

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Supérieure Polytechnique



Département de Génie Mécanique

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

Présenté pour l'obtention du diplôme

d'Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique

Thème :

**Contribution à l'Etude Numérique du Désenfumage d'un Tunnel
Routier par Extraction Mécanique Transversale**

Réalisé par :

Mr. Aimen SMATTI

Proposé et Dirigé par :

Dr. B. BENKOUSSAS

ملخص:

العمل المقدم دراسة لسريان واستخراج الأدخنة في حالة حريق داخل نفق للسيارات. تطبيق البرنامج الحسابي (ف.د.س) في منهجية استخراج الأدخنة عرضيا، مع مكان المهنات في السقف و في الجوانب، لتبيين فعالية استخراج الأدخنة مقارنة بمكان المهنات. بينت لنا نتائج الدراسة أن استخراج الأدخنة عن طريق مهنات في السقف هي الأفضل.

كلمات مفتاحية: أدخنة، سريان، نفق، استخراج الأدخنة.

Résumé :

Le présent travail est une étude numérique de la propagation des fumées et de désenfumage en cas d'incendie dans un tunnel routier. L'exécution du code commercial de calcul Fire Dynamic Simulator (FDS) pour une stratégie de désenfumage transversale avec les positions des trappes au plafond du tunnel et sur ses cotés latéraux a été réalisé dans le but de montrer l'efficacité de l'opération de désenfumage par rapport à la position des trappes. Il a été montré à travers les résultats de simulation que la stratégie de désenfumage transversale avec les trappes au plafond est la plus avantageuse.

Mots clés : Simulation, fumée, propagation, tunnel, désenfumage.

Abstract:

This work is a numerical study of the spread of smoke in case of fire in a tunnel. The implementation of the Commercial Code of calculation Fire Dynamic Simulator (FDS) for a smoke with the transverse positions of the hatches in the ceiling of the tunnel and on its sides was carried out in order to demonstrate the effectiveness of the operation with respect to the position of the traps. It has been shown through simulation results that the strategy of smoke with cross hatches in the ceiling is the most advantageous.

Keywords: Simulation, smoke propagation, tunnel, smoke.

Dédicaces

*A ma famille,
Et à mes amis.*

Remerciements

Le travail a été mené sous la direction du docteur Bouzid BENKOUSSAS à l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique. Je tiens à le remercier pour ses précieux conseils et son soutien constant durant le déroulement de ce travail.

J'adresse mes remerciements à Monsieur Mohamed BENBRAIKA, qui a bien voulu assurer la présidence de mon jury ainsi que Monsieur Mohamed BOUBEKEUR, pour avoir accepté d'examiner ce modeste travail.

Je remercie tous les enseignants du département Génie Mécanique pour leur soutien tout au long de ma formation.

Mes remerciements vont également à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à ma modeste formation d'ingénieur.

Table des matières

Introduction	1
Chapitre 1 Eléments d'accidentologie	3
1.1 Quelques accidents remarquables dans les tunnels	3
1.1.1 A l'échelle mondiale	3
1.1.2 A l'échelle nationale	9
1.2 Analyse de l'accidentologie	10
Chapitre 2 Phénoménologie de l'incendie	12
2.1 Problématique de l'incendie en tunnel	12
2.1.1 Des enjeux importants et divers	12
2.1.2 Les sources d'incendie en tunnel	12
2.1.3 Les dangers lors d'un incendie en tunnel	13
2.1.4 Puissances de référence et température atteinte	13
2.2 Les fumées	14
2.2.1 Définition	14
2.2.2 Quelque caractéristique des fumées	14
2.2.3 Mode de propagation des fumées	15
2.2.4 Les forces qui conduisent le mouvement des fumées	16
2.2.5 Dangers des fumées	21
2.3 Le désenfumage	23
2.3.1 Les objectifs de désenfumages	23
2.3.2 Stratégie de désenfumage	23
2.4 Les moyens d'étude de l'incendie et du désenfumage en tunnel	25
2.4.1 Les essais sur site	25

2.4.2	Les maquettes expérimentales	26
2.4.3	La modélisation numérique	27
	.	
Chapitre 3	Présentation du Code de Calcul Fire Dynamic Simulator (FDS).....	29
3.1	Introduction	29
3.2	Description de FDS	30
3.2.1	Modèles présents dans FDS	32
3.3	Modélisation en utilisant la technique LES	34
3.4	Domain de calcul	35
3.5	Choix du maillage	36
Chapitre 4	Etude numérique	39
4.1	Introduction	39
4.2	Vitesse de confinement	40
4.2.1	Définition	40
4.2.2	Evaluation de la vitesse de confinement	41
4.2.3	Evolution de la vitesse de confinement en fonction de la puissance du foyer	42
4.3	Résultats et interprétation	43
4.3.1	Premier scénario	43
4.3.2	Second scénario	49
Conclusion	54
Références bibliographiques	55
Annexes	57

Liste des figures

Fig.1.1	Accident dans un tunnel près de Lakhdaria	10
Fig.1.2	Propagation de fumées dans un tunnel routier	11
Fig.2.1	Poussée d'Archimède	17
Fig.2.2	Mouvement d'air par différence de pression dans un milieu fermé	18
Fig.2.3	Dilatation thermique	18
Fig.2.4	Mouvement de l'air en fonction de la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment	19
Fig.2.5	Dégagement de fumée par différents matériaux	22
Fig.2.6	Accélérateurs dans un tunnel ventilé longitudinalement	24
Fig.2.7	Schéma de principe du système de ventilation longitudinale	24
Fig.2.8	Schéma de principe du système de ventilation transversale	25
Fig.2.9	Vue en coupe d'un tunnel ventilé transversalement	25
Fig.2.10	Les essais d'incendie faits au tunnel de L.H. la fontaine (Canada)	26
Fig.3.1	Schéma de fonctionnement de FDS	31
Fig.3.2	Exemple d'un fichier généré pour la simulation sous FDS	35
Fig.3.3	Comparaison de la température maximale pour tous les cas	38
Fig.3.4	Temps de calcul pour tous les cas	38
Fig.4.1	Schéma d'un tunnel avec des trappes latérales	40
Fig.4.2	Schéma d'un tunnel avec des trappes au plafond	40
Fig.4.3	Variation de la longueur de la couche de fumée en fonction de la vitesse d'extraction	42
Fig.4.4	Variation de la vitesse de confinement en fonction de la puissance du foyer	43

Fig.4.5	Variation de la température en fonction de la longueur du tunnel à la hauteur de 2m	44
Fig.4.6	Distribution de la température en fonction du temps à x=80m	45
Fig.4.7	Profil de la température à x=80m après 300s	45
Fig.4.8	Variation de la concentration de CO ₂ en fonction de la longueur du tunnel à la hauteur de 2m	46
Fig.4.9	Distribution de la concentration de CO ₂ en fonction du temps à x=80m	47
Fig.4.10	Profil de la concentration de CO ₂ à x=80m après 300s	47
Fig.4.11	Profil de la vitesse de l'écoulement à x=80m	48
Fig.4.12	Variation de la température en fonction de la longueur du tunnel à la hauteur de 2m	49
Fig.4.13	Distribution de la température en fonction du temps à x=80m	50
Fig.4.14	Profil de la température à x=80m après 300s	50
Fig.4.15	Variation de la concentration de CO ₂ en fonction due la longueur du tunnel à la hauteur de 2m	51
Fig.4.16	Distribution de la concentration de CO ₂ en fonction du temps à x=80m	52
Fig.4.17	Profil de la concentration de CO ₂ à x=80m après 300s	52
Fig.4.18	Profil de la vitesse de l'écoulement à x=80m	53

Nomenclature

Lettres latines

D_i	Coefficient de diffusion de l'élément i [s^{-1}]
\vec{f}	Vecteur de forces extérieures [N]
g	Gravité [m/s^2]
h	Enthalpie [kj/kg]
H	Hauteur des points de mesure [m]
k	Conductivité thermique ; Energie cinétique turbulente [$w/m \cdot K$]
\dot{m}_i'''	Débit massique par unité de volume [$kg/m^3 \cdot s$]
M	Masse molaire ; Nombre de Mach [—]
N	Nombre de particule [—]
p	Pression [Pa]
\dot{q}'''	Taux de dégagement de chaleur par unité de surface [w/m^2]
Q	Débit volumique [m^3/s]
R	Constante des gaz parfait [$j/mole \cdot K$]
t	Temps [s]
T	Température [K]
u	Vitesse [m/s]
V	Volume [m^3]
Y_i	Fonction massique de l'élément i [—]

Lettres grecques

ε	Taux de dissipation [–]
μ	Viscosité dynamique [Pa. s]
ρ	Masse volumique [kg/m^3]
τ_{ij}	Composantes du tenseur de contraintes [N/m^2]
Φ	Fonction de dissipation [–]

Indices

CO_2	Dioxyde de Carbone
CO	Monoxyde de Carbone
N_2	Azote
Ar	Argon
O_2	Oxygène
CH_3OH	Méthanol
HCL	Acide Chlorique

Abréviations

BGH	Bâtiment de Grand Hauteur
LES	Large Eddy Simulation
DNS	Direct Numerical Simulation
FDS	Fire Dynamics Simulator
PPN	Plan de Pression Neutre
NIST	National Institut of Standardisation and Technology
CFD	Computational Fluid Dynamics.

Introduction

La prédiction du mouvement des fumées dans les bâtiments et la conception d'un système de contrôle des fumées sont des éléments importants pour concevoir une stratégie de sécurité de feu pour un bâtiment. Pour être capable de concevoir une stratégie de contrôle des fumées convenable, un expert de la sécurité de feu a besoin d'établir plusieurs paramètres qui décrivent la dynamique de mouvement des fumées et son impact sur les occupants du bâtiment.

Les phénomènes de propagation de feu et de fumée dans les milieux confinés et particulièrement dans les tunnels et les stations de métro sont très complexes à cause de l'architecture de l'ouvrage, ainsi que des systèmes de ventilation adoptés, ce qui rend difficile ou pratiquement impossible de concevoir une stratégie de sécurité globale pour tous les tunnels.

Pour prédire le mouvement des fumées dans les milieux confinés souvent les ingénieurs de sécurité du feu s'adressent aux outils de la modélisation, tel que les modèles empiriques simples (modèle de Zone), ou les modèles CFD (appelé modèle de Champ). En conséquence l'ingénierie du feu a besoin d'outils de modélisation fiables, qui peuvent être utilisés pour prédire avec précision les phénomènes associés aux fumées.

Dans cette étude on s'intéresse au contrôle et à la propagation des fumées lors d'un incendie dans un tunnel routier, en s'appuyant sur des simulations numériques réalisées à l'aide d'un logiciel CFD (Computational Fluid Dynamics).

Ce mémoire est composé de quatre chapitres ;

Après une introduction, une analyse de l'accidentologie est proposée dans le premier chapitre afin d'identifier les causes et les effets de ce type d'incident.

Dans le deuxième chapitre une présentation et une analyse de la phénoménologie de l'incendie en tunnel. Cette analyse porte sur les phénomènes rencontrés lors d'un incendie en

tunnel et elle aborde notamment les aspects de propagation de fumées et les stratégies de désenfumage.

Une présentation du code de calcul « Fire Dynamic Simulator» (FDS) et la formulation mathématique sont présentés dans le troisième chapitre.

Le chapitre quatre présente l'étude numérique de désenfumage sur une géométrie représentant un tronçon d'un tunnel, en utilisant des trappes située au plafond et sur les cotés latéraux, suivi de la présentation des résultats obtenus par FDS pour différents scénarios. Les résultats sont interprétés en conséquence.

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

Chapitre 1

Eléments d'accidentologie

L'analyse des incidents dans les milieux confinés passés offre un enseignement indispensable pour comprendre les causes et les conséquences qui leurs sont liées. C'est dans cette démarche que s'inscrit le présent chapitre.

1.1. Quelques accidents remarquables dans les tunnels

1.1.1 A l'échelle mondiale

Le tunnel sous la Manche, entre la France et l'Angleterre, le 18 Novembre 1996 et le 21 Août 2006 [1]

Un incendie s'est déclaré le 18 Novembre 1996 à bord d'un train transportant des camions et leurs chauffeurs. L'incendie a été remarqué peu de temps avant son entrée dans le tunnel en direction de l'Angleterre mais le conducteur n'a été prévenu que plus tard. Il a alors essayé de poursuivre sa route jusqu'à la sortie du tunnel mais un problème technique, indépendant de l'incendie, l'a forcé à s'arrêter à l'intérieur. Après une exposition aux fumées d'environ vingt minutes, les passagers et le personnel ont pu être évacués par un train de passagers allant en direction opposée dans le tunnel adjacent. Le tunnel sous la Manche est constitué en fait de trois tunnels parallèles: un pour chacune des directions et un tunnel de service. Des passages les relient entre eux tous les 375 mètres et des conduits d'aération relient les deux tunnels principaux tous les 250 mètres.

Aucun mort n'a été à déplorer mais les dégâts matériels et économiques ont été importants. La locomotive et dix camions ont été complètement détruits. De sérieux dommages ont été causés au tunnel sur une longueur d'un kilomètre ; le service normal du tunnel n'a pu reprendre que six mois après.

Le train transportait vingt-neuf camions dont un avait à son bord du polystyrène, classé matière dangereuse. Il y avait un wagon juste derrière la locomotive pour accueillir les trente et un chauffeurs de ces camions. Le train avait une longueur de 800 mètres. L'incendie, qui a probablement démarré sur l'un des camions, se situait vers le milieu du train, proche du camion qui transportait le polystyrène.

D'autres trains se trouvaient dans le tunnel au moment de l'incendie : trois trains en amont du train en feu ; deux trains, une locomotive seule et un train de passagers, sont entrés après que l'incident se soit déclaré ; trois trains circulaient en sens inverse dans le tunnel parallèle.

L'incendie a été tout d'abord remarqué par des agents de sécurité avant l'entrée du train dans le tunnel puis il a été détecté par des systèmes en place dans le tunnel qui se sont allumés au fur et à mesure de la progression du train. Le conducteur a été prévenu de la probabilité d'un incendie à bord de son train par le poste de commande qui lui a conseillé de poursuivre sa route jusqu'à la sortie du tunnel où l'attendraient les pompiers pour intervenir. Un train entré dans le tunnel après a dû ralentir à cause de l'épaisse fumée. Au même moment, les systèmes de détection du tunnel confirmaient la présence de fumées. Il s'ensuivit une série de mesures au cas où le train ne parviendrait pas à la sortie du tunnel : tous les trains furent ralenti ; toutes les valves des conduits de ventilation ont été fermées ; les portes coulissantes au niveau des crossover côté français et anglais et au niveau des passages entre les tunnels ont été fermées ; les pompiers anglais et français ont été mobilisés. Le poste de commande voulait en fait isoler les deux tunnels opérationnels mais n'y est pas parvenu : une porte entre les passages ne s'est pas fermée et la porte du crossover côté français est resté entrouverte.

A cause d'un incident sans rapport avec le feu, le conducteur du train en feu a dû s'arrêter. Il a suivi la procédure et a stoppé le train près d'un des passages entre les tunnels. Il était alors à 19 km de l'extrémité France et à 32 km de l'extrémité Royaume-Uni. Le train était situé sur trois passages : l'un près du wagon des chauffeurs de camions ; un autre près du wagon avec le camion transportant du polystyrène et l'autre près du dernier wagon.

A cause de la fumée dans le tunnel, le conducteur ne pouvait pas voir le numéro du passage à côté duquel il s'était arrêté. Le poste de commande savait que le wagon des chauffeurs était près d'un passage mais ne savait pas lequel. La ventilation du tunnel a été mise en marche

pour pousser les fumées mais une erreur commise par le poste de commande a fait que les ventilateurs étaient sans effet.

