



## Simulation des Grandes Echelles d'un Effet d'extraction naturelle pour un incendie dans un couloir

Imen Ben Abdellaziz<sup>a</sup>, Mourad Bouterra<sup>a</sup>, Olivier Vauquelin<sup>b</sup>  
Afif El Cafsi<sup>a</sup>, Ali Belghith<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Laboratoire d'Energétique et des Transferts Thermiques et Massique (LETTM), Université de Tunis El Manar, Faculté des Sciences de Tunis, El Manar II, 2092, Tunis, Tunisie

<sup>b</sup> Aix-Marseille Université, CNRS, IUSTI UMR 7343, 13 453 Marseille, France

*Mourad.Bouterra@gmail.com, olivier.vauquelin@univ-amu.fr*

*afif.elcafsi@fst.rnu.tn, ali.belghith@fst.rnu.tn*

*benabdellazizimen@gmail.com*

**Résumé :** L'extraction naturelle de la fumée par un conduit vertical est analysée numériquement par le code FDS. Nous avons étudié l'effet de la section, de la hauteur et de la forme du conduit sur l'efficacité de l'extraction. Les résultats trouvés montrent que la section du conduit est le paramètre le plus dominant. Il existe une section optimale responsable du processus du mélange et d'apparition du "Coanda-effect". Dans ce cas, le gaz toxique traduit le comportement d'un panache plan en amont et en aval du système-conduit. La stratification thermique est également élaborée. Il s'agit de quantifier le degré de la stratification en se basant sur un critère numérique établi par Newman (1984).

**Mots clés :** Tunnel; Efficacité d'extraction ; LES

### 1. Introduction

L'infrastructure (voûte, gaine de ventilation) subit des dommages pendant l'incendie, à cause de l'augmentation de la température ou des gaz corrosifs présents dans les fumées. Ces dramatiques accidents peuvent se produire dans les couloirs [1, 2] ou bien dans les tunnels. En cas du feu en tunnel [3], la ventilation a pour premier objectif de faciliter la sécurité des usagers [4] en les abritant des fumées, d'éviter les explosions en empêchant la formation des poches de gaz inflammables et de limiter les dommages subis par le tunnel lui-même. Pour cela, le désenfumage est un processus qui a été largement étudié [5, 6]. L'extraction des fumées par un système de ventilation transversale a été élaborée expérimentalement par Vauquelin O. et Mégret [7]. Brahim Kalech et al. [8], ont étudié l'effet des deux systèmes de ventilation sur la distribution de la température en utilisant le code CFD (FDS). J-Seong Ko et al [9], ont déterminé le taux d'échappement d'air optimal à travers une conduite en présence d'une ventilation longitudinale. Dans le but d'investiguer l'influence de l'intégration d'un conduit vertical sur l'efficacité d'extraction, C.G. Fan et al [10], ont analysé les phénomènes numériquement par la LES.

Dans le même contexte, l'objectif de cette étude est une contribution d'une part, à l'étude d l'efficacité d'extraction en fonction du rapport de forme du conduit vertical. D'autre part, d'étudier la stratification thermique qui s'établit dans le tunnel.

### 2. Description du problème

#### 2.1. Configuration géométrique et conditions aux limites



Tableau 3: Différentes valeurs du rapport d'aspect étudiées pour faire varier la forme du conduit.

Tests	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
$l$ (m)	0.08	0.16	0.32	0.64	1.28
$L$ (m)	1.28	0,64	0.32	0.16	0.08
$r = \frac{L}{l}$	16	4	1	0.25	0,0625
$s$ (m <sup>2</sup> )	0.1024	0.1024	0.1024	0.1024	0.1024

## 2. 2. Modélisation mathématique

FDS [11, 12] est un outil numérique utilisé pour la simulation du feu en cas d'incendie. En tant que code CFD, il permet la résolution des équations de Navier-Stokes à faible nombre de Mach [12]. Pour modéliser la turbulence, FDS utilise la DNS et la LES. Dans ce travail, nous avons choisi la LES afin de balayer les différents spectres du problème. Le modèle de Smagorinsky [13] est couramment utilisé par la LES. La viscosité turbulente est obtenue par un équilibre entre l'énergie produite et celle dissipée. Elle est définie dans FDS par :

$$\mu_{LES} = \rho (c_s \Delta)^2 [2\bar{S}_{ij} : \bar{S}_{ij} - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \bar{u})^2]^{1/2} \quad (1)$$

Où  $\Delta = (\delta_x \delta_y \delta_z)^{1/3}$ .

