

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Projet de fin d'études

*Pour l'obtention du diplôme
d'ingénieur d'état en Génie Mécanique*

Analyse et optimisation d'un système de
ventilation par utilisation d'un code CFD
Application : Tunnel du métro d'Alger et
tunnel routier

Proposé et dirigé par :
Dr. B. BENKOUSSAS

Etudié et Présenté par :
A. MERABTINE

Promotion 2007-2008

Remerciements

Je remercie avant tout ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la volonté et le courage de mener a bien ce modeste travail.

Quelques phrases de remerciement me semblent bien pauvres pour exprimer toute ma gratitude au Docteur B.BENKOUSSAS qui m'a proposé ce sujet. Merci pour votre confiance, vos précieux conseils, votre enthousiasme et votre soutien sans faille.

Je tiens également à remercier Monsieur K. Ben Miloud doctorant de l'Ecole nationale polytechnique, pour ses conseils, son suivi attentif, ses réflexions pertinentes et sa rigueur.

Je tiens à adresser mes remerciements au Docteur S. LARBI, pour avoir accepté de présider la soutenance. J'ai aussi été ravi que le Docteur A. SMAILLI, ait accepté de faire partie du jury en tant qu'examineur.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur M. ZENDAOUI, Directeur Général adjoint de l'Entreprise de Métro d'Alger (EMA) pour m'avoir accueilli au sein de l'EMA et m'avoir permis de s'informer.

Je n'oublie pas de remercier aussi, Messieurs H. BENMEBAREK, O. BOUSKINE et L. BOUTAKHEDMITE, ingénieurs à L'EMA pour leur sympathie et leur aide précieuse.

Enfin, c'est dans un état d'esprit mitigé que je rédige ces quelques lignes afin de remercier tous mes enseignants et toutes les personnes qui ont contribué implicitement ou explicitement à l'ensemble de ce travail.

Dédicaces

*Je dédie ce travail
A mes très chers parents, à mes
frères et à toute la famille.*

... Abdelatif.

ملخص:

العمل المقدم يهتم بدراسة خصائص سريان الأدخنة بواسطة اصطناع دخان متموج لعدة سيناريوهات التي تمثل تسرب الأدخنة بواسطة البرنامج الرقمي (ف.د.س) و هذا لكي يتسنى لنا إيجاد الحالة الحاسمة. اخترنا لذلك نموذجين هندسيين: مقطع من نفق مترو الجزائر و الآخر نفق للسيارات. هذا العمل يهتم أيضا بتقييم احتمالية البرنامج الرقمي (ف.د.س) لتحليل و توسعة نظام التهوية بداخل النفق

كلمات مفتاحية: تسرب، أدخنة، حريق، اصطناع، حالة حاسمة

Résumé:

Le travail présenté dans le cadre de ce projet de fin d'étude vise à caractériser l'écoulement de fumées à travers la simulation du panache air- fumées, pour différents scénarios de propagation de fumées, en utilisant l'outil numérique FDS dont le but d'évaluer l'état critique de désenfumage. Deux types de géométries sont choisis : un tronçon du tunnel de métro d'Alger et un tunnel routier. Ce travail a aussi pour objectif d'évaluer les potentialités du code de calcul FDS pour analyser et optimiser un système de ventilation dans les tunnels.

Mots clés: simulation, incendie, propagation, fumées, état critique.

Abstract :

The work presented in this study aims characterizing the flow of smoke through the simulation of the plume air fume in various scenarios of propagation of smoke by using the numerical software FDS. The study is also to evaluate the critical conditions of smoke clearing. Two types of geometries are selected: a section of a subway tunnel of Metro of Algiers and a road tunnel. This work aims also to evaluate the potentialities of the computer software FDS to analyze and optimize a ventilation system of the tunnel.

Keywords: simulation, fire, propagation, smoke, critical conditions.

Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Nomenclature

1. Chapitre 1 : Introduction	1
1.1 Objectif du présent travail	4
1.2 Structure du mémoire	4
2. Chapitre 2 : Phénoménologie de l'incendie en tunnel	5
2.1 Problématique de l'incendie en tunnel	5
2.1.1 Des enjeux importants et divers	5
2.1.2 Les sources d'incendie en tunnels	5
2.1.3. Les dangers lors d'un incendie en tunnel	6
2.1.4. Puissances de référence et température atteinte	6
2.2 Comportement des fumées en cas d'incendie	7
2.2.1 Mouvement des fumées dans de l'air au repos	7
2.2.2 Influence du courant d'air longitudinal	7
2.2.3 Effet de la pente	8
2.3 Le désenfumage	9
2.3.1 Organisation de la sécurité et rôle de désenfumage	9
2.3.2 Les stratégies de désenfumage	9
2.3.3 Cas d'un tunnel routier	10
2.3.3.1 La ventilation longitudinale	10
2.3.3.2 La ventilation transversale	11
2.3.4 Cas d'un tunnel de métro	11
2.3.4.1 Principes d'évacuation des fumées	12
2.3.4.2 Considérations de base	12
2.3.4.3 Principe de ventilation en station	12
2.3.4.4 Principe de ventilation en interstation	13
2.3.4.5 Scénarios de désenfumage	14
2.4 Les moyens d'étude de l'incendie et du désenfumage en tunnel	15
2.4.1 Les essais sur site	15
2.4.2 Les maquettes expérimentales	16
2.4.3 Modélisation numérique	16
3. Chapitre 3 : Théorie et potentialité du code FDS	18
3.1 Code de calcul « <i>Fire Dynamic Simulator</i> » (version 5.1.0)	19
3.1.1 Présentation du logiciel	19
3.1.2 Exploitation du logiciel	19

3.1.3	Définition des conditions de simulation sous FDS (Fichier input)	20
3.1.4	Résultats générés	21
3.2	La Formulation mathématique du code FDS	21
3.2.1	Modèle hydrodynamique	21
3.2.2	Modèle de combustion	23
3.2.3	Modèle de rayonnement	25
3.3	Résolution numérique	25
3.3.1	Equations simplifiées (modèle hydrodynamique)	25
3.3.2	Discrétisation temporelle	26
3.3.3	Discrétisation spatiale	26
3.3.4	Modèle de combustion	28
3.4	Choix du maillage	28
4.	Chapitre 4 : Simulation de la dynamique des fumées avec le code FDS : Application à une géométrie type tunnel du métro d'Alger	31
4.1	Simulation	33
4.1.1	Premier scénario	33
4.1.1.1	Conditions aux limites	34
4.1.1.2	Résultats de la simulation.....	34
4.1.1.3	Analyse de la migration des fumées.....	39
4.1.1.4	Conclusion	45
4.1.2	Deuxième scénario	45
4.1.2.1	Conditions aux limites	46
4.1.2.2	Géométrie	46
4.1.2.3	Choix de la vitesse d'insufflation.....	46
4.1.2.4	Simulations et Résultats.....	47
4.1.2.5	Conclusion.....	51
5.	Chapitre 5 : Etude et simulation du désenfumage dans un tunnel routier	52
5.1	Validation du code FDS (stratégie longitudinale).....	52
5.2	Modélisation de la stratégie longitudinale	54
5.2.1	Simulations et résultats	54
5.2.1.1	Conditions initiales et aux limites	54
5.2.1.2	Evaluation de la vitesse critique (deuxième méthode).....	54
5.3	Validation du code FDS (stratégie transversale).....	57
5.4	Modélisation de la stratégie transversale.....	58
5.4.1	Simulations et résultats	58
5.4.1.1	Conditions initiales et aux limites	58
5.4.1.2	Evaluation de la vitesse de confinement (deuxième méthode)..	59
	Conclusion générale	61
	Références bibliographiques	64

Nomenclature

Lettres latines

D_1	Coefficient de diffusion de l'élément '1'	s^{-1}
f	Vecteur des forces extérieures	N
g	Gravité	m/s^2
H	Hauteur du tunnel	m
h	Enthalpie spécifique	kJ/kg
h_0	Enthalpie par unité de masse de l'élément '1'	kJ/kg
k	Conductivité thermique	$w/m.K$
L	Longueur de la couche de fumée stratifiée	m
M	Nombre de Mach	-
m_1'''	Débit massique par unité de volume	$kg/m^3.s$
p	Pression	Pa
p_0	Pression moyenne	Pa
\tilde{p}	Perturbation de la pression	Pa
Q	Puissance thermique	W
q_r	Flux radiatif	kW/m^2
$\nabla . q$	Somme des deux flux de chaleur par conduction et par rayonnement	kW/m^2
R	Constante des gaz parfaits	$J/mol.K$
s	Vecteur unitaire dans la direction de l'intensité	-
t	Temps	s
T	Température	$^{\circ}C$
T_0	Température ambiante	$^{\circ}C$
U	Vitesse d'écoulement d'air longitudinal	m/s
U_C	Vitesse critique en stratégie longitudinale	m/s
u	vitesse	m/s
V	Composante de la vitesse verticale	m/s
V_C	Vitesse critique	m/s
V_d	Vitesse de déstratification	m/s
V_e	Vitesse d'extraction	m/s
V_{in}	Vitesse d'insufflation	m/s
\bar{W}	Poids moléculaire du mélange gazeux	N/mol
W_C	Vitesse de confinement	m/s
W_e	Vitesse d'extraction en stratégie transversale	m/s
W_{α}	Poids moléculaire de l'espèce gazeuse α	N/mol

Y_1	Fraction massique de l'élément '1'	-
Y_O^∞	Fraction massique de l'oxygène à l'ambiance	-
Y_F^I	Fraction massique de combustible dans le jet	-
Z	Fraction de mélange	-
HRPPUA	Puissance thermique par unité de surface	kW/m ²

Lettres grecques

Φ	Fonction de dissipation	-
μ	Viscosité dynamique du fluide	Pa.s
ν_α	Coefficient stœchiométrique de l'élément α	-
ρ	Masse volumique	kg/m ³
ρ_0	Masse volumique de l'air à l'ambiance	kg/m ³
τ_{ij}	Les composantes du tenseur des forces de viscosité	Pa.s
ω	La vorticité	-

Indices

∞	Condition ambiante
P_1	Première porte cotée gauche au niveau de la salle des billets
P_2	Deuxième porte cotée gauche au niveau de la salle des billets
CO	Monoxyde de Carbone
CO ₂	Dioxyde de Carbone

Chapitre 1

Introduction

Les incendies actuels, quelle que soit leur origine, suscitent un dilemme. La majeure partie des ces incendies a des origines humaines (imprudence, malveillance...). Ils sont particulièrement destructeurs et occasionnent de lourds et de nombreux dégâts aux ouvrages. Les vies humaines et leurs activités ne sont pas épargnées. Sur la figure (1.1), le détail d'une photo d'un tableau de 1666 représentant le grand incendie de Londres où le feu détruisit les maisons d'environ 70 000 des 80 000 habitants de la Cité. L'incendie d'Hambourg du 5 au 8 mai 1842 qui détruisit environ 4 000 logements, près de 10% de la population se retrouvait sans toit. Ce sont des exemples d'incendies tristement célèbres [1].



Fig. 1.1 le grand incendie de Londres [1]

De nos jours, le risque d'incendie est accentué par les activités de l'homme moderne et les causes d'incendie sont dans la plupart du temps d'origine énergétique (étincelles, réactions chimiques, court - circuits). A l'échelle nationale nous citons, l'explosion du 19 janvier 2004 qui a détruit la moitié du complexe gazier de Skikda et a causé la mort de 27 personnes et près de 12 blessés, l'incendie du 3 septembre 2007 qui a détruit plus de 55 hectares de forêt et d'arbres fruitiers à Zarifet près de Tlemcen (figure 1.2). On peut citer encore la récente catastrophe qui s'est produite le 28 février 2008 dans le tunnel des chemins de fer au niveau des gorges près de la ville de Lakhdaria qui causé par le télescopage d'un train de marchandises en provenance d'Alger et se dirigeant a Bordj Bou Arréridj qui tractait 10

wagons-citernes de gasoil et 5 autres chargés d'essence et une locomotive en provenance de Bouira (figure 1.3).



Fig. 1.2 Forêt de Zarifet en feu.



Fig. 1.3 Accident dans un Tunnel près de Lakhdaria (28 février 2008).

Le choc s'est produit à l'intérieur d'un tunnel d'environ 700 mètres de long sans issues de secours ni voies d'intervention. Le feu intense et les fumées toxiques résultant des explosions ont pratiquement rendu impossible l'intervention du personnel de la protection civile.

L'incendie est un phénomène rapide et dévastateur :

- Rapide : le feu se propage très vite, les victimes ont très peu de temps pour réagir. A titre d'exemple, si un verre d'eau est suffisant pour éteindre un feu au bout d'une minute, un seau d'eau est nécessaire pour la deuxième minute, une citerne d'eau pour la troisième, etc.
- Dévastateur : il fait des victimes parmi les personnes présentes et celles qui interviennent sur le lieu du sinistre et provoque des dégâts matériels importants.

Lors d'un incendie en milieu confiné (habitation, tunnel...), le danger pour les personnes est multiple. Les facteurs de risque principaux sont :

- L'opacité des fumées : les victimes ne peuvent plus s'orienter pour fuir, la propagation des fumées provoque une attitude de panique à l'origine de mauvais réflexes.
- La toxicité des fumées : outre l'état d'incapacité provoqué par les fumées toxiques (les victimes intoxiquées sont incapable de fuir), une exposition aux fumées, même très brève (moins de 5 minutes), peut donner lieu à un handicap à vie.

- La chaleur : il fait 600°C en moins de 5 min dans un espace clos. La température peut atteindre 1200°C dans une cage d'escalier. Dès que la température atteint 65°C, le corps humain ne fonctionne déjà plus.

L'incendie en tunnel est un événement qui demeure exceptionnel et l'on recense qu'une dizaine de cas d'incendies dramatiques de point de vue des pertes humaines. Néanmoins, ce type d'incendie est caractérisé par deux constats majeurs. D'une part, un incendie en tunnel a des conséquences plus dramatiques que ceux, plus fréquentes qui surviennent sur voies ouvertes à l'air libre. D'autre part, le risque d'incendie est accentué par l'augmentation du trafic routier et, en particulier, par la fréquentation accrue de poids lourds dans ces infrastructures.

Ce type d'incendie peut faire des victimes à proximité du lieu du sinistre mais aussi à plusieurs centaines de mètres de part et d'autre de celui-ci. Ce constat fait prendre conscience que, dans un tunnel, le danger majeur pour les usagers réside dans la propagation des fumées d'incendie (figure 1.4) et que ce danger peut être amplifié par une ventilation mal maîtrisée dans l'ouvrage.



Fig. 1.4 Propagation de fumées dans un tunnel routier [2].

1.1 Objectif du présent travail

Lorsqu'un incendie se déclare dans un tunnel, nous avons vu que le danger réside principalement dans la propagation des fumées chaudes, denses et toxiques et que ce danger peut être amplifié par une ventilation mal maîtrisée.

L'objectif visé à travers ce mémoire est de caractériser l'écoulement des fumées à travers la simulation de l'aéroulque dans un scénario de propagation des fumées. L'interaction entre le panache d'incendie qui se développe au-dessus du foyer et la ventilation en tunnel est aussi recherchée.

Ce mémoire s'articule autour d'un ensemble d'études sur le comportement d'un panache pour différentes configurations. Nous considérerons trois situations : la fumée se développant en champ libre dans un fluide ambiant au repos, puis le cas le plus complexe d'une fumée se développant en milieu confiné et ventilé type tunnel de métro et tunnel routier.

Outre une meilleure compréhension des mouvements fluides au voisinage d'un feu en tunnels, les travaux présentés dans ce mémoire ont aussi pour objectif d'évaluer les potentialités d'un code de calcul pour analyser et optimiser un système de ventilation.

Le modèle physique utilisé est un tronçon de tunnel du métro d'Alger sur lequel des simulations numériques sont réalisées à l'aide du code de calcul « Fire Dynamic Simulator » (FDS) développé par le NIST et basé sur le principe de champ.

1.2 Structure du mémoire

Le présent mémoire est devisé en cinq chapitres :

Dans le chapitre un, on introduit le thème, suivi par le chapitre deux dans lequel on présente la phénoménologie de l'incendie en tunnel (problématique de l'incendie et désenfumage).

Le chapitre trois est consacré à la présentation du code de calcul « *Fire Dynamic Simulator* » (FDS), la formulation mathématique et la résolution numérique.

Le chapitre quatre présente le principe de simulation sur une géométrie représentant un tronçon de tunnel de métro d'Alger, suivi de la présentation des résultats obtenus par FDS pour différents scénarios. Les résultats sont interprétés en conséquence.

Une validation du code FDS, suivi de l'évaluation des conditions critiques de désenfumage pour un tunnel routier en utilisant deux types de ventilation, sera entreprise dans le chapitre cinq. Les différents résultats des séries de test seront interprétés également.

Enfin, une conclusion dans laquelle une recommandation sur le système de ventilation adéquat aux géométries étudiées est faite.

Chapitre 2

Phénoménologie de l'incendie en tunnel

2.1. Problématique de l'incendie en tunnel

2.1.1 Des enjeux importants et divers

Dans un souci d'amélioration de l'efficacité des réseaux de transport et de préservation de l'environnement, on observe ces dernières années un développement des infrastructures souterraines à l'échelle internationale, qu'elles soient routières ou ferroviaires. Les responsables (concepteurs et exploitants) de ces projets ambitieux, mais également ceux des autres ouvrages plus courants, sont confrontés de manière permanente à la question de la sécurité des personnes et des biens.

Les incendies en tunnel ont d'autres conséquences néfastes. Les fortes températures sont susceptibles de causer de graves dommages à la structure, ce qui entraîne des travaux longs et coûteux [3]. Des ouvrages très importants peuvent être non utilisables durant de longues périodes, avec de graves conséquences sur la vie économique de régions entières, c'est le cas de la région est de notre pays suite à l'accident du tunnel de Lakhdaria.

2.1.2 Les sources d'incendie en tunnels

Les sources potentielles d'incendie en tunnel sont les véhicules présents et les matériaux et installations de l'espace de circulation lui-même ou des locaux techniques. Pour ce qui est des installations du tunnel présentes dans le tube lui-même, en raison des dispositions prises en matière de réaction au feu des matériaux, les puissances calorifiques sont faibles et un éventuel incendie ne risque pas de se propager (dans le seul cas de l'inflammation de la chaussée causée par un incendie de véhicule, la contribution à la puissance thermique peut atteindre un niveau important, mais uniquement quand l'incendie de véhicule dégage lui-même une très forte puissance, et relativement tard dans le développement de l'incendie) [2].

Les incendies en tunnel qui sont dangereux pour les usagers sont donc les incendies de véhicules présents dans le tunnel. L'incendie peut se produire en tout endroit du tunnel avec tout type de véhicule et de chargement du véhicule. Les caractéristiques de l'incendie seront fortement variables d'un cas à l'autre. La puissance thermique d'un incendie de véhicule varie entre moins de 2 MW (petit incendie de véhicule de tourisme) et 200 MW (incendie d'une citerne d'hydrocarbures).

La plupart de ces incendies sont causés par une inflammation spontanée des véhicules par défaillance technique (échauffement anormal, court-circuit,...). En revanche, la quasi-totalité des incendies ayant entraîné des décès est consécutive à un accident.

2.1.3 Les dangers lors d'un incendie en tunnel

L'ordre d'apparition des dangers pour les personnes lors d'un incendie en tunnel est en général le suivant :

- Le premier effet est l'arrivée des fumées, qui sont très opaques et gênent considérablement l'évacuation des usagers,
- Dans un second temps, les usagers qui n'ont pas pu évacuer le tunnel à cause du manque de visibilité sont incommodés voire asphyxiés par les fumées dégagées par l'incendie dont le niveau de toxicité augmente progressivement,
- Enfin, la chaleur dégagée par l'incendie provoque de fortes élévations de température, pouvant mettre en danger directement des personnes (par convection ou par rayonnement), mais aussi détruire ou endommager des véhicules ou des composants du tunnel parfois indispensables à la sécurité des usagers (éclairage, ventilation, systèmes de communication, faux plafonds, ...) [2].

2.1.4 Puissances de référence et température atteinte

Un incendie de voiture dégage en général une puissance thermique de l'ordre de 5 MW, alors qu'un incendie de poids lourd peut dégager jusqu'à 200 MW. Cette puissance varie beaucoup selon les conditions d'alimentation en air frais et selon la surface de contact qu'offre le combustible avec l'air frais.

Afin de contourner l'incertitude sur les puissances, la réglementation définit des incendies de dimensionnement, dont la puissance correspond à des incendies violents (tableau 2.1). Des incendies plus violents peuvent être pris en compte lors de l'étude spécifique des dangers, afin de tester le niveau de sécurité d'un tunnel dans un tel cas.

Tab. 2.1 Puissances thermiques d'incendie utilisées pour le dimensionnement [2].

Type de véhicule	Puissance thermique
Véhicule léger	5 à 8MW
Camionnette	10 à 15MW
Poids lourd sans marchandises dangereuses	30MW
Poids lourd avec marchandises dangereuses	200 MW

Dans de cas extrêmes, les températures peuvent atteindre jusqu'à 1300°C, alors que dans un feu de bac de fioul à l'air libre, elles ne dépassent pas les 800°C. Ces températures extrêmes sont dues au fait que le feu est bien alimenté en oxygène car le tunnel est ouvert aux deux extrémités, mais aussi à l'effet de four qui peut préchauffer l'air arrivant dans la zone de combustion.

2.2. Comportement des fumées en cas d'incendie

Un incendie produit des fumées chaudes qui tendent à se plaquer en sous-face de la voûte ou du plafond du tunnel. Selon le courant d'air longitudinal, mais aussi selon la pente du tunnel, le comportement des fumées est différent.

2.2.1 Mouvement des fumées dans de l'air au repos

En l'absence de courant d'air, les fumées se maintiennent en partie haute du tunnel sur d'assez longues distances. Si le tunnel n'est pas en pente, les fumées se propagent de façon symétrique dans les deux directions à une vitesse de l'ordre de 1 à 2 m/s pour un incendie de véhicule léger, et vraisemblablement à plus de 4 m/s pour une citerne d'essence. Au fur et à mesure de sa progression, la couche de fumée se refroidit et sa vitesse diminue. Une couche d'air frais se maintient sous la couche de fumée sur plusieurs centaines de mètres ; elle est entraînée en direction de l'incendie.

En continuant de s'éloigner, les fumées se rapprochent du sol et sont susceptible d'être renvoyées vers le feu par le courant d'air contraire. Elles occupent alors tout l'espace du tunnel (figure 2.1 (a, b)) [2].

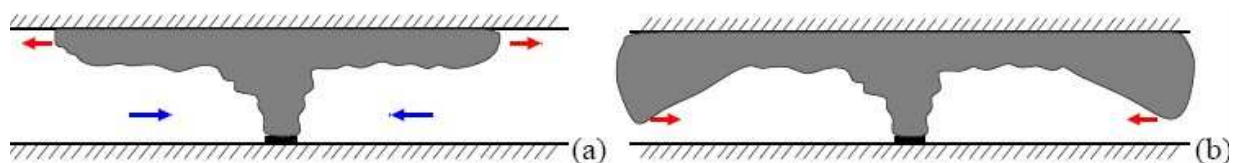


Fig. 2.1 Comportement des fumées en l'absence de pente et de courant d'air.
(a) Développement initial ; (b) Comportement après un certain temps.

2.2.2 Influence du courant d'air longitudinal

En présence d'un courant d'air suffisant, toujours en l'absence de pente, l'ensemble des fumées est poussé d'un seul côté par le courant d'air. D'après « Vauquelin » [4], la vitesse critique V_c est la vitesse minimale du courant d'air longitudinal permettant de repousser l'intégralité des fumées en aval de la source de chaleur. Les figures (2.2 (a) et (b)) montrent le

comportement des fumées quand la vitesse de l'air est inférieure à V_C . On y voit en particulier le phénomène de nappe de retour (*backlayering*), qui consiste en une couche stable de fumées au vent du foyer. La figure (2.2 (c)) montre la situation quand la vitesse de l'air est nettement supérieure à V_C . La vitesse critique V_C est de l'ordre de 1 à 2 m/s pour un incendie de véhicule léger, de 2 à 3 m/s pour un incendie de poids lourd, et ne dépasse pas 4 m/s pour un incendie de citerne d'essence.

On définit la vitesse de déstratification V_d , telle que si la vitesse du courant d'air V est inférieure à V_d alors l'écoulement reste stratifié [2], et si elle est supérieure à V_d il devient déstratifié (cas (b) et (c) de la figure 2.2). La définition précise de V_d est délicate, car la fumée peut être stratifiée à proximité du foyer et se déstratifier plus loin (voir figure 2.2 (b)). Cette stratification dépend de la présence d'obstacles dans le tunnel.



Fig. 2.2 Comportement des fumées en l'absence de pente et en présence de courant d'air.

(a) : $V < V_d$; (b) : $V_d < V < V_C$; (c) : $V > V_C$ et $V > V_d$

avec :

V : Vitesse de l'air

V_C : Vitesse critique

V_d : Vitesse de déstratification

2.2.3 Effet de la pente

L'éventuelle déclivité longitudinale du tunnel a pour conséquence de modifier le mouvement des fumées, à cause de la poussée d'Archimède exercée sur les fumées chaudes (effet cheminée). De même que dans le cas où la déclivité est nulle, selon la valeur de la vitesse du courant d'air, les fumées restent stratifiées ou non, comme illustré sur la figure (2.3). En toute rigueur la vitesse de déstratification V_d et la vitesse critique V_C dépendent de la pente. Compte tenu des ordres de grandeur des pentes (inférieures à 10 %), on ne tient pas toujours compte de cette dépendance.

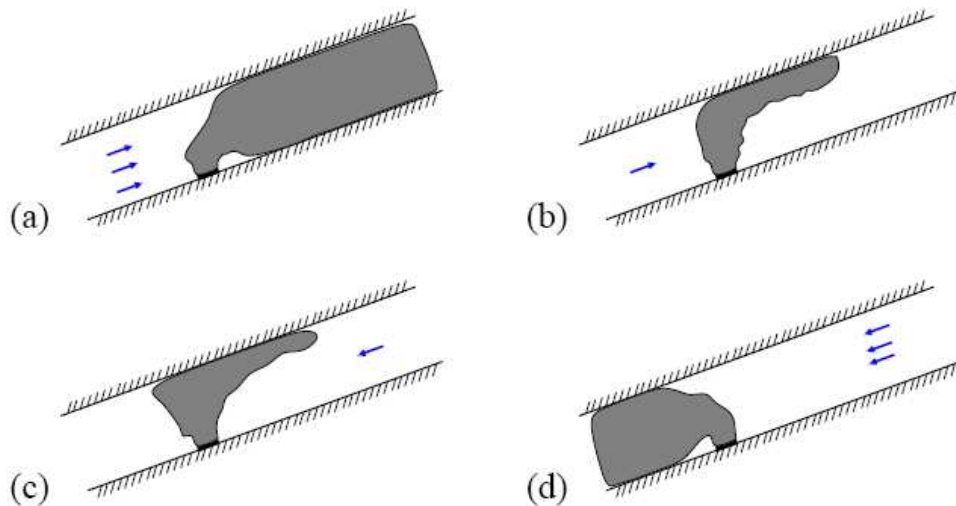


Fig. 2.3 Comportement des fumées dans un tunnel en pente.

(a) Courant d'air ascendant fort ; (b) Courant d'air ascendant modéré ; (c) Courant d'air descendant modéré ; (d) Courant d'air descendant fort.

2.3. Le désenfumage

2.3.1 Organisation de la sécurité et rôle de désenfumage

La sécurité des usagers d'un tunnel en cas d'incendie repose sur un système complexe d'éléments techniques et organisationnels. Parmi les dispositions techniques qui participent à la sécurité, on peut citer des éléments de génie civil tels que les issues de secours, les trottoirs ou les caniveaux de récupération des liquides inflammables ou toxiques, et les nombreux équipements : extincteurs, postes d'appel d'urgence, détection automatique d'incendie, éclairage de sécurité, alimentation en eau destinée aux pompiers, ainsi que le désenfumage. Ce dernier joue un rôle central ; en effet, l'absence de contrôle des fumées peut empêcher toute auto-évacuation des usagers et gêne fortement l'intervention de secours. Il faut également noter l'importance cruciale de la réaction rapide et adéquate du personnel d'exploitation (fermeture du tunnel, consignes d'évacuation) et des services de secours.

