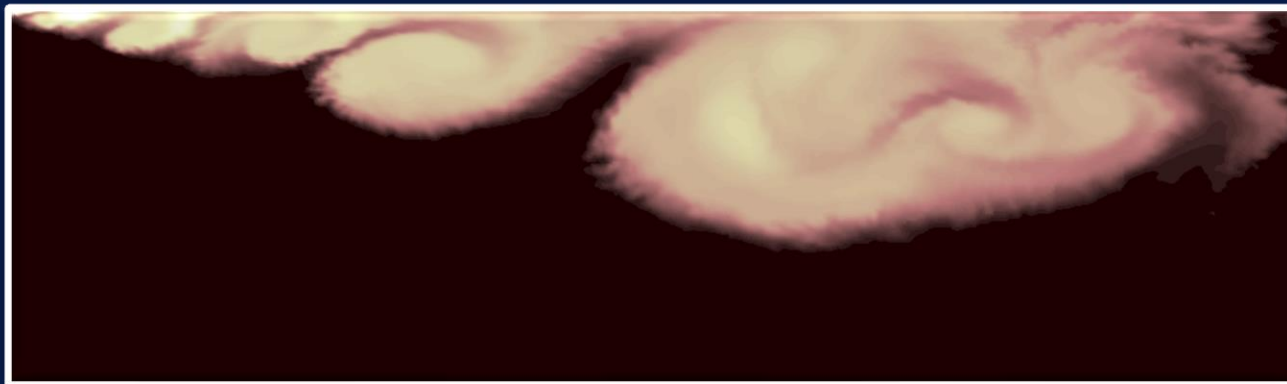


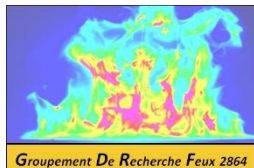
MODÉLISATION THÉORIQUE D'UNE NAPPE DE FUMÉE S'ÉCOULANT DANS UN CORRIDOR



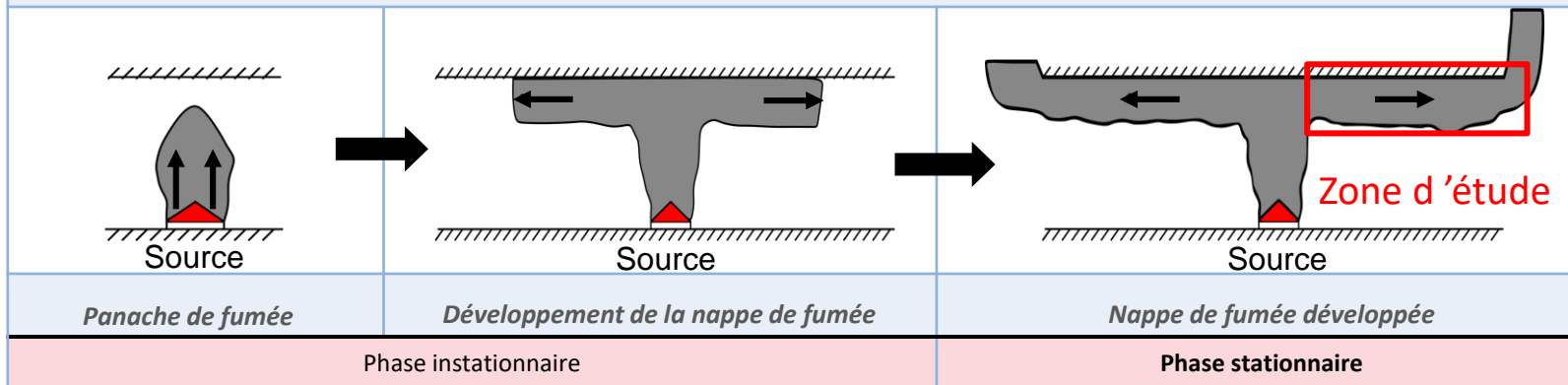
Safir Haddad^a - Samuel Vaux^a - Kevin Varrall^b - Olivier Vauquelin^b

a. Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), PSN-RES, SA2I, LIE, Cadarache, 13115 Saint-Paul-lez-Durance, France

b. Aix-Marseille Université (AMU), Laboratoire IUSTI, CNRS UMR 7343, 5 Rue Enrico Fermi, 13453 Marseille Cedex, France



➤ **Contrôle du risque incendie => Contrôle de la propagation de la fumée**



Evolution de la nappe de fumée au cours de l'incendie

➤ **Caractérisation du comportement de la nappe de fumée**
(Delichatsios, CF (1981))



Developement de la nappe de la fumée

Nappe de fumée stationnaire

Modélisation théorique de la nappe de fumée.

