de contrôle

$$\zeta = \frac{z}{H} \qquad \eta = \frac{\Delta\rho}{\rho} \qquad \omega = \frac{w}{\sqrt{gH}}$$

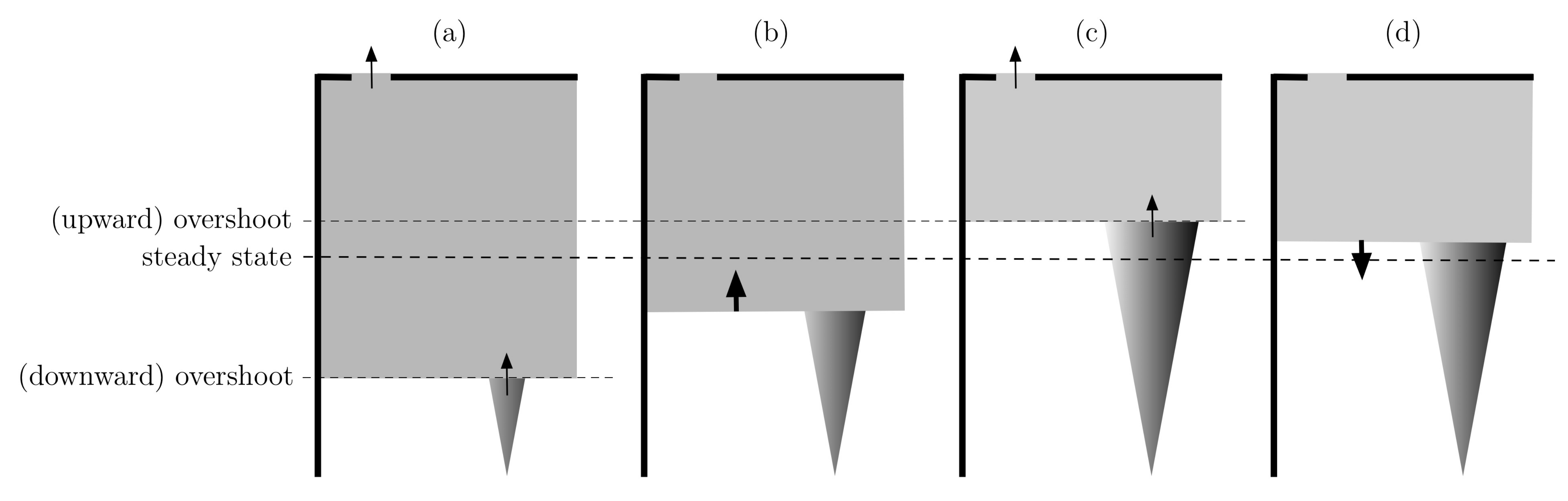
$$\Lambda = \frac{\Sigma}{H^2} \qquad \Theta = \frac{4A^{2/3}}{3g}\,\frac{B^{2/3}}{H^{5/3}}$$

