

Etude expérimentale et numérique d'un incendie en tunnel en phase de construction

Côme Leclerc^{1,2}, Rabah Mehaddi¹, Zoubir Acem¹, Bertrand Masselin², Pascal Boulet^{1*}

¹ Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54000 Nancy, France

² Société du Grand Paris, 2, mail de la Petite Espagne – 93200 SAINT-DENIS

* (auteur correspondant : pascal.boulet@univ-lorraine.fr)

Résumé - Un incendie en tunnel en phase de chantier pose des difficultés spécifiques de gestion des fumées. Nous avons étudié expérimentalement et numériquement la propagation des fumées dans un tunnel en phase de creusement, fermé du côté du tunnelier, sans système de ventilation permettant le contrôle des fumées. L'analyse des résultats s'est focalisée sur le panache en sortie de tunnel côté puits d'accès, identifiant les zones libres de fumées pouvant favoriser un accès des secours. La présence d'un vent extérieur perturbe l'écoulement en sortie et impacte la stratification des fumées dans la galerie.

Nomenclature

C_p capacité calorifique massique ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)

D^* longueur caractéristique (-)

g constante de la gravité ($m.s^{-2}$)

L facteur de mise à l'échelle (-)

\dot{m} débit massique de combustible ($kg.s^{-1}$)

\dot{Q} puissance du foyer (kW)

t temps (s)

T Température (K)

V Vitesse du vent ($m.s^{-1}$)

Symboles grecs

δx taille de maille (m)

Δh chaleur de combustion, ($kJ.kg^{-1}$)

ρ masse volumique ($kg.m^{-3}$)

Indices et exposants

0 référence à l'air ambiant

1. Introduction

En phase de chantier, le creusement mécanisé d'un tunnel est souvent réalisé à partir d'un puits, par lequel un tunnelier est mis en place au niveau de la galerie à creuser et avance progressivement sur une longueur allant parfois jusque plusieurs kilomètres. En cas d'incendie pendant cette phase, plusieurs spécificités rendent la gestion du feu et des fumées différentes d'un cas de tunnel en phase d'exploitation. La ventilation est généralement arrêtée par choix opérationnel lorsque le sinistre est détecté. Les écoulements se mettent en place dans un régime de convection naturelle, avec un effet majeur des forces de flottabilité liées à la chaleur dégagée par le foyer. Ces fumées et l'absence de ventilation peuvent impacter l'oxygénation du foyer. Par ailleurs l'évacuation des fumées est asymétrique, un seul côté étant ouvert. La puissance du foyer, la présence ou non de zones libres de fumées permettant l'accès des services de secours, ou encore les caractéristiques du panache de fumées observé dans le puits d'accès sont des questions cruciales pour gérer la sécurité incendie.

Largement étudiés pour les tunnels en phase d'exploitation, les problèmes d'incendie en tunnel sont beaucoup moins documentés en phase de chantier. On considérera à titre de référence l'ouvrage d'Ingason [1], pour une présentation générale sur l'étude des incendies en tunnel. Les travaux de Yao *et col.* [2] et Ingason *et col.* [3] concernent plus spécifiquement des tunnels en construction, mais la géométrie diffère de celle qui nous intéresse ici. Ils concernent un type de creusement différent, réalisé simultanément aux deux extrémités, avec une connexion au tunnel depuis l'extérieur par une galerie d'accès. Ils mettent en tout cas en

avant la complexité de l'écoulement des fumées, en particulier au niveau du puits d'accès, de possibles phénomènes de sous-oxygénation du foyer en fonction de la position de celui-ci et de la géométrie du réseau, ou encore l'influence de l'effet de tirage thermique dès qu'une des galeries est en pente. De nombreux travaux sur les tunnels en exploitation concernent par ailleurs la ventilation et son usage pour contrôler les fumées, parfois avec des puits d'extraction qui rapprochent le cas étudié de notre géométrie avec son puits d'accès. Parmi les études disponibles, celle de Fan *et col.* [4] considère en outre l'effet d'un vent extérieur sur l'extraction des fumées, un point que nous souhaitons également investiguer. Même si leur étude concerne un tunnel en phase d'exploitation combinant des effets de convection forcée et naturelle, ils montrent les effets contrastés du vent, induisant selon les auteurs une possible restriction du panache de fumées en sortie et en même temps créant une zone de dépression favorisant l'extraction. La vitesse du vent et la compétition entre les quantités de mouvement des fumées et du vent jouent évidemment un rôle clé dans l'impact sur l'extraction des fumées.