La condition de CFL est utilisée pour justifier la stabilité numérique. Ce critère s'écrit sous la forme suivante:

$$\delta t \cdot \max\left(\frac{|U_{ijk}|}{\delta X}, \frac{|V_{ijk}|}{\delta Y}, \frac{|W_{ijk}|}{\delta Z}\right) < 1 \quad (2)$$

## 3. Efficacité d'extraction

De manière intuitive, ce que l'on souhaite, c'est extraire la plus grande quantité possible des fumées présentes dans le tunnel par l'intermédiaire du notre système adapté à l'extraction. Elle constitue le rapport entre le débit volumique du taux de la fumée extraite par rapport à celle produite. Elle peut être écrite sous la forme suivante [7]:

$$\varepsilon = \frac{Q_{es}}{Q_s} \quad (3)$$

Dans notre étude,  $Q$  représente le taux de HRR réalisé par la fumée.

$$\text{Avec} \quad Q = \iint_S U [T - T_0] d\sigma = \sum_j \sum_k U_{jk} [T_{jk} - T_0] \Delta Y \Delta Z \quad (4)$$

Où  $U_{jk}$  et  $T_{jk}$  sont les composantes de la vitesse longitudinale et de la température respectivement, qui sont calculées dans chaque plan.  $T_0$  est la température ambiante alors que  $\sigma$  représente la section du chaque plan utilisé.

### 3. 1. Influence de la section du conduit

La figure 2 présente l'efficacité du conduit calculée à différentes sections [0.01 m<sup>2</sup> - 0.36 m<sup>2</sup>]. Elle indique que l'efficacité augmente avec l'augmentation de la section. On note considérablement que l'efficacité minimale est enregistrée pour la plus faible section (21.57 %) et l'efficacité maximale (81.46 %) est obtenue pour le cas du conduit le plus grand (0.36 m<sup>2</sup>). Ceci montre bien l'existence d'une perturbation au niveau du processus d'extraction de la fumée chaude qui déclenche la réduction de l'efficacité relative aux conduits les plus larges.

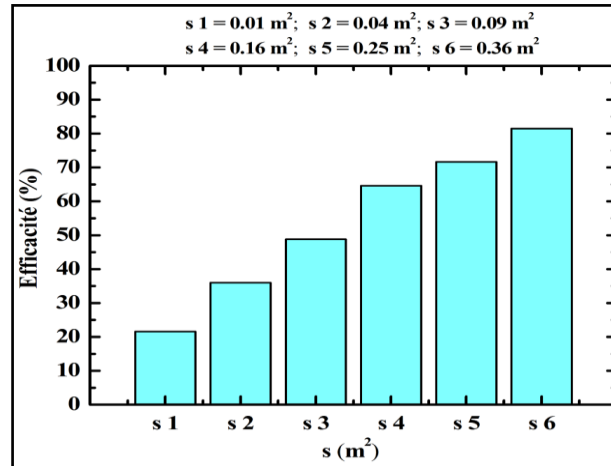


Figure 2: Efficacité calculée à différentes sections du conduit

### 3.2. Influence de la hauteur du conduit

La répartition de l'efficacité d'extraction de la fumée à différentes hauteurs du conduit est illustrée dans la figure 3. Elle montre que cette quantité augmente légèrement avec l'augmentation de la hauteur. L'efficacité dans ce cas ne dépasse jamais le 35 % ce qui illustre bien que le processus d'extraction de la fumée par un conduit d'une hauteur plus petite que 0.7 m n'est pas significatif. Pour une hauteur de 0.8 m, l'efficacité est bien prévue (48.8 %). Cependant, lorsque H = 1 m, on a obtenu un maximum de pourcentage (61.75 %). Il importe de souligner que même lorsque la hauteur du conduit est égale à la dimension caractéristique de la hauteur du tunnel, on a obtenu toujours une efficacité plus au moins moyenne (Figure 3). Le mouvement de la fumée est contrôlé par la force d'inertie verticale induite par l'effet de cheminée. Il importe également de souligner que la force d'inertie verticale de la fumée augmente avec l'augmentation de la hauteur du conduit. Dans cette situation, la perturbation au niveau de l'interface air-fumée est renforcée et l'air froid sera extrait facilement. Par conséquent, l'efficacité de ce système diminue progressivement.