VENTILATION NATURELLE

Résolution numérique



VENTILATION NATURELLE



VENTILATION NATURELLE

Linéarisation

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

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

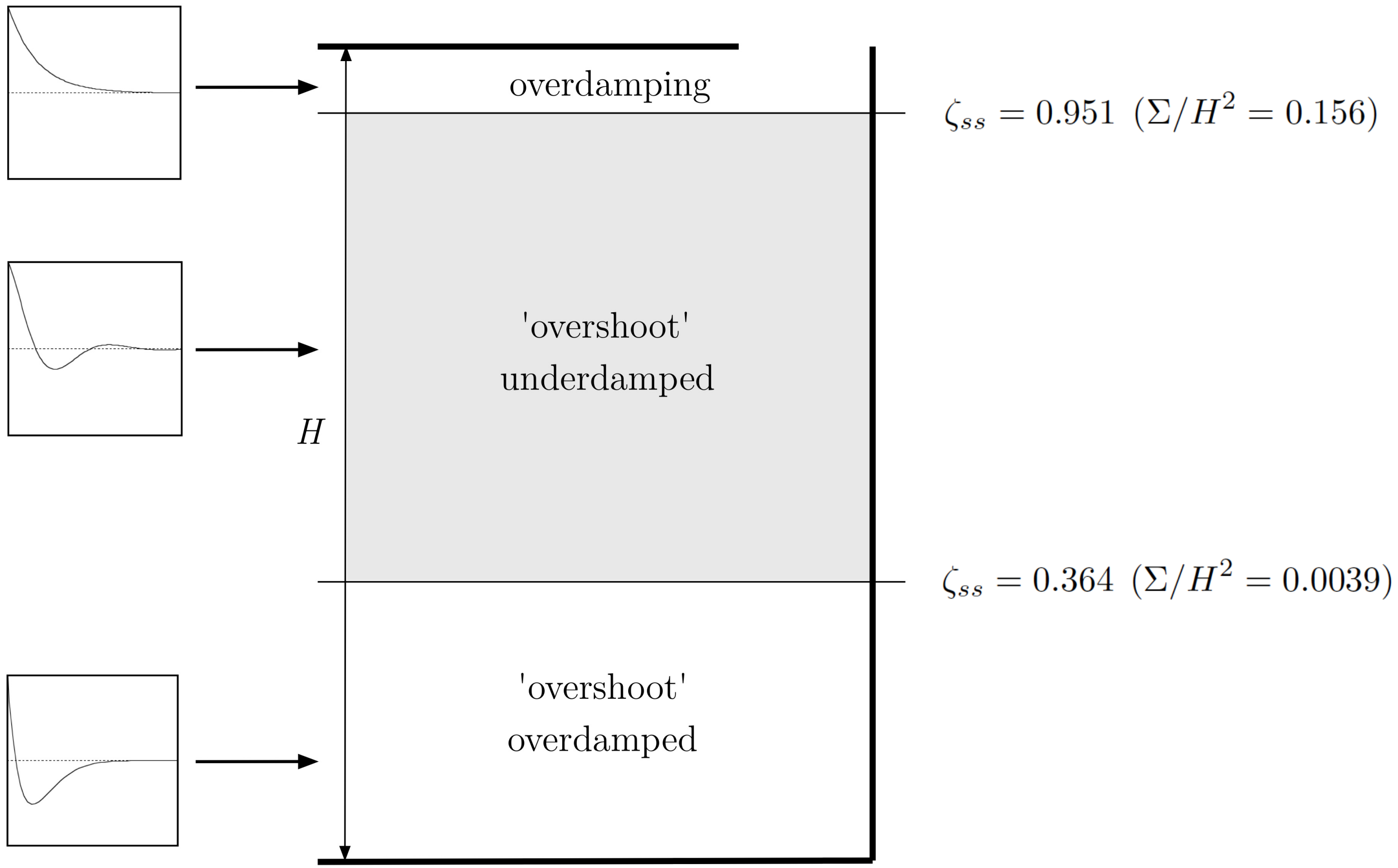
— A_1 et A_2 sont des fonctions de Λ, Θ et ζ_{ss}

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

— Dans le cas où $\Theta \approx 0$ (approximation de Boussinesq)

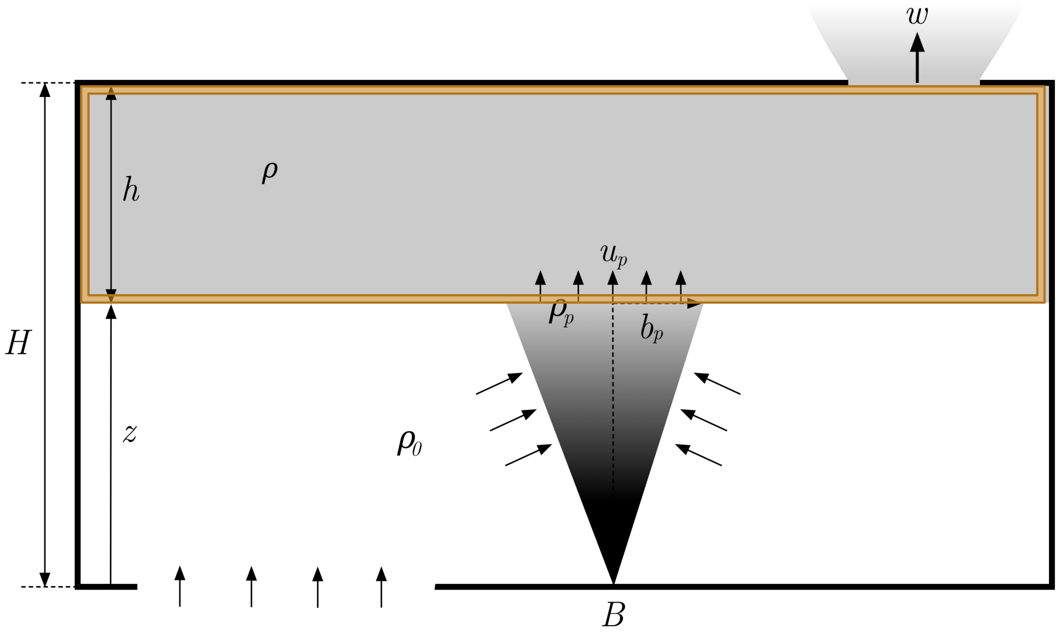
VENTILATION NATURELLE

Régimes



VENTILATION NATURELLE

Solution stationnaire



$$\cancel{\frac{d\zeta}{d\tau}} = \Lambda\,\omega - \kappa\,\Theta^{1/2}(\zeta^{5/3} + \Theta)$$

