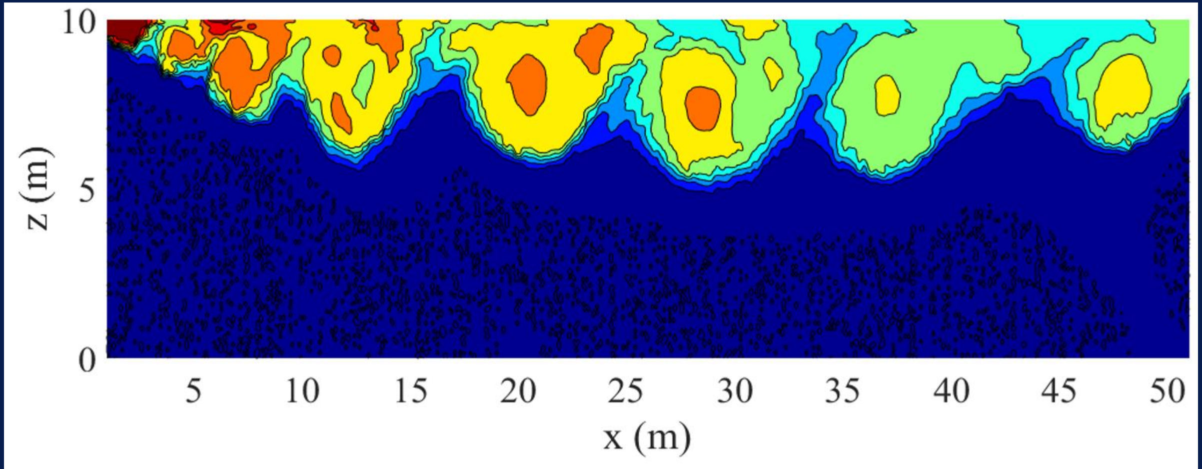
MODÈLE THÉORIQUE DE COURANT DE DENSITÉ APPLIQUÉ AUX INCENDIES EN TUNNELS



Safir HADDAD –IRSN (Laboratoire de l'Incendie et des Explosions)

Encadrants de thèse : Samuel VAUX (IRSN)
Olivier VAUQUELIN (IUSTI)
Kevin VARRALL (IUSTI)

MEMBRE DE ETSON

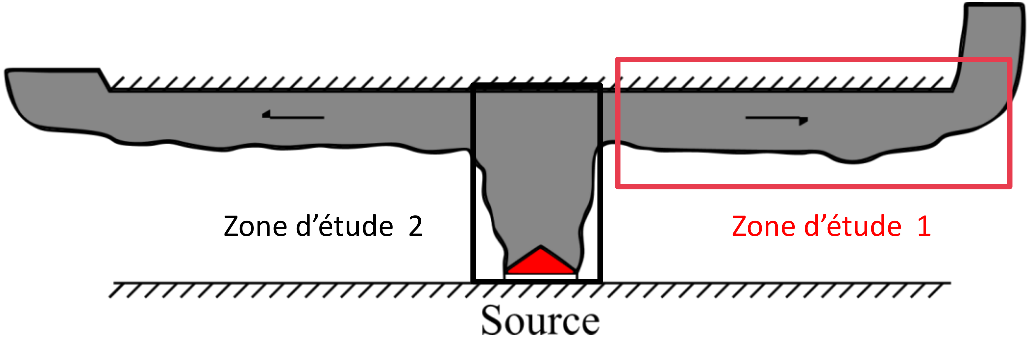
Contexte et Problématique

Contexte

- Maitrise du risque incendie en tunnel incliné.
- Phase instationnaire : étude de la cinétique d'un volume défini de fumée dans un tunnel incliné (R. Hanouzet, thèse IRSN, 2018).
- Phase stationnaire : étude du comportement d'un écoulement de fumée issu d'une injection continue : cas plus proches de la réalité.

