

Etude de l'extraction des fumées dans un tunnel routier

*Brahim Kalech, Mourad BOUTERRA, Afif EL CAFSI, Ali BELGHITH
Faculté des Sciences de Tunis Campus Universitaire 2092 ELMANAR, TUNISIE

*(auteur correspondant: ib.kalech.fst@gmail.com)

Résumé: Le travail consiste à étudier par la méthode Simulation des Grandes Échelles (LES), avec le code de calcul FDS 5.5, l'extraction des fumées d'incendie dans un tunnel routier, tel qu'il se base sur les stratégies de ventilation naturelle, longitudinale et semi transversale.

L'ensemble des résultats donne des informations et indications sur les conditions de sécurité ainsi que l'efficacité d'extraction, qui joue un rôle crucial. L'écoulement semble découpé en deux couches séparées par une zone de mélange (zone intermédiaire). La stratégie de ventilation longitudinale semble inefficace surtout pour des tunnels bidirectionnels. La stratification favorise l'extraction des fumées dans la stratégie de ventilation naturelle. La stratégie transversale montre une grande performance au désenfumage.

Mots clés: Tunnel; Ventilation; Extraction; FDS;

1. Introduction :

Les enquêtes sur les incendies dans les tunnels ont démontré que la fumée était le facteur le plus mortel, où de grandes quantités de gaz toxiques ont été libérées. La ventilation doit également être envisagée pour les tunnels routiers pour fournir le contrôle nécessaire des fumées et des gaz chauds résultant d'un incendie dans le tunnel et de maintenir un environnement approprié pour l'évacuation d'urgence et de sauvetage dans le chemin d'évacuation. La méthode choisie doit être la plus économique en termes de coûts de construction et d'exploitation. Les facteurs qui déterminent la stratégie de ventilation sélectionnée comprennent la longueur du tunnel, l'environnement immédiat; volume de trafic; sens de la circulation (unidirectionnel, bidirectionnel), et la composition du trafic. Les systèmes de ventilation couramment installés dans les tunnels routiers sont longitudinaux, semi-transversaux, transversaux partiels, systèmes de ventilation transversaux et naturels. Il existe de nombreuses variantes et combinaisons de systèmes. Des simulations numériques ont également été tentées de prédire le développement de l'incendie et à enquêter sur l'efficacité des différentes méthodes de contrôle de la fumée dans les tunnels [1, 2, 3].

Lin et al [4] ont étudié la performance des différentes stratégies d'extraction de fumée pour un tunnel, la puissance a été autour de 100 MW pour un scénario d'incendie. Les distributions de la propagation de la fumée, de CO, de la visibilité et de la température ont été analysées. Il a été constaté que la visibilité de la fumée et la température sont les facteurs clés pour l'évacuation en toute sécurité du personnel dans le tunnel.

Tong Yan et al [5] ont étudié expérimentalement la distribution de la température et de la vitesse de la fumée, des tests de combustion à grande échelle ont été menés dans un tunnel routier à ventilation naturelle. Les sources de feu ont été placées à des endroits différents avec une puissance autour de 5 MW.

La distribution longitudinale de la température et la température de la fumée sous le plafond sous différentes vitesses de ventilation longitudinale dans les incendies en tunnel a été étudiée expérimentalement et numériquement [6, 7].

Hwang et al [8] ont étudié la vitesse critique de ventilation et la description de la stratification et de la répartition de la température dans les tunnels. Hwang et ses collaborateurs ont étudié la stratification fondée sur l'étude expérimentale de Newman. La stratification de la température dans les incendies en tunnel a été décrite par le modèle de Froude. Une étude analytique et comparative des profils longitudinaux de la concentration en CO et de la température des fumées dans un tunnel a été étudiée par LH Hu et al [9].

Dans cette étude, nous proposons d'examiner la capacité des trois stratégies de ventilation, naturelle, longitudinale et transversale.

2. Modèle numérique:

2.1. Comparaison numérique-expérimentale :

Le code FDS est développé par NIST pour étudier le comportement du feu et d'évaluer la performance des systèmes de protection contre les incendies dans les tunnels, les bâtiments etc.

