

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
Ecole Nationale Polytechnique



DEPARTEMENT DE MAITRISE DES RISQUES INDUSTRIELS ET ENVIRONNEMENTAUX

Filière : QHSE-GRI

Mémoire de post-graduation spécialisée en QHSE-GRI

Contribution à l'analyse du risque issu de
l'écoulement des fumées dans une station

Sous-terrain de Métro

Slimane AMARI

Sous la direction de :

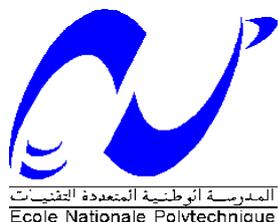
Mr Bouzid BENKOUSSAS, Prof	ENP
Mr Mohamed BOUBAKEUR, MAA	ENP
Mr M'hamed BOUSBAI, MAA	ENP

Présenté et soutenu publiquement le 29 avril 2018

Composition du jury :

Président :	Mr Salah LARBI, Prof	ENP
Promoteurs	Mr Bouzid BENKOUSSAS, Prof	ENP
	Mr Mohamed BOUBAKEUR, MAA	ENP
	Mr M'hamed BOUSBAI, MAA	ENP
Examineur :	Mr Mohamed Tarek ATTOUCHI, MAA	ENP
Invité :	Colonel Farid NECHAB	DGPC
	Lieutenant-colonel Ali GHARBI	DGPC

Ecole Nationale Polytechnique



DEPARTEMENT DE MAITRISE DES RISQUES INDUSTRIELS ET ENVIRONNEMENTAUX

Filière : QHSE-GRI

Mémoire de post-graduation spécialisée en QHSE-GRI

Contribution à l'analyse du risque issu de l'écoulement des fumées dans une station Sous-terrainne de Métro

Slimane AMARI

Sous la direction de :

Mr Bouzid BENKOUSSAS, Prof	ENP
Mr Mohamed BOUBAKEUR, MAA	ENP
Mr M'hamed BOUSBAL, MAA	ENP

Présenté et soutenu publiquement le 29 avril 2018

Composition du jury :

Président :	Mr Salah LARBI, Prof	ENP
Promoteurs	Mr Bouzid BENKOUSSAS, Prof	ENP
	Mohamed BOUBAKEUR, MAA	ENP
	Mr M'hamed BOUSBAL, MAA	ENP
Examineur :	Mr Mohamed Tarek ATTOUCHI, MAA	ENP
Invité :	Colonel Farid NECHAB	DGPC
	Lieutenant-colonel Ali GHARBI	DGPC

ملخص

هذا العمل هو دراسة رقمية لإنتشار الدخان وإستخراجه في حالة نشوب حريق في محطة مترو أنفاق نموذجية. الهدف من هذه الدراسة هو البحث عن أكثر سيناريوهات الحرائق خطورة لسلامة الركاب على أساس المحاكاة الرقمية باستخدام برنامج المحاكاة الرقمية FDS. تتمثل استراتيجية استخراج الدخان التي تمت دراستها في هذه العمل في الحفاظ على التقسيم الطبقي للأبخرة واستخلاصها من خلال الفتحات الموجودة على مستوى السقف.

كلمات البحث: محاكاة ، دخان ، إنتشار ، محطة مترو الانفاق ، استخراج الدخان.

Abstract

The present work is a numerical study of the propagation and extraction of smoke in case of fire in a typical subway station. The goal of this study is to search for the most critical fire scenario for the security of passengers, while leaning on numerical simulations with the help of the numerical software simulation FDS. The strategy of extraction of smoke considered in this study consists in maintaining the stratification of smokes and extracting them by trap situated in the ceiling.

Key words: Simulation numerical, Smoke, Propagation, Subway Station, Extraction.

Résumé

Le présent travail est une étude numérique de la propagation des fumées et de désenfumage en cas d'incendie dans une station de métro typique. Le but de cette étude est de rechercher les scénarios d'incendie les plus critiques pour la sécurité des passagers en s'appuyant sur des simulations numériques à l'aide du logiciel de simulation numérique FDS. La stratégie de désenfumage considérée dans cette étude consiste à maintenir la stratification des fumées et à les extraire par des trappes situées au plafond.

Mots clés : Simulation numérique, Fumée, Propagation, Station de métro, désenfumage,

Dédicaces

Je dédie ce travail à

*A ceux qui n'ont jamais cessé de m'encourager et de
me soutenir, à ceux qui leur amour m'a donné la
volonté d'aller toujours vers l'avant*

A mes très chers parents, que Dieu les

protège

A tous mes amis et collègues.

Remerciements

Je remercie avant tout Dieu le tout puissant de m'avoir donné la foi, la volonté et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je remercie les responsables de la direction Générale de la Protection civile qui nous ont donné la chance de suivre cette formation

Je remercie tous les professeurs du département MRIE ainsi que tous les enseignants de l'école nationale polytechnique, pour leurs encouragements et leurs soutiens le long de la formation.

Merci aux membres du jury, d'avoir pris le temps et le soin de lire ce travail.

Je remercie toutes les personnes qui ont contribué implicitement ou explicitement pour la réalisation de ce travail

Sommaire

Résumé

Nomenclature

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale..... 11

CHAPITRE 1

1. historique des incendies de métro.....13

1.1 Introduction.....13

1.2. Revue Bibliographique 14

1.2.1. Introduction 14

1.2.2. Etudes antérieures 14

1.3. Conclusion 17

1.4. Description de la problématique 18

CHAPITRE 2

2.1. Introduction 21

2.2. Feu et combustion 21

2.2.1. Combustible..... 21

2.2.2. Comburant 21

2.2.3. Source d'énergie - Énergie d'activation 22

2.3. Inflammation 22

2.3.1. Gaz 22

2.3.2 Liquides 22

2.3.3. Solides 24

2.4. Paramètres de l'incendie..... 25

2.4.1. Pouvoir calorifique 25

2.4.2 Potentiel calorifique 26

2.4.3. Débit calorifique27

2.5. Effets du feu 27

2.5.1. Gaz de combustion 27

2.5.2. Fumées.....	27
2.5.3. La dilatation thermique	28
2.5.4. Les forces de flottabilité.....	28
2.5.5. Propagation du feu.....	28
2.5.6. Phases de l'incendie	29
2.6. Mode de propagation des fumées	30
2.6.1. Mode de diffusion	30
2.6.2. Mode de dispersion	30
2.6.3. Mode de mélange	31
2.6.4. Les forces qui conduisent le mouvement des fumées.....	31
2.6.4.1. La poussée d'Archimède (force de flottabilité).....	31
2.7. Le désenfumage.....	31
2.7.1. Désenfumage dans les ERP :.....	32
2.7.2. Objet du désenfumage	32
2.7.3- Principes de désenfumage	32
2.7.4. Désenfumage mécanique.....	32
2.7.5. Instruction technique N° 246 relative au désenfumage dans les ERP (journal officiel du 4 mai 1982).....	33
2.7.6. Règles de sécurité applicables aux gares.....	34
2.7.7. Types de gares	34
2.8. Conclusion.....	35
<u>CHAPITRE3</u>	
3.1 Introduction	37
3.2. Modèles de transport des fumées	38
3.3. Description du code FDS	39
3.3.1. Modèles mathématiques présents dans FDS	39
3.3.1.1. Modèle Hydrodynamique.....	40
3.3.1.2. Modèle de combustion	41
3.3.2. Potentialités et limitation de FDS.....	42
3.3. Définition de la configuration retenue pour l'étude.....	43
Modélisation en utilisant la technique LES.....	43
3.5. Domaine de calcul.....	44
3.6. Maillage.....	44
chapitre 4	
4.1. Introduction	47
4.2. Définition des scénarios et nomenclature.....	48
4.3. Système de classement des résultats	48

4.4.Conditions aux limites.....	48
4.5. Résultats et interpretation.....	49
4.5.1.Catégorie 1 : Sans ventilation sur les tunnels.....	50
4.5.2. Catégorie 2 avec ventilation : faible débit sur les tunnels	53
a. Soufflement cas A	53
b. Extraction -Soufflement B.....	57
c. Soufflement – extraction - cas C	59
d.. Extraction cas D	62
Conclusion Générale	65
Références bibliographiques.....	I
<u>ANNEXE</u>	II

Nomenclature

Lettres latines

D_i : Coefficient de diffusion de l'élément i [s^{-1}]
 g : Gravité [m/s^2]
 H : Hauteur des points de mesure [m]
 m''' : Débit massique par unité de temps
 M : Masse molaire [g]
 M : Nombre de Mach [-]
 N : Nombre de particule [-]
 P : Pression [Pa]
 q'' : densité de flux de chaleur par unité de surface [w/m^2]
 Q_{TRAPPE} : Débit volumique dans les trappes [m^3/s]
 Q_{TUNNEL} : Débit volumique dans les tunnels [m^3/s]
 R : Constante des gaz parfait [$J/mole.K$]
 t : Temps [s]
 T : Température [K]
 r Vecteur de forces extérieures [N]
 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]
 T_{ij} : Composantes du tenseur de contraintes [N/m^2]
 Φ : Fonction de dissipation [-]

Indices

Ar : Argon
 CH_3OH : Méthanol
 CO_2 : Dioxyde de Carbone
 CO : Monoxyde de Carbone
 HCL : Acide Chlorique
 N_2 : Azote
 O_2 : Oxygène
 P_i : point de mesure de la température

Abréviations

BGH : Bâtiment de Grand Hauteur.
CFD: Computational Fluid Dynamics.
CFX4: logarithm de resolution
DF: désenfumage
DNS: Direct Numerical Simulation
ERP : établissement recevant du public
FDS: Fire Dynamics Simulator
HRR : quantité de chaleur
LES: Large Eddy Simulation
NC :
NIST: National Institut of Standardisation and Technology
PPN: Plan de Pression Neutre
Ppm : partie par million

Liste des tableaux

Tableau.1.1 : Quelques exemples des accidents dans les stations de métro	14
Tableau :2.1 : Limites d'inflammabilités de quelques gaz courants.....	24
Tableau : 2.2 : Températures d'auto-inflammation de quelques gaz courants.....	24
Tableau :2.3 : Points d'éclair de quelques produits.....	25
Tableau :2.4 : Températures d'inflammation de quelques solides courants.....	26
Tableau :2.5 : Pouvoirs calorifiques de quelques produits courants.....	27
Tableau :2.6 : Potentiel calorifique moyen selon l'occupation des locaux	26
Tableau :4.1 : Tableau des conditions aux limites.....	52
Tableau :4.2 : Températures moyennes pour la catégorie sans ventilation sur les tunnels.	36
Tableau :4.3 : Températures moyennes pour la catégorie A.....	40
Tableau :4.4 : Températures moyennes pour la catégorie D.....	43
Tableau :4.5 : Températures moyennes pour la catégorie C.....	45

Liste des figures

Fig.1.1 : Incendie dans la station de métro, Moscou, Russie.....	14
Fig.1.2 : Image du modèle physique choisi.....	20
Fig.2.1 Fig. 2.1: Phénomènes inhérents aux incendies dans un milieu confiné.....	30
Fig.3.1 : Division du domaine.....	48
Fig.3.2 : Maillage sur FDS avec système de coordonnées.....	49
Fig.4.1 : Image 3D de la station avec l'emplacement des points de mesure de la Température.....	50
Fig.4.2 : Numérotation des wagons.....	51
Fig. 4.3 : Distribution de la température pour le cas « OPEN » à t = 200s.....	54
Fig.4.4 : Evolution de l'enfumage de la station et l'évolution de la visibilité pour le cas « OPEN ».....	54
Fig.4.5 : Evolution de la quantité de chaleur émise en fonction du temps.....	55
Fig.4.6 : Distribution de la température en fonction du temps à une hauteur de 1.5 m Pour le cas « OPEN ».....	55
Fig.4.7 : Plans verticaux de la distribution de température.....	56
Fig.4.8: Distribution de la température pour le cas (A) à t = 200s.....	57
Fig.4.9 :Enfumage de la station et évolution de la visibilité pour le cas A.....	58
Fig.4.10 : Evolution de la quantité de chaleur émise en fonction du temps à une hauteur de 1.5 m.....	58
Fig.4.11 : Distribution de la vitesse pour le cas A à t = 15s.....	59
Fig.4.12 : Evolution de la température en fonction du temps à une Hauteur de 1.5 m pour le cas A.....	59
Fig.4.13 : Distribution de la température à une Hauteur de 1.5 m pour le cas B a t=200 s.....	60
Fig.4.14 : Enfumage de la station et évolution de la visibilité pour le cas B.....	61
Fig.4.15 :Evolution de la quantité de chaleur émise en fonction du temps à une hauteur de 1.5 m.....	62
Fig.4.16 : Evolution de la température en fonction du temps à une Hauteur de 1.5 m pour lecas B.....	62
Fig.4.17 : Distribution de la température à la Hauteur 1.5 m pour le cas C.....	63
Fig.4.18 : Enfumage de la station et évolution de la visibilité pour le cas C.....	63
Fig.4.19 : Evolution de la quantité de chaleur émise en fonction du temps à une hauteur de 1.5 m.....	64
Fig.4.20 : Evolution de la température en fonction du tempsàune Hauteur de 1.5 m pour le cas C.....	64
Fig.4.21 : Distribution de la température en fonction du temps à une Hauteur de 1.5 m pour le cas D.....	65
Fig.4.22 : Distribution de la température en fonction du temps àune Hauteur de 1.5 m pour le cas D.....	66
Fig.4.23: Evolution de la quantité de chaleur émise en fonction du temps à une hauteur de 1.5 m.....	66
Fig.4.24 : Evolution de l'enfumage de la station et évolution de la visibilité pour le casD.....	67

Introduction Générale

Introduction Général

Les tunnels ont toujours permis à l'homme de traverser des obstacles pour le transport des personnes et des marchandises. Ils ont toujours fait partie des infrastructures de transport avec l'urbanisation accrue. Les tunnels de métro se sont multipliés sous les villes, afin de décongestionner la circulation, cependant ces tunnels peuvent représenter un risque réel pour les usagers, si leur dimensionnement n'intègre pas tous les problèmes de sécurité qui peuvent se poser, et plus particulièrement les incendies. Ces dernières années, de nombreux tunnels ont été la proie du feu, provoquant ainsi de nombreuses victimes. Ces incidents sont des catastrophes, du fait du caractère confiné de ces ouvrages qui empêche toute évacuation et rend difficile les interventions d'évacuation et de secours.

La première ligne de chemin de fer métropolitaine souterraine a été inaugurée le 10 janvier 1863 à Londres [1] afin de soulager la congestion du trafic urbain dans la ville. Depuis, de nombreux systèmes de transport en commun portant sur des installations de métro ont été construits. Le taux de croissance de la population et l'augmentation de la circulation dans les grandes villes du monde sont les principales raisons qui ont poussé à l'amélioration de tels systèmes, se traduisant par une vitesse accrue des trains de métros, les intervalles de passage plus courts et une capacité de charge des voitures de métro plus grande. De ce fait, le risque de pertes humaines et matériels est d'autant plus élevé en cas de catastrophe et plus particulièrement en cas d'incendie. C'est pourquoi la sécurité incendie devient de plus en plus importante pour ce type de structure.

Chapitre 1 :

HISTORIQUE DES INCIDENTS DE METRO ET REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Historique des incidents de métro

1.1.Introduction

Plusieurs incendies se sont produits dans des stations de métro, causés pour la plupart des cas par des dysfonctionnements dans les systèmes électriques dans les voitures du métro et dans les systèmes électriques intégrés aux infrastructures. On citera dans ce qui suit (Tableau 1.1) quelques incendies majeurs qui se sont produit dans les installations de métro avec les causes et leurs conséquences et dans la figure 1.1 on montre une photo de l'incendie qui s'est produit à la station de métro à Moscou en Russie.

Tableau 1.1 : Principaux incendies dans les stations de métro [2]

Date	Lieu de l'accident	Cause la plus probable du feu	Conséquences
10/08/1903	Couronnes, Métro de Paris. France	Dysfonctionnement électrique	84 morts et des dizaines de blessés
06/11/1972	Tunnel d'Hokuriku. Japon	/	30 morts et 690 blessés
17/01/1979	BART*, San Fransisco. Etats-Unis	Dysfonctionnement électrique	1 mort et 58 blessés
18/11/1987	King's Cross Station. Royaume-Uni	Cigarette	31 morts
28/12/1990	New York métro. Etats-Unis	Câble	2 morts et 200 blessés
01/06/1991	Moscow métro. Russie	Dysfonctionnement électrique	7 morts et plus de 10 blessés
28/10/1995	Baku métro. Azerbaïdjan	Dysfonctionnement électrique	289 morts et 265 blessés
18/02/2003	Jungangno métro, Daegu. Corée du Sud	Incendie criminel	192 morts et 151 blessés
06/02/2004	Moscow métro. Russie	Attaque terroriste	39 morts et beaucoup de blessés
29/07/2007	<u>Entre les stations Varenne et Invalides</u>	Un patin de freinage	35 personnes intoxiquées
28/06/2012	Station <u>Rihour</u> - <u>Lille</u>	Incendie d'origine électrique	Important dégagement de fumée à la station

*BART : Bay Area Rapid Transit



Fig.1.1 : Incendie dans la station de métro, Moscou, Russie

1.2. Revue Bibliographique

1.2.1. Introduction

L'incendie dans les milieux confinés pose un risque majeur pour l'infrastructure, le matériel et les occupants, à cause des températures élevées et des fumées toxiques qui peuvent être générées. L'enjeu de la compréhension des phénomènes de propagation des fumées et du feu est donc très important.

La propagation du feu et de la fumée dans les milieux confinés et particulièrement dans les stations de métro est très complexe 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 toutes les stations de métro. Ces stratégies ont fait l'objet de quelques études numériques et expérimentales pour différentes stations de métro.

1.2.2. Etudes antérieures

Plusieurs études ont été faites afin de prédire la propagation des fumées lors d'un incendie en milieu confiné en général, et en stations de métro en particulier. Ces études sont le plus souvent numériques en raison de la difficulté et le coût très élevé des essais sur site. Néanmoins ces études qui ont été faites à l'aide de codes de calcul commerciaux restent

insuffisantes et devront être validées par des essais expérimentaux faits sur des maquettes à une échelle réduite.

La technique CFD a été utilisée par **O.Mégret** [3] pour examiner le mouvement des fumées dans les infrastructures souterraines de transport. Le code de simulation numérique CFX4, qui utilise la méthode des éléments finis a été employé. Il a été signalé qu'un choix judicieux du modèle de turbulence est essentiel afin d'avoir une meilleure précision des résultats. Le modèle de turbulence k- ϵ est en mesure de simuler l'écoulement des fumées. La source de chaleur et de fumée sont représentées par une injection de CO₂ sans aucune combustion considérée. L'incendie avait une puissance donnée et produit une certaine quantité de fumée (en ppm/s). Les conditions aux limites sont le non glissement pour la vitesse et l'adiabacité pour les murs. La pression atmosphérique est imposée au lieu de la distribution de vitesse aux ouvertures. Durant chaque pas de temps, pour vérifier l'exactitude des résultats, ils ont examiné la conservation de la masse dans l'enceinte, en calculant le débit massique qui traverse les tunnels.