Objectif

- **Caractériser le comportement de la fumée** pour un incendie pleinement développé

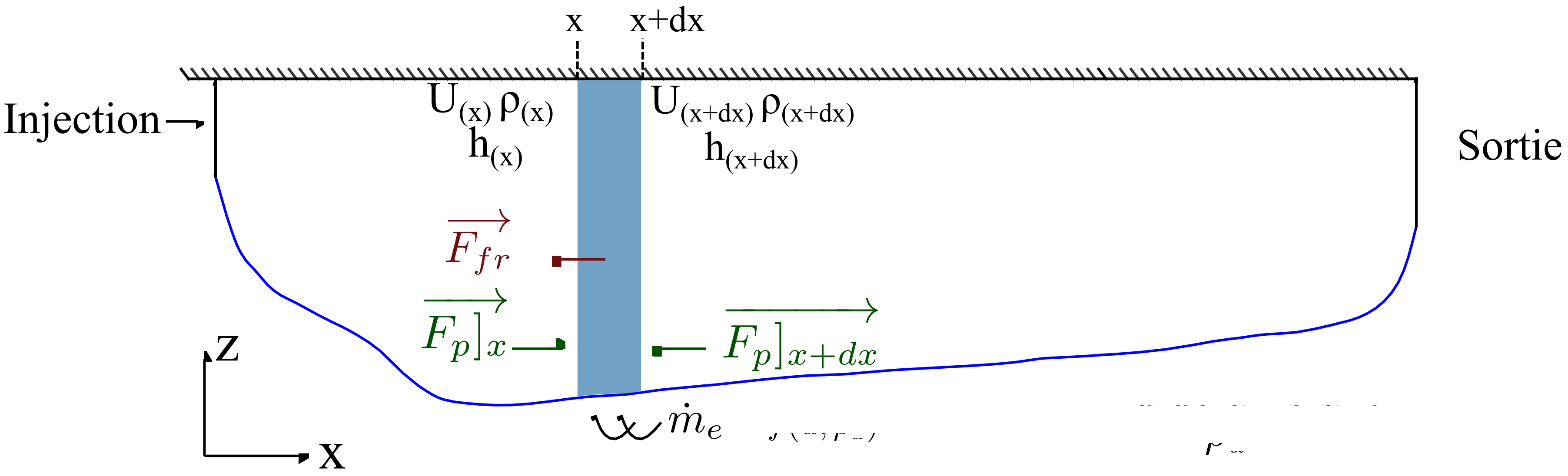


Ecoulement de fumée dans un tunnel issu d'une source continue

Moyens utilisé

- Moyens **numériques** (logiciel CFD $CALIF^3S - ISIS$) et **expérimentaux** (maquette de tunnel IUSTI)

Problématique : Caractériser le comportement longitudinal de la nappe de fumée



Représentation de la nappe étudiée

- Déterminer l'évolution longitudinale des **variables primaires** (**vitesse** de la nappe **U**, **hauteur** de la nappe **h**, et **masse volumique** de la nappe **ρ**) dans un milieu ouvert au repos.

Modèle théorique : Injection de fumée dans un milieu continu ouvert

Equations de conservation

- Equation de **continuité** (conservation du débit massique)

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

Avec E = coefficient d'entraînement

- Equation de **conservation de la quantité de mouvement**

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

Avec Cf = coefficient de frottement

- Equation de **conservation de l'énergie**

$$\frac{d(\dot{m}\mathrm{C_p}\Delta T)}{dx} = 0 \Rightarrow \frac{d(\Delta\rho u h)}{dx} = 0$$

$$\rho_0 T_0 = \rho T$$

$$R_i = \frac{(\rho_a - \rho)\ g\ h}{\rho U^2}$$

Modèle théorique : Injection de fumée dans un milieu incliné continu ouvert

- Système d'équations différentielles couplées obtenu à partir des équations de conservation :

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

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

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

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

- Problème de **discontinuité** lorsque $(R_i = 1)$

Modèle théorique : Injection de fumée dans un milieu incliné continu ouvert

Le fluide peut avoir 3 régimes différents :

- $\boldsymbol{R_i > 1}$: Régime **sous-critique**. L'écoulement est gravitaire.
- $\boldsymbol{R_i < 1}$: Régime **supercritique.** L'écoulement est inertiel.
- $\boldsymbol{R_i = 1}$: Régime **critique**. Les forces de flottabilité et d'inertie sont équilibrées.