3 variables primaires : vitesse U , hauteur h et température T

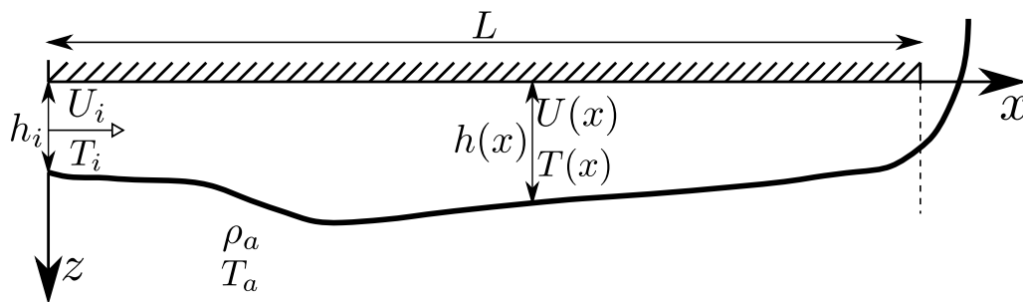


Schéma de la nappe de fumée

➤ Loi des gaz parfait: $\rho_a T_a = \rho T$

➤ Nombre caractéristique : $Ri = \frac{\text{Flottabilité}}{\text{Inertie}}$

➤ 3 états possibles

▪ $Ri > 1$: Etat sous-critique

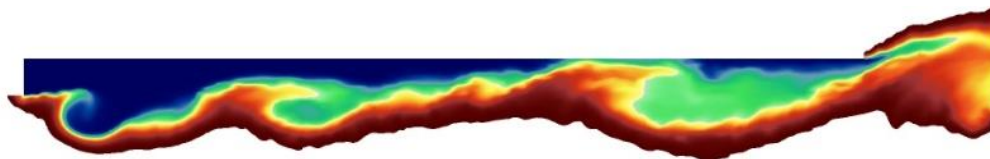
▪ $Ri < 1$: Etat supercritique

▪ $Ri = 1$: Etat critique

(Ellison and Turner, JFM (1959))

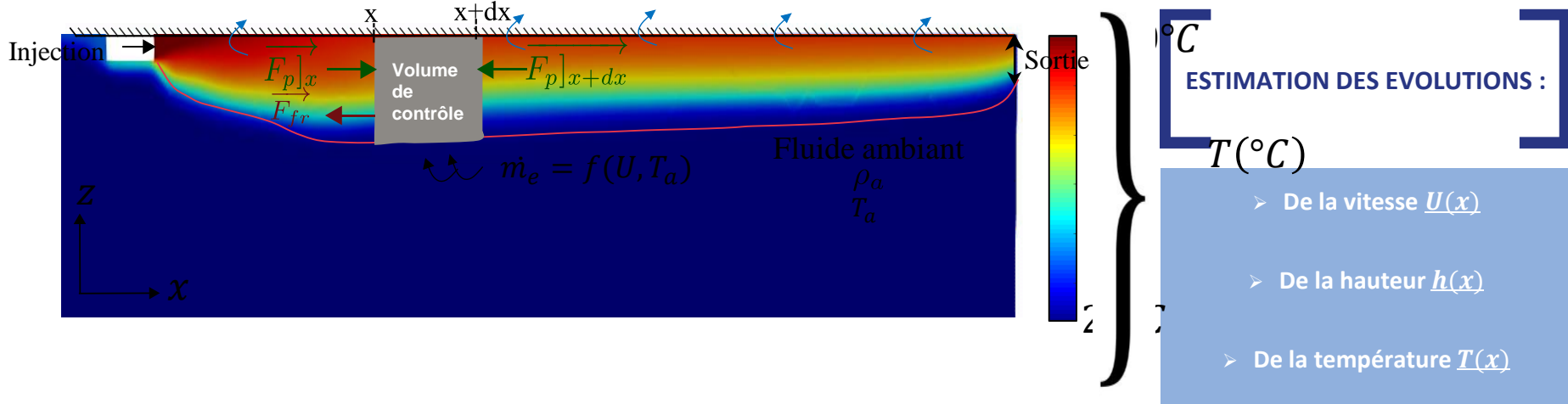
(Alpert, FSJ (1975))

Comparaisons avec des simulations de référence (CFD : CALIF³S – Isis)



Nappe de fumée stationnaire

Nappe de fumée modélisée:



Injection de fumée dans le volume de contrôle, forces de pression et frottement

- ESTIMATION DES EVOLUTIONS :
- De la vitesse $\underline{U}(x)$
 - De la hauteur $\underline{h}(x)$
 - De la température $\underline{T}(x)$

Modèle théorique : équations de conservation

Equations de conservation:

- Conservation de la **masse**

$$\frac{d(\rho U h)}{dx} = E U \rho_a$$

- Conservation de la **quantité de mouvement**

$$\frac{d(\rho U^2 h)}{dx} = -\frac{1}{2} \frac{d}{dx} (\Delta \rho g h^2) - C_d \rho U^2$$

- Conservation de la **puissance convective**

$$\frac{d(\dot{m} C_p \Delta T)}{dx} = 0$$

- Nombre de Richardson

$$Ri = \frac{\Delta T g h}{T_a U^2}$$

Avec E = Coefficient d'entraînement = $f(Ri)$, C_d = Coefficient de frottement

Modèle théorique : équations de conservation

■ Système d'équations différentielles couplées :

$$\frac{dU}{dx} = -\frac{U - \left(\frac{\rho_a}{\rho} + \frac{1}{2}R_i\right)E - C_d}{h(1 - R_i)}$$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{\left(1 + \frac{\rho_a}{\rho} - \frac{1}{2}R_i\right)E + C_d}{h(1 - R_i)}$$

$$\frac{d\rho}{dx} = \frac{\Delta\rho E}{h}$$

$$\frac{dR_i}{dx} = \frac{R_i \left(1 + 2\frac{\rho_a}{\rho}\right) \left(1 + \frac{R_i}{2}\right)E + 3C_d}{h(1 - R_i)}$$

Discontinuité lorsque $R_i = 1$ (Haddad et al., PRF (2022), Guo et al., FSJ (2020))

2 Méthodes:

⇒ **Richardson constant**
(Guo et al., FSJ (2020))

- Reprise des équations de **conservation** en fixant **$Ri = 1$** .