Dans le premier cas le feu a été localisé dans la partie gauche du hall. Ils ont déduit que le facteur d'emplacement du feu est déterminant pour le mouvement des fumées dans la station. Le facteur de zone prend la relève et influence le mouvement des fumées poussant les fumées à passer par la région la plus petite de la station. Dans le deuxième cas, le feu est localisé dans le milieu de la plateforme. La fumée s'est déplacée rapidement vers le haut se plaquant contre le plafond en s'étalant sur les deux extrémités de la station. La fumée arrive aux deux extrémités au même temps. A cause du petit espace, l'effet d'empilement prédomine le mouvement des fumées, les poussant à se déplacer à droite de la station. La quantité de fumée est si grande, le petit espace n'est pas assez large pour tout évacuer ; elle se déplace à droite. Les autres sorties aident à l'évacuation partielle des fumées à cause de leur grande section.

Les techniques de modélisation ont été analysées par **D. Willemann** et **J.G. Sanchez** [2] dans le but de concevoir un système de ventilation par les tunnels pour la station de métro de la ville de New York afin d'améliorer le niveau de sécurité de l'ouvrage. Trois intensités de feu ont été considérées : la première de 44 W (intensité faible), représente une faible source de chaleur, la seconde de 1.8 kW (intensité moyenne), qui représente un feu sous une des voitures du train et la dernière de 14.7 kW (intensité élevée), qui représente une voiture de train entièrement en feu. Il a été souligné que le choix du modèle de feu est crucial dans la simulation CFD. Un processus de combustion simplifié est considéré pour quantifier le taux de génération de la chaleur et le taux de production des fumées. Cette étude a montré comment la

technique de modélisation a aidé à concevoir un système de ventilation sur les tunnels pour la station de métro de New York.

F. Chen et al [3] ont étudié le contrôle des fumées dans la station de métro de Gong-Guan de système de transport rapide de Taipei. L'étude en trois dimensions de différents scénarios incendie se produisant dans la station de métro Gong-Guan, du système de transport rapide de Taipei est réalisé. La station comporte deux étages, l'étage inférieur est une plateforme et l'étage supérieur est un hall. La longueur de la station est de 142.1 m et sa largeur est de 17.9 m. La hauteur de la plateforme et du hall sont de 4.15 m et 5.15 m, respectivement.

L'incendie avait une puissance de 5 MW. Les conditions aux limites sont le non glissement pour la vitesse et l'adiabacité pour les murs. La pression atmosphérique est imposée au lieu de la distribution de vitesse aux ouvertures. La station est équipée avec trois systèmes de ventilation pour extraire les fumées. Des ventilateurs localisés dans les tunnels près des deux extrémités de la plateforme, des ouvertures d'aspiration au-dessous de la plateforme et des grilles d'évacuation de fumées situées au plafond du hall.

Il a été conclu que le feu qui a eu lieu au milieu de la station est le cas le plus dangereux. Les ventilateurs des tunnels et les ouvertures au-dessous de la plateforme contrôlent le mouvement des fumées générées. Les grilles d'évacuations sont des équipements auxiliaires. Il a été aussi rapporté que pour les feux qui ont eu lieu aux deux extrémités de la plateforme, les ventilateurs des tunnels près du feu aspirent toute la fumée.

L'effet des portes de blocage de la plateforme a été aussi étudié. Les portes de blocage sont des murs verticaux, fabriqués avec des matériaux transparents, séparent complètement ou partiellement l'espace entre la plateforme et les rails. Sur ces murs transparents il y a autant de portes que sur le train. Ces murs aident efficacement à contrôler le mouvement des fumées.

K.C. Karki et al [4] ont réalisé une étude pour valider le modèle CFD pour un système de ventilation longitudinale par les tunnels. Le modèle utilisé inclut la turbulence, le feu, le transport radiatif et les fumées ainsi que la ventilation. Le code utilisé est appelé COMPACT-3D, où la turbulence est représentée par le modèle k- ϵ . Les modèles de ventilation, de transfert radiatif et de fumée sont inclus. Le feu est représenté par une source de chaleur et de fumée. Le modèle ne simule pas le processus de combustion, par contre, le taux de transfert de chaleur dû à la combustion est représenté par une source de chaleur volumétrique au voisinage du feu. Le modèle inclut deux options pour la représentation du transport radiatif. Dans l'approche de la fraction radiative, la participation de la radiation thermique dans le milieu est négligée et une

fraction fixe de la chaleur totale du feu est supposé perdue dans le milieu sans affecter la distribution de la température dans le tunnel.

0.2 et 0.4. La chaleur dégagée par le feu a été introduite comme source dans l'équation d'énergie et le modèle de la radiation détermine l'énergie perdue à travers les murs. L'approche de la fraction de radiation est retenue pour minimiser le temps de calcul. Le taux de production de fumée est calculé à partir du taux de consommation de combustible et du coefficient stœchiométrique du combustible qui suppose que la combustion est complète. Les débits de fluide mis en mouvement par les ventilateurs sont considérés constant avec le coefficient de diffusion pour la température et la conservation des espèces pris égale à zéro et qu'il y a aucune interaction entre le fluide de l'intérieur et celui de l'extérieur du ventilateur.

Ils ont conclu que le code peut prédire le courant d'air produit par le système de ventilation longitudinale et l'approche qui consiste à simplifier la représentation du feu à une source de chaleur volumétrique, ainsi que, la négligence du rayonnement du feu était des choix adéquats pour prédire les effets du feu dans les régions lointaines du tunnel.

1.3. Conclusion

Les incendies dans les tunnels peuvent causer des dommages aux personnes, aux biens et à l'ouvrage. L'ordre d'apparition des dangers 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 indispensable à la sécurité des usagers (éclairage, ventilation, systèmes de communications, faux plafonds, . . .) ou provoquer la chute d'objets lourds fixés au plafond (signalisation, ventilateurs, . . .). C'est pourquoi l'instruction technique prévoit des dispositions de résistance au feu des structures et des équipements de tunnels. Ce risque concerne essentiellement les services de lutte contre l'incendie qui peuvent pénétrer dans le tunnel munis d'appareils respiratoires.

Les ordres de grandeur des conditions ambiantes critiques pour les usagers sont une visibilité de moins de 10 m, une température entre 50 et 80°C selon l'humidité de l'air, et un rayonnement de l'ordre de 2 kW/m². La toxicité reste en général acceptable tant que les

conditions minimums de visibilité décrites ci-dessus sont assurées. C'est donc bien la perte de visibilité qui est

le danger fondamental, car sans visibilité, il devient impossible d'évacuer l'espace enfumé, ce qui conduit à devoir respirer un air chargé en substances toxiques pendant un temps trop long pour permettre la survie.

Pour les services de lutte contre le feu munis d'équipements adaptés (en particulier des appareils respiratoires), la température critique est de l'ordre de 100°C et le rayonnement critique est de 5 kW/m². Il convient d'évoquer brièvement le risque d'explosion en tunnel. Un tunnel est un espace confiné dans lequel toute explosion a des conséquences dramatiques (formation d'une onde de choc puissante qui est mortelle sur toute la longueur du tunnel et dangereuse à l'extérieur à proximité immédiate des têtes). Priver complètement d'air, un incendie en tunnel est donc dangereux, car cela peut conduire à la formation de poches de gaz explosives.

A l'issue de l'introduction générale et de la revue bibliographique, nous jugeons qu'il est indispensable que d'autres études plus détaillées et plus approfondies soient nécessaires pour améliorer les conditions de sécurité dans les installations souterraines. A cet effet, nous sommes intéressés à une étude dans les stations de métro pour apporter notre contribution à la compréhension de cette phénoménologie. Dans ce qui suit, nous allons définir la problématique en question et essayer de trouver les situations critiques relatives à l'enfumage de la station et les températures atteintes lors d'un incendie.

1.4. Description de la problématique

L'objectif de notre étude est de rechercher les scénarios les plus critiques, pour un incendie qui se déclare dans une station de métro et émet des fumées qui se propagent dans la station, en utilisant un logiciel CFD qui peut simuler le mouvement des fumées et prédire l'élévation de la température dans la station.

Le modèle physique utilisé est une station de métro typique (figure 1.2). Elle a une longueur de 70 m, une largeur de 14 m et une hauteur sur le quai de 4 m. Au milieu de la station, un train constitué de quatre wagons est garé sur le quai droit, chaque wagon a trois portes sur les deux côtés. La longueur totale du train est de 64 m. Le feu est simulé comme une source de chaleur surfacique d'une puissance de 15 MW répartie sur toute la surface incendiée.

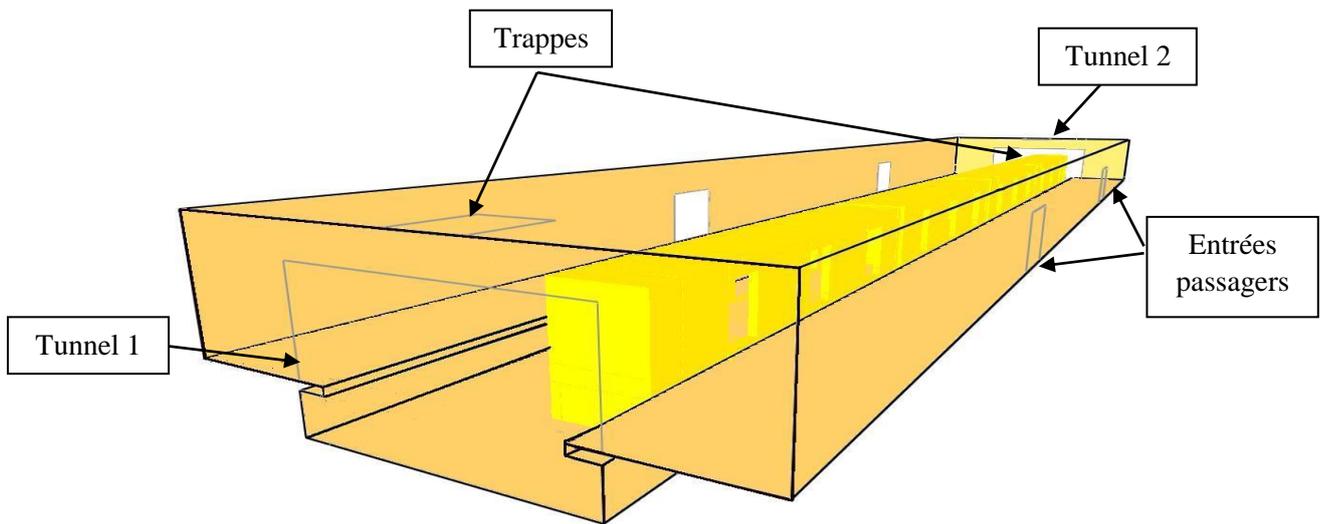


Fig.1.2 : Image du modèle physique choisi.

La stratégie adoptée pour évacuer les fumées émises par un incendie qui se déclare à l'intérieur ou au niveau des roues pneumatiques d'un des wagons de la rame garée au milieu de la station (d'une puissance de 15 MW) est d'utiliser deux trappes de désenfumage de 2×2.5 m situées au plafond sur les deux extrémités de la station (figure 1.2). Le débit d'extraction est fixé à $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Les deux tunnels situés sur les deux côtés de la station sont utilisés pour extraire les fumées ou souffler l'air frais à l'intérieur de la station. Le débit d'extraction ou de soufflement peut être modifié. Tout en gardant les quatre entrées des passagers situées sur les deux cotés latéraux de la station en pression atmosphérique.

Chapitre 2 :

Généralités sur le feu et la
propagation des fumées

2.1. Introduction

Les incendies entraînent, chaque année, dans le monde, la perte de milliers de vies humaines et des pertes matérielles considérables. La plupart des atteintes aux victimes sont dues aux fumées plutôt qu'aux flammes et à la chaleur.

La protection contre l'incendie consiste en l'application d'un certain nombre de règles et de mesures de bon sens qui ont pour but :

- D'éviter tout début d'incendie dans le cas où il se déclare
- De faire en sorte que cet incendie ne doit pas se développer ni se propager, et qu'il soit maîtrisé avant d'avoir causé des dégâts importants ou irrémediables. [4]

2.2. Feu et combustion

Le feu est une réaction de combustion qui est due à la réaction de deux corps : un combustible et un oxydant (ou comburant) qui est généralement l'oxygène de l'air. Mais cette réaction ne peut avoir lieu que dans des conditions bien définies, et en particulier à partir d'une température qui varie d'un corps à l'autre. Cette réaction est exothermique. La combustion, et donc le feu, ne peut se produire que lors de la réunion des trois éléments qui sont le combustible, le comburant et une source d'énergie (chaleur, étincelle, ...). Ce principe fondamental est souvent représenté sous la forme du « triangle du feu »

2.2.1. Combustible

Tous les corps susceptibles de s'unir avec l'oxygène sont dits « combustibles ». De nombreux corps ont cette propriété mais tous ne brûlent pas si facilement et aussi vite les uns que les autres ; cela tient à leur nature, à leur état de division. Généralement, les solides et les liquides ne brûlent pas en l'état ; ce sont les gaz et les vapeurs qu'ils émettent qui brûlent.

2.2.2. Comburant

En pratique, il n'existe qu'un seul comburant : c'est l'oxygène ; mais cet oxygène peut se trouver soit à l'état pur, soit en mélange avec d'autres gaz, soit provenir de la décomposition de certains produits chimiques. Dans la plus grande partie des cas, l'oxygène qui alimente une combustion se trouve dans l'air en mélange avec de l'azote et d'autres gaz rares. L'air contient

en volume 21 % d'oxygène et 78 % d'azote, mais il s'agit là d'une composition moyenne. Dans certains cas, la teneur en oxygène peut être inférieure. Il faut savoir que l'air ne peut être considéré comme comburant que s'il contient suffisamment d'oxygène, soit plus de 15 % en volume pour les combustibles courants. Certains corps peuvent dégager de l'oxygène, ce sont des oxydants. Les plus fréquemment rencontrés sont : les nitrates, les chlorates, les peroxydes.

2.2.3. Source d'énergie - Énergie d'activation

Ainsi que le rappelle le triangle du feu, la seule présence d'un combustible et d'un comburant n'est pas suffisante pour provoquer le phénomène de combustion. Un apport d'énergie, dite « énergie d'activation », est nécessaire pour « démarrer » ce phénomène, qui s'entretiendra de lui-même par la suite, en raison de la quantité de chaleur (très supérieure à l'énergie d'activation nécessaire) que dégage cette réaction exothermique.

2.3. Inflammation

2.3.1. Gaz

Pour que s'effectue la combustion d'un gaz, il faut que le mélange gaz combustible/gaz comburant soit dans des proportions adéquates. Dans le cas du mélange gaz combustible/air, il faut que la concentration de gaz dans le mélange soit comprise entre deux limites que l'on appelle limites d'inflammabilité qui sont

- La limite inférieure d'inflammabilité (LII) ;
- La limite supérieure d'inflammabilité (LSI).

Lorsque la combustion présente les caractères de l'explosion, on parlera de limites inférieures et supérieures d'explosivité (LIE et LSE). Ces valeurs limites sont exprimées en pourcentages volumiques.

Tableau 2.1 : Limites d'inflammabilités de quelques gaz courants [4]

Gaz	Inférieure (%)	Supérieure (%)
Butane	1,9	8,5
Propane	2,2	9,5
Essence (vapeur)	1,4	7,6
Éthanol (vapeur)	3,3	19
Éther (vapeur)	1,9	36

Lorsque le mélange est compris entre les limites d'inflammabilité, la source d'énergie d'activation devra être en mesure de porter le mélange à une température minimale appelée température d'auto-inflammation.

Tableau : 2.2 : Températures d'auto-inflammation de quelques gaz courants[4]

Gaz	Température d'auto-inflammation (°C)
Butane	405
Essence	450
Gazole	270
Éthanol	365
Éther	160

2.3.2. Liquides

Un liquide inflammable est, en fait, un liquide dont les vapeurs, dans certaines conditions, sont inflammables. Dans des conditions normales, si la vapeur émise par un liquide constitue un mélange trop riche (concentration supérieure à la limite supérieure d'inflammabilité), la flamme se décollera de la nappe de liquide et le mélange pourra récupérer l'air susceptible d'abaisser la concentration pour ramener le mélange entre les limites d'inflammabilité.

Pour qu'un liquide soit considéré comme inflammable, il suffit donc que les valeurs limites soient à une Concentration supérieure à la limite inférieure d'inflammabilité. Pour chaque liquide, cette condition correspond à une certaine température que l'on appelle point d'éclair (tableau 2.3), les vapeurs peuvent être enflammées par une source d'énergie. Lorsque la

température d'un liquide est à peine supérieure au point d'éclair, la source d'inflammation ne pourra provoquer qu'un allumage fugitif (éclair ou flash). Pour que la flamme subsiste, il faut que la température dépasse de quelques degrés la valeur du point éclair.

Produits	Point d'éclair (°C)
Essence	- 40
Kérosène	+ 40
Gazoile	+ 70
Acétone	- 18
Éthanol	+ 13
Éther	-45

Tableau 2.3 : Points d'éclair de quelques produits [4]

2.3.3. Solides

La combustion des solides ne répond pas à des lois aussi précises que celles des gaz ou des liquides. Les matériaux tels que le bois et autres matériaux cellulosiques émettent des gaz inflammables. Pour les matériaux de synthèse, on peut repérer une température de décomposition à partir de laquelle il y a production de gaz inflammables ; on voit alors une similitude avec la notion de point d'éclair des liquides. Certains matériaux brûlent en formant des braises : il s'agit d'un mode de combustion particulier qui se produit lentement et directement depuis l'état solide : les braises peuvent se consumer très lentement, sans gros apport d'oxygène ; cela donne lieu à des feux couvant qui posent souvent de gros problèmes d'extinction. L'état de division du solide a une très grande influence sur le déroulement de la combustion d'un même matériau. Plus la surface de contact entre le matériau et l'air est importante, plus vive sera la réaction de la combustion, pouvant aller, dans le cas de poussières, jusqu'au phénomène de déflagration : c'est le cas de poussières très dangereuses comme la sciure de bois, la farine, le sucre, le charbon, etc.

On assiste parfois à des phénomènes de combustion spontanée pour certains matériaux qui peuvent être le siège, en ambiance ordinaire, d'une lente oxydation dégageant de la chaleur. Dans certains cas de stockage (mise en tas, par exemple), la dispersion de chaleur n'est pas suffisante pour refroidir les matériaux, et l'élévation de température peut conduire à l'inflammation.

Tableau 2.4 : Températures d'inflammation de quelques solides courants[4]

Solides	Températures d'inflammation (°C)
Bois	De 280 à 340
Charbon 250	250
Charbon de bois	De 250 à 350
Coton	450
Papier journal	185
Papier à letter	360
Polyéthylène	350
Polystyrène	490
Polyamide	425
Mousse polyuréthane	330

2.4. Paramètres de l'incendie

Le principal effet de l'incendie est évidemment de dégager de la chaleur ; la quantité de chaleur dégagée est fonction de trois paramètres :

- le pouvoir calorifique ;
- le potentiel calorifique ;
- le débit calorifique.

2.4.1. Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de 1 kg de ce combustible s'il est solide ou liquide ou de 1 m³ s'il est gazeux. Pour un combustible liquide elle est égale à 4200kj/kg ou 42Mj/kg).