$$\cancel{\frac{d\eta}{d\tau}} = \frac{1+\eta}{1-\zeta}\kappa\,\Theta^{1/2}(\Theta - \eta\zeta^{5/3})$$

$$\omega = \sqrt{\eta(1-\zeta)}$$

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

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

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

VENTILATION NATURELLE

Formule du « petit feu »

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

retour aux grandeurs physiques dimensionnelles

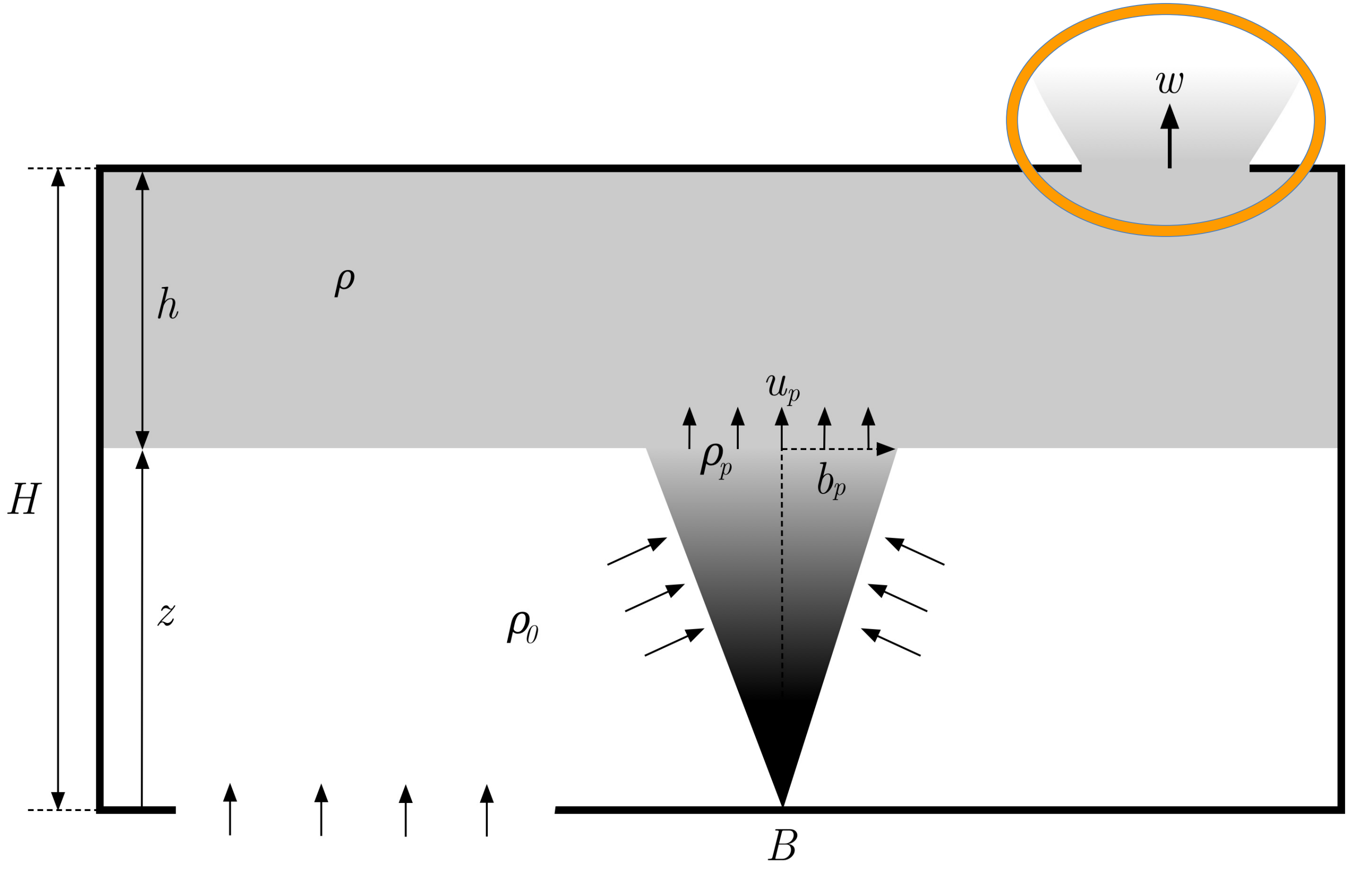
$$\downarrow$$

$$\Sigma(m^2) = 0{,}04\,\frac{z^{5/6}\left(z^{5/3}+8{,}1\,\dot{Q}_c^{2/3}\right)}{\sqrt{H-z}} \qquad (avec\ \dot{Q}_c\ en\ MW)$$

formule du « petit feu » de l'IT 246 (désenfumage naturel)

