

Article

Étude sur les caractéristiques du mouvement des fumées d'incendie et leurs Impact sur l'évacuation des personnes dans les tunnels routiers courbes

Yuang Cui et Zhiqiang Liu *

École de génie civil, Université Jiaotong de Lanzhou, Lanzhou 730070, Chine ; 11220166@stu.lzjtu.edu.cn *
Correspondance : lzqiang@mail.lzjtu.cn

Application en vedette : Application en vedette : Fire Dynamics Simulator Pyrosim.

Résumé : Dans les recherches existantes sur les incendies de tunnels, les chercheurs se concentrent principalement sur les tunnels droits, négligeant l'impact des parois latérales courbes dans les tunnels courbes. Sur la base de la théorie de la diffusion de la fumée, une série de simulations numériques CFD a été réalisée à l'aide du simulateur de dynamique du feu pour étudier les caractéristiques de la répartition de la fumée dans un tunnel routier courbe. Les résultats ont indiqué que des caractéristiques distinctes de répartition de la fumée ont été observées lorsqu'un incendie s'est déclaré dans un tunnel courbe. par rapport à ceux observés dans les tunnels droits, avec des différences significatives particulièrement évidentes pour le rayon de courbure du tunnel inférieur à 1000 m. En comparant les caractéristiques de répartition de la fumée provenant de différents emplacements de sources d'incendie, les emplacements de sources d'incendie les plus défavorables dans un tunnel courbe ont été déterminés. La fumée d'incendie à haute température se limite entre les parois intérieures et extérieures du tunnel, conduisant à la formation de multiples zones à haute température à proximité de la source d'incendie, plutôt que de se diffuser directement vers la sortie dans un tunnel linéaire. De plus, sur la base d'une analyse de la température, de la visibilité et de la concentration de CO à des hauteurs caractéristiques, des emplacements appropriés pour les passages pour piétons à l'intérieur du tunnel ont été déduits et une stratégie d'évacuation des personnes se trouvant dans la zone d'incendie principale a été proposée. Les résultats peuvent fournir une référence pour les stratégies d'évacuation personnelle dans les scénarios d'incendie de tunnels routiers courbes et pour la conception d'une galerie pour les personnes passant dans ces tunnels.

Mots-clés : tunnel routier courbe ; feu; distribution de fumée; évacuation personnelle



Référence : Cui, Y. ; Liu, Z. Étude sur le feu
Caractéristiques du mouvement de la fumée et
Leur impact sur l'évacuation des personnes
dans les tunnels routiers courbes. Appl.
Sci. 2024, 14, 6339. <https://doi.org/10.3390/app14146339>

Rédacteur académique : Cheng-Yu Ku

Reçu : 22 juin 2024

Révisé : 15 juillet 2024

Accepté : 18 juillet 2024

Publié : 20 juillet 2024



Copyright : © 2024 par les auteurs.
Licencié MDPI, Bâle, Suisse.

Cet article est un article en libre accès
distribué selon les termes et
conditions des Creative Commons

Licence d'attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Avec les progrès de la technologie d'excavation des tunnels, la proportion de tunnels routiers courbes au sein des réseaux routiers a progressivement augmenté. La structure unique d'un tunnel incurvé introduit une plus grande complexité dans le flux de fumée et les variations de température lors d'incendies, en fonction du rayon de virage du tunnel [1-3]. Des recherches antérieures ont délimité les schémas de déplacement de la fumée d'incendie dans des tunnels linéaires et fourni des formules pour calculer la longueur de la couche arrière de fumée, la vitesse critique du vent et la température maximale. Cependant, la diffusion de la fumée est soumise à divers facteurs d'influence tels que l'altitude, la pente du tunnel et la courbure du tunnel. La courbure du tunnel constitue le point central de cette enquête.

Des recherches antérieures ont démontré que les tunnels courbes et les tunnels droits présentent des caractéristiques distinctes. Kashef et coll. a étudié la stratégie de contrôle des fumées dans les zones droites et courbes d'un tunnel à travers des expériences et des simulations numériques. Leurs résultats ont montré que lorsque la source d'incendie se trouvait dans la zone courbe, la température à proximité de la source d'incendie était nettement inférieure à celle dans la zone droite et la longueur de la couche arrière de fumée augmentait [4].

Parallèlement, des formules de correction ont été proposées pour les indicateurs clés des incendies dans les tunnels courbes, basées sur celles des incendies dans les tunnels droits. Wang Feng a construit des modèles numériques sur les caractéristiques du mouvement de la fumée d'incendie d'un tunnel courbe d'un rayon de

600 m et a proposé une méthode de calcul de la résistance le long du tunnel courbe pour clarifier la loi de l'influence du tunnel courbe sur l'écoulement du fluide [5–7]. Caliendo et coll. ont utilisé la simulation numérique CFD pour étudier l'influence de la ventilation longitudinale sur la couche arrière de fumée dans un tunnel courbe à deux voies et ont prédit l'emplacement de la température maximale du plafond [8]. Wu et coll. ont étudié les caractéristiques de transport de la fumée d'incendie du tunnel routier courbe de Qianhaizi pour obtenir la vitesse critique du vent du tunnel [9]. Wang a effectué des simulations numériques d'un incendie dans un tunnel routier courbe à l'aide de Fluent pour comparer la vitesse critique du vent aux emplacements convexes et concaves de la source de l'incendie. Ils ont également analysé la longueur de la couche arrière de fumée et ont conclu que la vitesse critique à l'emplacement convexe était plus grande [10]. Zhong et coll. ont étudié la loi de propagation de la fumée lors d'incendies dans des tunnels inclinés et courbes par des simulations numériques et des expériences et ont découvert que l'endroit présentant la plus grande différence de taux de transfert de chaleur était le plafond du tunnel dans différentes conditions de travail [11]. Zhang et coll. a combiné la simulation numérique avec l'analyse théorique pour déterminer un modèle d'incendie adapté aux tunnels courbes et a étudié la longueur de la couche de fumée et la vitesse critique de ventilation des tunnels courbes [12]. Pan et coll. ont étudié l'effet d'une paroi latérale incurvée sur la forme du feu et la température maximale sous l'axe du plafond et ont établi des formules pour prédire la température maximale sous l'axe du plafond [13]. Lu a étudié la distribution de température dans les tunnels courbes grâce à une méthode de simulation numérique et a proposé un nouveau modèle de décroissance exponentielle pour les prévisions longitudinales de température dans diverses conditions de courbure du tunnel [14].

Xu et coll. mené des expériences et des simulations numériques pour analyser la vitesse critique d'un tunnel courbe dans différents scénarios d'incendie [15].

Néanmoins, il reste peu de recherches examinant directement l'impact d'un incendie dans des tunnels courbes sur l'évacuation des personnes. Muhasilovic et coll. ont étudié l'influence du rayon de courbure (>2500 m) sur le rayonnement thermique et la répartition des fumées dans un tunnel par simulation numérique [16]. Lu a établi un modèle numérique par FDS pour comparer la diffusion de la fumée et la répartition de la température d'un incendie de tunnel dans la section droite et dans la section courbe. Ils ont constaté que le reflux des fumées était plus important et que la température augmentait de manière plus significative lorsque l'incendie survenait dans la section courbe [17].

Zhao et coll. ont utilisé FDS pour effectuer une simulation numérique d'un incendie de tunnel avec un petit rayon de courbure et ont découvert que le rayon de courbure entraînerait un gradient de température important à proximité de la source de l'incendie [18]. Li a simulé le flux de fumée d'incendie dans un tunnel à courbure unique par Fluent pour obtenir le changement de concentration de CO dans différents environnements de courbure et de ventilation [19]. Liu et coll. ont évalué des facteurs tels que la courbure du tunnel, le temps de fonctionnement de la ventilation longitudinale et la vitesse de ventilation afin d'étudier l'influence des paramètres de ventilation longitudinale sur l'effet extincteur du brouillard d'eau dans un tunnel courbe [20].

De plus, les caractéristiques de diffusion de la fumée à la hauteur caractéristique de l'œil humain et la variation de facteurs tels que la température, la visibilité et la concentration de CO dans les incendies de tunnels courbes qui affectent l'évacuation des personnes n'ont pas été prises en compte. Même les codes existants manquent de directives spécifiques pour la lutte contre les incendies dans les tunnels courbes [21,22]. Cet article vérifie ainsi les caractéristiques de diffusion de fumée présentées par des tunnels routiers courbes avec des courbures variables et évalue l'impact sur l'évacuation des personnes. Les stratégies d'évacuation recommandées et la conception d'une galerie pour les personnes sont également fournies. L'accent est mis sur le modèle distinct de diffusion de la fumée et sur les stratégies permettant de gérer son impact sur l'

2. Matériels et méthodes

2.1. Simulateur de dynamique du feu

Le Fire Dynamics Simulator (FDS) [23,24] est un code développé par le National Institute of Standards and Technology des États-Unis qui a été largement adopté par de nombreux chercheurs pour étudier les champs de température et de vitesse dans les incendies suite à la maturation de la dynamique des fluides computationnelle (CFD). et le développement de la capacité de calcul informatique [25]. La validité de ce code a été largement vérifiée par de nombreux travaux de recherche sur les incendies. Le FDS est conçu pour la simulation aux grands tourbillons (LES) d'écoulements à faible vitesse et thermiques, et

où ρ_a est la densité ambiante ; C_p est la capacité thermique ; g est l'accélération gravitationnelle, H est la hauteur du tunnel ; L_b est la longueur de la couche arrière, où $L_b = 0$ définit la vitesse critique ; T_a est la température ambiante du gaz ; u est la vitesse longitudinale ; et W est la largeur du tunnel.