Les conditions à bord du train devenaient de plus en plus difficiles à mesure que les fumées s'infiltraient. Aucune personne dans le train n'a remarqué le passage vers le tunnel de service qui était pourtant à hauteur du wagon.

Le poste de commande a fait reculer le dernier train entré dans le tunnel et a évacué le conducteur de la locomotive entrée après le train avec l'incendie à son bord. De plus, l'un des trains circulant en direction inverse dans l'autre tunnel a été stoppé au niveau de l'incendie pour permettre au besoin l'évacuation des passagers et du personnel.

Le poste de commande a ensuite ouvert les deux portes des passages où ils pensaient que le wagon des chauffeurs étaient pour permettre aux pompiers d'accéder. Ceux-ci se sont alors rendu compte que la ventilation ne marchait pas. Cette dernière a finalement été mise en route correctement et elle a poussé les fumées loin du train. Aussi, l'ouverture de la porte du tunnel de service a entraîné l'approvisionnement en air frais qui a dégagé les fumées et permis aux passagers de se rendre compte qu'ils étaient près d'un passage. Le tunnel de service a son propre système de ventilation qui le pressurise de façon à empêcher l'infiltration de fumées.

Les passagers ont été dirigés dans le tunnel de service. De là, ceux qui pouvaient marcher ont été conduits dans l'autre tunnel et ils sont montés à bord du train en direction de la France. Ils ont pu quitter le tunnel sains et saufs même si le train a dû traverser un nuage de fumées au niveau du crossover à cause de la porte restée entrouverte. Les blessés plus graves ont été évacués du tunnel dans des véhicules équipés comme des ambulances par le tunnel de service.

Un incident s'est produit depuis, le 21 Août 2006. Il s'agit de l'incendie d'un moteur de camion chargé à bord d'une navette. Le feu a été rapidement maîtrisé et les 34 passagers évacués. Ainsi, il n'y a pas eu de blessés et les dégâts ont été beaucoup moins importants que lors du précédent incendie : seule une caténaire a été endommagée dans le tunnel nord où a eu lieu l'incendie. Le tunnel sud qui n'a pas souffert de l'incendie a réouvert trois heures après l'incendie et le tunnel nord a été remis en usage après seulement un peu plus de 24 heures.

Eurotunnel, l'opérateur du tunnel, a mis en avant l'efficacité des systèmes de suppression incendie dans le tunnel, du système de ventilation pour dégager les fumées et de la qualité des procédures d'intervention.

Le tunnel du Mont-Blanc entre la France et l'Italie, le 24 Mars 1999 [1]

Le 24 Mars 1999, 39 personnes sont mortes suite à un incendie qui s'est déclaré à bord d'un camion transportant de la farine et de la margarine dans le tunnel du Mont-Blanc, long de 11,6 kilomètres et large de 8,6 mètres, reliant la France à l'Italie.

Le conducteur s'est rendu compte de l'incendie à bord de son véhicule alerté par les conducteurs allant dans la direction opposée. Il avait déjà parcouru plusieurs kilomètres dans le tunnel. Il s'est arrêté à mi-chemin entre l'entrée et la sortie du tunnel pour essayer d'éteindre lui-même l'incendie mais en vain. Le personnel du tunnel a déclenché l'alarme quelques minutes plus tard et a fermé l'entrée du tunnel dans les deux sens. 10 voitures et 18 camions entrés du côté français étaient à ce moment déjà dans le tunnel. Quelques véhicules entrés par le côté italien ont pu passer près de l'incendie et traverser le tunnel. Certains véhicules du côté français ont réussi à faire demi-tour et à sortir malgré l'épaisse fumée qui avait rapidement envahi le tunnel. Malheureusement, les camions les plus larges n'ont pas pu suivre la même démarche faute de place. La plupart des conducteurs ont fermé leurs vitres et ont attendu les secours.

Un effet cheminée dû à la pente du tunnel s'est produit : de l'air frais était aspiré côté italien, poussant la chaleur et les fumées de l'autre côté, plus élevé. Le système de ventilation du tunnel a amplifié ce phénomène poussant les fumées du côté français à une vitesse trop rapide pour que quiconque ait le temps de se mettre à l'abri. Les fumées auraient aussi causé la panne des moteurs de certains véhicules et de nombreux conducteurs qui sont sortis de leurs véhicules pour rejoindre les refuges ont été rapidement asphyxiés.

Quelques minutes après que l'alarme ait été donnée, les services de secours français de Chamonix sont intervenus. Mais la violence de l'incendie a causé la fonte des câbles électriques et a plongé le tunnel dans le noir. Les équipes de secours n'ont donc pas pu, dans ces conditions, s'approcher de la source d'incendie, d'autant plus que de nombreux véhicules endommagés bloquaient leur passage. Elles ont abandonné leurs engins et se sont abritées dans des refuges pressurisés. Elles ont été sauvées cinq heures plus tard par une troisième équipe de pompiers qui est passée par un conduit de ventilation. Des 15 pompiers pris au piège, un est mort et tous les autres étaient dans une condition critique.

Quelques autres personnes ont aussi été sauvées grâce aux refuges bien que les portes coupe-feu de ceux-ci aient été originellement conçues pour résister pendant deux ou quatre

heures (selon leur vétusté) alors que l'incendie aura duré 56 heures avec des températures atteignant 1000°C. Le pouvoir calorifique du chargement de margarine, équivalent à 22.000 litres d'essence, est principalement en cause. De plus, l'incendie s'est ensuite rapidement propagé aux autres camions qui transportaient aussi des produits inflammables.

L'effet cheminée était notable dans les conséquences de l'accident : seuls les véhicules du côté français, plus élevé que le côté italien et vers où la chaleur et les fumées sont allées, ont été pris dans l'incendie ; presque tous les véhicules du côté italien n'ont pratiquement pas été endommagés.

27 personnes sont mortes dans leurs véhicules, 10 en essayant de se sauver à pied. Sur les 50 personnes prises au piège dans l'incendie, seulement 12 ont survécu.

Le tunnel est resté fermé pendant trois ans suite à l'incendie et a subi des transformations majeures : il a été équipé d'un système automatisé de détection, des baies de sécurité ont été rajoutées, une issue de secours parallèle au tunnel a été creusée, un poste d'intervention qui dispose de camions incendie a été installé au milieu du tunnel.

Le lourd bilan de l'incendie a aussi en partie été imputé au manque de coordination entre les deux sociétés, l'une française, l'autre italienne, responsables de la gestion du tunnel.

Le tunnel de Kaprun en Autriche le 11 Novembre 2000 [1]

Un incendie s'est déclaré sur le funiculaire du Mont Kitzsteinhorn en Autriche le 11 Novembre 2000 alors qu'il traversait un tunnel. Il a été très meurtrier, causant la mort de 155 personnes.

Il était 9h lorsque le funiculaire a démarré pour gravir le Mont Kitzsteinhorn au départ du village de Kaprun, en Autriche. Les passagers de la cabine montante situés dans le compartiment le plus bas ont vu des petites flammes sortir du compartiment arrière lorsque que la cabine était dans le tunnel. La cabine s'est arrêtée 530 mètres après l'entrée du tunnel mais les portes sont restées bloquées. Douze passagers du compartiment inférieur ont pu sortir en brisant des vitres. L'un de ces passagers était un pompier volontaire et il a su guider les autres pour les mettre à l'abri : il leur a fait descendre le tunnel en passant devant l'incendie et alors que ceux-ci craignaient de voir le funiculaire descendre la pente. Le conducteur a finalement réussi à débloquer les portes et des passagers encore conscients dans la cabine ont essayé de s'échapper

en s'éloignant de la source incendie, c'est-à-dire en remontant le tunnel. Malheureusement, l'effet cheminée dû à la pente du tunnel a dirigé les flammes et les fumées toxiques vers eux et leurs corps ont été retrouvés sur une distance de 140 mètres en amont de la cabine. Aucun n'a réussi à rejoindre le puit de ventilation situé 130 mètres plus loin et qui aurait pu constituer une issue de secours. Aussi, les deux seules personnes à bord de la cabine descendante, le conducteur et un passager, sont mortes asphyxiées ainsi que trois autres situées dans la station en amont. Au total, 155 personnes sont décédées.

L'incendie a eu pour origine une fuite d'huile d'un conduit hydraulique du système de freinage et un appareil de chauffage défectueux qui avait été installé de façon illicite dans la cabine inférieure du conducteur, inoccupée au moment de l'incendie. L'appareil de chauffage a fourni la chaleur nécessaire à l'embrassement de l'huile et des panneaux de bois et autres matériaux proches préalablement enduits d'huile. C'est la perte du liquide hydraulique qui a causé l'arrêt du funiculaire par l'intermédiaire d'un système de sécurité et qui a aussi empêché l'ouverture des portes par le conducteur qui s'était rendu compte qu'il y avait un incendie.

Le tunnel mis en service en 1974 et rénové en 1994 avait une longueur de 3300 mètres et une pente moyenne de 42%. Sa section était beaucoup moins importante que celle, par exemple, du tunnel routier du Mont-Blanc et ce plus grand confinement a favorisé l'élévation de la température lors de l'incendie. Celle-ci a été estimée aux alentours de 1000°C. Bien que les cabines étaient en matériaux ignifuges, elles n'ont pas résistées à cette forte chaleur. Seul le châssis en acier, qui a une température de fusion de 1500°C, n'a pas fondu. De plus, le tunnel n'était équipé d'aucun système d'extinction d'incendie si bien que les secours n'ont pu pénétrer dans le tunnel que lorsque l'incendie s'est éteint de lui même et que les fumées toxiques se sont dissipées. Le funiculaire avait été conçu en estimant que le risque incendie était présent dans les stations mais très improbable dans le tunnel. Ceci explique l'absence de moyens d'extinction et la présence d'un escalier large de seulement 50 cm pour l'évacuation d'un funiculaire qui avait la capacité de transporter 180 personnes dans chacune des directions.

Le funiculaire de Kaprun n'a pas été remis en service mais a été remplacé par un téléphérique. Les cabines des autres funiculaires autrichiens sont maintenant équipées de masques à gaz, de marteaux et de pics pour briser les vitres. Des extincteurs ont également été ajoutés.

Le tunnel de Fréjus, le 4 Juin 2005 [1]

Le feu a pris dans un camion, à environ la moitié du tunnel long de 12,8 kilomètres, reliant Modane (Savoie) à la ville italienne de Bardonecchia. Il a vraisemblablement été provoqué par une fuite de gazole sur un camion transportant des pneus, selon les images prises par une caméra de surveillance du tunnel. On y voit du gazole fuir du turbo-compresseur du camion de pneus. Il est possible qu'il y ait eu une panne mécanique. Le carburant est arrivé sur le moteur et s'est enflammé et en un instant le camion était en feu.

Le feu s'est alors propagé à trois autres véhicules, dont un autocar de la Sitaf (société Italienne exploitante). Les pompiers ont retrouvé deux corps sans vie. Le premier, un Slovène de 23 ans, a été découvert dans l'abri numéro 6 du tunnel, côté français de l'ouvrage. Il s'agissait probablement du conducteur de l'un des camions en feu. Un autre chauffeur slovaque, de 24 ans, à été retrouvé à proximité. Plusieurs autres personnes ont été intoxiquées par la fumée, mais sans gravité. Cinq personnes ont été hospitalisées à Turin, mais leur état n'inspirait pas d'inquiétude. Du côté italien, 19 voitures, un autobus, un camping car et neuf chauffeurs de poids lourds ont réussi à sortir du tunnel après le début de l'incendie. La fumée et la chaleur dégagée par l'incendie a considérablement gêné la progression des pompiers.

1.1.2 A l'échelle nationale

On cite 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 à Bordj Bou Arreridj qui tractait 10 wagon-citerne de gasoil et 5 autre chargés d'essence et une locomotive en provenance de Bouira (Figure 1.1).



Fig1.1 Accident dans un tunnel près de Lakhdaria

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.

1.2. Analyse de l'accidentologie

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, 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 1 200°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 1.1) et que ce danger peut être amplifié par une ventilation mal maîtrisée dans l'ouvrage.



Fig.1.2 Propagation de fumées dans un tunnel routier [2].

Chapitre 2

Phénoménologie de l'incendie

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 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 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 8 MW
Camionnette	10 à 15 MW
Poids lourd sans marchandises dangereuses	30 MW
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. Les Fumées

2.2.1. Définition

La fumée est un aérosol de nature variable et dynamique puisqu'elle est constamment en mouvement. Elle se déplace par le gré des conditions de son environnement, sa température change chaque instant, elle est formée d'un mélange de gaz de vapeur, de particules liquides et solides, produit par une combustion et en suspension dans l'air.

2.2.2. Quelques caractéristiques des fumées

La fumée produite au cours d'un incendie est une combinaison des trois états de la matière : l'état solide (particules solides imbrulées riches en carbone), l'état gazeux (gaz de combustion, hydrocarbure, etc.) et l'état liquide, suspension dans la phase gazeux (aérosol, condensats divers, vapeur d'eau, etc.). La taille des particules de fumée peut varier entre 0.01 et 10 μm [4]. La couleur résultante nous renseigne sur la composition : fumées blanche révélatrice d'aérosol et de vapeur d'eau, fumée grise pour les mélanges d'aérosols et de particules solides, enfin fumée noire pour les grosses particules solides. Le débit des fumées dépend de la surface du feu, de la

température et de la hauteur des flammes et de l'épaisseur de la couche de fumée. La vitesse horizontale du front de fumée est de l'ordre de 0.2 m/s à 1 m/s [4]. Les fumées ont tendance à occuper le maximum de volume et à créer une légère surpression dans le locale incendié. Elles sont sujettes à un tirage thermique vertical favorisant leur migration vers les étages supérieurs. Si ces paramètres influencent directement sur l'opacité et le mode de déplacement des fumées, ils ne donnent aucune information sur les dangers réels dus à la température et la présence des gaz toxiques associés à un éventuel manque d'oxygène.

2.2.3. Mode de propagation des fumées

Le mouvement des fumées est purement turbulent, caractérisé par l'instabilité et l'instationnarité, l'équation régissant l'évolution de la concentration C [5], est :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j C) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \quad (2.1)$$

Le premier terme traduit l'instationnarité, le deuxième le transport dû au mouvement du fluide, c'est le terme convectif et enfin le dernier exprime la diffusion moléculaire.

Les fumées se propagent par trois modes, diffusion, dispersion et mélange.

2.2.3.1. Mode de diffusion :

Il correspond à un transport irréversible de matière. Il existe entre deux milieux où il y a une inhomogénéité de concentration des particules, c'est-à-dire la présence d'un gradient de particule. Ces inhomogénéités peuvent être transitoires et ne durent que la période d'atteindre l'équilibre.

La théorie de la cinétique des gaz permet de donner une approximation du coefficient de diffusion par [6]:

$$D = \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{4k^3}{m\pi^3} \frac{T\sqrt{T}}{P}} \quad (2.2)$$

Avec $\alpha = 0.499$

2.2.3.2. Mode de dispersion

La dispersion est caractérisée par la diversité du mouvement, elle peut être vue comme la variation de la position de N particules marquées, émises à différents instants [6]. D'autre part, si un couple de particule, distant de 'y' à un instant initial, alors le caractère turbulent se manifeste par l'accroissement en moyenne de cet écart avec le temps.

2.2.3.3. Mode de mélange

Cette notion associe la diffusion par agitation turbulente et moléculaire. L'extension de l'air d'échange à travers les gradients locaux multiplie l'action de la diffusion par agitation moléculaire. Le mélange joue un rôle important dans la propagation de la fumée, cependant il a pour effet la dilution des fumées et le retardement de la détection des fumées.