Le LEMTA a réalisé une première étude de la dynamique du feu et des fumées dans un tunnel en phase de creusement en partenariat avec la Société du Grand Paris, dans le cadre des travaux réalisés sur le projet Grand Paris Express. Nous avons conçu pour cela une maquette (échelle 1:22^{ème}) et analysé les résultats de simulations numériques réalisées à l'aide du code de calcul Fire Dynamics Simulator (FDS). Nous avons considéré un tronçon de galerie avec son puits d'accès. Un foyer de type bac d'heptane a été utilisé pour simuler un feu, la perte en masse de combustible étant analysée pour accéder à la puissance du foyer. Le champ de température dans la galerie a été déterminé avec des thermocouples répartis sur des perches verticales implantées sur plusieurs positions longitudinales, afin de caractériser l'écoulement des fumées et leur évacuation vers le puits d'accès. Ce travail a d'abord été focalisé sur la propagation des fumées dans la galerie et l'utilisation envisagée d'un rideau d'eau pour confiner les fumées dans la zone de foyer [5]. Il a permis de qualifier la méthode de travail utilisée ici, combinant essais en maquette et simulation numérique. Dans Mehaddi *et col.* [5] nous avons montré que l'utilisation d'un rideau d'eau ne permet pas le confinement des fumées. Il provoque au contraire un brassage des fumées, qui induit un remplissage complet de la galerie, ce qui est contre-productif pour l'accès des secours. Sur un plan opérationnel, il faut donc laisser les fumées s'écouler, préserver leur stratification en aval et analyser leur évacuation dans le puits d'accès, y compris sous l'influence possible du vent en surface. Cette analyse est l'objectif principal du travail présenté ici.

Dans la suite de cet article nous proposons une description de la maquette et de sa métrologie, la configuration des calculs sous FDS, leur validation par comparaison avec les données expérimentales, ainsi qu'un ensemble de résultats représentatifs de la dynamique du foyer et des fumées dans le puits d'accès.

2. Dispositif expérimental

Nous avons adapté la maquette à l'échelle 1:22^{ème} décrite dans [5], présentée sur les Figures 1 et 2. Elle est composée ici d'un tronçon circulaire de diamètre 40 cm et de longueur 2 m et d'un puits cubique de côté 1.2 m. La longueur de l'ensemble a été réduite pour permettre de placer la maquette dans la galerie munie de ventilateurs pour simuler l'effet du vent. Nous avons vérifié qu'elle est suffisante pour que la couche de fumée soit stabilisée. La position des perches de thermocouples est indiquée sur la Figure 1. Les positions A, B et C ont été choisies respectivement à 30, 60 et 90 cm de la sortie du tunnel, dans l'axe de celui-ci. La position D en sortie de tunnel est localisée 10 cm avant la fin de la galerie. Les

thermocouples sont espacés verticalement de 2 cm. Ils sont de type K. La soufflerie simulant l'effet du vent (Figure 2) permet d'imposer des vitesses de soufflage entre 1 et 5 m/s.

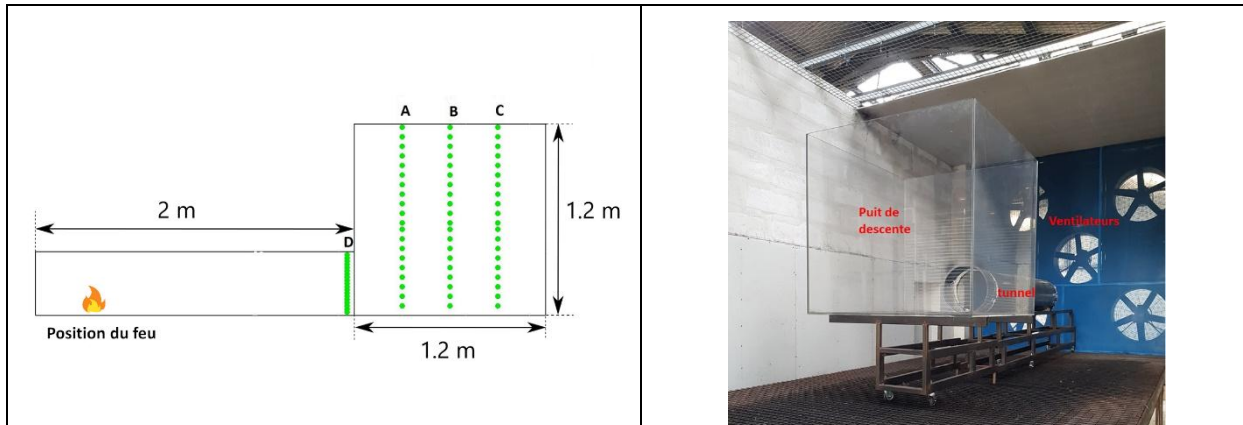


Figure 1 : Schéma de principe de la maquette de tunnel avec son puits de descente

Figure 2 : Vue longitudinale de la maquette dans la soufflerie.