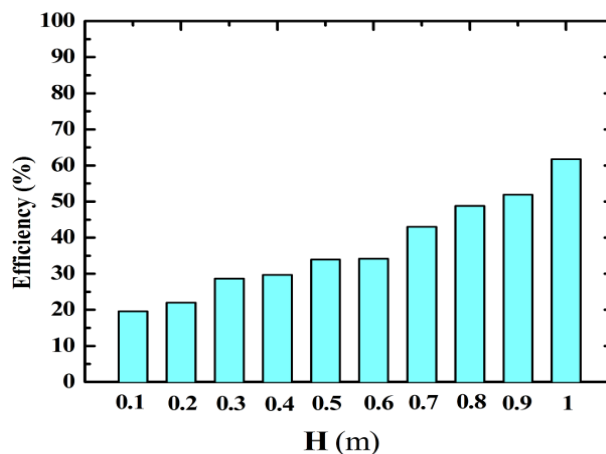


Figure 3: Efficacité calculée à différentes hauteurs du conduit

### 3.3. Influence de la forme du conduit

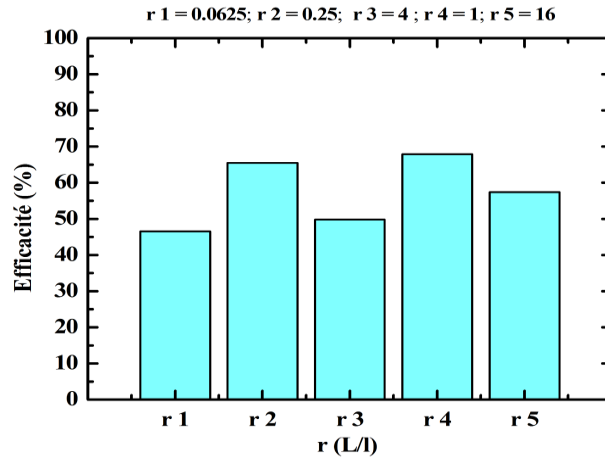


Figure 4 : Efficacités calculées à différents rapports d'aspect (r) du conduit : 5 différentes formes

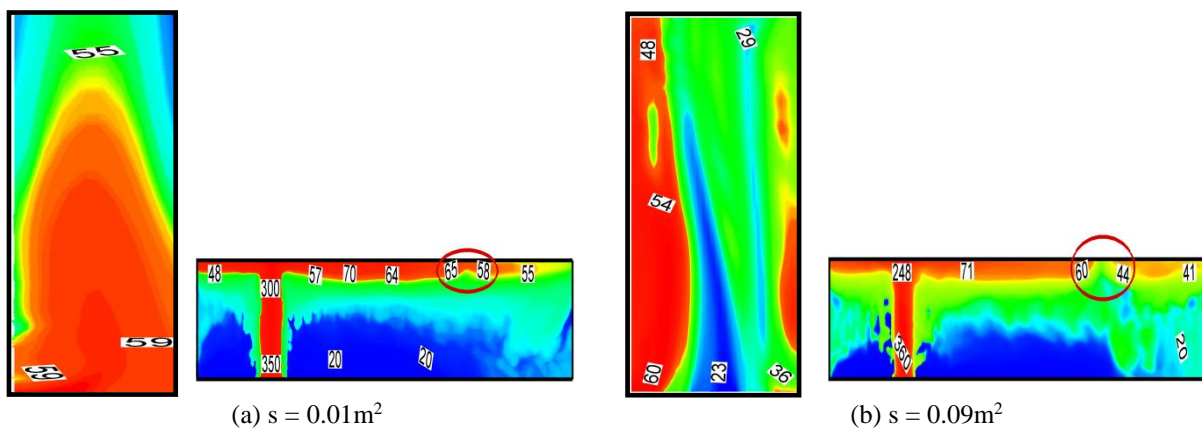
Nous nous intéressons dans cette partie de réaliser cinq différentes formes du conduit. Comme il est bien illustré dans la figure 4, l'efficacité est en fonction du rapport d'aspect (r). Nous avons constaté l'apparition des deux niveaux de pic. Le premier niveau est caractérisé par des pics les plus faibles qui correspondent à  $r = 0.0625$  et  $r = 1$ . Dans ces cas, même le pourcentage de 50 % n'est pas encore identifié ce qui permet d'obtenir une faible performance de l'extraction par ce conduit. Le deuxième niveau est caractérisé par les pics les plus élevés qui correspondent à  $r = 0.25$ ,  $r = 4$  et  $r = 16$ . Dans ces cas, l'efficacité ne dépasse jamais une valeur moyenne (67.88 %). Il est intéressant de noter que malgré les valeurs les plus élevées du rapport d'aspect (4 et 16) et avec la stabilité de la section ( $0.16 \text{ m}^2$ ), l'efficacité maximale n'est pas encore atteinte.

Nous avons conclu alors que la dimension du conduit par variation de la forme constitue un paramètre non significatif.

## 4. Distribution de la température dans le tunnel et le conduit

### 4.1. Influence de la section du conduit

Nous avons indiqué précédemment qu'un effet perturbateur a été détecté lors du processus d'échappement de la fumée ce qui amène à la réduction de l'efficacité du système conduit. En revanche, il influe sur l'efficacité du point de vue quantitative. Nous laissons place aussitôt à une description plus fine de la distribution du champ thermique afin de prouver explicitement le mécanisme de base ainsi amorcé. Les isovaleurs de la température, calculées dans le plan transverse ( $Y = 1$ ) et situées dans le conduit et le tunnel à différentes sections sont présentées dans la figure 5. La partie gauche révèle les isovaleurs de la température dans le tunnel.