2.2.4. Les forces qui conduisent le mouvement des fumées

Comme tous les fluides, la fumée s'écoule sous l'action des forces extérieures. En l'absence de courant d'air, son écoulement est laminaire jusqu'à une hauteur critique, au-delà de laquelle son écoulement devient turbulent. Dans le cas d'un incendie, l'écoulement de la fumée est toujours turbulent, en raison de l'ampleur du feu et de l'énorme pression engendrée. Les forces en cause dans le déplacement des fumées sont essentiellement [7] :

2.2.4.1. La poussée d'Archimède (force de flottabilité)

Lorsqu'un feu prend naissance, la chaleur qu'il dégage réchauffe l'air ambiant et crée un courant ascendant d'air chaud ; des gaz inertes (Azote N_2 , Argon $Ar...$), un gaz oxydant (Oxygène O_2) et des produits de combustion (fumées). En montant, ce courant d'air chaud entraîne un courant d'air frais qui alimente la base du feu (figure 2.1). La différence de densité entre l'air chaud et l'air froid engendre des mouvements de convection, c'est-à-dire des déplacements d'air causés par des différences de températures. Étant plus léger que l'air frais, l'air chaud monte par la poussée d'Archimède, qui est une force permettant d'élever les objets dont la densité est plus faible que celle de l'air. Au contraire, l'air frais est plus dense que l'air chaud et la gravité provoque sa descente. En résumé, plus la température ambiante est élevée, plus la fumée monte.



Fig.2.1 : Poussée d'Archimède

Les mouvements de convection engendrés par ces deux forces opposées expliquent des phénomènes comme la forme pointue des flammes en V d'un panache de fumée, la propagation d'un incendie aux étages supérieurs d'un bâtiment en laissant le milieu intact, de même que l'effet de roulement de la fumée au plafond. Cet effet est obtenu surtout au début d'un incendie, lorsque la fumée transmet sa chaleur au plafond par diffusion, provoquant ainsi son refroidissement et sa descente. En descendant, la fumée refroidie se mélange encore par diffusion avec les gaz chauds qui montent, ce qui la fait monter à nouveau. Ce mouvement de montée/descente continue jusqu'à ce que le plafond ait atteint la même température que la fumée.

2.2.4.2. La surpression causée par le feu

Dans un incendie, la fumée s'accumule au plafond pour former une couche de fumée et créer une hausse de pression (pression positive ou surpression), expliquant par la loi des gaz parfaits (ou la loi de Gay Lussac). Cette loi stipule que l'augmentation de température T d'un volume V de gaz engendre directement une élévation de sa pression P , d'où la formule : $PV=nRT$. Cette surpression en hauteur engendre une baisse de pression au niveau du sol (pression négative ou dépression), créant ainsi un mouvement d'air qui entraîne l'air frais vers le haut. En milieu fermé, l'air frais est aspiré par les ouvertures à des niveaux inférieurs, comme le bas des portes, les fenêtres et les pertes d'étanchéité d'un bâtiment (figure.2.2). On appelle ce mouvement d'aspiration d'air frais un appel d'air. Lorsqu'un équilibre de pression est atteint, c'est-à-dire lorsqu'il y a autant de fumée qui quitte la pièce que d'air frais entre, le niveau de la couche de fumée se stabilise.

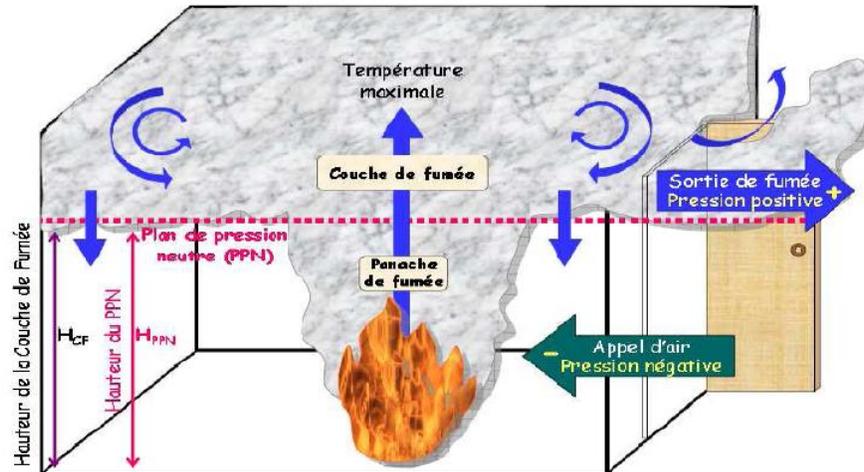


Fig.2.2 : Mouvement d'air par différence de pression dans un milieu fermé [7]

2.2.4.3. La dilatation thermique

La chaleur engendrée par un incendie augmente la température de l'air ambiant. Ainsi réchauffée, les molécules gazeuses de l'air et de la fumée s'agitent et leurs collisions créent une dilatation de leurs volumes (figure 2.3). Cette expansion des gaz chauds s'explique également par la loi des gaz parfaits (ou la loi de Charles), qui précise que le volume d'un gaz est directement proportionnel à sa température et à sa pression.



Fig.2.3 : Dilatation thermique

Toujours selon la loi des gaz parfaits, à chaque élévation de température de 1 Kelvin , un gaz se dilate de $1/273$ de son volume initial. Donc, si on prend par exemple un incendie provoquant une élévation de température de 800°C (1073 K) dans l'air ambiant, cela voudrait dire que l'air se dilaterait jusqu'à environ 4 fois par rapport à son volume initial. De façon générale, on pourrait supposer que dans la plus part des incendies, le volume des gaz chauds devrait au moins tripler par rapport au volume de l'air frais au départ.

Cette augmentation importante de volume des gaz chauds provoque ainsi l'expulsion des autres gaz présents au début de l'incendie et elle continue aussi longtemps que la température augmente. Le phénomène de dilatation thermique explique en partie la rapidité de propagation de la fumée, de même que l'abaissement de la couche de fumée dans un milieu fermé.

2.2.4.4. La différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment

La différence de température entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment crée une différence de pression puisque, toujours selon la loi des gaz parfaits, une augmentation de température engendre directement une augmentation de pression. Lorsqu'il fait plus chaud à l'intérieur qu'à l'extérieur, comme par exemple en hiver, la pression devient alors plus positive dans le haut d'un bâtiment. Un appel d'air est alors créé dans la partie inférieure et l'air est aspiré vers l'intérieur (figure 2.4).

Dans une pièce ou un bâtiment, le plan de pression neutre (PPN) ou "zone neutre" correspond à la hauteur à laquelle la pression est la même en dehors qu'en dedans, lorsqu'il y a pas de vent. Au-dessous du PPN d'un édifice, l'écart de pression fait pénétrer l'air à l'intérieur et la pression devient négative. Au-dessus du PPN, l'air est expulsée à l'extérieur et la pression devient donc positive. Lors d'un incendie la chaleur intense et la pression engendrée font déplacer le PPN vers le bas et il se promène ensuite vers le haut ou vers le bas en fonction des baisses ou des hausses de chaleur.

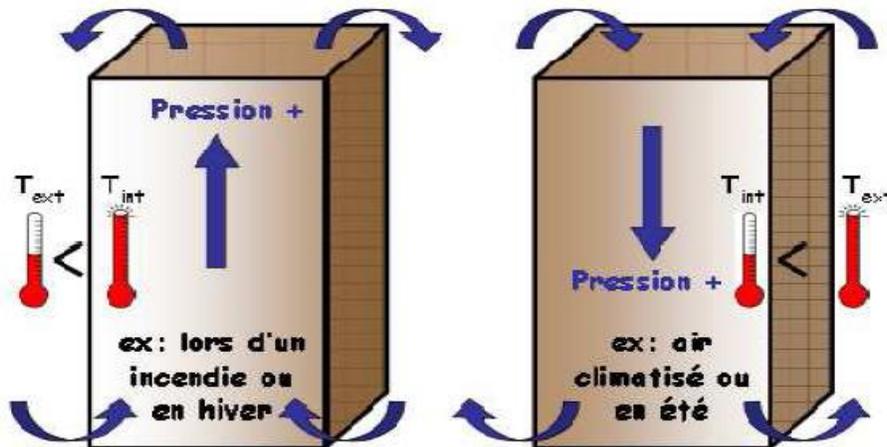


Fig. 2.4 : Mouvement de l'air en fonction de la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment [7]

Les variations de hauteur de PPN peuvent servir d'indication visuelle des phases d'incendie. Par exemple, un PPN très bas dans une pièce peut indiquer qu'un incendie est dans une phase très avancée et qu'il risque d'engendrer une explosion de fumée. Un PPN très haut peut au contraire indiquer le début d'un incendie. La vitesse de déplacement du PPN peut également donner des indices sur les variations d'intensité de l'incendie.

2.2.4.5. Les différences de pression en fonction de la hauteur d'un bâtiment

Lorsqu'un incendie prend naissance aux niveaux inférieurs d'un bâtiment de grande hauteur (BGH), la fumée a tendance de propager rapidement vers les étages supérieurs par les ouvertures verticales telles que les cages d'escaliers et les puits de lumière. Ce mouvement général de la fumée vers le haut est d'autant plus rapide que l'édifice est élevé, car un autre phénomène se superpose à celui de l'ascendance normale des fluides : l'effet de cheminée, appelé aussi effet de tirage.

En effet, un appel d'air est créé du bas vers le haut en raison d'une décroissance de la pression en fonction de la hauteur, elle-même causée par une diminution du poids total de l'air par surface. On compare cet appel d'air dans les cages ouvertes à celui d'un effet de tirage dans une cheminée, c'est pour quoi il est nommé « effet de cheminée ». Cet effet dépend essentiellement de deux facteurs : la hauteur du bâtiment, de même que la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur. Dans le cas d'un incendie dans un BGH en hiver, la différence de température entre la fumée et l'air extérieur étant plus grande, l'appel d'air devient donc plus important. Durant l'été, on peut observer le phénomène inverse lorsqu'il fait très chaud ; la fumée a tendance à s'écouler vers le bas au début de l'incendie.

2.2.4.6. La densité et la composition de la fumée

Lorsqu'un combustible organique (contenant du carbone) est suffisamment chauffé, comme par exemple du bois, il se déshydrate et se décompose à sa surface en milliers de fragments minuscules par un phénomène appelé pyrolyse. Ces fragments légers composés d'acétylène, de méthane, de benzène, de radicaux H , OH , etc., s'élèvent sous l'action de la poussée d'Archimède et s'écoulent dans l'air. Les produits qui n'ont pas réussi à brûler complètement et les produits de combustion s'échappent alors dans l'air ambiant en produisant un aérosol appelé fumée. Lorsque ces fragments gazeux s'éloignent de leur zone de combustion, ils ont tendance à se regrouper et à grossir au fur et à mesure que la température diminue. En

s'agglomérant de la sorte, les fragments forment des particules solides carbonées de composition divers appelées suies, les constituants majeurs de la fumée. Les suies jouent un rôle non négligeable dans la propagation de la fumée, puisque leur taille influence la densité de la fumée. Plus une fumée contient de suie, plus elle est lourde et elle aura tendance à s'écouler vers le sol. Voici quelques caractéristiques physico-chimiques des suies :

- Particules combustibles (oxydables) plus ou moins sphériques ;
- Leurs dimensions varient ; lorsque la température diminue, elles se regroupent jusqu'à l'obtention d'un diamètre d'environ 20 nm par un processus d'agglomération ;
- Leur composition chimique varie : elles sont formées principalement de carbone (d'où leur couleur noire) et d'hydrogène ;
- Peuvent se lier par adsorption grâce à des liaisons chimiques ou physiques et transporter d'autres molécules présentes dans l'air, comme les gaz toxiques ;
- Deviennent lumineuses lorsqu'elles sont suffisamment chauffées ;
- Leur production croît avec la richesse du mélange combustible : les combustibles riches en carbone et faible en oxygène (ex : diesel) produisent plus de suie que ceux qui sont plus pauvres en carbone ou riches en oxygène (ex : méthanol CH_3OH) ;
- Plus les particules sont petites, plus elles risquent d'être toxiques pour les poumons.

En résumé, il y a plusieurs facteurs qui influencent le mouvement des fumées lors d'un incendie et certains mécanismes sont encore mal élucidés. Prévoir les déplacements de la fumée demeure donc un art pour un intervenant en incendie. Pour devenir maître de cet art, il est donc nécessaire de maîtriser plusieurs concepts de physique et de chimie, additionnés à une bonne compréhension des bases de la combustion et de l'environnement de l'incendie.

2.2.5. Dangers des fumées

Les incendies dans les milieux confinés sont parmi les plus dangereux. L'augmentation de la concentration des fumées peut créer rapidement des conditions impropres à la survie des personnes. En effet, leur opacité diminue la visibilité, ce qui gêne l'évacuation des occupants et l'intervention des services de secours. Des gaz dangereux tel que (CO , HCL , etc.) résultant de la combustion, auxquels s'ajoutent le manque éventuelle de l'oxygène, rend cette ambiance rapidement mortelle, une victime intoxiqué est incapable de fuir, mais une simple exposition aux fumées, même très brève peut donner lieu à un handicap à vie : asthme chronique, insuffisance

rénale, hépatique, cardiaque et respiratoire [8]. En fin, l'élévation de la température constitue un obstacle infranchissable. Ces dangers concernent les occupants des lieux sinistrés, temporaires ou permanents, les personnes situées dans les locaux communiquant avec la zone incendiée et les équipes de secours venus lutter sur place contre l'incendie.

Les fumées sont aussi un facteur important de l'incendie en raison de leur température qui favorise la pyrolyse et l'inflammation des matériaux combustibles. De plus l'aspect corrosif de certains de leurs composants (*HCL* par exemple) représente aussi bien un danger pour les éléments du bâtiment que pour les biens stockés à l'intérieur (structures métalliques, informatiques, électroniques, etc.).

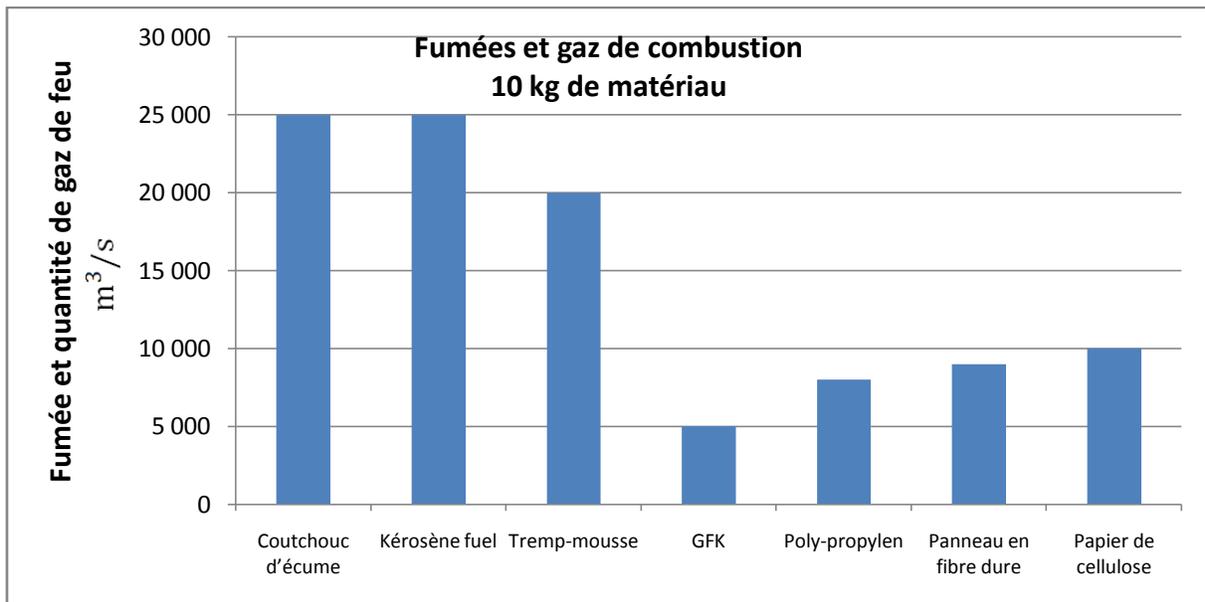


Fig. 2.5 : Dégagement de fumée par différents matériaux [9]

Ces dangers peuvent avoir lieu pour plusieurs raisons, on cite parmi eux ; la cigarette qui est la principale cause identifiée. Il existe néanmoins d'autres causes telles que les surtensions d'équipements électriques ou leurs mauvaises utilisations. Dans les métros, l'échauffement de pneumatiques est à l'origine de plusieurs incendies. Il existe d'autres origines telles que les défauts des matériels comme les escalators et les câbles qui peuvent contribuer à la propagation et l'émission nocive de fumée. Le graphe de la figure (2.5) illustre la quantité de fumée dégagée par différents matériaux.