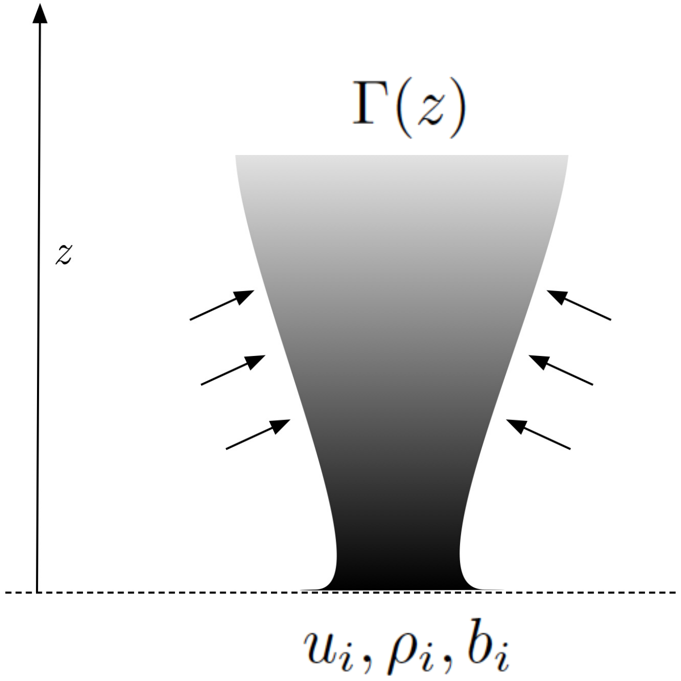
VENTILATION NATURELLE

Panache à l'exutoire



VENTILATION NATURELLE

Fonction panache



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

$\Gamma_i > 1$: panache paresseux

$\Gamma_i = 1$: panache pur

$\Gamma_i < 1$: panache forcé

VENTILATION NATURELLE

Fonction panache à l'exutoire

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

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

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

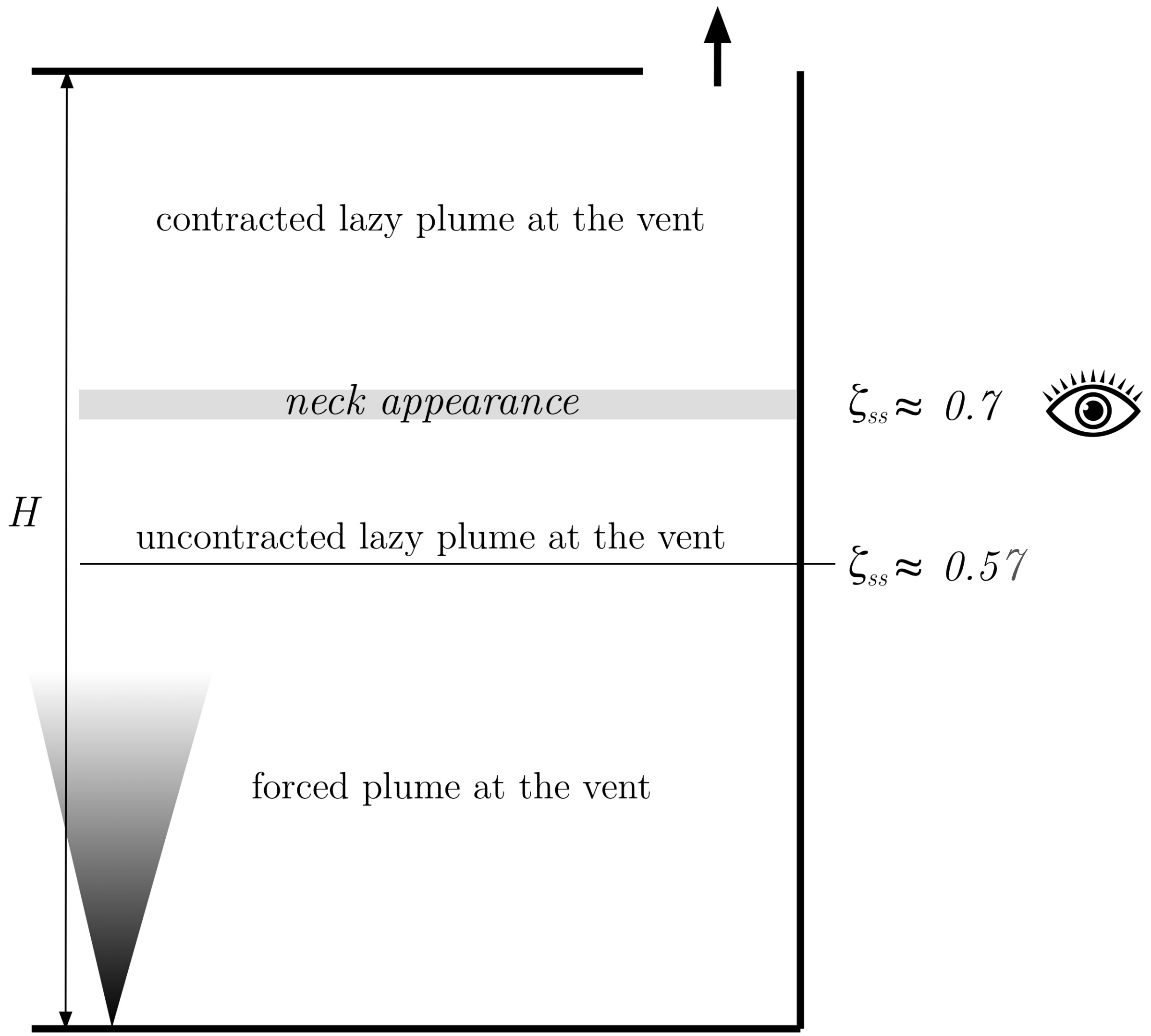
$$\omega_{ss} = \frac{\kappa\Theta^{1/2}}{\Lambda}(\zeta_{ss}^{5/3}+\Theta)$$

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

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

VENTILATION NATURELLE

Régimes à l'exutoire



VENTILATION NATURELLE

Bibliographie sélective

Baines W. D. & Turner J. S., Turbulent buoyant convection from a source in a confined region, *Journal of Fluid Mechanics*, 1969

Worster M. G. & Huppert H. E., Time-dependent profiles in a filling box, *Journal of Fluid Mechanics*, 1983

Quintiere J. G., Fundamentals of enclosure fire « zone » models, *Journal of Fire Protection Engineering*, 1989

Linden P. F., Lane-Serff G. F. & Smeed D., Emptying filling boxes, the fluid mechanics of natural ventilation, *Journal of Fluid Mechanics*, 1990

Rooney G. G. & Linden P. F., Strongly buoyant plume similarity and small-fire ventilation, *Fire Safety J.*, 1997

Kaye N. B. & Hunt G. R., Time-dependent flows in an emptying filling box, *Journal of Fluid Mechanics*, 2004

Hunt G. R & Coffey C. J., Emptying boxes – classifying transient natural ventilation flows, *Journal of Fluid Mechanics*, 2010

Lane-Serff G. F. & Sandbach S. D., Emptying non-adiabatic filling box: the effects of heat transfers on the fluid dynamics of natural ventilation, *Journal of Fluid Mechanics*, 2012

Vauquelin O., Oscillatory behaviour in an emptying-filling box, *Journal of Fluid Mechanics*, 2015