2.3.2 Les stratégies de désenfumage

En cas d'incendie dans un tunnel, les fumées représentent le principal danger pour les usagers :

- Leur opacité rend difficile, voir impossible, l'auto-évacuation des usagers ;
- Leur toxicité menace la vie des usagers qui n'auraient pas réussi à s'auto-évacuer ;
- Leur température peut être très élevée.

Il est donc primordial que les usagers soient protégés de la fumée, au moins le temps de leur évacuation ; c'est le rôle de la ventilation de désenfumage. Pratiquement, c'est un seul et même système qui assure le désenfumage et la ventilation sanitaire (confort). Le fonctionnement en mode désenfumage est activé dès la détection d'un incendie.

2.3.3. Les tunnels routiers : peuvent être ventilés en utilisant deux types de systèmes principaux : la ventilation longitudinale et la ventilation transversale. Leur utilisation dépend du type de trafic (unidirectionnel ou bidirectionnel, probabilité de congestion) et de la longueur de l'ouvrage.

2.3.3.1 La ventilation longitudinale

Le principe est de créer un courant d'air longitudinal dans le tunnel afin de faire entrer de l'air frais par une des têtes et de rejeter les fumées par l'autre tête. On utilise pour cela des ventilateurs spéciaux appelés *accélérateurs* (figure 2.4), généralement fixés sous la voûte du tunnel par batteries de deux ou trois machines. On évite également d'utiliser ce système dans des ouvrages de grande longueur.



Fig. 2.4 Accélérateurs dans un tunnel ventilé longitudinalement

Dans un tunnel ventilé longitudinalement, la stratégie de désenfumage consiste simplement à pousser toutes les fumées du même côté du foyer de l'incendie en créant un courant d'air suffisamment fort. Les usagers situés en aval peuvent sortir du tunnel car la vitesse des fumées reste nettement inférieure à celle d'un véhicule. Les usagers situés en amont sont bloqués par l'incendie mais protégés des fumées par le courant d'air et peuvent ainsi gagner les issues de secours (figure 2.5).



Fig. 2.5 Schéma de principe du désenfumage en ventilation longitudinale.

2.3.3.2 La ventilation transversale

Si la stratégie longitudinale n'apporte pas de garanties de sécurité suffisantes, et en particulier dans les tunnels à deux sens de circulation ou de longueur importante, ou les tunnels congestionnés on utilise une stratégie de désenfumage transversal qui consiste à favoriser la *stratification naturelle* des fumées (figure 2.6).

Les fumées étant plus légères que l'air ambiant, elles tendent à se plaquer sous le plafond du tunnel, au moins pendant les premières minutes de l'incendie. Il existe une couche d'air frais en partie basse, de hauteur suffisante pour permettre l'évacuation des usagers. Comme indiqué sur la figure (2.7), on extrait les fumées par des *trappes de désenfumage* situées en plafond.

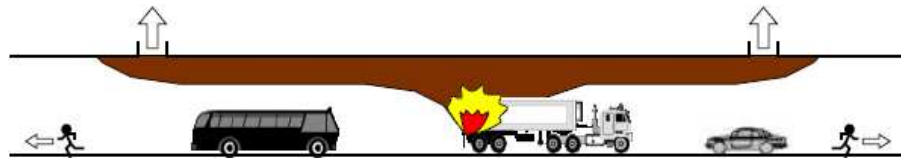


Fig. 2.6 Schéma de principe du désenfumage en ventilation transversale.

Les débits d'air nécessaires au désenfumage sont nettement supérieurs à ceux requis pour la ventilation sanitaire, aussi bien en ventilation longitudinale que transversale [3].



Fig. 2.7 Vue en coupe d'un tunnel ventilé transversalement.

2.3.4. Cas d'un tunnel de métro

Le désenfumage en tunnel de métro a deux principaux objectifs [5] :

- Permettre l'auto-évacuation des usagers ;
- Apporter des conditions satisfaisantes d'ambiance permettant l'intervention pour les services de secours et de lutte contre l'incendie.

2.3.4.1. Principes d'évacuation des fumées

Le désenfumage se fera par:

- un balayage longitudinal pour désenfumer les deux demi tronçon de tunnels reliés à la station. Ce balayage est réversible pour éviter d'enfumer la station en cas de sinistre en tunnel. Il est assuré par les ouvrages de ventilation jumelés en interstation. Le débit global de chaque ouvrage est ainsi plus important en extraction qu'en insufflation. Cette différence de débit permet un apport d'air neuf par les accès de la station.
- Une extraction en partie haute des quais de la station pour désenfumer le niveau des quais.
- Fermeture par des clapets coupe-feu des ouvrages d'insufflation non équipé de ventilateurs.

La vitesse de balayage minimale à assurer pour garantir l'état critique (on entend par état critique dans les tunnels de métro, le désenfumage qui garantie en même temps l'évacuation rapide des fumées et la non-déstratification de celles-ci) correspond à ce qui est usuellement appelé vitesse critique. Celle-ci a été déterminée empiriquement par Kennedy [5] pour des tunnels ferroviaires et métropolitains.

2.3.4.2. Considérations de base

Les considérations de base à prendre en compte relativement à la sécurité, dans le cas d'une conception d'un ouvrage type tunnel de Métro se résument en [6] :

- En cas d'incendie, une station de métro doit être évacuée en un temps inférieur à 10 minutes.
- Le temps maximum de réaction des équipes de secours de la station de la suite à un départ de feu est pris égal à 2 minutes.
- En tunnel, le dimensionnement du débit des ouvrages de ventilation doit permettre d'obtenir une vitesse de balayage supérieure ou égale à 1.5 m/s dans la zone de localisation des fumées (désenfumage par balayage longitudinal).
- Le débit d'air insufflé est inférieur au débit d'air extrait.

2.3.4.3. Principe de ventilation en station

Les ouvrages de ventilation sont de type [6]:

- Ouvrage de ventilation en station : est positionné au niveau de la salle des billets dans la zone technique non accessible au public.

- Ouvrage d'extraction en station : cet ouvrage réalise la liaison entre l'ouvrage de ventilation et l'extérieur de la station. Il assure le rejet des fumées.
- Ouvrage d'insufflation en station : cet ouvrage assure l'amenée d'air dans l'ouvrage de ventilation et les locaux techniques adjacents (ventilation basse). Il permet aussi l'évacuation de chaleur générée par les unités extérieures des climatiseurs « split-system » assurant le maintien en température des locaux.
- Ouvrage de ventilation aval et amont en station : ces ouvrages situés dans la zone des tympans des quais et débouchant dans le tunnel assurent les amenés d'air neuf au niveau des quais et du tunnel.
- Ouvrage de ventilation mixte : sur deux stations, l'ouvrage de ventilation amont est commun avec l'ouvrage d'insufflation. Ces ouvrages sont dénommés « ouvrage de ventilation mixte ».

2.3.4.4. Principe de ventilation en interstation

Les ouvrages en interstation assurent en mode désenfumage, l'extraction des fumées en tunnel et l'amenée d'air neuf. Chaque ouvrage est équipé d'un groupe moto-ventilateurs réversibles. Ces groupes moto-ventilateurs et les équipements attenants ont un classement au feu dénoté « 200 °C – 2 heures » c'est-à-dire peuvent résister à une température de 200 °C pendant 2 heures [6].

En fonction du positionnement du sinistre :

- Un ouvrage assure avec un seul groupe moto-ventilateurs l'extraction des fumées, ce groupe fonctionnant en régime nominal (à 100 % de sa vitesse).
- L'autre ouvrage assure avec un seul groupe moto-ventilateurs en mode « reverse » l'amenée d'air neuf en tunnel, ce groupe fonctionnant en régime dégradé (vitesse de confinement) suivant un point de fonctionnement défini (figure 2.8).

En cas d'avarie sur une machine ou sur une des lignes électriques alimentant les armoires de commande, la redondance des machines est assurée au niveau de chaque ouvrage.

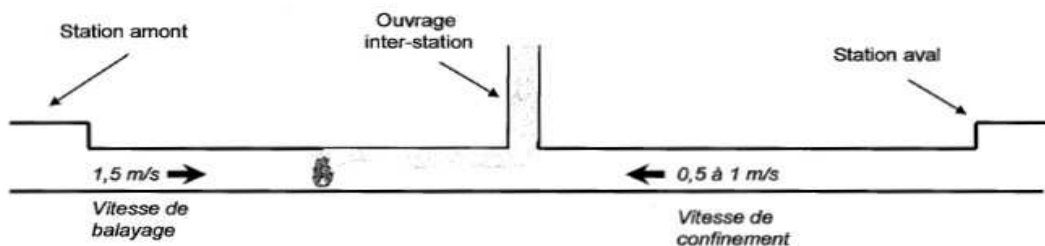


Fig. 2.8 Principe de répartition des vitesses [5].

2.3.4.5. Scénarios de désenfumage

Ces scénarios sont au nombre de trois. Les schémas (2.9) et (2.10) schématisent les trois cas géographiques de feu possible recensé sur une ligne [7] :

- L'incendie en ligne à l'amont des quais,
- L'incendie en ligne à l'aval des quais,
- L'incendie au niveau de la salle des billets.

Les deux premiers cas sont symétriques par rapport à la salle des billets [7].

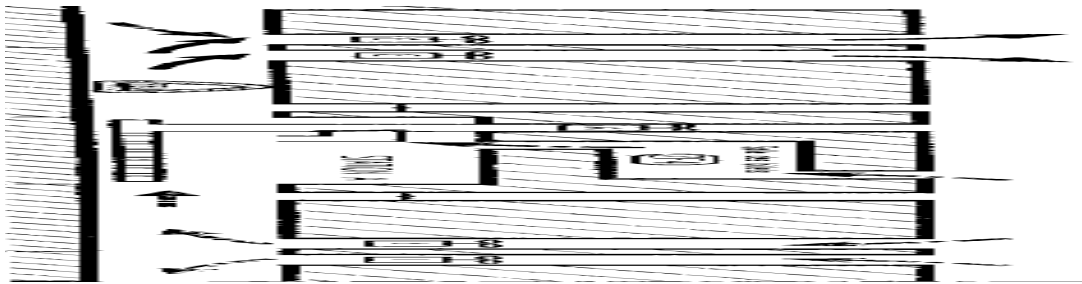


Fig. 2.9 Premier scénario de désenfumage : sinistre dans le ½ tunnel.

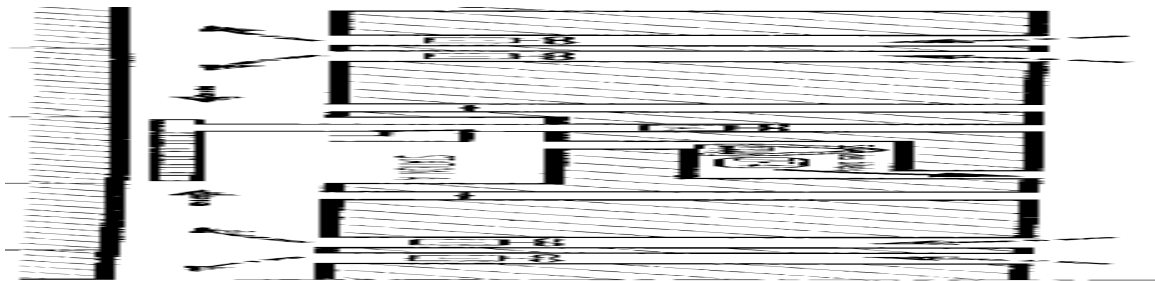
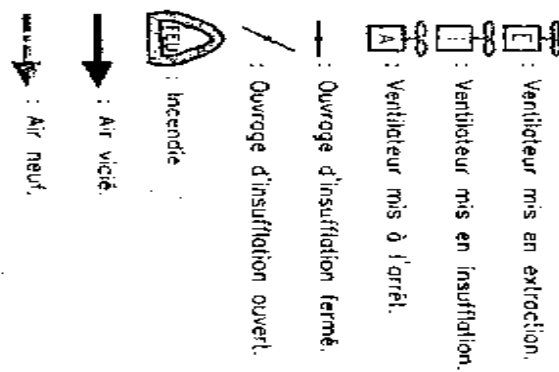


Fig. 2.10 Deuxième scénario de désenfumage : sinistre au niveau de la salle des billets.



2.4. Les moyens d'étude de l'incendie et du désenfumage en tunnel

Les lacunes actuelles en terme de réglementations et recommandations claires à propos des procédures de pilotage des systèmes de ventilation sont dues à la complexité de l'incendie en tunnel : le développement de chaque feu est étroitement lié à l'ouvrage (structure, forme ...), à la nature du foyer (taille, type de combustible ...), à la localisation du sinistre dans le tunnel, etc. L'interaction de nombreux phénomènes physiques (processus de combustion, dynamique des fluides, transferts de chaleur...) participent à la complexité de l'incendie en tunnel.

Etant donné le caractère exceptionnel d'un tel événement, les données terrains sont très limitées. Il est donc nécessaire de recourir aux techniques expérimentales ou numériques du désenfumage pour juger de l'efficacité des méthodes de ventilation [1].

2.4.1 Les essais sur site

Les essais sur site à échelle réelle permettent d'observer qualitativement le comportement des fumées d'incendie en situation réelle et fournissent des bases de données essentielles à la validation de modèles expérimentaux et numériques (figure 2.11).



Fig. 2.11 Les essais d'incendie faits au tunnel de L. H. la fontaine (Canada).

Cependant ces essais sont limités dans le temps (pour ne pas retarder l'ouverture ou la réouverture de l'ouvrage) et en termes de puissances d'incendie (nécessairement fortement limitée afin de ne pas endommager l'ouvrage) [1].

2.4.2 Les maquettes expérimentales

Les maquettes expérimentales à échelle réduite sont une alternative intéressante aux essais sur site pour trois raisons principales : confort d'utilisation, faible coût et meilleure maîtrise des conditions d'essais. Cependant, comme nous le verrons par la suite, un incendie en tunnel ne peut pas être complètement reproduit sur maquette à échelle réduite.

On distingue deux types de maquettes en fonction de la prise en compte, ou non, des aspects thermiques (rayonnement, transferts de chaleur convectifs et échanges thermiques aux parois) : les maquettes anisothermes ou « chaudes » et les maquettes isothermes ou « froides »

Sur maquette chaude, le foyer de l'incendie est représenté par une source de chaleur. L'utilisation d'un bac de combustible liquide (alcools, hydrocarbures ...) ou d'un combustible solide permet une bonne représentation de l'incendie (reproduction de la flamme et du processus de combustion). Cependant cette technique de simulation est difficile à mettre en place tant au niveau de la maîtrise des conditions expérimentales (taux de combustion) que de la sécurité des expérimentateurs.

Les maquettes froides permettent de s'affranchir de telles contraintes étant donné que le foyer de l'incendie n'est plus représenté par une source de chaleur mais par le rejet, à température ambiante, d'un fluide de masse volumique différente de celle du fluide ambiant. Les échanges de chaleur par rayonnement et conduction aux parois ne sont donc plus reproduits sur ce type de maquette. Néanmoins, les techniques expérimentales basées sur l'utilisation de maquettes froides sont plus simples à mettre en œuvre et moins onéreuses (ne nécessitant pas de matériaux thermorésistants).

Un certain nombre d'expérimentateurs simulent, par analogie hydraulique, le panache de fumées produit par l'incendie par le rejet d'un liquide dans un canal contenant un liquide de masse volumique différente, par exemple l'injection d'eau salée dans de l'eau douce (la reproduction du panache est alors inversée). Les maquettes hydrauliques sont limitées en puissance, les écarts de masse volumique entre l'eau douce et l'eau salée étant très inférieurs à ceux d'un incendie. La reproduction de ces écarts de masse volumique peut être obtenue en simulant, par analogie aérodynamique, le panache de fumées par un panache massique formé par le rejet d'un mélange gazeux de faible masse volumique dans une atmosphère ambiante [1].

2.4.3 La modélisation numérique

La modélisation numérique des mouvements de fluides (*Computational Fluid Dynamics*) et des échanges thermiques rencontrés lors d'un incendie en tunnel est une technique qui a connu et qui connaît encore d'importants développements (liés à l'évolution permanente de la puissance de l'outil informatique) [1]. Les modèles numériques reposent sur des équations de bilan qui font appel aux principes fondamentaux de la physique : conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie et d'équation d'état des gaz. Les équations sont résolues à l'aide de techniques numériques basées sur la discrétisation de l'espace (maillage) et du temps.

Dans le cadre de l'étude des incendies en tunnel, les méthodes numériques sont plus avantageuses que les techniques expérimentales à de nombreux points de vue : visualisation aisées des phénomènes étudiés, richesse des résultats quantitatifs, modularité des géométries, coût réduit, etc. Néanmoins, à ce jour, la fiabilité de l'outil numérique demeure discutable : de nombreux phénomènes physiques engendrés lors d'un incendie sont encore mal maîtrisés tel que le processus de combustion.

Le calcul précis de toutes les échelles d'un écoulement turbulent, appelée Simulation Numérique Directe *DNS* (*Direct Numerical Simulation*), nécessite d'utiliser des maillages excessivement fins, d'où des contraintes importantes en terme de temps et de puissance de calcul (**RAM** et fréquence du **CPU**). A l'heure actuelle, la *DNS* se limite à l'étude d'écoulement dans des domaines de faibles dimensions et n'est donc pas adaptée à l'étude de

la propagation des fumées d'incendie en tunnel. La complexité et les limites actuelles de la Simulation Numérique Directe, même sur les ordinateurs les plus puissants, ont conduit à différents types de modélisation de la turbulence ($\kappa\text{-}\epsilon$, *LES (Large Eddy Simulation)*) [1,3].

En conclusion, les essais seraient désormais réalisés de façon informatique, compte tenu du travail trop important et du coût exorbitant des essais réels. Un outil tel que **FDS** s'avère capable de modéliser des locaux très divers, ainsi nous l'avons choisi pour notre étude.

Chapitre 3

Théorie et potentialité du code FDS

Ces dernières années l'évolution des codes de calcul a pris un nouvel élan, caractérisé par la méthode de résolution des équations gouvernantes dans le phénomène étudié, ou dans la technique de discrétisation des variables. Cette évolution s'est lancée grandiosément dans le domaine de la mécanique des fluides, en particulier les problèmes basés sur la résolution des équations de Navier Stokes. Rappelons que ces dernières n'ont jamais pu être résolus de façon globale. Les difficultés résidantes dans ce contexte et les moyens mis pour les surmonter font la différence entre les codes de calcul. Les plus connus sont *FLUENT*, *SAMCEF*, *ANSYS*, *CATIA*.....

Cependant, puisque notre domaine encadre la filière des incendies et des feux, donc la plupart des codes cités ne font pas l'objet d'une description précise du phénomène de propagation de fumées et du feu. Par exemple, le code FLUENT ne permet pas de représenter le feu que par une corrélation théorique qui se base sur les caractéristiques du feu lui-même (flux de chaleur dégagé, température..). De plus les résultats ne sont décrits que par des valeurs qualitatives. Donc pour pouvoir envelopper tout le phénomène, il faut analyser les résultats de plusieurs codes, afin d'avoir la meilleure approche possible au problème.

L'idée d'étudier la dynamique d'un feu par des outils de simulation numérique remonte au tout début de l'informatique. Cependant, malgré la connaissance de l'ensemble des équations relatives à la dynamique des fluides, il existe de très nombreuses difficultés auxquelles il faut faire face pour obtenir des résultats raisonnables [8].

A l'heure actuelle, les codes de calcul modélisant l'incendie en milieu confiné peuvent être classés en deux grandes familles [8]:

- **Les codes dits à zones** : Les codes à zone sont basés sur une simplification tirée d'observations expérimentales. Cette simplification consiste à découper l'écoulement en deux zones homogènes : une zone haute ou couche chaude et une zone basse ou dite froide.
- **Les codes à champ ou codes dits "CFD"** (*Computational Fluid Dynamics*) : Les codes à champ sont basés sur la résolution complète des équations de la mécanique des fluides. Ils permettent de décrire finement un écoulement mais présentent une complexité de mise en œuvre beaucoup plus importante.

Un code à champ tel que **FDS** développé par le **NIST** (National Institute of Standard and Technology, USA) [8], présente une mise en œuvre plus complexe qu'un code à zone. Un tel logiciel permet une modélisation beaucoup plus fine du développement de l'incendie.

3. 1. Code de calcul « *Fire Dynamic Simulator* » (version 5.1.0)

3. 1.1 Présentation du logiciel :

FDS en tant que code de calcul se basant sur la résolution des équations de Navier Stocks à faible nombre de Mach, permet de simuler la propagation de fumée, de varier la puissance de l'incendie. Il utilise comme les autres codes le modèle LES (*Large Eddy Simulation*) pour balayer les différents spectres du problème.

Les objectifs poursuivis dans le développement du code FDS sont multiples. Premièrement en tant que code CFD, il permet la modélisation de la dynamique du feu. On peut penser qu'à terme avec l'amélioration croissante de la puissance de calcul il sera possible d'obtenir une résolution permettant une simulation de plus en plus proche de la réalité. Deuxièmement il est destiné à prévoir les conséquences d'un incendie dans de très diverses géométries. Il est à l'heure actuelle au cœur d'un programme entre le NIST et les industriels américains pour améliorer la prédiction des moyens de protection [8].

3. 1.2 Exploitation du logiciel

Depuis sa création, FDS est destinée à l'analyse d'incendie orienté « sécurité » tout en permettant d'étudier la dynamique fondamentale d'un feu et de la combustion [9].

FDS est utilisé pour l'analyse des phénomènes suivants :

- Le transfert de chaleur et la production des produits de combustion à faible vitesse.
- Les transferts de chaleur par convection et rayonnement entre gaz et solide.
- La pyrolyse.
- La propagation d'un incendie.
- Les détections de chaleur et de fumées et l'activation des détecteurs.

3.1 .3 Définition des conditions de simulation sous FDS (Fichier input)

La création du domaine de calcul et la définition des conditions de simulation (maillage, conditions aux limites, emplacement de la source...) sont réalisées en éditant un fichier texte avec le bloc-notes Windows ou Word Pad. L'exécution du calcul ainsi que la récupération des résultats de simulations se font sous l'invite de commande. Un exemple de

fichier texte est présenté par la figure (3.1). Cet exemple correspond à la simulation des fumées dans un tronçon de tunnel de dimensions (50 m × 8 m × 5 m) non ventilé.

Dans ce fichier input sont définis tous les paramètres de calcul nécessaires à la réalisation de la simulation numérique :

- La taille du domaine de calcul (50 m × 8 m × 5 m) et le nombre de mailles (500 × 50 × 25), la taille de la maille est alors fixée : (100 mm) suivant x , (160 mm) suivant y , (200 mm) suivant z , qui sont représentés à la ligne (2).

```

Fichier Edition Format Affichage ?
&HEAD CHID='pfe_1',TITLE='tunnel sans ventilation' / (1)
&MESH IJK=500,50,25 , XB=0.0,50.0,0.0,8.0,0.0,5.0 / (2)
&TIME TWFIN=10.0 / (3)
&MISC SURF_DEFAULT='CONCRETE SURFACE' /
&REAC ID='HEPTANE'
FYI='Heptane, C_7 H_16'
C=7.
H=16.
CO_YIELD=0.006
SOOT_YIELD=0.015 / (4)
&MATL ID = 'CONCRETE'
FYI = 'Quintiere, Fire Behavior'
SPECIFIC_HEAT = 0.88
DENSITY = 2100.
CONDUCTIVITY = 1.0 / (5)
&SURF ID = 'CONCRETE SURFACE'
COLOR = 'GRAY 60'
MATL_ID = 'CONCRETE'
THICKNESS = 0.1 /
&SURF ID='FIRE',HRRPUA=1500.,COLOR='RED' / (6)
&VENT XB= 24.0,26.0,2.5,5.5,0.0,0.0 , SURF_ID='FIRE' / source de chaleur (7)
&VENT XB= 0.0, 0.0, 0.0, 8.0, 0.0, 5.0,color='PINK',SURF_ID='OPEN' / 1er ouverture (8)
&VENT XB= 50.0, 50.0, 0.0, 8.0, 0.0, 5.0,color='PINK',SURF_ID='OPEN' / 2e ouverture (9)
&SLCF PBX=25.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. / (10)
&SLCF PBX=12.5, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. / (11)
&SLCF PBX=37.5, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. / (12)
&SLCF PBZ=5.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. / (13)
&SLCF PBY=5.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. / (14)

```

Fig. 3.1 Exemple d'un fichier texte généré pour la simulation sous FDS.

- La durée de la simulation (10 s), l'Heptane est choisi comme combustible et le matériau utilisé pour la construction est le béton qui sont respectivement définis aux lignes (3), (4) et (5).
- La réaction de combustion générée par le feu de bac dégage une puissance thermique par unité de surface de 1500 (kW/m²), la surface du bac est de (2 m × 3 m) aux lignes (6) et (7).
- Les deux ouvertures du tunnel sont considérées comme « OPEN » (conditions atmosphériques de part et d'autre du tunnel) aux lignes (8) et (9).

- Et, enfin, les plan ($x=12.5, 25, 37.5$; $y=5.0$; $z=5.0$) et les quantités que l'on souhaite visualiser à l'aide de *Smokeview* (outil spécifiquement conçu pour analyser les données produites par FDS) aux lignes (10) à (14).

3. 1.4 Résultats générés

FDS calcule la température, la densité, la pression, les vitesses, la composition chimique, la visibilité, dans chacune des cellules du domaine maillé et à chaque «pas de temps ». Il calcule aussi au niveau des surfaces solides la température, le flux de chaleur, le taux de perte massique et diverses autres grandeurs caractéristiques.

Les données retenues sont généralement la température des gaz, la vitesse, la concentration des espèces gazeuses (CO , CO_2 , N_2 , ...), la pression, la densité et la fraction de mélange. Certaines données sont directement enregistrées par le programme : taux de production calorifique, concentration des espèces émises durant les réactions. Les autres données sont visualisables à l'aide de *Smokeview*.

Smokeview est un outil de logiciel conçu pour visualiser des calculs numériques produits par des modèles du feu tels que (FDS), Smokeview visualise la fumée et autres paramètres physiques du feu en utilisant des méthodes scientifiques, il montre les découpes d'écoulement de particules, 2D ou par 3D, des données d'écoulement de gaz telles que des vecteurs de la température et d'écoulement montrant le sens et la grandeur d'écoulement [11].

3. 2 La Formulation mathématique du code FDS

3. 2.1. Modèle hydrodynamique

Le code de calcul FDS permet de balayer une grande plage de variation de la densité et de la température. Une importante remarque sur FDS est que la variation de pression est faible. Dans ces conditions, une approximation à la loi des gaz idéaux peut être déduite de sorte que la pression soit décomposée en une pression moyenne P_0 , une pression hydrostatique $\rho_0 gZ$ (où Z est la distance verticale), et une perturbation $\tilde{p}(x, t)$. Cette approximation n'est valable que pour les écoulements à faible nombre de Mach, puisque la température est inversement proportionnelle à la densité. Les équations de base utilisées pour le développement du code de calcul FDS se résument en [8,10]:

Conservation de la masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.1)$$

Conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot \rho \vec{u} \vec{u} + \nabla p = \rho \vec{f} + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (3.2)$$

Conservation de l'énergie

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h \vec{u} = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla \cdot \vec{q} + \Phi \quad (3.3)$$

Equation d'état pour les gaz parfaits

$$p = \frac{\rho RT}{W} \quad (3.4)$$

Conservation des espèces

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot \rho Y_i \vec{u} = \nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i + \dot{m}_i''' \quad (3.5)$$

Dans l'équation de la quantité de mouvement, le terme $(u.u)$ est le tenseur obtenu par multiplication de deux vecteurs u et u^T . Le terme $(\nabla \cdot \rho uu)$ est le vecteur obtenu par

multiplication de $(u.u)$ et $\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$.