Tableau 2.5 : Pouvoir calorifique de quelques produits courants [4]

Matériaux	Pouvoir calorifique
Bois	17 MJ/kg
Charbon	35 MJ/kg
PVC rigide	15 à 22 MJ/kg
Polystyrène	31 à 40 MJ/kg
Polyuréthane (mousse)	27 MJ/kg
Papier, carton	16 MJ/kg
Caoutchouc	44 MJ/kg

2.4.2 Potentiel calorifique

Le potentiel calorifique (ou charge calorifique) d'un local est la quantité de chaleur totale susceptible de se dégager par la combustion de l'ensemble des éléments combustibles se trouvant dans ce local, ramenée à l'unité de surface.

Le potentiel calorifique s'exprime donc en MJ/m². On ramène parfois cette mesure à l'équivalent de la quantité de chaleur dégagée par 1 kg de bois et on exprime alors le potentiel calorifique en kg de bois/m².

Tableau 2.6 : Potentiel calorifique moyen selon l'occupation des locaux [4]

Bâtiment ou activité	Potentiel calorifique (en MJ/m ²)
Logement	780
Hôpital	230
Hôtel	310
Bibliothèque	1 500
Bureau	420
École	285
Centre commercial	600
Théâtre	300

2.4.3. Débit calorifique

C'est la quantité de calories produite par unité de temps par la quantité de masse d'une matière combustible. Le débit calorifique est l'élément essentiel caractérisant l'élévation de température. Il dépend de différents facteurs qui permettent d'analyser le risque d'incendie :

- l'alimentation en comburant du combustible (ventilation des locaux) ;
- l'état de division des matériaux combustibles ;
- le mode de rangement des combustibles.

2.5. Effets du feu

2.5.1. Gaz de combustion

La combustion des matériaux s'effectue en dégageant un certain nombre de gaz qui peuvent avoir des effets toxiques et corrosifs. Par ailleurs, portés à température élevée, ces gaz vont contribuer à la propagation du feu. La nature des matériaux combustibles peut permettre de prévoir les caractéristiques des principaux gaz de combustion. Les principaux gaz susceptibles de se dégager sont :

- **CO** : oxyde de carbone très toxique, mortel à 0,3 % dans l'air ; provoque des réactions irréversibles sur le sang il se fixe au globule rouge. Sa formation est particulièrement importante dans les feux couvant, par manque d'oxygène.
- **CO₂** : dioxyde de carbone (ou gaz carbonique) n'est pas toxique, mais n'entretient pas la vie.
- **HCl** : gaz chlorhydrique toxique produit, par la combustion des PVC (polychlorures de vinyle), des matériaux ignifugés. Il est irritant et donc détecté rapidement par l'odorat. Très soluble dans l'eau, il pollue les eaux d'extinction.
- **HCN** : gaz cyanhydrique produit par la combustion des matériaux azotés (laine, soie, polyamide, butadiène, polyuréthane, etc.). Émis à partir de 250 °C, il est très toxique et dangereux en début d'incendie. Hydrosoluble, il est entraîné par l'eau sous forme d'acide cyanhydrique dilué.
- **NO_x** : divers gaz formés par la combustion des composés azotés :
 - **NO** monoxyde d'azote, le plus toxique,
 - **NO₂** peroxyde d'azote (vapeurs rousses).

2.5.2. Fumées

Les fumées sont constituées de gaz de combustion et sont chargées de particules solides de produits imbrûlés. Elles présentent donc tous les dangers des gaz de combustion

mais sont opaques du fait de la présence de particules solides. Les fumées comportent souvent des gaz imbrûlés, portés à température élevée. Ce mélange est souvent à l'origine de la propagation du feu. Les fumées dégagées par l'incendie ont par ailleurs pour effet de gêner et même souvent d'empêcher toute intervention des secours.

2.5.3. La dilatation thermique

Selon la loi des gaz parfaits, un gaz se dilaterait à $1/273$ de son volume initial pour chaque élévation de température de 1K à pression constante. Donc un incendie qui provoque une élévation de température de 800°C causerait une dilatation de l'air de 4 fois son volume initial. D'une façon générale, on pourrait dire que dans la plupart des incendies, le volume des gaz chauds devrait au moins tripler par rapport au volume d'air frais au départ

2.5.4. Les forces de flottabilité

La chaleur dégagée par le feu réchauffe l'air et les produits de combustion qui voient leur densité diminuer. La différence de densité entre ces produits de combustion et l'air frais se manifeste alors par des mouvements de convection : étant plus léger que l'air frais, l'air chaud remonte sous l'effet de la poussée d'Archimède, de même l'air frais qui est plus dense descend et alimente ainsi le feu à sa base.

2.5.5. Propagation du feu

a- Le Rayonnement : lorsqu'un feu a pris naissance par la réunion en milieu comburant, d'un combustible et d'une source de chaleur, la combustion produit de la chaleur, des gaz et de la fumée et le feu tend à se propager ; la chaleur, souvent considérable, dégagée par le foyer, peut communiquer le feu à tout combustible qui se trouve à proximité : c'est la propagation par rayonnement.

b - La Conduction : suffisamment chauffés par le foyer initial, des matériaux bons conducteurs de la chaleur (métal en particulier) peuvent à leur tour échauffer suffisamment des matières combustibles, même placées à distance (exemple du tuyau de chauffage propageant le feu de l'autre côté d'un mur) : c'est la propagation par conduction.

c- la Convection : les gaz émis lors d'une combustion sont chauds ; ils tendent à s'élever et à s'étendre surtout s'ils rencontrent un obstacle horizontal. Lorsqu'une température voisine de 600°C est atteinte, ces gaz chauds qui sont répandus, soit à des niveaux supérieurs, soit à d'autres locaux contigus, peuvent, à leur tour, s'enflammer ou enflammer des matières combustibles : c'est la propagation par convection. La propagation du feu peut se faire aussi :

- Par projection de matières combustibles enflammées après éboulement, explosion, flammèches portées par le vent, étincelles, etc.

- Par écoulement accidentel de liquide inflammable sur le sol ou par des caniveaux, des égouts, etc.
- Par rupture accidentelle de canalisations de liquides ou de gaz combustibles.

Afin d'éviter la propagation d'un incendie non maîtrisé à son origine, on peut utiliser différents moyens de compartimentage : planchers coupe-feu, murs coupe-feu, portes coupe-feu, clapets et d'une manière générale, toute disposition constructive fixe ou mobile offrant des caractéristiques de résistance en feu suffisantes.

2.5.6. Phases de l'incendie

Dans le déroulement d'un incendie, on peut distinguer cinq phases qui se déroulent successivement. La courbe de la figure 2 représente le développement d'un incendie en considérant qu'il était suffisamment alimenté en comburant, en combustible et en énergie.

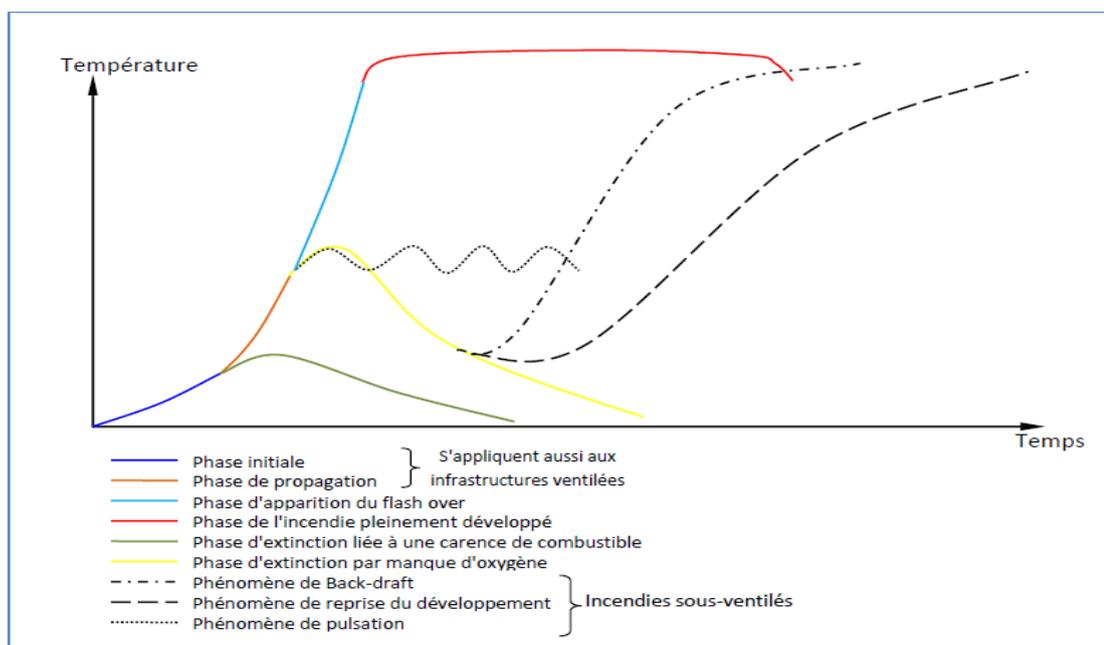


Fig. 2.1: Phénomènes inhérents aux incendies en milieu confiné

Phase 1 phase initiale : feu couvant ; après allumage par un point chaud (cigarette, allumette, court-circuit, soudure...), il y a début de combustion avec formation de fumées.

Phase de propagation : combustion ; apparition de flammes avec dégagement de gaz chauds et incomplètement brûlés.

Phase : flash over : embrasement généralisé ou « flash over » ; les gaz chauds (combustibles) et les particules imbrûlées des fumées portées à température d'auto-inflammation provoquent l'embrasement.

Phase développement de l'incendie : cette phase dépend de l'aliment du feu en combustible et en comburant.

Phase décroissance : soit du fait de l'intervention, soit du fait de la disparition du combustible.

2.6. Mode de propagation des fumées [6]

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j C) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \quad (1)$$

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.

2.6.1. 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 [7]:

$$D = \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{4k^3}{M\pi^3} \frac{T\sqrt{T}}{P}} \quad \text{Avec } \alpha = 0.499,$$

2.6.2. 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 [8]. 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.

2.6.3. 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.

2.6.4. 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 [9]

2.6.4.1. 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 N₂, Argon Ar...), un gaz oxydant (Oxygène O₂) 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. 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. Etant 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.

2.7. Le désenfumage

La sécurité des usagers en cas d'incendie repose sur un système complexe d'éléments techniques et organisationnels. Parmi les dispositions techniques qui participent à la sécurité, on peut citer les éléments de génie civile tel que les issues de secours et les nombreux équipements : Extincteurs

2.7.1. Désenfumage dans les ERP

Le chapitre IV du titre I, du livre II du règlement de sécurité du 25 juin 1980 (journal officiel - NC du 14 août 1980.) définit l'objet et les principes du désenfumage dans les établissements recevant du public.

2.7.2. Objet du désenfumage

Le désenfumage a pour objet d'extraire des locaux incendiés une partie des fumées et gaz de combustion afin de

-Rendre praticables les cheminements utilisés pour l'évacuation du public et l'intervention des secours.

- Limiter la propagation de l'incendie en évacuant vers l'extérieur la chaleur et les gaz et imbrûlés.

2.7.3- Principes de désenfumage

Le désenfumage peut se réaliser naturellement ou mécaniquement suivant l'une des méthodes suivantes d'après l'article DF2.

1. Par balayage de l'espace que l'on veut rendre praticable par apport d'air neuf et évacuation des fumées.
2. Par différence des pressions entre le volume que l'on veut protéger et le volume sinistré mis en dépression relative.
3. Par combinaison des deux méthodes.

Le désenfumage par tirage naturel est réalisé par des amenées d'air et des évacuations de fumées communiquant, soit directement soit au moyen de conduits, avec l'extérieur et disposées de manière à assurer un balayage satisfaisant du local (article DF 5).

2.7.4. Désenfumage mécanique

Le désenfumage par tirage mécanique est assuré par des extractions mécaniques des fumées et des amenées d'air naturelles ou mécaniques disposées de manière à assurer un balayage du volume à désenfumer. Ce balayage peut être complété par une mise en surpression relative des espaces à protéger des fumées. Les extractions et amenées d'air mécaniques sont réalisées au moyen de bouches reliées par des conduits à des ventilateurs et suivant les principes définis à l'article DF2. Un système de ventilation permanente (renouvellement d'air, chauffage ou conditionnement d'air) peut être utilisé pour le désenfumage, dans la mesure où il répond aux principes du présent chapitre.

2.7.5. Instruction technique N° 246 relative au désenfumage dans les ERP (journal officiel du 4 mai 1982)

Cette instruction a pour objet de préciser les règles d'exécution du désenfumage en décrivant les solutions qui permettent d'assurer :

- La mise à l'abri des fumées ou le désenfumage des escaliers.
- La mise à l'abri des fumées ou le désenfumage des circulations horizontales.
- Le désenfumage des locaux accessibles au public.

Les principales dispositions relatives au désenfumage mécanique stipulées dans cette instruction sont les suivantes :

- Si un local est ventilé en permanence (renouvellement d'air, chauffage ou conditionnement d'air), son système de ventilation peut être utilisé pour le désenfumage, dans la mesure où il répond aux dispositions de cette instruction.
- L'extraction des fumées est réalisée par des bouches raccordées, au moyen d'un conduit, à un ventilateur d'extraction.
- La vitesse de soufflage de l'air aux bouches d'amenée doit toujours être inférieure à 5 m/s.
- Les bouches d'amenée d'air mécanique doivent avoir un débit de l'ordre de 0,6 fois le débit extrait.
- Les ventilateurs d'extraction doivent assurer leur fonction pendant une heure avec les fumées à 400°C.

a- Solutions applicables aux dégagements : Pour limiter ou éviter l'enfumage des cages d'escalier et des circulations horizontales enclouées, celles-ci peuvent être, suivant le cas, désenfumées par un balayage naturel ou mise en surpression par rapport aux volumes sinistrés. Pour les escaliers, en aucun cas, les fumées n'en sont extraites mécaniquement.

b- Solutions applicables aux locaux accessibles au public :

Les locaux sont découpés en cantons de désenfumage (naturel) d'une superficie maximale de 1600 mètres carrés. La longueur d'un canton ne doit pas dépasser 60 mètres. Les cantons sont délimités par des écrans de cantonnement ou par la configuration de la toiture.

La surface géométrique totale des amenées d'air doit être au moins égale à celle des évacuations de fumées. Dans le cas de locaux divisés en cantons, cette amenée d'air peut se faire par les cantons périphériques.

c- Désenfumage mécanique des locaux :

Lorsque le désenfumage des locaux accessibles au public est prévu par tirage mécanique, il doit être réalisé dans les conditions suivantes :

- Les locaux sont découpés en cantons, dans les mêmes conditions qu'en désenfumage naturel.
- La hauteur des écrans de cantonnement doit être de 0,50 mètre au moins.
- Les salles sont équipées de bouches d'extraction mécanique des fumées avec un minimum d'une bouche par 320 mètres carrés.
- Le débit d'extraction à la bouche est au moins de 1 mètre cube par seconde pour 100 mètres carrés, avec un minimum de 1,5 mètre cube par seconde par local.

2.7.6. Règles de sécurité applicables aux gares

Les stations de métro sont des ERP de type GA, en effet l'arrêté du 20 février 1983 portant approbation des règles de sécurité et des modalités de contrôle applicables aux locaux accessibles au public, situés sur le domaine public du chemin de fer et rigoureusement indispensables à l'exploitation de celui-ci (Journal officiel –NC du 23 Avril 1983), stipule dans son deuxième article :

«Au sens du domaine du chemin de fer, le champ d'application du présent arrêté recouvre à la fois les chemins de fer d'intérêt général et d'intérêt local, les chemins de fer funiculaires, téléphériques, remonte-pentes, ou tout autre engin utilisant des câbles porteurs ou tracteurs, et d'une manière générale tous les systèmes de transport guidés ».

2.7.7. Types de gare

L'article GA 2 qui définit le Domaine d'application, de cet arrêté fait la distinction entre trois types de gares :

- Les gares aériennes.
- Les gares souterraines.
- Les gares mixtes.

Les gares souterraines sont celles dont les emplacements à prendre en compte répondent aux trois conditions suivantes :

- Etre situées au-dessous du niveau accessible aux engins des sapeurs-pompiers.
- Avoir la moitié de la surface de chaque face verticale longitudinale ne donnant pas à l'air libre.
- Etre couvertes en totalité.

Ces gares peuvent comprendre plusieurs niveaux de sous-sols accessibles au public, et leur point le plus bas être à plus de six mètres au-dessous du niveau moyen des seuils extérieurs

2.8. Conclusion

Par manque de réglementation algérienne relative à la sécurité incendie et le désenfumage dans les établissements recevant du public, on s'est référé à la réglementaires français qui restent très général et ne décrivent que qualitativement les exigences techniques relatives au désenfumage des stations de métro, et même les dispositions de l'instruction technique N°246 ne sont pas applicables aux gares souterraines.

Ils prescrivent la mise en surpression des volumes protégés par moyen de soufflage, cette solution est non envisageable – comme il sera montré lorsque ces volumes se situent en dessus des volumes sinistrés comme dans le cas des stations de métro. Le soufflage en haut ne peut empêcher les fumées de franchir les trémies à cause des forces de flottabilité importantes. En plus, le soufflage au niveau de la mezzanine aura certainement des conséquences déplorable sur le maintien de la stratification des fumées.

Chapitre 3 :

Présentation du code FDS

3.1 Introduction

Après les progrès réalisés dans le monde de l'informatique et après l'invention de l'ordinateur, l'étude numérique de la dynamique des feux et des incendies a connu un développement très rapide. Certes, les équations fondamentales qui gouvernent la dynamique des fluides et le transfert de chaleur ont été établies environ un siècle avant cela; mais toutefois, les modèles mathématiques pratiques du feu (pour le distinguer de la combustion contrôlée) sont relativement récents à cause de la complexité du problème.

La difficulté réside dans trois aspects: premièrement, le grand nombre de scénarios éventuels à considérer à cause de leur nature accidentelle. Deuxièmement, l'aspect physique complexe des phénomènes mis en jeu, et la limitation des ressources informatiques nécessaires pour faire les calculs pour la plupart des scénarios. En effet n'importe quelle étude fondamentale doit prendre en compte l'aspect aérodynamique de l'écoulement, qu'il est multiphasique, la turbulence et les transferts radiatifs et convectifs conjugués de la chaleur. A noter que chacun de ces aspects constitue un domaine de recherche à part. Troisièmement, le manque de modèles mathématiques généraux caractérisant la dégradation de la phase condensée des matériaux.

A ce jour, différentes approches sont utilisées dans la simulation des feux. Chacune de ces approches traite les phénomènes comme un problème tridimensionnel évoluant au cours du temps. L'une de ces approches dites à "zones", décrit les feux dans des locaux compartimentés, où chaque compartiment est divisé en deux couches homogènes, une couche supérieure chaude qui contient les gaz brûlés, et une couche inférieure constituée d'air frais. Pour chacune des deux couches, les bilans de masse et d'énergie et des équations supplémentaires qui décrivent d'autres processus physiques (écoulement à travers les ouvertures, transferts radiatifs et convectifs, pyrolyse...) sont établies.