Le programme d'ordinateur peut être utilisé pour analyser les problèmes liés au feu, tels que la distribution de la température, de la vitesse et de la concentration. FDS a été validé [10, 11] pour être capable de simuler la propagation de la fumée et le transport des espèces de CO d'incendie dans un canal. FDS résout numériquement une forme des équations de Navier-Stokes appropriées pour des faibles vitesses, le flux thermique d'entraînement avec un accent sur la fumée et le transport de chaleur d'un incendie. La turbulence est traitée par le biais du formulaire de Smagorinsky, Large Eddy Simulation (LES). Pour la réalisation de leurs expériences numériques, les auteurs [9] ont utilisé la configuration géométrique représentée sur la figure 1.

Dans notre étude, nous reprenons la même configuration avec les mêmes conditions aux limites. Le feu d'incendie est simulé par une source placée au centre du domaine. La puissance du feu est déterminée par la commande "HRRPUA, « Heat Release Rate Per Unit Area », prévue dans FDS. Le modèle de combustion utilisé est la fraction de mélange « Mixture Fraction » implanté dans le modèle turbulent LES (Large Eddy Simulation) de FDS. Le type de réaction est le pétrole brut, 'CRUDE OIL', selon la base des données des réactions du code FDS. Cette réaction est spécifique pour la production des fumées et la dispersion de CO provenant de la source d'incendie.

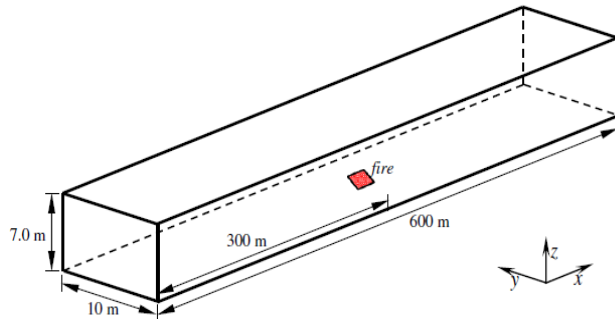


Figure 1. La configuration géométrique adoptée pour la comparaison.

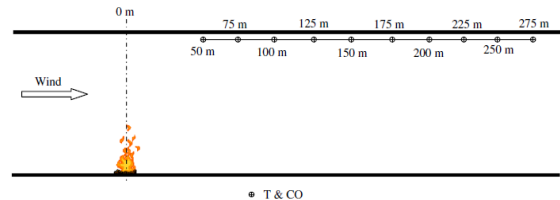


Figure 2. Les positions de prise de mesure de la température et de la concentration du CO dans la simulation numérique.

La puissance d'un tel incendie est de 4, 10 et 20 MW, ce qui est équivalent approximativement à la puissance d'une voiture, d'un bus et d'un camion respectivement. Les deux extrémités du tunnel sont naturellement ouvertes, sans vitesse initiale. La vitesse de la ventilation longitudinale de l'écoulement d'air frais le long du tunnel est mise en place par la commande "MISC" fournies par FDS. Ce dernier peut définir un vent initial traversant le domaine. Avec cette méthode, la vitesse de la ventilation longitudinale de l'écoulement d'air frais est uniforme. Sept niveaux des vitesses de la ventilation longitudinale sont considérés: 0, 0.5, 1, 1.5, 2.5, 3.5 et 4 m/s.

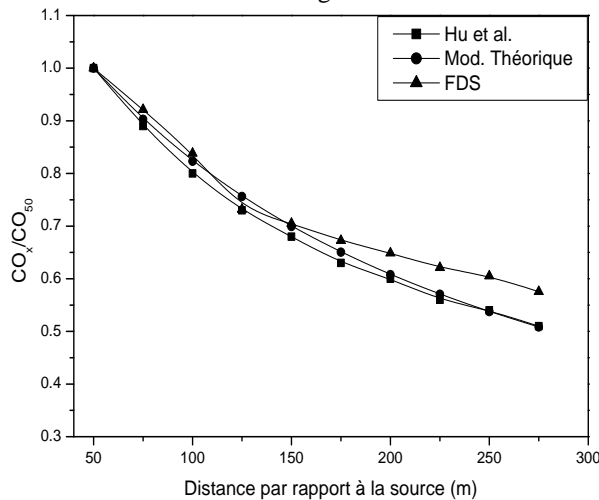


Figure 3. Distribution longitudinale de CO.