τ_{ij} sont les composantes du tenseur de forces de viscosité, il est défini par :

$$\tau_{ij} = \mu \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla \cdot u) \right), \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); i, j = 1, 2, 3. \quad (3.6)$$

S_{ij} : est le tenseur des contraintes.

μ : La viscosité dynamique du fluide.

f : Forces extérieures.

u : Le vecteur vitesse.

ρ : La masse volumique.

Dans l'équation de conservation de l'énergie on remarque l'utilisation de :

$\frac{D(\)}{Dt} = \frac{\partial(\)}{\partial t} + u.\nabla(\)$ Le terme $\nabla.q$ représente la somme des deux flux de chaleur par conduction et par rayonnement. h : L'enthalpie par unité de masse ; \dot{q}''' : est le taux de rejet de la chaleur par unité de volume pour une réaction chimique.

Le terme Φ est connu comme dissipation visqueuse, c'est le taux de l'énergie cinétique transférée à une énergie thermique en raison de la viscosité dynamique du fluide, et est défini par :

$$\Phi \equiv \tau_{ij}.u \equiv \mu \left(2S_{ij}.S_{ij} - \frac{2}{3}(\nabla.u)^2 \right) = \mu \left[\begin{aligned} & 2\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 \\ & + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 - \frac{2}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 \end{aligned} \right] \quad (3.7)$$

Dans l'équation de conservation des espèces on peut définir les termes quelle contient comme suit :

D_i : Coefficient de diffusion de l'élément 'I' ;

Y_i : La fraction massique de l'élément 'I' ;

m_i''' : Le débit massique par unité de volume ;

Pour la simulation d'incendie, le modèle hydrodynamique de FDS est couplé à un modèle de combustion à fraction de mélange (*mixture fraction model*) et à un modèle de rayonnement.

3.2.2. Modèle de combustion

Dans la plupart des applications, FDS exploite un modèle de combustion en fraction de mélange. Cette dernière est une quantité conservée qui est défini comme la fraction du gaz à un point donné dans le champ de flux.

Le modèle suppose que la combustion est une réaction contrôlée, la réaction entre les comburants et carburants étant infiniment rapide, ceci indépendamment de la température. Pour des feux à grande échelles et bien aérés, c'est une bonne approximation.

Les fractions massiques de tous les réactifs majeurs et des produits peuvent être tirées du mélange au moyen des relations d'état et des mesures [10].

La fraction de mélange Z peut être définie en termes de fraction de masse de carburant et des produits de la combustion :

$$Z = Y_F + \frac{W_F}{xW_{CO_2}} Y_{CO_2} + \frac{W_F}{xW_{CO}} Y_{CO} + \frac{W_F}{xW_s} Y_s \quad (3.8)$$

Y_F : est la fraction massique du carburant.

On peut considéré que : $Z = Z_1 + Z_2$, tel que :

$$Z_1 = Y_F \quad (3.9)$$

$$Z_2 = \frac{W_F}{xW_{CO_2}} Y_{CO_2} + \frac{W_f}{xW_{CO}} Y_{CO} + \frac{W_F}{xW_s} Y_s \quad (3.10)$$

Dans le meilleur des cas, nous pourrions employer ces valeurs dans un calcul pour déterminer le taux de rejet de la chaleur, ce dernier est défini par :

$$\dot{q}''' = \min \left[\frac{\max(\rho Y_F, s\rho Y_{O_2})}{\delta t} \Delta H, \dot{q}'''_{\max} \right]; s = \frac{W_F}{v_{O_2} W_{O_2}} \quad (3.11)$$

Avec :

W_α = le poids moléculaire de l'espèce gazeuse α ;

s = Vecteur unitaire dans la direction de l'intensité de rayonnement ;

v_α = Coefficient stœchiométrique de l'élément α

La fraction de mélange satisfait l'équation de conservation : $\rho \frac{DZ}{Dt} = \nabla \cdot \rho D \nabla Z$ (3.12)

Si on suppose que la combustion se produit tellement rapidement que le carburant et l'oxygène ne peuvent pas co-exister, alors tous les deux disparaissent simultanément sur une surface de flamme :

$$Z(x, t) = Z_f; Z_f = \frac{Y_{O_2}^\infty}{sY_F^I + Y_{O_2}^\infty} \quad (3.13)$$

Où :

$Y_{O_2}^\infty$: Fraction massique de l'oxygène à l'ambiance ;

Y_F^I : Fraction massique de combustible dans le jet

3.2.3. Modèle de rayonnement

Le transfert de chaleur par rayonnement est inclus dans le modèle par l'intermédiaire de la résolution de l'équation de transfert de rayonnement pour un gaz gris non dissipatif, et dans quelques cas limités en utilisant un modèle de bande large. L'équation est résolue en utilisant une technique semblable aux méthodes de volume finies pour le transfert par convection [10].

3. 3. Résolution numérique

3. 3.1. Equation simplifiées (modèle hydrodynamique)

La résolution numérique des équations de conservation simplifiées repose sur la méthode des différences finies centrées du second ordre. Le maillage est cartésien, structuré est décalé : les variables scalaires sont calculées au centre des mailles tandis que les variables vectorielles sont définies au centre des faces des mailles.

En accord avec les simplifications faites, les équations de Navier – Stokes s'écrivent [9] :

Conservation de la masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \rho = -\rho \vec{\nabla} \cdot \vec{u} \quad (3.14)$$

Conservation

n de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \times \vec{\omega} + \vec{\nabla} H = \frac{1}{\rho} \left((\rho - \rho_0) \vec{g} + \vec{f} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau}_{ij} \right) \quad (3.15)$$

Equation de la pression

$$\nabla^2 H = -\frac{\partial (\vec{\nabla} \cdot \vec{u})}{\partial t} - \vec{\nabla} \cdot \vec{F} \quad ; \quad \vec{F} = \vec{u} \times \vec{\omega} - \frac{1}{\rho} \left((\rho - \rho_m) \vec{g} - \vec{f} - \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau}_{ij} \right) \quad (3.16)$$

Equation d'état pour les gaz parfaits

$$\bar{P}_m = \rho TR \sum_i \frac{Y_i}{W_i} \quad (3.17)$$

Equation de la conservation des espèces

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \rho Y_i = -\rho Y_i \vec{\nabla} \cdot \vec{u} + \vec{\nabla} \cdot \rho D_i \vec{\nabla} Y_i + \dot{m}_i''' \quad (3.18)$$

On défini H par :
$$H = \frac{|u|^2}{2} + \frac{\tilde{P}}{\rho_0}$$

ω : Le vecteur de vorticité.

3.3.2 Discrétisation temporelle

1. La discrétisation de la densité :

$$\rho^{n+1} = \frac{1}{2} \left(\rho^n + \rho^{(n+1)_e} - \delta t \left(u^{(n+1)_e} \cdot \nabla \rho^{(n+1)_e} + \rho^{(n+1)_e} \nabla \cdot u^{(n+1)_e} \right) \right) \quad (3.19)$$

2. La discrétisation de la pression :

$$\nabla^2 H^{(n+1)_e} = - \frac{2(\nabla \cdot u)^{n+1} - (\nabla \cdot u)^{(n+1)_e} - (\nabla \cdot u)^n}{\delta t} - \nabla \cdot F^{(n+1)_e} \quad (3.20)$$

3. La discrétisation de la vitesse :

$$u^{n+1} = \frac{1}{2} \left[u^n + u^{(n+1)_e} - \delta t \left(F^{(n+1)_e} + \nabla H^{(n+1)_e} \right) \right] \quad (3.21)$$

3.3.3 Discrétisation spatiale

Les dérivées spatiales de chaque équation sont écrites en utilisant les différences finies précises (de second ordre) sur une grille rectiligne. Le domaine global rectangulaire qui est divisée en mailles rectangulaires, chaque maille est assignée par des indices : i , j et k qui représentent la position de la maille dans les directions x , y et z respectivement. Des quantités scalaires sont assignées au centre de chaque maille [10].

Equation de la conservation de la masse

Au centre de la $(ijk)^{\text{ème}}$ maille, la densité est mis à jour dans le temps avec un prédicteur-correcteur. Dans l'étape de la prédiction, la densité à $(n+1)^{\text{ème}}$ temps est estimée à partir de l'information du $n^{\text{ème}}$ temps. L'équation de la conservation de la masse peut être écrite sous la forme [10] :

$$\frac{\rho_{ijk}^{(n+1)e} - \rho_{ijk}^n}{\delta t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla \rho)_{ijk}^n = -\rho_{ijk}^n (\nabla \cdot \mathbf{u})_{ijk}^n \quad (3.22)$$

Après la prédiction de la vitesse et de la pression à $(n+1)^{\text{ème}}$ étape de temps, la densité est corrigée, et dont l'équation de conservation de la masse est la suivante :

$$\frac{\rho_{ijk}^{(n+1)} - \frac{1}{2}(\rho_{ijk}^n + \rho_{ijk}^{(n+1)e})}{\delta t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla \rho)_{ijk}^{(n+1)e} = -\rho_{ijk}^{(n+1)e} (\nabla \cdot \mathbf{u})_{ijk}^{(n+1)e} \quad (3.23)$$

Equation de la conservation des espèces

L'équation de la conservation des espèces est différenciée de la même manière, après l'étape de prédiction et de correction, elle est donnée par [10] :

$$\frac{(\rho Y_i)_{ijk}^{(n+1)} - \frac{1}{2}((\rho Y_i)_{ijk}^n + (\rho Y_i)_{ijk}^{(n+1)e})}{\frac{1}{2}\delta t} + \dots = \dots + (\nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i)_{ijk}^{(n+1)e} + \dot{m}_{i,ijk}^m \quad (3.24)$$

Equation d'état pour les gaz parfaits

Après discrétisation l'équation est donnée par :

$$\bar{p}_m = T_{ijk} \cdot \rho_{ijk} \cdot R \cdot \sum_{l=0}^{N_s} \frac{Y_{l,ijk}}{W_l} \quad (3.25)$$

Equation de la pression

Après discrétisation, l'équation devient :

$$\begin{aligned} & \frac{H_{i+1,j,k} - 2H_{ijk} + H_{i-1,j,k}}{\delta x^2} + \frac{H_{i,j+1,k} - 2H_{ijk} + H_{i,j-1,k}}{\delta y^2} + \frac{H_{i,j,k+1} - 2H_{ijk} + H_{i,j,k-1}}{\delta z^2} \\ & = -\frac{F_{x,ijk} - F_{x,i-1,j,k}}{\delta x} - \frac{F_{y,ijk} - F_{y,i,j-1,k}}{\delta y} - \frac{F_{z,ijk} - F_{z,i,j,k-1}}{\delta z} - \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \mathbf{u})_{ijk} \end{aligned} \quad (3.26)$$

3.3.2. Modèle de combustion

Une fois que le taux de rejets de la chaleur est calculé, Z_1 et Z_2 sont discrétisés dans le temps :

$$Z_1^{n+1} = Z_1^n - \frac{\dot{q}''' \Delta t}{\rho \Delta H} \quad ; \quad Z_2^{n+1} = Z_2^n - \frac{\dot{q}''' \Delta t}{\rho \Delta H} \quad (3.27)$$

Notons que la fraction du mélange ; $Z = Z_1 + Z_2$ est toujours une quantité conservée.

3.4. Choix du maillage

Les simulations numériques sur FDS ont besoin d'un temps assez considérable (des heures ou même des jours) pour s'exécuter sur les PC de dernières générations. Un des facteurs les plus significatifs influençant le temps de calcul est la taille de la maille. Puisqu'il est possible de choisir des tailles de mailles que ce soit raffinées ou trop larges, il est important de déterminer une taille appropriée pour un domaine informatique donné [12]. Quatre tailles de maille ont été employées pour étudier l'influence de celle-ci sur la prévision des résultats (température, concentration de CO) dans la section du tunnel. Les simulations ont été effectuées sur un tronçon de tunnel de 600m de long, 8m de large et 5.35m de haut. Pour toutes les simulations, un feu de bac d'heptane avec un taux de rejets de chaleur de 15.000 kilowatts a été employé pour représenter un feu de métro.

Le tableau (3.1) montre les différents cas avec les tailles de maille, les nombres de maille suivant les trois directions, le nombre total des mailles et le temps de calcul.

cas	Tailles (m)			Nb des mailles suivant les trois directions	Nombre total des mailles	Temps de calcul (h)
	Δx	Δy	Δz			
1 ^{er} cas	1.0	0.4	0.2	$600 \times 20 \times 27$	321 000.00	7.645
2 ^e cas	1.0	0.4	0.36	$600 \times 20 \times 15$	178 333.34	3.853
3 ^e cas	1.0	0.8	0.2	$600 \times 10 \times 27$	160 500.00	3.659
4 ^e cas	1.0	0.4	0.92	$600 \times 20 \times 6$	36 000.00	0.565

Tab. 3.1 Résultats générés lors de la simulation des différents cas de maillage.

Les résultats de simulation pour les quatre cas sont présentés dans cette section pour montrer l'effet de la taille de la maille sur les profils des températures et des concentrations de CO. Les figures (3.1) et (3.2) donnent, respectivement, l'évolution de la température moyenne et de la concentration moyenne de CO en fonction de la longueur du tunnel (domaine de calcul) à une section donnée. Les résultats sont quantitativement concordants, mais les temps de simulations différent considérablement.

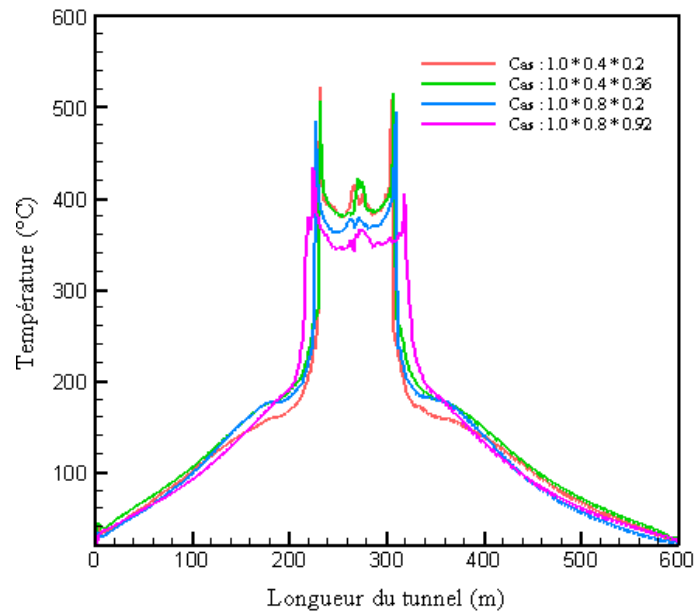


Fig. 3.1 Evolution de température pour les cas simulés.

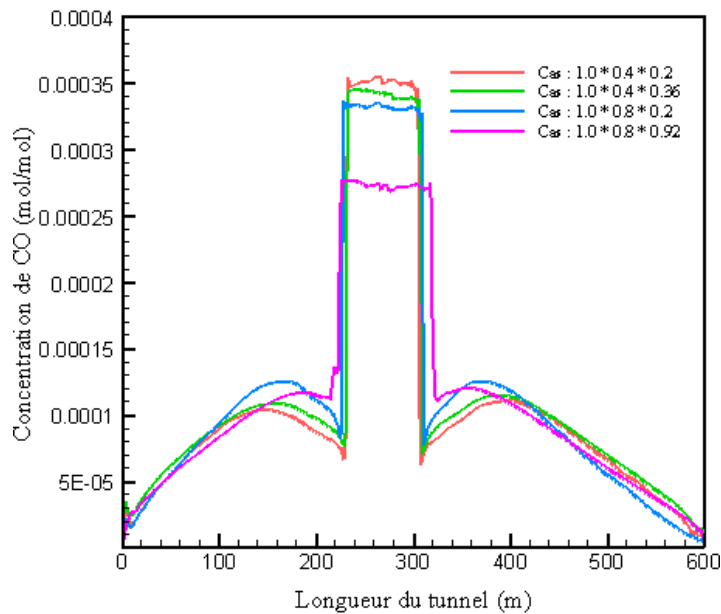


Fig. 3.2 Evolution de la concentration de CO pour les cas simulés.

La figure (3.3) montre le temps de calcul pour quatre cas considérés. On remarque que le temps de calcul est grand pour le maillage le plus raffiné.

La comparaison entre les résultats des quatre cas indique que les évolutions de la température sont très semblables pour les trois premiers cas. La même remarque peut être faite pour l'évolution de la concentration de CO. Les résultats du 4^e cas diffèrent des autres trois cas. La dimension Δz influe sur les résultats, alors que Δx et Δy influent légèrement.

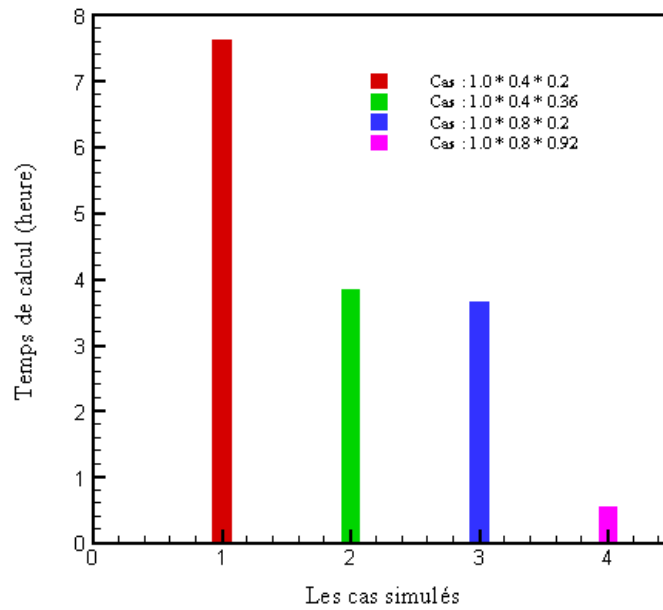


Fig. 3.3 Temps de calcul pour les cas simulés.

Le temps de simulation est un facteur déterminant. Il est plus commode d'opter pour un temps de calcul le plus faible du moment où les résultats sont très proches. La légère différence dans les résultats du quatrième cas par rapport aux trois cas se situe au voisinage du foyer où les perturbations sont importantes. Le maillage du troisième cas semble être le plus approprié. Ainsi, nous adopterons les dimensions de cellules de maille utilisées dans le troisième cas pour la prochaine étude.

Chapitre 4

Simulation de la dynamique des fumées avec le code FDS : Application à une géométrie type tunnel du métro d'Alger

Le renforcement de la sécurité au feu d'installations urbaines passe par une compréhension de l'ensemble des phénomènes impliqués lors de l'incendie et exige le développement d'outils numériques spécifiques d'analyse de sûreté. De plus, une meilleure connaissance des premiers instants de l'incendie permet une détection du feu plus précoce en évitant : son grossissement rapide, la création des conditions nécessaires favorisant la déstratification des fumées...etc.

L'objectif de cette partie d'étude sera de déterminer la vitesse critique qui permet d'éviter ces phénomènes. L'accent portera principalement sur la détermination des paramètres physiques tels que : la température, la concentration du CO_2 , la vitesse,...etc., et cela pour différentes vitesses d'extraction.

L'étude a été réalisée sur un tronçon de tunnel du métro d'Alger de 612.28 m de long, 8 m de large et 5.35 m de haut. Il englobe les deux interstations amont et aval de la station de «Aissat Idir» (station Arsenal). Elle est considérée comme géométrique et fait office de référence pour l'ensemble des stations. Les figures (4.1) et (4.2) présentent, respectivement, le schéma de la station et du tronçon du tunnel.

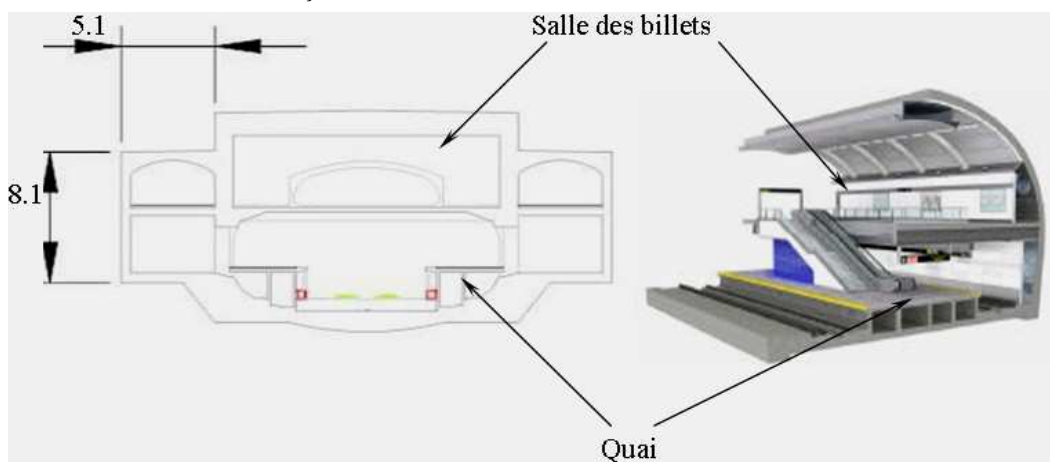


Fig. 4.1 Schéma descriptif de la station.

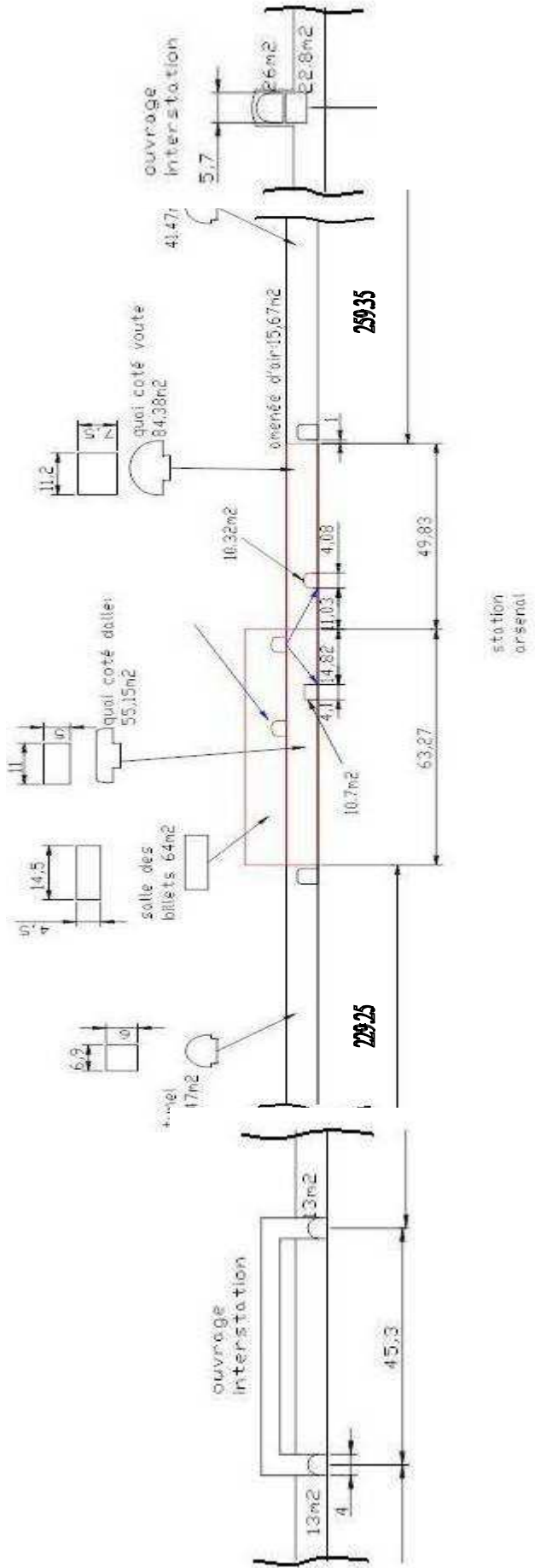


Fig 4.2 Schéma descriptif d'un tronçon de tunnel

Afin de mieux appréhender le niveau de sécurité fourni par le système de ventilation, deux scénarios ont été choisis.

Le premier scénario : L'incendie en ligne à l'amont ou à l'aval des quais, il s'agit de l'incendie de la première voiture de la rame du métro, le foyer est supposé amorcé par une étincelle de cigarette posée sur un siège de voyageur.

Le deuxième scénario : L'incendie au niveau de la salle des billets, il s'agit de l'incendie d'un fauteuil posé dans la salle des billets, la source de chaleur qui amorce l'incendie est une étincelle de cigarette tombée sur ce fauteuil.

4.1. Simulation :

4.1.1. Premier scénario :

La structure est divisée en quatre zones de calcul avec un maillage propre pour chaque zone, (tableau 4.1).

Compartiments	dimensions (m)	maillage (m)
Premier ½ tunnel	234.25 × 8.00 × 5.35	234 × 10 × 27
La station	63.00 × 24.70 × 9.13	64 × 30 × 45
Ouvrage après station	49.83 × 14.50 × 6.56	50 × 18 × 32
Deuxième ½ tunnel	265.20 × 8.00 × 5.35	265 × 10 × 27

Tab. 4.1 Les quatre compartiments de l'ouvrage.

Comme l'indique la figure (4.3), Les simulations numériques sont réalisés sur le domaine de calcul tridimensionnel. Le tronçon a deux ouvertures l'entrée et la sortie. Les rames de métro sont représentées par une géométrie parallélépipédique en vert (le code de calcul FDS ne permettant de générer que des géométries parallélépipédiques). La salle des billets est représentée en bleu. La source de chaleur est définie par une surface carrée au niveau du toit de la rame (représentée en rouge). Les deux ventilateurs sont représentés aussi par deux surfaces carrées de couleur verte au niveau du mur coté gauche. La durée de simulation est de l'ordre de 360 s. Ce temps correspond au temps nécessaire à l'évacuation des voyageurs.

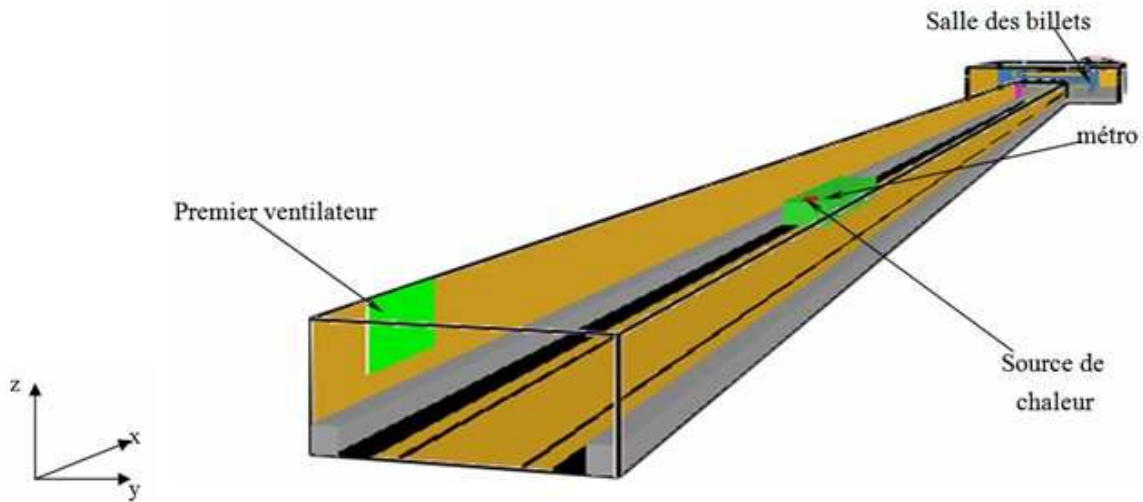


Fig. 4.3 Vue d'ensemble du domaine de calcul (tronçon du tunnel).

4.1.1.1 Conditions aux limites

Pour effectuer les simulations, des conditions limites sont introduites. Les régimes de ventilations: 1.0, 1.5, 3.0 et 4.5 m/s sont considérés. La puissance thermique par unité de surface de (3250 kW/m²) définit la source de chaleur. Elle est située à une distance de 51 m de la première tête du tunnel. Les thermocouples placés le long du domaine à une hauteur de 3 m et au milieu du domaine ($y = 0$), permettent de mesurer les températures du panache.

4.1.1.2 Résultats de la simulation

Dans cette partie on présente les résultats numériques obtenus (les distributions de concentrations de CO₂ et de la température).