- $U(x) = \text{constante}$

- $h(x) \propto x$

- $T(x) \propto \frac{1}{x}$

- **Non-conservation des flux.**

⇒ **Ressaut hydraulique**
(Haddad et al., PRF (2022))

- **Changement de comportement** de l'écoulement.

- Conservation des flux à travers le saut.

- Discontinuité mathématique.

- **Conservation des flux.**

Modèle théorique : ressaut hydraulique

$$\frac{dRi}{dx} > 0 \Rightarrow Ri \nearrow \Rightarrow \text{Discontinuité}$$

⇒ **Ressaut hydraulique**

(Haddad et al., 2022 [4])

- Hauteur ↗↗ | | Vitesse ↘↘
- Changement de comportement
 - $Ri < 1 \rightarrow Ri > 1$

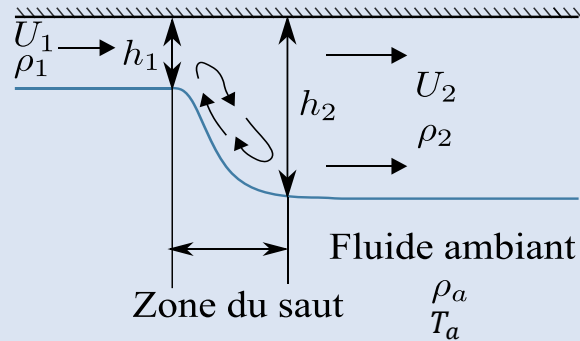


Schéma du ressaut hydraulique

$$\left(\frac{h_2}{h_1}\right) = \frac{\sqrt{1 + \frac{8}{Ri_1}} - 1}{2}$$

$$\frac{Ri_2}{Ri_1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^3$$

$$\Delta\rho_2 = \Delta\rho_1$$

Equations de Bélanger

Modèle théorique : paramètres du modèle et matrice d'essai

Paramètres du modèle

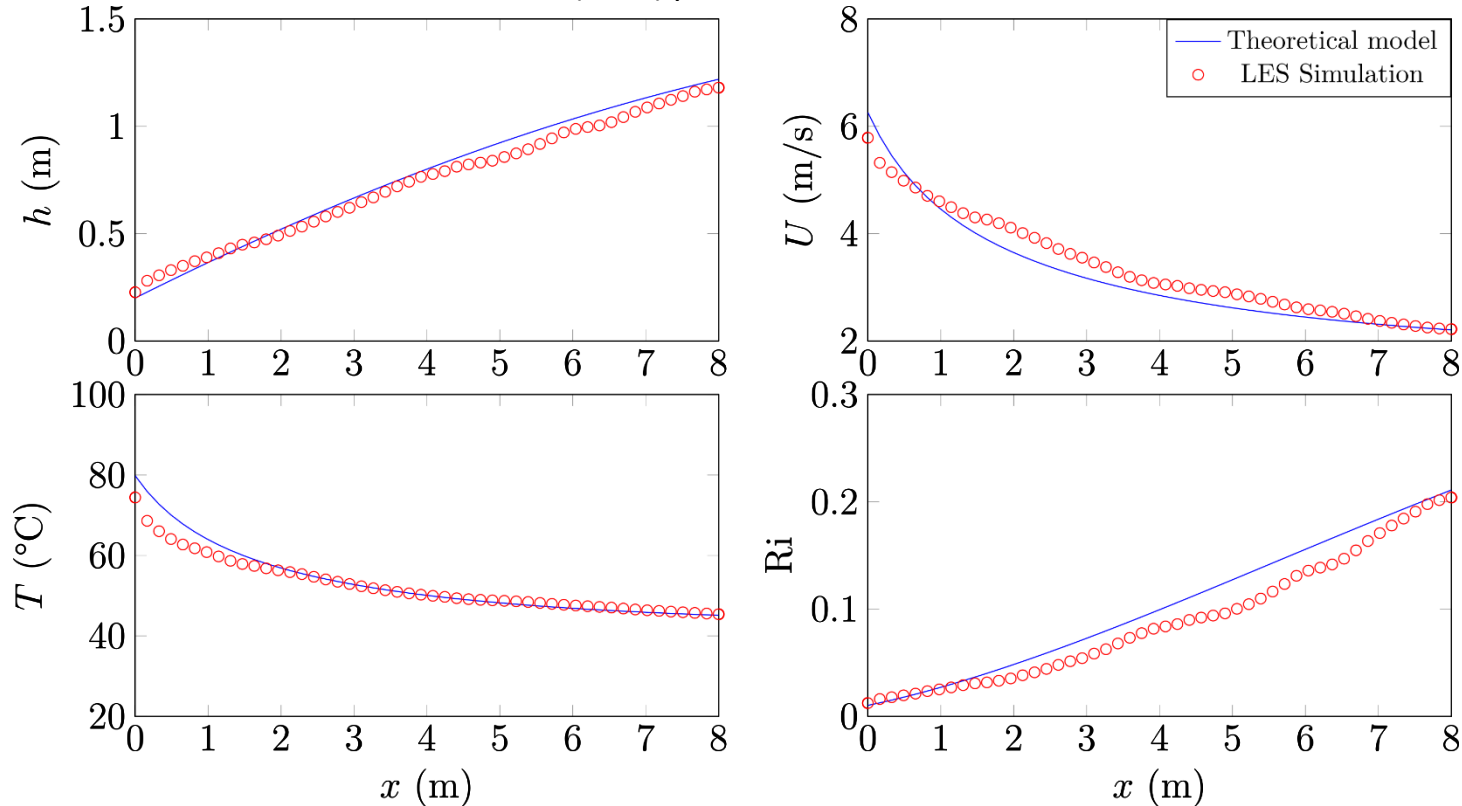
Loi d'entraînement	Coefficient de frottement
$E = \frac{5.5 \times 10^{-3}}{3.6 Ri - 1 \sqrt{(3.6 Ri - 1)^2 + 0.15}}$ <p>(van Kessel and Kranenburg, JHE (1996))</p>	$C_d = 0.0065$ <p>(Kunsch, ATM ENV (1998), Chow et al., FSJ (2015))</p>

