

# Modélisation d'un incendie en tunnel par un panache thermique turbulent : effet d'une ventilation longitudinale.

Mathieu Creyssels<sup>1\*</sup>, Julien Le Clanche<sup>1</sup>, Christian Nicot<sup>1</sup>, Fabien Candelier<sup>2</sup>, Rabah Mehaddi<sup>2</sup>, Olivier Vauquelin<sup>2</sup>, Pietro Salizzoni<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, CNRS, Ecole centrale de Lyon  
36, av. Guy de Collongues, 69134 Ecully

<sup>2</sup> Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels, CNRS, Aix-Marseille Université  
5 rue Enrico Fermi, 13 453 Marseille

\*(auteur correspondant : mathieu.creyssels@ec-lyon.fr)

**Résumé** - Nous présentons ici deux maquettes à échelle réduite d'un tunnel routier permettant de simuler en laboratoire l'effet d'une ventilation longitudinale sur la propagation des fumées produites par un incendie. La maquette du LMFA représente la source de chaleur par un panache thermique turbulent tandis que celle de l'IUSTI utilise un panache flottant produit par le rejet d'un mélange d'air et d'hélium. Les résultats expérimentaux obtenus montrent que la vitesse de ventilation critique pour laquelle les fumées sont en totalité poussées vers l'aval, est essentiellement dépendante du nombre de Richardson qui exprime le rapport entre le flux de flottabilité et le flux de quantité de mouvement au point source de l'incendie.

## Nomenclature

$H$	hauteur de la veine, m	$B$	flux de flottabilité, $m^2 s^{-2}$
$L$	largeur de la veine, m	$c_x$	coefficient de traînée du cylindre, $\approx 1.5$
$b$	rayon du panache, m	Ri	nombre de Richardson
$w$	vitesse verticale, m/s	<i>Symboles grecs</i>	
$u$	vitesse horizontale, m/s	$\rho$	densité, $kg m^{-3}$
$V$	vitesse de ventilation, m/s	$\Gamma$	fonction panache
$y$	altitude, m	$\alpha$	coefficient d'entraînement du panache (0.1)
$x$	distance au centre de la veine, m	$f$	facteur d'échelle
$T$	température, °C	$\beta$	constante du modèle
$c_p$	capacité calorifique de l'air, $J kg^{-1} K^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>	
$d_i$	débit d'injection, $L min^{-1}$	0	relatif à l'air de ventilation
$g$	accélération de gravité, $m s^{-2}$	$i$	injecté
$P$	puissance thermique du panache, W	reel	incendie réel

## 1. Introduction

La problématique des incendies dans les tunnels routiers constitue aujourd'hui une des préoccupations majeures des pouvoirs publics en terme de risques et de conséquence sur les vies humaines, sur les infrastructures et sur l'activité économique associée au transit à travers les tunnels. D'une manière générale, les problèmes de sécurité et d'évacuation des usagers en cas d'incendie en tunnel sont étroitement liés aux processus physiques qui contrôlent le déplacement et la dispersion des fumées dans le tunnel - qui transportent des gaz toxiques et gênent considérablement l'évacuation des usagers et l'intervention des secours.

Une stratégie de ventilation longitudinale consiste à pousser vers l'aval toutes les fumées provenant de l'incendie afin d'éviter l'apparition d'une 'nappe de retour' en amont de l'incendie

(voir figure 1). Ainsi, les usagers peuvent évacuer la zone sinistrée en amont dans un air sain et les secours atteindre l'incendie. Les véhicules en aval n'étant pas bloqués peuvent également évacuer rapidement. Il existe une vitesse critique de ventilation en dessous de laquelle la nappe de retour se forme et empêche l'évacuation. Cette vitesse critique est fonction des paramètres physiques tels que la température, la puissance injectée, les dimensions de l'incendie et du tunnel.