2.3. Le désenfumage

2.3.1. Les objectifs de désenfumages

D'une vue réglementation, le désenfumage a pour objectif d'extraire des locaux incendiés une partie des fumées et des gaz de combustion afin de rendre praticable les voies pour l'évacuation et l'intervention des services de secours et de limiter la propagation du feu hors du volume sinistré, donc il doit :

- Maintenir une visibilité suffisante ;
- Diminuer le teneur des gaz toxiques ;
- Conserver un taux d'oxygène acceptable ;
- Empêcher l'élévation de la température, par apport d'air frais.

2.3.2. Stratégie de désenfumage

Les ouvrages souterrains tels que les stations de métro sont en général dotés de système de ventilation dont le rôle est l'évacuation des fumées et de la chaleur pour améliorer les conditions des voies d'évacuations, ainsi que, l'accès des équipes de secours. Les ventilateurs de désenfumage doivent assurer leurs fonctionnements avec des fumées de 400°C pendant une heure, et elles doivent aussi assurer un débit minimal de renouvellement d'air de 15 volumes par heures [10].

Les systèmes de ventilation sont conçus par rapport à une stratégie d'évacuation des personnels présents dans l'infrastructure, Deux types de stratégie à retenir :

2.3.2.1. 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 2.6), 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.

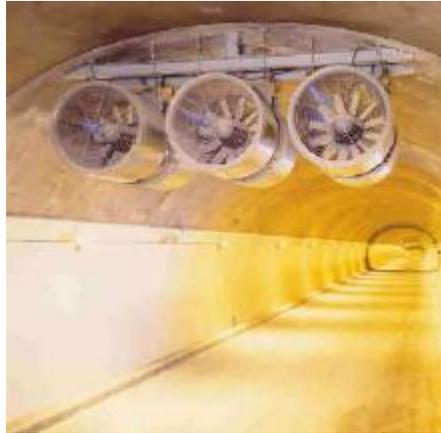


Fig.2.6 Accélérateurs dans un tunnel ventilé longitudinalement

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 2.7).



Fig.2.7 Schéma de principe du système de ventilation longitudinale.

2.3.2.2. 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 2.8).

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 (2.9), on extrait les fumées par des *trappes de désenfumage* situées en plafond.

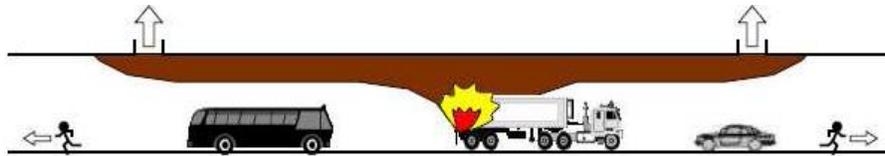


Fig.2.8 Schéma de principe du système de ventilation transversale.

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



Fig.2.9 Vue en coupe d'un tunnel ventilé transversalement

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 [11].

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 2.10).



Fig.2.10 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) [11].

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 [11].

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) [11]. 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 (*k-ε*, *LES* (*Large Eddy Simulation*)) [11].

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

Présentation du code de calcul Fire Dynamic Simulator (FDS)

3.1. Introduction

La simulation des phénomènes de propagation du feu et des fumées est difficile et complexe, sa complexité réside dans les interactions entre les processus physiques et chimiques (Turbulence, combustion, radiation, etc.) qui contrôlent le feu et le développement des fumées. A cause de ces interactions, les expériences faites à l'aide des maquettes à échelle réduite ne sont pas suffisantes pour reproduire le phénomène à l'échelle réel [12]. Les modèles mathématiques offerts une solution pratique pour mieux comprendre le feu et la dynamique des fluides.

La modélisation mathématique de la croissance de feu et du mouvement des fumées dans n'importe quel bâtiment présente un énorme défi. Non seulement il est difficile de simuler les phénomènes physiques tels que (la turbulence, le transfert radiatif, la combustion), mais aussi les variables tels que l'emplacement de l'incendie, les conditions de vent externe, la ventilation disponible qui ont tous un impact sur le comportement de feu et des fumées. Deux modèles fondamentaux de simulation se sont développés au cours des deux dernières décennies, les modèles de zones et les modèles de champs. D'autre part les modélisations numériques peuvent être classées comme des modélisations en un, deux, ou trois dimensions. Lors d'un incendie, le taux de dégagement de chaleur (HRR), le rayonnement et la flottabilité auront une influence sur la température et les flux. Tout modèle doit simuler ces effets.

Les codes de zones ont été introduits très tôt dans la recherche du feu. Comme leur application n'exige pas des grandes ressources en temps de calcul, et qu'ils sont basés principalement sur des considérations analytiques et semi analytiques, les modèles de zones peuvent être généralement exécutés sur des ordinateurs personnels. Les modèles de zones

divisent l'espace en deux volumes de contrôle distincts habituellement, un volume de contrôle supérieur près du plafond appelé couche supérieure, composée de gaz brûlé produit par le feu, et une couche inférieure qui est l'air.

Les codes de champs ou dits "CFD" (*Computational Fluid dynamics*) sont des modèles sophistiqués et complexes offrent des résultats plus précis que les modèles de zone. Ils peuvent donner une représentation en deux ou trois dimensions du domaine. Les modèles CFD résolvent les équations différentielles de la mécanique des fluides sur des milliers de petits volumes de contrôle qui décrivent le domaine de calcul.

Le logiciel de simulation FDS (*Fire Dynamics Simulator*) développé par NIST (*National Institut of Standard and Technology, USA*), utilise la CFD comme technique de modélisation de feu et de fumée.

3.2. Description de FDS

Ce chapitre fournit une description de FDS basée sur les informations contenues dans le Guide de l'Utilisateur [13] et le Guide des Références Techniques [14] accompagnant le programme.

Le code FDS (*Fire Dynamics Simulator*) est un logiciel CFD (*Computational Fluid Dynamics*), spécialisé dans la simulation des feux et de la propagation des fumées. Il est basé sur la résolution des équations de Navier-Stokes pour les écoulements avec transfert de chaleur. Le programme informatique principal est écrit en Fortran 90. La première version du programme a été publiée en février 2000. Depuis plusieurs améliorations majeurs et nouveaux dispositifs ont été mis en place dans le programme. Dans cette étude on utilise FDS version 4.07, lequel a été publié en mars 2006.

FDS a été développé comme un outil pour résoudre des problèmes pratiques dans l'ingénierie de protection contre le feu et aussi comme un outil pour étudier la dynamique du feu et la combustion. Les prévisions de vitesses et de températures sont déterminées avec une précision de 5 à 20% par rapport aux résultats expérimentaux selon la qualité du maillage.

FDS peut être utilisé pour modéliser les phénomènes suivants :

- Transport de la chaleur et des produits de combustion (principalement les fumées), à faible vitesse.

- Transferts de chaleur entre les solides et les gaz.
- Pyrolyse.
- Développement du feu.
- Propagation du feu.
- Activation d'extincteurs de feu et détecteurs de la chaleur.

FDS est utilisé largement par les professionnels de la sécurité du feu. Une des applications majeures du programme est de concevoir les systèmes de contrôle de la fumée et d'étudier l'activation des appareils d'arrosages. FDS a aussi été utilisé dans de nombreuses reconstructions du feu y compris l'enquête sur la catastrophe du Centre du Commerce Mondiale (*World Trade Centre*).[14]

FDS comme tous les logiciels CFD passe par trois étapes pour simuler un phénomène, figure (3.1) ; premièrement le Pré-Processeur qui est un fichier d'entrée de type texte sur le quel on spécifie la géométrie et les conditions aux limites, ce fichier sera compilé et exécuté par le Solveur qui est dans ce cas FDS, finalement les résultats des simulations peuvent être visualisés sur le Post-processeur qui est un programme compagnon appelé *Smokeview*.

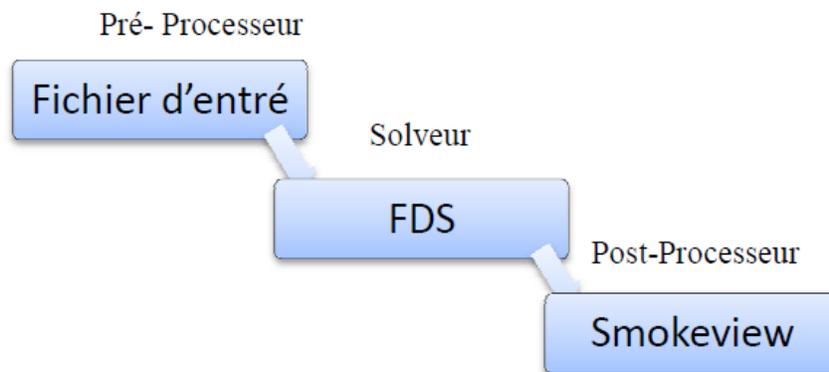


Fig.3.1 : schéma de fonctionnement de FDS

Le code FDS est muni de trois modèles intégrés qui permettent de simuler le feu et le transfert de chaleur et de matière.

3.2.1. Modèles présents dans FDS

3.2.1.1 Modèle hydrodynamique

FDS résout une forme des équations de Navier-Stokes approprié aux écoulements à faible vitesse. L'ensemble des équations de base de la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie résolues par FDS sont présentées au-dessous :

Conservation de la masse :

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

Conservation de la quantité de mouvement :

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

Conservation de l'énergie :

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

Equation des gaz parfaits :

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

Quant pour le terme de fraction de la masse pour les espèces gazeux l'équation de la conservation de la masse, s'écrit comme suit :

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

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 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 :

$\frac{D(\cdot)}{Dt} = \frac{\partial(\cdot)}{\partial t} + u \cdot \nabla(\cdot)$ le terme $\nabla \cdot q$ 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 d'énergie cinétique transférée à une énergie thermique en raison de la viscosité dynamique du fluide, est défini par :

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

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

D_i : Coefficient de diffusion de l'élément '1' ;

Y_i : La fraction massique de l'élément '1' ;

\dot{m}_i''' : Le débit massique pour unité de volume.

Puisque il n'y a aucune solution analytique de l'équation de Navier-Stocks, la solution exige l'usage des méthodes numériques où le volume d'étude est divisé en une grille

tridimensionnelle constituée de petits cubes (cellules de la grille). Le modèle calcul les conditions physiques dans chaque cellule comme une fonction de temps.

L'algorithme utilisé est un algorithme explicite de type prédiction-corrrection d'une précision du second ordre en espace et en temps. La turbulence est traitée au moyen de la forme Smagorinsky (LES) "Large Eddy Simulation". LES est le mode d'opération par défaut et il a été utilisé dans l'étude décrite dans ce rapport.

C'est aussi possible d'exécuter une résolution en mode DNS (Direct Numerical Simulation) dans FDS. Cependant, les simulations DNS exigent un maillage très fin, ce qui n'est pas toujours possible, en tenant compte de limitation en ressources informatiques.

3.2.1.2. Modèle de combustion

FDS utilise le modèle de la fraction du mélange comme le modèle de la combustion par défaut. La fraction du mélange est une quantité scalaire conservée. Elle est définie comme la fraction de gaz à un point donné dans le domaine. Le modèle suppose que la combustion se produit un mélange contrôlé et que la réaction du combustible et de l'oxygène est infiniment rapide. La fraction massique de tous les réactants et produits peut être dérivée de la fraction de mélange par le moyen d'équation d'état, ou bien d'expressions empiriques obtenues par analogie entre des analyses simplifiées et des expériences.

3.2.1.3. Transport des effets radiatifs

Le transfert de chaleur radiatif est inclus dans le modèle par la résolution de l'équation de transport radiatif pour un gaz gris non diffusif. La résolution est similaire à la méthode utilisée dans les volumes finis pour le transport convectif.

3.3. Modélisation en utilisant la technique LES

Une des approches ayant reçu une large part de développement ces 40 dernières années est la simulation des Grandes Echelles (en anglais LES pour Large Eddy Simulation). L'initiateur de cette approche, Smagorinsky propose dans son article fondateur en 1963, de considérer les contributions aux grandes échelles [15] (eg. Les grands courants atmosphériques). Cette approche résout les équations de Navier–Stokes instationnaires pour tous les mouvements de taille supérieure à une échelle fixée par le maillage disponible. Pour ce faire, on est amené à filtrer les équations pour ne simuler que les grosses structures porteuses de l'énergie et caractéristiques de

l'écoulement. Les petites structures des zones inertielles et dissipatives sont modélisées par des modèles type sous maille. Cette approche, formalisée par Léonard [16], fait apparaître des termes supplémentaires de tension de sous maille qui correspondent aux interactions entre grosses et petites structures. L'étude de ces interactions montre qu'elles ont deux rôles : d'une part elles régissent le flux d'énergie à travers la coupure entre les grandes échelles et les échelles de sous mailles et d'autre part, elles contribuent à la diffusion visqueuse [17].

3.4. Domaine de calcul

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 (3.2). Cet exemple correspond à la simulation des fumées dans un tronçon de tunnel de dimensions (50m x 8m x 5m) non ventilé.

```

Fichier Edition Format Affichage ?
&HEAD CHID=' PFE ', TITLE=' desenfumage' /
&GRID IBAR=200, JBAR=10, KBAR=20 / ..... (1)
&PDIM XBAR=200, YBAR=10, ZBAR=5 / ..... (2)

&TIME TWFIN=600.0 / ..... (3)

&MISC REACTION=' HEPTANE ', ..... (4)
      SURF_DEFAULT=' CONCRETE' /

&SURF ID=' FIRE ', HRRPUA=2500. , RGB=1, 0, 0 / ..... (5)

&SURF ID=' CONCRETE '
      RGB=0.66, 0.66, 0.66
      C_P=0.88
      DENSITY=2100.
      KS=1.4
      DELTA=1.0 /

&REAC ID=' HEPTANE '
      FYI=' Heptane, C_7 H_16 '
      MW_FUEL=100.
      NU_O2=11.
      NU_CO2=7.
      NU_H2O=8.
      CO_YIELD=0.006
      SOOT_YIELD=0.015 /

&VENT XB=99,101,4.,6.,0.,0. SURF_ID=' FIRE' /

&VENT PBX=0., RGB=0.6,0.6,0.6, SURF_ID=' OPEN' / ..... (6)
&VENT PBX=200, RGB=0.6,0.6,0.6, SURF_ID=' OPEN' / ..... (7)

&SLCF PBX=5.0, QUANTITY=' TEMPERATURE ', VECTOR=. TRUE. / ..... (8)
&SLCF PBZ=2.0, QUANTITY=' TEMPERATURE ', VECTOR=. TRUE. / ..... (9)
    
```

Fig.3.2 Exemple d'un fichier généré pour la simulation sous FDS

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

- La taille du domaine de calcul (200m x 10m x 5m) et le nombre de mailles (200x10x20), la taille de la maille est alors fixée :(1000mm) suivant x , (1000mm) suivant y , (250mm) suivant z , qui sont représentés aux lignes (1) et (2).
- La durée de la simulation (600s), l'heptane est choisi comme combustible et La réaction de combustion générée par le feu de bac dégage une puissance thermique par unité de surface de 2500 (kW/m²) aux lignes (3) (4) et (5).
- Les deux ouvertures du tunnel sont considérées comme « OPEN » (conditions atmosphériques de part et d'autre du tunnel aux lignes (6) et (7).
- Et, enfin, les plan ($y=5.0$; $z=2.0$) et les quantités que l'on souhaite visualiser à laide de *Smokeview* (outil spécifiquement conçu pour analyser les données produites par FDS) aux lignes (8) et (9).