La figure (4.4) présente l'évolution de la température moyenne et de la concentration de CO₂ moyenne en fonction de la longueur du tunnel pour les différentes vitesses d'extraction.

Les profils de température pour les deux vitesses 1.0 et 1.5 m/s sont pratiquement identiques et cela est dû à la légère variation de la vitesse d'extraction (température maximale = 64.5 °C). En augmentant la vitesse, une baisse de température le long du tunnel est observée. Cela se justifie par le fait que, plus on augmente la vitesse d'extraction, plus l'évacuation des fumées est rapide, plus la température dans l'ouvrage décroît.

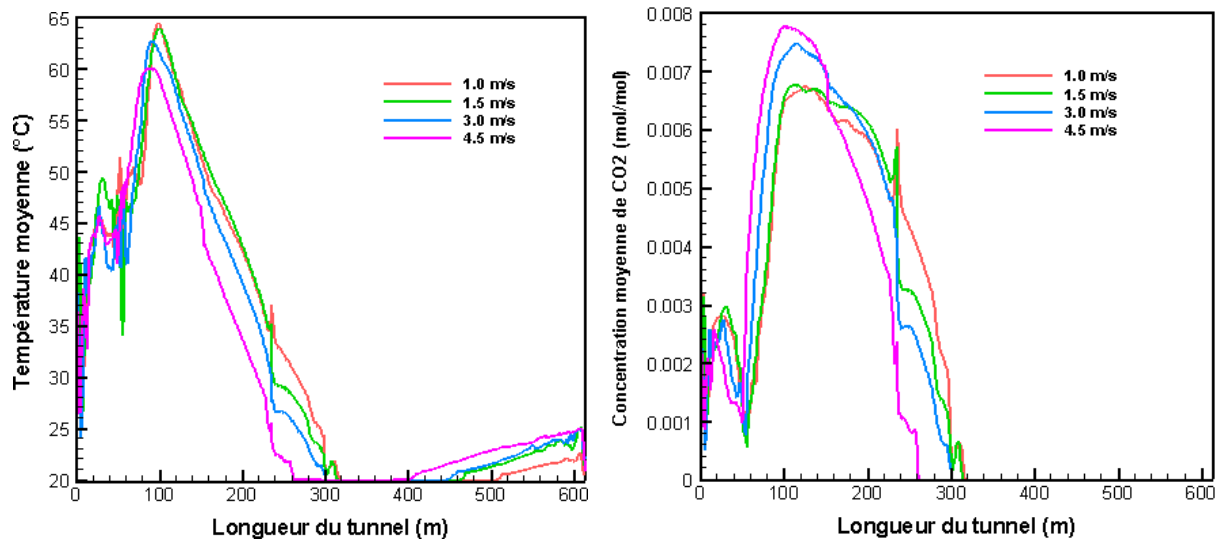


Fig. 4.4 Profils de température et de concentration de CO₂ moyennes à t = 360 s.

Dans le graphe présentant l'évolution de la concentration moyenne de CO₂, entre 0 et 60 m le long du tunnel, on observe un même comportement avec une différence négligeable. A partir de 60 m et jusqu'à 150 m, on remarque une concentration de CO₂ plus élevée pour les vitesses de : 3.0 et 4.5 m/s. Cela est due au fait qu'il y'a une turbulence au dessus du foyer qui fait obstacle à l'évacuation et par conséquent entraîne l'élévation de la concentration de CO₂. De 150 à 320 m les concentrations diminuent le long du tunnel jusqu'à la disparition puisque la fumée n'arrive pas durant le temps considéré à couvrir tout l'ouvrage.

Ces courbes ne montrent pas les phénomènes de déstratification des fumées. Pour en faire, Il est plus commode de représenter les évolutions de la température et de la concentration de CO₂ instantanées. Les graphes (4.5) à (4.8) montrent l'évolution de la température et de la concentration de CO₂ en fonction du temps aux différents endroits cités au (tableau 4.2).

Localisation (m)	Localisation par rapport à l'installation
x = 20, y = 0, z = 3	entre le ventilateur et le foyer
x = 50, y = 0, z = 3	proche au foyer
x = 130, y = 0, z = 3	entre le foyer et la station
x = 250, y = 0, z = 3	au milieu de la station (salle des billets)

Tab. 4.2 Localisation des points de mesure des paramètres physiques.

D'après la figure (4.5), on remarque une augmentation de la température pour tous les régimes, et des fluctuations de fortes amplitudes qui apparaissent pour les vitesses $V_e = 3.0$ et

$V_e = 4.5$ m/s. Alors que les fluctuations sont faibles dans les cas où $V_e = 1.0$ et $V_e = 1.5$ m/s. La déstratification se produit pour les deux régimes de ventilation où $V_e = 3.0$ et 4.5 m/s

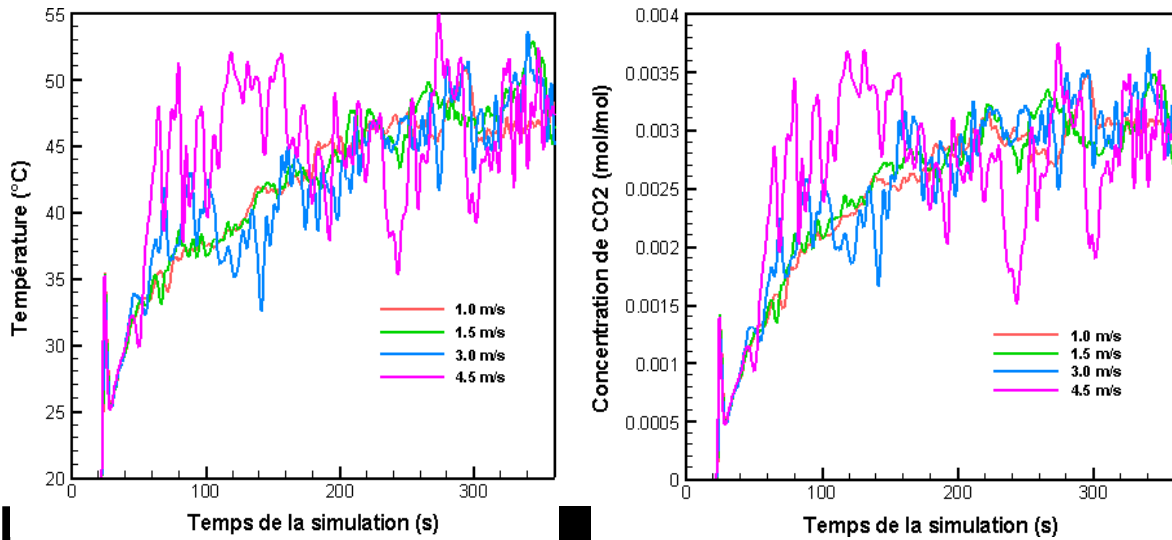


Fig. 4.5 Profils de température et de concentration de CO_2 à $x = 20$ m.

Pour la distribution de CO_2 , on remarque une augmentation de la concentration avec des fluctuations faibles pour le premier et le deuxième régime de ventilation (1.0 et 1.5 m/s). Les grandes fluctuations sur la concentration de CO_2 pour les deux vitesses d'extraction de 3.0 et 4.5 m/s sont bien marquées, à cause de la turbulence créée par le ventilateur.

Au point de mesure situé à 50 m proche de la source de chaleur (figure 4.6), les fluctuations sont plus grandes pour tous les régimes de ventilation. Se justifie par la combinaison de deux types de turbulence causés par : le foyer et le ventilateur. Le feu crée une turbulence par le dégagement de chaleur et le ventilateur par la dynamique d'extraction. Une déstratification très

remarquée à ce niveau pour les deux régimes de ventilation $V_e = 3.0$ et 4.5 m/s.

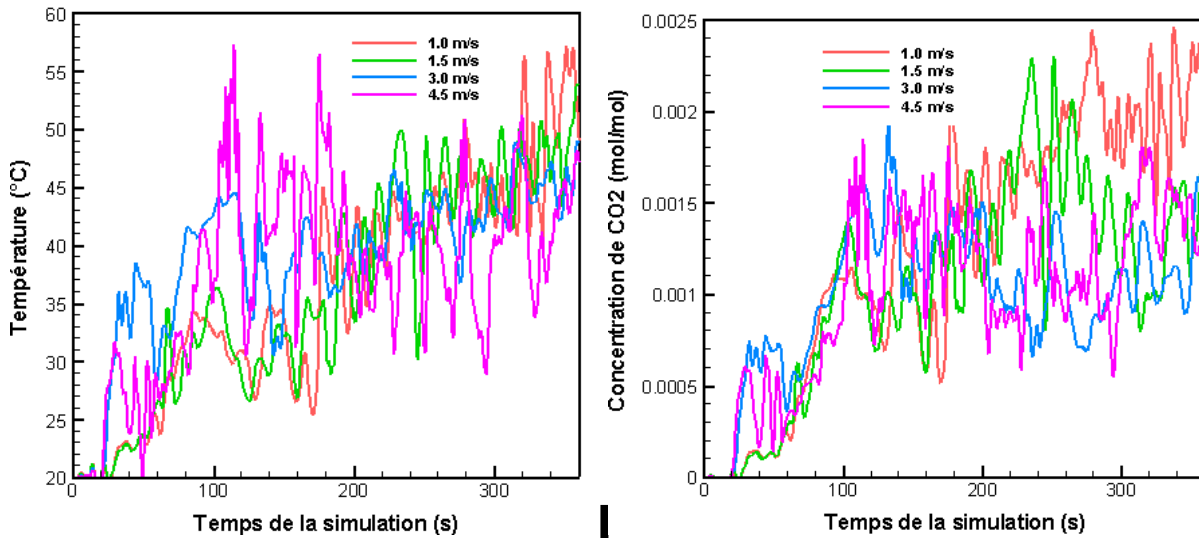


Fig.4.6 Profils de température et de concentration de CO_2 à $x = 50$ m.

La figure (4.7) montre l'augmentation de la température et de concentration de CO_2 , ces paramètres fluctuent faiblement. Ces deux paramètres diminuent avec l'augmentation de la vitesse d'extraction (évacuation rapide des fumées). La fumée reste stratifiée en s'éloignant du feu (l'écoulement est faiblement turbulent). A la distance entre le foyer et le point $x = 130$ m, le régime est stationnaire et est bien établi.

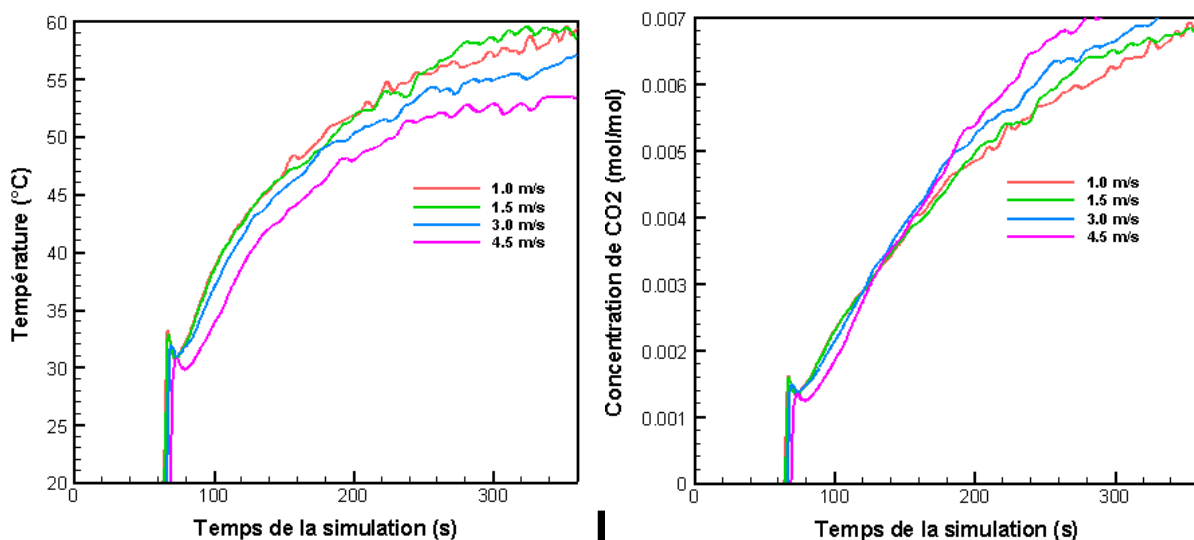


Fig. 4.7 Profils de température et de concentration de CO_2 à $x = 130$ m.

La figure (4.8) montre l'évolution de la température et de la concentration de CO₂ au niveau de la station des voyageurs à x = 250 m. La température reste acceptable jusqu'à 200 s. La concentration de CO₂ est négligeable. A partir de 200 s malgré que les fluctuations sont faibles, conséquence de la stratification des fumées, L'augmentation de la température et de concentration de CO₂ devient importante.

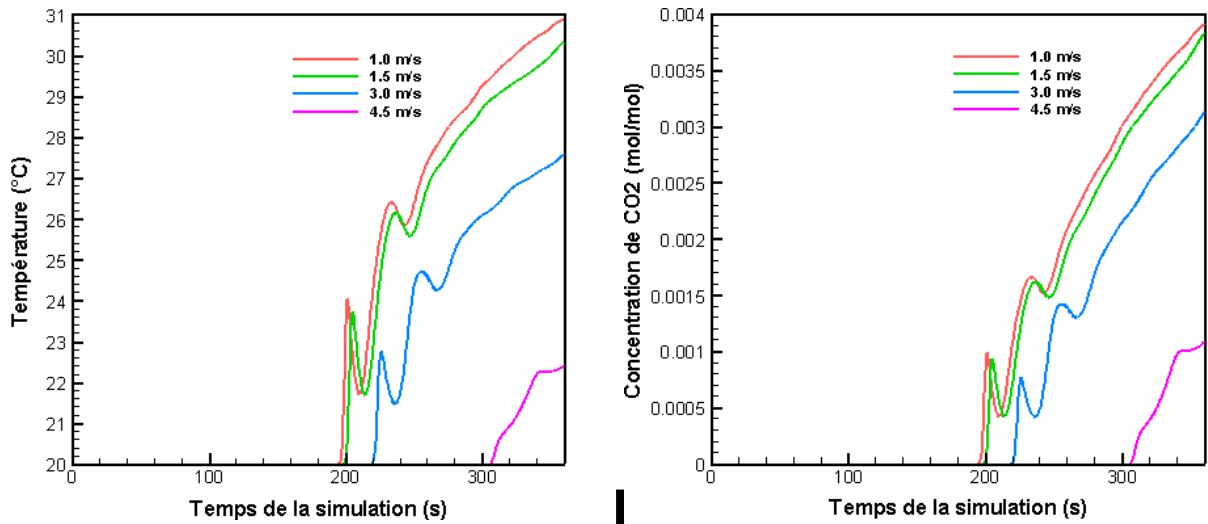


Fig. 4.8 Profils de la température et de concentration de CO₂ à x = 250 m.

On peut observer clairement le phénomène de la turbulence et donc de la déstratification des fumées dans la figure (4.9), où on a représenté la distribution de la vitesse moyenne U en fonction de la longueur de l'ouvrage.

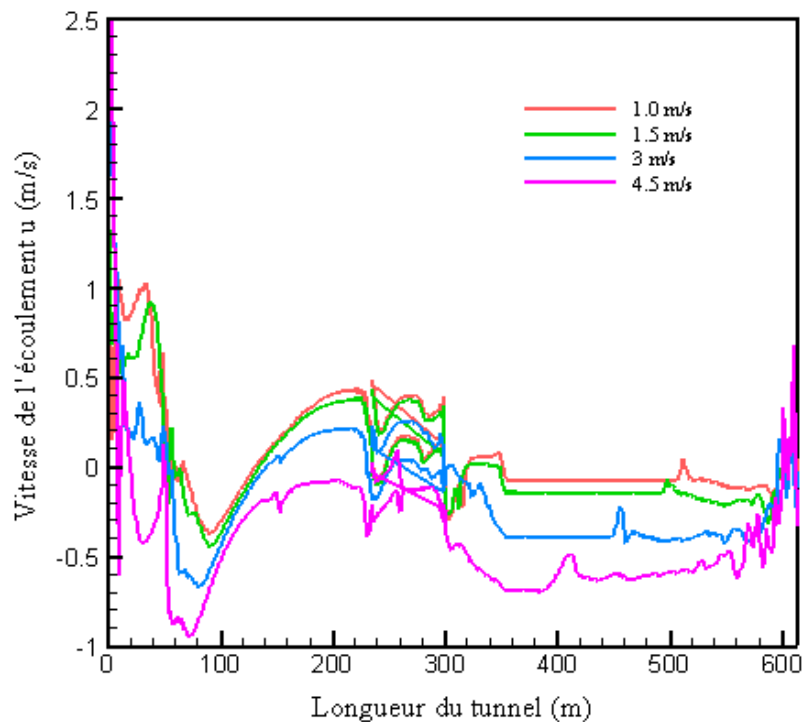


Fig. 4.9 profil de la vitesse moyenne de l'écoulement à $t = 360$ s.

C'est la vitesse de l'écoulement suivant la direction de la propagation des fumées, qui représente le panache air - fumées en fonction de la longueur. Il n'y a pas de grande différence entre les trois cas ($V_e = 1.0, 1.5$ et 3 m/s) concernant l'évolution de la vitesse du panache et les fluctuations sont à faible intensité. Les fluctuations deviennent très importantes pour le cas où $V_e = 4.5$ m/s. La vitesse change de direction au bout de 25 s. La turbulence créée des tourbillons. L'importante extraction créée par le ventilateur permet en même temps d'évacuer rapidement les fumées, mais aussi elle crée une déstratification de ces dernières dans tout l'ouvrage.

La figure (4.10) présente la distribution des transferts de chaleur avec le temps. On observe une dominance du transfert de chaleur par conduction, transfert via les murs intérieurs du tunnel. Le transfert par rayonnement est comparable à celui par conduction, par contre celui par convection est relativement moins important.

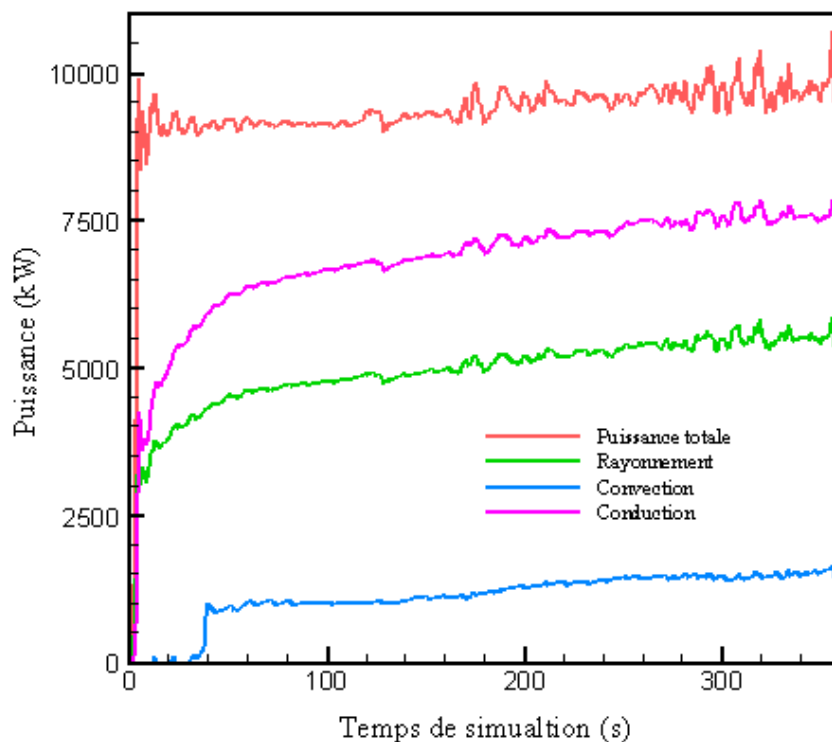


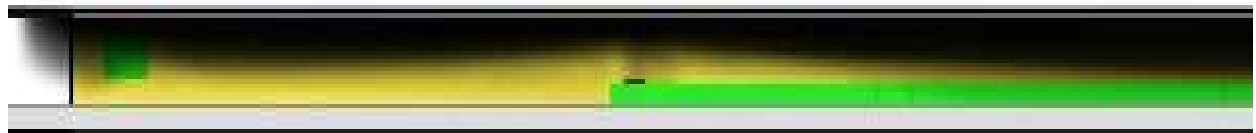
Fig. 4.10 Profil de puissance à $t = 360$ s

4.1.1.3. Analyse de la migration des fumées

La figure (4.11) montre l'enfumage du tunnel, après 360 s de simulation. On distingue deux couches, une représente l'air ambiant qui se situe dans la partie inférieure et l'autre

représente la fumée qui se situe dans la partie supérieure. La différence entre la densité de fumées et de l'air fait que les fumées ont tendance à se plaquer contre le plafond de l'ouvrage, c'est l'effet de la flottabilité. La fumée dans la partie haute, est plus structurée pour les vitesses d'extraction de 1.0 et 1.5 m/s (figure 4.11 (a) et (b)). A la vitesse d'extraction de 3.0 m/s, les couches de fumées et d'air commencent à se superposer au voisinage de l'interface horizontale, alors qu'à la vitesse de 4.5 m/s, la fumée commence à envahir toute la hauteur du tunnel (figure 4.11 (c) et (d)). Aux vitesses de 3.0 m/s et 4.5 m/s, on observe une extraction de fumées plus importante, mais l'écoulement est perturbé. On ne distingue pas les deux couches, c'est la déstratification.

La figure (4.12) montre la distribution de la température après 360 s de simulation et l'évolution de la température en fonction de la hauteur du tunnel pour deux points de mesure, l'un en amont du foyer ($x = 25$ m) et l'autre en aval du foyer ($x = 80$), pour différentes vitesses d'extraction.



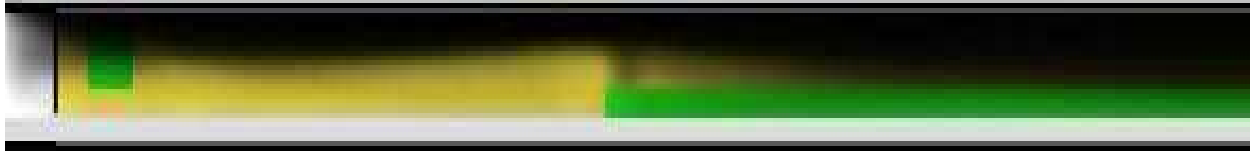
(a): $V_e = 1.0$ m/s



(b) : $V_e = 1.5$ m/s

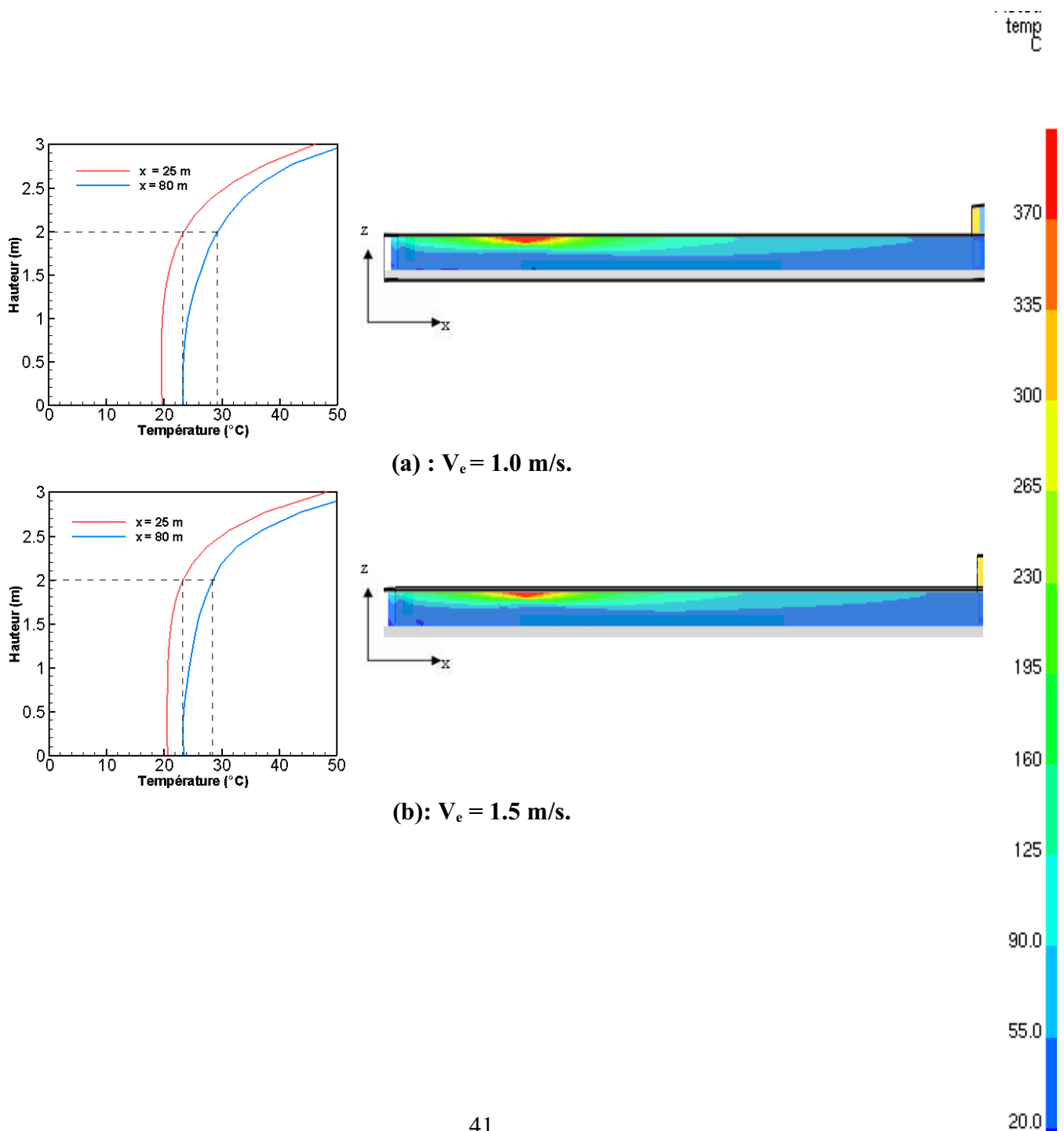


(c) : $V_e = 3.0$ m/s



(d) : $V_e = 4.5$ m/s

Fig. 4.11 Enfumage du tunnel après 360 s de simulation.