Un enjeu de l'étude des incendies en tunnel routier est de connaître la dépendance de la vitesse critique en fonction des conditions à la source de l'incendie. Le LMFA et l'IUSTI sont dotés de deux maquettes originales pouvant simuler un incendie dans un tunnel à échelle réduite. Afin de simplifier ce problème complexe mettant en oeuvre des phénomènes aussi différents que sont la combustion et l'écoulement des fluides à température et densité variables, l'incendie est modélisé par le rejet continu soit d'air chaud (maquette thermique du LMFA), soit d'un mélange air et hélium à température ambiante (maquette densimétrique de l'IUSTI). Pour chaque maquette, un protocole a été mis en oeuvre afin de bien définir et mesurer la vitesse critique en fonction des conditions à la source du panache (voir paragraphes 2.1 et 2.2). Ensuite est donnée une comparaison des résultats expérimentaux obtenus dans les deux maquettes et dans un dernier paragraphe un modèle est proposé afin d'expliquer l'évolution de la vitesse de ventilation critique en fonction de la puissance de la source.

## 2. Les dispositifs expérimentaux

### 2.1. Le modèle réduit thermique

La maquette du LMFA est constituée d'une structure en acier sur laquelle repose une conduite de longueur 8 m, de hauteur 18 cm et de largeur 36 cm ( $H/L = 0.5$ ), représentant un modèle réduit à l'échelle  $f = 1/25$  d'un tunnel routier réel (voir figure 1). Le sol et le plafond sont en

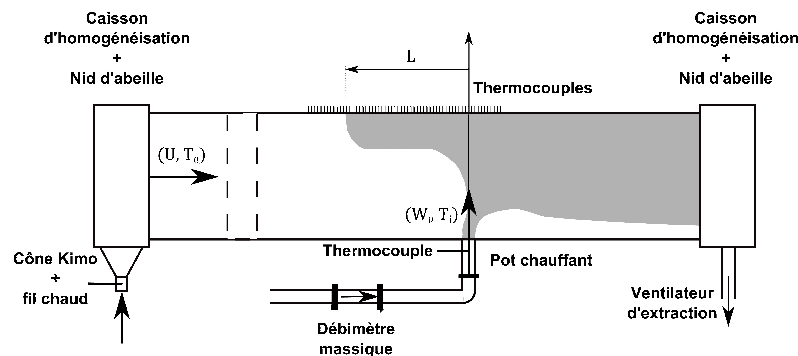


Figure 1 Schéma de la maquette thermique située au LMFA.

bois aggloméré recouverts sur leur face intérieure de panneaux en céramique Rescor 360. Les parois latérales sont en vitro-céramiques. Un ventilateur fonctionnant en aspiration produit un écoulement longitudinal dans la conduite et afin de s'affranchir des perturbations extérieures, des caissons d'homogénéisation sont montés en entrée et sortie de la maquette. Du nid d'abeille est installé à la jonction entre la veine et les caissons ce qui permet de casser les perturbations résiduelles dues aux variations de conditions extérieures et d'obtenir un écoulement homogène dans la conduite. Le débit d'air est mesuré à l'aide d'un dispositif comprenant un cône situé à l'entrée du caisson amont et un fil chaud placé au milieu du cône permettant de mesurer la vitesse de l'air. Le dispositif a été étalonné ce qui permet d'obtenir directement le débit d'air frais circulant dans la veine en fonction de la vitesse mesurée par le fil chaud.

L'incendie est modélisé par un panache d'air chaud injecté directement au niveau du sol de

la veine et à égale distance entre l'amont et l'aval. Le panache est produit par l'intermédiaire d'un deuxième ventilateur fonctionnant également en aspiration et qui injecte un certain débit d'air dans un pot chauffant régulé en température. La sortie du pot est constituée d'un tube de diamètre 100 mm qui affleure le sol de la veine, au milieu de celle-ci. L'homogénéité en vitesse et température est assurée à la fois par le pot chauffant qui est constitué de 20 canaux et également par une grille placée à sa sortie. La température d'injection d'air chaud ( $T_i$ ) est mesurée à l'aide d'un thermocouple. Un débitmètre massique placé entre le ventilateur et le pot chauffant permet de mesurer le débit d'injection  $d_i$ .