La simplicité relative des modèles à zones, du point de vue physique et numérique, a conduit à leur large utilisation dans l'analyse des différents scénarios de feux et incendies. Malgré qu'ils ne fournissent pas de détail sur les distributions spatiales des propriétés physiques, ces modèles restent fiables et décrivent raisonnablement la réalité. Par contre, et par leur nature, il n'y a aucun moyen pour les améliorer.

L'accroissement rapide de la puissance des ordinateurs et le développement correspondant de la mécanique des fluides numérique CFD a conduit au développement de modèles CFD dits "à champs" appliqués à la recherche dans le domaine des feux et incendies.

Les méthodes CFD utilisent les équations de la dynamique des fluides (Navier-Stokes, Euler, etc.) et passent par les mêmes étapes:

1. Le prétraitement: durant lequel
 - La géométrie (frontières physiques) est définie.
 - Le volume occupé par le fluide est discrétisé en le divisant en petites cellules qui peuvent être uniforme ou pas.
 - Le modèle physique est établi, par exemple: Equations de mouvement + Enthalpie + Radiation + Conservation des espèces.
 - Les conditions aux limites sont définies, le cas échéant, les conditions initiales.
2. Le traitement: la simulation est démarrée et les équations sont résolues itérativement soit en stationnaire soit non- stationnaire.
3. Le post-traitement: il est utilisé pour l'analyse des résultats et leurs visualisations.

3.2. Modèles de transport des fumées

Le mouvement des fumées est en général suivi en résolvant une équation de transport pour un scalaire passif, c'est-à-dire en supposant que les fumées suivent le même trajet que les molécules d'air. Ce sera le cas pour les gaz et les particules de suie de petites tailles. On peut ainsi espérer mesurer relativement bien la vitesse des particules qui peuvent être inhalées, soit les particules de diamètre inférieur à 5-10 μm [10].

Pour les particules les plus grosses, des modèles de suivi lagrangien ont été développés. Ceux-ci prédisent les trajectoires individuelles des particules en résolvant une équation de transport lagrangienne pour chaque particule et prend en compte notamment leur densité contrairement à l'approche du scalaire passif.

Généralement, la production de fumées par un incendie est déduite de facteurs de conversion qui donnent la quantité d'un produit (CO_2 , H_2O , CO , NO , etc...) en fonction de la chaleur dégagée par l'incendie. Cette approche peut être utilisée avec un modèle de source volumique de chaleur, auquel cas la quantité de produits générés est distribuée uniformément sur le volume représentant la source incendie, ou avec un modèle de combustion auquel cas la quantité est répartie sur la surface définissant l'incendie et la

répartition des fumées dans la flamme est calculée. Cette méthode repose sur la disponibilité de données permettant

d'obtenir les facteurs de conversion et elle ne prend pas en compte les conditions de ventilation auxquelles sont soumises l'incendie et qui peuvent faire varier significativement la nature et la quantité de produits émis. Cette approche est utilisée dans cette étude, en effet FDS [11] suppose par défaut un taux de production de fumée par défaut qui est directement proportionnel au taux de dégagement de chaleur (HRR) qui sera fixé dans cette étude.

3.3. Description du code FDS

FDS est un logiciel CFD (Computational Fluid Dynamics) qui a été développé par le NIST pour la finalité de résoudre les problèmes pratiques de l'engineering en matière de protection contre l'incendie, et pour fournir en même temps un outil pour étudier la dynamique des feux et de la combustion. Sa première version a été publiée en Février 2003, et la version utilisée dans la présente étude est la version 6.6.0, Smokeview est un programme de post-traitement qui accompagne FDS et qui produit des images et des animations à partir des résultats de calcul de ce dernier. Dernièrement, son développeur lui a rendu apte à produire des visualisations du feu et des fumées d'une façon très réaliste.

Tous les paramètres requis par FDS pour décrire un scénario donné sont introduits par l'utilisateur dans un seul et unique fichier texte. Ce fichier contient toutes les informations suivantes : définition du domaine et de la grille de résolution numérique, l'environnement ambiant, géométrie des locaux, propriétés des matériaux, cinétique de la combustion et les quantités de sortie (Output quantité), un exemple de fichier d'entrée utilisé dans la présente étude est fourni en annexe.

FDS calcule la température, la densité, la vitesse et la composition chimique pour chaque cellule et pour chaque pas de temps. En plus, FDS calcul aux surfaces solides la température, le flux de chaleur, Taux de dégradation massique, et autres quantités variées. L'utilisateur doit choisir soigneusement quelles informations devrait-il enregistrer.

3.3.1. Modèles mathématiques présents dans FDS

Ci-après une description sommaire des modèles essentiels présents dans FDS, ainsi que les hypothèses qui y sont faites:

3.3.1.1. Modèle Hydrodynamique

FDS résout une forme des équations de Navier-Stokes appropriée aux écoulements à faible vitesse par les effets thermiques, et qui sont chargés de fumée et transportant la chaleur qui proviennent des feux. L'algorithme principal utilisé est un schéma de prédiction-correction explicite de second ordre dans l'espace et le temps.

L'approximation de faibles vitesses implique la filtration des ondes acoustiques tout en permettant une grande variation de la température et de la densité. Ceci donne aux équations un caractère elliptique approprié aux écoulements à faibles vitesses avec convection thermique. En effet, résoudre les équations pour des régimes transsoniques nécessiterait un pas de temps extrêmement court pour parvenir à avoir l'information qui se déplace à la vitesse du son, ce qui rend les simulations très difficiles.

Une approximation de l'équation d'état est faite par le biais d'une décomposition du champ de pression en une pression "background" de référence et une perturbation, l'objectif de cette décomposition est que pour les écoulements à faible nombre de Mach, la température et la densité peuvent être supposées inversement proportionnelles et l'équation d'état peut être approximée par:

$$P = \frac{\rho RT}{M} \quad (2)$$

La pression p dans l'équation d'état et l'équation de l'énergie est remplacée par la pression pour filtrer les ondes acoustiques qui se déplacent beaucoup plus rapidement que les écoulements rencontrés dans les applications de feux et les simulations des incendies. La façon avec laquelle un modèle CFD traite la turbulence constitue sa caractéristique la plus distinctive. Parmi les trois principales techniques de modélisation de la turbulence (DNS, RANS, LES), FDS n'en contient que deux, à savoir la technique LES et la méthode DNS.

La turbulence est traitée par l'approche à grande échelles LES qui est le mode de traitement par défaut, bien que les calculs peuvent être faits en simulation numérique directe DNS. Toutefois, cette dernière est limitée actuellement par la puissance des ordinateurs car elle nécessite un maillage très raffiné (de l'ordre du millimètre), cette approche n'est possible que dans des configurations simples, académiques et à faibles nombres de Reynolds, c'est à dire limitée à des écoulements présentant une gamme d'échelles spatiotemporelles relativement étroite. La Simulation des Grandes Echelles est l'une des approches qui ont reçu une large part de développements ces 30 dernières années. L'initiateur de cette approche, « Smagorinsky » propose dans son article fondateur de 1963 de considérer les contributions

aux grandes échelles comme étant explicitement calculées, et de modéliser les effets des structures dont la taille caractéristique est inférieure à la maille de calcul de la discrétisation considérée.

Le formalisme de LES repose sur un filtrage passe-bas des équations de bilan et une modélisation des paramètres sous-maille. Cette modélisation repose sur l'hypothèse d'universalité des mouvements à petite échelle. Cette hypothèse est généralement vérifiée loin des parois et de possibles interfaces (bulles, surface libre...).

A noter que L'algorithme numérique de FDS est conçu d'une façon à ce que le traitement par LES tend vers celui de DNS quand le maillage est suffisamment raffiné.

La résolution des équations simplifiées de la dynamique des fluides issues après toutes ces simplifications est faite à l'aide de la méthode des volumes finis avec une approximation de second ordre. Les variables sont mis à jour dans le temps par un algorithme de type prédiction-corrrection 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. Les équations simplifiées du modèle hydrodynamique (en plus de l'équation régissant l'évolution de la concentration (1)), se résument dans:

- L'équation de conservation de la masse:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3)$$

- Conservation de l'énergie

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h \vec{u} = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla \cdot q + \Phi \quad (4)$$

- Conservation de la quantité de mouvement:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{u} \vec{u} + \vec{\nabla} p = \rho \vec{f} + \vec{\nabla} \cdot \tau_{ij} \quad (5)$$

- Quant au terme de la fraction de la masse aux espèces gazeuses l'équation de la conservation de la masse s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(Y_i) + \nabla \cdot \rho Y_i \vec{u} = \nabla \rho D_i \nabla Y_i + \dot{m}''' \quad (6)$$

3.3.1.2. Modèle de combustion

Il existe deux modèles de combustion utilisés dans FDS, celui qui est par défaut, utilise la fraction du mélange qui est une quantité conservée qui représente le combustible et les produits de combustion. Le deuxième utilise les paramètres d'Arrhenius spécifique à chaque espèce. Mais souvent ce deuxième modèle est utilisé en mode DNS où la diffusion du combustible et d'oxygène peut être modélisée directement. Par contre, quand la grille de maillage n'est pas suffisamment raffinée, c'est le premier modèle qui est adapté et est utilisé avec la simulation à grande échelles LES. Etant donné un volume qui contient un mélange d'espèces gazeux, la fraction du mélange peut être définie comme étant le rapport entre la masse partielle des espèces et la masse totale présente dans le volume. La fraction du mélange est une fonction de l'espace et du temps. Si l'on suppose qu'après le mélange la réaction de combustion entre l'oxygène et le combustible se produit d'une façon instantanée et complète, on pourrait dire que le processus de combustion est contrôlé par le mélange, et dans ce cas toutes les espèces à lesquelles on s'intéresse peuvent être décrite en fonction uniquement de la fraction du mélange.

Nota: Lorsque l'objectif de la simulation est simplement la prédiction du transport de la fumée et de la chaleur à partir d'un feu "spécifié", en d'autre terme, lorsque le HRR du feu est un paramètre que l'utilisateur introduit, comme dans le cas de notre étude, FDS convertit le HRR introduit pour une surface donnée, en flux massique suivant la relation:

$$\dot{m}'' = \frac{f(t) \cdot q''_{user}}{\Delta H_g} \quad (6)$$

3.3.2. Potentialités et limitation de FDS

FDS peut être utilisé pour modéliser les phénomènes suivants :

- Le transport à faible vitesse des produits de combustion
- Transfert de chaleur convectif et radiatif entre gaz et solides
- Pyrolyse
- Propagation des flammes et développement du feu
- Extincteurs, arroseurs, détecteurs de chaleurs et leurs activations

Bien que FDS ait été conçu spécialement pour la simulation des feux, il peut être utilisé dans d'autres simulations à faible vitesse qui n'implique pas nécessairement la présence d'un feu ou des effets thermiques.

Malgré que FDS puisse aborder plusieurs types de scénarios, il existe des limitations dans tous ses algorithmes dont les plus essentielles sont les suivantes :

- Hypothèse de l'écoulement à faible vitesse : cette hypothèse rend FDS inapproprié pour modéliser des scénarios impliquant la présence de grandes vitesses qui approchent la vitesse du son comme c'est le cas dans les explosions, les ondes de choc dans les tuyères et les détonations.

- Géométrie rectiligne : l'efficacité de FDS provient de la simplicité de la grille de

-

résolution numérique et de l'utilisation d'un solveur direct et rapide pour le champ de pression. En contrepartie, ceci constitue une limitation dans le cas où la géométrie n'est pas conforme avec le maillage rectangulaire.

- Développement du feu et sa propagation : Comme le modèle de FDS a été conçu à l'origine pour analyser les feux à échelle industrielle, il peut être utilisé et donnera de bons résultats, selon la finesse du maillage, dans le cas où le HRR du feu est spécifié et que l'objectif principal de la simulation. Par contre dans le cas où le HRR est prédit au lieu d'être spécifié, l'incertitude du modèle devient plus importante.

- Combustion : FDS utilise un modèle de combustion basé sur la notion de fraction de mélange. Dans sa forme la plus simple, le modèle suppose que la combustion est fonction uniquement du mélange sans tenir compte de la température. Celle-ci est une bonne supposition dans le cas des feux à grande échelle et bien ventilés. Par contre si le feu manque de bonne ventilation, l'oxygène et le combustible peuvent se mélanger sans qu'ils s'enflamment.

3.4. Définition de la configuration retenue pour l'étude

La configuration de la station retenue pour l'étude (voir Fig.1.2) est une station à un seul niveau. Les quais ont une longueur de 70 m, 14 m de largeur et d'une hauteur de 3 m. les deux Tunnels ont une section transversale de 33,75 m² (7.5 m x 3.5 m). La sortie de la station est en forme de carré de 23.35 m² (6 m x 3.075 m). au milieu de la station sur le quai droit, un train long de 63m composés de 4 wagons est garé.

3.5. 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 [12] (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 [13], 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.

3.6. Domaine de calcul

Le fichier d'entrée FDS est un fichier de type texte « nom.data » qui représente la première étape avant de procéder au calcul. Dans ce fichier on spécifié le maillage, les obstructions présente dans le domaine, les conditions aux limites, etc. par des groupes de commande, tel que (MESH, OBST, VENT...), suivi par les paramètres de repérage. Le domaine de calcul est spécifié par le groupe PDIM. Il est nécessaire de choisir un système de coordonné fixe.

Le train présent au milieu de la station est représenté, en créant des obstructions à l'aide du groupe OBST, après les portes du train sont créés par la commande HOLE. L'emplacement des entrées passagers est spécifié par le groupe VENT, ou on peut imposer la condition à la limite voulu (OPEN ou une vitesse). La source de chaleur est spécifiée par le groupe VENT ou on peut imposer une température ou un flux de chaleur.

3.7. Maillage

FDS calcul les équations gouvernantes dans un maillage rectangulaire. Ceci peut représenter une limitation, où certaine géométrie ne sont pas conformes pour les grilles rectangulaires, donc il faut les approximées par une forme rectangulaire. Sur FDS on peut diviser la géométrie considérée à plusieurs zones, si celle-ci n'est pas rectangulaire. Dans notre cas on a divisé notre grand volume qui est la station en trois volumes secondaires (volume du haut, du milieu et du bas) Figure (3.1).

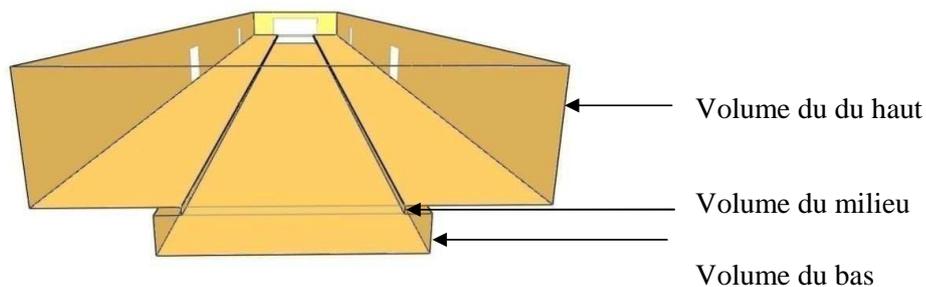


Fig.3.1 : Division du domaine

La taille des mailles est spécifiée dans chaque direction du système de coordonnées à l'aide de IJK (nombre de maille dans les directions x, y, z respectivement) suivi de XB (dimension du domaine), après le bloc &MESH. Notons qu'il serait meilleur pour les calculs, si les mailles sont cubiques.

Dans le cas de notre station on a choisi un maillage cubique de 0.25 m dans les trois directions, donc les mailles ont une forme cubique, tel qu'on a eu 250 880 mailles pour le volume haut, 6 720 mailles pour le volume du milieu et 42 000 mailles pour le volume du bas, donc une totalité de 299 600 mailles

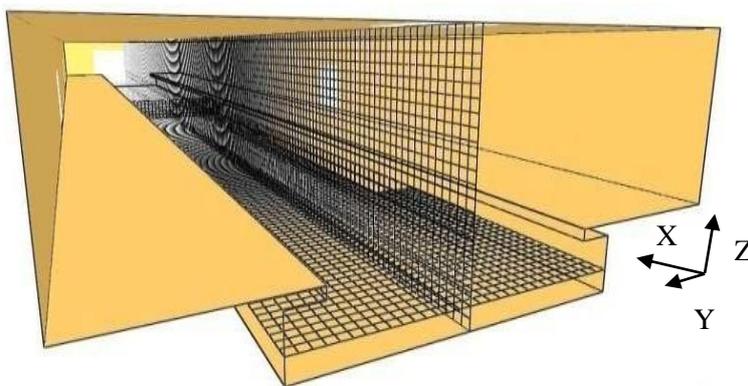


Fig.3.2 : Maillage sur FDS avec système de coordonnées

Chapitre 4 :

Etude Numérique

Résultats et Interprétation

4.1. Introduction

La station qui fait l'objet de cette étude est une station de métro typique (**Fig.4.1**) Elle a une longueur de 70 m, une largeur de 14 m et une hauteur sur le quai de 4 m. Au milieu de la station un train constitué de quatre wagons est garé sur le quai droit, chaque wagon à trois portes sur les deux côtés. La longueur totale du train est de 64 m. La configuration en trois dimensions a été dessinée sur FDS 6.6.0 figure (4.1). Le feu est simulé comme une source de chaleur surfacique d'une puissance de 15 MW répartie sur toute la surface incendiée. Un scénario de feu a été considéré : Le feu se produit au niveau du 1er wagon.

Dans les calculs, il a été supposé que la totalité d'énergie est transporté par convection et l'influence du rayonnement est négligée (du fait de la difficulté du traitement des données par le PC). L'étude numérique est faite avec le logiciel FDS 6.6.0 afin d'évaluer la sécurité contre l'incendie dans la station.

L'objectif de cette partie est de rechercher les scénarios les plus critiques par l'évaluation des champs de vitesse et de la température moyenne à l'aide des prises de mesure P1, P2, P3 et P4 localisées dans la station. Ces points se situent à une hauteur de 1.5 m au milieu du quai droit (le plus proche du wagon en feu), figure 4.1.

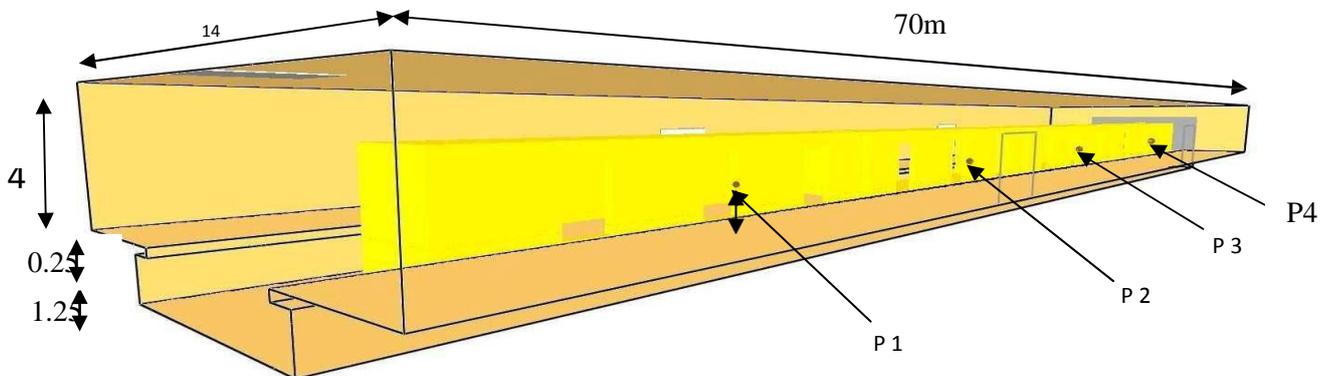


Fig.4.1 : Image 3D de la station avec l'emplacement des points de mesure de la température

4.2 Définition des scénarios et Nomenclature

a. Définition des scénarios

Dans cette partie on présente les différents scénarios d'incendie.