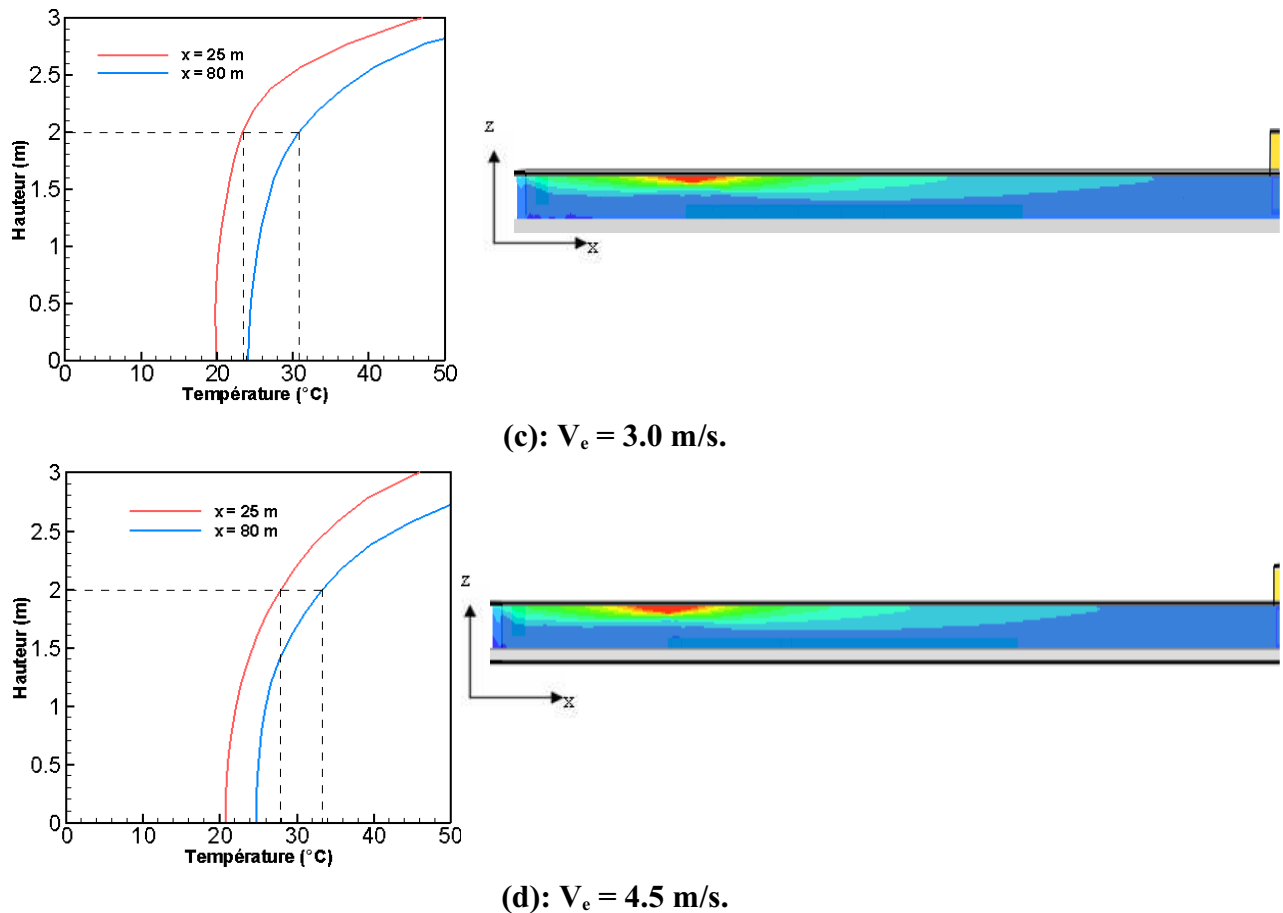


Fig. 4.12 Champ de température selon le plan axial du tunnel.

Pour les deux cas où $V_e = 1.0$ et $V_e = 1.5$ m/s, l'évacuation des fumées est insuffisante d'où une certaine accumulation des fumées, qui reste en sa majeure partie répartie sur la couche supérieure du tunnel, ce qui induit une élévation de la température au niveau de cette couche. Il est évident qu'elle va s'étaler sur toute la hauteur du tunnel si on augmente le temps de simulation. À hauteur d'homme (≈ 2 m) la température reste ambiante, ce qui favorise l'évacuation des usagers.

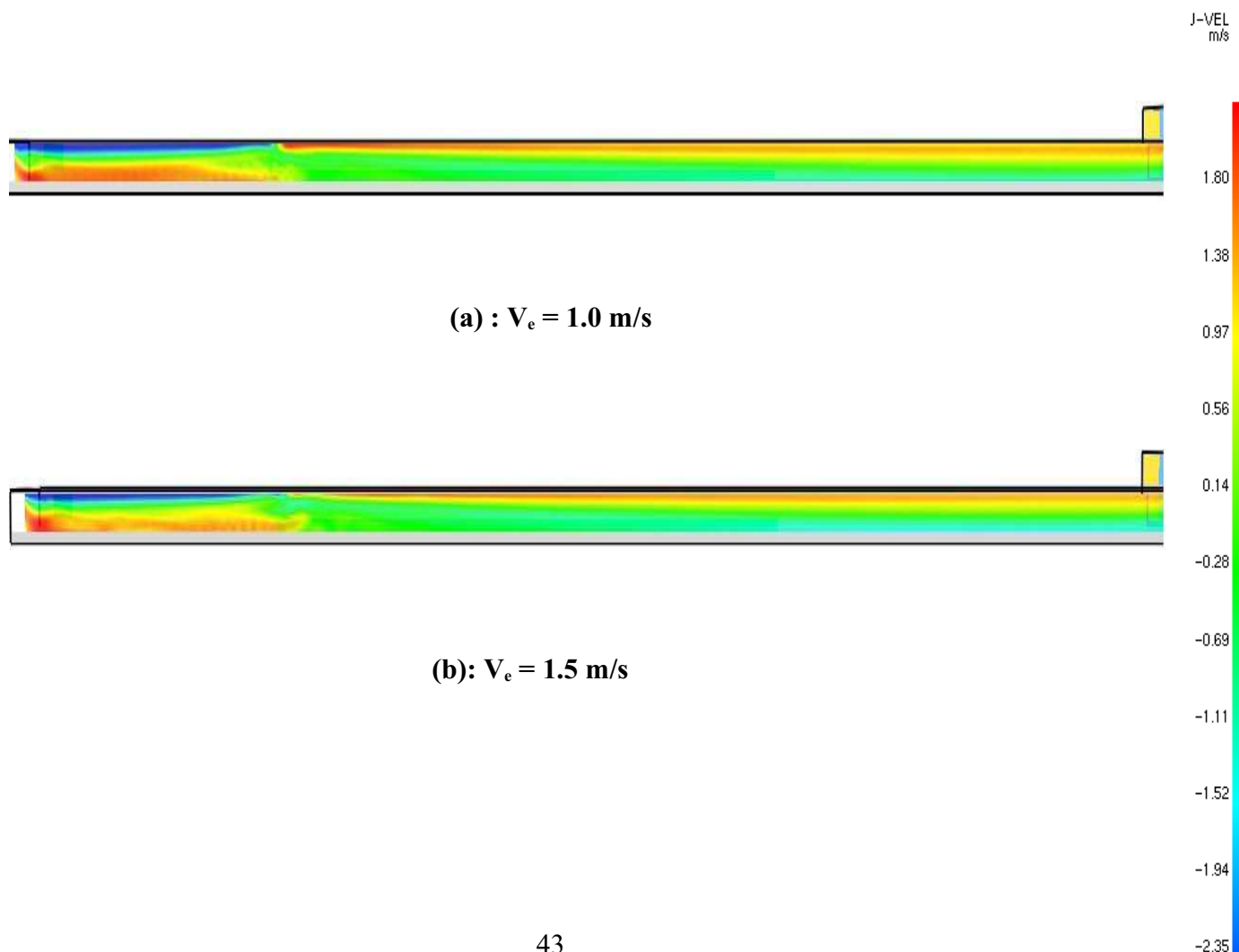
Sur la figure (4.12 (c)), on signale une élévation importante de la température dans la couche supérieure du tunnel accompagnée d'une légère augmentation de la température dans la partie basse du fait de l'augmentation de la vitesse d'extraction, une température qui reste supportable par les usagers. On est au début de l'apparition du phénomène de déstratification.

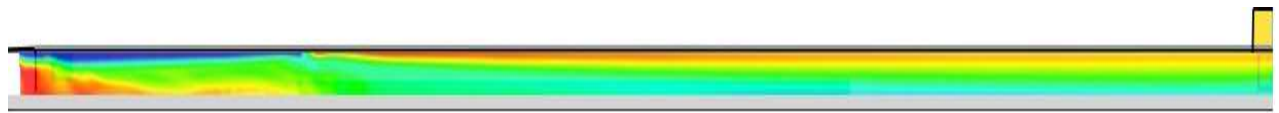
A la vitesse d'extraction de 4.5 m/s (Figure 4.12 (d)), il y a une accumulation importante et un retour de fumées, ce qui génère une élévation de la température sur toute la hauteur du tunnel. La température au niveau de la partie basse est de 28 °C à $x = 25$ m et est de 34 °C à $x = 80$ m. Cette élévation rend l'évacuation des sinistrés très difficile. En plus de l'élévation de

la température, la toxicité des fumées, induite par la déstratification, aggrave encore plus la situation des usagers dans le local.

Pour bien appréhender le phénomène de déstratification on a présenté la distribution de la vitesse après 360 s de simulation pour les quatre régimes d'extraction (figure 4.13). Selon la direction du référentiel choisi, la couleur bleue représente les vitesses des fumées dans le sens opposé (négatif). La couleur rouge représente les vitesses positives. On observe un retour de l'air chaud pour les vitesses d'extraction de 1.0 m/s et 1.5 m/s, et de la fumée pour les vitesses de 3.0 et 4.5 m/s.

On remarque que la couche représentant l'écoulement dans le sens positif du référentiel au voisinage du ventilateur d'extraction est épaisse (figure 4.13 (c)), et elle s'étale sur une grande longueur. Pour la vitesse d'extraction de 4.5 m/s, cette dernière est plus épaisse encore, mais elle est limitée en longueur, (figure 4.13 (d)). Pour les deux vitesses 3.0 et 4.5 m/s, l'extraction est importante mais elle génère des perturbations des fumées.





(c): $V_e = 3.0$ m/s

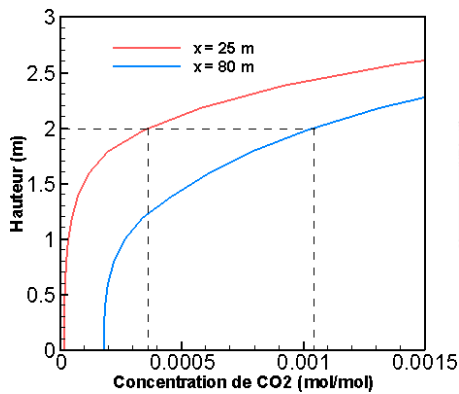


(d): $V_e = 4.5$ m/s

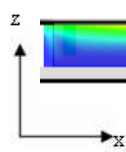
X_CO2
mol/mol

Fig. 4.13 Champ de vitesse selon le plan axial du tunnel.

La distribution de CO₂ est représentée dans la figure (4.14), pour les deux cas où $V_e = 1.0$ et 1.5 m/s, on remarque que la concentration de CO₂ est très supportable pour les deux point de mesures $x = 50$ m et 80 m. Tandis qu'au dans les deux autre cas où $V_e = 3.0$ et 4.5 m/s la concentration de CO₂ est un peu élevée conséquence de la déstratification des fumées dans les deux points de mesure.



(a): $V_e = 1.0$ m/s



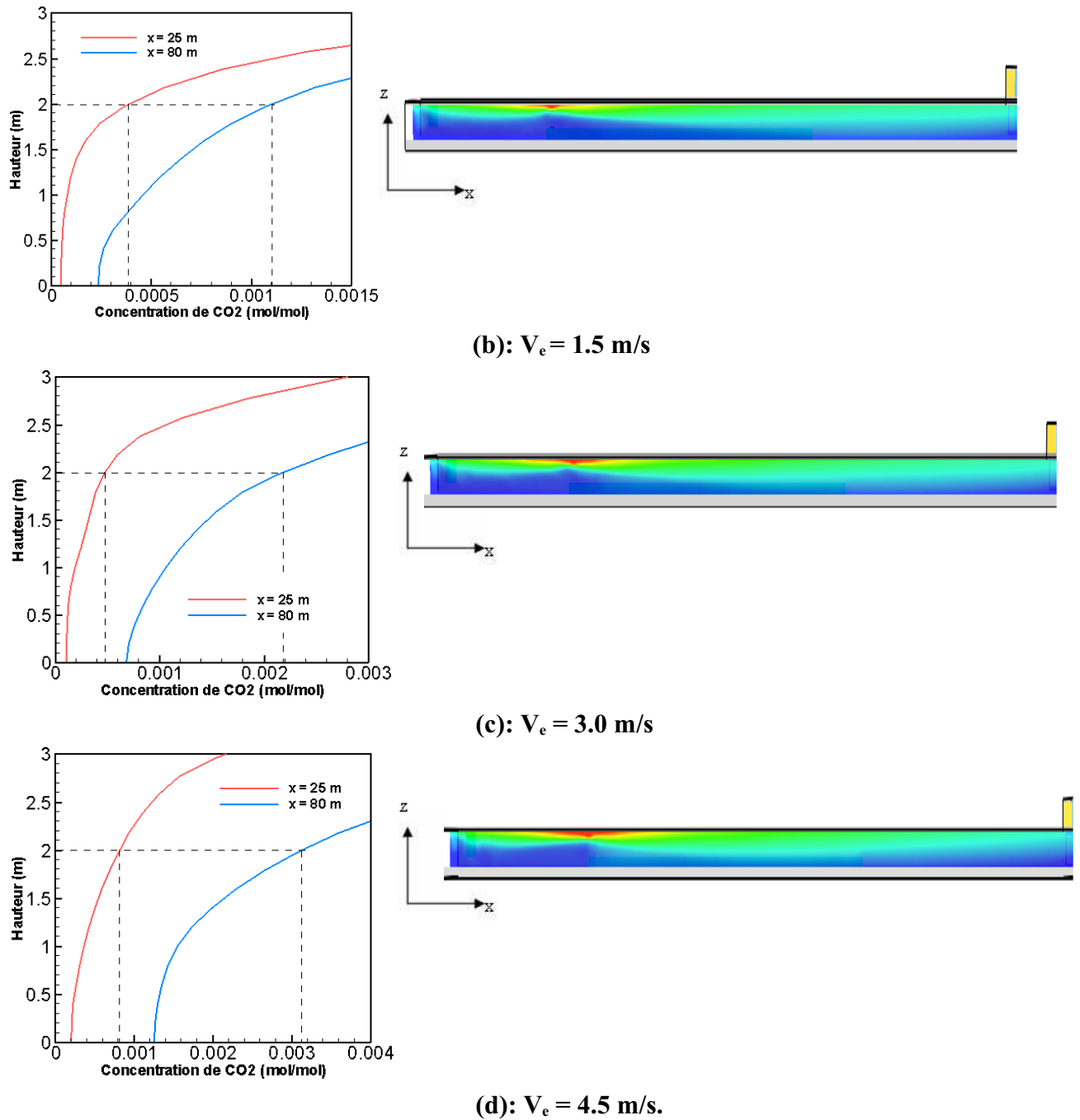


Fig. 4.14 Champ de concentration de CO_2 selon le plan axial du tunnel.

4.1.1.4. Conclusion

D'après les résultats présentés, la vitesse d'extraction qui permet une évacuation rapide des fumées non déstratifiée et sans apparition du phénomène de couche de retour est voisine de 1.5 m/s. Cette vitesse est appelée la vitesse critique. Elle concorde bien avec celle recommandée par la réglementation française relative à la sécurité des tunnels de métro (VINCI).

4.1.2. Deuxième scénario

Pour simuler la configuration adoptée dans le deuxième scénario la structure est divisée en quatre domaines de calcul avec un maillage propre pour chaque domaine (tableau 4.1).

Comme indiqué dans la figure (4.15), les simulations numériques sont réalisées sur un domaine de calcul tridimensionnel. La station représentée en bleu, a deux portes ouvertes sur les quais et quatre autres portes dans la salle des billets. La source de chaleur est définie par une surface carrée sur le sol dans la salle des billets au niveau supérieur de la station. La puissance utilisée pour les simulations est égale à 500 kW/m^2 . Trois ventilateurs placés au niveau du toit (représentés en vert) servent à extraire de la fumée en cas d'incendie. Le temps choisi pour la simulation est de l'ordre de 360 s. Ce temps correspond au temps nécessaire à l'évacuation des voyageurs.

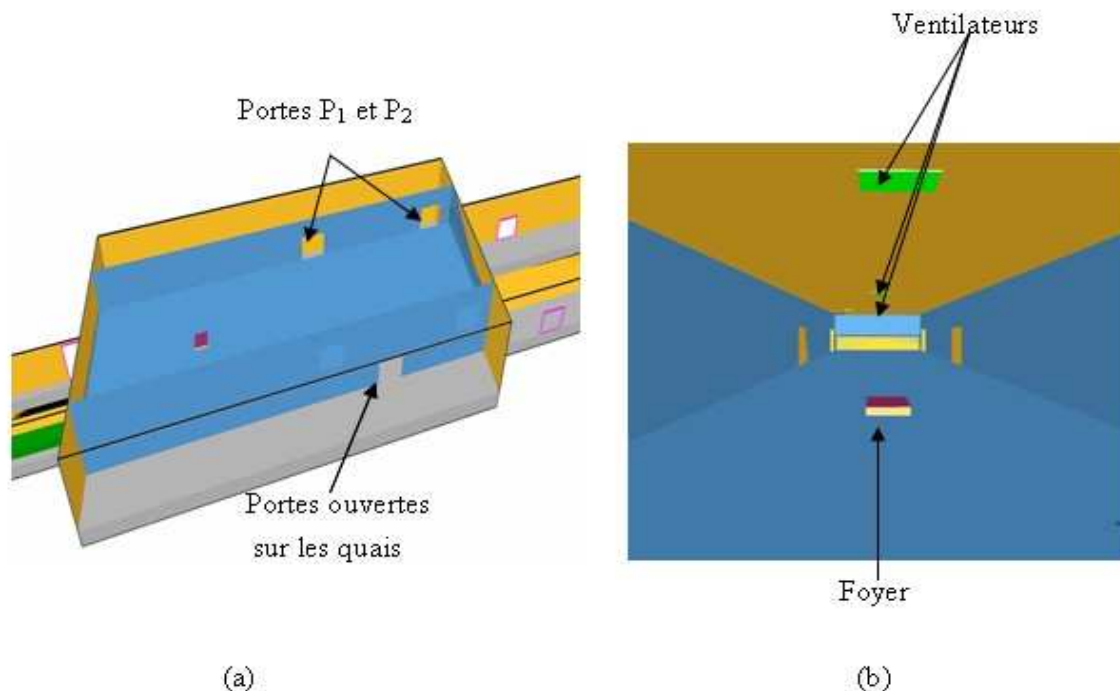


Fig. 4.15 (a) Vue d'ensemble de la station, (b) Vue d'intérieur de la salle des billets.

4.1.2.1 Conditions aux limites

Pour effectuer les simulations, des conditions limites sont introduites.. La puissance thermique par unité de surface de 500 kW/m^2 définit la source de chaleur, cette dernière est

située à une distance de 250 m. Les thermocouples placés le long du domaine à une hauteur de 3 m et au milieu du domaine ($y = 0$), permettent de mesurer les températures du panache.

4.1.2.2. Géométrie

La structure considérée (figure 4.16) à une échelle réduite est une représentation simplifiée de la salle des billets, quatre portes de mêmes dimensions : $(4.1 \times 0.2 \times 2.53)$ m disposées sur les deux côtés. Le foyer de dimensions : (2.0×2.0) m est situé au centre du planché. Trois ventilateurs sont situés au niveau du plafond de la salle des billets de dimensions : (1.5×0.9) m.

4.1.2.3. Choix de la vitesse d'insufflation

Pour une vitesse d'extraction fixée, les vitesses d'insufflation des deux ventilateurs situés en interstation ont été variées de 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5 m/s pour étudier l'effet de l'insufflation sur le comportement dynamique des fumées dans la salle des billets. Il ressort des résultats des simulations que l'effet de l'insufflation est négligeable. Ceci s'explique par le fait que les ventilateurs sont situés très loin de la salle des billets. L'aspiration naturelle à travers les ouvertures dans la salle des billets suffit à elle seule de renouveler l'air dans le local.

La distribution de la température moyenne dans la salle des billets est quasiment la même quantitativement pour tous les cas de simulation, figure (4.17).

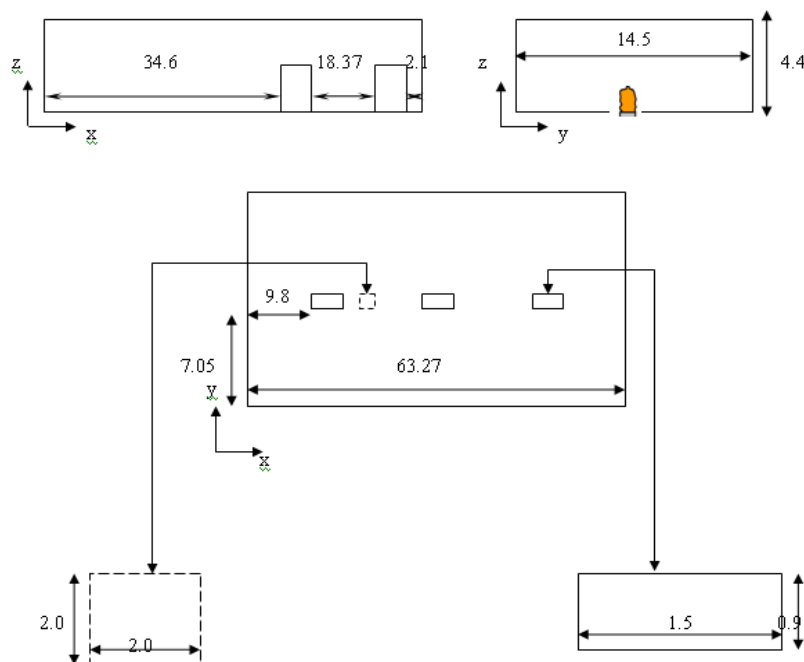


Fig. 4.16 Géométrie de la salle des billets.

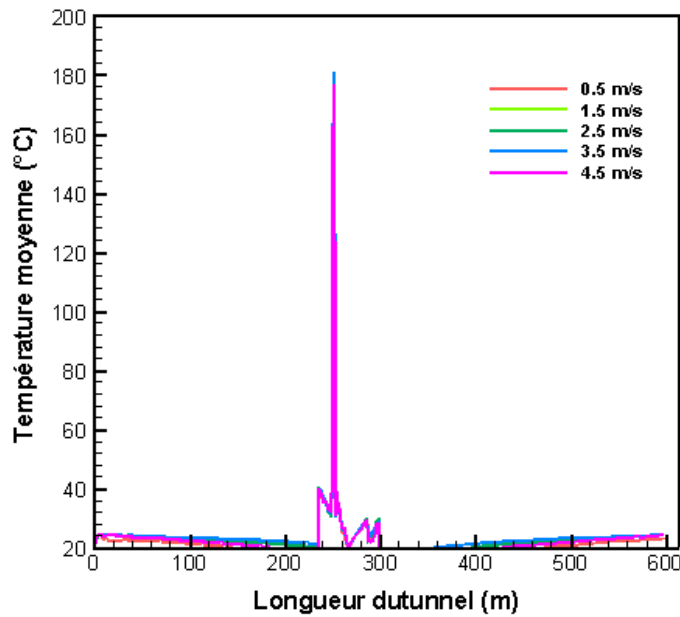


Fig. 4.17 Distributions de la température moyennes

Dans le but purement économique du point de vue énergétique, la vitesse d'insufflation de 0.5 m/s est choisie. Cette vitesse est utilisée pour la suite de nos simulations.

4.1.2.4. Simulations et Résultats

Dans le but d'assurer un désenfumage optimum, des extractions à différentes vitesses et à la vitesse d'insufflation fixée à 0.5 m/s ont été réalisées. Les résultats de ces simulations, relatif à différents endroits (tableau 4.3), sont représentés dans les figures (4.18) à (4.20).

Localisation (m)	Localisation par rapport à l'installation
$x = 240, y = 0, z = 7$	en amont du foyer
$x = 250, y = 0, z = 7$	juste au dessus foyer
$x = 280, y = 0, z = 7$	en aval du foyer

Tab. 4.3 Localisation des points de mesure des paramètres physiques.

Sur la figure (4.18), la température et la concentration de CO₂ augmentent en fonction du temps pour les différentes vitesses considérées. Des fluctuations dans la température et la concentration de CO₂ peuvent être observées jusqu'à 150 s. Ces dernières sont probablement causées par la source de chaleur.

Le comportement de ces paramètres est différent pour les différents cas. Plus on augmente la vitesse d'extraction plus l'augmentation de la température et de la concentration de CO₂ devient lente. Il y'a donc bien une évacuation plus importante des fumées.

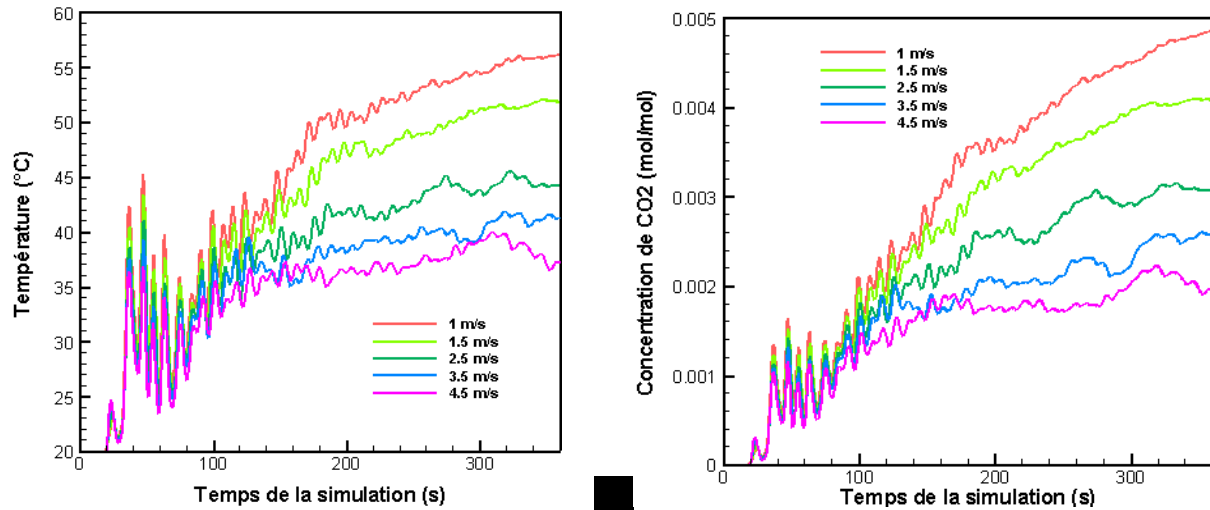


Fig. 4.18 Profils de température et de concentration de CO₂ à x = 240 m.

Au dessus du foyer (Figure 4.19), une augmentation appréciable de la température et de la concentration du CO₂ est remarquée, accompagnée par des fluctuations de grandes amplitudes. Ceci s'explique par le fait que la flamme perturbe l'écoulement. Les fluctuations sont plus importantes au régimes d'extraction $V_e = 3 \text{ m/s}$ et 4.5 m/s .

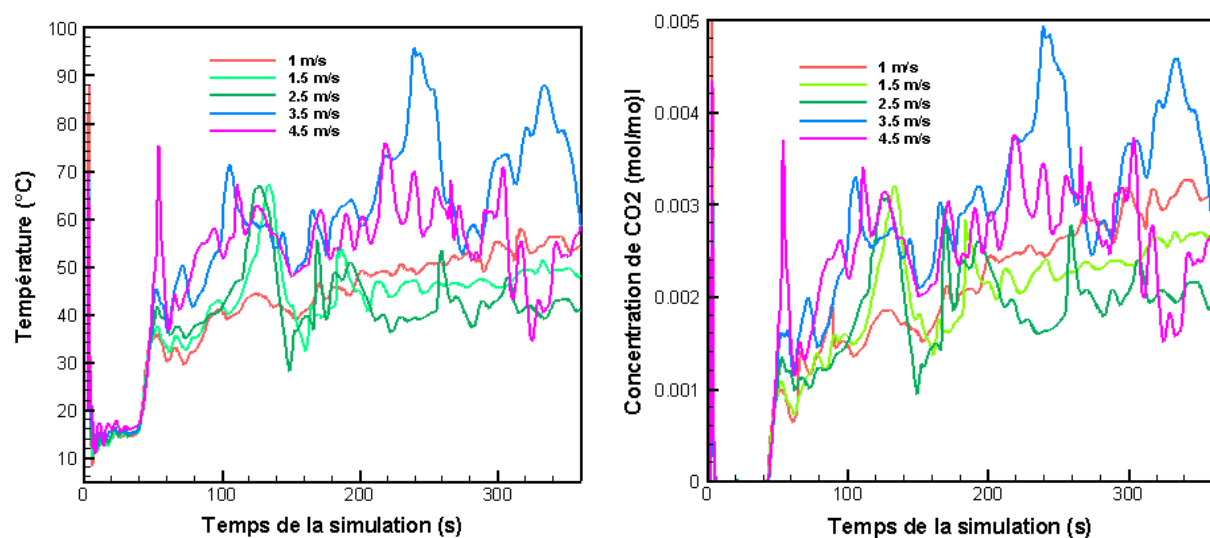


Fig. 4.19 Profil de température et de concentration de CO₂ à x = 250 m.