Enfin, des thermocouples de type K chemisés de diamètre 1.5 mm sont disposés régulièrement le long du plafond de la veine d'essai, leur partie sensible à la température baigne dans l'écoulement d'air ventilé à 2 mm sous le plafond. Ainsi l'évolution temporelle et spatiale de la température de l'air proche du plafond est enregistrée ce qui permet d'en déduire une mesure de la vitesse critique. En effet, lorsque le panache est poussé entièrement vers l'aval, les thermocouples en amont de la source ne révèlent aucune augmentation de température en présence de la source chaude tandis que lorsque la vitesse de ventilation est inférieure à la vitesse critique, ces mêmes thermocouples voient leur température s'élever et d'autant plus que la vitesse de ventilation est faible. Pour des conditions à la source données ( $b_i, T_i, w_i$ ), la vitesse de ventilation critique est obtenue par approximations successives en essayant plusieurs débits d'air ventilé et en observant la position du panache près du plafond.

## 2.2. Modèle réduit densimétrique

Le modèle réduit de l'IUSTI, présenté sur la figure 2, est une structure en PMMA sur laquelle est placée une conduite droite en plexiglas d'une longueur de 10 m et de section  $25 \times 50 \text{ cm}^2$  ( $H/L = 0.5$ ). L'échelle de réduction par rapport à un tunnel routier est de  $f = 1/18$ . Un ventilateur fonctionnant en aspiration produit un écoulement longitudinal dans la conduite. Du nid d'abeille est installé à l'entrée de la conduite afin d'éliminer une grande partie des perturbations provenant de l'extérieur de la conduite et ainsi homogénéiser l'écoulement d'air. Un étalonnage réalisé au préalable permet de déduire le débit d'air de ventilation à partir de la mesure de la vitesse en un point au milieu de la veine. Celle-ci est obtenue à l'aide d'un anémomètre à fil chaud portatif.

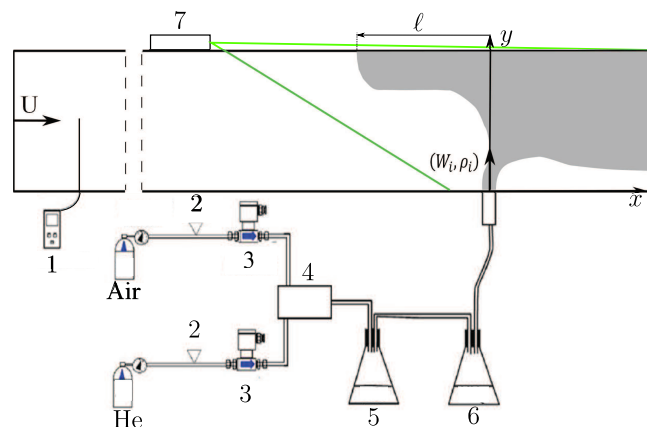


Figure 2 Schéma de la maquette densimétrique située à l'IUSTI. 1 : anémomètre à fil chaud, 2 : manomètres, 3 : débitmètres, 4 : chambre de mélange, 5 : solution d'acide d'hydrochlorydrique, 6 : solution d'ammoniac concentré, 7 : source de la nappe laser.

Dans cette maquette, l'incendie est modélisé par le rejet d'un mélange d'air et d'hélium à température ambiante ( $T_0$ ). En ajustant convenablement les débits d'air et d'hélium, le panache

de fluide léger ainsi produit a la même densité  $\rho_i$  et donc la même flottabilité que le panache d'air chaud produit dans la maquette LMFA :  $\rho_i = \rho_0 T_i / T_0$ . Ainsi, pour les deux maquettes, le nombre de Richardson à la source s'écrit de la manière suivante :  $Ri = \frac{g(\rho_0 - \rho_i)b_i}{\rho_0 w_i^2}$ .