L'incendie se produit au niveau de la plateforme du 1er wagon (figure 4.2). On considère cinq cas possibles de ventilation :

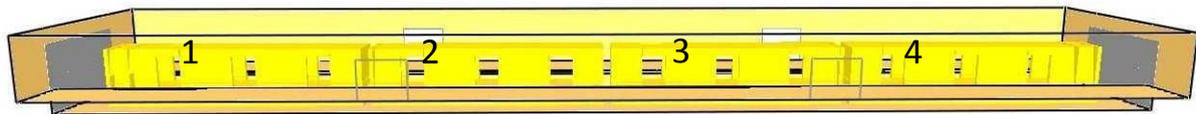


Fig.4.2 : Numérotation des wagons

Les directions suivantes du courant d'air dans les tunnels sont retenues :

- Tunnels sans ventilation (condition 'ouvert' (OPEN)).
- Les deux tunnels sont en soufflement ;
- Le tunnel le plus près du wagon en feu est en soufflement et le deuxième en extraction
- Le tunnel le plus près du wagon en feu est en extraction et l'autre en soufflement
- Les deux tunnels sont en extraction.

Dans cette étude on a considéré que les débits d'extraction et de soufflement sont faible dans les tunnels, est pris égale à $34 \text{ m}^3/\text{s}$.

b. Nomenclature

Pour éviter les répétitions lors de la rédaction nous proposons la nomenclature suivante pour faciliter le repérage des différents cas.

Tous les cas sont nommés par ABCD tel que :

A : Quand les deux tunnels sont en soufflage

B : Quand le tunnel le plus près de wagon en feu est en extraction et l'autre en soufflement

C : Quand le tunnel le plus près du wagon en feu est en soufflement et le deuxième en
Extraction.

D : Quand les deux tunnels sont en extraction

4.3. Système de classement des résultats

Comme l'objectif de notre étude est de rechercher les scénarios d'incendie les plus critiques pour la sécurité des passagers, donc on doit disposer d'un système pour classer les résultats des simulations.

Le système adopté pour classer les résultats est basé sur la température moyenne calculée par les quatre prises de mesure de température P1, P2, P3 et P4, placées dans la station (figure 4.1) sur une période de 200 s (3 min et 20 secondes). Les spécialistes de l'incendie déclarent qu'une exposition à des températures de 50°C ou plus constitue un très grand danger pour la santé [15]. Dans notre étude on a voulu renforcer la sécurité, donc on a choisi la température de 40°C comme température de référence au danger sur laquelle tous les cas vont être classés.

- Si la température moyenne calculée sur deux ou trois prises de mesure dépasse 40°C, on dit que le cas est très dangereux.
- Si la température moyenne dépasse 40°C dans une ou deux prises de mesure, on dit que le cas est moyennement dangereux.
- Si la température moyenne ne dépasse pas 40°C dans les 4 prises de mesure, on dit que le cas est faiblement dangereux.

4.4. Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont considérées pour les trappes, les entrées passagers et les tunnels. Elles sont résumées dans le tableau (4.1)

Tab.4.1 : Tableau des conditions aux limites

	Dimension (m)	Condition à la limite
Trappes	2 x 2.5	Débit sortant constant, $Q_{trappe}=50 \text{ m}^3/\text{s}$
Entrées passagers	3 x 2.5	Ouvert « OPEN » ¹
Tunnels	7.5 x 4.5	débites d'extraction ou de soufflement faible ²

(1) La condition « ouvert » veut dire qu'on n'impose aucun débit à l'état initial

(2) ce débit correspond à la vitesse de 1 m/s.

La puissance de l'incendie est fixée à 15 MW pour tous les cas et la température et la pression initiale dans le domaine est 20°C et 101.3 kPa respectivement. Le maillage du domaine est uniforme.

4.5. Résultats et interprétation

Les résultats sont présentés sous plusieurs formes (tableaux, graphes, images). On se contentera de présenter les cas les plus représentatifs des phénomènes qui se produisent dans la station. Ils sont groupés en catégories.

- Catégorie 1 : Sans ventilation sur les tunnels.
- Catégorie 2 : avec ventilation à faible débit.

4.5.1. Catégorie 1 : Sans ventilation sur les tunnels

Dans le tableau (4.2) on donne la température moyenne calculée aux trois prises de mesure, placées au milieu du quai droit à la hauteur de 1.5 m pour le cas sans ventilation à différents temps. La condition qui a été imposé sur les tunnels est ‘ouvert’ (OPEN) (c'est-à-dire aucun débit n'est imposé).

Tab.4.2 : Températures moyennes pour la catégorie sans ventilation sur les tunnels

	Température au milieu du quai droit à H=1.5 m (°C)			
Temps (s)	P 1 (x=11.75)	P 2 (x=27.25)	P 3 (x=42.75)	P 4 (x=58.25)
20	43.16	20.05	20.00	20.00
80	50.33	21.58	21.90	22.18
100	32.72	21.92	22.87	21.41
150	35.68	22.14	22.61	21.80

Dans ces quatre temps (Tableau 4.2), l'extraction des fumées se fait uniquement par les trappes avec un débit total de 100 m³/s. La conservation de la quantité de mouvement dans la station implique un débit d'air entrant par les entrées passagers et les tunnels. Dans cette catégorie on remarque qu'à la position P1, la température dépasse le seuil de référence de 40°C. a cet effet le scenario est moyennement dangereux.. Ceci est causé par les courants d'air induits sur les entrées passagers qui attisent le feu et aussi par l'emplacement du feu dans le premier wagon qui est à proximité des entrées passagers.

Dans la figure 4.2 on représente les champs de température pour le premier cas. On remarque qu'à la position P1 la moyenne des températures pour les différents temps, à la hauteur 1.5m dépasse le seuil imposé. Au niveau de la position P1 les usagers ne peuvent pas être en sécurité par rapport au niveau des températures.

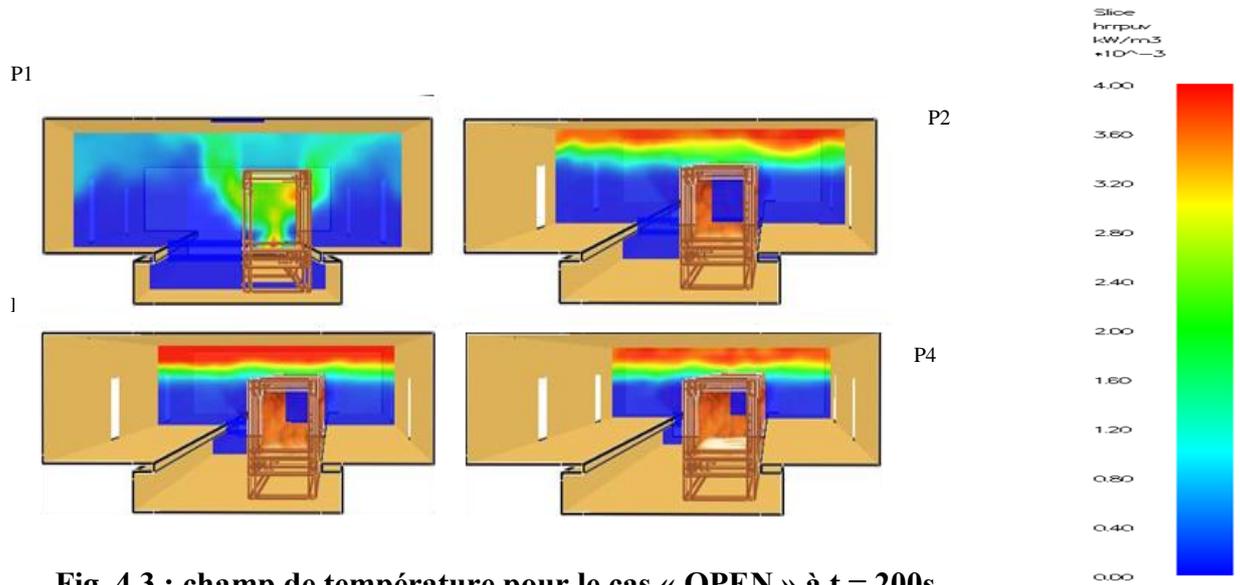


Fig. 4.3 : champ de température pour le cas « OPEN » à t = 200s

La visibilité est un critère très important à prendre en considération avec la température, elle influe directement sur la capacité et le temps que mettent les usagers à évacuer la station.

Dans la Figure (4.4), est présenté l'évolution de l'enfumage et la densité des fumées dans la station. La visibilité est exprimée en mètre. La valeur de 30 mètres correspond à une visibilité maximale et la valeur de 1 mètre correspond à une visibilité très limitée.

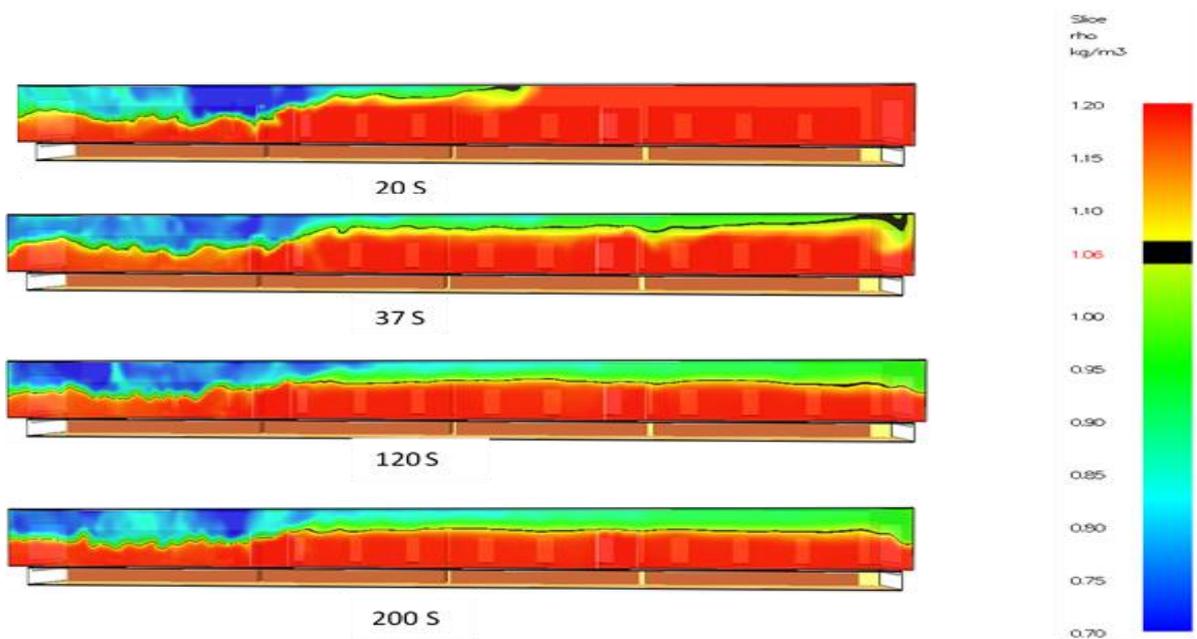


Fig.4.4 : Evolution de l'enfumage de la station et l'évolution de la visibilité pour le cas « OPEN »

On remarque qu'à partir de 20 secondes, la visibilité diminue sensiblement à proximité de la première porte de sortie des voyageurs ce qui constitue une gêne pour les usagers à évacuer et à partir de 37 secondes la station est complètement enfumée, sans apport d'air les fumées restent stratifiées au niveau du plafond ceci se traduit par des températures très proches de la température ambiante au niveau des plans P2, P3 et P4 à la hauteur 1,5m.

Quand le régime stationnaire est atteint, l'évolution globale de la quantité de chaleur émise en fonction du temps est constante, Figure (4.5).

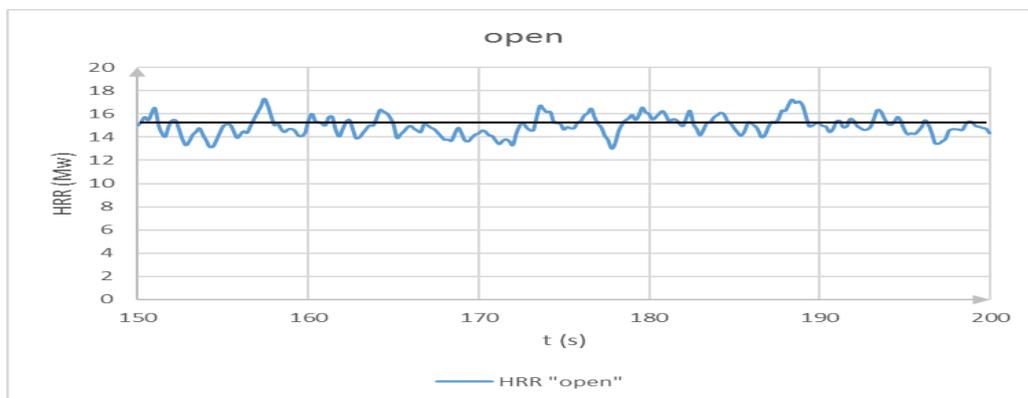


Fig.4.5 : Evolution de la quantité de chaleur émise en fonction du temps

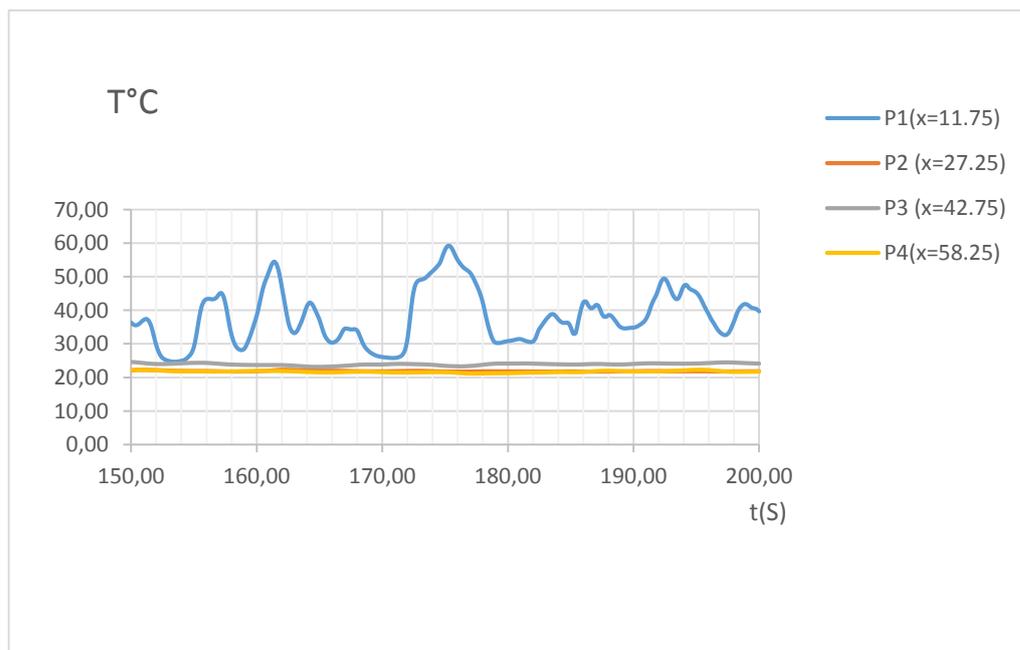


Fig.4.6 : Distribution de la température en fonction du temps à la hauteur 1.5 m pour le cas OPEN

Dans la figure (4.6), on représente la distribution de température en fonction du temps à la hauteur 1.5 m pour le cas OPEN. La moyenne des températures au différentes positions correspond bien à celle donnée précédemment, **Tab.4.2**.

On remarque dans la figure (4.7), que les fumées sont stratifiées de part et d'autre dans la direction Y pour les positions P2, P3 et P4. Les températures restent au-dessous de la température critique (40°C) jusqu'à la hauteur de 2 m. Le même résultat est constaté dans le graphe de la figure (4.4) où la température reste en général au-dessus de 40°C pour le premier plan de mesure. On remarque une distratification des fumées au niveau du 2ème et du 3ème wagon. Ceci s'explique par l'existence d'une force de flottabilité importante et d'un appel d'air par les entrées passagers. On constate aussi dans la figure (4.6) que les fluctuations de la température ne sont pas marquées par des modifications importantes au niveau des prises de mesures et plus, on s'éloigne de la source de chaleur la température diminue.

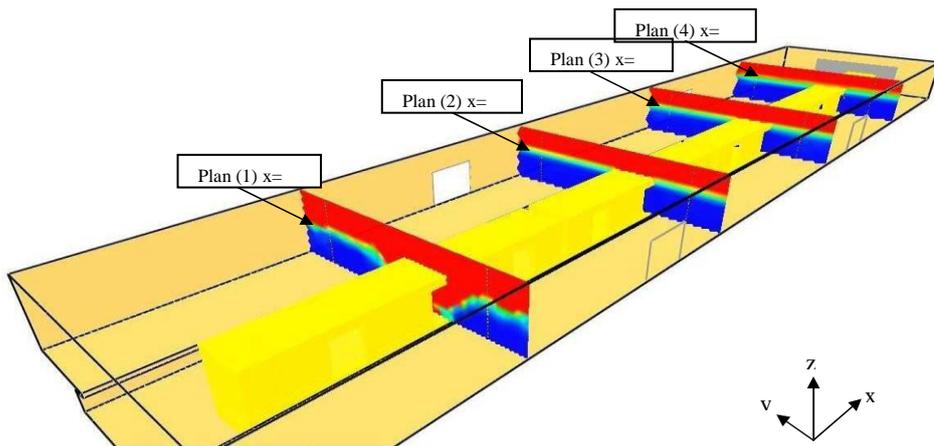


Fig.4.7 : Plans verticaux de la distribution de température.

4.5.2. Catégorie 2 avec ventilation : faible débit sur les tunnels

a. Soufflement cas A

Dans le tableau (4.3), on présente les résultats du cas A qui ont été simulés pour la catégorie faible débit de soufflement sur les tunnels. On remarque que ce scénario présente une dangerosité moyenne, vue que la moyenne des températures au moins a une position de la station dépasse le seuil imposé.