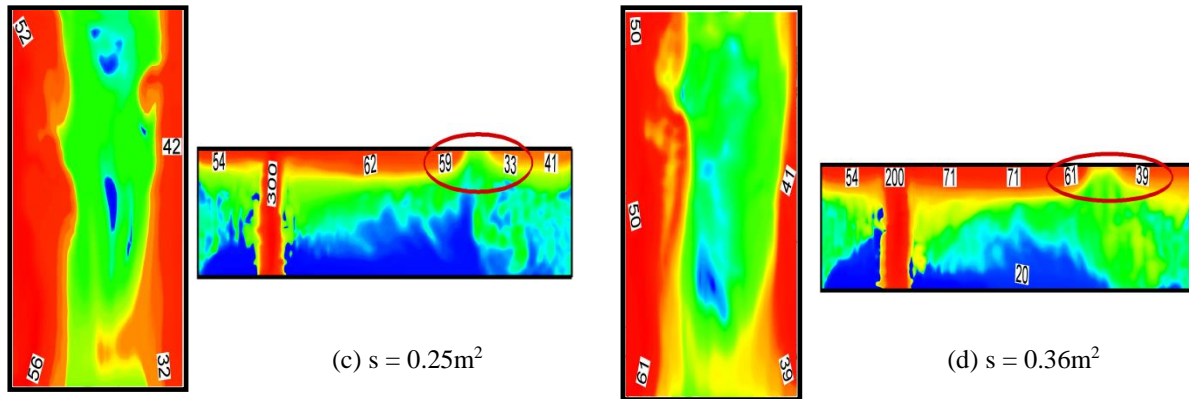


Figure 5: Champs de la température dans le plan (XZ) à différente section du conduit, dans le tunnel (la zone de fuite est circulée en rouge) et dans le conduit (coté gauche : système- conduit ; coté droite : tunnel)

Comme il est bien distingué dans la figure 5a, lorsque la perturbation au niveau de l'interface air-fumée commence à s'interagir sous l'action du faible effet de la force d'inertie verticale, la stratification des deux couches se déstabilise partiellement. Une faible quantité d'air frais peut s'intégrer dans la couche de la fumée, puis se mélanger avec ce gaz, là ou une zone de fuite apparait simultanément. Les fumées dans cette région seront incapables de séparer du fond du conduit et par la suite de s'échapper à travers un conduit de section  $0.01 \text{ m}^2$ . En augmentant la section du conduit et sous l'action moyenne de la force d'inertie verticale, les zones des fuites apparaissent plus intensivement (Figures 5b, 5c et 5d). On remarque qu'un mélange d'air et de la fumée se produit. Nous sommes encore dans une zone sous influence de la dilution gazeuse. Il est très clair que la fumée est extraite avec une quantité d'air à travers ce système de section moyenne et serait la cause de l'inefficacité d'extraction naturelle de ce gaz dans ces cas (Figure 2 et Figure 5b). Toutefois, Pour un conduit de section  $s = 0.36 \text{ m}^2$  (Figure 5d), la température au niveau du plafond est de l'ordre de  $61^\circ\text{C}$  et environ  $39^\circ\text{C}$  dans la partie gauche et droite de la zone de fuite successivement. De la même façon, la partie inférieure du conduit est caractérisée par les mêmes niveaux du champ de la température ( $61^\circ\text{C}$  dans la partie gauche et  $39^\circ\text{C}$  dans la partie droite).

Il existe également une zone ou la température de stagnation est moyenne au niveau du point de séparation (Figures 5c et 5d). Les fumées sous l'effet de la force d'inertie horizontale atteignent le niveau surfacique et pénètrent dans cette région. Il s'agit immédiatement du phénomène de la séparation de la couche limite.

On constate que les zones de recirculation en aval du point de séparation, les fumées adhèrent au mur du conduit, sont sous l'influence d'un semi-collage gazeux ce qu'on appelle la couche limite d'attachement « Coanda effect ». Les Figures 5b, 5c et 5d nous permettent de comprendre cette situation. Les fumées chaudes présentent le comportement adhérent d'un panache plan qui vont être échappées par la suite suivant cette forme par la coté gauche et droite du conduit. Les Figures 5c et 5d révèlent l'existence d'un mélange gazeux qui peut extraire indirectement à travers le centre de la partie supérieure. Par conséquent, on a obtenu une perte en pourcentage de 20 % (Figure 2 et Figure 5d). Cette perte constitue en faite le pourcentage de l'air frais.

#### 4.2. Influence de la hauteur du conduit

La figure 6 présente la distribution de la température dans le tunnel et dans le conduit à différentes hauteurs pour une section  $s = 0.09 \text{ m}^2$ . Les résultats pour une hauteur du conduit de 0.5, 0.7 m, 0.9 m et 1 m sont choisis.