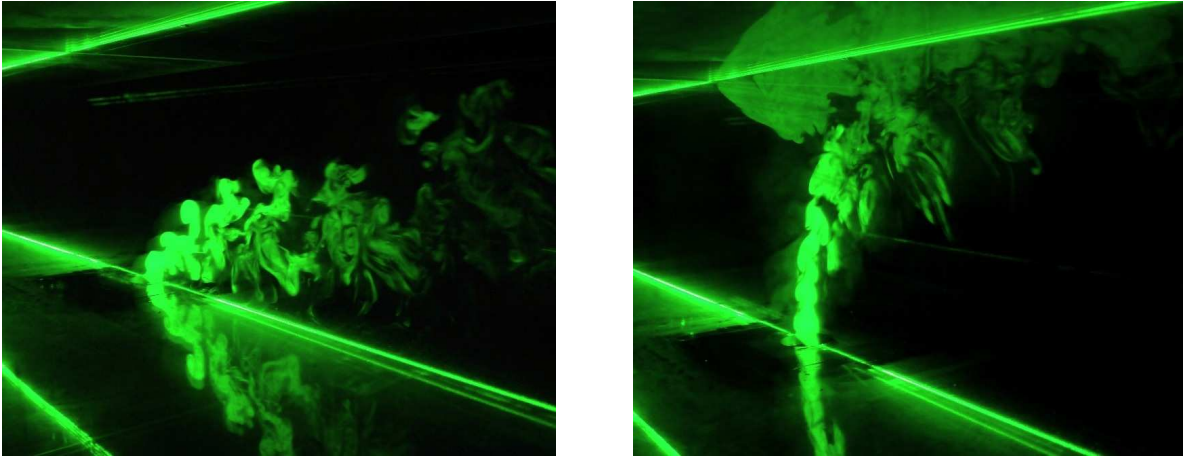


Figure 3 A gauche : image du panache obtenu pour une vitesse de ventilation supérieure à la vitesse critique. A droite : image du panache obtenu pour  $V < V_c$ , une nappe de retour s'est formée.

L'ensemencement du panache couplé à une tranche laser permet d'observer la propagation des fumées au sein de la veine d'essais. L'interface entre le mélange d'air et d'hélium ensemençé et l'air ambiant apparaît alors très clairement (voir figure 3). A partir d'une grande vitesse de ventilation pour laquelle le panache est couché et repoussé très loin vers l'aval, la vitesse est réduite progressivement jusqu'à l'apparition d'un tourbillon à la verticale de la source du panache, contre le plafond ( $x = 0, y = H$ ). En réduisant encore la vitesse de ventilation, une partie des fumées contenues dans le tourbillon remonte à contre-courant vers l'amont de la source ce qui provoque la création de ce que l'on appelle la nappe de retour. La vitesse critique est donc définie ici comme la vitesse de ventilation qui provoque la transition entre le tourbillon formé au dessus de la source et son étalement qui produit la nappe de retour.

### 2.3. Comparaison des modèles avec le problème réel d'incendie en tunnel

Nous adoptons ici une règle de similitude simple afin de comparer la puissance thermique injectée dans la veine et la puissance thermique dégagée par l'incendie d'un véhicule (1 MW) ou d'un camion (100 MW) dans un tunnel routier :

$$P_i = f^3 P_{i, \text{reel}} \quad (1)$$

Il s'agit d'affirmer que la source de chaleur est volumique et  $f$  est le rapport de réduction géométrique. La puissance thermique injectée dans la conduite est fonction de la température du panache ( $T_i$ ) et du débit d'air chaud :

$$P_i = \rho_i c_p (T_i - T_0) d_i \quad (2)$$

$T_0$  étant la température de l'air extérieur utilisé pour ventiler la veine d'essai. Pour un débit maximum de 20 L/s et une température de 300°C, la puissance thermique injectée s'élève à 3.5 kW. Cette injection de puissance thermique modélise l'incendie d'une grosse camionnette de 55 MW.