Paramètres des simulations

Cas n°	U_i (m/s)	h_i (m)	T_i (°C)	Ri	Re
1 ➤ Test du modèle	6.3	0.2	80	0.01	65 895
2 ➤ Transition rapide	8.0	0.4	310	0.06	102 900
3 ➤ Transition longue	13	0.4	310	0.02	167 200

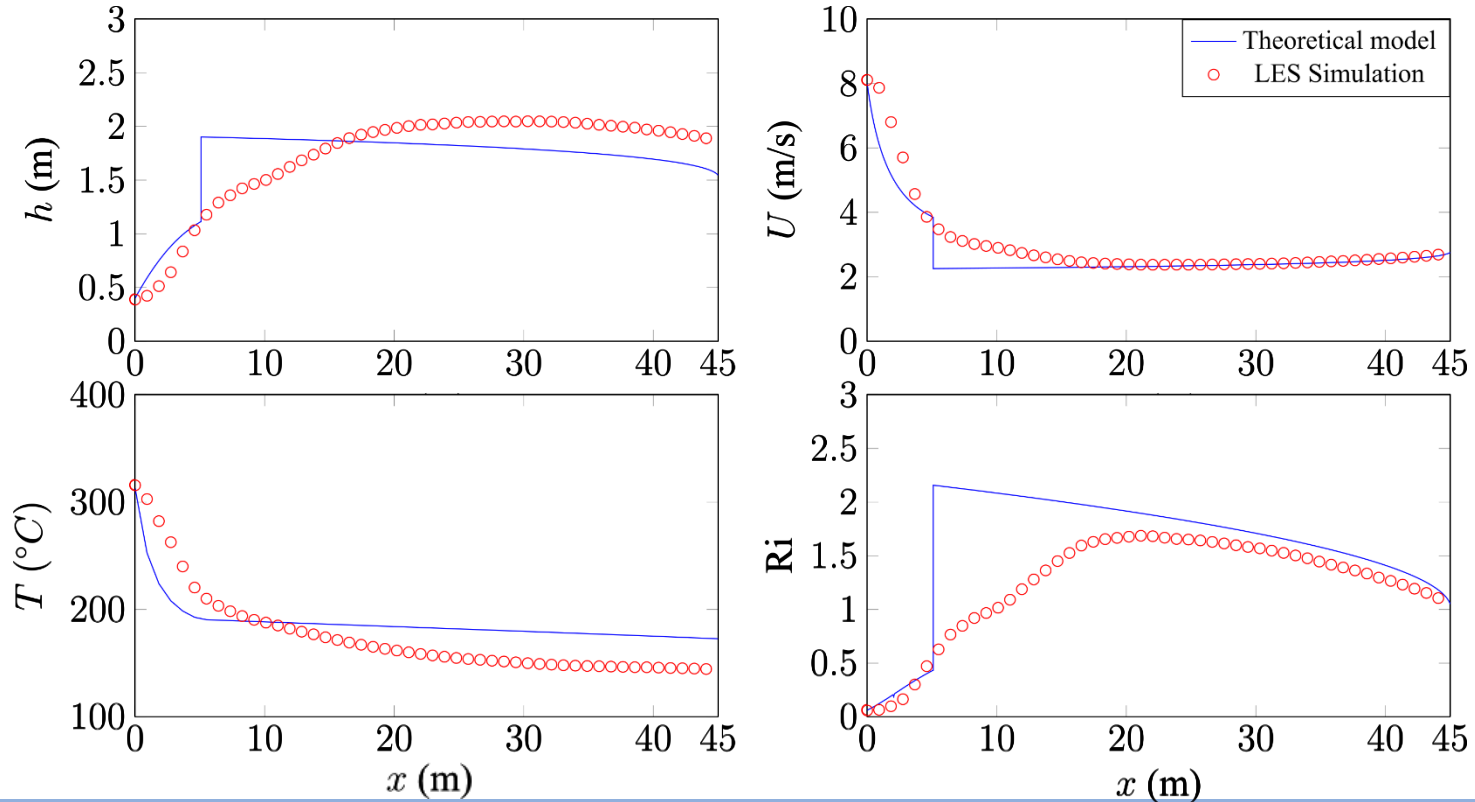
Comparaisons entre le modèle et les simulations