A x = 280 m en aval du foyer, les paramètres représentés dans la figure (4.20) montrent une augmentation très accrue pour les trois régimes de ventilation $V_e = 1.0, 1.5$ et 2.5 m/s .

L'évolution de la température et de la concentration de CO₂ aux vitesses de 3.5 et 4.5 m/s est constante. Ces deux vitesses permettent une évacuation rapide puisque la température ne varie pas et elle n'excède pas les 27 °C. Cette température est supportable pour les usagers. Une légère augmentation de CO₂ qui est jugée sans influence sur la respiration des personnes.

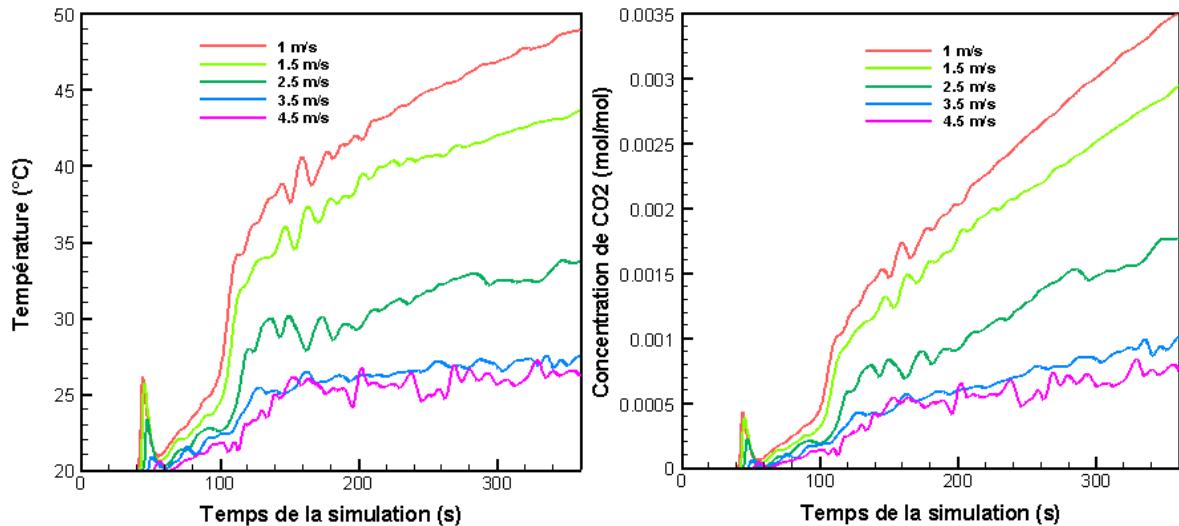


Fig. 4.20 Profil de température et de concentration de CO₂ à x = 280 m.

La vitesse $V_e = 4.5$ m/s, au vu des résultats présentés, permet une évacuation rapide et efficace des fumées. Les fumées sont bien structurées (pas de déstratification). L'apport d'air important généré par les ventilateurs crée des conditions presque ambiantes.

On doit signaler que l'apport d'air dans de telles situations peut avoir un effet négatif sur la sécurité dans le local. Il peut accroître la puissance du feu, comme aussi il peut provoquer des explosions de fumées (phénomène de « backdraft ») [13,14].

Afin de palier à ce phénomène, l'apport d'air doit être optimisé. Dans la figure (4.21) on présente la composante normale de la vitesse V en fonction de la hauteur au niveau des deux portes désignées par P_1 et P_2 coté gauche de la salle des billets.

Les ventilateurs exercent sur l'air des forces de volume qui tendent à l'aspirer vers la salle des billets, et puisque la fumée a une densité plus faible que l'air, ce dernier est aspiré par le bas de la porte, par conséquent les fumées s'évacuent par le coté supérieur de la porte. Une comparaison entre les cinq cas simulés montre que lorsque on augmente la vitesse d'extraction les courbes se déplacent vers les vitesses négatives empêchant les fumées de s'échappées par la porte, et permettent un apport d'air important vers le compartiment.

Dans la première porte (P_1) on remarque que la vitesse qui engendre en même temps un apport d'air moyen et une évacuation négligeable des fumées est $V_e = 2.5$ m/s, tandis qu'au niveau de la deuxième porte (P_2), à la même vitesse, un petit flux de fumées traverse cette dernière.

A partir de ces observations on peut déduire que la vitesse critique qui réduit l'évacuation des fumées et engendre un apport d'air moyen, par conséquent évite le *backdraft* est voisine de 2.5 m/s.

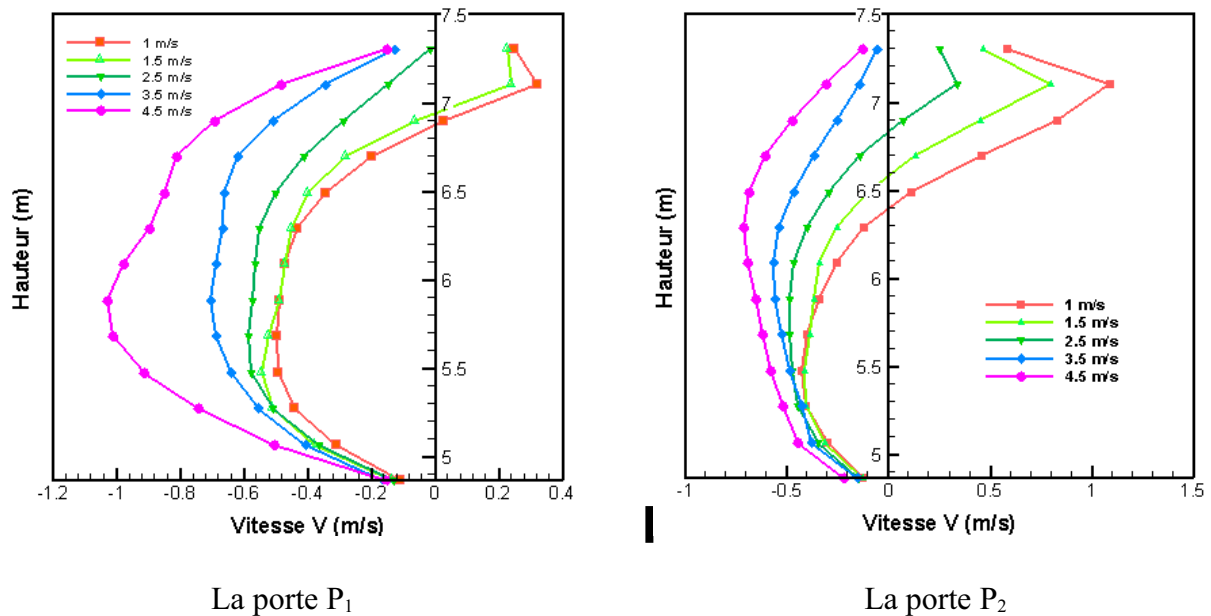


Fig. 4.21 Profils de vitesse V au niveau des deux portes P_1 et P_2 .

Dans la figure (4.22), on présente la dynamique des particules (suies) après 360 s de simulation à la vitesse d'extraction $V_e = 2.5$ m/s. Cette visualisation permet de montrer les lignes de courant de la dynamique de ces particules. On remarque que ces dernières s'orientent plus vers le ventilateur le plus proche.

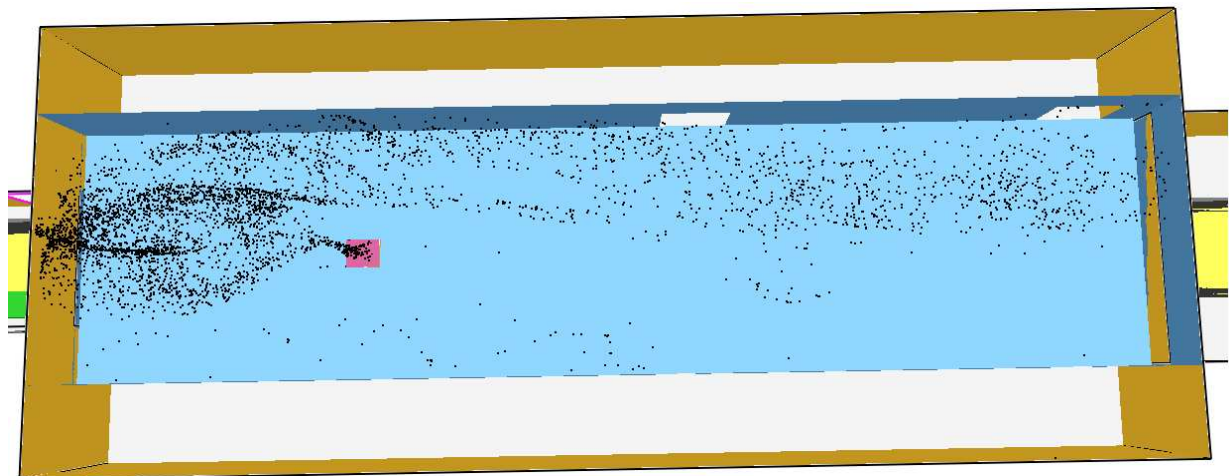


Fig. 4.22 Mouvement des particules à 360 s de simulation.

La représentation de l'évolution de la température est cruciale dans ce genre de problèmes. Son analyse permet une évaluation objective de la sécurité. La figure (4.23) issu de la simulation indique qu'à hauteur d'homme la température ne dépasse pas les 30 °C. Cette situation permet une évacuation des voyageurs dans de bonnes conditions.

Smokeview 5.0.1_730 - , sb_3_02_0360_02.q

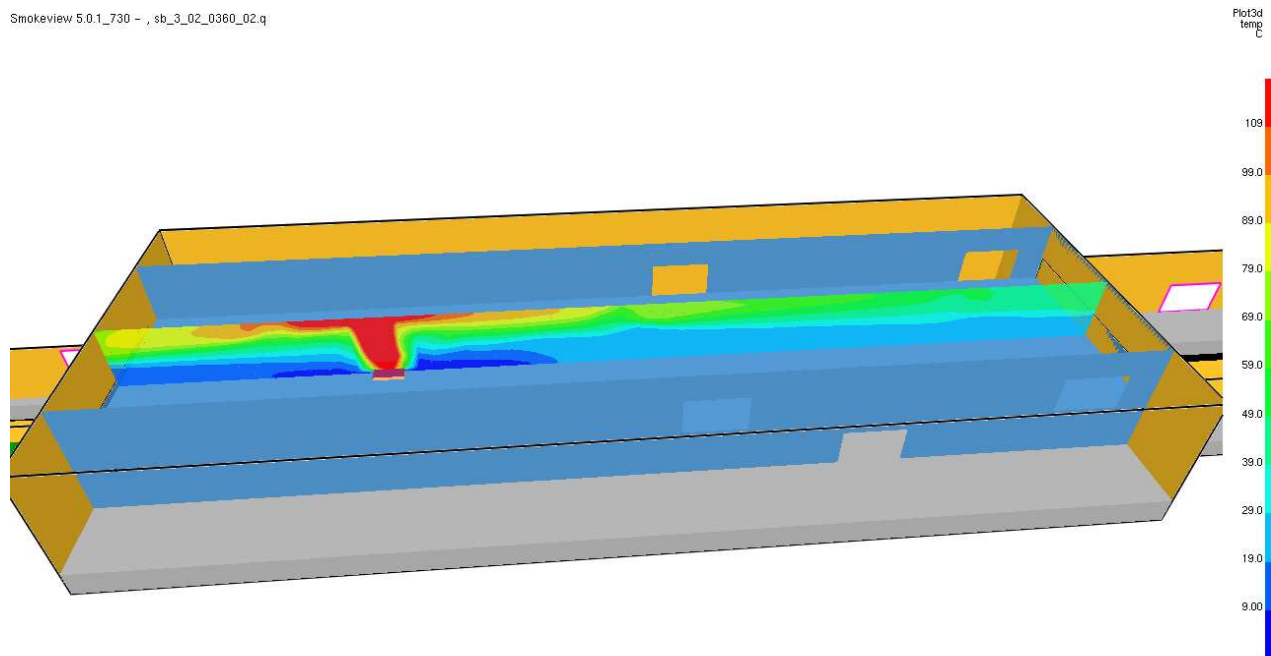


Fig. 4.23 Champ de température selon le plan axial de la salle des billets.

4.1.2.5. Conclusion

Les simulations réalisées ont permis d'étudier le mode de migration des fumées dans la salle des billets.

Il est apparu que pour les différentes vitesses d'extraction, la vitesse critique est voisine de 2.5 m/s. Cette vitesse implique des conditions compatibles avec l'évacuation des voyageurs dans la période réglementaire.

Les causes qui nous ont poussé à choisir cette vitesse s'articulent autour de :

- Une extraction rapide des fumées et la non – déstratification de celles-ci.
- Une réduction de l'air aspiré vers la salle des billets (risque d'explosion).

Ce résultat est en accord avec les données de la réglementation du constructeur, qui recommande une vitesse critique voisine de 2.6 m/s.

Chapitre 5

Etude et simulation du désenfumage dans un tunnel routier

Dans le cas des tunnels routiers, deux stratégies de désenfumage sont possibles :

- Ou bien viser à pousser toutes les fumées d'un seul coté du foyer, protégeant par là même les usagers présents du coté d'où vient le courant longitudinal. Les usagers présents en aval peuvent se diriger vers la sortie, évitant de s'exposer à la fumée. Il s'agit de la **stratégie longitudinale**.
- Ou bien viser à conserver la stratification des fumées, les usagers se trouvant alors dans une couche d'air frais située sous les fumées. Il s'agit de la **stratégie transversale**.

5.1. Validation du code FDS (stratégie longitudinale)

Quand un incendie se déclenche, les fumées montent au plafond, et se propagent rapidement. La propagation a lieu essentiellement suivant une seule direction. Si un flux d'air longitudinal est appliqué dans l'ouvrage, la fumée peut être complètement soufflée en aval de la source de chaleur. Si les forces de flottabilité sont supérieures aux forces à inertie (dues à la convection forcée), une partie de la couche de fumée stratifiée se développe en amont de la source en contre courant du flux d'air longitudinal. Ce phénomène est appelé « *Backlayering* ». Il est généralement associé à une vitesse critique U_c qui est, par définition, la vitesse minimale du courant d'air longitudinal permettant de repousser l'intégralité des fumées en aval de la source. Comme l'illustrent les photographies de la figure (5.1), lorsque la vitesse longitudinale est inférieure à la vitesse critique, le *backlayering* se développe à contre-courant. La configuration critique ($U \approx U_c$) est caractérisée par l'apparition d'une zone de recirculation en amont de la zone d'impact au plafond. [4,15].

Notre contribution concerne l'évaluation de la vitesse critique dans le cas d'un écoulement longitudinal en utilisant le code FDS5.

Pour valider l'utilisation du code FDS5, la vitesse critique de désenfumage est obtenue par visualisation (première méthode) en fonction de la puissance du feu aux conditions initiales et aux limites utilisées par les différents auteurs (Thomas, Kunch, Oka & Atkinson et Vauquelin). Les résultats sont comparés aux résultats obtenus théoriquement par Thomas [19] et Kunsch [20] ainsi qu'aux données expérimentales de Oka & Atkinson [16] et Vauquelin [4] (obtenues sur une maquette thermique à échelle réduite). Un tunnel routier de géométrie

parallélépipédique de 200 m de long, 10 m de large et 5 m de hauteur est choisi en conformité avec le choix des auteurs cités précédemment. La source de chaleur, située au milieu, est un feu de bac utilisant l’heptane comme combustible.

Sur la figure (5.2), on montre l’accord de nos résultats de simulation avec ceux des autres travaux.

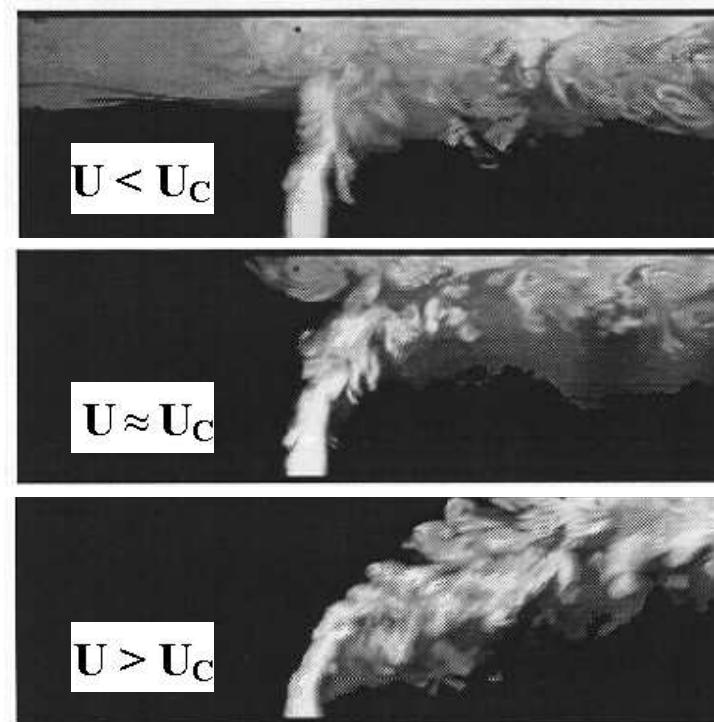


Fig. 5.1 Mise en évidence de la vitesse critique [4].

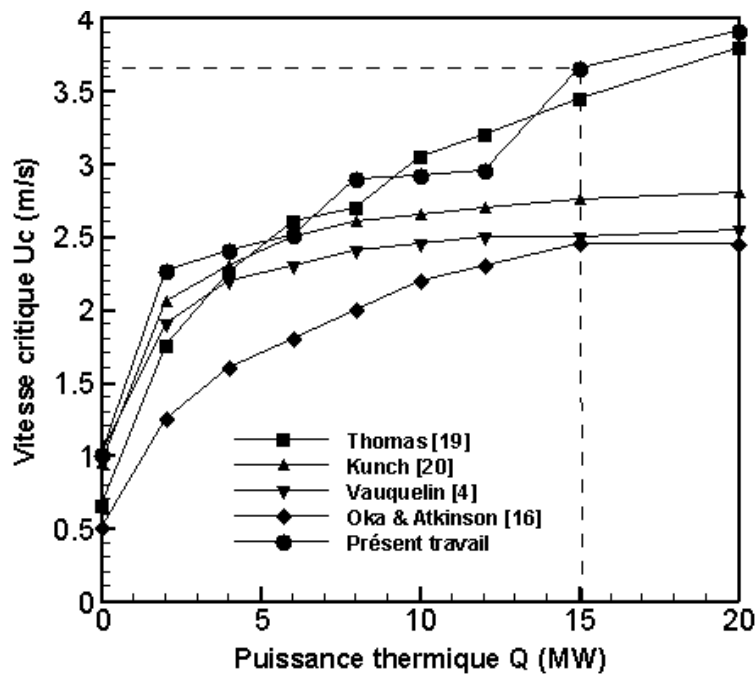


Fig. 5.2 Vitesse critique en fonction de la puissance.

5.2 Modélisation de la stratégie longitudinale

5.2.1 Simulations et résultats

5.2.1.1. Conditions initiales et aux limites

La figure (5.3) présente le schéma d'un tunnel routier unidirectionnel de 200 m de long, 10 m de large et 5 m de haut. Il est équipé, à l'entrée, d'un système de ventilation mécanique. Le feu est simulé par la combustion de l'heptane dans un bac, sa puissance thermique par unité de surface est égale à 3750 kW/m^2 . Cette source de chaleur représente l'incendie d'une camionnette (tableau 2.1). La température de l'atmosphère et des murs latéraux est prise égale à $20 \text{ }^\circ\text{C}$ et la pression dans l'ouvrage est supposée atmosphérique.

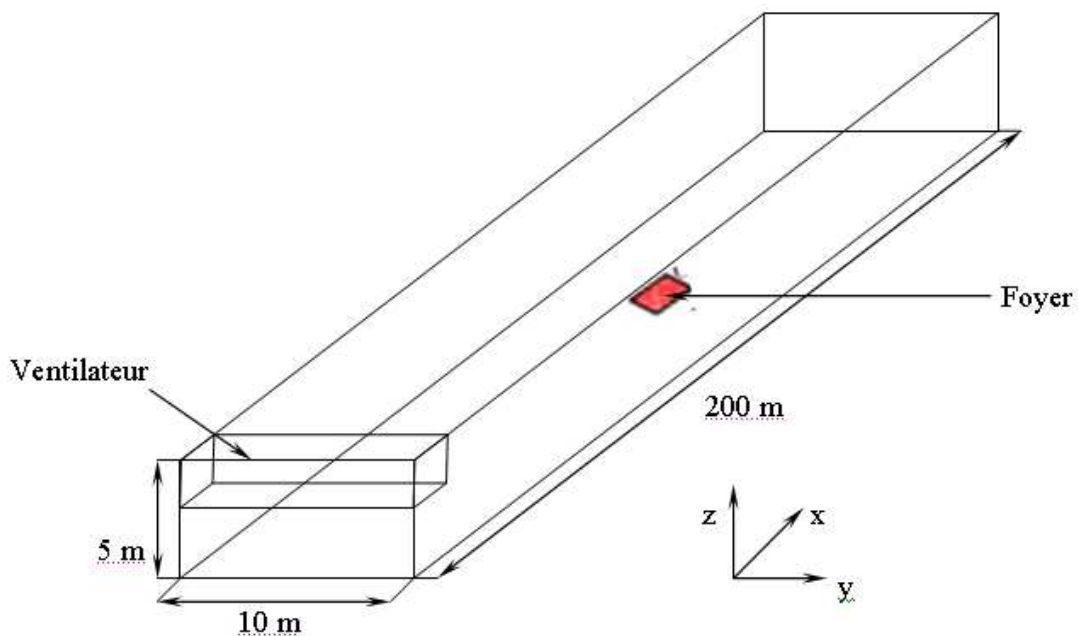


Fig. 5.3 Schéma d'un tunnel routier muni d'une ventilation longitudinale.

5.2.1.2 Evaluation de la vitesse critique (deuxième méthode)

A partir du tracé de l'évolution de la vitesse de l'écoulement en fonction de la hauteur du tunnel, on calcule la vitesse critique.

Pour la puissance du feu de 15 MW (3750 kW/m^2 pour une surface de 4 m^2), une série de tests ont été réalisés à des vitesses d'insufflation variant entre 5 m/s et 15 m/s pour localiser la vitesse d'insufflation qui génère le tourbillon caractérisant l'état critique. Ce dernier est identifié approximativement pour les vitesses d'insufflation entre 8 m/s et 12 m/s . Afin de localiser exactement l'état critique et par conséquent la vitesse critique, les résultats de

simulation aux vitesses d'insufflation de : 8, 10 et 12 m/s sont présentés sur la figure (5.4). Pour évaluer la vitesse longitudinale U , on a pris trois points de mesure : deux en amont du foyer $x = 90$ m, 95 m et le troisième à $x = 100$ m juste au dessus du foyer. Ces points de mesure sont à une hauteur de 4.4 m par rapport au sol. Les résultats des simulations sur la figure (5.4) concernent les 10 premières secondes.

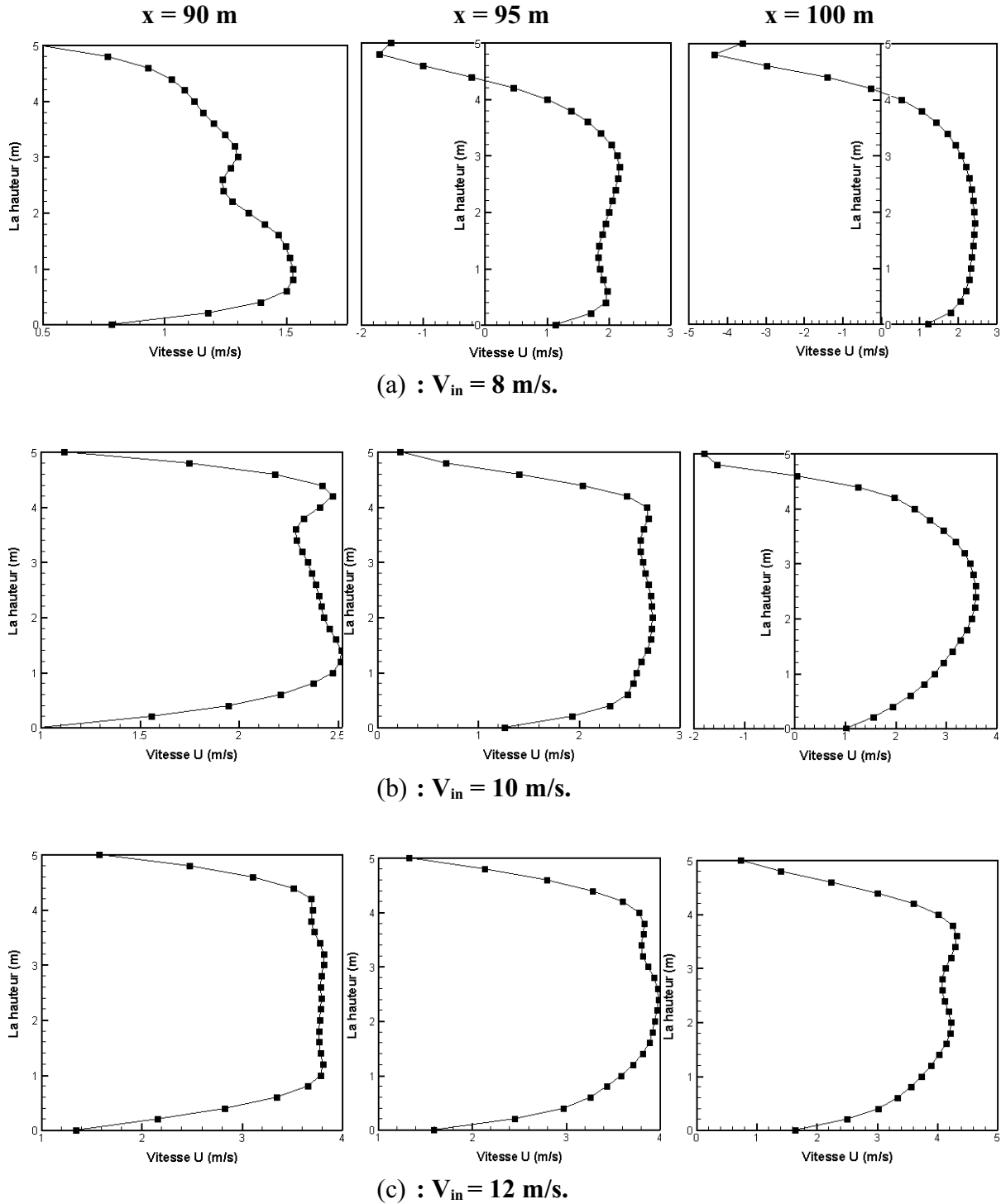


Fig. 5.4 Evolution de la vitesse longitudinale U par rapport à la hauteur du tunnel pour différentes vitesses d'insufflation et à différents points de mesure, après 10 s de simulation.

Dans la figure 5.4 (a), à $x = 95$ m une couche stratifiée de fumées se développe en amont en contre-courant du flux longitudinal. Juste au dessus du foyer à $x = 100$ m, la vitesse de la fumée en contre-courant augmente et elle est supérieure à celle de l'air insufflé. Le phénomène du *backlayering* est nettement présent à cet endroit. On déduit que la vitesse de l'air est inférieure à la vitesse critique ($U < U_C$).

A la vitesse d'insufflation plus grande ($V_{in} = 10$ m/s), la vitesse de l'air empêche la fumée à se propager en amont de la source et cela est montré aux deux points de mesure $x = 90$ m et $x = 95$ m, tandis qu'au dessus du foyer un petit retour de fumée est observé (figure 5.4 (b)). En fait, ce n'est pas un retour de fumée, mais c'est une re-circulation qui caractérise l'état critique de la ventilation. Il ressort donc que la vitesse longitudinale de l'air est voisine de la vitesse critique ($U \approx U_C$).