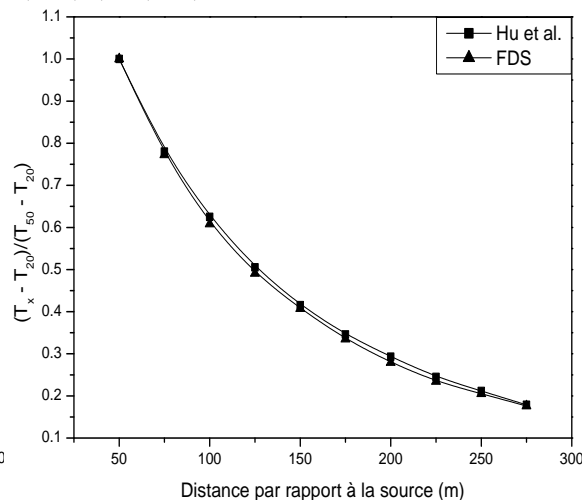


Figure 4. Distribution longitudinale de la température.

Pour décrire la dispersion des fumées par LES, deux points doivent être considérés [10, 11]:

- un maillage fin
- un choix du modèle de sous maille.

Pour cela la taille de la maille est choisie après beaucoup de tests : $\Delta x = 0.2\text{m}$ à la zone de la source, et 0.5m à la suite de la longueur du tunnel et $\Delta y = \Delta z = 0.2\text{m}$, et elle est uniforme sur toute la direction. La comparaison entre le résultat numérique et le modèle théorique est donnée dans la figure 3. Les résultats présentés sont donnés pour une puissance d'incendie de 4MW soumis à une ventilation longitudinale d'une vitesse de 0.5 m/s.

Les valeurs enregistrées de notre simulation numérique, pour la distribution longitudinale de CO, ont un taux d'erreur allant de 2 % à 5 %. Pour le taux d'erreur à la figure 4, les résultats ont montré qu'il ne dépasse pas 2 %. La concordance de nos résultats numériques avec ceux de Hu et al. est bien illustrée sur la distribution de la température. Une petite différence sur la distribution de CO est observée. Ceci peut être expliqué par le choix du maillage et les conditions aux limites sur le choix de fraction de mélange. Les résultats numériques sont en bon accord avec le modèle théorique validé expérimentalement et les résultats numériques de Hu et al. [9].

2.2. Configuration pour les simulations :

Après avoir réglé les paramètres de l'étude, les constantes du modèle de turbulence, les constantes du modèle de combustion et surtout le maillage, nous proposons d'adopter la configuration géométrique pour la simulation comme le montre la figure 5, avec ses dimensions géométriques. Pour toutes les simulations, le taux de dégagement de chaleur qui a été utilisé est 10 MW pour représenter le bac de kérosène de l'incendie. Les ouvertures dans le plafond ont des sections transversales carrées de largeur 2 m et la hauteur de l'épaisseur du faux plafond est égale à 0,2 m et la conduite d'évacuation est d'une hauteur égale à 1 m au-dessus du plafond. La figure 6 caractérise la stratégie de ventilation naturelle, celle de ventilation longitudinale et celle de ventilation transversale.

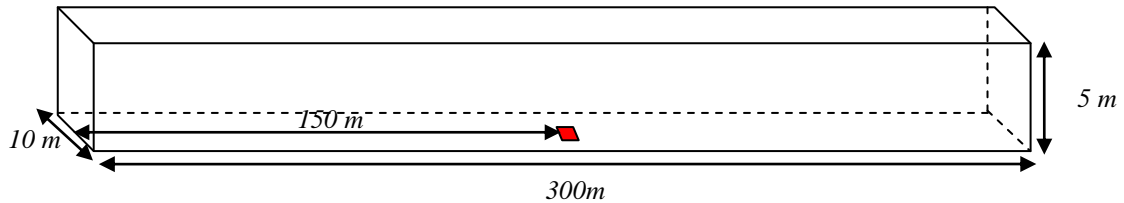


Figure 5. Geometrical configuration adopted for simulation.