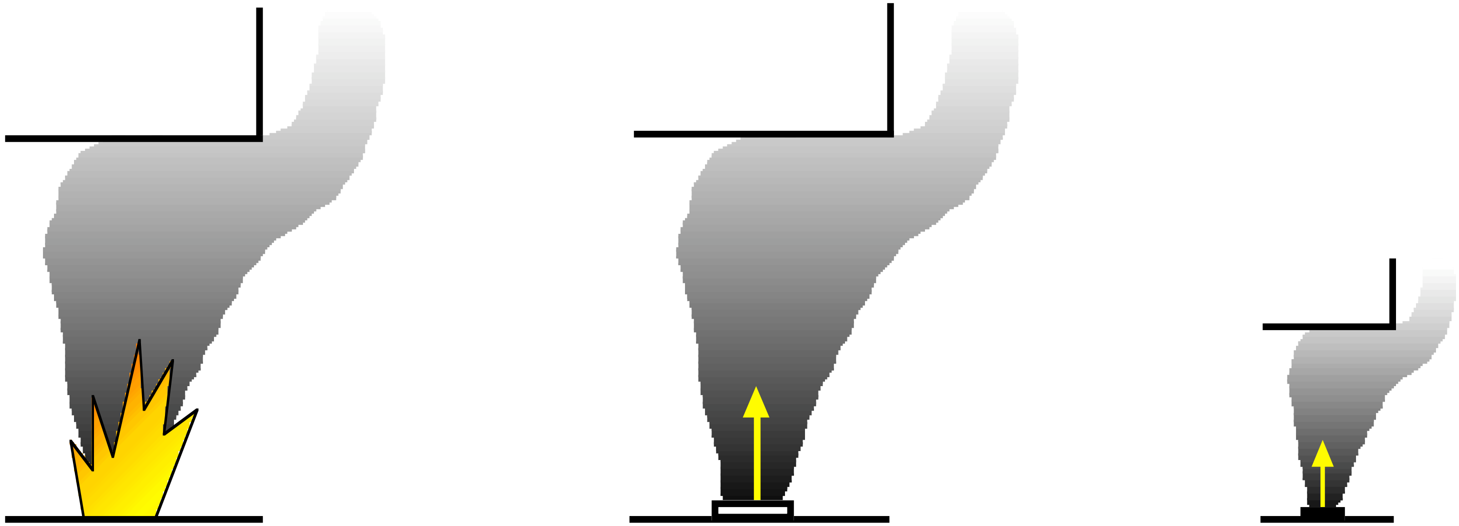
Vauquelin O., Koutaiba E. M., Blanchard E. & Fromy P., The discharge plume paramater and its implications for an emptying-filling box, *Journal of Fluid Mechanics*, 2017

SIMILITUDES

SIMILITUDES

Objectif

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

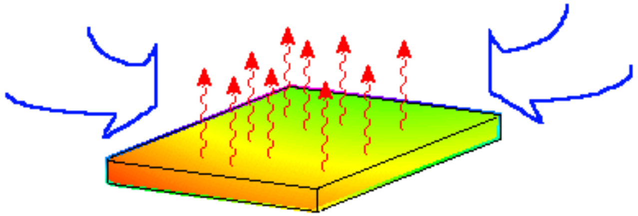


panache thermique >>>>>>>>>>>>>>>> jet de faible densité >>>>>>>>>>>>> réduction d'échelle

SIMILITUDES

Convection naturelle

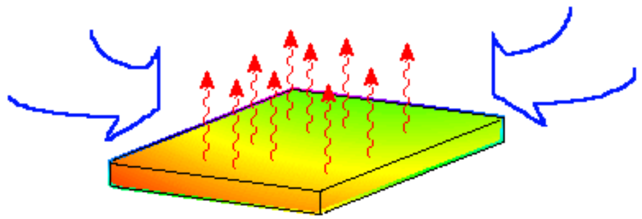
Pour simuler un panache d'incendie de ***1 MW*** (convectée) issu d'un bac de surface *S* (~ ***1** m^2*), calculer l'ordre de grandeur de la température qu'il faudrait imposer sur une plaque de même surface pour générer un panache de convection naturelle de même puissance



SIMILITUDES

Convection naturelle

Pour simuler un panache d'incendie de ***1 MW*** (convectée) issu d'un bac de surface *S* (~ ***1 m²***), calculer l'ordre de grandeur de la température qu'il faudrait imposer sur une plaque de même surface pour générer un panache de convection naturelle de même puissance



$$\dot{Q}_c = h\left(T_p - T_0\right)S$$

$$\text{convection libre} : h = 10 - 50$$

$$\Rightarrow T_p - T_0 > 20\,000$$

SIMILITUDES

Injection d'air chaud

Calculer la valeur du débit volumique d'air chaud à *100°C* qu'il serait nécessaire d'injecter pour simuler une puissance convective de *1 MW* sur une surface *S* (~ *1 m²*)

SIMILITUDES

Injection d'air chaud

Calculer la valeur du débit volumique d'air chaud à *100°C* qu'il serait nécessaire d'injecter pour simuler une puissance convective de *1 MW* sur une surface *S* (~ *1 m²*)

$$q_f = \frac{\dot{Q}_c}{\rho_0 C_p T_0 \frac{\Delta T}{T}} \sim 13\, m^3/s$$

$$(4\, m^3/s \;\; imposerait \;\; T = 970°C)$$

SIMILITUDES

Injection d'un gaz léger

Calculer le débit volumique d'hélium (ρ = *0.17 kg/m³*) à température ambiante qu'il serait nécessaire d'injecter pour "simuler" une puissance convective de ***1 MW*** (~ ***1 m²***)