La zone du foyer est métallique pour assurer la résistance au flux dégagé par le foyer, sur un tronçon de longueur 1 m. Le reste du tunnel et du puits d'accès sont en polycarbonate transparent pour permettre l'observation directe de l'écoulement des fumées. Une balance de précision est placée sous le foyer pour suivre la perte en masse du bac d'heptane utilisé et en déduire la puissance dégagée avec la relation directe :

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta h \quad (1)$$

où \dot{m} désigne la vitesse de perte en masse du combustible et Δh la chaleur massique de combustion (44,6 kJ/kg pour l'heptane, d'après [6], valeur supposée prendre en considération le rendement de combustion en lien avec le confinement du foyer). Les résultats qui suivent ont été obtenus avec un bac d'heptane de 91 mm de diamètre, produisant une puissance en régime établi de 5,5 kW. En vraie grandeur, pour un tunnel de diamètre 8.70 m représentatif du projet réel, en appliquant les règles de similitude en $L^{5/2}$ pour la puissance (L facteur de mise à l'échelle, 22 dans le cas présent), cela correspond à une puissance de 12,5 MW, ce qui est un ordre de grandeur cohérent avec la puissance maximale du foyer que nous avons étudiée dans [5].

3. Étude numérique

Les cas étudiés en maquette ont été simulés avec le code FDS (Fire Dynamics Simulator), code CFD très largement utilisé dans le domaine des sciences de l'incendie. Il est basé sur une résolution par méthode des volumes finis, décrivant un écoulement à faible nombre de Mach avec une approche LES (voir [7] pour une description complète du code et [8] pour une analyse détaillée de la validité des sous-modèles utilisés).

3.1. Configuration de la simulation numérique

Le code a été paramétré (conditions aux limites et principales grandeurs d'intérêt) pour correspondre au mieux à la maquette expérimentale, telle que présentée sur la Figure 3. Le tunnel est reproduit à l'identique avec son puits d'accès en tenant compte des matériaux réels (acier et polycarbonate) au niveau des parois pour le calcul des conditions aux limites thermiques. Pour prendre en compte l'effet du vent un domaine ouvert additionnel est considéré au-dessus du puits.

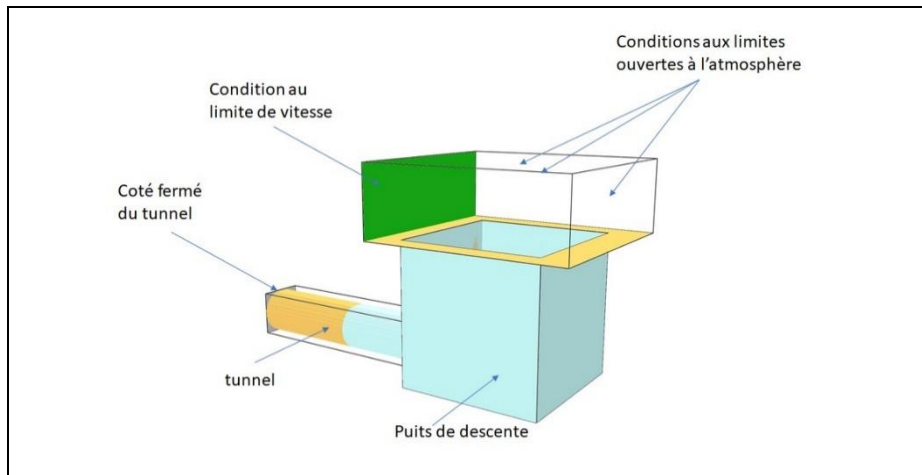


Figure 3 : Schéma du modèle numérique.

D'après les préconisations de la référence [7], pour une bonne résolution de la puissance du feu, une dimension caractéristique du foyer peut être définie par $D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_0 T_0 c_p \sqrt{g}} \right)^{2/5}$, en introduisant au numérateur la puissance du foyer et au dénominateur la masse volumique, la température et la capacité calorifique de référence pour l'air ambiant, ainsi que la gravité. Dans le cas présent D^* est de l'ordre de 10 cm et il est conseillé de prendre une taille de maille δx respectant le critère $4 \leq D^*/\delta x \leq 16$. Dans les résultats qui suivent, le maillage est de type structuré, homogène, avec des mailles cubiques de côté 1 cm, ce qui est bien conforme au critère proposé et permet de représenter le foyer avec un nombre raisonnable de mailles, même si l'analyse n'est pas portée sur une description fine du foyer, mais plutôt sur l'écoulement des fumées. De ce point de vue, avec 40 mailles sur une section droite de la galerie, nous avons également une bonne résolution. Ajoutons que ce problème de sensibilité numérique a été analysé dans [5] avec des tests basés sur la comparaison de résultats avec des maillages de résolution encore plus fine pour vérifier l'invariabilité des résultats en-dessous d'une taille de maille $\delta x = 1$ cm.