3.5. Choix du maillage

Les simulations numériques sur FDS nécessitent des heures et voir même des jours pour s'exécuter sur des ordinateurs personnels. Le facteur qui influe sur le temps de calcul d'une manière plus significative est la taille de la maille. Parce qu'il est possible de choisir des tailles de mailles raffinées ou trop larges, il est important de déterminer une taille appropriée du maillage pour un domaine de calcul donné [18].

Six tailles de maillage ont été utilisées pour étudier l'influence de la taille du maillage sur la prédiction de la température et de la concentration de CO₂ dans le tronçon du tunnel. Les simulations ont été effectuées sur un tronçon de tunnel de 200m de long, 10m de large et 5m de hauteur. Pour toutes les simulations, un feu de bac d'heptane avec un taux de rejets de chaleur de 20 MW a été employé pour représenter un feu de camionnette.

Le tableau (3.1) résume les différents cas avec les tailles de maillage, le nombre des mailles, la température maximale et le temps de calcul.

Tableau.3.1 Taille de maillage et température maximale

Cas	Tailles (m)			Nb des mailles suivant les trois directions	Nombre total des mailles	Température maximale (°C)	Temps de calcul (h)
	Δx	Δy	Δz				
1 ^{er} cas	0.2	0.2	0.2	800×50×25	1 000 000	550	3.37
2 ^e cas	0.2	0.5	0.5	800×20×10	200 000	424	0.53
3 ^e cas	0.5	0.2	0.5	400×50×10	200 000	403	0.77
4^e cas	0.5	0.5	0.2	400×20×25	200 000	499	0.88
5 ^e cas	0.5	0.67	0.2	400×15×25	150 000	480	0.60
6 ^e cas	0.5	1	0.2	400×10×25	100 000	364	0.37

Les résultats de simulations des six cas sont présentés dans cette partie pour souligner l'effet de la taille du maillage sur l'estimation de la température. Dans les figures (3.3) et (3.4) on présente l'évolution de la température en fonction de la position le long d'un tronçon de tunnel. Elle montre la comparaison entre tous les cas. On remarque à partir des résultats de simulation obtenus pour le premier cas et le quatrième cas de maillage que les températures sont très proches par contre le temps de calcul est diminué par un facteur d'environ 4. Ceci s'explique par le fait que quand on affine le maillage dans l'une ou l'autre direction du domaine de calcul, on obtient des résultats plus au moins précis mais avec des temps de calcul variables. Puisque le flux est dirigé par la poussée d'Archimède, il est très influent. Le maillage du quatrième cas semble être le plus approprié. Ainsi, nous adopterons les dimensions de cellules de maille utilisées dans le quatrième cas pour la notre étude. Le cas 4 présente une précision des résultats presque égale à celle du cas 1.

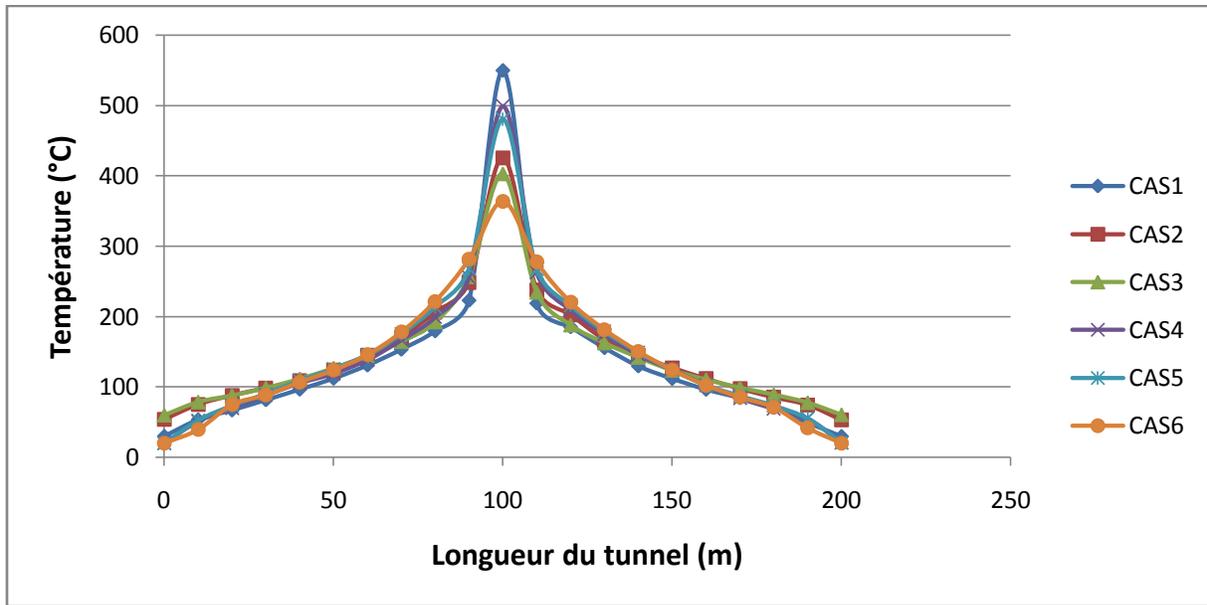


Fig.3.3 Comparaison de la température maximale pour tous les cas

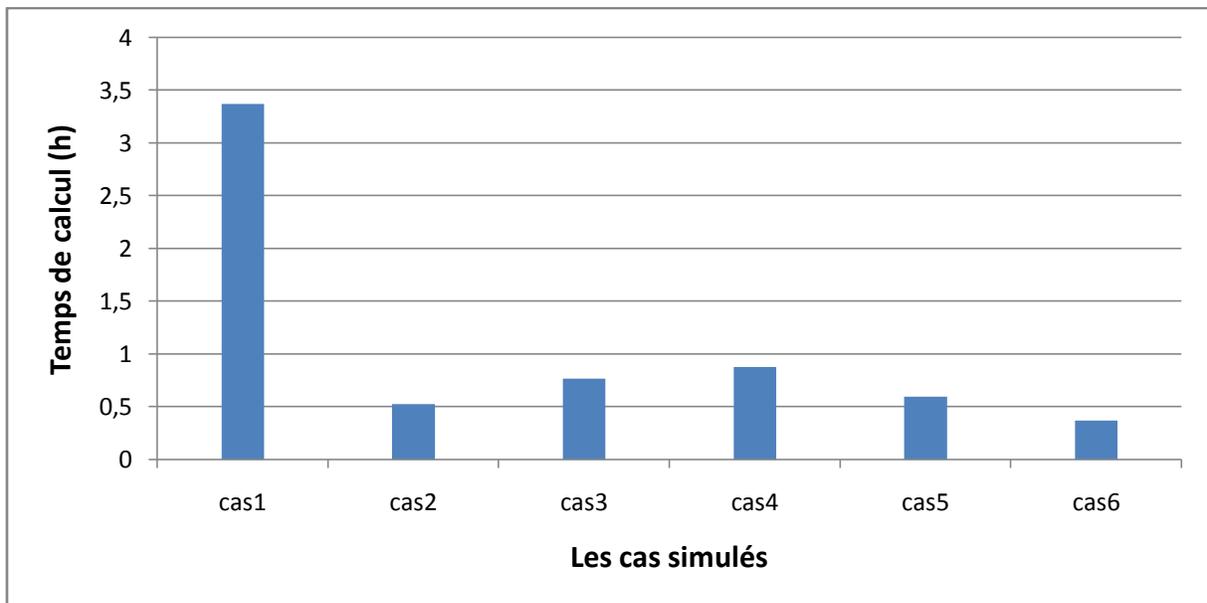


Fig.3.4 temps de calcul pour tous les cas

Chapitre 4

Etude Numérique

4.1. Introduction

Les phénomènes de propagation de feu et de fumée dans les tunnels sont très complexes à cause de l'architecture de l'ouvrage, ainsi que des systèmes de ventilation adoptés, ce qui rend difficile ou pratiquement impossible de concevoir une stratégie de sécurité globale pour tous les tunnels.

Ce chapitre est consacré à l'exécution de la stratégie transversale d'extraction de fumée pour un tunnel routier, et ceci en changeant les positions des trappes (au plafond ou sur les cotés latéraux). L'accent portera principalement sur la détermination des paramètres thermo-physiques tels que : la température, la concentration du CO₂, la vitesse, etc.

Pour ce faire, l'étude a été réalisée dans un tunnel de dimension de 200m de long, 10m de large et 5m de hauteur avec deux positions des trappes différentes. Dans le premier cas, on a utilisé quatre trappes de dimensions 2m×1m, deux trappes de chaque coté distancées l'un de l'autre de 70m (figure 4.1). Dans le deuxième cas les deux trappes de dimensions 2m×2m sont situées au plafond du tunnel et distancées de 70m l'une de l'autre, (figure 4.2).

On a considéré dans toute l'étude que le feu est situé au milieu du tunnel, et il est simulé par la combustion de l'heptane dans un bac de surface égale à 4m².

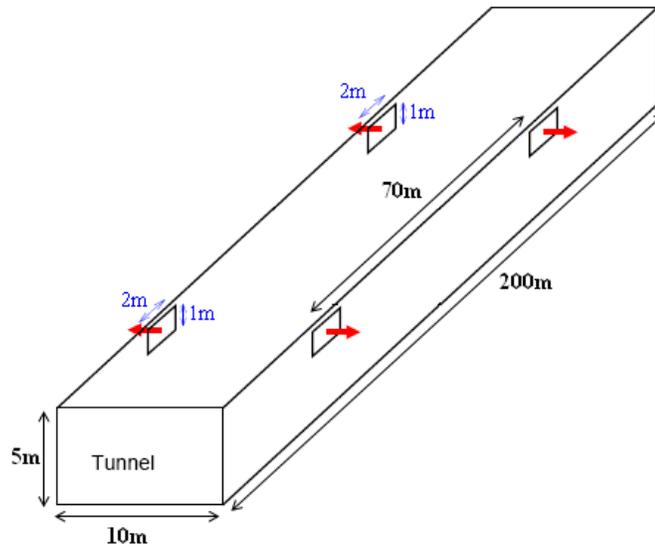


Fig.4.1 Schéma d'un tunnel avec des trappes latérales

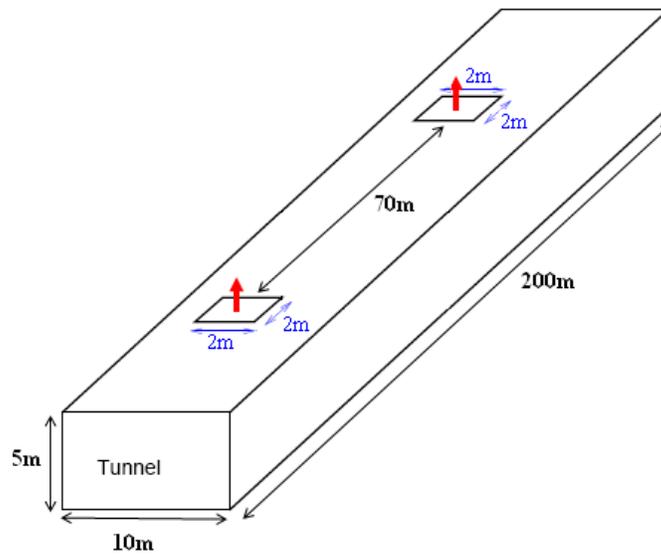


Fig.4.2 Schéma d'un tunnel avec des trappes au plafond

4.2. Vitesse de confinement

4.2.1. Définition

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 [19].

En cas de désenfumage, il est commode de régler les vitesses d'extraction à une vitesse dite de confinement. Cette vitesse est définie 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.

4.2.2. Evaluation de la vitesse de confinement

La méthode de détermination de la vitesse de confinement consiste à mesurer, pour plusieurs vitesses d'extraction et une puissance donnée, 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**.

Un exemple montre comment on détermine la vitesse de confinement pour une puissance thermique de 10MW. La simulation est effectuée sur un tronçon de tunnel avec des trappes au plafond (figure 4.2). Le feu est situé entre les deux trappes, il est simulé par la combustion de l'heptane dans un bac de surface égale à 4m², sa puissance thermique par unité de surface est 2500 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.

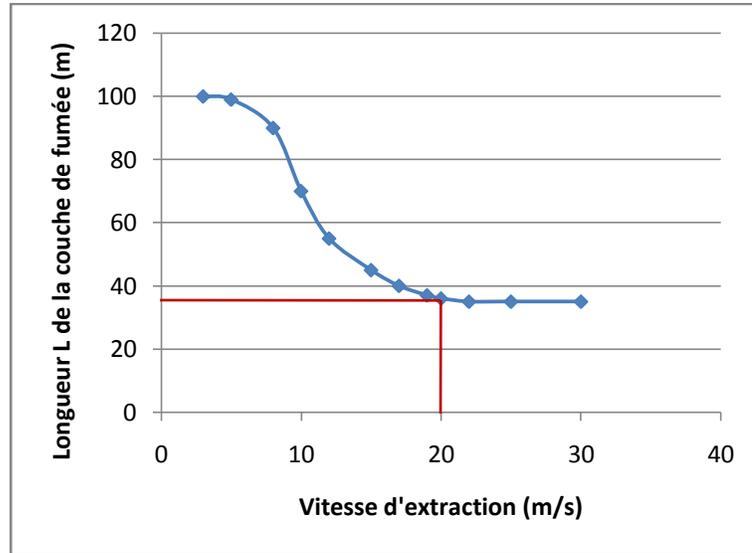


Fig.4.3 Variation de la longueur de la couche de fumée en fonction de la vitesse d'extraction pour une puissance de feu de 10 MW

L'évolution de la longueur de fumées stratifiées en fonction de la vitesse d'extraction est représentée dans la figure 4.3. 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 ; la longueur L de 35 m se stabilise à partir de cette vitesse. Cette distance correspond à la distance entre une trappe et le foyer. C'est la longueur qui correspond au confinement des fumées entre les deux trappes.

4.2.3. Evolution de la vitesse de confinement en fonction de la puissance du foyer

Les simulations pour la stratégie transversale avec les trappes situées au plafond et sur les cotés, ont été effectuées pour des puissances de feu variant entre 10MW et 150MW.