Comme le montre l'équation (1), la densité ambiante, la température ambiante du gaz et la capacité thermique change à mesure que l'altitude augmente. En conséquence, la vitesse critique maximale de 3,56 m/s est choisie. pour concevoir les simulations.

Sur la base des données existantes sur la période d'exploitation du tunnel [31,32], la vitesse de contrôle du vent de ventilation longitudinale du tunnel varie de 2,0 m/s (la ventilation longitudinale naturelle maximale vitesse de ventilation) à 8,0 m/s (la vitesse de ventilation longitudinale de contrôle maximale). Lorsqu'un incendie se déclare, la vitesse du vent dans le tunnel doit être légèrement supérieure au vent critique. rapidité. Selon le code national, le rayon de courbure des simulations était choisi comme rayon de braquage minimum à différentes vitesses [33].

Les études existantes [6,7,15,34,35] montrent que la courbure d'un tunnel affectera la valeur critique vitesse d'un incendie dans un tunnel. Par conséquent, 4 m/s a été choisi comme vitesse critique dans cette papier. Les résultats de simulation ultérieurs montrent également que la courbure du tunnel a un effet sur la vitesse critique.

Un groupe de vitesse générale (la vitesse longitudinale de ventilation est de 2 m/s ; tests 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 et 17) et un groupe de vitesses critiques (la vitesse de ventilation longitudinale est de 4 m/s ; les tests 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 et 18) ont été conçus pour étudier le mouvement de la fumée d'incendie caractéristiques sous vitesse de ventilation longitudinale naturelle et contrôle longitudinal vitesse de ventilation dans le scénario d'incendie. Sauf ventilation longitudinale, aucune autre mécanique des mesures de ventilation ont été prises en compte dans la simulation. Tous les tests sont affichés dans le tableau 1.

Tableau 1. Résumé de tous les tests.

Non.	Rayon de courbure, m	Vitesse de ventilation longitudinale, m/s
1, 2	∞	2, 4
3, 4	250	2, 4
5, 6	400	2, 4
7, 8	600	2, 4
9, 10	800	2, 4
11, 12	1000	2, 4
13, 14	1200	2, 4
15, 16	1500	2, 4
17, 18	2000	2, 4

2.4. Taille de la grille

Les études existantes ont montré que la taille de la grille a une grande influence sur la précision de résultats de simulation, et la taille des mailles a une relation étroite avec les caractéristiques du feu diamètre D . Lorsque le diamètre caractéristique du feu D est compris entre 4 et 16 fois le diamètre de la grille taille, les résultats de la simulation peuvent refléter la situation réelle avec plus de précision [24] Le calcul La méthode de D est la suivante :

$$D^* = \sqrt[2.5]{\frac{Q}{\rho^\infty c_p T^\infty g}}$$
 (2)

où D est le diamètre caractéristique du feu, Q est le HRR, ρ[∞] est la densité de l'air, c_p est le capacité thermique spécifique de l'air, T[∞] est la température ambiante et g est l'accélération de la gravité. Comme le montre l'équation (1), le diamètre caractéristique du feu augmentera lorsque la température ambiante la pression diminue.

En conséquence, la taille de grille appropriée pour l'incendie actuel de 30 MW variait entre 0,233 m et 0,94 m. Les résultats de simulation pour le cas d'un rayon de courbure de 800 m et avec une ventilation de 2 m/s (identique au test 9) à 150 s a été comparée en utilisant cinq grilles différentes tailles de 0,25 m, 0,3 m, 0,4 m, 0,5 m, 0,6 m et 0,9 m, comme le montre la figure 2. On voit que à mesure que la taille de la grille diminue, l'écart de température devient insignifiant. À l'exception de les tailles de ceinture de 0,6 m et 0,9 m, les températures verticales près du plafond du tunnel de les autres tailles de grille étaient similaires. Lorsque la taille de la grille ne dépasse pas 0,5 m, la précision de les simulations avec des grilles plus petites ne se sont pas améliorées de manière significative mais ont nécessité plus

Figure 4. Comparaison de la température du plafond et de la hauteur caractéristique de différentes sources d'incendie postes. (a) Température au plafond du tunnel ; (b) Température de la ligne médiane à 2 m de hauteur ; (c) Température du côté intérieur à 2 m de hauteur ; (d) Température du côté extérieur à 2 m de hauteur.

la hauteur caractéristique a été fixée à 60 °C, conformément aux codes nationaux [37]. De même, une visibilité de 10 m et une concentration de CO de 400 ppm ont été fixées comme norme de visibilité et la concentration en CO. La hauteur caractéristique a été définie à 2 m dans cette étude.

3.2. Comparaison de la répartition de la fumée sur différents côtés du tunnel

Pour analyser plus en détail les caractéristiques de la répartition des fumées dans le tunnel, les simulations ont été classées en deux groupes comme suit : Groupe A et Groupe B. Groupe A comprenait quatre simulations différentes avec des rayons de courbure de 250 m, 400 m, 600 m et 800 m, alors que le groupe B était constitué de quatre simulations avec des rayons de courbure de 1 000 m, 1 200 m, 1 500 m et 2 000 m. Le groupe A et le groupe B ont été comparés à des tunnels droits pour évaluer l'impact de la courbure du tunnel. Les caractéristiques de distribution unidimensionnelles de la fumée d'incendie à la hauteur caractéristique à 360 s sont analysées dans cet article.

3.2.1. Température

Dans les études précédentes, l'emplacement de la source d'incendie était principalement supposé être sur la ligne médiane du tunnel, ce qui entraîne une symétrie horizontale et longitudinale distributions de température. Cependant, si l'on considère des scénarios réels, lorsqu'un véhicule prend feu dans un tunnel, il est plus probable que le véhicule source d'incendie soit positionné d'un côté du tunnel.

Appl. Sci. 2024, 14, x POUR EXAMEN

8 sur 18

PAR LES PAIRS La figure 5 montre la distribution longitudinale de la température à la hauteur caractéristique pour le groupe de vitesse critique à 360 s. Dans ce scénario, la hausse rapide de la température au sein la zone source de l'incendie est attribuée à la génération de flammes et de fumées à haute température.

A 1500 m et 2000 m, la répartition des températures et les températures maximales sont relativement les mêmes. Ce phénomène est représenté par le pic initial sur la figure de répartition des températures.

identiques à ceux observés dans le tunnel droit du côté intérieur du tunnel. Par la suite, propulsé par une ventilation longitudinale, le

Cependant, lorsque la vitesse de ventilation du tunnel est inférieure à la vitesse critique, la fumée à haute température se propage vers l'avant. Cependant, en raison de la courbure du

La distribution de température gitudinale présente des variations distinctes, comme le montre la figure 6. Une fois le tunnel terminé, elle entre en collision avec la paroi extérieure et rebondit sur celle-ci, ce qui entraîne une région de pic distincte sur la paroi extérieure.

Dans de telles circonstances, la force motrice de la ventilation longitudinale pour la haute température de sa surface. La variation de la courbure du tunnel entraîne une différence de focalisation

la fumée à l'intérieur du tunnel devient insuffisante, ce qui entraîne une répartition prédominante du pic de température côté extérieur. Par conséquent, de multiples pics sont observés en hauteur le long de la ventilation longitudinale du tunnel. Néanmoins, la paroi incurvée exerce toujours une température de

un certain effet inhibiteur sur la propagation de la fumée. Cela se manifeste principalement par une variation constante de la température, à l'écart de la source d'incendie, dans la ligne médiane du tunnel.

La répartition de la température le long de la ligne médiane du tunnel dans différentes simulations est devenue plus petite et progressivement vers le bas. L'emplacement et la hauteur du pic de température des différences significatives observées. Les principales distinctions entre l'intérieur et l'extérieur du

groupe A (essais 4, 6, 8 et 10) diffèrent significativement de celles observées en ligne droite tunnel (essai 2). Cet écart peut être attribué à l'influence du tunnel courbe sur

Cependant, au-delà de cette zone centrale, la fumée pénètre dans une propagation longitudinale unidimensionnelle - la position d'impact initiale du flux de fumée à haute température sous ventilation longitudinale.

étape de déclenchement. conditions, entraînant des variations dans les distributions de température ultérieures.