3.2. Validation numérique

Le cas expérimental reproduit ici prend en compte la perte en masse mesurée dans le cas d'un foyer stabilisé à 5,5 kW (simulation avec puissance prescrite) et la mise en route de la soufflerie avec une vitesse de 3.5 m/s activée 150 s après l'allumage du foyer. La Figure 4 permet de visualiser l'évolution des fumées dans la maquette. En l'absence de vent le régime s'établit avec les spécificités également observées lors de notre première étude [5] : remplissage de la galerie en amont côté fermé, stratification en aval laissant une zone libre de fumées stabilisée sur une hauteur de l'ordre de 40% de la hauteur totale, panache déversant dans le puits d'accès. A noter qu'il est rattaché à la paroi en sortie côté tunnel, ce qui laisse une zone libre de fumées sur le côté opposé, permettant un passage éventuel des secours, d'autant qu'en aval du foyer la zone libre de fumées en partie basse peut permettre de poursuivre dans la galerie jusqu'au foyer, bien que le plafond de fumées en partie haute puisse avoir un impact thermique par rayonnement en particulier. En présence d'un courant d'air latéral au-dessus du puits (à partir de la Figure 4c) le panache est entraîné et on observe un remplissage du puits, qui perturbe même la couche de retour dans la galerie, provoquant un enfumage au moins partiel de la zone auparavant libre de fumées. Ces fumées sont diluées avec l'air présent dans le puits d'accès, continuant à alimenter le foyer dont on n'observe pas l'extinction par manque d'oxygène.

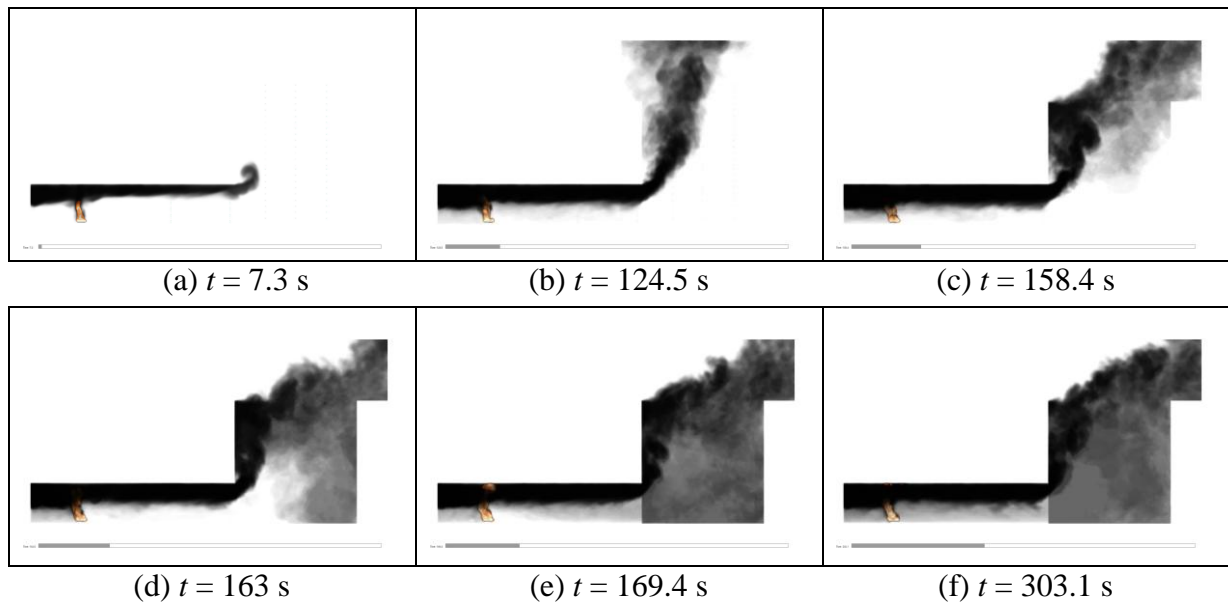


Figure 4 : Simulation numérique de l'écoulement de fumées dans la galerie et le puits d'accès à différents instants. Puissance en régime établi 5.5kW. Soufflerie activée à 150s.