Simulation LES avec *CALIF³S* – Isis (IRSN) pour le cas 1



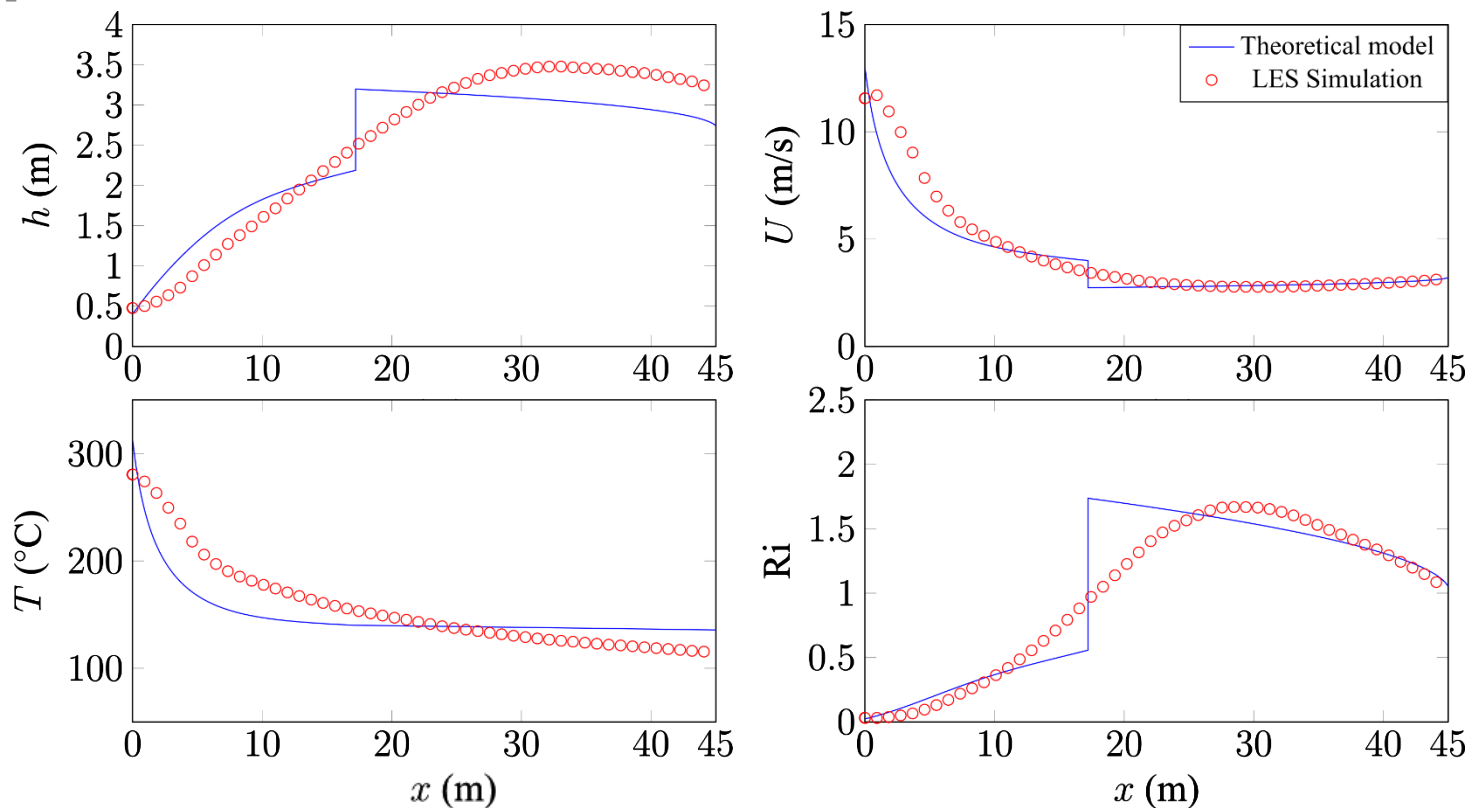
Comparaisons entre le modèle et les simulations

Simulation LES avec CALIF³S – Isis (IRSN) pour le cas 2



Comparaisons entre le modèle et les simulations

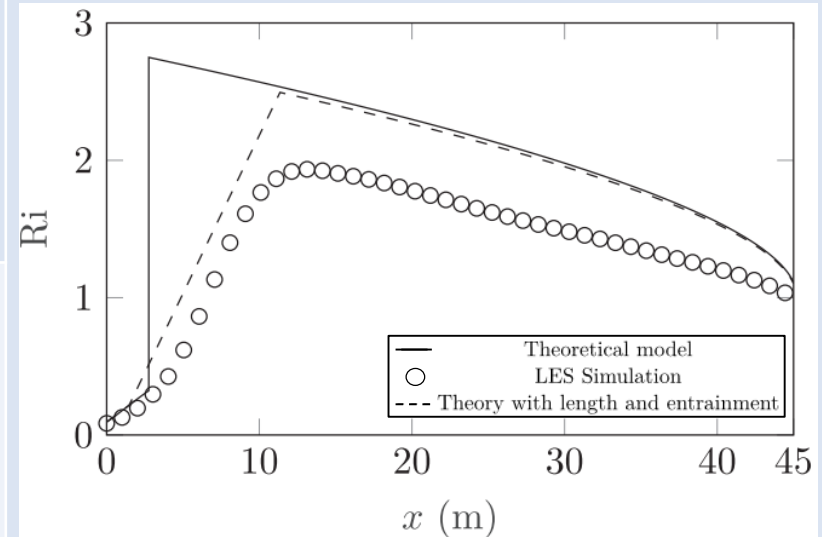
■ Simulation LES avec *CALIF³S* – Isis (IRSN) pour le cas 3



Ressaut hydraulique

- Longueur de ressaut **finie**.
(Hager et al., JHR (1991))

- **Entraînement** local dans le saut.
(Wilkinson and Wood, JFM (1971))



Modèle théorique : échange de chaleur

Equation d'énergie en incluant les **effets thermiques**:

$$\frac{d(\dot{m}C_p\Delta T)}{dx} = -\sigma\Delta T \quad (\text{Avec } \sigma \text{ le coefficient de transfert convectif (} W/m^2K \text{)})$$
$$\Rightarrow \frac{d(\Delta\rho Uh)}{dx} = -\frac{\sigma}{C_p} \frac{\Delta\rho}{\rho}$$