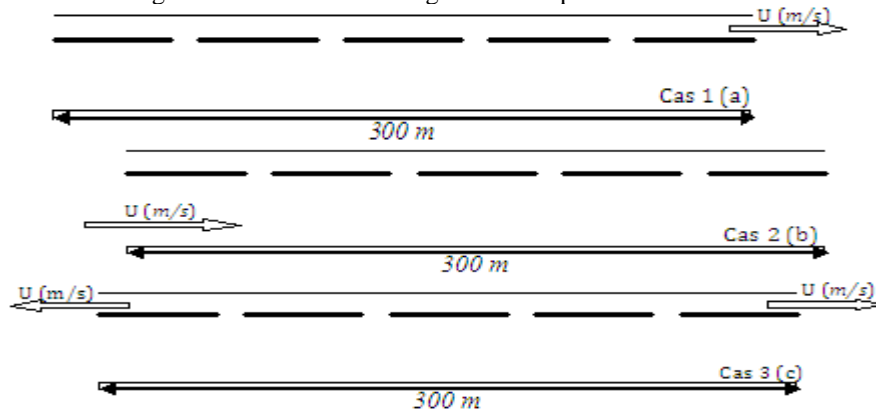


Figure 6. Configuration géométrique pour tous les cas de simulation.

3. Résultats et discussion :

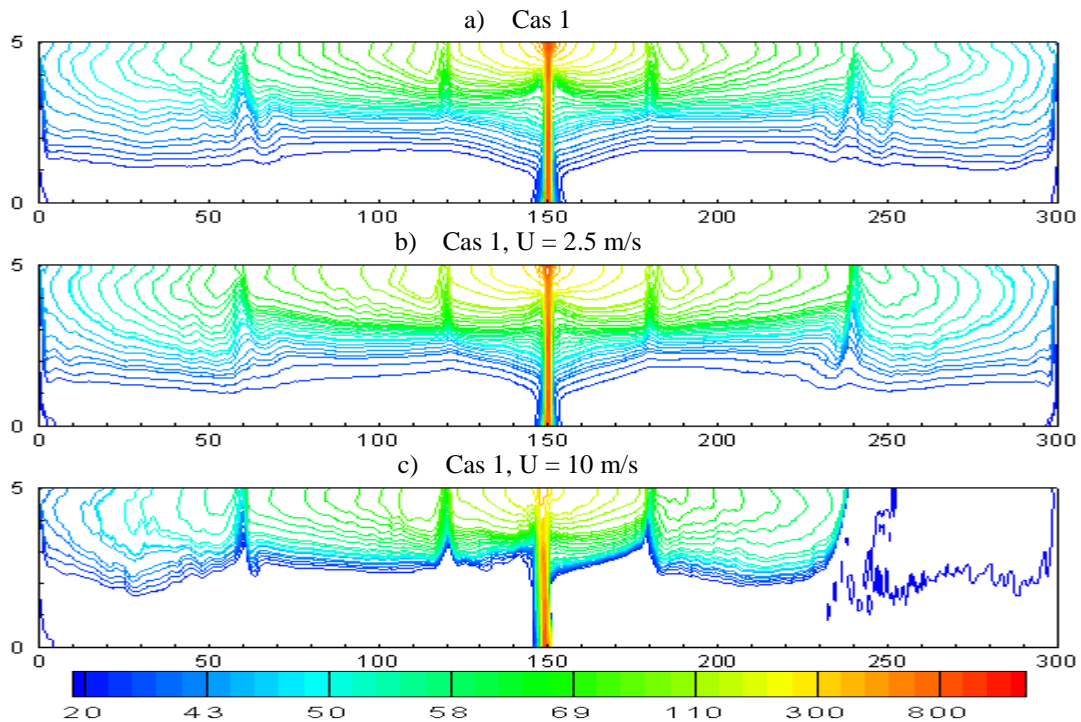


Figure 7. Champ de température en °C.

Les produits de combustion sont chauds par rapport à l'air ambiant et ils sont donc soumis à des forces de gravité ascendantes. Ils forment un panache ascendant au dessus de l'origine de l'incendie et entraînent de l'air ambiant. La vitesse d'aspiration n'influe pas l'inclinaison du panache et l'écoulement est symétrique.