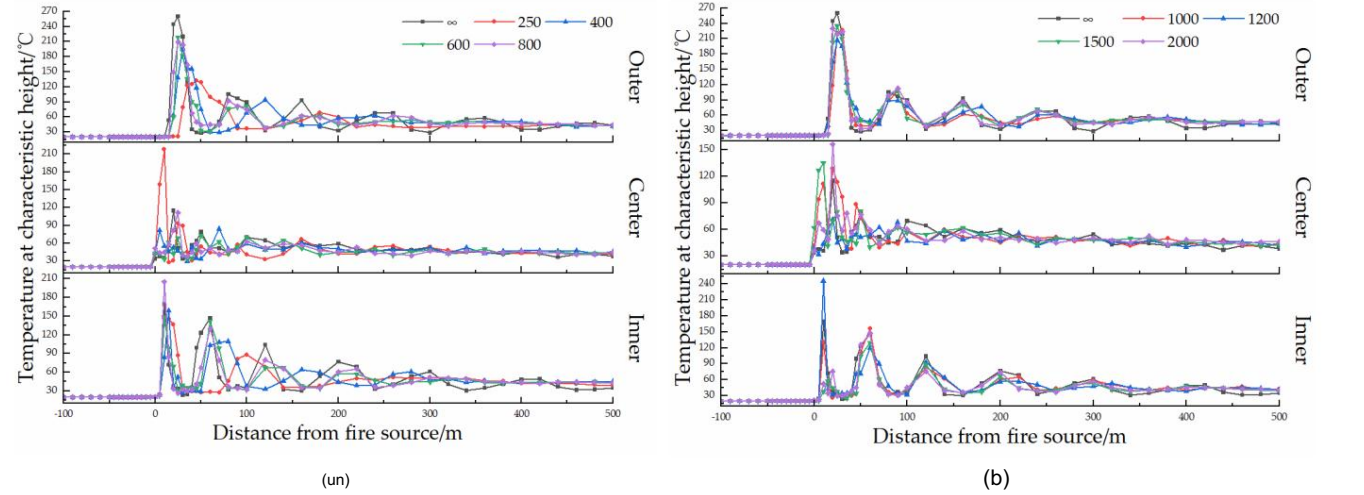


Figure 5. Variation de la température longitudinale à la hauteur caractéristique de la vitesse critique Figure 5. Variation de la température longitudinale à la hauteur caractéristique de la vitesse critique groupe. (a) Comparaison de la température sur différents côtés du tunnel pour le groupe A. (b) Groupe de comparaison. (a) Comparaison de la température des différents côtés du tunnel pour le groupe A. (b) Comparaison de température sur différents côtés du tunnel pour le groupe B.

répartition de la température le long de la ligne médiane du tunnel dans différentes simulations sans différences significatives observées. La principale distinction entre les côtés intérieur et extérieur du tunnel réside dans la température maximale dans la zone centrale de la source d'incendie. Cependant, au-delà de cette zone centrale, la fumée entre dans une phase de propagation longitudinale unidimensionnelle.

Pour le groupe B (essais 12, 14, 16 et 18), la répartition longitudinale de la température sur le le côté intérieur, le côté extérieur et la ligne centrale du tunnel ressemblent beaucoup à ceux du tunnel droit (essai 2). Cependant, des disparités notables apparaissent en termes de valeurs de pointe de température entre le côté intérieur et le côté extérieur du tunnel à la distance correspondante du feu source. Les comparaisons numériques révèlent des différences significatives à la fois dans la température répartition et températures maximales entre le rayon de courbure du tunnel de 1000 m et 1200 m avec un tunnel droit. A l'inverse, lorsque le rayon de courbure du tunnel est fixé à 1 500 m et 2000 m, la répartition de la température et les températures maximales sont relativement les mêmes que ceux observés dans le tunnel droit.

Cependant, lorsque la vitesse de ventilation du tunnel est inférieure à la vitesse critique, la distribution longitudinale de la température présente des variations distinctes, comme le montre la figure 6. circonstances, la force motrice de la ventilation longitudinale pour les fumées à haute température à l'intérieur du tunnel devient insuffisant, ce qui entraîne sa répartition prédominante le long du ventilation longitudinale du tunnel. Néanmoins, le mur courbe exerce encore une certaine effet inhibiteur sur la propagation de la fumée. Cela se manifeste principalement par une température constante répartition le long de la ligne médiane du tunnel dans différentes simulations sans

Figure 6. Variation de la température longitudinale à la hauteur caractéristique du groupe de vitesse critique. (a) Comparaison de la température sur les différents côtés du tunnel pour le groupe A. (b) Comparaison de la température sur les différents côtés du tunnel pour le groupe B.

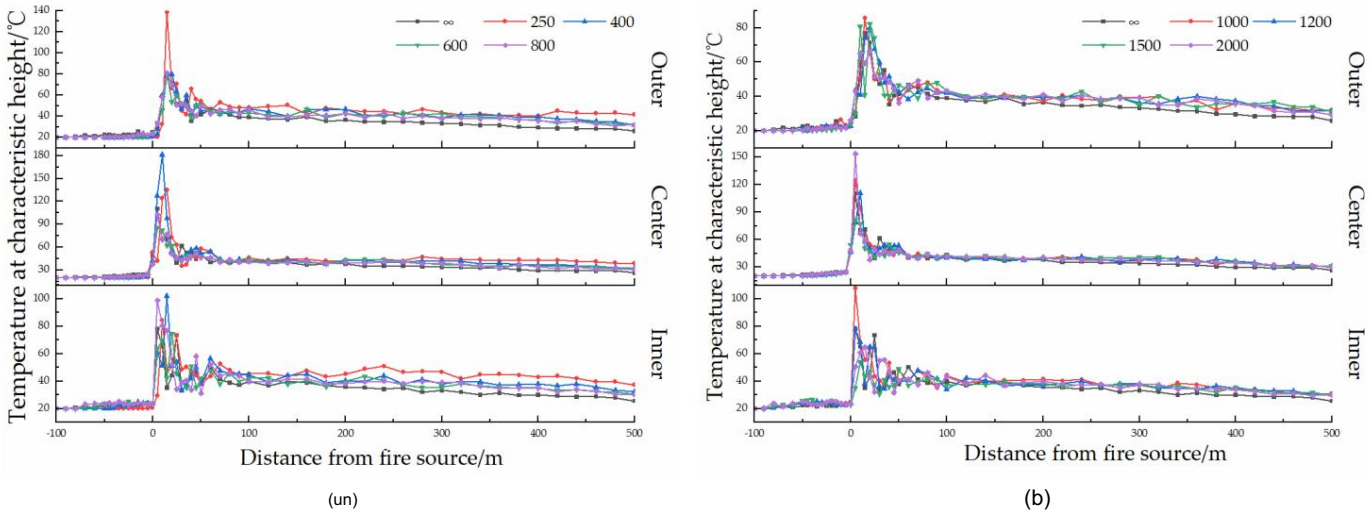


Figure 6. Variation de température longitudinale à la hauteur caractéristique de la vitesse générale Figure 6. Variation de température longitudinale à la hauteur caractéristique de la vitesse générale. (a) Comparaison de la température sur différents côtés du tunnel pour le groupe A. (b) Comparaison de la température sur les différents côtés du tunnel pour le groupe B.

3.2.2. Visibilité

La figure 7 montre la variation longitudinale de la visibilité du groupe de vitesse critique à la hauteur caractéristique à 360 s. Initialement, durant les premiers stades de l'incendie, de la fumée s'accumule principalement dans le plafond du tunnel en raison de la chaleur générée par la source d'incendie. Cette accumulation a un impact minime sur la visibilité à la hauteur caractéristique, car il n'y a pas de modifications significatives de la température ou de la concentration de la fumée. Cependant, comme le le feu progresse, la fumée se diffuse longitudinalement dans tout le tunnel. La distribution de la visibilité humaine correspond à la distribution longitudinale de la température et reflète zones alternées de fumée d'incendie provoquées par la fumée à haute température et les flammes entre les côtés intérieurs et extérieurs du tunnel.

hauteur. Néanmoins, la visibilité humaine reste dans des limites de sécurité du côté extérieur du tunnel ; cela reste également vrai pour le groupe B. Bien que les essais 16 et 18 présentent des schémas de répartition de la fumée et de la température similaires à ceux observés dans un tunnel droit du groupe B, il existe encore des différences notables de visibilité en amont de la source d'incendie et sur la ligne médiane.

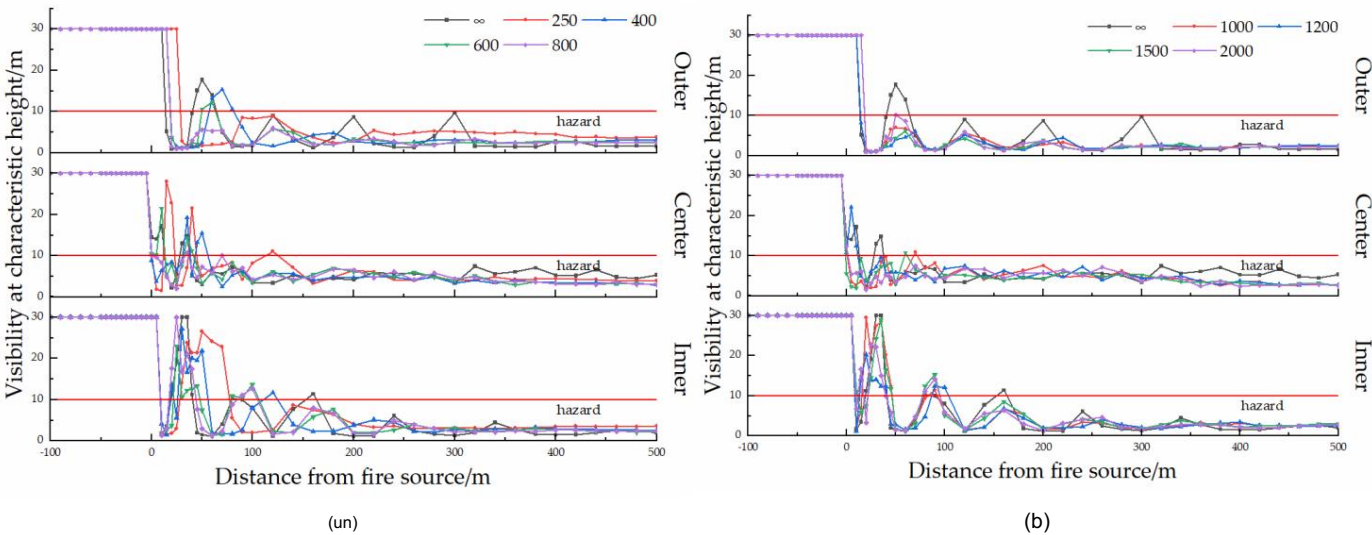


Figure 7: Variation de la visibilité longitudinale à la hauteur caractéristique du groupe de vitesse générale. (a) Comparaison de la visibilité des différents côtés du tunnel pour le groupe A. (b) Comparaison de la visibilité sur différents côtés du tunnel pour le groupe B.