Les équations deviennent:

$$\frac{dU}{dx} = \frac{U - \left(\frac{\rho_a}{\rho} + \frac{1}{2}R_i\right)E - \left(-R_i \frac{\rho_a}{\rho} + \frac{1}{2}R_i\right)S_t - C_f}{h(1 - R_i)}$$

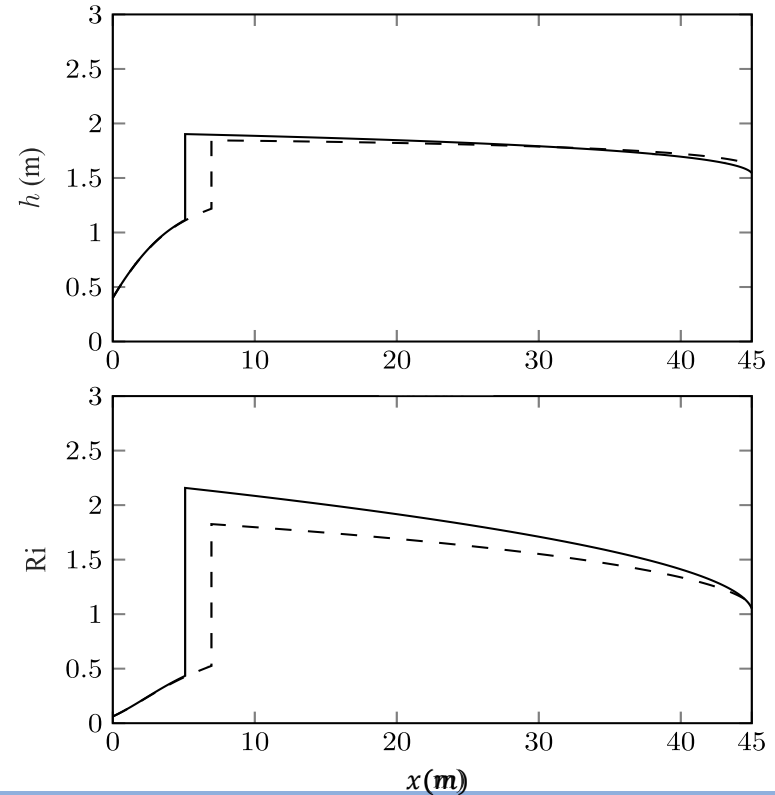
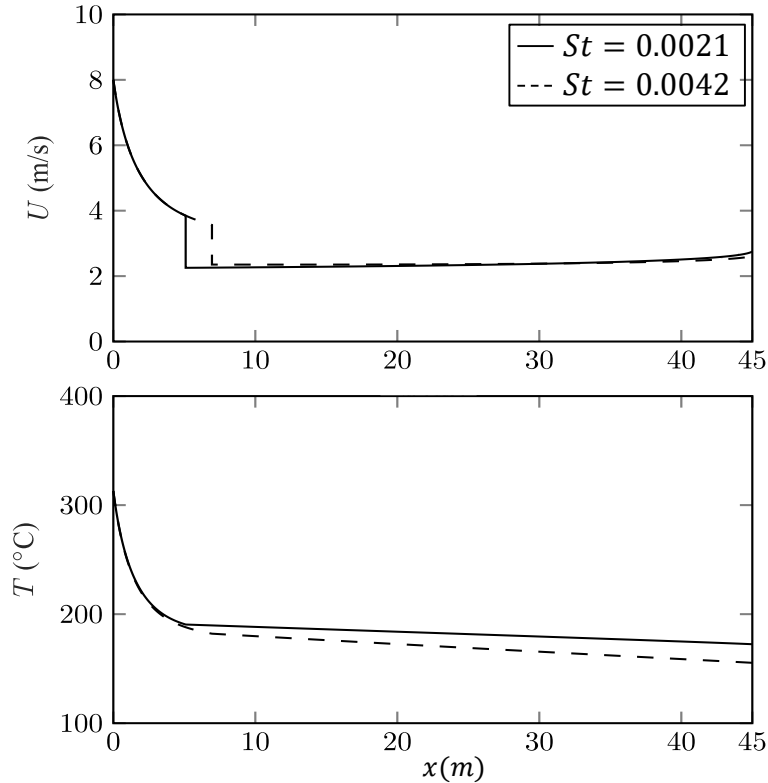
$$\frac{dh}{dx} = \frac{\left(1 + \frac{\rho_a}{\rho} - \frac{1}{2}R_i\right)E + \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho} - \frac{1}{2}R_i\right)S_t + C_f}{(1 - R_i)}$$

$$\left(St = \frac{\sigma}{C_p U \rho_0} \right)$$

$$\frac{d\rho}{dx} = \frac{\Delta\rho(E + S_t)}{h}$$

Modèle théorique: augmentation de l'échange thermique

Modèle avec un nombre de St de **0.0021** et un nombre de St de **0.0042**



Modèle théorique : resolution analytique

■ Avec l'hypothèse Boussinesq ($\rho_a \approx \rho$), on a : $U = f(Ri)$, $h = f(Ri)$, $\rho = f(Ri)$

▪ Avec :