Les figures 6a et 6b montrent que les zones de fuite et leurs points sommets se prolongent graduellement avec l'augmentation de la hauteur du conduit. Pour une hauteur de 0.5 m, ces points sommets atteignent le centre du conduit sous forme d'une faible ligne verticale telle que la température est d'environ  $24^\circ\text{C}$  au fond de la ligne et d'environ  $29^\circ\text{C}$  dans sa partie supérieure. Lorsque  $H = 0.7 \text{ m}$ , la limite inférieure de la couche de la fumée s'interagit avec la frontière médiane du tunnel. La diffusion des points sommets s'amplifie très profondément et déclenche un début d'apparition d'une deuxième ligne verticale d'air. Dans cette situation, les fumées sont extraites initialement sous forme d'un déversement adhérent d'un panache. Cependant, il existe toujours un espace suffisant au niveau du centre qui empêche les fumées de se décharger. De ce fait, l'air entre au sein du conduit où il peut atteindre le niveau supérieur (Figures 6a et 6b). C'est une raison alors d'avoir une diminution de l'efficacité d'extraction de ce gaz toxique (voir Figure 3). En augmentant la hauteur de notre système d'extraction, et sous l'effet de la grande force d'inertie verticale de l'effet de cheminée, la stratification de la couche de la fumée se détecte ce qui entraîne l'apparition remarquable des zones de fuite (Figures 6c et 6d). Lorsque l'épaisseur de cette couche devient très négligeable, des zones de dépression sont apparues et facilitent l'atténuation des points sommets des zones de fuite à la partie haute du conduit, là ou une grande quantité d'air

frais serait extraite directement. Ce phénomène qui influe le processus d'extraction de la fumée est appelé phénomène de poinçonnement « plug-holing ».

La figure 6c indique l'apparition des deux couches linéiques d'air froid. L'interaction entre ces deux dernières (Figure 6d) affaiblit le déversement adhérent du panache, et l'air froid sera déchargé facilement à travers le conduit. Donc l'espace volumineux concerné pour faire extraire le gaz toxique se réduit significativement ce qui sert à obtenir une efficacité moyenne comme il est bien montré dans la figure 3.

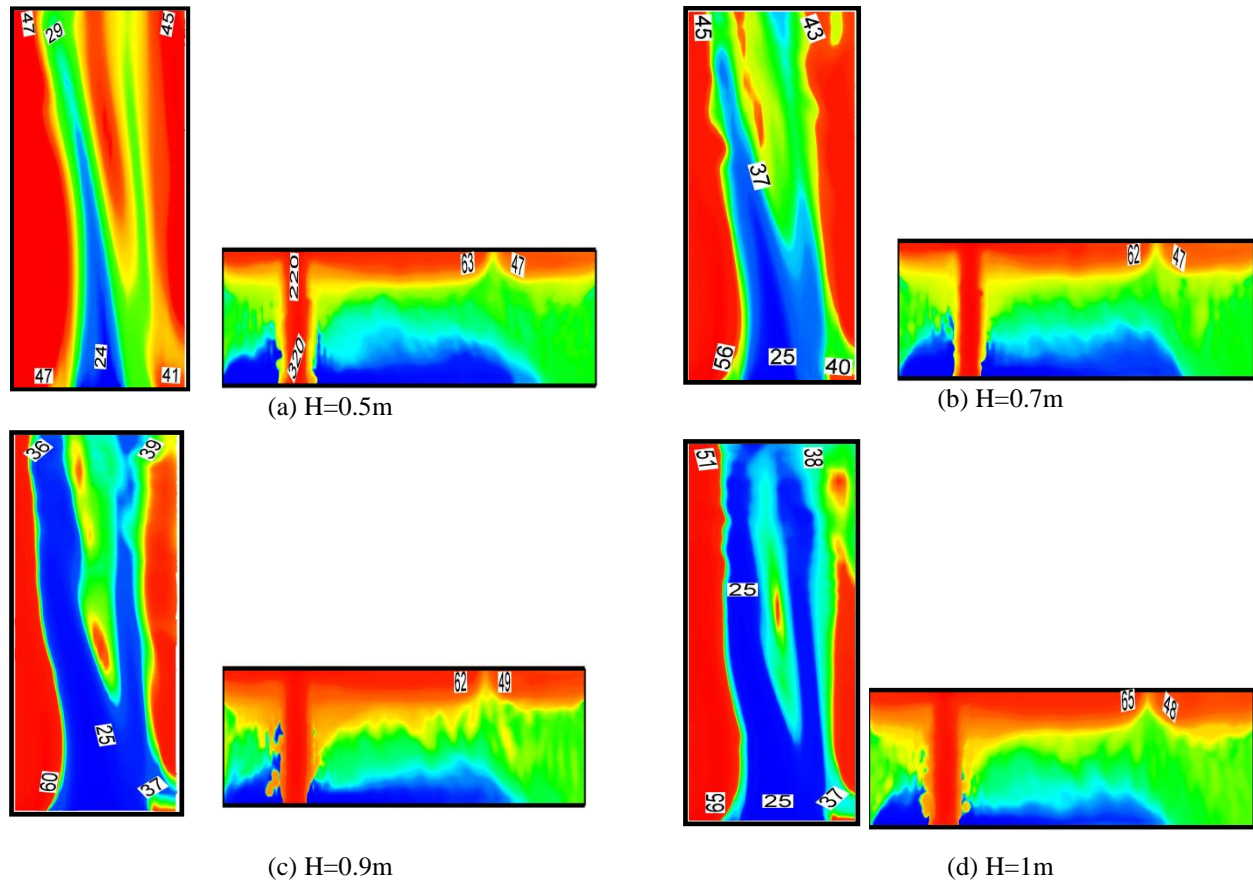


Figure 6 : Champs de la température dans le plan (XZ) à différente hauteur du conduit, dans le tunnel et dans le conduit (coté gauche : système- conduit ; coté droite : tunnel)