Le groupe B (tests 12, 14, 16 et 18) présente une tendance similaire dans la répartition de la visibilité par rapport à celle observée dans un tunnel droit (essai 2). La principale différence est que le la visibilité à 50 m du foyer d'incendie du tunnel droit est restée dans la plage de sécurité, tandis que le groupe B est au sommet de la visibilité mais toujours dans la plage dangereuse. Pour groupe A (tests 4, 6, 8 et 10), la position maximale et la hauteur maximale de sa visibilité sont significativement différents de ceux du tunnel droit. Cependant, lorsque la distance du feu source dépasse 150 m, la visibilité est inférieure à 10 m dans toutes les simulations, ce qui signifie il ne reste aucune différence dans l'évacuation personnelle. Cependant, lorsque la ventilation du tunnel la vitesse est inférieure à la vitesse critique, comme le montre la figure 8, il existe une disparité significative dans la distribution longitudinale de la visibilité au sein du groupe de vitesse générale. Longitudinal la ventilation est insuffisante pour chasser la fumée à haute température dans le tunnel dans de telles conditions simulations. Au-delà d'une distance de 50 m du foyer d'incendie, la visibilité humaine pour toutes les simulations tombent dans la zone dangereuse. Une couche arrière de fumée notable se produit. Dans le groupe A, les variations de courbure du tunnel influencent grandement l'impact de la longueur de la couche arrière de fumée sur la visibilité humaine en amont de la source d'incendie. En raison de l'obstruction de la paroi latérale intérieure du tunnel, la température des fumées diminue plus rapidement que avec celui du côté extérieur, ce qui entraîne une diminution rapide de la visibilité à la caractéristique hauteur. Néanmoins, la visibilité humaine reste dans des limites de sécurité du côté extérieur du tunnel; cela reste également vrai pour le groupe B. Bien que les tests 16 et 18 présentent des résultats similaires modèles de répartition de la fumée et de la température comme ceux observés dans un tunnel droit au sein du groupe B, il existe encore des différences notables de visibilité en amont du foyer d'incendie et sur la ligne médiane.



Appl. Sci. 2024, 14, x POUR EXAMEN PAR LES PAIRS

11 sur 18

que par rapport aux tunnel droits, la combustion incomplète des matériaux combustibles. Le tunnel défini dans les simulations comprend un planifond voûté, à travers lequel le CO est excrété dans les tunnels courbes. Les effluents du gaz toxiques comme le CO principaux entz toxiques comme le CO principalement transportés avec les gaz de combustion. Par la suite, le CO monte jusqu'au planifond du tunnel avant d'être retrouvé dans la combustion incomplète descendant vers les deux cotés. La répartition spatiale du CO est censée être influencée à différents stades des incendies d'opencut. Cependant, il a été constaté qu'il faut un certain temps pour que le CO atteigne le rayon de courbure du tunnel, un incendie peut durer un certain temps pour que le CO atteigne le rayon de courbure du tunnel, un incendie peut durer un certain temps pour que le CO atteigne le rayon de courbure du tunnel, un incendie peut durer un certain temps pour que le CO atteigne le rayon de courbure du tunnel.

source d'incendie reste cohérente avec celle des tunnels droits, indiquant un niveau bas. Figure 9. Variation de la concentration longitudinale de CO à la hauteur caractéristique de la vitesse critique. Figure 9. Variation de la concentration longitudinale de CO à la hauteur caractéristique de la vitesse critique.

Ille base (a) Comparaison de la concentration de CO sur différents côtés du tunnel pour le groupe A. (b) Comparaison de la concentration de CO sur différents côtés du tunnel pour le groupe B.

groupe de vitesse: (a) Comparaison de la concentration de CO sur différents côtés du tunnel pour le groupe A. (b) Comparaison de la concentration de CO sur différents côtés du tunnel pour le groupe B.

Comparaison de la concentration de CO sur différents côtés du tunnel pour le groupe A. Comparaison de la concentration de CO sur différents côtés du tunnel pour le groupe B.

et des tunnels droits. Néanmoins, dans un rayon de 100 à 350 m de la source d'incendie, les côtés intérieur et extérieur présentent des concentrations de CO plus élevées que celles trouvées dans les tunnels droits. Toutefois, les niveaux de concentration en CO restent similaires à ceux observés le long de l'axe médian des tunnels droits. Au-delà de 350 m du foyer d'incendie, on constate une augmentation significative de la concentration de CO le long de l'axe des tunnels courbes par rapport à

(un)

(b)

Appl. Sci. 2024, 14, 6339

Figure 9. Variation de la concentration longitudinale de CO à la hauteur caractéristique du groupe de vitesse critique. (a) Comparaison de la concentration de CO des différents côtés du tunnel pour le groupe A. (b) 11 sur 18
Comparaison de la concentration de CO sur différents côtés du tunnel pour le groupe B.

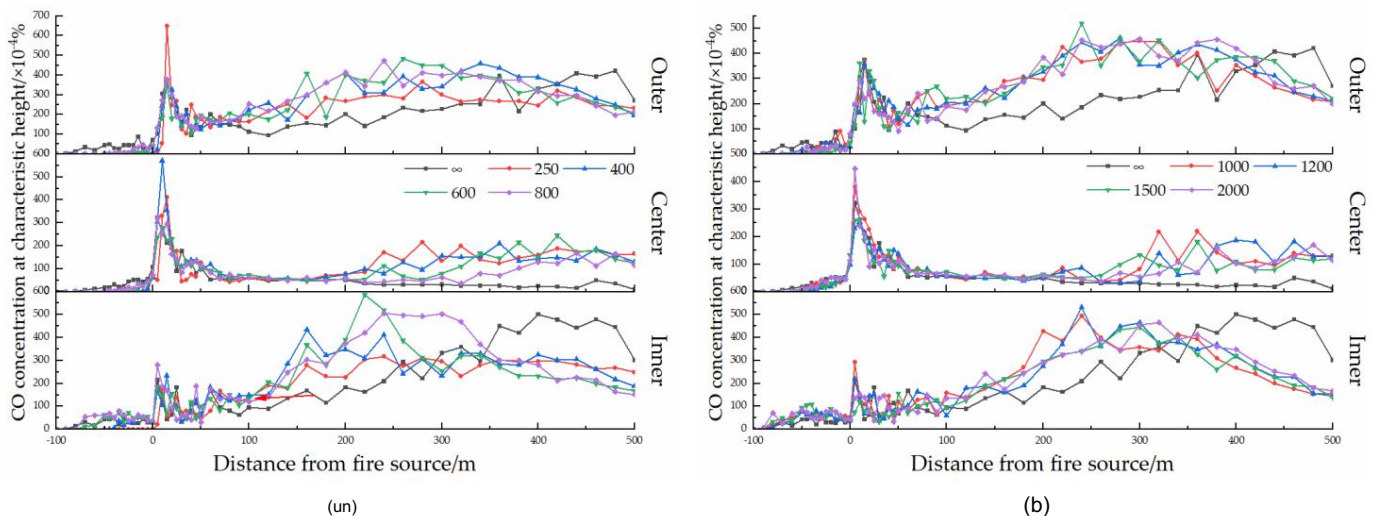


Figure 10. Variation de la concentration longitudinale de CO à la hauteur caractéristique du groupe de localités. (a) Comparaison de la concentration de CO sur différents côtés du tunnel pour le groupe A. (b) Comparaison de la concentration de CO sur différents côtés du tunnel pour le groupe B.

3.3. Analyse complète de l'effet d'altitude et de la ventilation longitudinale Comme le montre la figure 9, la ventilation longitudinale dans le tunnel du groupe de vitesse critique. Les modèles de la courbe de distribution longitudinale de la température, de la visibilité et de la concentration de CO supportent de manière concentrée la fumée à haute température. Ils ne disséminent pas la fumée vers l'extérieur du tunnel, mais plutôt spécifiquement vers les zones de ventilation. La diffusion longitudinale du CO est généralement concentrée, les tendances de la température et de la visibilité. À l'entrée de la zone centrale de la source, le CO rapidement et la concentration est inférieure au niveau longitudinal. Cependant, le groupe A se trouve le CO à propager que le rayon de courbure augmente, la direction longitudinale de la ventilation, mais sa ligne centrale connaît une diminution des concentrations de CO. De plus, la longueur La répartition de la concentration de CO sur les côtés extérieurs et intérieurs se rapproche progressivement de celle observée dans les tunnels droits. Cependant, des concentrations plus élevées de CO persistent sur la ligne médiane par rapport à ceux trouvés dans les tunnels droits.