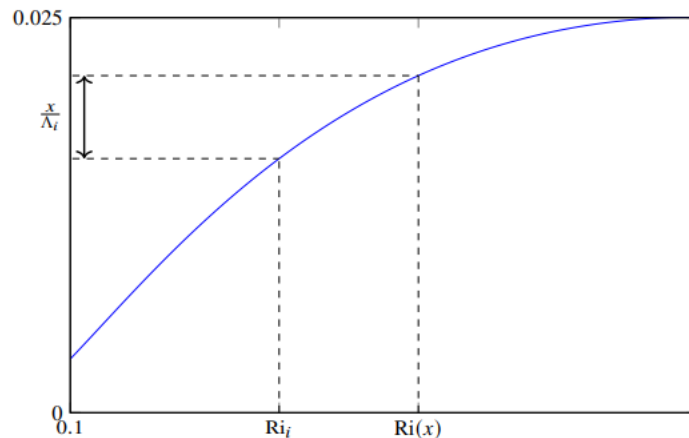
$$F(Y) = \int_0^{Ri(x)} \frac{(1 - Ri) Ri^{\frac{2}{3}}}{(2 + \kappa Ri)^{\frac{2+A}{3A}}}$$

Avec $\kappa = f(E, Cd)$

▪ On trouve :

$$F(Ri(x)) = \frac{x}{\Lambda_i} + F(Ri_i)$$

Avec $\Lambda_i = f(h_i, Ri_i)$

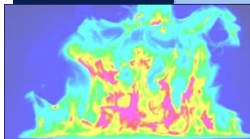


- Nous avons étudié la **modélisation théorique** d'une nappe de **fumée stationnaire**.
 - Nous avons ajouté un saut afin de passer d'un état **supercritique** à un état **sous-critique**.
- Nous avons réalisé 3 simulations LES de référence.
 - Pour une nappe supercritique **sans** transition.
 - Pour une nappe supercritique **avec** transition.
- Le modèle permet d'estimer fiablement les **évolutions** des variables **primaires** dans le cas **sans** transition.
- Le modèle peut **reproduire** le comportement **non-monotone** de l'écoulement dans les cas **avec** transition.
- Le modèle de **saut** peut être affiné afin d'augmenter la **représentativité** du modèle théorique.

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

References:

- M. A. Delichatsios. The Flow of Fire Gases Under a Beaming Ceiling. *Combust. Flames*, 43 :1-10, 1981.
- T. H. Ellison and J. S. Turner. Turbulent entrainment in stratified flows. *J. Fluid Mech.*, 6(3) : 423-448, 1959.
- R. L. Alpert. Turbulent ceiling-jet induced by large-scale fires. *Combust. Sci. Technol.*, 11(5-6) :197-213, 1975.
- S. Haddad, S. Vaux, K. Varrall, and O. Vauquelin. Theoretical model of continuous inertial gravity current including a jump condition. *Phys. Rev. Fluids*, 7.084802, 2022.
- Q. Guo, Y. Z. Li, H. Ingason, Z. Yan, and H. Zhu. Theoretical studies on buoyancy-driven ceiling jets of tunnel fires with natural ventilation. *Fire Saf. J.*, 2020.
- T. van Kessel et C. Kranenburg. Gravity Current of Fluid Mud on Sloping Bed. *J. Hydraul. Eng.*, 122(12) :710-717, 1996.
- S. Li, R. Zong, W. Zhao, Z. Yan, and G. Liao. Theoretical and experimental analysis of ceiling-jet flow in corridor fires. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, 26(6) :651-658, 2011.
- J. P. Kunsch. Critical velocity and range of a fire-gas plume in a ventilated tunnel. *Atmos. Environ.*, 33(1) :13-24, 1998.
- W. K. Chow, Y. Gao, J. H. Zhao, J. F. Dang, C. L. Chow, and L. Miao. Smoke movement in tilted tunnel fires with longitudinal ventilation. *Fire Saf. J.*, 75 :14-22, 2015.
- W. H. Hager, R. Bremen, et N. Kawagoshi. Classical hydraulic jump : length of roller. *J. Hydraul. Res.*, 28(5) :591-608, 1990.
- D. L. Wilkinson AND I. R. Wood. A rapidly varied flow phenomenon in a two-layer flow. *J. Fluid Mech.*, 47(2) :241-256, 1971.