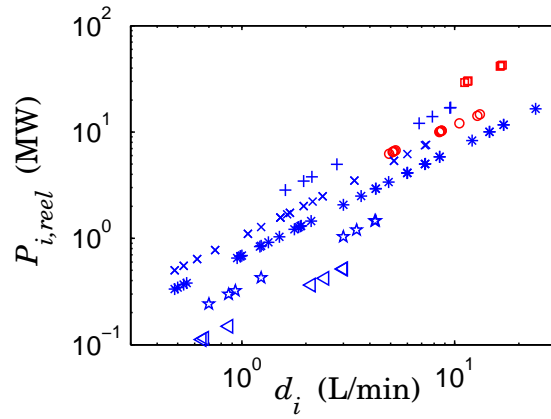


Figure 4 Puissance thermique simulée en fonction du débit de fluide injecté. Maquette thermique :  $T_i = 100 \text{ °C}$  ( $\square$ ),  $T_i = 300 \text{ °C}$  ( $\circ$ ). Maquette densimétrique :  $\rho_i/\rho_0 = 0.14$  ( $+$ ),  $\rho_i/\rho_0 = 0.5$  ( $\times$ ),  $\rho_i/\rho_0 = 0.67$  ( $*$ ),  $\rho_i/\rho_0 = 0.83$  ( $\star$ ),  $\rho_i/\rho_0 = 0.92$  ( $\triangle$ ).

La puissance thermique injectée peut également s'exprimer comme un flux de flottabilité injecté dans la veine :

$$P_i = \frac{c_p}{g} \rho_0 T_0 B_i \quad (3)$$

avec :  $B_i = g \frac{\rho_0 - \rho_i}{\rho_0} d_i$ . A son tour, le panache d'air chaud peut être modélisé par un panache densimétrique constitué d'un mélange d'air et d'hélium à la température  $T_0$ . La densité du fluide injecté  $\rho_i$  est ajustée en modifiant la quantité d'hélium par rapport à la quantité d'air. L'équation 2 permet d'obtenir la puissance thermique du panache d'air chaud que le panache d'hélium modélise.

### 3. Résultats expérimentaux

La figure 5 présente la vitesse critique en fonction de la puissance réelle du rejet d'air chaud (maquette LMFA) ou de mélange air/hélium (maquette IUSTI). Un premier résultat est de re-

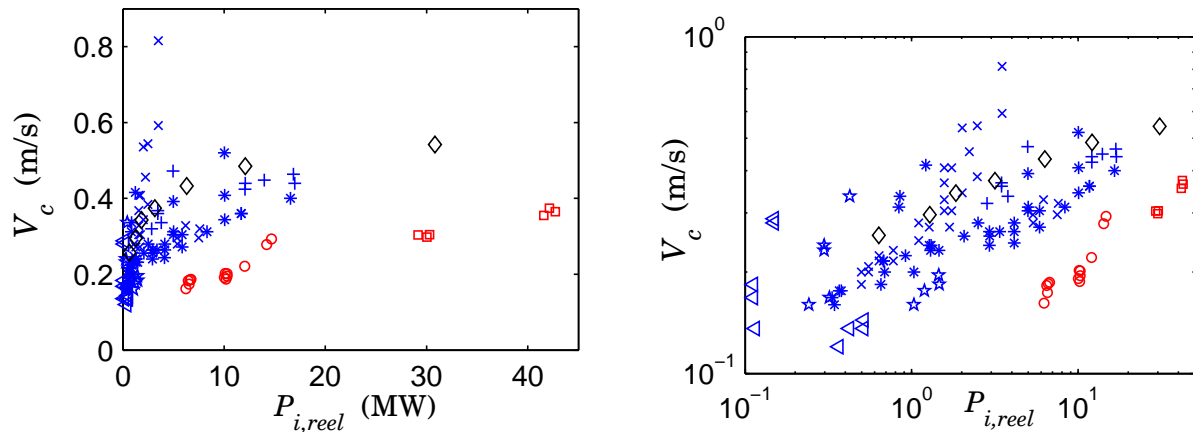


Figure 5 La vitesse critique en fonction de la puissance réelle (en représentation log-log à droite). Légende identique à la figure 4. Losanges : Vauquelin 2008, [1].

marquer les vitesses critiques obtenues sont semblables pour les deux maquettes et de plus en accord avec les résultats préalablement obtenus par [1]. Cependant, la dispersion est relativement grande et il semble que la puissance à la source ne soit pas le paramètre qui contrôle la vitesse critique de façon univoque. Nous proposons dans la suite un modèle d'entraînement du

panache par l'air ventilé qui met en évidence une grandeur sans dimension caractéristique du panache : le nombre de Richardson ou fonction  $\Gamma$ .