Pour vérifier la validité de la simulation nous avons réalisé une comparaison avec les valeurs de températures mesurées sur la maquette dans les mêmes conditions. La Figure 5 permet de comparer les valeurs mesurées et calculées sur une sélection de thermocouples (pour améliorer la visibilité) au niveau des arbres B et C en traçant la différence de température par rapport à la température ambiante à différentes hauteurs. Avant activation de la soufflerie à 150 s, la température varie très peu par rapport à l'ambiante (quelques fluctuations au niveau expérimental en (5a) et (5c)) la fumée n'atteint pas (ou peu) les positions des arbres B et C, en accord avec la Figure 4. Après 150 s la montée en température sur les deux zones B et C, en bon accord entre résultats expérimentaux et numériques, confirme que l'activation de la soufflerie a perturbé l'écoulement et induit un remplissage du puits sur tout le volume.

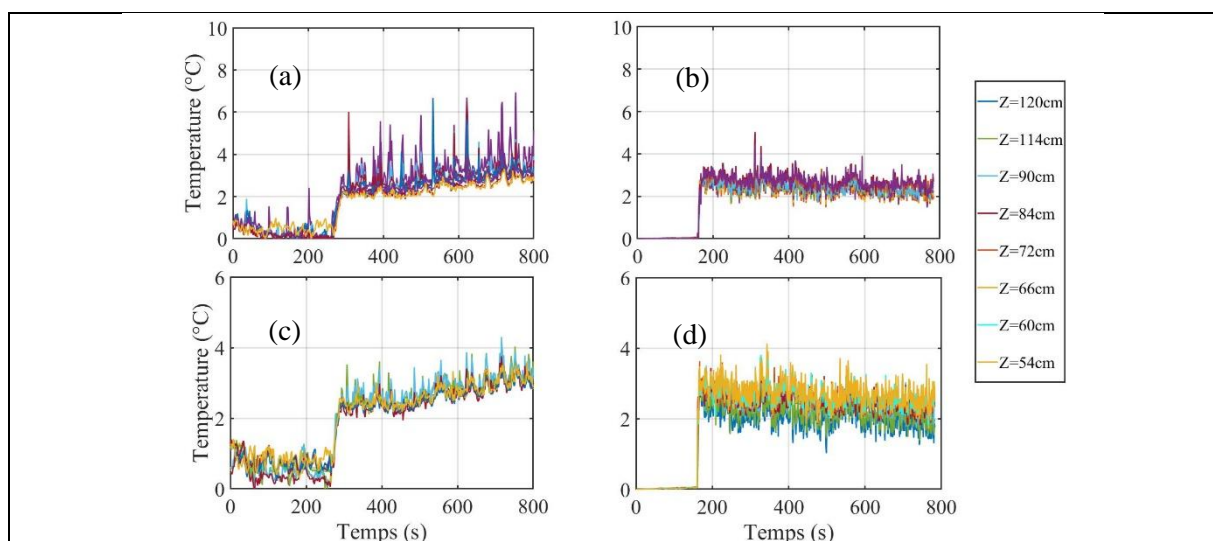


Figure 5 : Ecart de température mesuré par rapport à l'ambiante (figures (a) et (c)) et calculé (figures (b) et (d)) sur l'arbre B à 60 cm de la sortie de la galerie (figures (a) et (b)) et l'arbre C à 90 cm (figures (c) et (d)).

4. Sensibilité à la vitesse du vent

Pour investiguer l'interaction entre le panache de sortie et la vitesse du vent, des simulations numériques ont été réalisées en faisant varier la vitesse du vent dans une gamme de 1 à 5 m/s. La figure 6 présente les structures des différents écoulements obtenus, matérialisées par des lignes de courant. Ces lignes de courant sont superposées au champ de fraction massique de suies permettant de cartographier la distribution des fumées dans le tunnel et le puits de descente. Ces données ont été obtenues en régime établi (après 400 s).