➢ Pour une nappe de fumée issue d'une injection continue, **le fluide est en régime supercritique** (Alpert, 1975)

Modèle théorique : Comparaisons avec des données numériques

- Résolution dans le cas d'une discontinuité : introduction du **saut de densité**

- Semblable au ressaut hydraulique pour un canal ouvert.

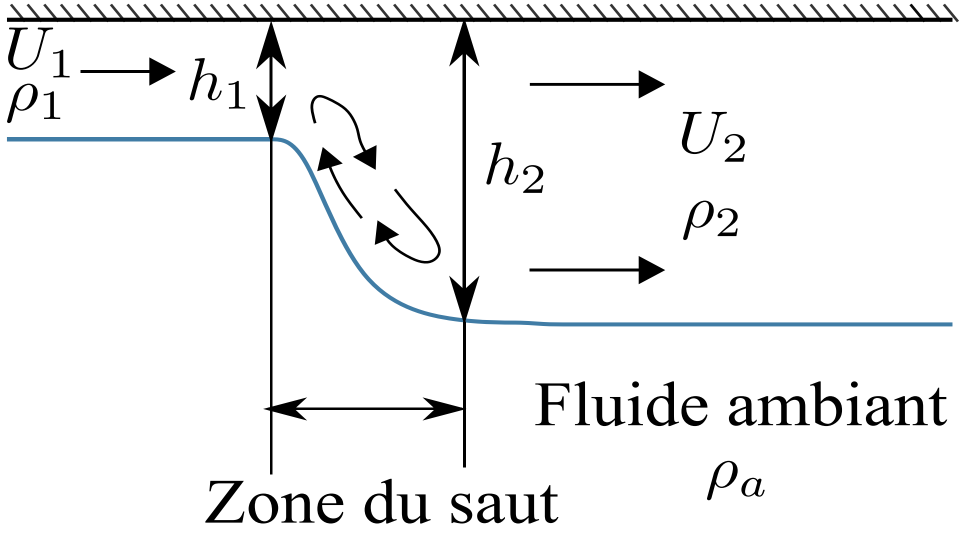


Illustration du saut de densité

- **Forte diminution de la vitesse et forte augmentation de la hauteur.**

Modèle théorique : Résolution des équations du saut de densité

- Equation de conservation de la masse :

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

- Equation de conservation de la quantité de mouvement :

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

- Equation de conservation du débit de flottabilité :

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

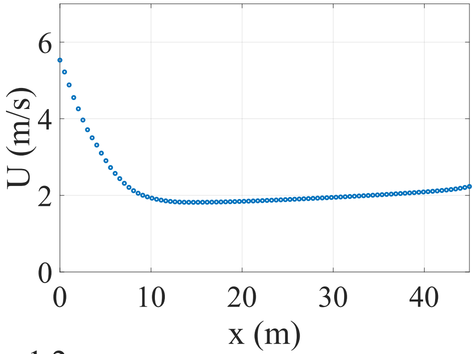
- En combinant ces trois équations, on obtient :

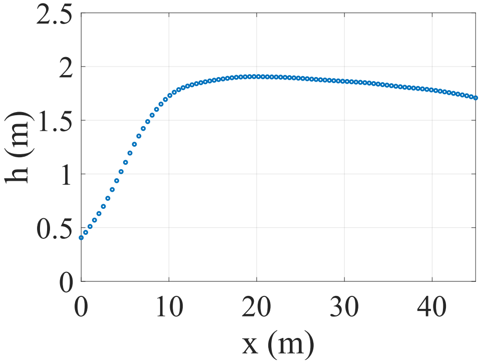
$$\boldsymbol{\left(\frac{h_2}{h_1}\right) = \frac{\sqrt{1 + \frac{8}{R_i}} - 1}{2}}$$

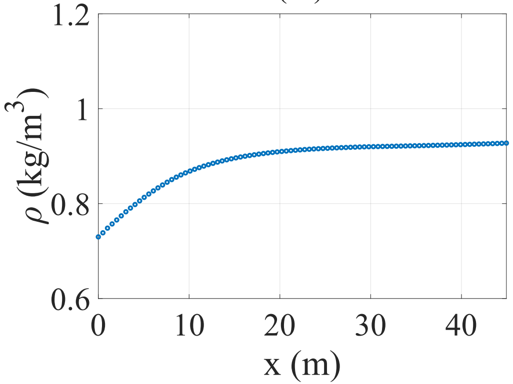
$$\boldsymbol{\frac{R_{i_2}}{R_{i_1}} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^3}$$