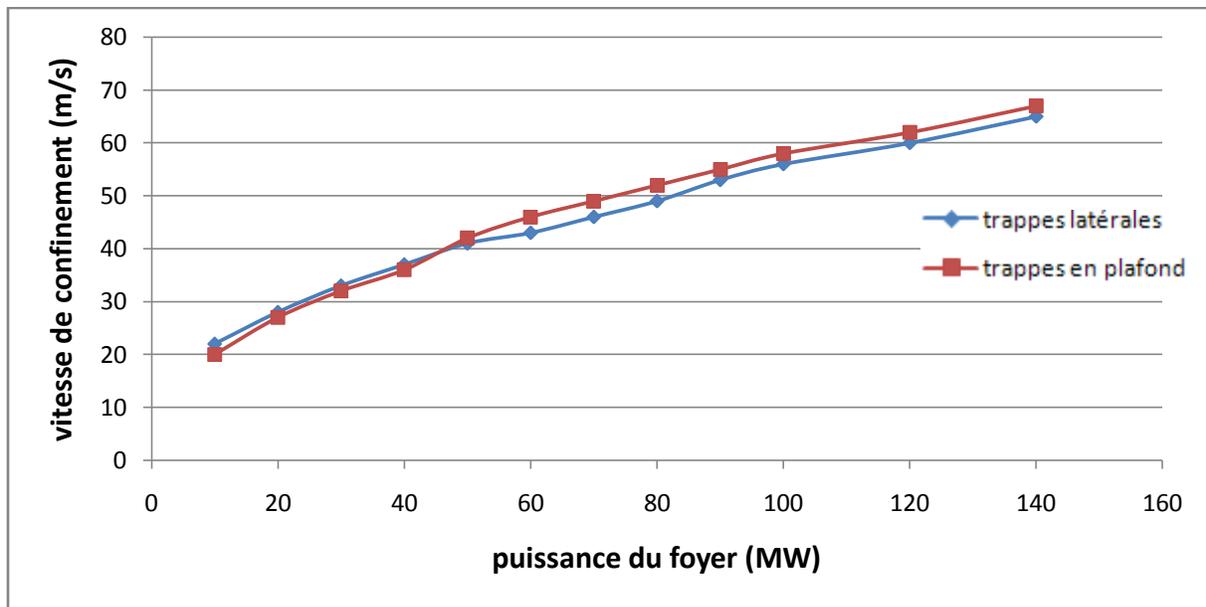


Fig.4.4. variation de la vitesse de confinement en fonction de la puissance du foyer

La figure 4.4 montre la variation de la vitesse de confinement en fonction de la puissance du foyer pour les deux modes d'extraction. On remarque que l'évolution de la vitesse de confinement est la même pour les deux modes d'extraction jusqu'à la puissance de 50 MW, elle est légèrement différente au delà de 50. Ceci n'empêche de dire que les deux systèmes d'aspiration ont le même profil. Il faut noter que les mesures sont effectuées visuellement, et par conséquent, elles manquent de précision.

4.3. Résultats et interprétations

Nous avons effectué des simulations pour deux scénarios différents avec des puissances thermiques égales à 10 MW (incendie d'une camionnette) et 100 MW (incendie d'un poids lourd avec marchandise dangereuse). Les résultats représentant les évolutions des différents paramètres physiques caractéristiques de la propagation de la fumée sont représentés et discutés dans ce qui suit.

4.3.1. Premier scénario

4.3.1.1. Distribution de la température

La figure 4.5 donne pour les deux positions des trappes, la variation de la température en fonction de longueur du tunnel à une hauteur de 2m, et après 300s de simulation. On observe que la température est quasi-constante et égale à 20°C de 0 à 60m et de 140 à 200m. Pour les positions 60-90 et 110-140, on constate une légère fluctuation de la température (de l'ordre 3 à 5°C). Une augmentation brusque de la température pour la position 100 est dû, au fait que les fumées issus du foyer sont emprisonnées entre les trappes et que la source de chaleur se trouve dans cette position au sol. On observe qu'il n'existe pas de différence entre les températures pour les deux modes d'extraction.

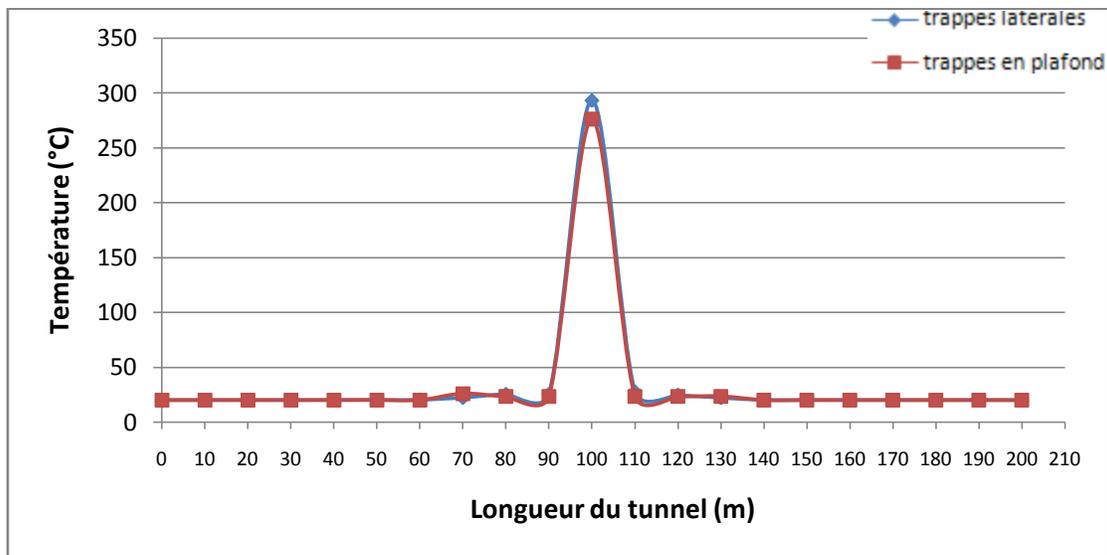


Fig.4.5 Variation de la température en fonction de la longueur du tunnel à la hauteur de 2m

Le graphe 4.6 illustre la distribution de la température en fonction du temps à la position $x=80m$ et à une hauteur de 2m. On remarque que l'aspiration avec des trappes latérales produit des températures légèrement supérieures mais elles restent dans la marge des fluctuations tolérées.

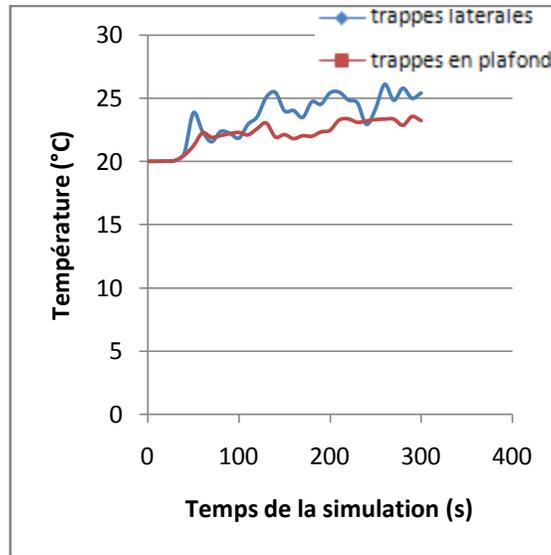


Fig.4.6 Distribution de la température en fonction du temps à x=80m

La figure 4.7 montre la variation de la température en fonction de la hauteur des deux tunnels. On remarque que la température augmente doucement jusqu'à la hauteur de 3m. Par la suite elle croit rapidement jusqu'au plafond. Il s'agit du phénomène de stratification des fumées. Le phénomène est identique pour les deux systèmes d'aspiration.

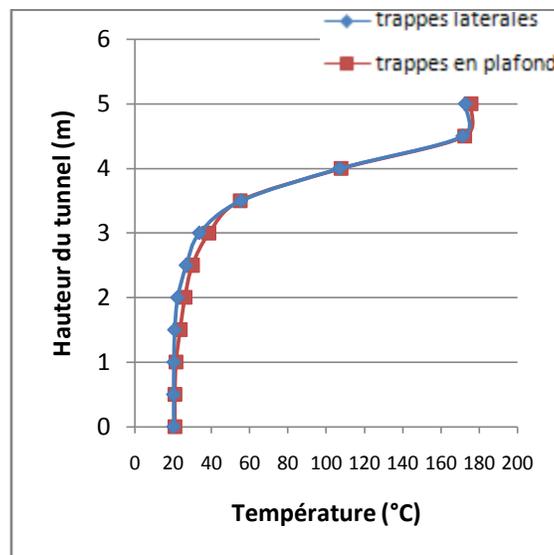


Fig.4.7 Profil de la température à x=80m après 300s

4.3.1.2. Concentration de CO₂

La figure 4.8 donne pour les deux positions des trappes, la variation de la concentration de CO₂ en fonction de la longueur du tunnel à une hauteur de 2m, et après 300s de simulation. On remarque que la concentration de CO₂ est stable et égale à la concentration de CO₂ dans l'air (0,03%), et ceci de 0 à 60m et de 140 à 200m. Pour les positions 60-90 et 110-140, on constate une petite augmentation de la concentration de CO₂, ensuite, une augmentation brusque pour la position 100m, avec celle du mode des trappes latérales est supérieure à celle du mode des trappes au plafond. Ceci est dû, au fait que les fumées sont emprisonnées entre les trappes. Ce qui explique maintenant l'augmentation brusque de la concentration de CO₂ est le fait que le foyer est situé à cette position. On observe qu'il n'existe pas de grande différence entre les températures pour les deux modes d'extraction.

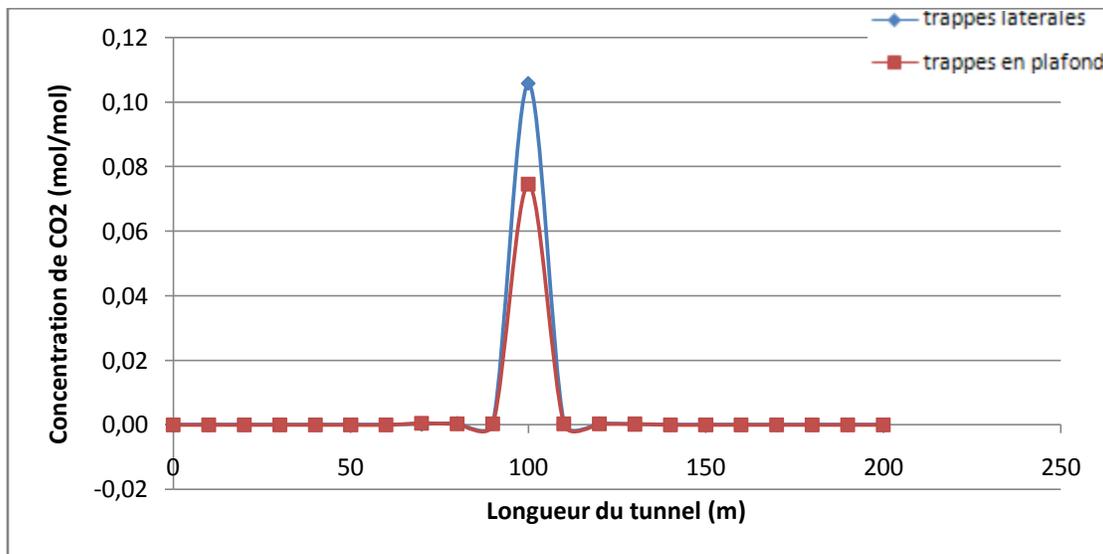


Fig.4.8 Variation de la concentration de CO₂ en fonction de la longueur du tunnel à la hauteur de 2m

Le graphique 4.9 illustre la distribution de la concentration de CO₂ en fonction du temps à la position $x=80m$ et à une hauteur de 2m. On observe qu'avec une aspiration latérale, la variation de la concentration de CO₂ est remarquable par rapport à une aspiration depuis le plafond, ça explique que l'extraction latérale engendre une perturbation de la fumée.

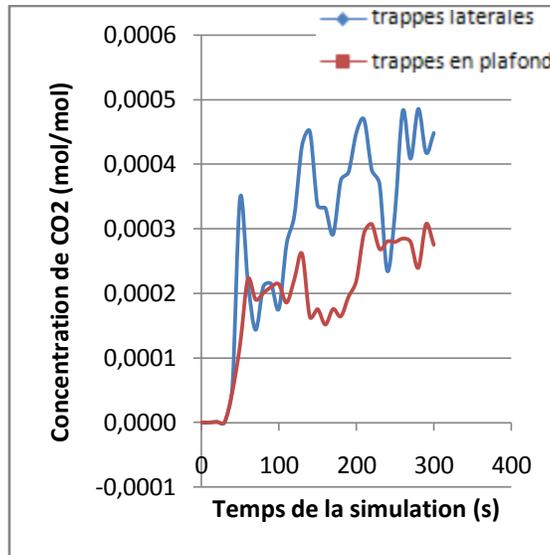


Fig.4.9 Distribution de la concentration de CO₂ en fonction du temps à x=80m

La figure 4.10 montre la variation de la concentration de CO₂ en fonction de la hauteur des deux tunnels. On remarque que la concentration de CO₂ augmente doucement jusqu'à la hauteur de 3m. Par la suite elle croit rapidement jusqu'au plafond. Il s'agit du phénomène de stratification des fumées.

Afin de déterminer la hauteur exacte de stratification des fumées, on trace la courbe de la vitesse de l'écoulement en fonction de la hauteur du tunnel (figure 4.11).

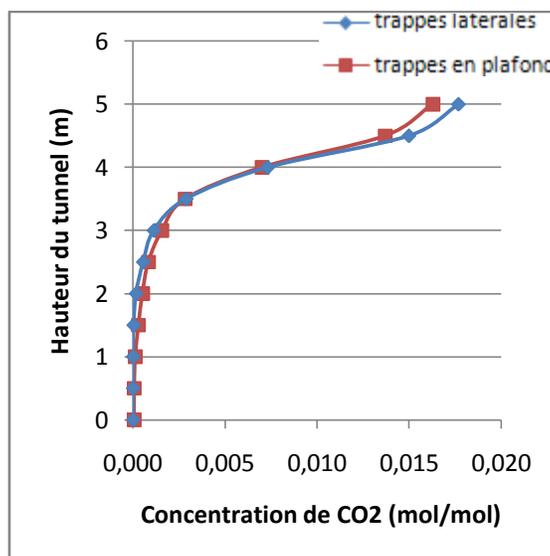


Fig.4.10 Profil de la concentration de CO₂ à x=80m après 300s

4.3.1.3. Vitesse de l'écoulement

La figure 4.11 présente, pour les deux positions des trappes tunnels, la variation de la vitesse de l'écoulement des fumées en fonction de la hauteur du tunnel, pour la position $x=80m$. On remarque que selon la hauteur, la vitesse peut être positive ou négative. Au niveau du plafond, où les vitesses sont négatives, la fumée se dirige vers les trappes d'extraction. Et pour une hauteur basse, les vitesses sont positives du fait qu'il y a un retour des fumées, qui est plus important pour l'extraction latérale que l'extraction depuis le plafond. Le retour des fumées n'a aucun impact sur les températures et les concentrations de CO_2 . On a déjà vu ça dans les graphes précédents. On remarque aussi que la hauteur de stratification des fumées avec une extraction latérale est presque la même que celui avec une extraction depuis le plafond. Ce niveau est égal à 3.5m.

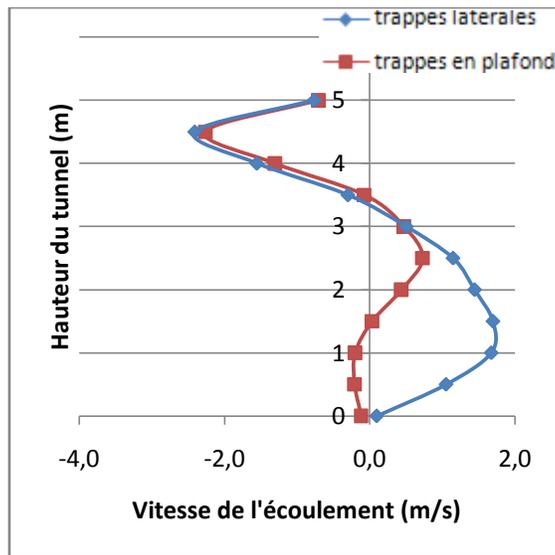


Fig.4.11 Profil de la vitesse de l'écoulement à $x=80m$

Conclusion

Cette partie nous permet de conclure que, et pour une puissance de 10MW, les deux systèmes d'aspiration sont similaires d'un point de vue du niveau de stratification des fumées qui est égale approximativement à 3.5m. En outre, le système à trappes latérales présente des petites perturbations des fumées par rapport au système à trappes au plafond.