Groupement De Recherche Feux 2864



Société Française
de Thermique

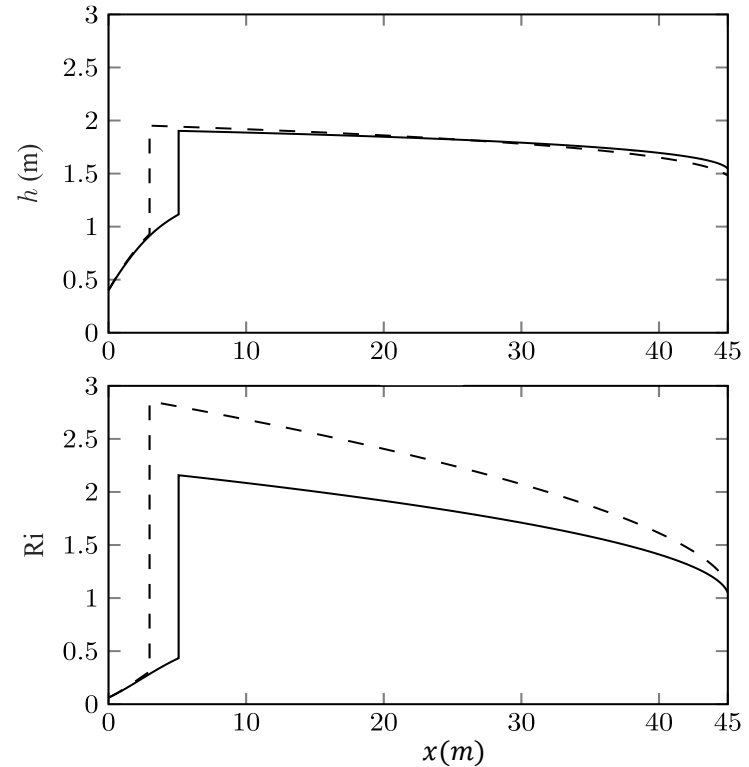
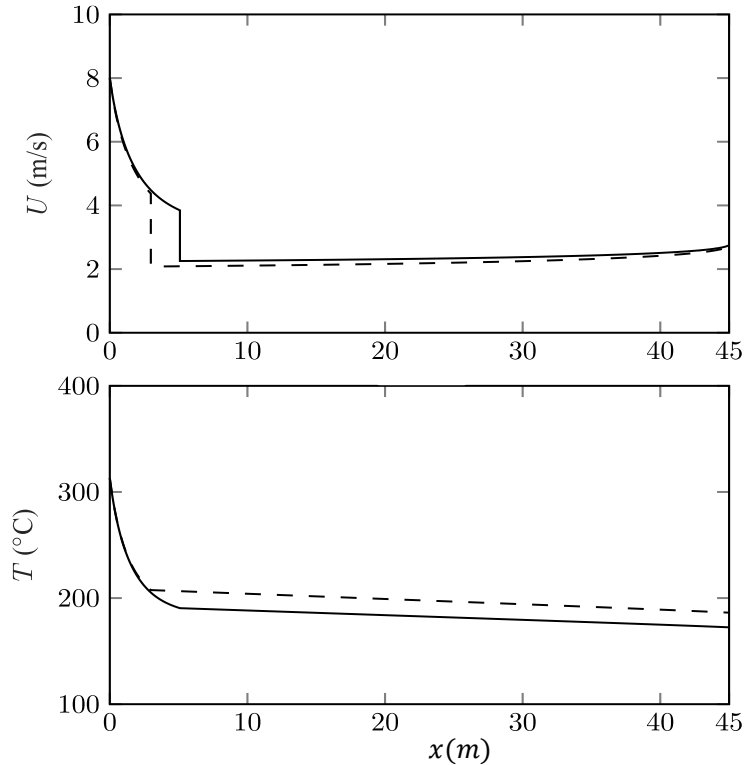
Theoretical model : Sensitivity study

- 2 parameters are linked to the ceiling : S_t and C_d
- Quantify** the **influence** of these parameters from the reference case 1.

<i>Case n°</i>	<i>Stanton number</i>	<i>Drag coefficient</i>
1 (Reference case)	$S_t = 0.0021$	$C_f = 0.0065$
3	$S_t = 0.0021$	$C_f = 2 * 0.0065 = 0.0130$
4	$S_t = 2 * 0.0021 = 0.042$	$C_f = 0.0065$

Theoretical model : Sensitivity study

Comparisons between the **case 1** and the **case 3**.



Theoretical model : Jump condition

■ Mass conservation:

$$\rho_1 h_1 u_1 = \rho_2 h_2 u_2$$

■ Momentum conservation:

$$\rho_1 u_1^2 h_1 - \rho_2 u_2^2 h_2 = \frac{1}{2} g \Delta \rho_2 h_2^2 - \frac{1}{2} g \Delta \rho_1 h_1^2$$

■ Energy conservation:

$$\Delta \rho_1 u_1 h_1 = \Delta \rho_2 u_2 h_2$$

■ By combining these equations, we get:

$$\left(\frac{h_2}{h_1} \right) = \frac{\sqrt{1 + \frac{8}{R_i}} - 1}{2}$$

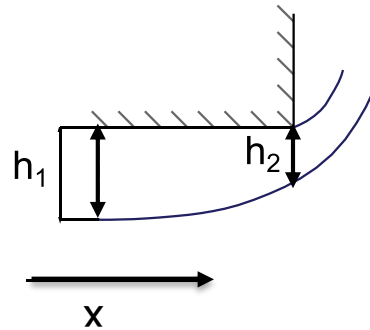
$$\frac{R_{i_2}}{R_{i_1}} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^3$$

Theoretical model : Boundary condition

- Boundary condition to close the problem : Critical flow at the exit of the domain.
- The total pressure equilibrium on a line close to the exit of the domain implies :

$$\frac{dh}{dx}(R_i - 1) = 0$$

- At the exit of the domain, the flow looks like :



Flow at the exit of the domain

Theoretical model: slope angle and heat transfer

- The **slope angle** influences the momentum conservation equation.
- The **heat transfers** influence the energy conservation equation.

$$\frac{dU}{dx} = \frac{U - \left(\frac{\rho_a}{\rho} + \frac{1}{2}R_i\right)E(\theta) - C_f - \left(-R_i \frac{\rho_a}{\rho} + \frac{1}{2}R_i\right)S_t + R_i \tan(\theta)}{(1 - R_i)}$$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{\left(1 + \frac{\rho_a}{\rho} - \frac{1}{2}R_i\right)E(\theta) + C_f + \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho} - \frac{1}{2}R_i\right)S_t - R_i \tan(\theta)}{(1 - R_i)}$$

$$\frac{d\rho}{dx} = \frac{\Delta\rho(E + S_t)}{h}$$

$$(St = \frac{\sigma}{C_p U \rho_a})$$