SIMILITUDES

Injection d'un gaz léger

Calculer le débit volumique d'hélium (ρ = *0.17 kg/m³*) à température ambiante qu'il serait nécessaire d'injecter pour "simuler" une puissance convective de *1 MW* (~ *1 m²*)

$$B = \frac{\rho_0 - \rho_{hél}}{\rho_0}\, g\, q_{hél}$$

$$B = \frac{g\,\dot{Q}_c}{\rho_0\, C_p\, T_0}$$

$$\Rightarrow q_{hél} = 3{,}3\, m^3/s$$

100 € le m³

SIMILITUDES

Réduction d'échelle

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

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

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

$$\frac{d}{dz}\left(\Delta\rho u d^2\right) = 0 \qquad (3)$$

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.

SIMILITUDES

Adimensionnement

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

— $$\frac{d}{dz}\left[\left(\frac{\rho_0}{\rho_0}\right)^j u^2 d^2\right] = \frac{d}{dz}\left(u^2 d^2\right)$$

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

On introduit les variables sans dimensions :

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

SIMILITUDES

Nombres sans dimension

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

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 :

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

SIMILITUDES

Règles de 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	$B_m = a^{5/2}\ B_r$

SIMILITUDES

Bibliographie sélective

Quintiere J. G., Scaling applications in fire research, *Fire Safety Journal*, 1989

Thomas P. H., Dimensional analysis: a magic art in fire research ?, *Fire Safety Journal*, 2000

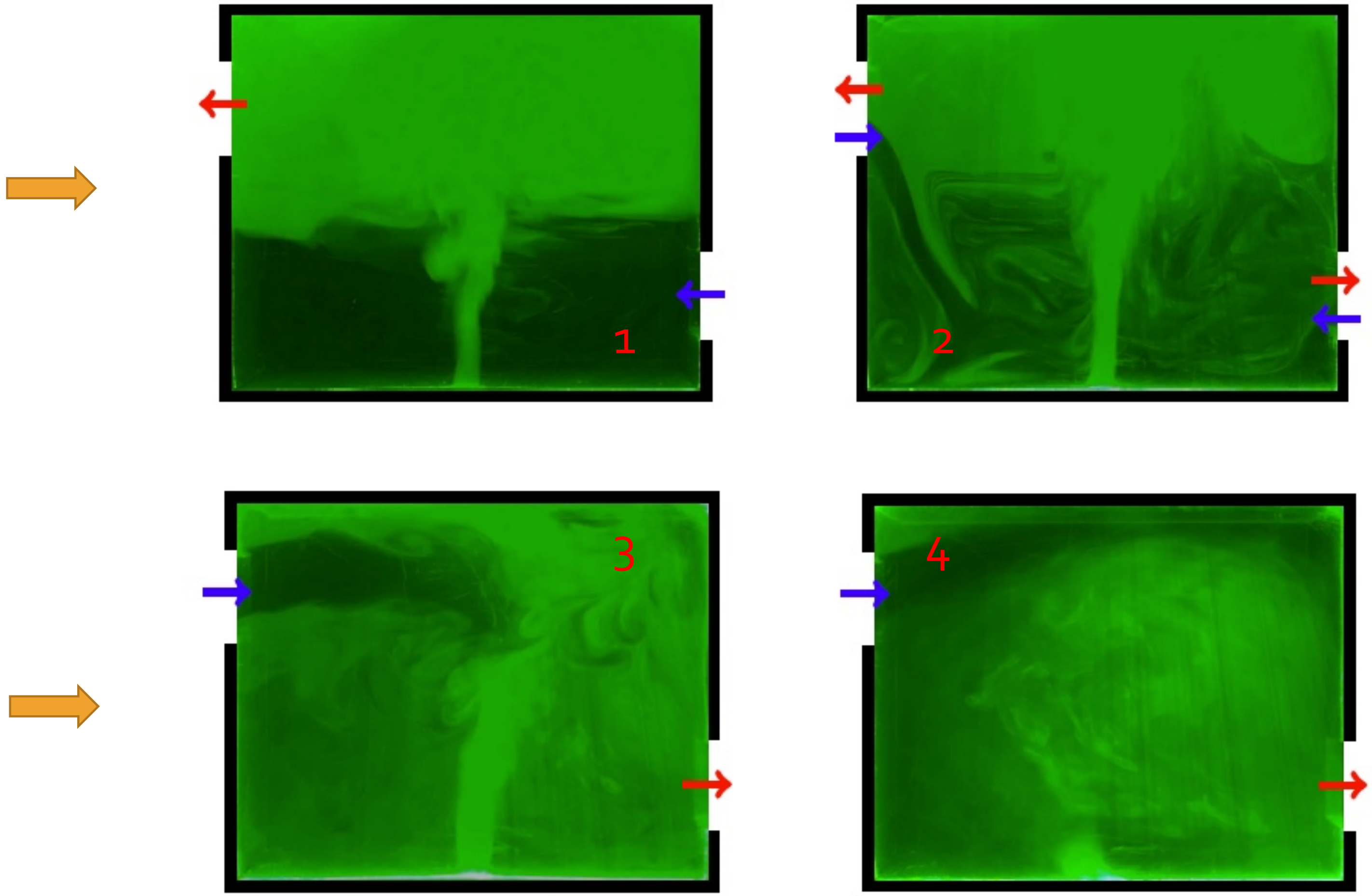
Yao X. & Marshall A. W., Quantitative salt-water modeling of fire-induced flow, *Fire Safety Journal*, 2006