Dans le troisième cas (figure 5.4 (c)), l'intégralité des fumées est repoussée en aval de la source sans aucun retour de cette dernière. La vitesse de l'air est donc supérieure à la vitesse de retour des fumées et elle est également supérieure à la vitesse critique ($U > U_C$).

Sur le tableau (5.1), on récapitule les observations faites sur les différentes situations.

Vitesse d'insufflation	Observation	Déduction
$V_{in} = 8$ m/s	une nappe stratifiée (appelée <i>backlayering</i>) se développe à contre-courant.	$U < U_C$
$V_{in} = 10$ m/s	Apparition d'une zone de re-circulation en amont de la zone d'impact au plafond (dans les 10 premières secondes de simulation).	$U \approx U_C$
$V_{in} = 12$ m/s	l'intégralité des fumées est repoussée en aval de la source avec une vitesse longitudinale très supérieure.	$U > U_C$

Tab. 5.1 Tableau récapitulatif des différentes situations de migration des fumées.

Après stationnarité de l'écoulement (temps de simulation $\approx 50s$), la vitesse critique est obtenue à l'aide du tracé du graphe représentant le profil de la vitesse de l'air U par rapport à la hauteur du tunnel (figure 5.5).

A la hauteur de 4.4 m, on trouve $U \approx U_C \approx 3.65$ m/s. Elle est exactement la même que celle obtenue par visualisation et proche de celles obtenues par les différents auteurs (figure 5.2).

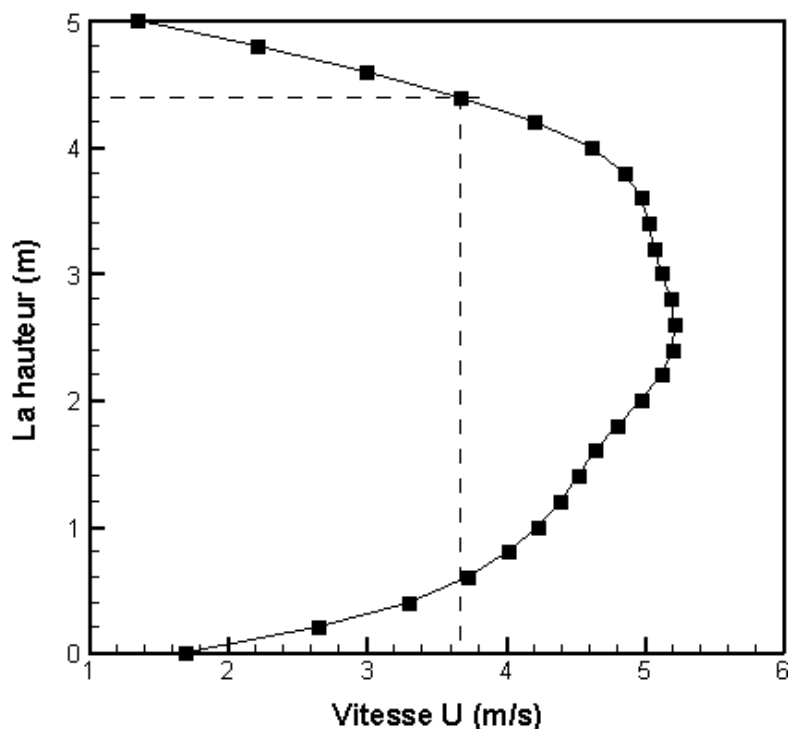


Fig. 5.5 Evolution de la vitesse de l'air U par rapport à la hauteur après 50 s de simulation.

5.3. Validation du code FDS (stratégie transversale)

En ventilation transversale, la stratégie est de maintenir les fumées stratifiées au plafond du tunnel afin de les aspirer par des trappes d'extraction, par conséquent une couche d'air frais au niveau inférieur du tunnel est conservée. La ventilation transversale peut donc être employée dans des cas où la ventilation longitudinale serait dangereuse, en particulier :

- dans les tunnels bidirectionnels, où il y a à priori des véhicules bloqués de chaque côté de l'incendie,
- dans les tunnels unidirectionnels avec une longueur importante, pour lesquels les véhicules situés en aval de l'incendie (dans le sens de la circulation) risquent de ne pas pouvoir s'échapper du fait de cette congestion [17].

En cas de désenfumage, il est commode de régler les vitesses d'extraction à une vitesse dite de confinement. Vauquelin [15] a défini cette vitesse comme étant la vitesse minimale qui maintient la couche de fumées confinée et stratifiée, en plus, elle doit être emprisonnée entre les deux trappes d'extraction.

Dans le but de valider le code FDS5, on simule le désenfumage à des puissances thermiques du feu de : 1, 4, 10 et 20 MW et aux conditions initiales et aux limites utilisées par Vauquelin [15]. La vitesse de confinement est évaluée à l'aide des visualisations de la couche

des fumées (première méthode). Le domaine de calcul est un tunnel routier bidirectionnel de 200 m de long, 10 m de large et 5 m de haut. Les résultats obtenus sont comparés avec celles trouvés expérimentalement (sur une maquette réduite) par Vauquelin [15] (figure 5.6). On montre que nos résultats sont en bon accord avec ceux obtenus expérimentalement.

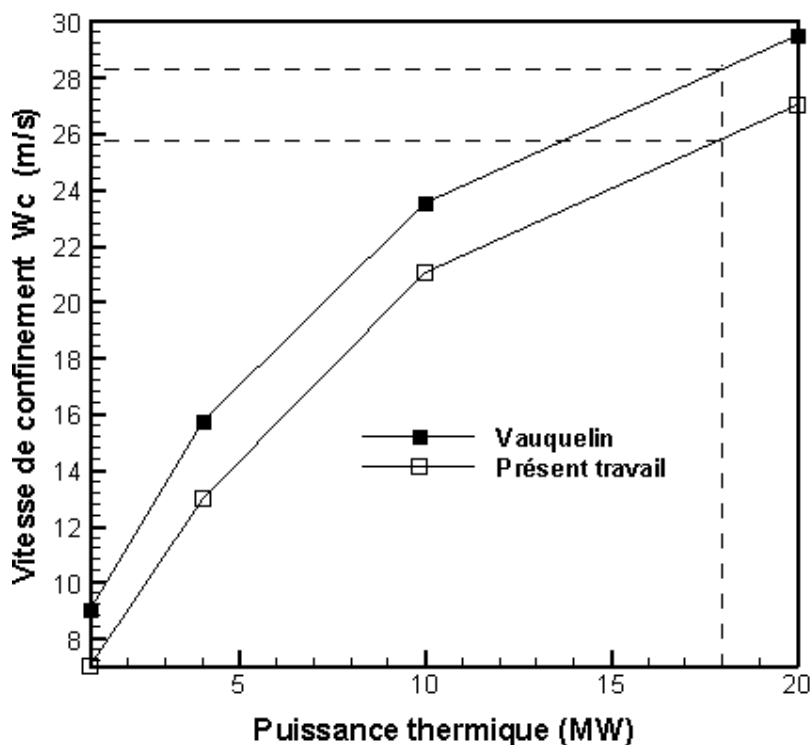


Fig. 5.6 Vitesse de Confinement en fonction de la puissance.

5.4. Modélisation de la stratégie transversale

5.4.1 Simulations et résultats

5.4.1.1. Conditions initiales et aux limites

La figure (5.7) présente le schéma d'un tunnel routier bidirectionnel de 200 m de long, 10 m de large et 5 m de haut. Il est équipé d'un système de ventilation mécanique composé de deux ventilateurs situés au plafond et à une distance de 30 m de part et d'autre du foyer. Les dimensions des trappes sont identiques (2 m×2 m). Le feu est simulé par la combustion de l'heptane dans un bac de surface égale à 4 m². Sa puissance thermique par unité de surface est égale à 4500 kW/m². Cette source de chaleur représente l'incendie d'une camionnette (tableau 2.1). La température de l'atmosphère et des murs latéraux est prise égale à 20 °C et la pression dans l'ouvrage est supposée atmosphérique.

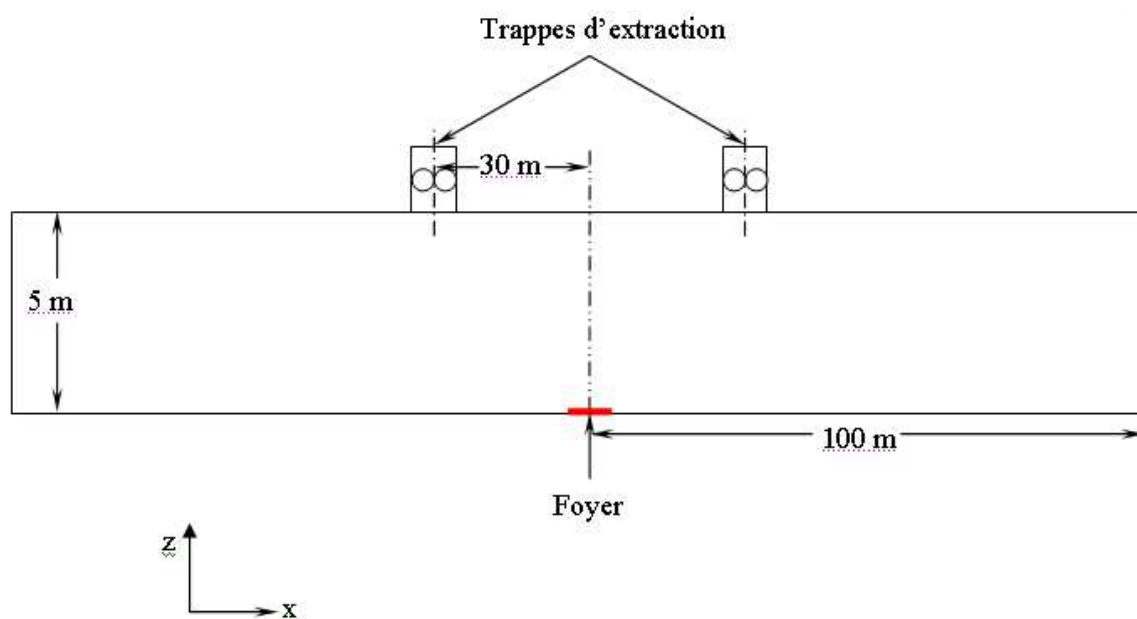


Fig. 5.7 Schéma d'un tunnel routier muni d'une ventilation transversale.

5.4.1.2. Evaluation de la vitesse de confinement (deuxième méthode)

La deuxième méthode de détermination de la vitesse de confinement consiste à mesurer, pour plusieurs vitesses d'extraction et une puissance donnée (on prend $Q=18$ MW), la longueur L de la couche stratifiée de fumée en amont ou en aval de la source de chaleur (puisque la fumée se propage de la même manière dans les deux sens). Cette méthode permet d'évaluer exactement la vitesse de confinement en utilisant la valeur de L .

L'évolution de la couche de fumées stratifiées en fonction de la vitesse d'extraction est représentée dans la figure (5.8). On remarque une forte diminution de la longueur de la couche de fumées stratifiées quand on augmente la vitesse d'extraction et cela est observable jusqu'à la vitesse de 20 m/s. A des vitesses d'extraction supérieures, la longueur L commence à se stabiliser au voisinage de la longueur de 30 m. Cette distance correspond à la distance entre une trappe et le foyer. Il peut être suggéré que le « backlayering » est lié au champ d'extraction créé par les trappes.

Dans le deuxième graphe on représente la distribution de la température au niveau du plafond du tunnel en fonction de la longueur de la couche de fumées pour différentes vitesses d'extraction. Quand on s'éloigne du foyer, une diminution de la température est remarquée pour toutes les vitesses d'extraction. Cette diminution n'est pas la même. Plus on augmente la vitesse d'extraction plus la diminution de la température devient plus importante jusqu'à atteindre la température ambiante pour une valeur de $L \approx 30$ m et cela est observé à partir de 27.5 m/s. Par définition la vitesse d'extraction minimale qui permet un emprisonnement de la

couche de fumée entre les deux trappes est la vitesse de confinement. Il ressort donc que cette dernière est voisine de 27.5 m/s.

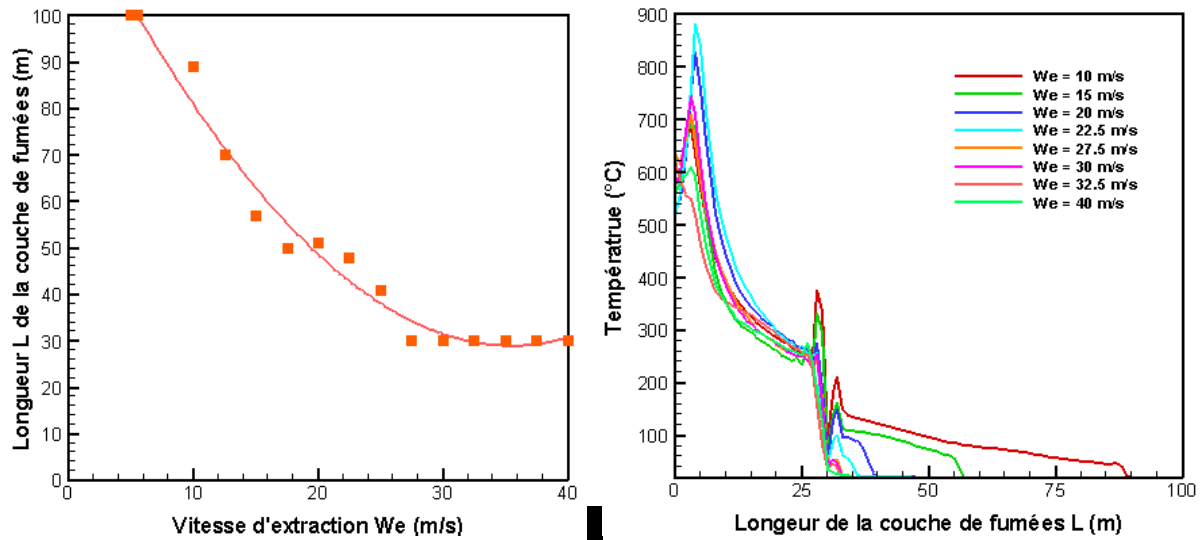


Fig.5.8 Variation de la longueur de la couche de fumée en fonction de la vitesse d'extraction.

La valeur de la vitesse de confinement obtenue est comparée avec celles représentées dans le graphe de la figure (5.6). Cette valeur est proche de celle trouvée expérimentalement par Vauquelin et également par visualisation avec une erreur de 3.5 %. Cette erreur est due aux incertitudes faites dans l'application des règles de similitudes d'une part et aux erreurs liées au model de simulation lui même d'autre part.

Conclusion générale

Dans ce mémoire nous présentons un ensemble d'études relatives à la dynamique des fumées dans des structures type tunnels.

Les travaux présentés visent à caractériser l'écoulement des fumées à travers la simulation du panache air - fumées dans différents scénarios de propagation de fumées en utilisant l'outil numérique commercial FDS « *fire dynamic simulator* ». Outre l'étude des mouvements des fluides issus d'un feu en tunnels, les travaux ont aussi pour objectif d'évaluer les potentialités du code de calcul FDS pour analyser et optimiser un système de ventilation du tunnel.

Il s'agissait tout d'abord de réaliser une analyse de sensibilité à la taille du maillage sur le temps de calcul et la précision des résultats. Cette étude de sensibilité a permis de comprendre et de montrer l'influence du maillage suivant la hauteur du tunnel Δz sur le temps de calcul et surtout sur la précision des résultats. Notre conclusion sur cette analyse concorde avec celle de Kashef [12].

Nous avons ensuite mené des simulations dans le but de caractériser l'écoulement de fumées avec le code FDS sur une configuration type tronçon de tunnel du métro d'Alger où on a montré l'influence de la vitesse d'extraction sur la croissance et le comportement du panache et cela pour deux scénarios de désenfumage. Dans la première configuration (premier scénario), les phénomènes de déstratification des fumées et d'apparition d'une nappe de fumée de retour ont été mis en évidence. Ces derniers ralentissent l'extraction de la fumée, par conséquent, ils rendent les secours et le sauvetage difficile.

Des essais ont été aussi réalisés pour caractériser l'apparition de ces phénomènes et déterminer la vitesse critique d'extraction. Il a été conclu que la gestion du système de ventilation s'oriente vers un réglage du débit d'air absorbé par le ventilateur de telle façon à limiter la vitesse d'extraction à une valeur de 1.5 m/s. Ce résultat concorde avec les recommandations du concepteur du système de désenfumage du Métro d'Alger « *VINCI* ».

Dans la deuxième configuration type salle des billets (deuxième scénario), le désenfumage se fera par une extraction des fumées à l'aide de trois trappes situées au niveau du plafond. Il est apparu que pour les différentes vitesses d'extraction, la vitesse critique est voisine de 2.5 m/s. Cette vitesse implique des conditions compatibles avec l'évacuation des voyageurs dans

la période réglementaire. Les causes qui nous ont poussés à choisir cette vitesse s'articulent autour d'une extraction rapide des fumées et la non-déstratification de ces dernières, ainsi de la réduction de l'air aspiré vers la salle des billets pour éviter le phénomène du Backdraft. Ce résultat est en accord avec les données de la réglementation du constructeur, qui recommande une vitesse critique voisine de 2.6 m/s.

D'autres simulations ont été effectuées pour étudier et comprendre aussi l'effet de la ventilation sur le comportement des fumées dans une configuration type tunnel routier. Deux systèmes de ventilation ont été expérimentés : la ventilation longitudinale et la ventilation transversale.

Pour la stratégie longitudinale, le premier objectif était de valider le code FDS par une comparaison des résultats de simulation avec celles obtenues analytiquement par Thomas et Kunch et expérimentalement par Oka, Atkinson et Vauquelin. Cette comparaison a montré que l'outil de simulation utilisé est valable dans le cas de la propagation des fumées. Le deuxième objectif était d'évaluer la vitesse critique U_c . Deux méthodes ont été utilisées. La première se base sur la visualisation de l'apparition de la zone de re-circulation qui caractérise l'état critique, par conséquent permet l'obtention de la vitesse critique. La seconde consiste à déterminer l'état critique par le tracé des courbes représentant la vitesse de l'écoulement longitudinal U par rapport à la hauteur du tunnel H . Les deux méthodes donnent exactement la même vitesse critique.

Pour la stratégie transversale, l'étude consiste à évaluer la vitesse de confinement lors d'une extraction massive par deux trappes situées au plafond. Une série de tests de simulation a été faite en variant la puissance thermique du foyer. A l'aide de la visualisation du panache la vitesse de confinement est estimée. Le confinement et l'emprisonnement de la fumée entre les deux trappes ont permis le tracé de la courbe représentant la vitesse de confinement en fonction de la puissance thermique. Une comparaison entre nos résultats et ceux obtenues expérimentalement par Vauquelin a été faite. Il ressort que la vitesse de confinement est quantitativement comparable pour les deux méthodes, ce qui montre la validité du code de calcul pour de telles configurations.

La deuxième méthode a permis de calculer la vitesse de confinement à l'aide du tracé du graphe représentant la longueur de la couche de fumées stratifiée « L » en fonction de la vitesse de l'écoulement transversal W_e . On a remarqué qu'au delà de la vitesse de 30 m/s la longueur de la couche stratifiée est stable et constante, elle est égale approximativement à ≈ 30 m, ce qui correspond à la distance entre une trappe et le foyer.

Nous terminons cette conclusion par la suggestion de quelques perspectives relatives à l'axe de recherche abordé dans cette étude :

- Réaliser cette étude expérimentalement sur une maquette à échelle réduite.
- Etudier le comportement des fumées dans un tunnel incliné (en pente).
- Réaliser des simulations numériques à l'aide d'autres codes de calcul tels que : CFAST, CFX, FLUENT...etc., et ensuite comparer les résultats générés par ces codes avec ceux de FDS.
- développer un code de calcul propre, qui permet la manipulation des différents paramètres physiques et chimiques du panache de fumées.
- Décrire la flamme avec plus de détails.
- Etudier l'influence de la position et de la géométrie des trappes, par rapport au foyer, sur le confinement de la couche de fumées lors de l'extraction de celles-ci.

Références bibliographiques

[1] **Michaux G.**, Etude sur la dynamique d'un panache massique en champ libre et en milieu confiné ventilé – Application à la simulation sur maquette des feux en tunnel, thèse de doctorat, Université de la Méditerranée Aix – Marseille II, 2007.

[2] **Carlotti P.**, Mécanique des fluides pour la ventilation des tunnels, cours de master professionnel, centre d'études des tunnels. 2005.

[3] **Mos A.**, Modèles phénoménologiques pour la simulation d'incendies en tunnel routier, thèse de doctorat, Université Claude Bernard – Lyon I, 2005.

[4] **Vauquelin O.**, Mise en place d'une technique expérimentale destinée à simuler les fumées d'incendie par un rejet isotherme de faible densité— application à l'étude des feux en tunnels —, 12èmes Journées Internationales de Thermique, Tanger, Maroc du 15 au 17 Novembre 2005.

[5] Principe de dimensionnement du système de ventilation / Désenfumage, notes techniques, Entreprise de métro d'Alger (EMA), 2007.

[6] Spécification techniques, ventilation / Désenfumage en station, tunnel et inter-station, notes techniques, Entreprise de métro d'Alger (EMA), 2007.

[7] Résumé spécifications fonctionnelles des ventilations, Notes techniques, Entreprise de métro d'Alger (EMA), 2007.

[8] **Ouarem A.**, Etude sur maquette de la propagation des fumées d'incendie d'un local «source » vers un local « cible » ventilé mécaniquement, Projet de fin d'étude, Ecole Nationale Polytechnique, 2005.

[9] Incendie d'une rame à quai, simulation sur la migration des fumées, notes techniques, Entreprise de métro d'Alger (EMA), 2007.

[10] **McGrattan K.**, Fire dynamic simulator (version 5) – technical référence guide, NIST special publication (1018-5), National institute of standards and technology, 2007.

- [11] **McGrattan K.**, User's Guide for Smokeview (version 5) – technical reference guide. NIST special publication (1018-5). National institute of standards and technology, 2007.
- [12] **Bounagui, A., Kashef A. and Bénichou N.**, CFD simulation of the fire Dynamic for a section of a tunnel in the event of fire, CFD 2004, 12th Annual Conference of the Computational Fluid Dynamics Society of Canada, pp 1-8, Ottawa 2004.
- [13] **Lamballais P.L**, Anatomie d'un backdraft, Cours de formation pour les sapeurs pompiers, Flashover.fr, 2005.
- [14] **Lamballais P.L**, Le backdraft « ouvert », Cours de formation pour les sapeurs pompiers. Flashover.fr, 2005.
- [15] **Vauquelin O.**, Experimental simulations of fire-induced smoke control in tunnels using an "air-helium reduced scale model": Principle, limitations, results and future, publication, IM2/UNIMECA, Université de la Méditerranée, Technopôle de Chateau-Gombert, December 2006.
- [16] **Oka Y. & Atkinson G. T**, Control of Smoke Flow in Tunnel Fires, Department of Safety Engineering, October 1995.
- [17] Dossier pilote des tunnels – Equipement – Section 4.1 – Ventilation, document, Centre d'étude des tunnels (CETU), Novembre 2003.
- [18] **Vauquelin O. et Mégret O.**, Smoke extraction experiments in case of fire in a tunnel, Laboratory of Mechanics and Energetic, University of Valenciennes, January 2002.
- [19] **Thomas, P.H. 1968**, The movement of smoke in horizontal passages against an air flow. Fire Research Note 723/1968, Fire Research Station.
- [20] **Kunsch J.P.**, Simple model for control of fire gases in a ventilated tunnel, *Fire Safety Journal* **37** (2002), pp. 67–81.

Annexes

Annexe A : Hypothèse de faible nombre de Mach :

Dans un gaz, le carrée de la vitesse du son est donné par la dérivée de la pression par la masse volumique, à entropie constante :

$$C^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_s$$

Pour le cas d'un gaz parfait, cela donne: $C = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}$ avec : $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$

En suivant un tube de courant infiniment mince, on a $dP \approx -\rho d\left(\frac{u^2}{2}\right) \approx \rho \left(\frac{u^2}{2}\right)$ et donc, pour un gaz parfait :

$$\frac{dP}{P} \approx \frac{\gamma}{2} d\left(\frac{u^2}{C^2}\right) \approx \frac{\gamma}{2} M^2$$

Où M est le nombre de Mach et \approx signifie «du même ordre de grandeur». Dès que $M^2 \ll 1$,

on a donc $\frac{dP}{P} \ll 1$. La différentielle logarithmique de l'équation d'état est donc :

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dT}{T} \approx 0, \text{ et donc } \rho T = \rho_0 T_0$$

Où :

ρ_0 : La masse volumique de l'écoulement à l'ambiance.

T_0 : La température ambiante.