Tab.4.3 : Températures moyennes pour le cas A

Cas A	Température au milieu du quai droit à H=1.5 m (°C)			
Temps (s)	P 1 (x=11.75)	P 2 (x=27.25)	P 3 (x=42.75)	P4(x=58.25)
20	55.46	22.12	20.02	20.00
80	56.76	28.15	25.09	23.00
100	43.50	28.88	22.85	23.59
150	41.29	29.74	26.12	21.11
200	24.49	21.96	26.15	21.36

Sur la figure (4.8) on montre que la situation est dangereuse pour les passagers au niveau du premier plan où il y a un dépassement de la température critique. Cela est dû principalement à la couche de fumées stratifiées ainsi que l'emplacement du feu. Dans les figures (4.7) et (4.8), on montre la distratification des fumées et l'enfumage de la station pour et dans la figure (4.9) on peut apercevoir les courants d'air induits sur les entrées passagers.

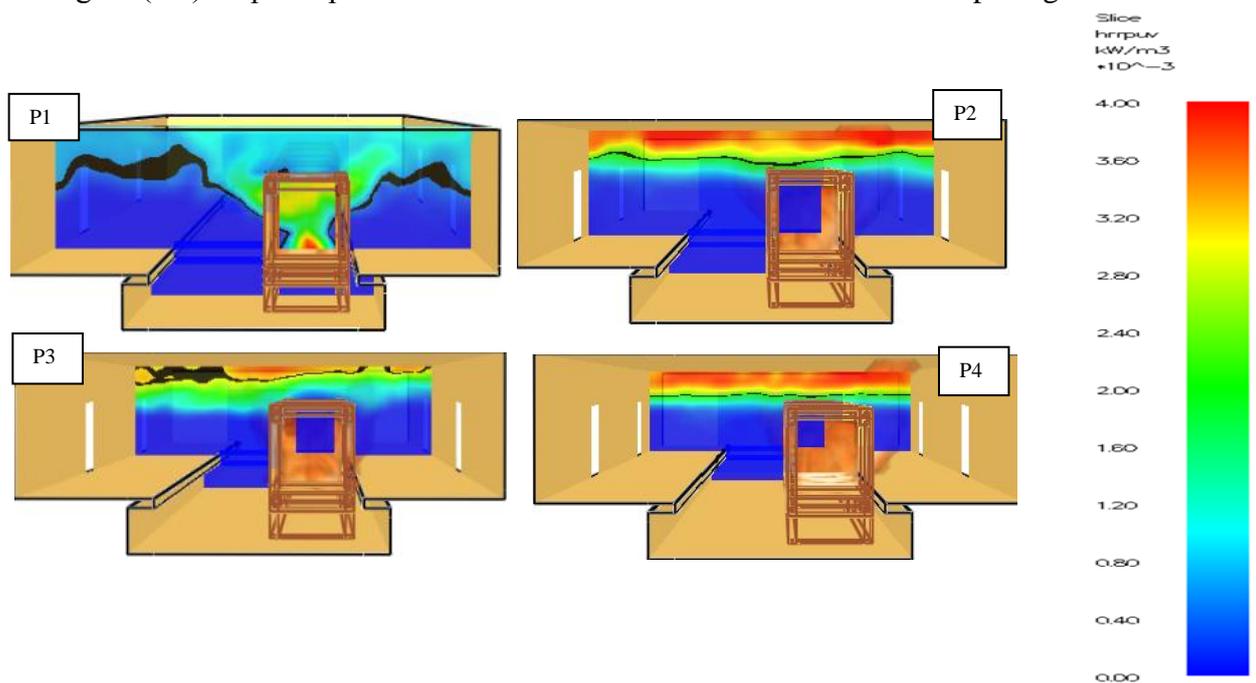


Fig.4.8: Distribution de la température pour le cas A à t = 200s

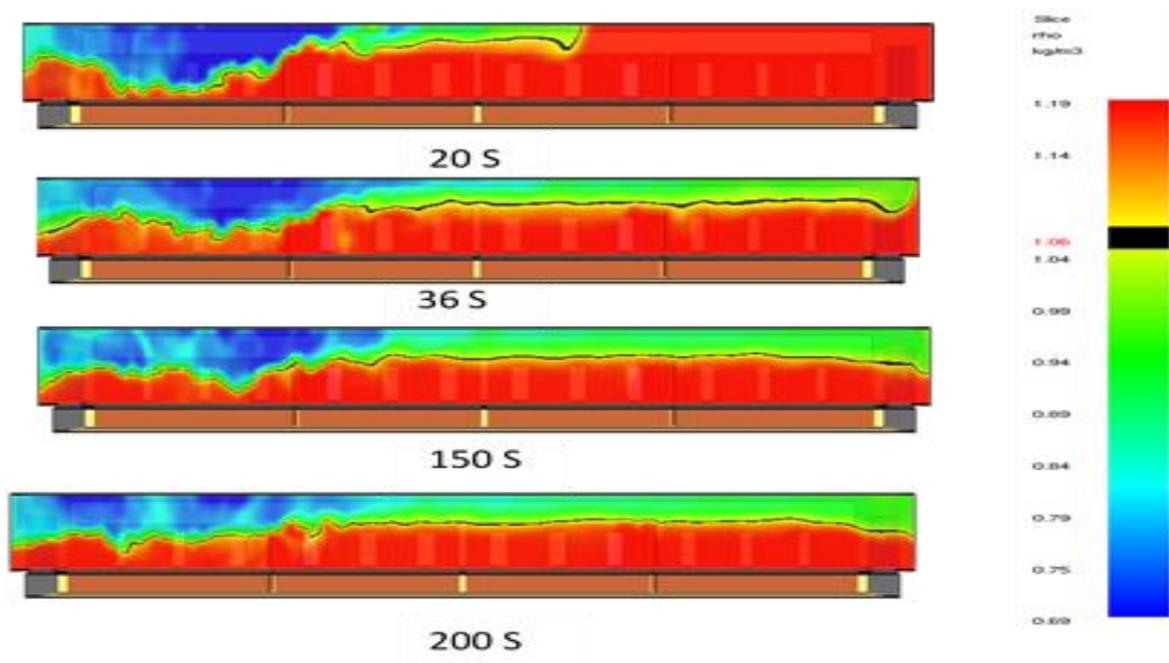


Fig.4.9 : Enfumage de la station et évolution de la visibilité pour le cas A

Les visualisations par Smokeview (Fig.4.8-4.9) des résultats des simulations pour le cas de soufflage par les tunnels montrent l'enfumage de la station (au voisinage du feu).

La fumée qui remonte au plafond se trouve perturbée par le courant d'air issu de la sortie des deux tunnels, fig (4.11). Le même comportement dans l'évolution de la chaleur émise dans la station que pour le cas open, sauf que ce scénario présente plus de fluctuations, figure (4.10).

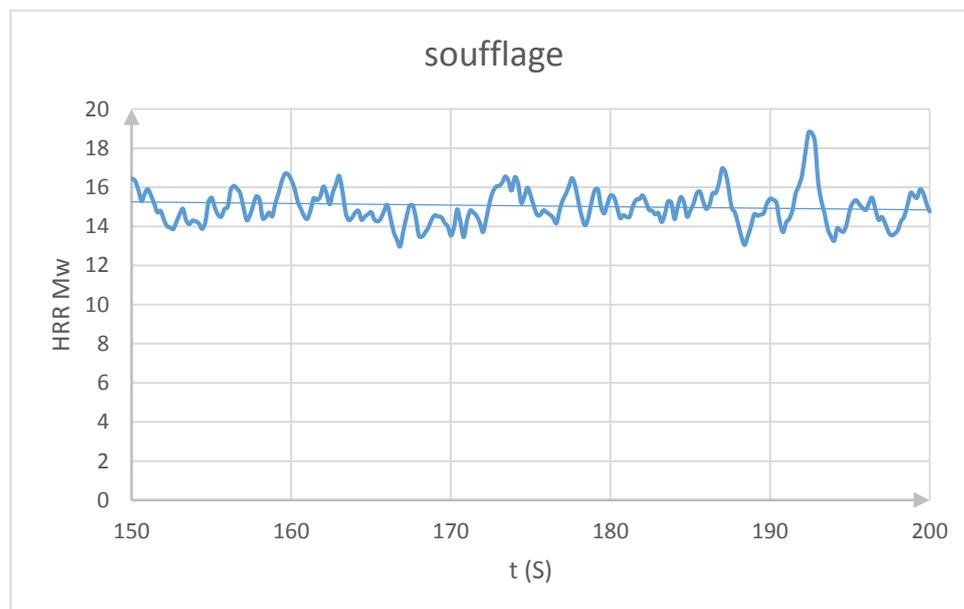


Fig.4.10 : Evolution de la quantité de chaleur émise en fonction du temps à la hauteur 1.5 m

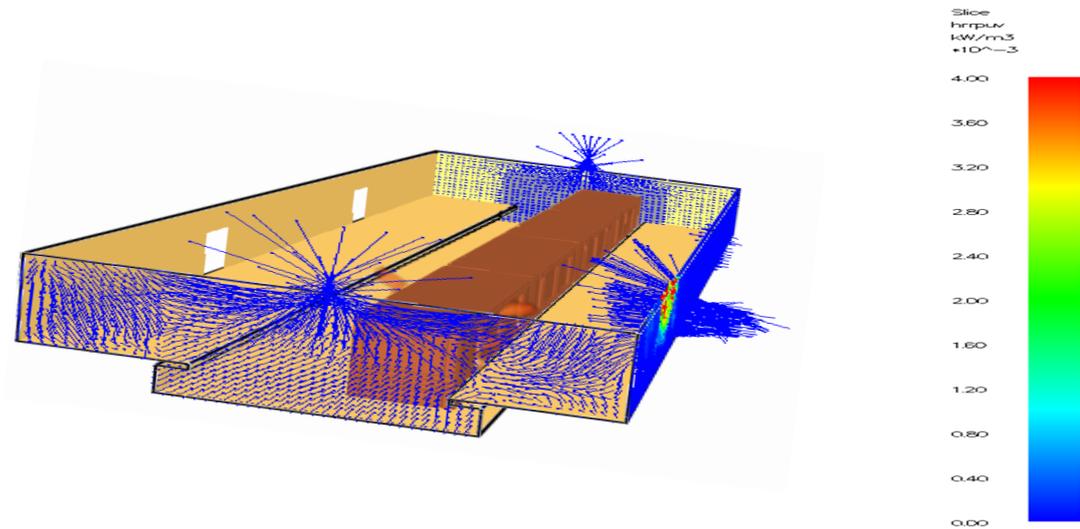


Fig.4.11 : Distribution de la vitesse pour le cas A à $t = 15s$

Dans le graphique de la figure (4.12), on remarque que la température prélevée sur les plans de prises de mesure sont acceptables à l'exception du plan P1 ($x=11.75$) où les températures sont critiques avec enregistrement d'une température critique sur le plan P2 a $t=197.94s$

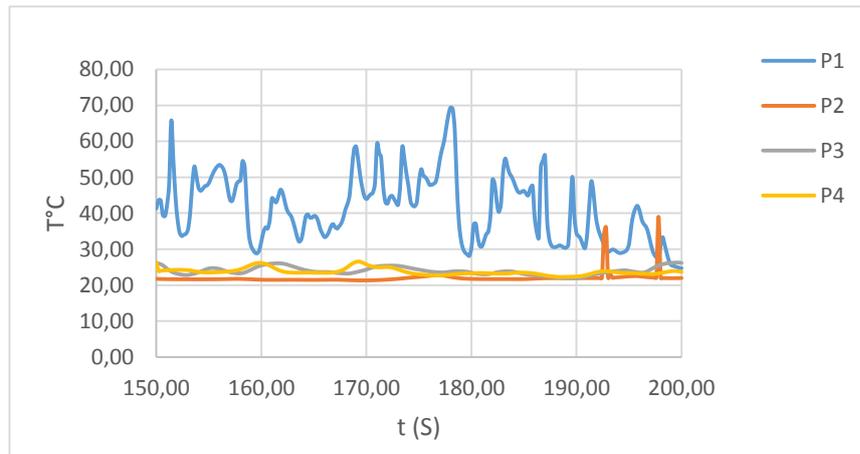


Fig.4.12 : évolution de la température en fonction du temps à la Hauteur 1.5 m pour le cas A

b. Extraction -Soufflement cas B

Dans le tableau (4.4) on présente les résultats du cas B qui ont été simulés pour ce scénario, extraction - soufflement sur les tunnels. On remarque la présence du cas très dangereux. Sur l'ensemble de la station seule la zone P4 peut être considérée sécurisée dans la marche du temps 200 secondes.

Tab. 4.4 : Températures moyennes pour le cas extraction soufflement

Temps (s)	Température au milieu du quai droit à H=1.5 m (°C)			
	P 1 (x=11.75)	P 2 (x=27.25)	P 3 (x=42.75)	P4(x=58.25)
20	91.73	20	20	20
80	168.06	20.97	22.32	22.40
100	146.56	40.45	41.87	22.89
150	96.37	39.62	40.12	23.99
200	114.04	22.23	25.25	21.49

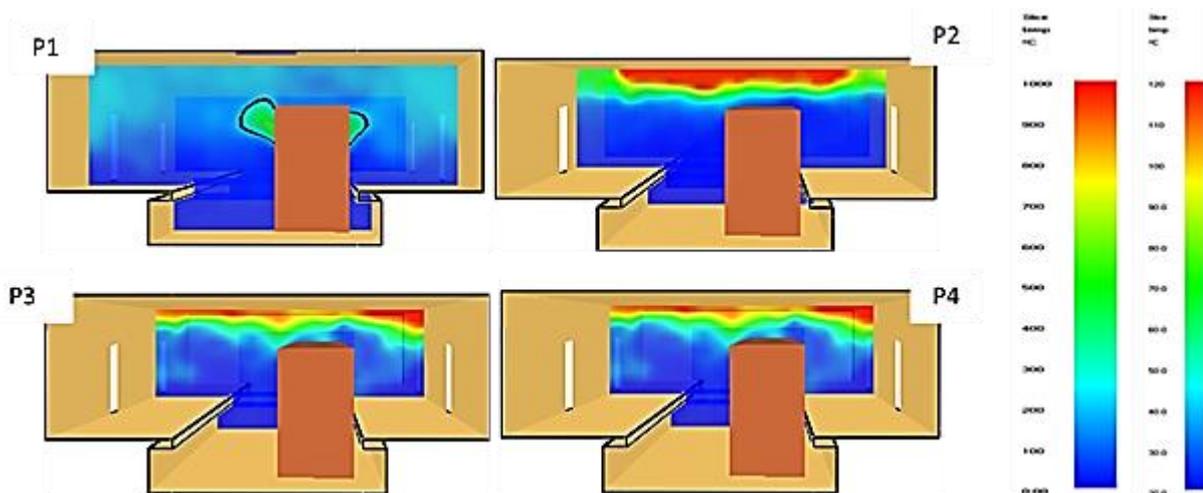


Fig.4.13 : Distribution de la température à la hauteur 1.5 m pour

le cas B à t=200s

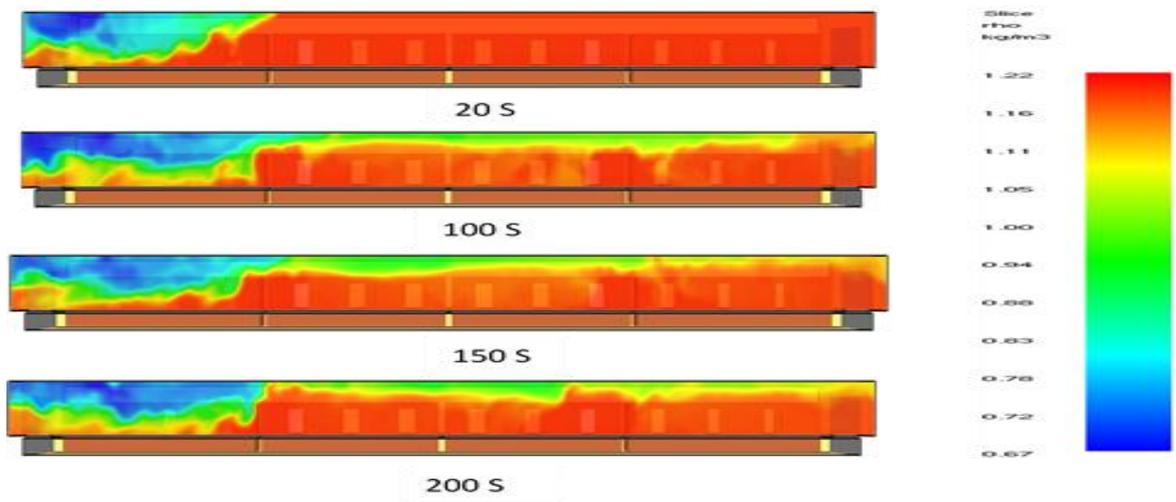


Fig.4.14 : Enfumage de la station et évolution de la visibilité pour le cas B

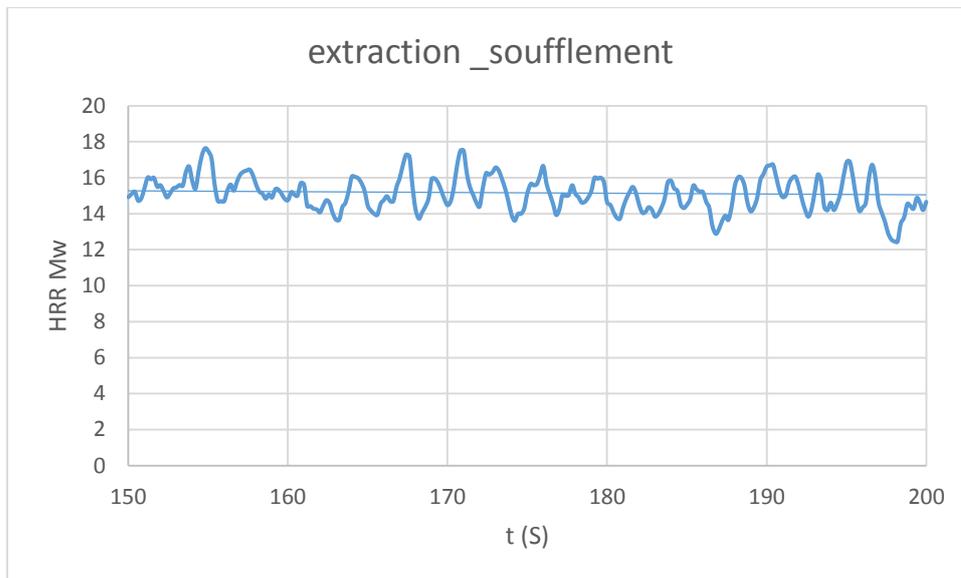


Fig.4.15 : Evolution de la quantité de chaleur émise en fonction du temps
à la hauteur 1.5 m

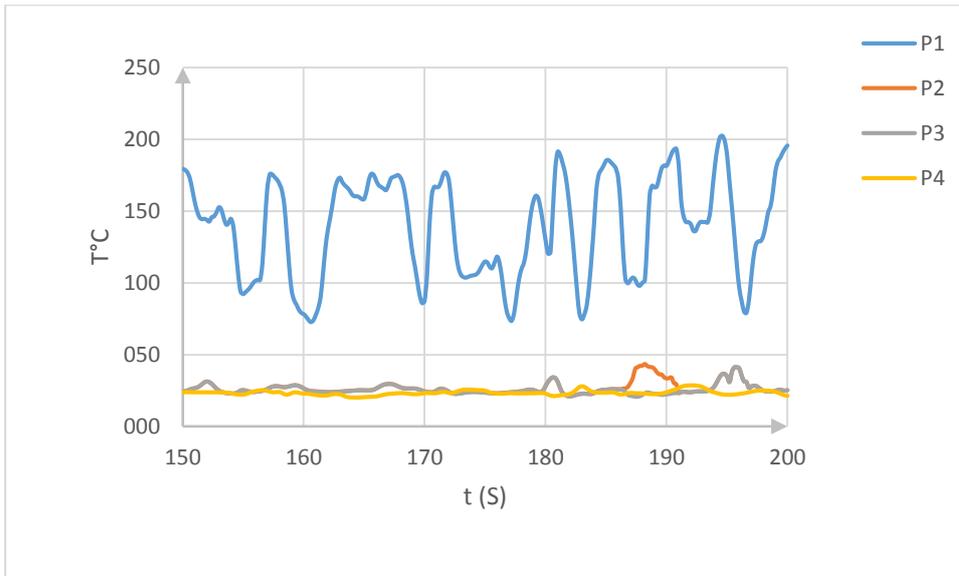


Fig.4.16 : évolution de la température en fonction du temps à la Hauteur 1.5 m
pour le cas B

Les résultats des figures (4.13), (4.14), et (4.15) viennent conforter les interprétations faites par rapport aux résultats donnés dans le tableau (4.4). Dans le graphe de la figure (4.16), on constate une augmentation dans la fluctuation de la température prélevée sur les quatre prises de mesure et on a enregistré des températures critiques sur les plans P1, P2 et P3 avec une légère augmentation des températures au niveau du plan P4 causée par la chaleur transportée par convection de l'air chaud. La quantité de chaleur émise par l'incendie (figure 4.15) est très importante ceci est dû à l'apport de l'air frais par les entrées passagers. L'enfumage de la station est atteint à $t= 200$ s.

c. Soufflement – extraction - cas C

Dans le tableau (4.5) on présente la température moyenne calculée aux quatre prises de mesurées à différents intervalle, placées au milieu du quai droit à la hauteur de 1.5 m.