On peut constater alors que la nature de l'écoulement au sein d'un conduit à différente hauteur est peut être expliquée par la fonction combinée entre le comportement d'un panache plan dans des zones proches et les deux couches linéiques verticales du courant d'air ambiant. Ces deux dernières observations s'appuient immédiatement pour présager le processus d'échappement de la fumée chaude par le conduit de sa coté gauche et droite après la pénétration du fluide.

## 5. Etude de la stratification thermique

L'état de la stratification des fumées est, à la base, un problème terminologique. C'est en fait une considération au sens thermique puisque les fumées, ou plus exactement les concentrations en polluants, sont reliées à la température. Un critère quantitatif est nécessaire pour introduire ces constatations. Il est souvent commode d'adapter une similitude entre la position de ce gaz toxique et le champ de la température. Un des critères de stratification est de définir des températures en différents points du tunnel. On prend par exemple, le paramètre de Newman [14]. Il est défini à partir de la température au plafond du tunnel  $T_c$ , de la température au sol  $T_f$ , de la température moyenne dans la section du tunnel considéré  $T_{avg}$  et de la température de l'écoulement d'air ambiant  $T_0$  :

$$S = \frac{T_c - T_f}{T_{avg} - T_0} \quad (5)$$

Ce critère représente le degré de la stratification et la condition  $S > 1.7$  [14] estime un bon critère pour assurer la stratification de la fumée.

Sur la base de ces observations, on a tracé le paramètre de la stratification dans la zone aval, en fonction de la longueur adimensionnelle du tunnel ( $X/H$ ). Ce paramètre est illustré dans le plan  $Y = 1$  à différentes section, hauteur et forme du conduit (Figures 7, 8 et 9).

Les figures 7, 8 et 9 présentent ce critère calculé en amont du conduit. Il semble être toujours supérieur à la condition critique (1.7) ce qui pilote la stabilité de la stratification entre les 2 couches soit par changement de la section, de la hauteur ou bien de la forme. Donc la couche amont est bien stratifiée. Il importe de souligner que ce paramètre est un peu élevé pour la plus grande section et la plus grande hauteur. On note par exemple que  $S = 3.5$  en  $(X/H) = 3.5$  à la fois pour une section de  $0.36 \text{ m}^2$  (voir Figure 7a) et pour une hauteur de 1 m (voir Figure 8a). Si l'on part de l'état amont à l'état aval, et les fumées seront impactées par la piège de se contre plaquer avec le coin droite du conduit, on se dirige alors progressivement vers les effets d'entraînement plus prononcés aux interfaces fumée-air frais. Les niveaux des températures sont notablement réduits par l'apport d'air ambiant et la stratification est détruite. On se référant à ces constatations, nous avons tracé la répartition évolutive de ce paramètre en aval du conduit en fonction de la longueur adimensionnée ( $X/H$ ) comme il est bien schématisé dans les figures 7b, 8b et 9b. Dans une première étape et lorsqu'on fait varier la section du conduit (Figure 7b), il est très bien claire que l'évolution de  $S$  est divisée en deux parties. Une région au dessus de la ligne correspondante à  $S = 1.7$  et l'autre partie est située dans le plan au dessous. Donc la couche aval dans ce cas est clairement détectée.

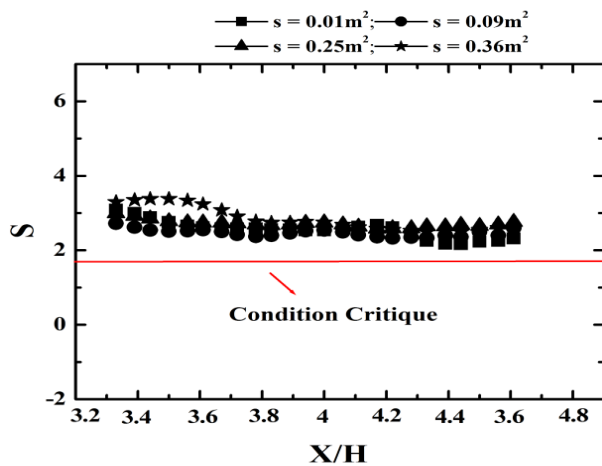


Figure 7a : Evolution de  $S$  en fonction de la longueur adimensionnelle du tunnel en amont du conduit à différentes sections