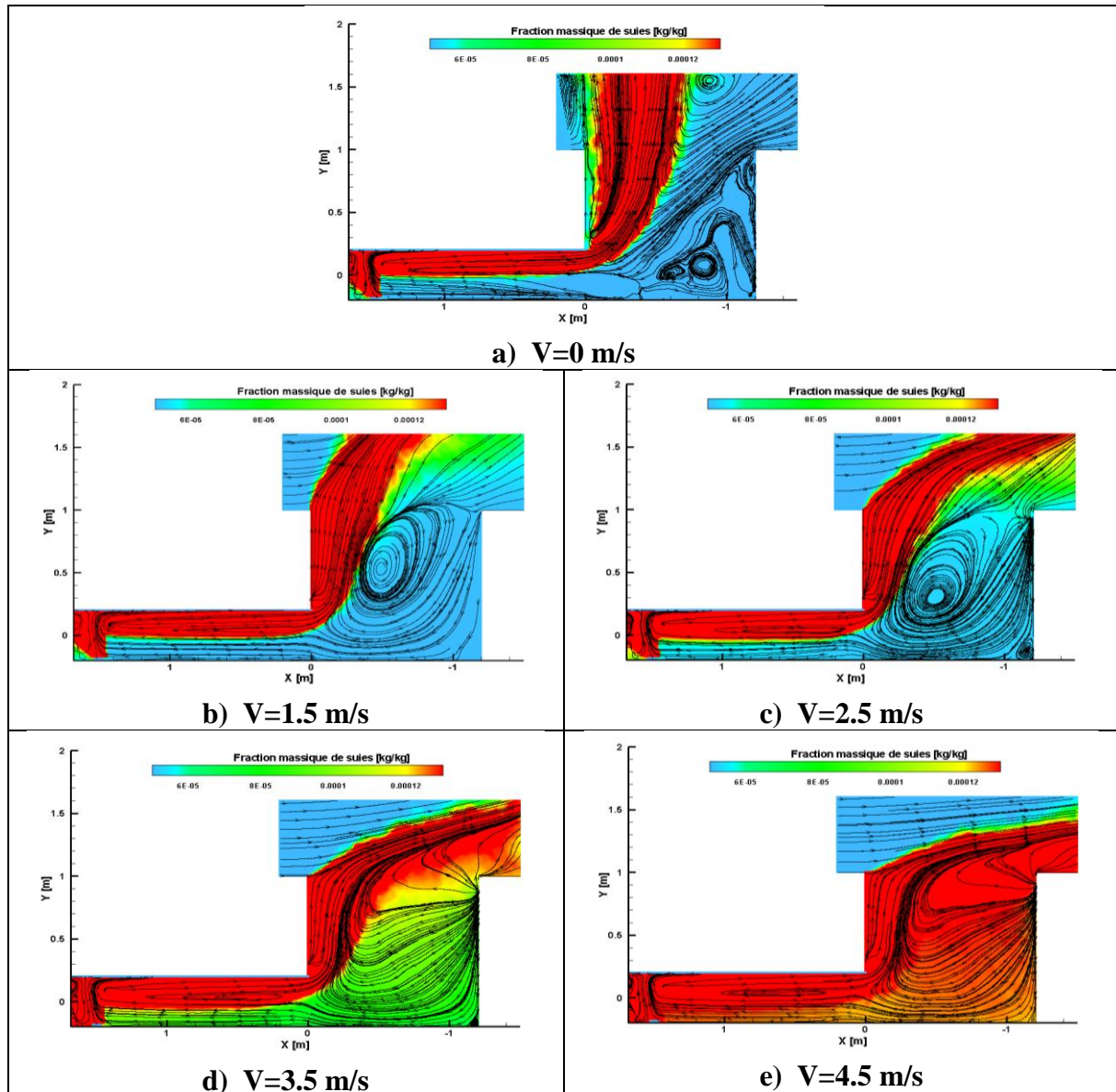


Figure 6 : Lignes de courant avec les contours de fraction massique de suies pour différentes vitesses du vent. Les lignes de courant et les champs de concentration ont été obtenus suite à une intégration temporelle sur 50 secondes (entre 400 et 450 secondes).

On peut observer que le panache de fumées en sortie du puits de descente est incliné par l'écoulement horizontal du vent, avec une perturbation qui croît avec la vitesse du vent. Un vortex se forme ainsi à l'intérieur du puits de descente. Il existe déjà sur la Figure a) à l'interface entre le panache sortant et le flux d'air entrant, mais il descend au niveau du puits et fusionne avec la boucle de recirculation dans le puits. Au-delà d'une vitesse de 3.5 m/s, ce vortex disparaît et la concentration de suies augmente fortement à l'intérieur du puits de

descente et du tunnel sous l'effet de la recirculation des fumées. Celles-ci sont en partie diluées et de l'air extérieur reste entraîné et peut alimenter le foyer par la couche de retour en partie basse du tunnel (noter que l'écoulement réel est tridimensionnel et que l'on analyse ici un plan médian).