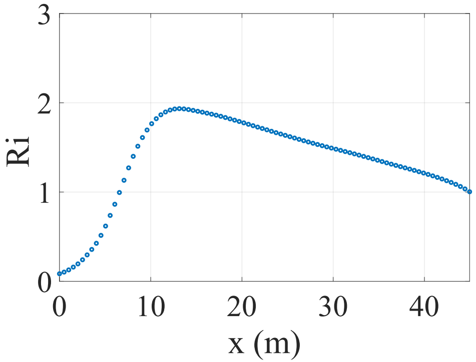
Modèle théorique : Comparaisons avec des données numériques

- Simulation numérique **LES** avec le logiciel $CALIF^3S - ISIS$ (IRSN) dans le cas avec saut de densité ($\boldsymbol{Ri_{inj} = 0,11\ ;\ 4 \times 10^6}$**mailles**)



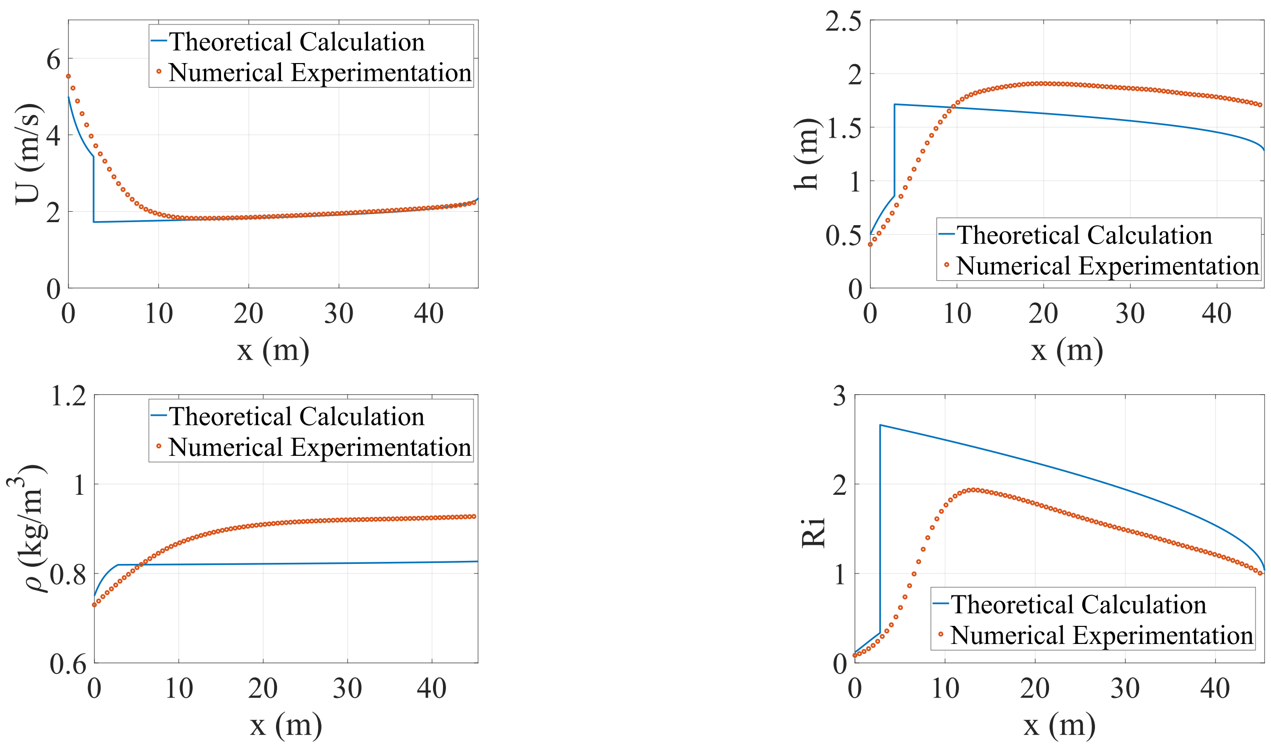






Modèle théorique : Comparaisons avec des données numériques

▌ Comparaison entre les données numériques et les résultats théoriques



Modèle théorique : Conclusion sur le modèle

- Le modèle donne des valeurs cohérentes pour les quantités physiques (la vitesse, la masse volumique et la hauteur de la couche de fumée), avec une discontinuité liée au saut de densité.
- Le modèle reste dépendant de la loi d'entraînement