Cependant, lorsque la vitesse longitudinale de ventilation est inférieure à la vitesse critique, le le schéma de distribution longitudinale de la concentration de CO dans les tunnels courbes diffère considérablement de celle observée dans les tunnels droits, comme le montre la figure 10. La concentration de CO dans tunnels courbes avec différents rayons de courbure sur le côté extérieur et sur la ligne médiane de le tunnel en amont du foyer d'incendie reste cohérent avec celui des tunnels droits, indiquant un niveau bas. Cependant, en raison des influences structurelles sur les modèles de flux d'air, il Il y a une concentration de CO nettement plus élevée à l'intérieur des tunnels courbes. En termes de noyau Dans les zones proches de la source d'incendie, les concentrations de CO sont généralement comparables entre les zones courbes et tunnels droits. Néanmoins, dans un rayon de 100 à 350 m de la source d'incendie, les deux les côtés intérieur et extérieur présentent des concentrations de CO plus élevées que celles trouvées dans tunnels droits. Cependant, les niveaux de concentration de CO restent similaires à ceux observés le long du la ligne médiane dans les tunnels droits. Au-delà de 350 m du foyer d'incendie, il existe une augmentation de la concentration de CO le long de la ligne médiane des tunnels courbes par rapport à celle observée dans des tunnels droits. La tendance à la baisse observée pour les concentrations de CO tant sur le les côtés intérieurs et extérieurs les font progressivement devenir plus bas que ceux mesurés à l'intérieur tunnels droits.

Le tunnel défini dans les simulations comprend un plafond voûté, à travers lequel le CO est transporté avec les gaz de combustion. Par la suite, le CO remonte jusqu'au plafond du tunnel avant descendant vers les deux côtés. La répartition spatiale du CO est considérée comme influencée par le rayon de courbure du tunnel.

3.3. Analyse complète de l'effet d'altitude et de la ventilation longitudinale

Les modèles de distribution longitudinale de la température, de la visibilité et de la concentration de CO reflètent collectivement les caractéristiques de répartition de la fumée d'incendie dans le tunnel. Spécifiquement,

lorsque la vitesse de ventilation longitudinale dans le tunnel dépasse la vitesse critique, les flammes à haute température et la fumée générées par la source d'incendie décalée se propagent rapidement dans la direction du tunnel sous l'influence de la ventilation longitudinale. Cependant, cette propagation ne s'aligne pas parfaitement avec la direction longitudinale de la ventilation mais présente un certain écart. Par la suite, la fumée à haute température heurte et rebondit sur la paroi extérieure du tunnel. Ce phénomène se manifeste par le premier pic de température et de concentration de CO ainsi que par une zone de faible visibilité sur la face intérieure du tunnel. Ensuite, il y a un processus alterné de réflexion et de refroidissement entre les parois intérieure et extérieure pour la fumée à haute température. La principale distinction observée dans les tunnels de courbures différentes réside dans les positions et les valeurs des pics numériques. Néanmoins, par rapport aux tunnels droits, si la vitesse de ventilation longitudinale tombe en dessous de la vitesse critique dans un tunnel courbe, la température, la visibilité et la concentration de CO présentent des tendances similaires en aval de 0 m à 100 m par rapport à celles émises par la source d'incendie. La température, la visibilité et la concentration de CO diminuent avec l'augmentation de la distance par rapport à ladite source. Cependant, la région en amont connaît des différences significatives en raison de la couche arrière de fumée causée par les effets de courbure du tunnel. De plus, la courbure du tunnel contribue de manière significative à l'augmentation de la concentration de CO dans les régions situées entre 100 et 350 m en aval du foyer d'incendie.

3.4. Impact sur l'évacuation personnelle

3.4.1. Impact sur le temps de sortie sécurisé disponible

Sur la base de la distribution de la température, de la visibilité et de la concentration de CO, le temps de sortie en toute sécurité disponible (ASET) a été déterminé lorsqu'un facteur atteignait un niveau dangereux. Dans le cas d'un incendie dans un tunnel, la sécurité des personnes est principalement menacée par les trois facteurs suivants : l'augmentation de la température dans la zone source de l'incendie, la diminution de la visibilité due à la diffusion de la fumée et la dispersion de gaz toxiques. Ces trois facteurs se combinent progressivement pour former une zone dangereuse. Une analyse comparative révèle que la température est le principal facteur de risque contribuant au désastre dans la zone centrale d'un incendie de tunnel. À environ 120 s, les températures atteignent des niveaux dangereux dans la zone centrale. Lorsqu'un incendie se déclare dans un tunnel routier, la vitesse longitudinale du vent serait accélérée au-delà de la vitesse critique. Par conséquent, l'analyse suivante est basée sur les résultats du groupe de vitesse critique.

Comme indiqué ci-dessus, lorsqu'un incendie survient dans un tunnel courbe, la répartition de la fumée à haute température sur les côtés intérieur et extérieur du tunnel présente une certaine différence. La figure 11 montre les différences entre l'ASET à l'intérieur et à l'extérieur du tunnel. De gauche à droite et de haut en bas, les rayons de courbure correspondants de chaque tunnel sont 250 m, 400 m, 600 m, 800 m, 1 000 m, 1 200 m, 1 500 m et 2 000 m.

Comme le montre la figure 11, quel que soit le rayon de courbure, le côté intérieur du tunnel dispose d'un temps de sortie en toute sécurité plus long que le côté extérieur dans la zone centrale de l'incendie et à une distance de 150 m de la source de l'incendie. Dans une distance de 75 à 150 m de la source d'incendie, comme mentionné précédemment, lorsque la fumée à haute température frappe la paroi extérieure du tunnel et se reflète vers la paroi intérieure, elle donne naissance à une zone faible localisée de fumée à haute température à travers des passages successifs. reflets. Cependant, il est important de noter que la faible région de distribution de température près de la zone centrale de la source d'incendie, comme illustré dans la section 3.2.1 lorsque la fumée à haute température frappe le côté opposé du tunnel, continuera à se transformer en zone dangereuse. gamme de visibilité humaine à un stade précoce.

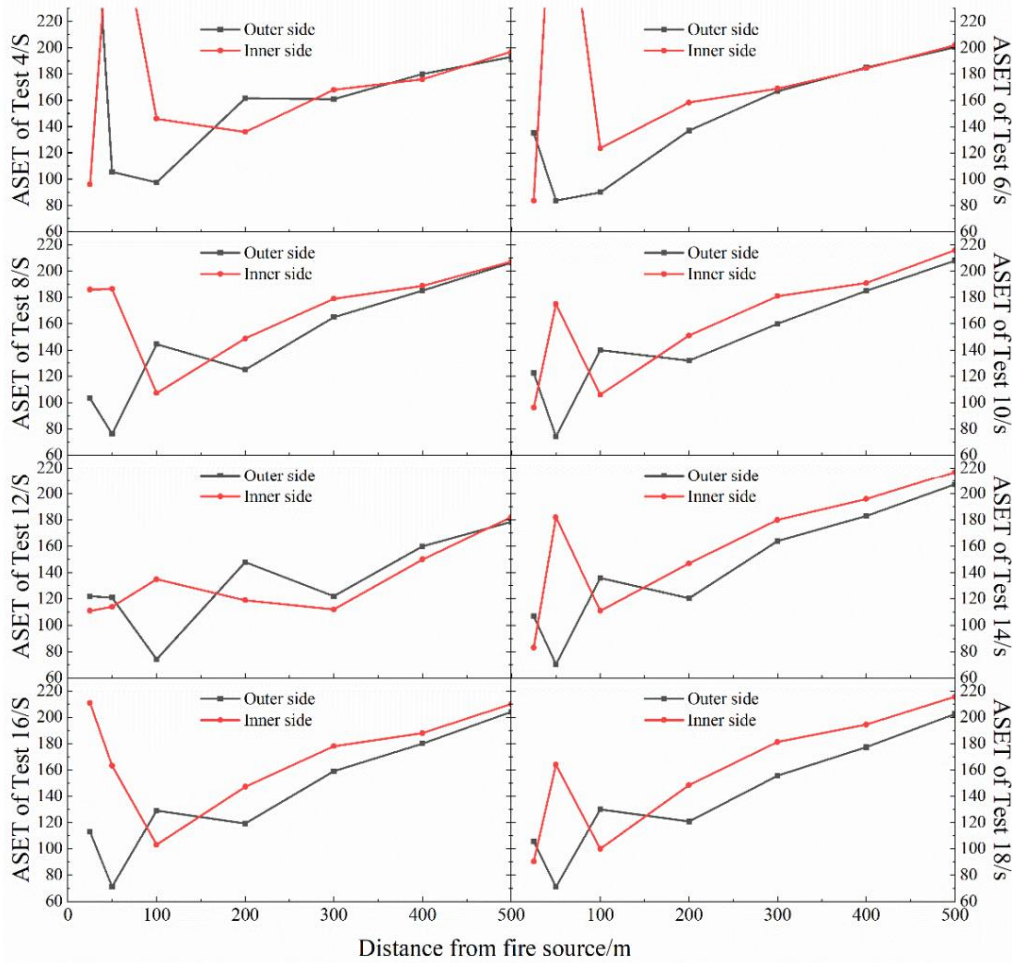


Figure 11. ASET de tunnels avec différents rayons de courbure à différentes distances de la source d'incendie.

3.4.2. Position d'une galerie pour les passants

Sur la base des résultats ci-dessus, lors de la conception des voies d'évacuation personnelles pour les tunnels courbes,

passant il est recommandé de positionner stratégiquement une galerie pour les personnes qui passent du côté intérieur de courbes, afin de maximiser le temps de sortie en toute sécurité disponible.

Sur la base des résultats ci-dessus, lors de la conception des voies d'évacuation personnelles pour les tunnels courbes, il est recommandé de positionner stratégiquement une galerie pour les personnes passant du côté intérieur de tunnel afin de maximiser le temps de sortie en toute sécurité disponible.