4.3.2. Second scénario

4.3.2.1. Distribution de la température

La figure 4.12 donne pour les deux modes d'extraction, la variation de la température en fonction de longueur du tunnel à une hauteur de 2m, et après 300s de feu. On remarque que la température est stable et égale à 20°C, de 0 à 60m et de 140 à 200m. Pour les positions 60-90 et 110-140, on constate une augmentation de 40°C pour le mode des trappes au plafond, et de 50 pour le mode des trappes latérales, ceci est dû, au fait que les fumées sont emprisonnées entre les trappes d'extraction. L'augmentation brusque de la température à $x=100$ est le fait que le foyer est situé à cette position.

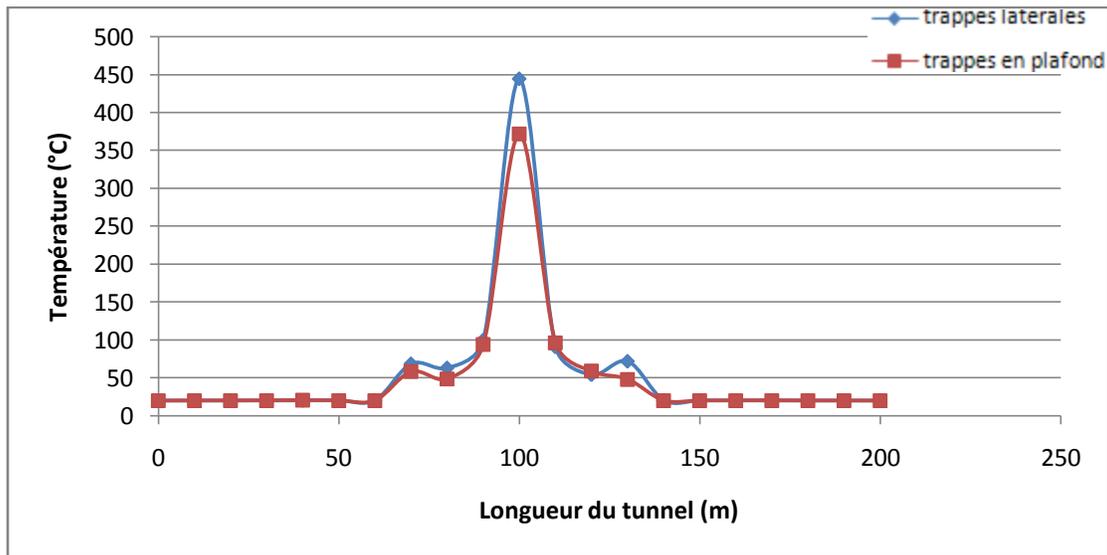


Fig.4.12 Variation de la température en fonction de la longueur du tunnel à la hauteur de 2m

Le graphe 4.13 illustre la distribution de la température en fonction du temps à la position $x=80m$, et à une hauteur de 2m. Et là on voit bien que l'aspiration avec des trappes latérales produit des températures supérieures, d'une moyenne de 20°C, à celle de l'aspiration avec des trappes au plafond.

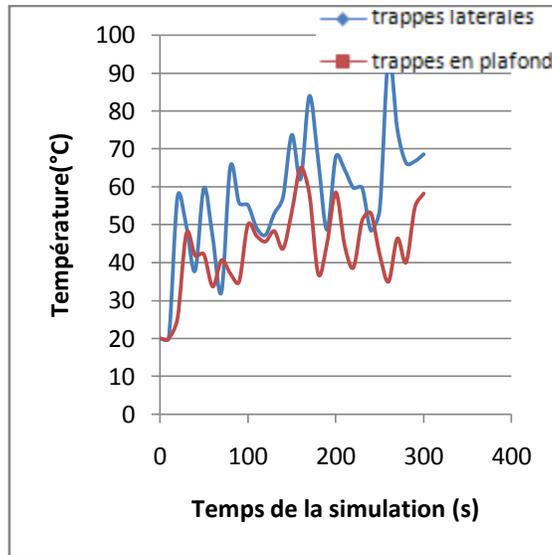


Fig.4.13 Distribution de la température en fonction du temps à x=80m

La figure 4.14 montre la variation de la température en fonction de hauteur du tunnel pour les deux modes d'extraction. On remarque que la température augmente doucement jusqu'à la hauteur de 2.5m. Par la suite elle croit rapidement jusqu'au plafond. Ceci est dû, au fait que à la hauteur de 2.5 les fumées se concentre, et c'est ce qu'on appel le phénomène de stratification des fumées.

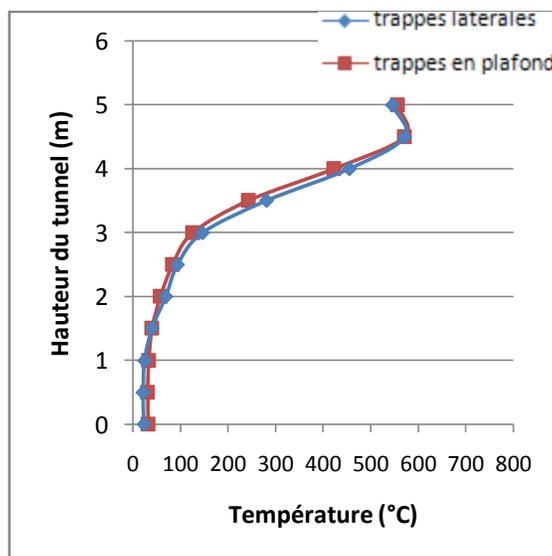


Fig.4.14 Profil de la température à x=80m après 300s

4.3.2.2. Concentration de CO_2

La figure 4.15 donne pour les deux positions des trappes, la variation de la concentration de CO_2 en fonction de leurs longueurs à une hauteur de 2m, et après 300s de simulation. On remarque que la concentration de CO_2 est stable et égale à la concentration de CO_2 dans l'air (0,03%), et ceci de 0 à 60m et de 140 à 200m. Pour les positions 60-90 et 110-140, on constate une augmentation de la concentration de CO_2 jusqu'à 0,25%, et on remarque cela sur la figure 4.16 à l'instant 300s. Ensuite, une augmentation brusque pour la position 100m, avec celle du mode des trappes latérales supérieure à celle du mode des trappes au plafond. Ceci est dû, au fait que les fumées sont emprisonnées entre les trappes. Ce qui explique maintenant l'augmentation brusque de la concentration de CO_2 est le fait que le foyer est situé à cette position.

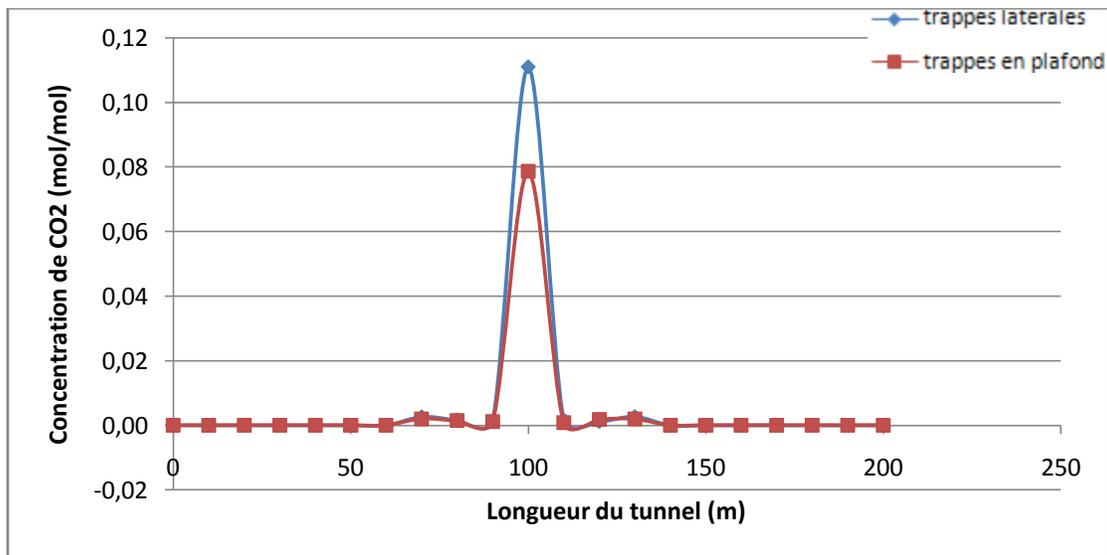


Fig.4.15 Variation de la concentration de CO_2 en fonction de la longueur du tunnel à la hauteur de 2m

Le graphique 4.16 illustre la distribution de la concentration de CO_2 en fonction du temps à la position $x=80m$ (entre les trappes et le foyer), et à une hauteur de 2m. On observe que les concentrations de CO_2 du mode des trappes latérales sont supérieures à celle du mode des trappes au plafond. En outre, les deux modes d'extraction engendrent des perturbations de la fumée, cependant, les perturbations engendrées par le mode des trappes latérales sont plus importantes.

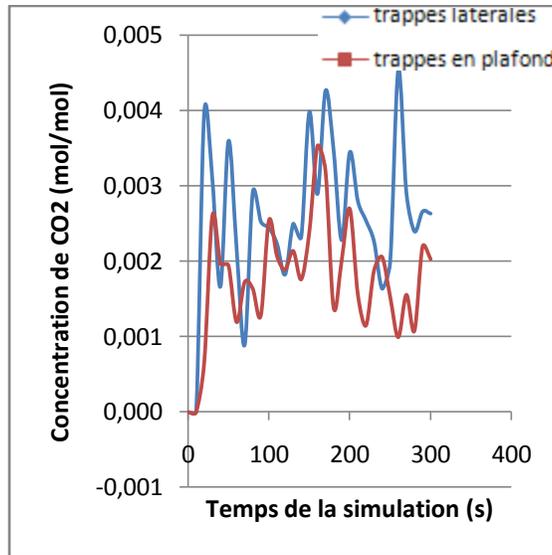


Fig.4.16 Distribution de la concentration de CO₂ en fonction du temps à x=80m

La figure 4.17 montre pour les deux positions des trappes, la variation de la concentration de CO₂ en fonction de la hauteur du tunnel. On remarque que la concentration de CO₂ augmente doucement jusqu'à la hauteur de 3m. Par la suite elle croit rapidement jusqu'au plafond. A cette hauteur les fumées se concentre, et c'est ce qu'on appelle le phénomène de stratification des fumées.

Afin de déterminer la hauteur exacte de stratification des fumées, on trace la courbe de la vitesse de l'écoulement en fonction de la hauteur du tunnel.

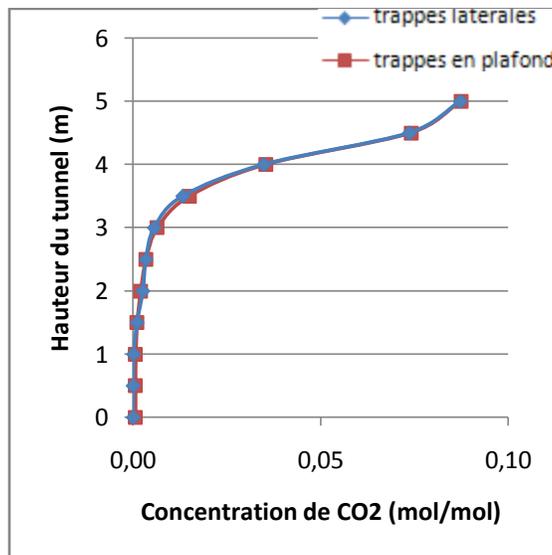


Fig.4.17 Profil de la concentration de CO₂ à x=80m après 300s

4.3.2.3. Vitesse de l'écoulement

La figure 4.18 présente, pour les deux positions des trappes, la variation de la vitesse de l'écoulement des fumées en fonction de la hauteur du tunnel, pour une position entre les trappes et le foyer ($x=80m$). On remarque que selon la hauteur, la vitesse peut être positive ou négative. Au niveau du plafond, où les vitesses sont négatives, la fumée se dirige vers les trappes d'extraction. Et pour une hauteur basse, les vitesses sont positives du fait qu'il y a un retour des fumées, qui est plus important pour l'extraction latérale que l'extraction depuis le plafond. On remarque aussi que le niveau de stratification des fumées avec une extraction latérale est inférieur à celui avec une extraction depuis le plafond. Ce niveau est égal à 2.5m pour le mode des trappes latérales, et à 3m pour le mode des trappes au plafond.

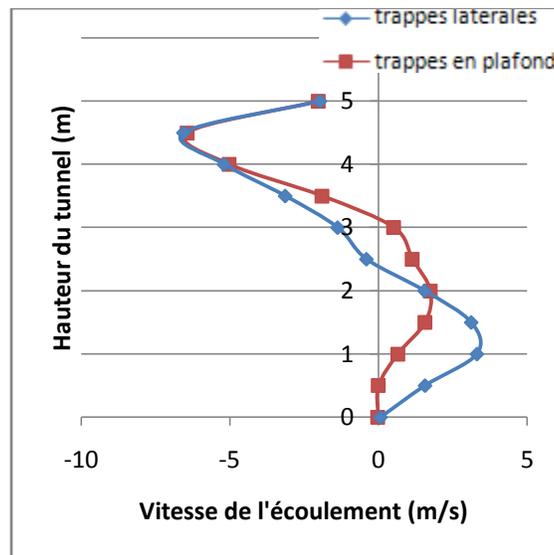


Fig.4.18 Profil de la vitesse de l'écoulement à $x=80m$

Conclusion

Dans cette partie, on a remarqué que l'extraction avec des trappes au plafond est meilleure que celle des trappes latérales. Ceci en termes de hauteur de stratification des fumées. L'extraction avec des trappes au plafond donne une hauteur de stratification des fumées supérieure à celle de l'extraction avec des trappes latérales

Conclusion

Dans ce mémoire nous présentons une étude relative à la dynamique des fumées dans les milieux confinés. L'objectif de celle-ci était de simuler numériquement le désenfumage d'un tunnel pour déterminer l'influence des positions des trappes, à l'aide du logiciel de simulation numérique spécialisé dans ce domaine, FDS (*Fire dynamic Simulator*), version 4.07.

La première partie a été consacrée à l'analyse des incidents dans les milieux confinés. Elle nous a permis de comprendre les causes et les conséquences qui leurs sont liées.

Dans la deuxième partie, nous avons étudié le concept de fumée, en définissant les caractéristiques des fumées, leurs modes de propagation et les forces qui pilotent leurs mouvements, ainsi leurs dangers sur la santé des humains et sur les matériaux présents dans le bâtiment incendié.

Dans la troisième partie, une description du code de calcul FDS a été entreprise, en présentant les modèles mathématiques qui permettent au logiciel de simuler les mécanismes de transferts de chaleur et de matière. L'étape d'apprentissage du code nous a pris un temps considérable vu que nous n'avons reçu aucune formation pour ce logiciel. Pour cela nous avons réalisé 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 z sur le temps de calcul et surtout sur la précision des résultats. Notre conclusion sur cette analyse concorde avec celle de Kashef [18].

Dans le dernier chapitre, on a étudié numériquement le désenfumage d'un tunnel équipé de systèmes différents de ventilation. Le premier à trappes latérales et le second à trappes au plafond. Les résultats ont montré, pour un feu de faible puissance (10MW), que les deux stratégies sont pareilles. Par contre pour un feu de forte puissance (100MW), la stratégie des trappes au plafond est meilleure.