#### 4. Modèle proposé

Dans cet article, nous proposons une modélisation de l'interaction entre le panache flottant turbulent (thermique ou densimétrique) et la ventilation longitudinale. Nous nous appuyons sur la description du panache turbulent initiée par Morton *et al.* [2], puis généralisée par Rooney et Linden [3] et Michaux et Vauquelin [4]. Comme illustré schématiquement par la figure 1, le panache est décrit, en régime permanent, par trois quantités globales : son rayon ( $b$ ), la vitesse verticale ( $w$ ) et le déficit de masse volumique ( $\rho_0 - \rho$ ) moyennes sur un plan horizontal situé à l'altitude  $y$ . Ces trois grandeurs sont des fonctions de l'altitude et des conditions d'injection à la source. Les équations de conservation des flux de masse, de quantité de mouvement et de déficit de masse volumique peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\frac{d}{dy}(\rho w b^2) = 2\rho_0 u_e b \quad (4)$$

$$\frac{d}{dy}(\rho w^2 b^2) = (\rho_0 - \rho) g b^2 \quad (5)$$

$$\frac{d}{dy}((\rho_0 - \rho) w b^2) = 0 \quad (6)$$

Le terme de droite de l'équation 4 représente le flux d'air extérieur apporté au panache à chaque altitude  $y$ ,  $u_e$  étant définie comme la vitesse d'entraînement de l'air extérieur par le panache. En première approximation, cette vitesse d'entraînement est prise proportionnelle à la vitesse verticale  $w(y)$  avec un coefficient d'entraînement  $\alpha = 0.1$  supposé constant, c'est à dire indépendant de la vitesse, du rayon et de la densité du panache :  $u_e(y) = \alpha w(y)$ . Par ailleurs, dans le cas de panaches dits Boussinesq (i. e. pour des faibles déficits de masse volumique), les trois équations précédentes se simplifient de la manière suivante :

$$\frac{d}{dy}(w b^2) = 2u_e b \quad ; \quad \frac{d}{dy}(w^2 b^2) = g \eta b^2 \quad ; \quad \frac{d}{dy}(\eta w b^2) = 0 \quad (7)$$

avec :  $\eta = (\rho_0 - \rho)/\rho_0$ .

Les trois équations précédentes s'intègrent en introduisant la fonction panache [4] :

$$\Gamma(y) = \frac{5g \eta b}{8\alpha w^2} \quad (8)$$

Le rayon, la vitesse verticale et le déficit de masse volumique ne sont alors des fonctions que de la variable  $\Gamma$  [4] :

$$\frac{b}{b_i} = \left(\frac{\Gamma}{\Gamma_i}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1-\Gamma}{1-\Gamma_i}\right)^{-\frac{3}{10}} \quad ; \quad \frac{w}{w_i} = \left(\frac{\Gamma}{\Gamma_i}\right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{1-\Gamma}{1-\Gamma_i}\right)^{\frac{1}{10}} \quad ; \quad \frac{\eta}{\eta_i} = \left(\frac{\Gamma}{\Gamma_i}\right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{1-\Gamma}{1-\Gamma_i}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