3.4.3. La position de la galerie pour les personnes passant sera généralement classée en trois étapes principales comme suit : détection d'incendie, confirmation de l'apparition d'un incendie et les actions d'évacuation [38]. Pour assurer l'évacuation sécuritaire de toutes les personnes, généralement être classé en trois étapes principales comme suit : détection d'incendie, confirmation de l'apparition d'un incendie et les actions d'évacuation [38]. Assurer l'évacuation en toute sécurité de toutes les personnes, notamment dans les situations dangereuses, il est impératif d'établir un espacement adéquat entre les zones d'accès à la source d'incendie. La distance maximale autorisée doit être définie comme la distance permettant aux personnes d'évacuer en toute sécurité dans le délai d'évacuation sécuritaire (RSET) requis. Le RSET est

RSET est où T_d est l'heure de l'alarme ; T_{pre} est l'heure précédant le déplacement pour l'évacuation personnelle ; et T_t est le temps d'évacuation personnel.

Les détecteurs de fumée utilisés dans l'ingénierie actuelle peuvent détecter des incendies jusqu'à 100 kW. Le feu où est l'heure de l'alarme ; 2 L'heure de début de l'alarme est calculée en fonction du t est le temps d'évacuation personnel. La loi de développement des incendies au stade initial est la suivante :

Les détecteurs de fumée utilisés dans l'ingénierie actuelle peuvent détecter des incendies jusqu'à 100 kW. Le l'heure de début de l'alarme est calculée en fonction du modèle feu feu dans cette recherche. Typiquement, le (4) La loi de développement des incendies au stade initial est la suivante :

où t est l'heure à laquelle l'incendie s'est produit ; Q_f est HRR, qui est défini sur 100 kW dans le calcul de l'heure de l'alarme ; et α est le coefficient de croissance du feu, fixé à 0,187 kW/s² dans cette étude. Par conséquent, l'heure d'alarme du système de détection d'incendie peut être déterminée comme suit :

$$T_d = \sqrt{Q_f / \alpha} = \sqrt{(100/0,187)} \approx 23,1 \text{ s}$$

(5)

L'intervalle de temps entre la réception de l'alarme incendie et le déclenchement de l'évacuation Les mesures, connues sous le nom de temps de pré-action ou temps de réponse à l'évacuation personnelle, sont cruciales pour urgences incendie. La détermination du temps de pré-action dépend principalement de facteurs tels que type de bâtiment et caractéristiques associées à la sécurité des occupants. Les recherches existantes les données [39–42] montrent que le temps préalable au déplacement pour l'évacuation personnelle varie de 30 s à 210 s. Dans cette étude, un temps de pré-action de 90 s a été observé.

À l'heure actuelle, aucune étude n'a indiqué une quelconque influence du rayon de courbure sur vitesse d'évacuation ou leurs choix dans un tunnel courbe. Par conséquent, l'évacuation personnelle le temps T_t est supposé cohérent entre les tunnels courbes et droits. Ce problème n'est pas discuté plus en détail dans cet article.

La figure 12 montre la répartition de la température dans le tunnel avec un rayon de courbure de 400 m à moins de 200 m du foyer d'incendie. De gauche à droite, les répartitions de température sont à 83,1 s, 113,1 s, 143,1 s et 173,1 s. Sur la base de l'heure d'alarme réglée de 23,1 s et de la temps de pré-déplacement pour une évacuation personnelle de 90 s, les personnes commenceront à évacuer à 113,1 s, et la répartition de la température dans le tunnel à ce moment est représentée sur la figure 12b.

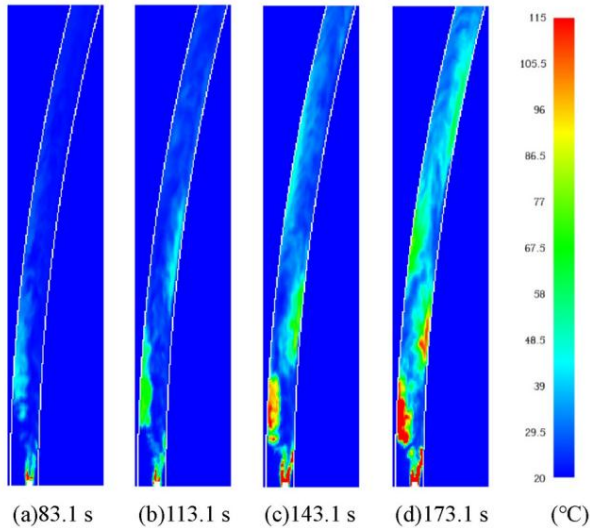


Figure 12. Répartition de la température du tunnel à moins de 200 m de la source d'incendie à différents moments. Figure 12. Répartition de la température du tunnel à moins de 200 m de la source d'incendie à différents moments.

À ce moment-là, comme indiqué précédemment, la fumée à haute température atteint la paroi extérieure du tunnel qui mène à la zone verte du côté extérieur. Le vert zone signifie que la température dans cette zone approche 60 °C, ce qui ne convient pas pour le passage des personnes. En général, lors des procédures d'évacuation, les individus doivent se déplacer le long de la voie piétonne des deux côtés des voies de circulation. Cependant, le danger d'incendie s'est formée à l'extérieur du tunnel, ce qui oblige les personnes à évacuer le long du tunnel. La fumée peut être classée selon les deux étapes suivantes : la phase de développement de l'incendie et la phase d'épandage longitudinal unidimensionnelle [46]. Au cours de la phase de développement de l'incendie, la fumée à haute température générée directement par la source d'incendie subit des collisions répétées 143.1 s. La présence d'une deuxième zone à haute température à l'intérieur du tunnel rend le mouvement de la fumée dans les tunnels courbes présente différents schémas. La propagation de la zone d'incendie s'est formée à l'extérieur du tunnel, ce qui oblige les personnes à évacuer le long du tunnel. Il en résulte plusieurs zones à haute température entre les côtés intérieur et extérieur. De plus, le long du côté extérieur du tunnel, la faisabilité d'un tel mouvement de va-et-vient entre l'intérieur et l'extérieur, présente également des pics alternés entre les côtés intérieur et extérieur, car les côtés extérieurs du tunnel sont compromis pour les personnes piégées dans un incendie. Par conséquent, dans le cas d'incendies survenant dans des tunnels courbes, il est recommandé debles que dans un tunnel droit où la visibilité est moins influencée par la température de la fumée, les personnes situées au cœur de la source d'incendie évacuent rapidement le long de la ligne médiane de aux caractéristiques de transmission mais plus affectées par la concentration de la fumée. Après le début de la diffusion longitudinale unidimensionnelle de la fumée, il n'y a aucune variation perceptible de température ou de visibilité à différents endroits du tunnel. Néanmoins, la répartition du CO ne correspond pas entièrement à la diffusion de la fumée. Dans la fumée à haute température, des zones distinctes de pics de concentration alternés de CO persistent à la fois à l'intérieur et à l'extérieur.

le tunnel. Une fois qu'ils ont dépassé une distance de 100 m du foyer d'incendie, ils doivent poursuivre leur évacuation le long de la paroi intérieure du tunnel et sortir par une galerie réservée aux passants.

Parallèlement, la comparaison présentée dans la figure 12 suggère également que si le temps préalable au déplacement pour l'évacuation personnelle peut être réduit à 60 s, les recherches existantes sur la vitesse d'évacuation personnelle [21, 43–45] indiquent que les individus seront capables d'évacuer le lieu d'évacuation. zone centrale de la source d'incendie avant la formation d'une zone à haute température. Au-delà de la zone centrale de la source d'incendie, le principal indice de danger d'évacuation personnelle passe de la température à la visibilité.

4. Discussion

Cette recherche sur la diffusion de la fumée dans les incendies de tunnels routiers courbes a révélé des modèles distincts de caractéristiques d'incendie à hauteur des yeux humains. Comparé aux tunnels droits, le mouvement de la fumée dans les tunnels courbes présente des schémas différents. La propagation de la fumée d'incendie peut être classée selon les deux étapes suivantes : la phase de développement du feu et la phase de propagation longitudinale unidimensionnelle [46]. Au cours de la phase de développement de l'incendie, la fumée à haute température générée directement par la source de l'incendie subit des collisions répétées entre les parois latérales intérieures et extérieures du tunnel. Par conséquent, ce processus entraîne la création de plusieurs zones à haute température entre les côtés intérieur et extérieur. De plus, le CO, qui a un impact significatif sur l'évacuation des personnes en raison de la combustion incomplète de la source d'incendie, présente également des pics alternés entre les côtés intérieur et extérieur lorsqu'il se propage avec la fumée à haute température. Cependant, la diffusion ultérieure de la fumée ressemble à celle d'un tunnel droit où la visibilité est moins influencée par la température de la fumée en raison des caractéristiques de transmission mais plus affectée par la concentration de la fumée. Après le début de la diffusion longitudinale unidimensionnelle de la fumée, il n'y a aucune variation perceptible de température ou de visibilité à différents endroits du tunnel. Néanmoins, la répartition du CO ne correspond pas entièrement à la diffusion de la fumée. Dans la fumée à haute température, des zones distinctes de pics de concentration alternés de CO persistent sur les parois latérales intérieures et extérieures pendant la phase de propagation unidimensionnelle.

Les résultats sur la distribution de la température concordent bien avec les études précédentes [4,14,18]. Cependant, il faut souligner que nous avons également pris en compte deux indicateurs critiques, à savoir la concentration de CO et l'acuité visuelle humaine, lorsque nous avons comparé nos résultats à ceux d'études plus anciennes. De plus, le choix du rayon de courbure du tunnel n'était pas limité à une valeur minimale de 2 500 m [16]. Sur la base d'une ingénierie pratique, la vitesse longitudinale de ventilation a été introduite dans les simulations pour prendre en compte le modèle de propagation de la fumée dans le scénario d'incendie réel. Les résultats ont dépassé la portée des mesures de contrôle de la fumée pour englober des considérations relatives à la sélection de stratégies d'évacuation personnelle.