Avec une vitesse d'aspiration vers la droite, et au côté amont du tunnel, la fumée s'écoule de façon similaire que celle sans aspiration ainsi que pour le champ de température (figure 7). Au côté aval du tunnel, la température maximale se produit à une distance, sous le plafond, à environ 50% de h et entre les ouvertures. Entre les deux ouvertures B et C, la température enregistrée atteint $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Entre les ouvertures A et B, ainsi que C et D, la température est entre 300 et $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. À la source d'incendie, la valeur de la température enregistrée est de l'ordre de $820\text{ }^{\circ}\text{C}$. À la moitié inférieure du tunnel, suivant le profil vertical, les valeurs de la température se dégradent rapidement, et les valeurs enregistrées sont de 20 à $110\text{ }^{\circ}\text{C}$. De part et d'autre des ouvertures A et D, la température est de 20 à $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En augmentant l'intensité de la vitesse d'aspiration, figure 7c, la couche des fumées s'écoule juste au dessous du plafond et le tunnel est rempli de fumée à 40% de h . Les températures, entre les ouvertures A et D, sont de 110 à $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. A gauche de l'ouverture A, la température atteint $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ au maximum. D'autre part, la partie droite du tunnel reste sans fumée et la température égale à celle du milieu ambiant, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La figure 8 montre la distribution de la température pour les stratégies de ventilation longitudinale et transversale. Les figures 8a et 8b montrent la situation quand la vitesse de l'air est inférieure à la vitesse critique de ventilation. On observe le phénomène de nappe de retour (*back-layering*), qui consiste en une couche stable de fumées en amont du foyer. La vitesse critique de la ventilation est de l'ordre de 2.2 m/s pour un incendie de puissance 10 MW .

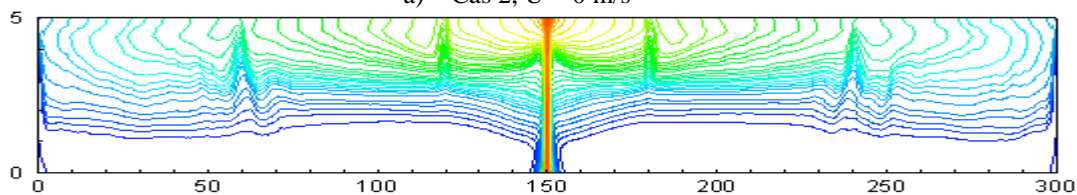
Sans vitesse longitudinale, (figure 8a), l'écoulement est symétrique. La température élevée est au dessous du plafond. Elle est entre 130 et $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. En appliquant une vitesse (figure 8b), la dispersion des fumées devient dissymétrique par rapport à l'injection. En amont, l'écoulement présente les mêmes caractéristiques de température que l'écoulement du courant d'air appliqué. En aval, la température la plus élevée est au dessous du plafond et elle se dégrade en fonction de la longueur du tunnel.

Ajoutant, qu'en amont de la source, on observe une accumulation des fumées de forte température allant de 94 à $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. La zone d'interaction représente un danger en raison de son étendue plus importante et de la déstratification des fumées en aval de la source.

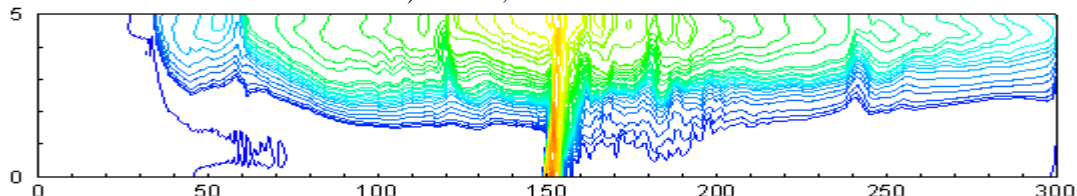
En augmentant l'intensité de la vitesse (figure 8c), la répartition de la température dans le tunnel n'est pas symétrique. En aval, la température, varie entre 175 et $450\text{ }^{\circ}\text{C}$, elle est plus élevée et se répartit dans la moitié supérieure du tunnel. Elle se dégrade en fonction de la longueur du tunnel. L'instabilité de l'écoulement influe sur la distribution de la température.

Physiquement, lorsqu'une vitesse longitudinale est appliquée sur la flamme, cela provoque son inclinaison et fait accroître la quantité d'air entraîné. La vitesse de combustion et les flux de chaleurs rayonnés sont plus importants. Face à cette situation, la flamme se comporte comme un pseudo-obstacle. La flamme s'incline sous l'effet de la pression dynamique exercée par la composante de la vitesse transverse et son enveloppe subit une modification structurelle. A l'amont ou à l'aval, on constate la présence d'une zone de surpression.