Vauquelin O., Michaux G. & Lucchesi C., Scaling laws for a buoyant release used to simulate fire-induced smoke in laboratory experiments, *Fire Safety Journal*, 2009

AUTRES PROBLEMES

AUTRES PROBLEMES

Effets du vent



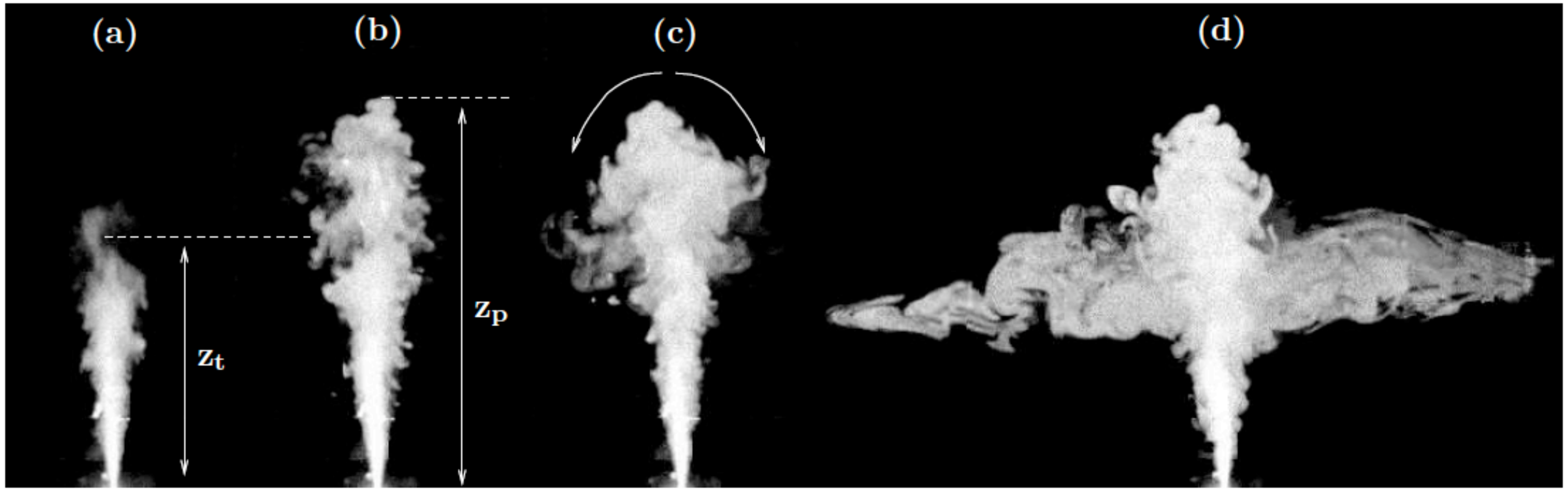
Expérience réalisée à l'IUSTI (Marseille) dans une soufflerie avec une source « air-hélium »

AUTRES PROBLEMES

Stratification thermique

Développement des panaches en milieu stratifié

problématique des géophysiciens mais aussi des « aérauliciens de l'incendie »



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

AUTRES PROBLEMES

— Stabilité d'une couche de fumées et quantification de la stratification

— Interaction sprinklage – couche de fumées

— Couplage combustion-ventilation dans les enceintes

— Impact des fumées (visibilité sur l'évacuation)

— etc …

Aéraulique des fumées

Rabah Mehaddi – LEMTA, Université de Lorraine

Olivier Vauquelin – IUSTI, Aix-Marseille Université