Les limites de notre étude doivent être reconnues lors de l'interprétation de ces résultats. Tout d'abord, il est important de souligner que les résultats de distribution de température ont été validés par suffisamment d'expériences [11,15], garantissant l'exactitude de nos résultats. La répartition de la visibilité humaine a également été rigoureusement justifiée. Néanmoins, une vérification expérimentale du schéma de répartition de la concentration de CO dans les tunnels routiers courbes reste nécessaire. Dans les simulations numériques actuelles, le taux de dégagement de chaleur de la source d'incendie est systématiquement supposé être celui d'un incendie ultra-rapide. Cependant, le taux de dégagement de chaleur de la source d'incendie présente une tendance perceptible à l'augmentation progressive. De plus, notre sélection de simulations présente des limites. Comme aucun tunnel complètement plat n'est insensible à l'altitude en ingénierie réelle, notre étude reste limitée. Les variations de densité de l'air, d'humidité et de teneur en oxygène à l'emplacement du tunnel auront également un impact sur les résultats. Malgré son caractère préliminaire, notre étude indique clairement l'influence des différents rayons de courbure des tunnels sur la dispersion des fumées d'incendie et l'évacuation des personnes.

Une orientation future importante consiste à explorer les effets combinés de multiples facteurs d'influence. Par exemple, étudier l'impact des effets d'altitude et des effets de cheminée sur le modèle de diffusion de la fumée d'incendie dans un tunnel incurvé peut aider à élucider leur potentiel à améliorer ou à supprimer la distribution de la fumée. Un autre avenir important

La direction est une section de courbe de transition entre la zone droite et la zone courbe. L'influence du rayon de courbure en constante évolution sur la répartition de la fumée mérite également une étude plus approfondie.

Une nouvelle stratégie d'évacuation personnelle pour les tunnels routiers courbes peut être dérivée de nos découvertes. Dans les tunnels droits, l'évacuation s'effectue le long des trottoirs des deux côtés du tunnel menant à une galerie pour les passants. Cependant, dans les tunnels courbes, afin de minimiser les dommages et d'assurer une évacuation sécuritaire, nous recommandons que les personnes proches de la source d'incendie évacuent d'abord le long de la ligne centrale du tunnel sur une distance spécifique avant de passer aux passages pour piétons latéraux.

5. Conclusions

Pour étudier les caractéristiques de la température, de la concentration de CO et de la visibilité de l'œil humain à des hauteurs caractéristiques, une série de simulations numériques ont été réalisées en tenant compte du rayon de courbure et de la vitesse de ventilation longitudinale. L'impact sur l'évacuation des personnes a été conçu en fonction des résultats. Les principales conclusions sont les suivantes :

Sous l'influence de la ventilation longitudinale, la fumée d'incendie dans les tunnels courbes ne se disperse pas directement vers la sortie du tunnel. Au lieu de cela, la fumée se reflète entre les parois latérales intérieures et extérieures du tunnel. Par conséquent, de multiples zones à haute température se forment des deux côtés du tunnel à proximité de la source de l'incendie. L'emplacement des zones à haute température change avec les variations du rayon de courbure du tunnel, ce qui entraîne différentes caractéristiques de répartition de la fumée dans le tunnel.

Lorsque le rayon de courbure du tunnel est inférieur à 1 000 m, il existe une disparité plus prononcée des caractéristiques de répartition des fumées entre les tunnels courbes et droits. À mesure que le rayon de courbure du tunnel dépasse 1 000 m, la répartition des fumées dans les tunnels courbes s'aligne progressivement sur celle des tunnels droits.

En raison des caractéristiques particulières de répartition de la fumée dans les tunnels courbes, une comparaison des emplacements des sources d'incendie révèle que lorsque le véhicule source d'incendie est positionné dans la voie intérieure du tunnel, il présente un risque plus élevé d'évacuation des personnes. Par conséquent, grâce à une analyse et une comparaison de la température, de la visibilité et de la répartition de la concentration de CO sur les parois latérales intérieures et extérieures sur différents rayons de courbure des courbes du tunnel, il est déterminé que la galerie pour les personnes qui passent doit être située du côté intérieur du tunnel.

Pour l'évacuation des personnes dans la zone centrale du foyer d'incendie, compte tenu de l'impact des caractéristiques de répartition des fumées à haute température résultant de la ventilation longitudinale dans les tunnels courbes, nous recommandons d'effectuer dans un premier temps les évacuations le long de la ligne centrale du tunnel. Par la suite, les personnes doivent être guidées le long de la voie piétonne intérieure vers la galerie réservée aux personnes décédées à l'écart de la zone centrale du foyer d'incendie.

Contributions des auteurs : Conceptualisation, YC et ZL ; méthodologie, YC; logiciel, YC; validation, YC ; analyse formelle, YC ; enquête, ZL; ressources, ZL; conservation des données, YC ; rédaction – préparation du projet original, YC ; rédaction – révision et édition, ZL ; visualisation, YC ; supervision, ZL; administration de projet, ZL; acquisition de financement, ZL Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche a été financée par la Fondation nationale des sciences naturelles de Chine, numéro de subvention 41461016 et numéro de subvention 41761015.

Déclaration du comité d'examen institutionnel : sans objet.

Déclaration de consentement éclairé : sans objet.

Déclaration de disponibilité des données : Les contributions originales présentées dans l'étude sont incluses dans l'article, des demandes complémentaires peuvent être adressées à l'auteur correspondant.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Les références

1. Du, T. ; Lèvre.; Wang, Y. ; Xue, X. Décroissance longitudinale de la température de la fumée et de la vitesse du front dans les incendies de tunnels. *Chine Saf. Sci. J.* 2023, 33, 140-145. [\[Référence croisée\]](#)

2. Jiang, X.-P.; Chen, X.-G.; Guo, K. Étude sur la vitesse critique de l'incendie d'un tunnel de désenfumage à un point latéral. *Chine Saf. Sci. J.* 2021, 31, 105-111. [\[Référence croisée\]](#)

3. Zhao, Q. ; Li, J.-M. ; Xie, X. ; Liu, W. Étude numérique sur la diffusion et le contrôle de la fumée dans les tunnels souterrains incurvés urbains. *J. Phys. Conf. Ser.* 2023, 2445, 012003. [\[Réf. croisée\]](#)

4. Kashef, A. ; Sabre, HH ; Gao, L. Optimisation des stratégies de ventilation d'urgence dans un tunnel routier. *Technologie incendie.* 2016, 47, 1019-1046. [\[Référence croisée\]](#)

5. Wang, F. Recherche sur les paramètres clés de la ventilation opérationnelle du tunnel routier courbe. doctorat Thèse, Jiaotong du Sud-Ouest Université, Chengdu, Chine, 2010. [\[CrossRef\]](#)

6. Wang, F. ; Dong, G.-H. ; Wang, M. Étude sur la vitesse critique de l'air pour le contrôle des fumées d'incendie dans un tunnel incurvé. *Mod. Tunn. Technologie.* 2015, 52, 84-89. [\[Référence croisée\]](#)

7. Wang, F. ; Wang, M. ; Carvel, R. ; Wang, Y. Étude numérique sur le mouvement et le contrôle de la fumée d'incendie dans les tunnels routiers courbes. *Tunn. Sous-gr. Technologie spatiale.* 2017, 67, 1–7. [\[Référence croisée\]](#)

8. Caliendo, C. ; Ciambelli, P. ; De Guglielmo, ML; Méo, MG ; Russo, P. Simulation numérique de différents scénarios d'incendie de poids lourds dans des tunnels routiers bidirectionnels courbes et évaluation de la sécurité. *Tunn. Sous-gr. Technologie spatiale.* 2012, 3133, 50. [\[Référence croisée\]](#)

9. Wu, C. ; Lui, J. ; Ni, T. Recherche sur le mouvement de la fumée dans les incendies de tunnels curvilignes à petit rayon. *Scie au feu. Technologie.* 2014, 33, 37-40. [\[Référence croisée\]](#)

10. Wang, F. ; Wang, M.-N. Une étude informatique sur les effets de la localisation d'un incendie sur le mouvement de la fumée dans un tunnel routier. *Tunn. Sous-gr. Technologie spatiale.* 2016, 51, 405-413. [\[Référence croisée\]](#)

11. Zhong, MH ; Shi, CL-L.; Lui, L. ; Shi, J. ; Liu, C. ; Tian, X. Développement de fumée dans des incendies de tunnels longs et larges en pente à grande échelle sous ventilation naturelle. *Appl. Thermie. Ing.* 2016, 108, 857-865. [\[Référence croisée\]](#)

12. Zhang, S. ; Yang, H. ; Yao, Y. ; Zhu, K. ; Zhou, Y. ; Shi, L. ; Cheng, X. Enquête numérique sur la longueur de la couche arrière et la vitesse critique dans les tunnels de métro courbes avec différents rayons de braquage. *Technologie incendie.* 2017, 53, 1765-1793. [\[Référence croisée\]](#)

13. Pan, R.-L. ; Zhu, G.-Q.; Liang, Z.-H. ; Zhang, G. ; Liu, H. ; Zhou, X. Étude expérimentale sur la forme du feu et la température maximale sous l'axe du plafond dans un tunnel utilitaire sous l'effet d'une paroi latérale incurvée. *Tunn. Sous-gr. Technologie spatiale.* 2020, 99, 103304. [\[Référence croisée\]](#)