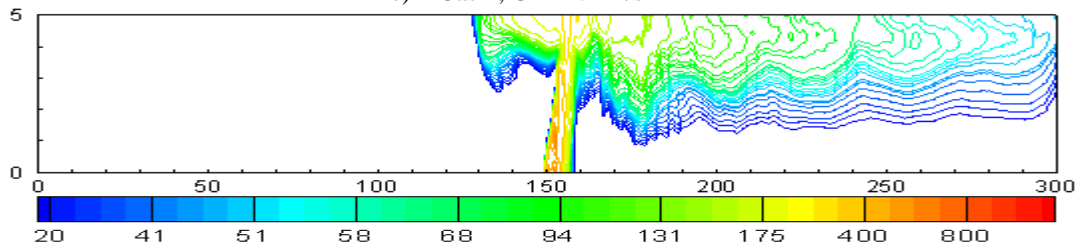
a) Cas 2, $U = 0\text{ m/s}$

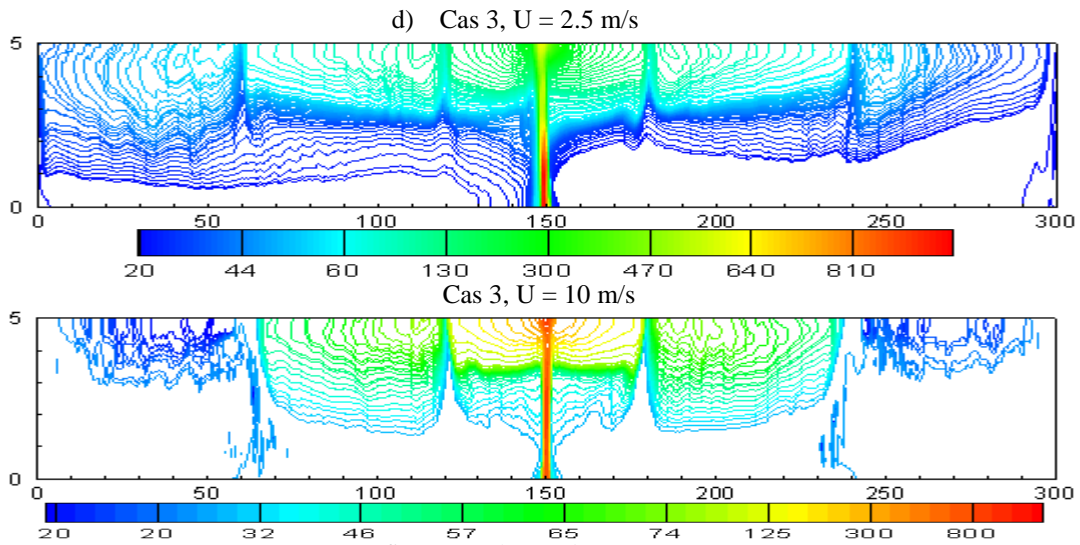


b) Cas 2, $U = 1.1\text{ m/s}$



c) Cas 2, $U = 2.2\text{ m/s}$





La figure 8. Champ de température.

Pour la stratégie de ventilation transversale, (figures 8d et 8e), l'écoulement est symétrique par rapport à la source d'incendie. Le panache se développe d'une façon symétrique de part et d'autre de la source. La température la plus élevée est enregistrée au dessous du plafond. Elle est entre les ouvertures A et D. Les valeurs enregistrées sont entre 65 et 800 °C.