L'évolution de  $\Gamma$  avec l'altitude est obtenue en résolvant numériquement l'équation différentielle suivante :

$$\frac{d\Gamma}{dy} = -\frac{1}{\Lambda_i} \Gamma^{1/2} (\Gamma - 1)^{13/10} \quad (10)$$

avec :  $\Lambda_i = \frac{b_i}{4\alpha} \Gamma_i^{-1/2} |\Gamma_i - 1|^{3/10}$

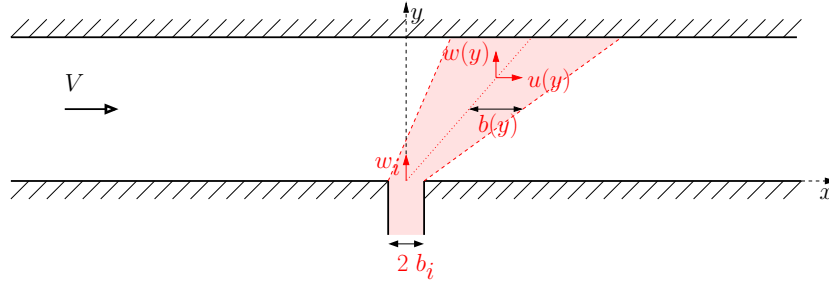


Figure 6 Représentation schématique du panache turbulent poussé par la ventilation longitudinale.

Dans le cas de la présence d'une ventilation longitudinale de vitesse  $V$ , le panache thermique ou de densité est poussé vers l'aval de la veine (voir la représentation schématique du panache figure 6). Son centre de gravité se déplace longitudinalement avec une vitesse  $u(y)$  qui augmente avec l'altitude à cause du frottement de l'air de ventilation sur le panache. Dans le modèle simple présenté ici, chaque portion de panache située à l'altitude  $y$  et de hauteur  $\delta y$  est représentée par un petit cylindre solide de rayon  $b(y)$ , de vitesse verticale  $w(y)$  et de vitesse longitudinale  $u(y)$ . La force de frottement exercée par l'air de ventilation sur ce petit cylindre s'écrit de la manière suivante :  $c_x \rho_0 (V - u)^2 b \delta y$ , avec  $c_x \approx 1.5$ . Nous pouvons ainsi en déduire l'équation suivante de conservation de la quantité de mouvement longitudinale pour le panache :

$$\frac{d}{dy}(\rho u w b^2) = c_x \rho_0 (V - u)^2 b \quad (11)$$

Pour un panache non-Boussinesq et en supposant que sa forme soit très peu différente de celle obtenue sans ventilation (i. e.  $u \ll V$ ), l'équation précédente se simplifie sous la forme :

$$\frac{d}{dy}(u w b^2) = c_x V^2 b \quad (12)$$

En intégrant l'équation 12 et en utilisant les équations 10 et 9, le rapport entre les vitesses longitudinale et verticale est obtenu pour toute altitude  $y$  :

$$\frac{u}{w} = \frac{5c_x}{12\alpha\Gamma_i} \left( \frac{1-\Gamma}{1-\Gamma_i} \right)^{\frac{2}{5}} \left[ 1 - \left( \frac{1-\Gamma}{1-\Gamma_i} \right)^{-\frac{3}{5}} \right] \left( \frac{V}{w_i} \right)^2 \quad (13)$$

La vitesse critique correspond à la vitesse de ventilation maximale ( $V_c$ ) pour laquelle le panache n'est pas emporté vers l'aval. Dans le modèle que nous proposons ici, elle correspond au moment où la vitesse longitudinale du panache atteint la vitesse d'entraînement à une constante  $\beta$  près :  $u = \beta u_e = \beta \alpha w$ , et donc  $\left( \frac{u}{w} \right)_{V_c} = \beta \alpha$ . Comme  $u$  augmente avec l'altitude, nous supposons par la suite que ce critère s'applique au niveau du plafond, lorsque  $y = H$ . A partir de l'équation 14, nous obtenons la vitesse critique en fonction des conditions à la source du panache ( $\Gamma_i$ ) et du rapport  $H/b_i$  :

$$\frac{V}{w_i} = \alpha \left( \frac{12\beta}{5c_x} \right)^{\frac{1}{2}} \Gamma_i^{\frac{1}{2}} \left( \frac{1-\Gamma_H}{1-\Gamma_i} \right)^{-\frac{1}{5}} \left[ 1 - \left( \frac{1-\Gamma_H}{1-\Gamma_i} \right)^{-\frac{3}{5}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