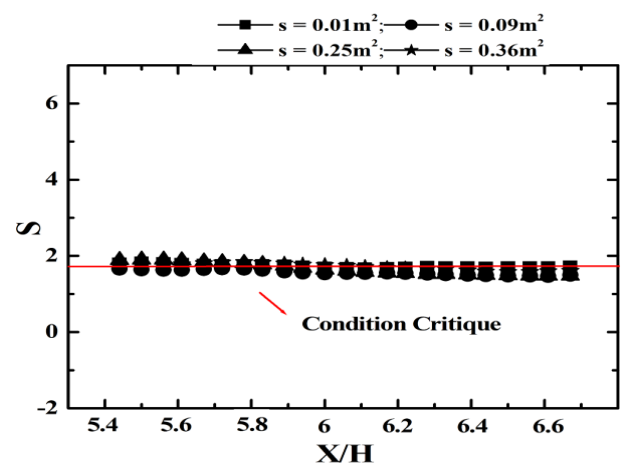


Figure 7b : Evolution de  $S$  en fonction de la longueur adimensionnelle du tunnel en aval du conduit à différentes sections

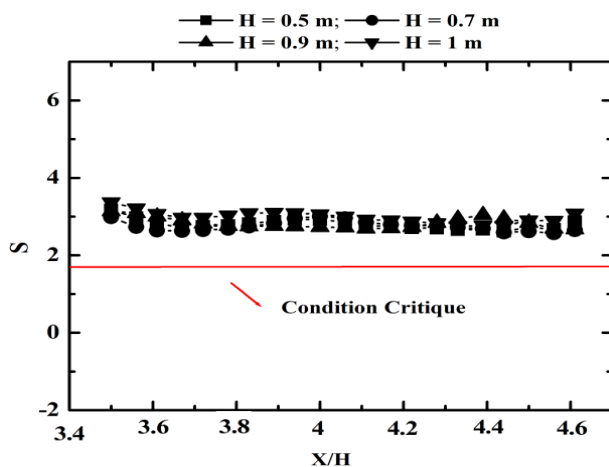


Figure 8a : Evolution de  $S$  en fonction de la longueur adimensionnelle du tunnel en amont du conduit à différentes hauteurs

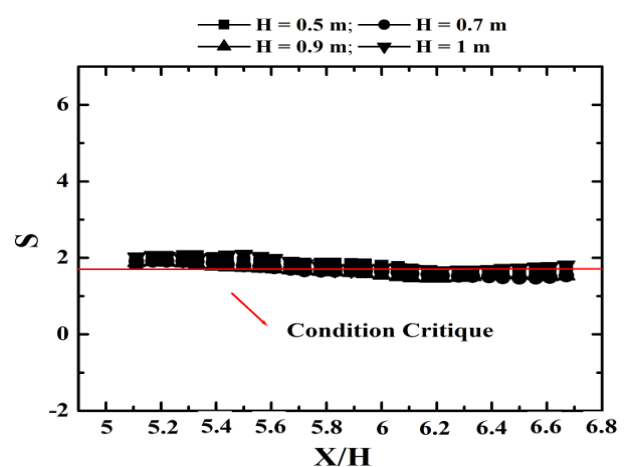


Figure 8b : Evolution de  $S$  en fonction de la longueur adimensionnelle du tunnel en aval du conduit à différentes hauteurs



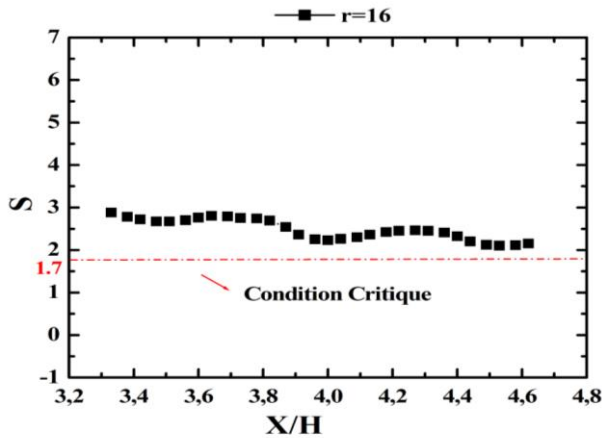


Figure 9a : Evolution de S en fonction de la longueur adimensionnelle du tunnel en amont du conduit pour  $r = 16$

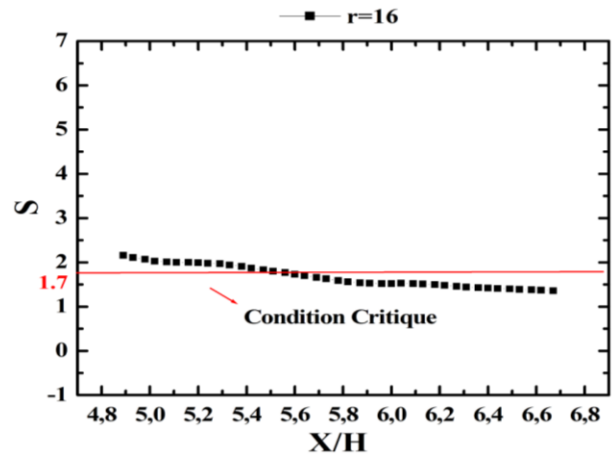


Figure 9b : Evolution de S en fonction de la longueur adimensionnelle du tunnel en aval du conduit pour  $r = 16$