Notons que la stratégie de ventilation longitudinale est importante en ce qui concerne la direction dans laquelle le feu se propage et la stratification des fumées. Les grandes vitesses de l'air ont tendance à limiter le phénomène du back-layering en amont et en aval du feu. La couche des fumées est observée sur une hauteur entre 40 et 60 % de h à partir du plafond. Sachant que la stratégie de la ventilation transversale est destinée à maintenir la couche stratifiée près du plafond. La fumée est ventilée à partir du gain au dessus du tunnel par l'intermédiaire du plafond. L'estimation de l'efficacité d'extraction d'une stratégie de ventilation est le plus important critère qui valorise la potentialité de la stratégie. Les calculs des taux d'extraction des fumées, pour les différentes stratégies de ventilation dans des conditions équivalentes et différentes, sont définis comme le rapport suivant :

$$\Phi_i = \frac{Q_i \cdot X_{CO,i}}{Q_s \cdot X_{CO,s}} \quad \text{tel que } \Phi_i \text{ est le taux d'extraction de l'ouverture (i } \equiv \text{ A, B, C et D).}$$

Où Q_i est le débit volumique de l'ouverture i et Q_s est le débit volumique de la source d'incendie. $X_{CO,i}$ est la fraction molaire du monoxyde de carbone à l'ouverture i et $X_{CO,s}$ est la fraction molaire du monoxyde de carbone à la source. L'efficacité d'extraction est égale à la somme des taux d'extraction à chaque ouverture.

La figure 9 donne les pourcentages d'efficacité d'extraction des fumées pour les trois stratégies de ventilation considérées dans notre étude.

La figure 9 (cas 2), adopté à la stratégie de ventilation longitudinale, montre que l'allure de l'efficacité d'extraction diminue en fonction de la vitesse longitudinale. En considérant que la vitesse longitudinale égale à 2.2 m/s est la vitesse critique de ventilation (U_c), l'efficacité d'extraction tend vers des faibles pourcentages d'extraction après la vitesse 1.1 m/s correspondant à $\frac{U_c}{2}$. L'application d'une vitesse longitudinale sur l'écoulement a des conséquences catastrophiques surtout sur la stratification des fumées comme on a montré précédemment. De même pour l'extraction des fumées.

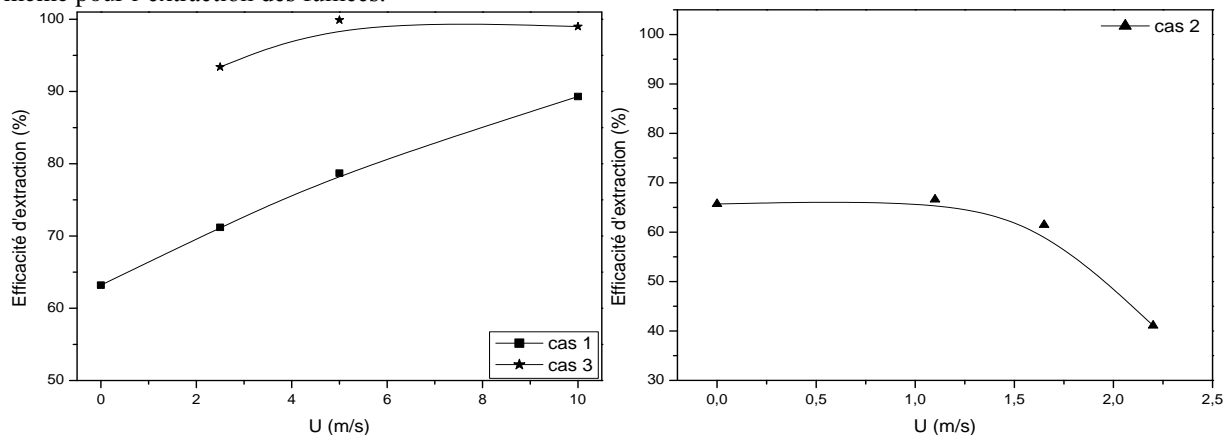


Figure 9. Efficacité d'extraction pour les stratégies de ventilation naturelle et transversale

Pour la stratégie de ventilation naturelle (cas 1), le pourcentage d'efficacité d'extraction varie de 63 à 87 %. L'aspiration à travers la conduite d'évacuation, créant une zone de dépression, nous bénéficions d'une grande quantité des fumées extraite.

Les pourcentages d'efficacité d'extraction sont supérieurs à 90 %, pour la stratégie de ventilation transversale (cas 3). Les pourcentages sont satisfaisants.