Annexe B : Exemples d'un fichier input FDS5

1- Désenfumage dans un tunnel de métro (1^{er} scénario)

```

&HEAD CHID='PFE_1',TITLE='vent. metro. 1er scenario' /
&MESH IJK=234,10,27 , XB=0.,234.25,-4.,4.,0.,5.35 /
&MESH IJK=64,30,20 , XB=234.25,297.52,-12.35,12.35,0.,9.13 /
&MESH IJK=50,18,16 , XB=297.52,347.35,-7.25,7.25,0.,6.56 /
&MESH IJK=265,10,18 , XB=347.35,612.55,-4.,4.,0.,5.35 /

&TIME TWFIN=360.0 /
&MISC SURF_DEFAULT='CONCRETE SURFACE' /

&MATL ID          = 'CONCRETE'
  FYI              = 'Quintiere, Fire Behavior'
  SPECIFIC_HEAT    = 0.88
  DENSITY          = 2100.
  CONDUCTIVITY     = 1.0 /

&MATL ID          = 'PLASTIC'
  CONDUCTIVITY     = 0.2
  SPECIFIC_HEAT    = 1.5
  DENSITY          = 1500.
  N_REACTIONS      = 1
  HEAT_OF_REACTION = 3000.
  HEAT_OF_COMBUSTION = 25000.
  REFERENCE_TEMPERATURE = 400.
  NU_FUEL          = 1.0 /

&MATL ID          = 'FABRIC'
  FYI              = 'Properties completely fabricated'
  SPECIFIC_HEAT    = 1.0
  CONDUCTIVITY     = 0.1
  DENSITY          = 100.0
  N_REACTIONS      = 1
  NU_FUEL          = 1.
  REFERENCE_TEMPERATURE = 350.
  HEAT_OF_REACTION = 3000.
  HEAT_OF_COMBUSTION = 15000. /

&SURF ID          = 'CONCRETE SURFACE'
  COLOR            = 'GOLDENROD'
  MATL_ID          = 'CONCRETE'
  THICKNESS        = 0.4 /

&SURF ID          = 'UPHOLSTERY'
  FYI              = 'Properties completely fabricated'
  COLOR            = 'PURPLE'
  BURN_AWAY        = .TRUE.
  MATL_ID(1:2,1)   = 'FABRIC','PLASTIC'
  THICKNESS(1:2)   = 0.002,0.1
  PART_ID          = 'smoke' /

/Obstruction, vents et holes

&VENT XB=0.,0.,-4.,4.,0.,5.35,COLOR='PINK',SURF_ID='OPEN'/1er ouverture
&VENT XB=612.55,612.55,-4.,4.,0.,5.35,COLOR='PINK',SURF_ID='OPEN'/2e ouv

&SURF ID='SUCK',VEL=1.5,TMP_FRONT=25.,COLOR='BLUE' /

```

```

&VENT XB=3.,7.,4.,4.,2.1,5.35,COLOR='GREEN',SURF_ID='SUCK'/v1
&VENT XB=229.13,233.25,4.,4.,1.15,4.95,SURF_ID='OPEN'/aa
&OBST XB=0.,234.25,-4.,-3.37,0.,1.15,COLOR='GRAY 60'/trott 1d
&OBST XB=0.,234.25,3.37,4.,0.,1.15,COLOR='GRAY 60'/trott 1g
&OBST XB=347.35,612.55,-4.,-3.37,0.,1.15,COLOR='GRAY 60'/trott 2d
&OBST XB=347.35,612.55,3.37,4.,0.,1.15,COLOR='GRAY 60'/trott 2g
&OBST XB=234.25,297.52,-12.35,-3.29,0.,1.53,COLOR='GRAY 60'/quai dalle d
&OBST XB=234.25,297.52,3.29,12.35,0.,1.53,COLOR='GRAY 60'/quai dalle g
&OBST XB=297.52,347.35,-7.25,-3.4,0.,1.36,COLOR='GRAY 60'/quai 3e d
&OBST XB=297.52,347.35,3.4,7.25,0.,1.36,COLOR='GRAY 60'/quai 3e d
&OBST XB=234.25,297.52,-7.25,7.25,4.63,4.83,COLOR='STEEL BLUE'/1er mur
&OBST XB=234.25,297.52,-7.45,-7.25,1.53,4.83,COLOR='STEEL BLUE'/2e mur
&OBST XB=234.25,297.52,-7.45,-7.25,4.73,9.13,COLOR='STEEL BLUE'/3e mur
&OBST XB=234.25,297.52,7.25,7.45,1.53,4.63,COLOR='STEEL BLUE'/4e mur
&OBST XB=234.25,297.52,7.25,7.45,4.73,9.13,COLOR='STEEL BLUE'/5e mur
&OBST XB=234.25,234.45,-7.25,7.25,4.73,5.35,COLOR='STEEL BLUE'/6e mur
&OBST XB=297.32,297.52,-7.25,7.25,4.73,9.13,COLOR='STEEL BLUE'/7e mur
&HOLE XB=278.61,282.71,-7.45,-7.25,1.53,4.14/p dalle d
&HOLE XB=278.61,282.71,7.25,7.45,1.53,4.14/p dalle g
&HOLE XB=268.85,272.95,-7.45,-7.25,4.73,7.26 /p salle des billets 1d
&HOLE XB=268.85,272.95,7.25,7.45,4.73,7.26 /p salle des billets 1g
&HOLE XB=291.32,295.42,-7.45,-7.25,4.73,7.26 /p salle des billets 2d
&HOLE XB=291.32,295.42,7.25,7.45,4.73,7.26 /p salle des billets 2g
&VENT XB=308.55,312.63,-7.25,-7.25,1.36,3.89,SURF_ID='OPEN'/p 3 d
&VENT XB=308.55,312.63,7.25,7.25,1.36,3.89,SURF_ID='OPEN'/p 3 g
&SURF ID='BLOW',VEL=-3.3,TMP_FRONT=25.,COLOR='BLUE'/
&VENT XB=244.05,245.55,-0.35,0.35,9.13,9.13,COLOR='GREEN',SURF_ID='BLOW'/
&VENT XB=265.15,266.65,-0.35,0.35,9.13,9.13,COLOR='GREEN',SURF_ID='BLOW'/
&VENT XB=286.25,287.75,-0.35,0.35,9.13,9.13,COLOR='GREEN',SURF_ID='BLOW'/
&VENT XB=348.35,352.47,4.,4.,1.15,4.95,SURF_ID='OPEN'/aa
&OBST XB=0.,612.55,-2.87,-2.77,0.,0.1,COLOR='BLACK'/1d
&OBST XB=0.,612.55,-1.32,-1.22,0.,0.1,COLOR='BLACK'/2d
&OBST XB=0.,612.55,2.77,2.87,0.,0.1,COLOR='BLACK'/1g
&OBST XB=0.,612.55,1.22,1.32,0.,0.1,COLOR='BLACK'/2g
&OBST XB= 50.,152.,1.32,2.77,0.1,2.1,COLOR='GREEN',SURF_ID='UPHOLSTERY'/mét
&SURF ID='BLOWER',VEL=-1.05,TMP_FRONT=25.,COLOR='BLUE'/
&VENT XB=603.4,609.1,4.,4.,1.25,3.25,COLOR='KELLY GREEN',SURF_ID='BLOWER'/
&PART ID='smoke',MASSLESS=.TRUE. /
&SURF ID='FIRE',PART_ID='smoke',HRRPUA=3250.,color='RASPBERRY'/ Ignition
&VENT XB= 51.,53.,1.3,2.7,2.1,2.1, SURF_ID='FIRE' /
&SLCF PBX=25., QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=50., QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=80., QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=200., QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=290., QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=340., QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /

```



```
&SLCF PBX=500., QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=0.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
```

```
&SLCF PBX=25., QUANTITY='HRRPUV' /
&SLCF PBX=50., QUANTITY='HRRPUV' /
&SLCF PBX=80., QUANTITY='HRRPUV' /
&SLCF PBX=200., QUANTITY='HRRPUV' /
&SLCF PBX=290., QUANTITY='HRRPUV' /
&SLCF PBX=340., QUANTITY='HRRPUV' /
&SLCF PBX=500., QUANTITY='HRRPUV' /
&SLCF PBZ=3.0, QUANTITY='HRRPUV' /
&SLCF PBY=0.0, QUANTITY='HRRPUV' /
```

```
&SLCF PBX=25.0, QUANTITY='carbon dioxide' /
&SLCF PBX=50.0, QUANTITY='carbon dioxide' /
&SLCF PBX=80.0, QUANTITY='carbon dioxide' /
&SLCF PBX=200., QUANTITY='carbon dioxide' /
&SLCF PBX=290., QUANTITY='carbon dioxide' /
&SLCF PBX=340., QUANTITY='carbon dioxide' /
&SLCF PBX=500., QUANTITY='carbon dioxide' /
&SLCF PBY=0., QUANTITY='carbon dioxide' /
&SLCF PBZ=4., QUANTITY='carbon dioxide' /
```

```
&DEVC XYZ=25.,0.,3.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='25' /
&DEVC XYZ=50.,0.,3.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='50' /
&DEVC XYZ=80.,0.,3.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='80' /
&DEVC XYZ=130.,0.,3.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='130' /
&DEVC XYZ=140.,0.,3.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='140' /
&DEVC XYZ=150.,0.,3.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='150' /
&DEVC XYZ=160.,0.,3.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='160' /
&DEVC XYZ=170.,0.,3.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='170' /
&DEVC XYZ=200.,0.,3.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='200' /
&DEVC XYZ=250.,0.,3.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='250' /
&DEVC XYZ=300.,0.,3.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='300' /
&DEVC XYZ=400.,0.,3.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='400' /
&DEVC XYZ=500.,0.,3.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='500' /
&DEVC XYZ=600.,0.,3.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='600' /
```

```
&DEVC XYZ=25.,0.,3.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO1' /
&DEVC XYZ=50.,0.,3.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO2' /
&DEVC XYZ=80.,0.,3.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO3' /
&DEVC XYZ=130.,0.,3.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO4' /
&DEVC XYZ=140.,0.,3.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO5' /
&DEVC XYZ=150.,0.,3.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO6' /
&DEVC XYZ=160.,0.,3.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO7' /
&DEVC XYZ=170.,0.,3.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO8' /
&DEVC XYZ=200.,0.,3.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO9' /
&DEVC XYZ=250.,0.,3.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO10' /
&DEVC XYZ=300.,0.,3.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO11' /
&DEVC XYZ=400.,0.,3.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO12' /
&DEVC XYZ=500.,0.,3.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO13' /
&DEVC XYZ=600.,0.,3.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO14' /
```

```
&DEVC XYZ=25.,0.,3.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U1' /
&DEVC XYZ=50.,0.,3.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U2' /
&DEVC XYZ=80.,0.,3.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U3' /
&DEVC XYZ=130.,0.,3.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U4' /
&DEVC XYZ=140.,0.,3.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U5' /
&DEVC XYZ=150.,0.,3.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U6' /
&DEVC XYZ=160.,0.,3.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U7' /
```

```

&DEVC XYZ=170.,0.,3.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U8' /
&DEVC XYZ=200.,0.,3.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U9' /
&DEVC XYZ=250.,0.,3.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U10' /
&DEVC XYZ=300.,0.,3.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U11' /
&DEVC XYZ=400.,0.,3.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U12' /
&DEVC XYZ=500.,0.,3.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U13' /
&DEVC XYZ=600.,0.,3.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U14' /

&DEVC XYZ=25.,0.,3.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H1' /
&DEVC XYZ=50.,0.,3.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H2' /
&DEVC XYZ=80.,0.,3.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H3' /
&DEVC XYZ=130.,0.,3.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H4' /
&DEVC XYZ=140.,0.,3.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H5' /
&DEVC XYZ=150.,0.,3.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H6' /
&DEVC XYZ=160.,0.,3.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H7' /
&DEVC XYZ=170.,0.,3.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H8' /
&DEVC XYZ=200.,0.,3.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H9' /
&DEVC XYZ=250.,0.,3.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H10' /
&DEVC XYZ=300.,0.,3.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H11' /
&DEVC XYZ=400.,0.,3.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H12' /
&DEVC XYZ=500.,0.,3.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H13' /
&DEVC XYZ=600.,0.,3.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H14' /
&BNDF QUANTITY='GAUGE_HEAT_FLUX' / Flux de chaleur
&BNDF QUANTITY='WALL_TEMPERATURE' / Température des murs (surfaces)
&BNDF QUANTITY='BURNING_RATE' / Perte de masse par unité

&TAIL /Fin

```

2- Désenfumage dans un tunnel de métro (2^e scénario)

```

&HEAD CHID='PFE_2',TITLE=' Vent. metro. 2e scénario' /

&MESH IJK=234,10,18 , XB=0.,234.25,-4.,4.,0.,5.35 /
&MESH IJK=64,30,45 , XB=234.25,297.52,-12.35,12.35,0.,9.13 /
&MESH IJK=50,18,16 , XB=297.52,347.35,-7.25,7.25,0.,6.56 /
&MESH IJK=265,10,18 , XB=347.35,612.55,-4.,4.,0.,5.35 /

&TIME TWFIN=360.0 /
&MISC SURF_DEFAULT='CONCRETE SURFACE' /

&MATL ID          = 'CONCRETE'
  FYI              = 'Quintiere, Fire Behavior'
  SPECIFIC_HEAT    = 0.88
  DENSITY          = 2100.
  CONDUCTIVITY     = 1.0 /

&MATL ID          = 'PLASTIC'
  CONDUCTIVITY     = 0.2
  SPECIFIC_HEAT    = 1.5
  DENSITY          = 1500.
  N_REACTIONS      = 1
  HEAT_OF_REACTION = 3000.
  HEAT_OF_COMBUSTION = 25000.
  REFERENCE_TEMPERATURE = 400.
  NU_FUEL          = 1.0 /

&MATL ID          = 'FABRIC'
  FYI              = 'Properties completely fabricated'
  SPECIFIC_HEAT    = 1.0
  CONDUCTIVITY     = 0.1

```

```

DENSITY                = 100.0
N_REACTIONS            = 1
NU_FUEL                = 1.
REFERENCE_TEMPERATURE  = 350.
HEAT_OF_REACTION       = 3000.
HEAT_OF_COMBUSTION     = 15000. /

&MATL ID                = 'STEEL'
FYI                    = 'Quintiere, Fire Behavior'
EMISSIVITY             = 0.8
DENSITY                = 7850.
CONDUCTIVITY           = 45.8
SPECIFIC_HEAT          = 0.46 /

&SURF ID                = 'SHEET METAL'
MATL_ID                = 'STEEL'
COLOR                  = 'SILVER'
BACKING                = 'EXPOSED'
THICKNESS              = 0.0013 /

&SURF ID                = 'CONCRETE SURFACE'
COLOR                  = 'GOLDENROD'
MATL_ID                = 'CONCRETE'
THICKNESS              = 0.4 /

&SURF ID                = 'UPHOLSTERY'
FYI                    = 'Properties completely fabricated'
COLOR                  = 'PURPLE'
BURN_AWAY              = .TRUE.
MATL_ID(1:2,1)         = 'FABRIC', 'PLASTIC'
THICKNESS(1:2)         = 0.002,0.1
PART_ID                = 'smoke' /

/Obstruction, vents et holes

&VENT XB=0.,0.,-4.,4.,0.,5.35,COLOR='PINK',SURF_ID='OPEN'/1er ouverture
&VENT XB=612.55,612.55,-4.,4.,0.,5.35,COLOR='PINK',SURF_ID='OPEN'/2e ouvert

&SURF ID='BLOW',VEL=-1.5,TMP_FRONT=25.,COLOR='BLUE' /
&VENT XB=3.,7.,4.,4.,2.1,5.35,COLOR='GREEN',SURF_ID='BLOW'/v1

&VENT XB=229.13,233.25,4.,4.,1.15,4.95,SURF_ID='OPEN'/aa

&OBST XB=0.,234.25,-4.,-3.37,0.,1.15,COLOR='GRAY 60'/trott 1d
&OBST XB=0.,234.25,3.37,4.,0.,1.15,COLOR='GRAY 60'/trott 1g
&OBST XB=347.35,612.55,-4.,-3.37,0.,1.15,COLOR='GRAY 60'/trott 2d
&OBST XB=347.35,612.55,3.37,4.,0.,1.15,COLOR='GRAY 60'/trott 2g

&OBST XB=234.25,297.52,-12.35,-3.29,0.,1.53,COLOR='GRAY 60'/quai dalle d
&OBST XB=234.25,297.52,3.29,12.35,0.,1.53,COLOR='GRAY 60'/quai dalle g

&OBST XB=297.52,347.35,-7.25,-3.4,0.,1.36,COLOR='GRAY 60'/quai 3e d
&OBST XB=297.52,347.35,3.4,7.25,0.,1.36,COLOR='GRAY 60'/quai 3e d
&OBST XB=234.25,297.52,-7.25,7.25,4.63,4.83,COLOR='STEEL BLUE'/1er mur
&OBST XB=234.25,297.52,-7.45,-7.25,1.53,4.83,COLOR='STEEL BLUE'/2e mur
&OBST XB=234.25,297.52,-7.45,-7.25,4.73,9.13,COLOR='STEEL BLUE'/3e mur
&OBST XB=234.25,297.52,7.25,7.45,1.53,4.63,COLOR='STEEL BLUE'/4e mur
&OBST XB=234.25,297.52,7.25,7.45,4.73,9.13,COLOR='STEEL BLUE'/5e mur
&OBST XB=234.25,234.45,-7.25,7.25,4.73,5.35,COLOR='STEEL BLUE'/6e mur
&OBST XB=297.32,297.52,-7.25,7.25,4.73,9.13,COLOR='STEEL BLUE'/7e mur

```

```

&HOLE XB=278.61,282.71,-7.45,-7.25,1.53,4.14/p dalle d
&HOLE XB=278.61,282.71,7.25,7.45,1.53,4.14/p dalle g

&HOLE XB=268.85,272.95,-7.45,-7.25,4.73,7.26 /p salle des billets 1d
&HOLE XB=268.85,272.95,7.25,7.45,4.73,7.26 /p salle des billets 1g
&HOLE XB=291.32,295.42,-7.45,-7.25,4.73,7.26 /p salle des billets 2d
&HOLE XB=291.32,295.42,7.25,7.45,4.73,7.26 /p salle des billets 2g

&VENT XB=308.55,312.63,-7.25,-7.25,1.36,3.89,SURF_ID='OPEN'/p 3 d
&VENT XB=308.55,312.63,7.25,7.25,1.36,3.89,SURF_ID='OPEN'/p 3 g

&SURF ID='SUCK',VEL=2.5,TMP_FRONT=25.,COLOR='BLUE'/
&VENT XB=244.05,245.55,-0.45,0.45,9.13,9.13,COLOR='GREEN',SURF_ID='SUCK'/v
&VENT XB=265.15,266.65,-0.45,0.45,9.13,9.13,COLOR='GREEN',SURF_ID='SUCK'/v
&VENT XB=286.25,287.75,-0.45,0.45,9.13,9.13,COLOR='GREEN',SURF_ID='SUCK'/v

&VENT XB=348.35,352.47,4.,4.,1.15,4.95,SURF_ID='OPEN'/aa

&OBST XB=0.,612.55,-2.87,-2.77,0.,0.1,COLOR='BLACK',SURF_ID='SHEET METAL'/1
&OBST XB=0.,612.55,-1.32,-1.22,0.,0.1,COLOR='BLACK',SURF_ID='SHEET METAL'/2
&OBST XB=0.,612.55,2.77,2.87,0.,0.1,COLOR='BLACK',SURF_ID='SHEET METAL'/1g
&OBST XB=0.,612.55,1.22,1.32,0.,0.1,COLOR='BLACK',SURF_ID='SHEET METAL'/2g

&OBST XB= 200.,302.,-2.87,-1.22,0.1,2.1,COLOR='KELLY
GREEN',SURF_ID='UPHOLSTERY'/
&OBST XB=250.,252.,-1.,1.,4.83,5.,COLOR='SANDY BROWN',SURF_ID='UPHOLSTERY'/

&SURF ID='BLOWER',VEL=-1.5,TMP_FRONT=25.,COLOR='BLUE'/
&VENT XB=603.4,609.1,4.,4.,1.25,3.25,COLOR='GREEN',SURF_ID='BLOWER'/v2

&PART ID='smoke',MASSLESS=.TRUE. /
&SURF ID='FIRE',PART_ID='smoke',HRRPUA=500.,COLOR='RASPBERRY'/ Ignition
&VENT XB=250.,252.,-1.,1.,5.,5., SURF_ID='FIRE' /

&SLCF PBX=270.9, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=269.9, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=271.9, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=293.73, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=292.73, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=291.73, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=9.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=0.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBX=-7.35, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./

&SLCF PBX=270.9, QUANTITY='carbon dioxide' /
&SLCF PBX=269.9, QUANTITY='carbon dioxide' /
&SLCF PBX=271.9, QUANTITY='carbon dioxide' /
&SLCF PBX=293.73, QUANTITY='carbon dioxide' /
&SLCF PBX=292.73, QUANTITY='carbon dioxide' /
&SLCF PBZ=9.0, QUANTITY='carbon dioxide' /
&SLCF PBX=0.0, QUANTITY='carbon dioxide' /
&SLCF PBX=-7.35, QUANTITY='carbon dioxide' /
&DEVC XYZ=50.,0.,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T50' /
&DEVC XYZ=100.,0.,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T100' /
&DEVC XYZ=150.,0.,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T150' /
&DEVC XYZ=200.,0.,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T200' /
&DEVC XYZ=220.,0.,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T220' /
&DEVC XYZ=230.,0.,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T230' /
&DEVC XYZ=240.,0.,7.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T240' /
&DEVC XYZ=250.,0.,7.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T250' /
&DEVC XYZ=260.,0.,7.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T260' /

```

```

&DEVC XYZ=280.,0.,7.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T280' /
&DEVC XYZ=300.,0.,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T300' /
&DEVC XYZ=350.,0.,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T350' /
&DEVC XYZ=500.,0.,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T500' /
&DEVC XYZ=600.,0.,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T600' /

&DEVC XYZ=50.,0.,2.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO50' /
&DEVC XYZ=100.,0.,2.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO100' /
&DEVC XYZ=150.,0.,2.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO150' /
&DEVC XYZ=200.,0.,2.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO200' /
&DEVC XYZ=220.,0.,2.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO220' /
&DEVC XYZ=230.,0.,2.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO230' /
&DEVC XYZ=240.,0.,7.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO240' /
&DEVC XYZ=250.,0.,7.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO250' /
&DEVC XYZ=260.,0.,7.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO260' /
&DEVC XYZ=280.,0.,7.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO280' /
&DEVC XYZ=300.,0.,2.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO300' /
&DEVC XYZ=350.,0.,2.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO350' /
&DEVC XYZ=500.,0.,2.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO500' /
&DEVC XYZ=600.,0.,2.,QUANTITY='carbon dioxide',ID='CO600' /

&DEVC XYZ=50.,0.,3.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U50' /
&DEVC XYZ=100.,0.,3.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U100' /
&DEVC XYZ=150.,0.,3.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U150' /
&DEVC XYZ=200.,0.,3.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U200' /
&DEVC XYZ=220.,0.,3.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U220' /
&DEVC XYZ=230.,0.,3.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U230' /
&DEVC XYZ=240.,0.,7.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U240' /
&DEVC XYZ=250.,0.,7.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U250' /
&DEVC XYZ=260.,0.,7.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U260' /
&DEVC XYZ=280.,0.,7.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U280' /
&DEVC XYZ=300.,0.,3.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U300' /
&DEVC XYZ=350.,0.,3.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U350' /
&DEVC XYZ=500.,0.,3.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U500' /
&DEVC XYZ=600.,0.,3.,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U600' /

&DEVC XYZ=50.,0.,3.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H50' /
&DEVC XYZ=100.,0.,3.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H100' /
&DEVC XYZ=150.,0.,3.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H150' /
&DEVC XYZ=200.,0.,3.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H200' /
&DEVC XYZ=220.,0.,3.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H220' /
&DEVC XYZ=230.,0.,3.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H230' /
&DEVC XYZ=240.,0.,7.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H240' /
&DEVC XYZ=250.,0.,7.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H250' /
&DEVC XYZ=260.,0.,7.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H260' /
&DEVC XYZ=280.,0.,7.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H280' /
&DEVC XYZ=300.,0.,3.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H300' /
&DEVC XYZ=350.,0.,3.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H350' /
&DEVC XYZ=500.,0.,3.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H500' /
&DEVC XYZ=600.,0.,3.,QUANTITY='HRRPUV',ID='H600' /

&BNDF QUANTITY='GAUGE_HEAT_FLUX' / Flux de chaleur
&BNDF QUANTITY='WALL_TEMPERATURE' / Température des murs (surfaces)
&BNDF QUANTITY='BURNING_RATE' / Perte de masse par unité

&TAIL /Fin

```

3- Désenfumage dans un tunnel routier (longitudinal)

```

&HEAD CHID='PFE_3',TITLE='vent. long.' /
&MESH IJK=200,16,25 , XB=0.0,200.0,-5.0,5.0,0.0,5.0 /
&TIME TWFIN=50.0 /
&MISC SURF_DEFAULT='CONCRETE SURFACE'/

&REAC ID='HEPTANE'
      FYI='Heptane, C_7 H_16'
      C=7.
      H=16.
      CO_YIELD=0.006
      SOOT_YIELD=0.015 /

&MATL ID          = 'CONCRETE'
      FYI          = 'Quintiere, Fire Behavior'
      SPECIFIC_HEAT = 0.88
      DENSITY      = 2100.
      CONDUCTIVITY = 1.0 /

&SURF ID          = 'CONCRETE SURFACE'
      COLOR        = 'GRAY 60'
      MATL_ID      = 'CONCRETE'
      THICKNESS   = 0.1 /

&SURF ID='FIRE',HRRPUA=3750.,COLOR='RED' /
&VENT XB= 99.,101.,-1.,1.,0.,0. , SURF_ID='FIRE' / source de chaleur

&VENT XB= 0., 0., -5., 5.0, 0.0, 5.0,color='PINK',SURF_ID='OPEN' / 1er ouver
&VENT XB= 200.0, 200.0, -5.0, 5.0, 0.0, 5.0,color='PINK',SURF_ID='OPEN' /2e

&SURF ID='BLOWER' ,VEL=-10., TMP_Front=20., COLOR='BLUE' / vent.long

&OBST XB=0.0,2.0,-5.0,5.0,3.0,5.0,COLOR='MELON' /1er ventilateur
&VENT XB=2.0,2.0,-5.,5.0,3.0,5.0,color='AQUAMARINE',SURF_ID='BLOWER' /ouver

&SLCF PBX=80., QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=90., QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=95., QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=98., QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=99., QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=100., QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=4.4, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=0., QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./

/ Les thermocouples

&DEVC XYZ=80.,0.,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U98' /
&DEVC XYZ=90.,0.,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U98' /
&DEVC XYZ=95.,0.,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U98' /
&DEVC XYZ=98.,0.,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U98' /
&DEVC XYZ=99.,0.,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U99' /
&DEVC XYZ=100.,0.,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U100' /

&BNDF QUANTITY='GAUGE_HEAT_FLUX' / Flux de chaleur
&BNDF QUANTITY='WALL_TEMPERATURE' / Température des murs (surfaces)
&BNDF QUANTITY='BURNING_RATE' / Perte de masse par unité

&TAIL /Fin

```

4- Désenfumage dans un tunnel routier (transversal)

```

&HEAD CHID='PFE_4',TITLE='vent. trans.' /
&MESH IJK=200,16,25 , XB=-100.,100.0,-5.0,5.0,0.0,5.0 /
&TIME TWFIN=150.0 /
&MISC SURF_DEFAULT='CONCRETE SURFACE'/

&REAC ID='HEPTANE'
      FYI='Heptane, C_7 H_16'
      C=7.
      H=16.
      CO_YIELD=0.006
      SOOT_YIELD=0.015 /

&MATL ID          = 'CONCRETE'
      FYI          = 'Quintiere, Fire Behavior'
      SPECIFIC_HEAT = 0.88
      DENSITY      = 2100.
      CONDUCTIVITY = 1.0 /

&SURF ID          = 'CONCRETE SURFACE'
      COLOR        = 'GRAY 60'
      MATL_ID      = 'CONCRETE'
      THICKNESS   = 0.1 /

&SURF ID='FIRE',HRRPUA=4500.,COLOR='RED'/
&VENT XB= -1.,1.,-1.,1.,0.,0. , SURF_ID='FIRE' / source de chaleur

&VENT XB= -100., -100., -5., 5.0, 0.0, 5.0,color='PINK',SURF_ID='OPEN'/ 1er
&VENT XB= 100.0, 100.0, -5.0, 5.0, 0.0, 5.0,color='PINK',SURF_ID='OPEN'/ 2e

&SURF ID='SUCK' ,VEL=27.5, COLOR='BLUE'/ ventilation transversale

&VENT XB=-31.0,-29.0,-1.,1.0,5.0,5.0,color='AQUAMARINE',SURF_ID='SUCK'/ 1er
&VENT XB=29.0,31.0,-1.0,1.0,5.0,5.0,color='AQUAMARINE',SURF_ID='SUCK'/ 2e v

&SLCF PBX=40., QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=30., QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=20., QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=10., QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=5., QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=0., QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=4.4, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=5.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE.

/ Les thermocouples
&DEVC XYZ=40.,0.,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U40' /
&DEVC XYZ=30.,0.,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U30' /
&DEVC XYZ=20.,0.,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U20' /
&DEVC XYZ=10.,0.,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U10' /
&DEVC XYZ=5.,0.,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U5' /
&DEVC XYZ=0.,0.,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY',ID='U0' /

&DEVC XYZ=0.,0.,5.,QUANTITY='carbon monoxide',ID='CO0' /
&DEVC XYZ=5.,0.,5.,QUANTITY='carbon monoxide',ID='CO5' /
&DEVC XYZ=10.,0.,5.,QUANTITY='carbon monoxide',ID='CO10' /
&DEVC XYZ=15.,0.,5.,QUANTITY='carbon monoxide',ID='CO15' /
&DEVC XYZ=20.,0.,5.,QUANTITY='carbon monoxide',ID='CO20' /

```

```
&DEVC XYZ=25.,0.,5.,QUANTITY='carbon monoxide',ID='CO25' /
&DEVC XYZ=30.,0.,5.,QUANTITY='carbon monoxide',ID='CO30' /
&DEVC XYZ=35.,0.,5.,QUANTITY='carbon monoxide',ID='CO35' /
&DEVC XYZ=40.,0.,5.,QUANTITY='carbon monoxide',ID='CO40' /
&DEVC XYZ=45.,0.,5.,QUANTITY='carbon monoxide',ID='CO45' /
&DEVC XYZ=50.,0.,5.,QUANTITY='carbon monoxide',ID='CO50' /
&DEVC XYZ=60.,0.,5.,QUANTITY='carbon monoxide',ID='CO60' /
&DEVC XYZ=70.,0.,5.,QUANTITY='carbon monoxide',ID='CO70' /
&DEVC XYZ=80.,0.,5.,QUANTITY='carbon monoxide',ID='CO80' /
&DEVC XYZ=90.,0.,5.,QUANTITY='carbon monoxide',ID='CO90' /
&DEVC XYZ=100.,0.,5.,QUANTITY='carbon monoxide',ID='CO100' /

&BNDF QUANTITY='GAUGE_HEAT_FLUX' / Flux de chaleur
&BNDF QUANTITY='WALL_TEMPERATURE' / Température des murs (surfaces)
&BNDF QUANTITY='BURNING_RATE' / Perte de masse par unité

&TAIL /
```