Pour compléter ces observations, la figure 7 illustre les résultats obtenus avec les vitesses $V = 1.5 \text{ m/s}$, 3.5 m/s et 4.5 m/s , toujours avec une activation de la soufflerie après 150 s. Il est particulièrement intéressant de noter qu'à 1.5 m/s l'activation de la soufflerie perturbe l'écoulement dans un premier temps (Figures d et g), mais que la flottabilité des fumées est suffisante pour contrebalancer la quantité de mouvement induite par le vent extérieur et le puits est finalement dégagé après 220 s (Figures j et m). Le panache reste entraîné horizontalement au-dessus du puits, mais une zone libre de fumées est bien observée dans le puits, du côté opposé au tunnel. De plus, la zone libre de fumées en partie basse de la galerie en aval du foyer est préservée. Par contre, plus la vitesse de vent est élevée, plus la perturbation du panache est forte, avec une densité de fumées qui augmente partout dans le puits d'accès et supprime les zones libres de fumées.

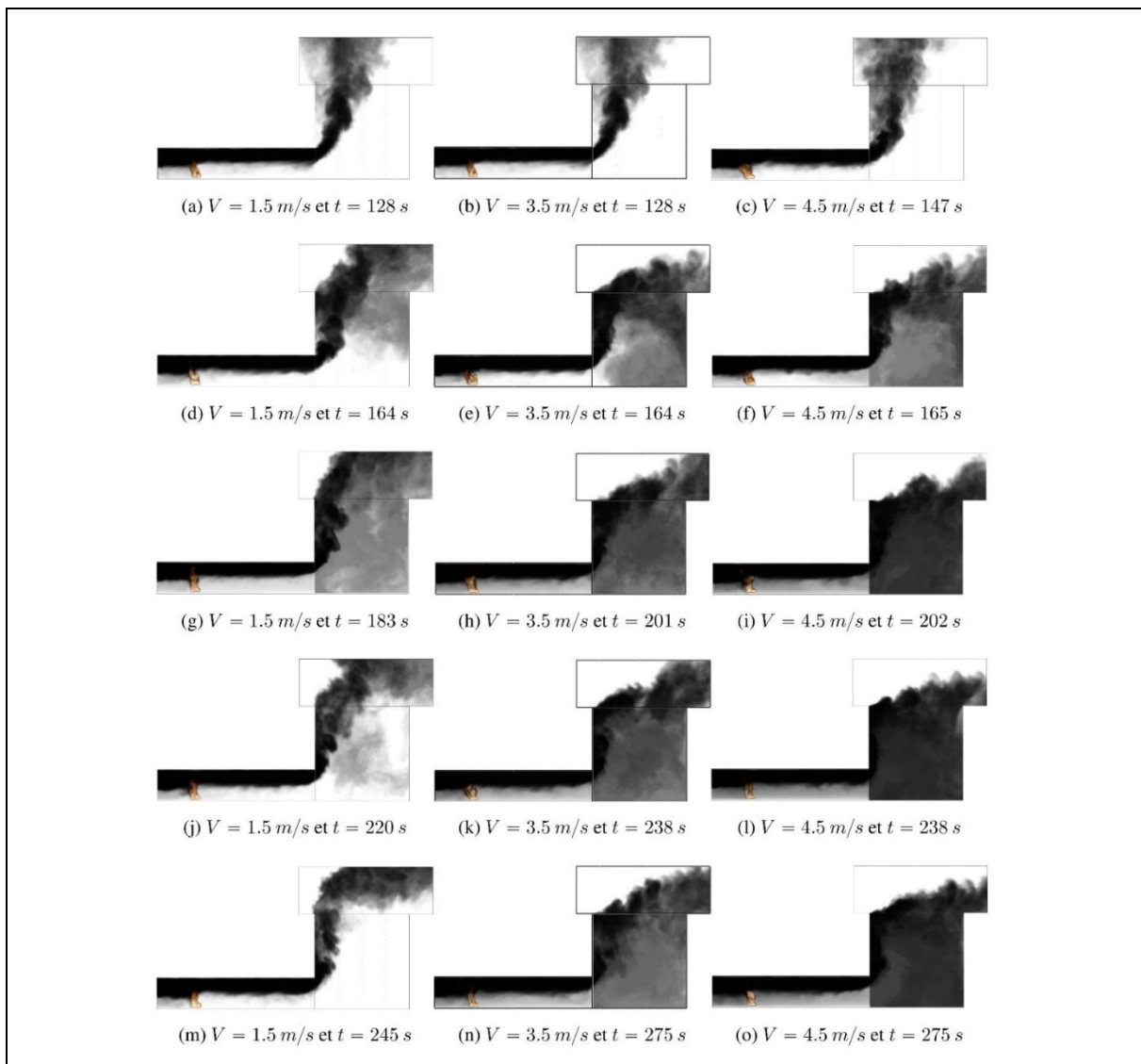


Figure 7 : Simulation numérique des fumées à différents instants (de haut en bas), pour une puissance de foyer de 5.5 kW et trois vitesses de vent (1.5 m/s à gauche, 3.5 m/s au centre et 4.5 m/s à droite).