$\Gamma_H(\Gamma_i, H/b_i)$  est la valeur de la fonction panache à l'altitude  $H$  et ne dépend que de la valeur de  $\Gamma$  à la source et du rapport  $H/b_i$ . Pour une géométrie de tunnel et une source de taille fixes, l'équation 14 montre que la vitesse critique dépend uniquement de la fonction panache

à la source. Ce modèle montre que la fonction  $\Gamma$  (qui correspond au nombre de Richardson à une constante près) est le paramètre qui contrôle l'évolution du panache et donc également l'évolution de la vitesse critique en fonction des conditions à la source du panache ( $w_i$ ,  $b_i$  et  $T_i/T_0$  ou  $\rho_i/\rho_0$ ).

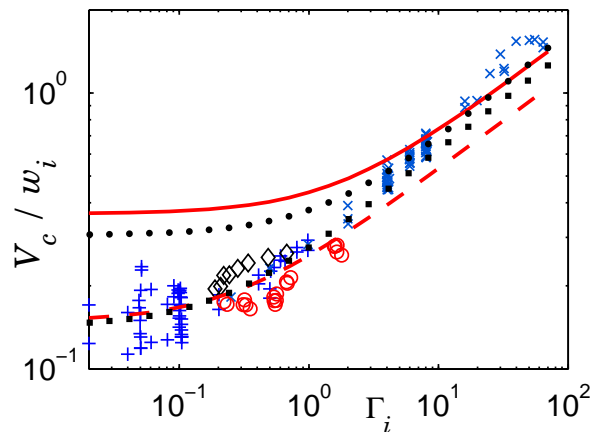


Figure 7 Vitesse critique normalisée à la vitesse verticale d'injection du panache en fonction du paramètre d'injection  $\Gamma_i$ . Maquette thermique :  $H/b_i = 1.8$  ( $\circ$ ). Maquette densimétrique :  $H/b_i = 2.1$  ( $\times$ ),  $H/b_i = 8.3$  ( $+$ ). Les lignes continue et discontinue correspondent au modèle décrit dans le texte et représenté par l'équation 14 avec respectivement  $H/b_i = 2$  et  $H/b_i = 8$ . Le coefficient  $\beta$  est pris égal à 4.8. Les petits ronds et carrés correspondent au même modèle sans réaliser l'hypothèse que la vitesse de ventilation soit très grande devant la vitesse longitudinale du panache. Losanges : [1].

Sur la figure 7 sont tracées les vitesses critiques obtenues pour chaque maquette en fonction du paramètre  $\Gamma_i$  à la source. Nous remarquons que les points expérimentaux se regroupent assez bien et sont beaucoup moins dispersés que dans la représentation de la figure 5.

## 5. Conclusion

L'effet d'une ventilation longitudinale sur la propagation de fumées d'incendie en milieu confiné a été étudié ici grâce à deux maquettes à échelle réduite d'un tunnel routier. Le nombre sans dimension de Richardson calculé à partir des conditions à la source de l'incendie contrôle la valeur de la vitesse de ventilation critique pour laquelle les fumées ne remonte pas en amont du lieu de l'incendie. Un modèle de panache entraîné par l'air ventilé permet d'expliquer quantitativement l'évolution de la vitesse critique avec le nombre de Richardson et le rapport hauteur du tunnel sur diamètre de la source.

## Références

- [1] O. Vauquelin, Experimental simulations of fire-induced smoke control in tunnels using an air-helium scale model : Principle, limitations, results and future, *Tunneling and underground space technology*, 23 (2008) 171-178.
- [2] B. R. Morton, G. I. Taylor et J. S. Turner, Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources, *Proc. R. Soc. London A*, 234 (1956) 1-23.
- [3] G. G. Rooney et P. F. Linden, Similarity considerations for non-boussinesq plumes in an unstratified environment, *J. Fluid Mech.*, 318 (1996) 237-250.
- [4] G. Michaux et O. Vauquelin, Solutions for turbulent buoyant plumes rising from circular sources, *Phys. Fluids*, 20 (2008) 066601.

## Remerciements

Ce travail a reçu le soutien financier de la région Rhône-Alpes (Programme Arc Transport).