14. Lu, K.-X.; Xia, K.-H. ; Shi, C. ; Yang, M. ; Wang, J. ; Ding, Y. Enquête sur l'effet de courbure du tunnel sur le plafond Température des incendies de tunnels : une simulation numérique. *Technologie incendie.* 2021, 57, 2839-2858. [\[Référence croisée\]](#)

15. Xu, Z.-S.; Zhou, DM; Tao, H. ; Zhang, X. ; Hu, W. Enquête sur la vitesse critique dans un tunnel courbe sous les effets de différents emplacements d'incendie et rayons de braquage. *Tunn. Sous-gr. Technologie spatiale.* 2022, 126, 104553. [\[Réf. croisée\]](#)

16. Muhasilovic, M. ; Deville, MO Influence de la courbure du tunnel sur la propagation des conséquences d' un incendie accidentel à grande échelle - Une enquête CFD. *Turc. J. Ing. Environ. Sci.* 2013, 31, 391-402. [\[Référence croisée\]](#)

17. Lu, F. Recherche par simulation sur le contrôle de la fumée d'incendie dans un tunnel routier incurvé. doctorat Thèse, Institut de technologie de Harbin, Harbin, Chine, 2017. [\[CrossRef\]](#)

18. Zhao, W.-F. ; Lv, S.-J. ; Xu, H. Caractéristiques du mouvement de la fumée du feu dans un tunnel à petit rayon de courbure. *Scie au feu. Technologie.* 2019, 38, 77-81. [\[Référence croisée\]](#)

19. Lin, L. ; Jian, G. ; Xiong, X.-P. Analyse numérique du flux de fumée dans un incendie de tunnel à courbure unique. *J. Nanchang Hangkong Univ. (Nat. Sci. Ed.)* 2019, 33, 66-67, 88. [\[CrossRef\]](#)

20. Liu, Z. ; Chen, C. ; Liu, M. ; Wang, S. ; Liu, Y. Simulations numériques sur l'effet extincteur du système de brouillard d'eau avec différents Paramètres de ventilation longitudinale dans les incendies de tunnels courbes. *Av. Civ. Ing.* 2021, 5, 1–13. [\[Référence croisée\]](#)

21. JTG/T D70/2-02-2014 ; Lignes directrices pour la conception de la ventilation du tunnel routier. People's Communications Press : Pékin, Chine, 2014.

22. NFPA 502 ; Norme pour les tunnels routiers, les ponts et autres autoroutes à accès limité. Association nationale de protection contre les incendies : Quincy, MA, États-Unis, 2020.

23. McGrattan, K. ; McDermott, R. ; Floyd, J. ; Hostikka, S. ; Forney, G. ; Baum, H. Modélisation informatique de la dynamique des fluides du feu. *Int. J. Informatique. Fluide Dyna.* 2012, 26, 349-361. [\[Référence croisée\]](#)

24. McGrattan, K. ; Hostikka, S. ; McDermott, R. ; Floyd, J. ; Weinschenk, C. ; Overholt, K. Guide de l'utilisateur du simulateur Fire Dynamics, 6e éd.; Publication spéciale (NIST SP) – 1019 ; Institut national des normes et de la technologie : Gaithersburg, MD, États-Unis, 2013. [\[CrossRef\]](#)

25. Fan, C. ; Chen, J. ; Zhou, Y. ; Liu, X. Effets de la localisation de l'incendie sur la capacité d'évacuation des fumées des puits de ventilation naturelle en milieu urbain tunnels. *Mater du Feu.* 2018, 42, 974-984. [\[Référence croisée\]](#)

26. McGrattan, KB ; McDermott, RJ; Weinschenk, CG; Forney, GP Guide de référence technique du simulateur de dynamique du feu Volume 1 : Modèle mathématique ; Publication spéciale du NIST ; Institut national des normes et de la technologie : Gaithersburg, MD, États-Unis, 2013. [\[Référence croisée\]](#)

27. Ji, J. ; Gao, ZH; Ventilateur, CG ; Sun, JH Large Eddy Simulation de l'effet de cheminée sur l'effet d'épuisement naturel de la fumée sur une route urbaine incendies de tunnels. *Int. J. Chaleur Masse Tran.* 2013, 66, 531-542. [\[Référence croisée\]](#)

28. Zhang, X.-L. ; Lin, Y.-J.; Shi, C. ; Zhang, J. Simulation numérique de la température maximale et de la longueur de la couche arrière de fumée dans un tunnel incliné sous ventilation naturelle. *Tunn. Sous-gr. Technologie spatiale.* 2021, 107, 103661. [\[Réf. croisée\]](#)

29. Bai, Y. ; Zhang, X.-F. ; Yan, X. ; Zeng, Y. Étude sur le contrôle de la vitesse sous le feu dans un tunnel routier bidirectionnel à haute altitude. *Menton. J. Undergr. Ingénieur spatial*. 2019, 15, 269-276.
30. Association mondiale de la Route (AIPCR). *Le Manuel des Tunnels Autoroutiers* ; Association mondiale de la Route : Pairs, France, 2016.
31. Zheng, B. ; Croc, L. ; Guo, R. Analyse de la loi de distribution longitudinale de la température et des facteurs d'influence de la haute altitude Tunnel sous Ventilation Unidirectionnelle. *Mod. Tunn. Technologie*. 2021, 58, 349-358. [\[Référence croisée\]](#)
32. Liu, B. ; Mao, J. ; Xi, Y. ; Hu, J. Effets de l'altitude sur la vitesse de déplacement de la fumée et la répartition longitudinale de la température dans le tunnel les feux. *Tunn. Sous-gr. Technologie spatiale*. 2021, 112, 103850. [\[Réf. croisée\]](#)
33. JTG D70/2-2014 ; Spécifications pour la conception des tunnels routiers. Section 2 Ingénierie du trafic et installations affiliées. Chine Communications Press : Pékin, Chine, 2014.
34. Jafari, S. ; Farhanieh, B. ; Afshin, H. Enquête numérique sur la vitesse critique dans les tunnels courbes : étude paramétrique et établissement mise en place d'un nouveau modèle. *Tunn. Sous-gr. Technologie spatiale*. 2023, 135, 105021. [\[Réf. croisée\]](#)
35. Jafari, S. ; Farhanieh, B. ; Afshin, H. Effets des paramètres d'incendie sur la vitesse critique dans les tunnels courbes : une étude numérique et Analyse de la surface de réponse. *Technologie incendie*. 2024, 60, 1769-1802. [\[Référence croisée\]](#)
36. Pan, R.-L. ; Wang, Y.-N. ; Yue, S.-Y. ; Ran, CH ; Cheng, HH ; Zhong, M.-H. Etude expérimentale grandeur nature sur les caractéristiques du champ d'écoulement longitudinal des fumées dans les tunnels ferroviaires à grande vitesse. *Université J. Tsinghua. (Sci. Technol.)* 2024, 1-12. [\[Référence croisée\]](#)
37. Administration nationale des chemins de fer de la République populaire de Chine. Code de conception en matière d'ingénierie d'évacuation pour la prévention des catastrophes et le sauvetage des tunnels ferroviaires ; Administration nationale des chemins de fer de la République populaire de Chine : Pékin, Chine, 2017.
38. Leslie, J. ; Millenson, J. *Principes d'analyse comportementale* ; Prentice Hall : Hoboken, New Jersey, États-Unis, 1967.
39. Comité Technique AIPCR Route. *Contrôle des incendies et de la fumée dans les tunnels routiers* ; Comité Technique AIPCR Route : La Défense, France, 1999.
40. Association nationale de protection contre les incendies. Code national d'alarme et de signalisation d'incendie NFPA 72, édition 2019 ; Association nationale de protection contre les incendies : Boston, MA, États-Unis, 2019.
41. Caliendo, C. ; Ciambelli, P. ; De Guglielmo, ML ; Méo, MG ; Russo, P. Simulation de l'évacuation des personnes en cas d' incendie dans un tunnel routier. *Procedia : Social et comportemental. Sciences* 2012, 53, 178-188. [\[Référence croisée\]](#)
42. Wang, G.-H. ; Yan, Z.-G. Etude de simulation du temps d'évacuation lors d'un passage piéton long et raide dans un tunnel routier. *Mod. Tunn. Technologie*. 2019, s2, 132-137. [\[Référence croisée\]](#)
43. GB 1589-2016 ; Limites de dimensions, de charge par essieu et de masses pour les véhicules à moteur, les remorques et les véhicules combinés. Administration générale du contrôle de la qualité, de l'inspection et de la quarantaine de la République populaire de Chine : Pékin, Chine, 2016.
44. Wang, X. ; Qu, J.-R. ; Xia, Y. ; Wang, L. ; Zhen, Y. Étude sur l'évacuation et le sauvetage du personnel d'incendie dans un tunnel routier bidirectionnel à un seul trou . *J. Undergr. Ingénieur spatial*. 2020, 16, 944-954.
45. Zhang, T.-R. ; Li, W. ; Yan, Z.-G. Recherche sur la performance de la stratégie longitudinale de désenfumage et l'évacuation du personnel en Tunnel routier. *Mod. Tunn. Technologie*. 2020, 57, 651-661. [\[Référence croisée\]](#)
46. Jones, WW État de l'art en matière de modélisation de zones d'incendies. La Vereinigung zur Forderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (VFDB). Dans *Actes du 9e Séminaire international sur la protection contre les incendies, Méthodes d'ingénierie pour la sécurité incendie*, Munich, Allemagne, 25-26 mai 2001 ; pp. 89-126.

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.