Un travail de sensibilité plus approfondi pourrait permettre d'évaluer une vitesse critique au-delà de laquelle la zone libre de fumées disparaît du puits. Cette vitesse (de l'ordre de 3 m/s d'après l'ensemble des calculs et tests que nous avons réalisés) pourrait ensuite être transposée en vraie grandeur pour différentes puissances de foyer, celle-ci pouvant influencer sur la flottabilité et donc la quantité de mouvement des fumées. Toutefois, il faut rester prudent dans l'analyse dans la mesure où le vent ne peut être représenté simplement comme une contribution constante mais produit plutôt des rafales et des instationnarités. De même, la position du foyer impactera aussi le refroidissement des fumées le long du tunnel et donc leur flottabilité à la sortie. Des essais complémentaires en modifiant le sens du vent sont également envisagés.

5. Conclusion

Nous avons réalisé une étude expérimentale et numérique d'un incendie en tunnel en phase de construction. Les résultats numériques obtenus avec le code FDS sont en bonne concordance avec les données expérimentales recueillies. Ils conduisent aux conclusions suivantes :

- L'incendie provoque le remplissage de la galerie en amont du foyer (côté fermé), mais une couche libre de fumées subsiste en partie basse en aval sur 40% de la hauteur de la galerie.
- Les fumées s'évacuent dans le puits d'accès en produisant un panache déversant attaché à la paroi au-dessus de la sortie du tunnel, laissant une zone libre de fumées sur le côté opposé du puits (permettant si besoin l'accès des services de secours ou lutte contre le feu).
- La présence de vent au-dessus du puits peut toutefois perturber ce régime d'écoulement et provoquer l'entraînement du panache, sa recirculation dans le puits et un remplissage des zones initialement libres de fumées.
- En-dessous d'une vitesse critique (de l'ordre de 3 m/s à l'échelle de la maquette étudiée 1:22^{ème}), la flottabilité des fumées peut être suffisante pour dégager le puits et redonner une zone libre analogue au cas sans vent. Toutefois la présence de rafales ou autres instationnarités n'a pas été étudiée à ce stade et demanderait une analyse complémentaire.

Le travail engagé va se poursuivre à deux niveaux. Au niveau académique, une analyse fine de la vitesse critique qui produit le remplissage du puits d'accès sera menée pour différentes conditions de puissance de foyer, de vitesse de vent et de hauteur du puits d'accès, avec recherche de conditions seuils en termes de nombre de Richardson ou Froude par exemple. L'étude des effets de pente et de tirage thermique induit, ou encore de la sensibilité à la puissance et à la position du foyer est également prévue. Sur un plan opérationnel une extraction partielle des fumées pourrait être envisagée avec le dispositif de ventilation existant pour l'aération du chantier, mais l'impact sur l'apport d'oxygène au foyer doit également être pris en compte et interroger sur les conséquences d'un tel choix opérationnel.

Références

- [1] H. Ingason, Li Ying Zhen, A. Lönnemark, Tunnel Fire Dynamics, Springer (2015).
- [2] Y. Yao *et col.*, Numerical study of the characteristics of smoke spread in tunnel fires during construction and method for improvement of smoke control, *C. St. in Th. Eng.* 34 (2022) 102043
- [3] H. Ingason *et col.*, Fire incidents during construction work of tunnels, *SP Report* (2010), p.88
- [4] C.G. Fan *et col.*, Effects of ambient wind on thermal smoke exhaust from a shaft in tunnels with natural ventilation, *Applied Thermal Engineering* 117 (2017) 254–262
- [5] R. Mehaddi *et col.*, Use of a water mist for smoke confinement and radiation shielding in case of fire during tunnel construction. *Int. J. Therm. Sci.* 148 (2020), 106156.
- [6] V. Babrauskas, Estimating large pool fire burning rates, *Fire Technol.* 19 (4) (1983) 251–261.
- [7] K. McGrattan *et col.*, Fire Dynamics Simulator, User's Guide, NIST Pub. 1019 6th Ed. (2023)
- [8] K. McGrattan *et col.*, Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide Volume 3: Validation NIST Spec. Pub. 1018-3 6th Ed. (2023)