Références Bibliographiques

- [1] Rapport d'étude, "Incendie en milieu confiné", INRIS.DRA.INVE, N° :46055-C70050, Sciences of Middle East Technical University, 2007.
- [2] Carlotti P., "Mécanique des fluide 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 doctort, Université Claude Bernard-Lyon I, 2005.
- [4] Martel C., "ventilation et sécurité incendie d'une zone expérimentale", CERN.
- [5] Abdellaoui C., BenMiloud K., "étude expérimentale sur la propagation des fumées dans une enceinte confinée avec recirculation d'air forcée", ENP, Algérie, 2004.
- [6] OUAREM A., "Etude sur maquette de la propagation des fumées d'incendie d'un locale « source » vers un locale « cible » ventilé mécaniquement", ENP, Algérie, 2005.
- [7] Josian Ray., "Le mouvement des fumées", M. Science Chimie Journal, Janvier 2007.
- [8] Préfecture de Police, "Prévision des incendies d'immeubles", Compagne National de Prévision des Incendies Domestiques, 2004.
- [9] Ferdinand Schad KG., "Déecteur de fumée", SCHAKO Aération-Ventilation.
- [10] Ministre d'Etat, ministre de l'intérieur et de la décentralisation et le ministre d'Etat, ministre des transports, "Règles de sécurité applicables aux gares (G A), Arrêté du 20 février 1983", Journal officiel - NC du 23 avril 1983.
- [11] 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 Méditerrané Aix – Marseille II, 2007.
- [12] Kashef A., Bénichou N. and Loughheed G., "Numerical Modelling of Movement and Behaviour of Smoke Produced from Fires in the Ville-Marie and L.-H.", La Fontaine Tunnels Literature Review, IRC-RR-141, 2003.
- [13] Kevin McGrattan., "Fire Dynamics Simulator (Version 4), User's Guide", National

Institute of Standard Technology, 2006.

- [14] Kevin McGrattan., "Fire Dynamics Simulator (Version 4), Technical Reference Guide", National Institute of Standard Technology, 2006.
- [15] CHATELAIN A., "Simulation des Grandes Echelles d'Écoulements Turbulents avec Transferts de Chaleur", Thèse de Doctorat, INP Grenoble, France, 2005.
- [16] Leonard A., "Energy Cascade in Large Eddy Simulation of Turbulent Fluid Flows", *Geophysics*, 18,237-248, 1974.
- [17] Chabni A., "Étude par méthodologie de type Simulation des Grosses Structures de la dynamique de l'interaction et des échanges entre une couche limite et une encoche", Thèse de Doctorat en Sciences de l'Université Paris XI, 1997.
- [18] Bounagui A., Kashef A. and Bénichou N., "CFD simulation of the fire dynamique 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.
- [19] Dossier pilote des tunnels-Equipement-Section 4.1-Ventilation, document, Centre d'étude des tunnels (CETU), Novembre 2003.

Annexes

Annexe A : Résolution numérique de FDS

1. Modèle hydrodynamique :

La résolution des équations simplifier de la dynamique des fluides fait à l'aide de la méthode des volumes finis entrées de second ordre et les variables sont mis à jour dans le temps par un algorithme de type prédiction-correction d'une précision de second ordre. Le maillage est structuré, cartésien et décalé : les variables scalaires sont calculées au centre des mailles tandis que les variables vectorielles sont définies au centre des faces des mailles.

En simplifions les équations de Navier-Stocks, on aura :

Conservation de la masse :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \rho = -\rho \vec{\nabla} \cdot \vec{u}$$

Equation de la conservation des espèces :

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

Conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u} \times \vec{\omega} + \vec{\nabla} H = \frac{1}{\rho} (\rho - \rho_0) \vec{g} + \vec{f} + \vec{\nabla} \cdot \tau_{ij}$$

Equation des gaz parfaits :

$$\bar{p}_m = \rho RT \sum_i \frac{Y_i}{W_i}$$

2. Discrétisation temporelle :

Discrétisation de la densité :

$$\rho^{n+1} = \frac{1}{2} (\rho^n + \rho^{(n+1)e} - \delta t (u^{(n+1)e} \cdot \nabla \rho^{(n+1)e} + \rho^{(n+1)e} \cdot \nabla u^{(n+1)e}))$$

Discrétisation de la pression :

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

Discrétisation de la vitesse :

$$u^{n+1} = \frac{1}{2} [u^n + u^{(n+1)e} - \delta t (F^{(n+1)e} + \nabla H^{(n+1)e})]$$

3. Discrétisation spatiale :

Les dérivées spatiales dans les équations gouvernantes sont écrites en utilisant la méthode des différences finies (de second ordre) sur une grille rectiligne. Le domaine total est divisé en plusieurs maille en assignant les indices i, j et k , qui représentent la position dans les directions x, y et z respectivement. Les quantités scalaires sont assignées au centre de chaque maille [15].

Equation de Transport de la masse :

La densité au centre de l' $i j k$ maille est mise à jour dans le temps avec l'algorithme prédiction-correction suivant. Dans l'étape de prédiction, la densité au $(n + 1)^{\text{ème}}$ pas de temps est estimé sur la base des renseignements au niveau $n^{\text{ème}}$.

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

Après l'étape de la prédiction de la vitesse et de la pression à la $(n+1)^{\text{ème}}$ étape, la densité est corrigé comme suit :

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

L'équation de la conservation des espèces est différenciée de la même façon :

$$\frac{(\rho Y_i)_{ijk}^{(n+1)e} - (\rho Y_i)_{ijk}^n}{\delta t} + (u \cdot \nabla \rho Y_i)_{ijk}^n = -(\rho Y_i)_{ijk}^n (\nabla \cdot u)_{ijk}^n + (\nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i)_{ijk}^n + \dot{m}_{i,ijk}'''$$

Et à l'étape suivante de la prédiction :

$$\begin{aligned} & \frac{(\rho Y_i)_{ijk}^{(n+1)} - \frac{1}{2} \left((\rho Y_i)_{ijk}^n + (\rho Y_i)_{ijk}^{(n+1)e} \right)}{\frac{1}{2} \delta t} + (u \cdot \nabla \rho Y_i)_{ijk}^{(n+1)e} \\ & = -(\rho Y_i)_{ijk}^{(n+1)e} (\nabla \cdot u)_{ijk}^{(n+1)e} + (\nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i)_{ijk}^{(n+1)e} + \dot{m}_{i,ijk}''' \end{aligned}$$

Annexe B : Exemple d'un fichier input de FDS

```

&HEAD CHID='PFE',TITLE='desenfumage'/
&GRID IBAR=400,JBAR=20,KBAR=25/
&PDIM XBAR=200,YBAR=10,ZBAR=5/

&TIME TWFIN=300.0/
&MISC REACTION='HEPTANE', SURF_DEFAULT='CONCRETE'/

&SURF ID='FIRE' ,HRRPUA=2500. ,RGB=1, 0, 0/

&SURF ID='CONCRETE'
  RGB=0.66, 0.66, 0.66
  C_P=0.88
  DENSITY=2100.
  KS=1.4
  DELTA=1.0 /

&REAC ID='HEPTANE'
  FYI='Heptane, C_7 H_16'
  MW_FUEL=100.
  NU_O2=11.
  NU_CO2=7.
  NU_H2O=8.
  CO_YIELD=0.006
  SOOT_YIELD=0.015 /

&VENT XB=99,101,4.,6.,0.,0. SURF_ID='FIRE' /

/ TUNNEL
&VENT PBX=0.,RGB=0.6,0.6,0.6,SURF_ID='OPEN'/
&VENT PBX=200,RGB=0.6,0.6,0.6,SURF_ID='OPEN'/

/ Trappes latérales
&SURF ID='BLOWER',VEL=22.,TMPWAL=20./
&VENT XB=64,66,0.,0.,4.,5.,RGB=1.,1.,0.,SURF_ID='BLOWER'/
&VENT XB=134,136,0.,0.,4.,5.,RGB=1.,1.,0.,SURF_ID='BLOWER'/
&VENT XB=64,66,10.,10.,4.,5.,RGB=0.,1.0,0.0,SURF_ID='BLOWER'/
&VENT XB=134,136,10.,10.,4.,5.,RGB=0.,1.0,0.0,SURF_ID='BLOWER'/

/ Trappes en plafond
&SURF ID='BLOWER',VEL=20.,TMPWAL=20./
&VENT XB=64,66,4.,6.,5.,5.,RGB=1.,1.,0.,SURF_ID='BLOWER'/
&VENT XB=134,136,4.,6.,5.,5.,RGB=1.,1.,0.,SURF_ID='BLOWER'/

&SLCF PBx=70,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBx=80,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBx=90,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBx=5.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBz=2.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /

/Thermocouple temperature horizontale z=2m
&THCP XYZ=0.0,5.0,2,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp x0 m/'

```

&THCP XYZ=10.0,5.0,2,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp x10 m' /
 &THCP XYZ=20.0,5.0,2,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp x20 m' /
 &THCP XYZ=30.0,5.0,2,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp x30 m' /
 &THCP XYZ=40.0,5.0,2,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp x40 m' /
 &THCP XYZ=50.0,5.0,2,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp x50 m' /
 &THCP XYZ=60.0,5.0,2,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp x60 m' /
 &THCP XYZ=70.0,5.0,2,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp x70 m' /
 &THCP XYZ=80.0,5.0,2,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp x80 m' /
 &THCP XYZ=90.0,5.0,2,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp x90 m' /
 &THCP XYZ=100.0,5.0,2,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp x100 m' /
 &THCP XYZ=110.0,5.0,2,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp x110 m' /
 &THCP XYZ=120.0,5.0,2,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp x120 m' /
 &THCP XYZ=130.0,5.0,2,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp x130 m' /
 &THCP XYZ=140.0,5.0,2,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp x140 m' /
 &THCP XYZ=150.0,5.0,2,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp x150 m' /
 &THCP XYZ=160.0,5.0,2,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp x160 m' /
 &THCP XYZ=170.0,5.0,2,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp x170 m' /
 &THCP XYZ=180.0,5.0,2,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp x180 m' /
 &THCP XYZ=190.0,5.0,2,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp x190 m' /
 &THCP XYZ=200.0,5.0,2,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp x200 m' /

/Thermocouple temperature verticale x=80m

&THCP XYZ=80,5,0,0,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp z0 m' /
 &THCP XYZ=80,5,0,0,5,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp z0.5 m' /
 &THCP XYZ=80,5,0,1,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp z1 m' /
 &THCP XYZ=80,5,0,1,5,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp z1.5 m' /
 &THCP XYZ=80,5,0,2,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp z2 m' /
 &THCP XYZ=80,5,0,2,5,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp z2.5 m' /
 &THCP XYZ=80,5,0,3,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp z3 m' /
 &THCP XYZ=80,5,0,3,5,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp z3.5 m' /
 &THCP XYZ=80,5,0,4,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp z4 m' /
 &THCP XYZ=80,5,0,4,5,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp z4.5 m' /
 &THCP XYZ=80,5,0,5,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp z5 m' /

/Thermocouple CO2 horizontale z=2m

&THCP XYZ=0.0,5.0,2,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 x0 m' /
 &THCP XYZ=10.0,5.0,2,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 x10 m' /
 &THCP XYZ=20.0,5.0,2,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 x20 m' /
 &THCP XYZ=30.0,5.0,2,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 x30 m' /
 &THCP XYZ=40.0,5.0,2,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 x40 m' /
 &THCP XYZ=50.0,5.0,2,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 x50 m' /
 &THCP XYZ=60.0,5.0,2,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 x60 m' /
 &THCP XYZ=70.0,5.0,2,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 x70 m' /
 &THCP XYZ=80.0,5.0,2,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 x80 m' /
 &THCP XYZ=90.0,5.0,2,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 x90 m' /
 &THCP XYZ=100.0,5.0,2,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 x100 m' /
 &THCP XYZ=110.0,5.0,2,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 x110 m' /
 &THCP XYZ=120.0,5.0,2,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 x120 m' /
 &THCP XYZ=130.0,5.0,2,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 x130 m' /
 &THCP XYZ=140.0,5.0,2,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 x140 m' /
 &THCP XYZ=150.0,5.0,2,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 x150 m' /
 &THCP XYZ=160.0,5.0,2,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 x160 m' /
 &THCP XYZ=170.0,5.0,2,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 x170 m' /
 &THCP XYZ=180.0,5.0,2,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 x180 m' /
 &THCP XYZ=190.0,5.0,2,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 x190 m' /
 &THCP XYZ=200.0,5.0,2,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 x200 m' /

/Thermocouple CO2 verticale x=80m

&THCP XYZ=80,5.0,0,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 z0 m' /
 &THCP XYZ=80,5.0,0.5,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 z0.5 m' /
 &THCP XYZ=80,5.0,1,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 z1 m' /
 &THCP XYZ=80,5.0,1.5,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 z1.5 m' /
 &THCP XYZ=80,5.0,2,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 z2 m' /
 &THCP XYZ=80,5.0,2.5,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 z2.5 m' /
 &THCP XYZ=80,5.0,3,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 z3 m' /
 &THCP XYZ=80,5.0,3.5,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 z3.5 m' /
 &THCP XYZ=80,5.0,4,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 z4 m' /
 &THCP XYZ=80,5.0,4.5,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 z4.5 m' /
 &THCP XYZ=80,5.0,5,QUANTITY='carbon dioxide',LABEL='CO2 z5 m' /

/Thermocouple vitesse horizontale z=2m

&THCP XYZ=0.0,5.0,2,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U x0 m' /
 &THCP XYZ=10.0,5.0,2,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U x10 m' /
 &THCP XYZ=20.0,5.0,2,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U x20 m' /
 &THCP XYZ=30.0,5.0,2,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U x30 m' /
 &THCP XYZ=40.0,5.0,2,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U x40 m' /
 &THCP XYZ=50.0,5.0,2,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U x50 m' /
 &THCP XYZ=60.0,5.0,2,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U x60 m' /
 &THCP XYZ=70.0,5.0,2,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U x70 m' /
 &THCP XYZ=80.0,5.0,2,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U x80 m' /
 &THCP XYZ=90.0,5.0,2,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U x90 m' /
 &THCP XYZ=100.0,5.0,2,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U x100 m' /
 &THCP XYZ=110.0,5.0,2,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U x110 m' /
 &THCP XYZ=120.0,5.0,2,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U x120 m' /
 &THCP XYZ=130.0,5.0,2,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U x130 m' /
 &THCP XYZ=140.0,5.0,2,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U x140 m' /
 &THCP XYZ=150.0,5.0,2,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U x150 m' /
 &THCP XYZ=160.0,5.0,2,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U x160 m' /
 &THCP XYZ=170.0,5.0,2,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U x170 m' /
 &THCP XYZ=180.0,5.0,2,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U x180 m' /
 &THCP XYZ=190.0,5.0,2,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U x190 m' /
 &THCP XYZ=200.0,5.0,2,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U x200 m' /

/Thermocouple vitesse verticale x=80m

&THCP XYZ=80,5.0,0,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U z0 m' /
 &THCP XYZ=80,5.0,0.5,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U z0.5 m' /
 &THCP XYZ=80,5.0,1,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U z1 m' /
 &THCP XYZ=80,5.0,1.5,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U z1.5 m' /
 &THCP XYZ=80,5.0,2,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U z2 m' /
 &THCP XYZ=80,5.0,2.5,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U z2.5 m' /
 &THCP XYZ=80,5.0,3,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U z3 m' /
 &THCP XYZ=80,5.0,3.5,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U z3.5 m' /
 &THCP XYZ=80,5.0,4,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U z4 m' /
 &THCP XYZ=80,5.0,4.5,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U z4.5 m' /
 &THCP XYZ=80,5.0,5,QUANTITY='U-VELOCITY',LABEL='U z5 m' /

&BNDF QUANTITY='WALL_TEMPERATURE' /

&BNDF QUANTITY='GAUGE_HEAT_FLUX' /

&BNDF QUANTITY='BURN_DEPTH' /