Tab.4.5 : Températures moyennes pour la catégorie C

Temps	Température au milieu du quai droit à H=1.5 m (°C)			
	P 1 (x=11.75)	P 2 (x=27.25)	P 3 (x=42.75)	P 4 (x=58.25)
20	56	23.59	20.00	20.01
80	64	50.80	28.56	23.97
100	58	41.13	28.63	26.01
150	73	42.65	28.66	25.06

Dans ces quatre cas (Tab.4.5), l'extraction des fumées se fait par les trappes et le tunnel 2 avec un débit total de 100 m³/s. Dans cette catégorie on remarque que le cas P1 (x=11.75) est un danger pour la sécurité des passagers car on a un dépassement de la température critique (40 °C) ainsi que P2 à t= 80 S, Ceci est causé par les courants d'air induits par le premier tunnel et les entrées de la station.

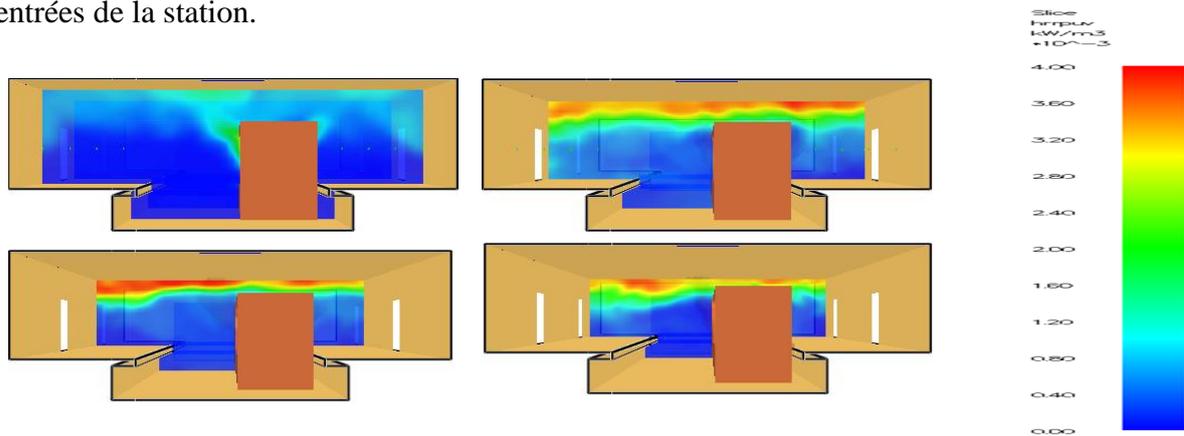


Fig.4.17 : Distribution de la température à la Hauteur 1.5 m pour le cas C

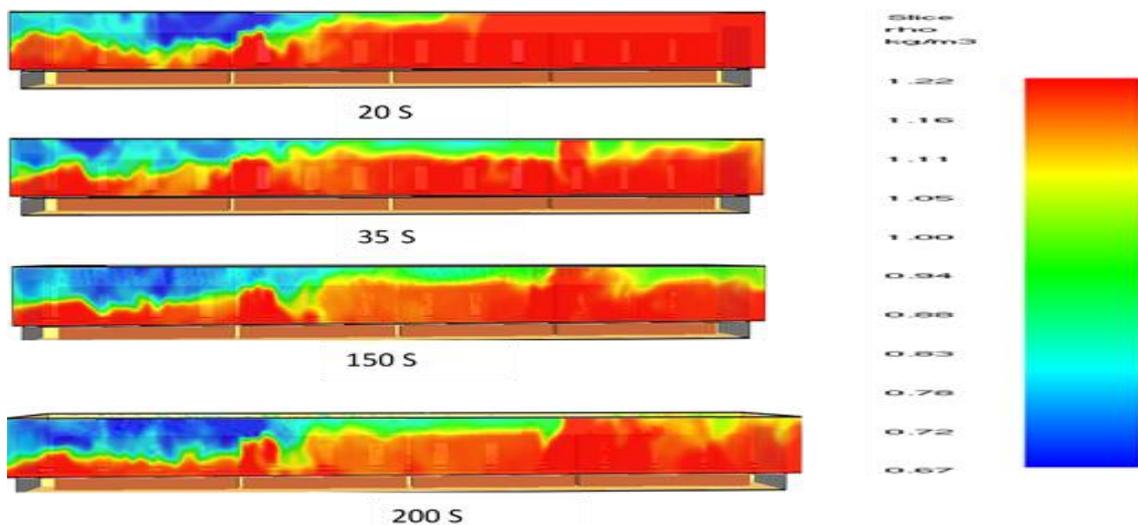


Fig.4.18 : Enfumage de la station et évolution de la visibilité pour le cas C

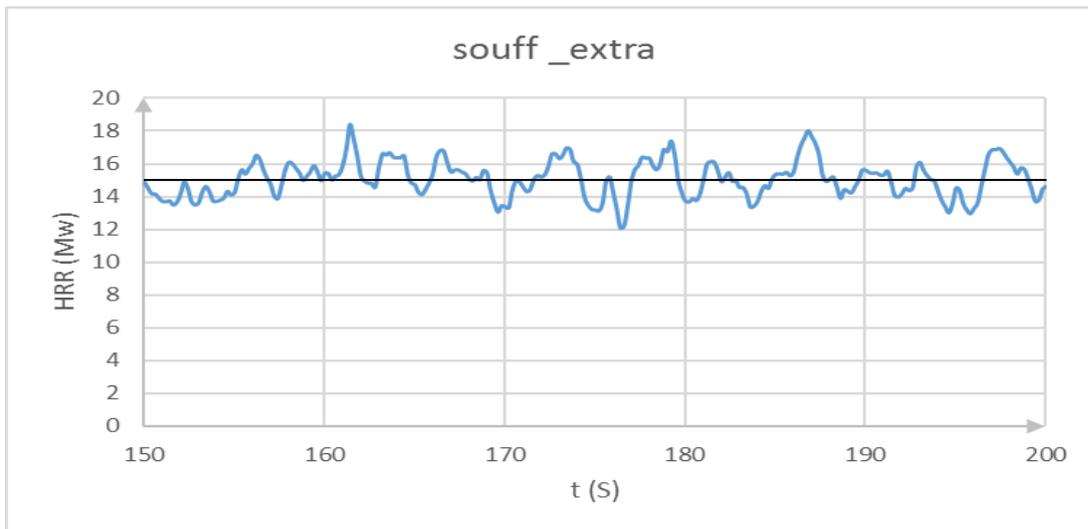


Fig.4.19 : Evolution de la quantité de chaleur émise en fonction du temps
à la hauteur 1.5 m

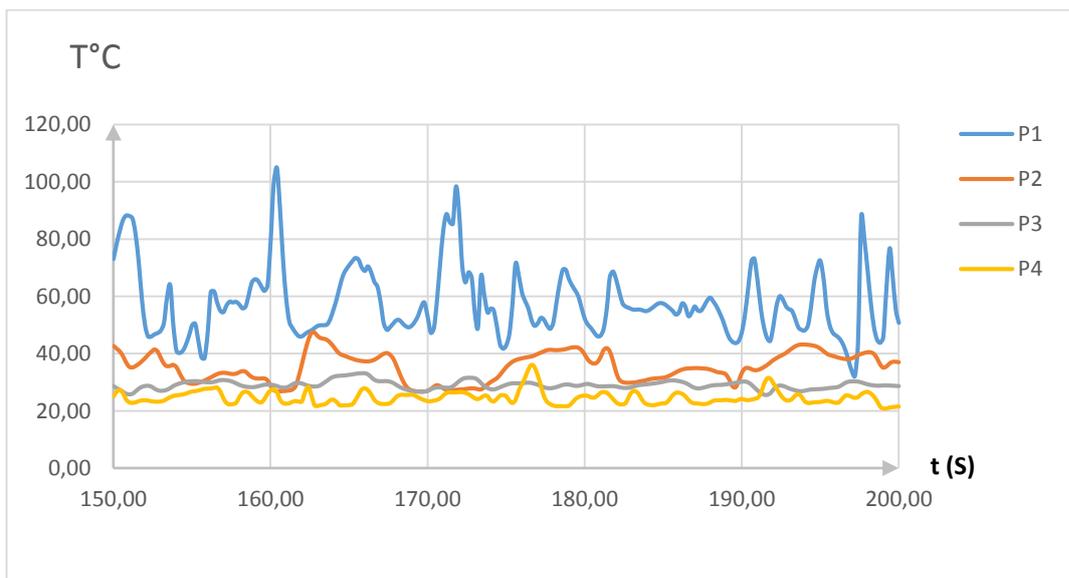


Fig.4.20 : distribution de la température en fonction du temps
à la Hauteur 1.5 m pour le cas C

Dans le graphe de la figure (4.20), on constate une augmentation de la température prélevée sur les quatre prises de mesure et on a enregistré des températures critique sur les plans P1 et P2 avec une légère augmentation des températures au niveau des plans P3 et P4 même si elles restent faiblement dangereuses. La quantité de chaleur émise par l'incendie (fig 4.19) est très importante ceci est dû à l'apport de l'air frais par le premier tunnel qui

alimente l'incendie en comburant. L'enfumage de la station est atteint à $t= 200$ S, on remarque aussi une élévation de la température aux plans de prise de mesures P2, P3 et P4 à cause de la chaleur transportée par convection de l'air chaud.

d. Extraction cas D

Dans le tableau (4.5) on donne la température moyenne calculée aux quatre prises de mesurées à différents intervalle, placées au milieu du quai droit à la hauteur de 1.5 m.

Tab.4.6 : Températures moyennes pour la catégorie D

	Température au milieu du quai droit à H=1.5 m (°C)			
Temps (s)	P 1 (x=11.75)	P 2 (x=27.25)	P 3 (x=42.75)	P 4 (x=58.25)
20	101.12	27.97	20.02	20.00
80	120.34	40.21	41.01	33.86
100	165.95	42.03	30.04	29.44
150	98.82	27.15	25.02	25.81

Dans le (Tableau 4.6), l'extraction des fumées se fait par les trappes et les deux tunnels avec un débit total de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ par les deux trappes et $64 \text{ m}^3/\text{s}$ par les deux tunnels. Dans cette catégorie on remarque que le cas P1 (x=11.75) est un danger pour la sécurité des passagers car on a un dépassement de la température critique (40 °C) ainsi que P2 à partir de 80 secondes. Ceci est causé par les courants d'air induits par le premier tunnel et les entrées passagères.

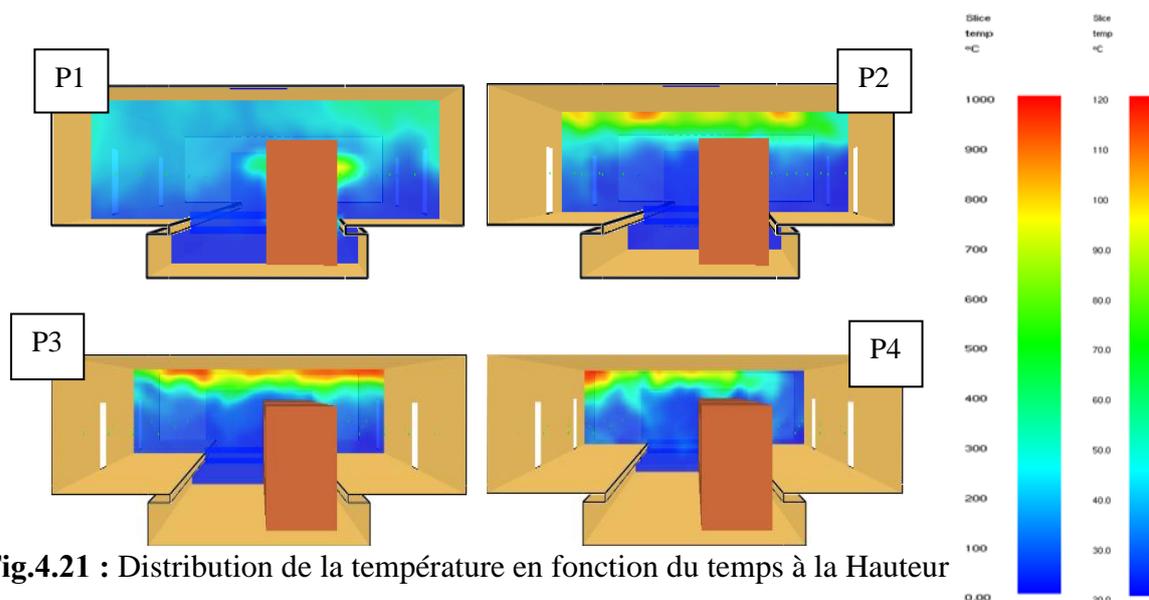


Fig.4.21 : Distribution de la température en fonction du temps à la Hauteur pour le cas D

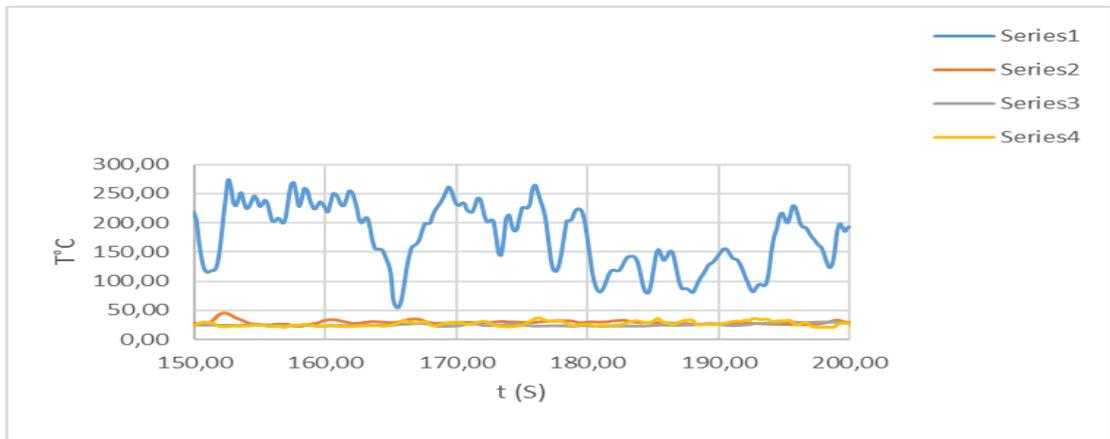


Fig.4.22 : Distribution de la température en fonction du temps
à la Hauteur 1.5 m pour le cas D

Malgré le faible débit d'extraction par les tunnels, la couche de fumée est fortement distratifiée au niveau du plafond (Fig4.23) l'apport de l'air frais dans la station favorise l'évolution de l'incendie qui dégage de grande quantités de chaleur

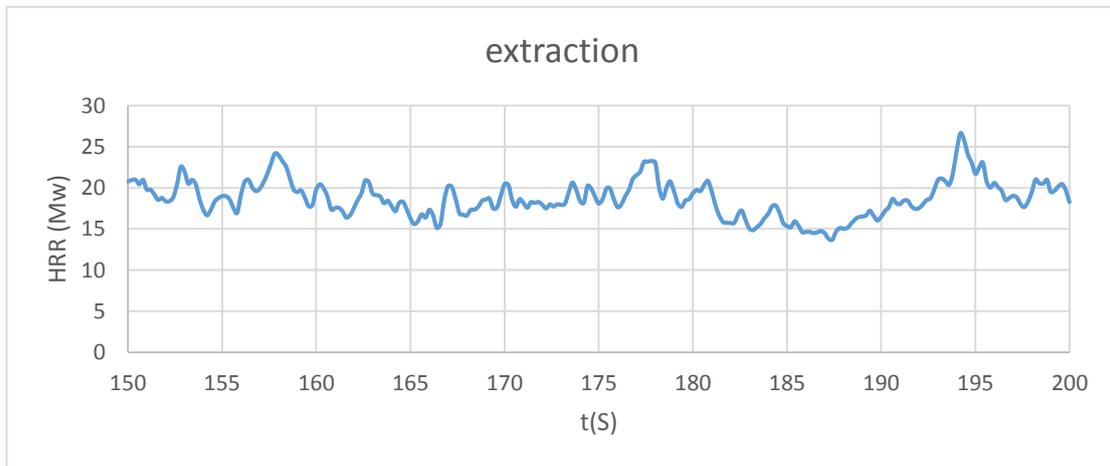


Fig.4.23. Evolution de la quantité de chaleur émise en fonction du temps
à la hauteur 1.5 m

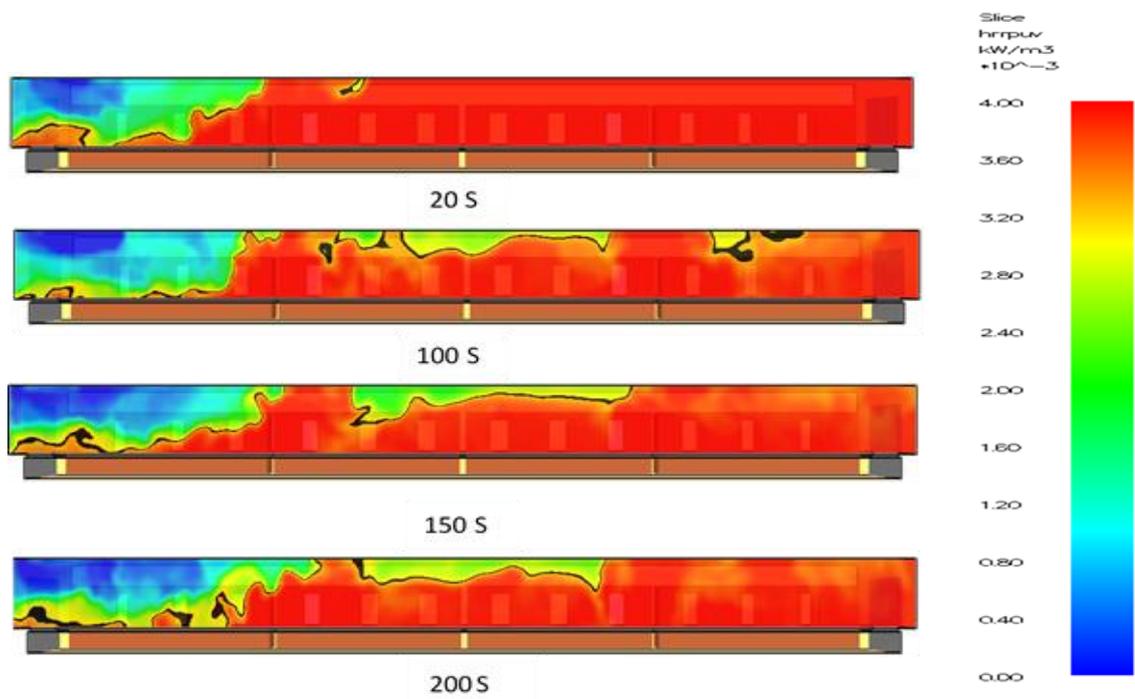


Fig.4.24 : Evolution de l'enfumage de la station et évolution de la visibilité pour le cas D

la figure (4.19) illustre l'évolution de la température en fonction du temps, on constate une perturbation de celle-ci pour les quatre plan de mesure, sur la figure (4.24) on constate que les fumées sont concentrées tous près du premier tunnel et elles diminuent le long de la station, l'incendie est alimenté en air frai par les entrées de la station une très grande quantité de chaleur est dégagée ce qui se traduit par des températures très importante au premier plan Ceci est dû à la dilution de ces fumées par l'air frais arrivant par les entrées passagères et l'extraction de ce dernier par le premier tunnel et la trappe la plus proche.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'étude menée a mis en évidence la contribution de la modélisation numérique dans la compréhension et la prédiction du mouvement des fumées, qui sont indispensables pour établir une stratégie efficace de désenfumage, et qui permet d'assurer la sécurité des personnes lors d'un incendie en station de métro.