Qualitativement, une comparaison entre les pourcentages d'efficacité d'extraction pour les différentes stratégies de ventilation dans ces cas conduit au choix d'une stratégie de la ventilation optimale. Dans un tunnel avec trafic bidirectionnel, il semble dangereux de contrôler un scénario d'incendie avec la stratégie de ventilation naturelle-longitudinale. Il y a toujours un risque aux usagers. Néanmoins, la sécurité des usagers du tunnel est augmentée si les scénarios d'incendie possibles sont traités par une stratégie naturelle qui garantit la stratification de l'écoulement. La sécurité est acceptable en utilisant la stratégie de ventilation naturelle-transversale.

Conclusion

L'étude de la performance des stratégies de la ventilation, est le but de ce papier pour offrir les bonnes conditions aux usagers. Pour justifier le choix de la meilleure stratégie de la ventilation, différentes formes de stratégie ont été considérées, tenant compte du facteur déterminant caractérisé par l'efficacité d'extraction. Ajoutant, que la distribution de la température des fumées est fonction du type de la ventilation qui doit être utilisée.

- À la stratégie de ventilation naturelle, l'écoulement est stratifié vue l'aspect phénoménologique des fumées. Les résultats montrent que cette stratégie permet de mettre en dépression une gaine de désenfumage. L'utilisation de la gaine augmente le pourcentage d'efficacité d'extraction jusqu' il atteint 90 %.

- La stratégie de ventilation longitudinale se traduit par la poussée des fumées vers une zone où il n'y a pas des personnes. La vitesse longitudinale de ventilation favorise l'homogénéisation de l'écoulement. Les valeurs de l'efficacité d'extraction sont faibles et inférieure à 50 % pour les vitesses supérieures à $\frac{U_c}{2}$.

- Des ouvertures de désenfumage sont alors ouvertes au niveau desquelles les fumées sont aspirées vers la gaine de désenfumage. L'aspiration des deux cotés de la gaine augmente la dépression et le pourcentage d'efficacité d'extraction atteint 100 %. Dans ce cas, la stratégie de la ventilation adéquate est la stratégie transversale.

Références bibliographique

- [1] S.M. Jojo, Chow, W.K, Numerical studies on performance evaluation of tunnel ventilation safety systems, *Tunnelling and Underground Space Technology* (2003)18:435–52.
- [2] J. Modic, Fire simulation in road tunnels, *Tunnelling and Underground Space Technology* (2003)18:525–30.
- [3] Miloš Banjac, Barbara Nikolić, Numerical study of smoke flow control in tunnel fires using ventilation systems, *FME Transactions* (2008) 36, 145-150.
- [4] Chi-Ji Lin, Yew Khoy Chuah, A study on long tunnel smoke extraction strategies by numerical simulation. *Tunnelling and Underground Space Technology* 23 (2008) 522–530.
- [5] Tong Yan, Shi MingHeng, Gong YanFeng, He JiaPeng, Full-scale experimental study on smoke flow in natural ventilation road tunnel fires with shafts, *Tunnelling and Underground Space Technology* 24 (2009) 627–633.
- [6] L.H.Hu, R. Huo, W. Peng, W.K. Chow, R.X. Yang, On the maximum smoke temperature under the ceiling in tunnel fires, *Tunnelling and Underground Space Technology* 21 (2006) 650–655.
- [7] L.H. Hu, R. Huo, H.B. Wang, R.X. Yang, Experimental and Numerical Studies on Longitudinal Smoke Temperature Distribution Upstream and Downstream from the Fire in a Road Tunnel, *Journal of fire sciences* ISSN 0734-9041.
- [8] C.C. Hwang, J.C. Edwards, The critical ventilation velocity in tunnel fires—a computer simulation, *Fire Safety Journal* 40 (2005) 213–244.
- [9] L.H. Hu, F. Tang, D. Yang, S. Liu, R. Huo, Longitudinal distributions of CO concentration and difference with temperature field in a tunnel fire smoke flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53 (2010) 2844–2855.
- [10] Kevin McGrattan, Simo Hostikka, Jason Floyd, Howard Baum, Ronald Rehm, William Mell Randall McDermott, G. Forney, *Fire Dynamics Simulator (Version 5.5) Technical Reference Guide*. NIST Special Publication 1018-5, June 23, 2010.
- [11] Kevin McGrattan, Randall McDermott, Simo Hostikka, Jason Floyd, *Fire Dynamics Simulator (Version 5.5) User's Guide*, NIST Special Publication 1019-5, June 23, 2010.