Dans une deuxième étape, on a tracé ce critère à différentes hauteurs. De la même façon nous avons distingué l'existence des 2 différentes répartitions (Figures 8b). Nous sommes encore dans une zone sous l'influence de l'entraînement turbulent causé par la nappe froide qui favorise la cassure de la nappe chaude en aval du conduit. Pour le cas  $r = 16$  (Figure 9a), on constate que la répartition du paramètre de stratification illustre bien la destratification de la couche aval. On note la présence de deux zones :

$4.8 \leq X/H \leq 5.41$  : une stratification est permise (stable) vue que  $S > 1.7$ .

Et

$X/H > 5.7$  : une destratification est persiste vue que  $S < 1.7$ .

## 6. Conclusion

Dans ce papier nous avons analysé numériquement à travers la (LES) l'influence des configurations géométriques d'un conduit situé au niveau du plafond sur l'efficacité d'extraction. Nous avons également étudié la stratification thermique, en introduisant un critère numérique pour évaluer le degré de la stratification basée sur Newman (1984).

## Nomenclatures

	Symboles		Symboles grecs
	$\delta X$	dimension d'une maille dans la direction des	$\mu$
	$X$		viscosité dynamique
	$C_S$	nombre de Smagorinsky	$\rho$
			densité
	$\Delta$	caractéristique de la longueur de la maille	
	$U_{ijk}$	vecteur de vitesse suivant la direction de l'axe	$i$
	$X$		interne
	$\bar{S}_{ij}$	tenseur de contrainte	$j$
	$\bar{u}$	vitesse moyenne	$k$
			interne

Indices

## Références

[1] C.H. Yoon, M.S. Kim, J. Kim, The evaluation of natural ventilation pressure in Korean long road tunnels with vertical shafts, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 21, Page 472, 2006.

- [2] J.Ji, Z.H. Gao, C.G. Fan, W. Zhong, J.H. Sun, A study of the effect of plug-holing and boundary layer separation on natural ventilation with vertical shaft in urban road Tunnel fires, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 55, Pages 6032-6041, 2012.
- [3] Falin Chen, J.C. Leong, Smoke flow phenomena and turbulence characteristics of tunnel fires, *Applied Mathematical Modelling*, Volume 35, Pages 4554–4566, 2011.
- [4] Oucherfi Myriam, Contribution `a l'`etude de la ventilation transversale lors d'un incendie en tunnel routier, *Thèse de Doctorat*, L'université de Claude Bernard- Lyon I, 2009.
- [5] Yanfu Wang et al, Full-scale experiment research and theoretical study for fires in tunnels with roof openings, *Fire Safety Journal*, Volume 44, Pages 339–348, 2009.
- [6] Ji Jie, Experimental investigation on influence of smoke venting velocity and vent height on mechanical smoke exhaust efficiency, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 177, Pages 209–215, 2010.
- [7] O. Vauquelin, O. Mégret, Smoke extraction experiments in case of fire in a tunnel, *Fire Safety Journal*, Volume 37, Pages 525–533, 2002.
- [8] K. Brahim, B. Mourad, E. C. Afif and B. Ali, Control of Smoke Flow in a Tunnel, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Volume 6, Pages 49-60, 2013.
- [9] Ju-seog Ko et al, Determination of the applicable exhaust airflow rate through a ventilation shaft in the case of road tunnel fires, *Safety Science*, Volume 48, Pages 722–728, 2010.
- [10] C.G. Fan et al, Effects of vertical shaft arrangement on natural ventilation performance during tunnel fires, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 73, Pages 158–169, 2014.
- [11] K. Mc Grattan, R. M. Dermott, S. Hostikka, J. Floyd , Fire Dynamics Simulator (version 5)-User's Guide, National Institute of Standards and Technology, Baltimore, Maryland, NIST Special Publication, 1019-5, 2010.
- [12] K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, H. Baum, R. Rehm, W. Mell, R. M. Dermott , Fire Dynamics Simulator (version 5)-Technical Reference Guide, National Institute of Standards and Technology, Baltimore, Maryland, NIST Special Publication, 1018-5, 2010.
- [13] J. Smagorinsky, 1963. General circulation experiment with the primitive equations, I. The basic experiment, *Monthly Weather Review*, Volume 91, Pages 99-164.
- [14] Jeffrey Newman, Experimental Evaluation of Fire-Induced Stratification, *Combustion and Flame*, Volume 57, Pages 33-39, 1984.