- ✓ Dans le cas sans ventilation sur les tunnels, au niveau de la plateforme du premier wagon, on a enregistré des températures moyennes et un dégagement de chaleur qui sont relativement constant et faibles, mais accompagné d'une fumée dense car l'incendie est alimenté par des courants d'air induits sur les entrées passagers qui déstabilisent la couche de fumée. Ce scénario est considéré sécurisé, puisque une grande partie de la station se trouve dans des conditions acceptables relativement à la sécurité des usagers et des intervenants.

- ✓ Dans les autres cas de ventilation, même à débit faible sur les tunnels, les résultats ont abouti à des cas très dangereux, moyennement dangereux et faiblement dangereux. D'une manière générale, les cas qui représentent un grand ou moyen danger, sont les cas avec extraction sur l'un ou les deux tunnels en même temps. Les débits d'extraction induisent un courant d'air entrant important par les entrées passagers. Ils déstabilisent la couche de fumée stratifiée d'où la température du milieu augmente. Les cas qui représentent un danger faible pour la sécurité des passagers sont les cas avec soufflement par les deux tunnels, où les fumées restent confinées et collées sous le plafond.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] S. KAYILI « CFD simulation of fire and ventilation in the stations of underground transportation systems », Master Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University (2005).
- [2] F. CRETIN, A. CARRAU, Développement d'une méthodologie d'évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d'entrepôt, Rapport de recherche. INERIS, Décembre 2000.
- [3] Olivier Mégret, Etude expérimentale de la propagation des fumées d'incendies en tunnel pour différents systèmes de ventilation - thèse de doctorat- Université de Valenciennes. 2000
- [4] Jean-Michel D'HOOP, Sécurité incendie bâtiment, Techniques de l'ingénieur, Article SE2 050.
- [5] Guerouillis Etude Numérique du Désenfumage d'une Station de Métro : Application à un Feu dans la Mezzanine, PFE ENP 2015
- [6] D. Willemann, J. G. Sanchez, « Computer Modeling Techniques and Analysis Used In Design Of Tunnel Ventilation Fan Plants For The New York City Subway », Proceedings of the 2002 ASME/IEEE Joint Rail Conference, 2002
- [7] P. FORNEY, B. Mc GRATTAN, User's guide for smokeview. NIST. Août 2004.
- [8] G. Heskestad. Dynamics of the fire plume. Factory Mutual Research. Corporation, Norwood- MA 02062, USA. 1997
- [9] DJIDJIG Rabah, Etude Numérique du Désenfumage en cas d'Incendie dans une Station de Métro à Deux Niveaux, PFE ENP 2009
- [10] E. BERNUCHON, O. SALVI, Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels, Feux de nappe, INERIS, Octobre 2002
- [11] Ferdinand Schad KG « détecteur de fumée », SCHAKO Aération-Ventilation.
- [12] Kevin McGrattan, « Fire Dynamics Simulator (Version 4), User's Guide », National Institute of Standard Technology, 2006.
- [13] A. CHATELAIN, « Simulation des Grandes Echelles d'Écoulements Turbulents avec Transferts de Chaleur », Thèse de Doctorat, INP Grenoble, France (2005).
- [14] A. Leonard « Energy Cascade in Large Eddy Simulation of Turbulent Fluid Flows ». Geophysics, 18, 237-248, (1974).
- [15] A. Chabni. « Etude 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).

ANNEXE

ANNEXE

```
&HEAD CHID='TUNNEL_METRO_open',TITLE='Amari' /
&MESH ID='volume haut',IJK=280,56,16,XB=0,70,0,14,1.5,5
&MESH ID='volume bas',IJK=280,30,5,XB=0,70,3.25,10.75,0,1.25/
/Temps de simulation
&TIME T_END=200/
% &MISC RADIATION=.FALSE./
/-----
/ENTREES PASSAGERS
&VENT XB=20, 23, 0.0, 0.0, 1.5, 4.0,COLOR='WHITE',SURF_ID='OPEN'/1ER PORTE DROITE
&VENT XB=47, 50, 0.0, 0.0, 1.5, 4.0,COLOR='WHITE',SURF_ID='OPEN'/2EME PORTE DROITE
&VENT XB=20, 23, 14.0, 14.0, 1.5, 4.0,COLOR='WHITE',SURF_ID='OPEN'/1ER PORTE
GAUCHE
&VENT XB=47, 50, 14.0, 14.0, 1.5, 4.0,COLOR='WHITE',SURF_ID='OPEN'/2EME PORTE
GAUCHE
/-----
/TRAPPE
&SURF ID='TRAPPE1',VEL=10/
&VENT XB=0.0, 2.5, 6.0, 8.0, 5.5, 5.5,COLOR='BLUE',SURF_ID='TRAPPE1'/TRAPPE 1
&SURF ID='TRAPPE2',VEL=10/
&VENT XB=67.5, 70.0, 6.0, 8.0, 5.5, 5.5,COLOR='PINK',SURF_ID='TRAPPE2'/TRAPPE 2
/-----
/TUNNEL
&VENT XB=0.0, 0.0, 3.25, 10.75, 0.0, 4.5,COLOR='GRAY',SURF_ID='OPEN'/ TUNNEL 1
&VENT XB=70.0, 70.0, 3.25, 10.75, 0.0, 4.5,COLOR='GRAY',SURF_ID='OPEN'/ TUNNEL 2
%-----Feu -----
/ Source de chaleur DANS LE MILIEU DU WAGON 1
&PART ID='tracers',MASSLESS=.TRUE. /
&SURF ID='BURNER',PART_ID='tracers',HRRPUA=517.24137931/ Ignition source
&VENT XB= 4.5, 19, 4.50, 6.50, 1.5, 1.5, SURF_ID='BURNER' /
&REAC FUEL ='HEPTANE'
FYI='Heptane, C_7 H_16'
```

C = 7.

H = 16.

CO_YIELD=0.006

SOOT_YIELD=0.015 /

%-----

/CONSTRUCTION DU TRAIN

/wagon 1

&OBST XB= 3, 19.25, 4.25, 4.50, 0.25, 4 ,COLOR='SIENNA'/mur droite de métro

&OBST XB= 3, 19.25, 6.50, 6.75, 0.25, 4 ,COLOR='SIENNA'/mur gauche de métro

&OBST XB= 3, 3.25, 4.25, 6.75, 0.25, 4 ,COLOR='SIENNA'/mur de métro en face tunnel1

&OBST XB= 4.25,4.5, 4.25, 6.75, 0.25, 4 ,COLOR='SIENNA'/mur entre wagon 1 et conducteur

&OBST XB= 19, 19.25, 4.25, 6.75, 0.25, 4 ,COLOR='SIENNA'/mur de métro en face tunnel2

&OBST XB= 3, 19.25, 4.25, 6.75, 0.25, 1.5 ,COLOR='SIENNA'/plateforme du métro

&OBST XB= 3, 19.25, 4.25, 6.75, 3.75, 4 ,COLOR='SIENNA'/plafond du métro

/wagon 2

&OBST XB= 19.75, 34.75, 4.25, 4.50, 0.25, 4 ,COLOR='SIENNA'/mur droite de métro

&OBST XB= 19.75, 34.75, 6.50, 6.75, 0.25, 4 ,COLOR='SIENNA'/mur gauche de métro

&OBST XB= 19.75, 20, 4.25, 6.75, 0.25, 4 ,COLOR='SIENNA'/mur de métro en face tunnel1

&OBST XB= 34.5, 34.75, 4.25, 6.75, 0.25, 4 ,COLOR='SIENNA'/mur de métro en face tunnel2

&OBST XB= 19.75, 34.75, 4.25, 6.75, 3.75, 4 ,COLOR='SIENNA'/plafond du métro

&OBST XB= 19.75, 34.75, 4.25, 6.75, 0.25, 1.5 ,COLOR='SIENNA'/plateforme du métro

/wagon 3

&OBST XB= 35.25, 50.25, 4.25, 4.50, 0.25, 4 ,COLOR='SIENNA'/mur droite de métro

&OBST XB= 35.25, 50.25, 6.50, 6.75, 0.25, 4 ,COLOR='SIENNA'/mur gauche de métro

&OBST XB= 35.25, 35.5, 4.25, 6.75, 0.25, 4 ,COLOR='SIENNA'/mur de métro en face tunnel1

&OBST XB= 50, 50.25, 4.25, 6.75, 0.25, 4 ,COLOR='SIENNA'/mur de métro en face tunnel2

&OBST XB= 35.25, 50.25, 4.25, 6.75, 3.75, 4 ,COLOR='SIENNA'/plafond du métro

&OBST XB= 35.25, 50.25, 4.25, 6.75, 0.25, 1.5 ,COLOR='SIENNA'/plateforme du métro

/wagon 4

&OBST XB= 50.75, 67, 4.25, 4.50, 0.25, 4 ,COLOR='SIENNA'/mur droite de métro

&OBST XB= 50.75, 67, 6.50, 6.75, 0.25, 4 ,COLOR='SIENNA'/MUR GAUCHE DE MÉTRO

&OBST XB= 50.75, 51, 4.25, 6.75, 0.25, 4 ,COLOR='SIENNA'/MUR de métro en face tunnel1

&OBST XB= 65.5, 65.75, 4.25, 6.75, 0.25, 4 ,COLOR='SIENNA'/mur entre wagon 4 et conducteur

&OBST XB= 66.75, 67, 4.25, 6.75, 0.25, 4 ,COLOR='SIENNA'/mur de métro en face tunnel2

&OBST XB= 50.75, 67, 4.25, 6.75, 3.75, 4 ,COLOR='SIENNA'/plafond du métro

&OBST XB= 50.75, 67, 4.25, 6.75, 0.25, 1.5 ,COLOR='SIENNA'/plateforme du métro

/PORTES DROITES DES WAGONS

&HOLE XB=6.25, 7.75, 4.25, 4.5, 1.5, 3.5/1ER PORTE DU WAGON 1

&HOLE XB=11, 12.5, 4.25, 4.5, 1.5, 3.5/2EME PORTE DU WAGON 1

&HOLE XB=15.75, 17.25, 4.25, 4.5, 1.5, 3.5/3EME PORTE DU WAGON 1

&HOLE XB=21.75, 23.25, 4.25, 4.5, 1.5, 3.5/1ER PORTE DU WAGON 2

&HOLE XB=26.50, 28, 4.25, 4.5, 1.5, 3.5/2EME PORTE DU WAGON 2

&HOLE XB=31.25, 32.75, 4.25, 4.5, 1.5, 3.5/3EME PORTE DU WAGON 2

&HOLE XB=37.25, 38.75, 4.25, 4.5, 1.5, 3.5/1ER PORTE DU WAGON 3

&HOLE XB=42, 43.5, 4.25, 4.5, 1.5, 3.5/2EME PORTE DU WAGON 3

&HOLE XB=46.75, 48.25, 4.25, 4.5, 1.5, 3.5/2EME PORTE DU WAGON 3

&HOLE XB=52.75, 54.25, 4.25, 4.5, 1.5, 3.5/1ER PORTE DU WAGON 4

&HOLE XB=57.5, 59, 4.25, 4.5, 1.5, 3.5/2EME PORTE DU WAGON 4

&HOLE XB=62.25, 63.75, 4.25, 4.5, 1.5, 3.5/2EME PORTE DU WAGON 4

/PORTES GAUCHES DES WAGONS

&HOLE XB=6.25, 7.75, 6.5, 6.75, 1.5, 3.5/1ER PORTE DU WAGON 1

&HOLE XB=11, 12.5, 6.5, 6.75, 1.5, 3.5/2EME PORTE DU WAGON 1

&HOLE XB=15.75, 17.25, 6.5, 6.75, 1.5, 3.5/3EME PORTE DU WAGON 1

&HOLE XB=21.75, 23.25, 6.5, 6.75, 1.5, 3.5/1ER PORTE DU WAGON 2

&HOLE XB=26.50, 28, 6.5, 6.75, 1.5, 3.5/2EME PORTE DU WAGON 2

&HOLE XB=31.25, 32.75, 6.5, 6.75, 1.5, 3.5/3EME PORTE DU WAGON 2

&HOLE XB=37.25, 38.75, 6.5, 6.75, 1.5, 3.5/1ER PORTE DU WAGON 3

&HOLE XB=42, 43.5, 6.5, 6.75, 1.5, 3.5/2EME PORTE DU WAGON 3

&HOLE XB=46.75, 48.25, 6.5, 6.75, 1.5, 3.5/2EME PORTE DU WAGON 3

&HOLE XB=52.75, 54.25, 6.5, 6.75, 1.5, 3.5/1ER PORTE DU WAGON 4

&HOLE XB=57.5, 59, 6.5, 6.75, 1.5, 3.5/2EME PORTE DU WAGON 4

&HOLE XB=62.25, 63.75, 6.5, 6.75, 1.5, 3.5/2EME PORTE DU WAGON 4

/-----

/THERMOCOUPLE TEMPERATURE horizontale

/A X=11.75 COTE DROITE

&DEVC XYZ=11.75, 0, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X11.75;Y0'/
&DEVC XYZ=11.75, 1, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X11.75;Y1'/
&DEVC XYZ=11.75, 2, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X11.75;Y2'/
&DEVC XYZ=11.75, 3, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X11.75;Y3'/
&DEVC XYZ=11.75, 4.5, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X11.75;Y4.5'/
&DEVC XYZ=11.75, 5.5, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X11.75;Y5.5'/
&DEVC XYZ=11.75, 11, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X11.75;Y11'/
&DEVC XYZ=11.75, 12, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X11.75;Y12'/
&DEVC XYZ=11.75, 13, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X11.75;Y13'/
&DEVC XYZ=11.75, 14, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X11.75;Y14'/

/A X=27.25 COTE DROITE

&DEVC XYZ=27.25, 0, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X27.25;Y0'/
&DEVC XYZ=27.25, 1, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X27.25;Y1'/
&DEVC XYZ=27.25, 2, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X27.25;Y2'/
&DEVC XYZ=27.25, 3, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X27.25;Y3'/
&DEVC XYZ=27.25, 4, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X27.25;Y4'/
&DEVC XYZ=27.25, 4.5, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X27.25;Y4.5'/
&DEVC XYZ=27.25, 5.5, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X27.25;Y5.5'/
&DEVC XYZ=27.25, 11, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X27.25;Y11'/
&DEVC XYZ=27.25, 12, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X27.25;Y12'/
&DEVC XYZ=27.25, 13, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X27.25;Y13'/
&DEVC XYZ=27.25, 14, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X27.25;Y14'/

/A X=42.75 COTE DROITE

&DEVC XYZ=42.75, 0, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X42.75;Y0'/
&DEVC XYZ=42.75, 1, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X42.75;Y1'/
&DEVC XYZ=42.75, 2, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X42.75;Y2'/
&DEVC XYZ=42.75, 3, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X42.75;Y3'/
&DEVC XYZ=42.75, 4, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X42.75;Y4'/
&DEVC XYZ=42.75, 4.5, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X42.75;Y4.5'/
&DEVC XYZ=42.75, 5.5, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X42.75;Y5.5'/
&DEVC XYZ=42.75, 11, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X42.75;Y11'/

```

&DEVC XYZ=42.75, 12, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X42.75;Y12'/
&DEVC XYZ=42.75, 13, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X42.75;Y13'/
&DEVC XYZ=42.75, 14, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X42.75;Y14'/
/A X=58.25 COTE DROITE
&DEVC XYZ=58.25, 0, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X58.25;Y0'/
&DEVC XYZ=58.25, 1, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X58.25;Y1'/
&DEVC XYZ=58.25, 2, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X58.25;Y2'/
&DEVC XYZ=58.25, 3, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X58.25;Y3'/
&DEVC XYZ=58.25, 4, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X58.25;Y4'/
&DEVC XYZ=58.25, 4.5, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X58.25;Y4.5'/
&DEVC XYZ=58.25, 5.5, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X58.25;Y5.5'/
&DEVC XYZ=58.25, 11, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X58.25;Y11'/
&DEVC XYZ=58.25, 12, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X58.25;Y12'/
&DEVC XYZ=58.25, 13, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X58.25;Y13'/
&DEVC XYZ=58.25, 14, 3, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='X58.25;Y14'/

/SUR LA SOURCE DE CHALEUR
&DEVC XYZ=7.75,5.5,0.5, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='SOURCE'/
/-----
/COUNTEUR TEMPERATURE
/SUIVANT X
&SLCF PBX= 0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBX= 3, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBX= 11.75, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBX= 27.25, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBX= 42.75, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBX= 58.25, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBX= 70, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
/SUIVANT Y
&SLCF PBY= 0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBY= 2, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE.
&SLCF PBY= 12, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&TAIL /

```