Axes d'études futures

- Confrontation des données théoriques avec des données expérimentales.
- Prise en compte de l'inclinaison.
- Prise en compte des transferts thermiques.
- Liaison du modèle avec un modèle de panache impactant.
- Prise en compte du confinement, ventilation longitudinale.

INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

LABORATOIRE
AIX MARSEILLE UNIVERSITÉ
CNRS

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

Modèle théorique : Prise en compte des déperditions thermiques

- Prise en compte des déperditions thermiques dans l'équation de conservation de l 'énergie

$$\frac{d(\dot{m}\mathrm{C_p}\Delta T)}{dx} = -\sigma \Delta T$$

(Avec σ le coefficient de convection thermique $(W/m^2 K)$)

$$\Rightarrow \frac{d(\Delta\rho u h)}{dx} = -\frac{\sigma}{C_p}\frac{\Delta\rho}{\rho}$$

- Les équations deviennent

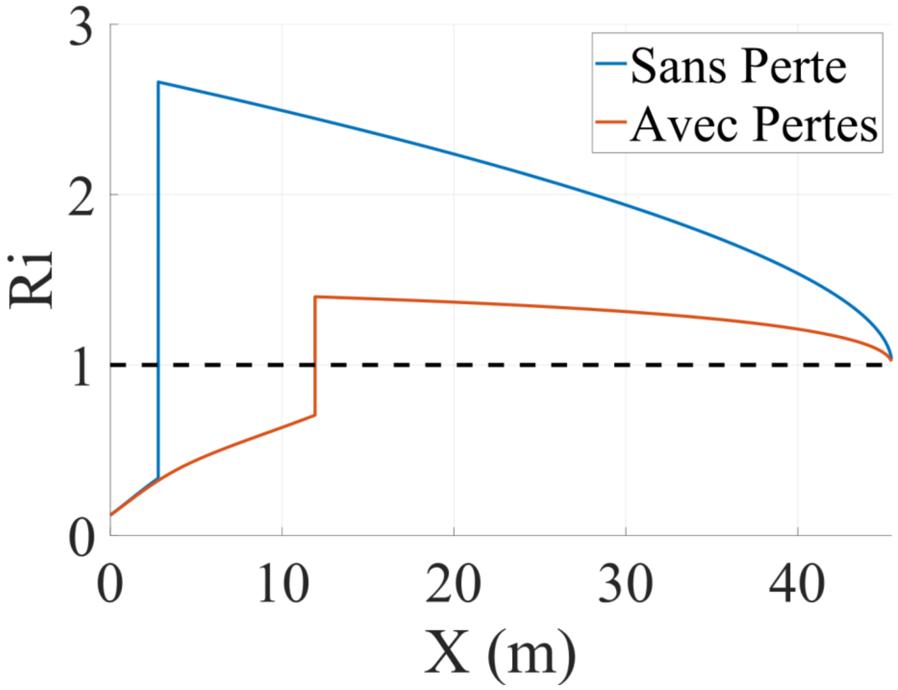
$$\frac{du}{dx} = \frac{u}{h}\frac{-\left(\frac{\rho_a}{\rho} + \frac{1}{2}R_i\right)E - \left(-Ri\,\frac{\rho_a}{\rho} + \frac{1}{2}R_i\right)S_t - C_f}{(1 - R_i)}$$

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

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

Modèle théorique : Prise en compte des déperditions thermiques

- Comparaison entre le modèle théorique et la simulation avec les déperditions thermiques.



Modèle théorique : Injection de fumée dans un milieu incliné continu ouvert

- Champ moyen de température pour un cas avec un saut de densité