

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département de Génie Mécanique

Mémoire de Master en Génie Mécanique

Option Energétique

Thème

**Etude Numérique du Désenfumage d'une
Station de Métro : Application à un Feu dans
la Mezzanine**

Présenté par : Islem GUEROUI

Proposé et dirigé par :

B. Benkoussas, MC(A), ENP

Avec la collaboration de :

E. Casalé, Prof. Associé, AMU

O. Vauquelin, Prof., AMU

هذا العمل عبارة عن دراسة عددية لاستخراج الأدخنة في حالة نشوب حريق في محطة لقطارات الأنفاق ذات طابقين. تتمثل هذه الدراسة في تفحص فعالية قواعد التنظيم الخاصة باستخراج أدخنة الحرائق من المحطات تحت أرضية، وهذا عبر دراسة وسائطية واسعة المجال. و من ثم القيام بالبحث عن أنسب الإستراتيجيات لاستخراج الأدخنة وذلك عبر القيام بدراسة عدة سيناريوهات بهدف ضمان أمن وسلامة الأشخاص عند عمليات الإخلاء والإنقاذ وهذا باستخدام البرنامج FDS في المحاكاة العددية. وقد أظهرت النتائج أن تطبيق قواعد التنظيم الخاصة باستخراج أدخنة الحرائق على الهياكل المتواجدة حاليا في المحطات تحت أرضية، لا تسمح بالحصول على الفعالية المتوقعة. بالإضافة إلى ذلك، تبين أيضا من خلال النتائج أن تغيير موقع إستخراج الأدخنة و إضافة شاشة وقائية تحسن فعالية عملية إستخراج الأدخنة.

كلمات مفتاحية: محطة تحت أرضية، السلامة من الحرائق، إستخراج الأدخنة، قواعد التنظيم، فعالية.

Résumé

Ce travail consiste en une étude numérique du désenfumage en cas d'incendie d'une station de métro souterraine à deux niveaux. Il consiste à examiner l'efficacité de mesures réglementaires relatives au désenfumage en stations souterraines. La recherche de meilleures stratégies de désenfumage en proposant différents scénarios afin d'assurer la sécurité des usagers lors des opérations d'évacuation et de sauvetage a été introduite. Les simulations numériques ont été réalisées à l'aide du code FDS. Les résultats ont montré qu'à l'état actuel des structures des stations souterraines, l'application de la réglementation en vigueur présente une certaine incohérence compte à un désenfumage efficace. Les résultats ont montré aussi qu'une modification de la position d'extraction s'impose, en plus, l'introduction d'un écran de cantonnement améliore l'efficacité du désenfumage.

Mots Clés : Station souterraine, Sécurité incendie, Désenfumage, Règlementation, Efficacité.

Abstract

This work is a numerical study of smoke extraction in case of fire in a two level subway station. It consists in the examination of the effectiveness of the regulations related to smoke extraction in underground stations. The search for the best strategies by testing several scenarios in order to ensure the safety of the users during the evacuation and rescue were introduced. These simulations were carried out using the FDS code. The results showed that the application of the regulations to the current state of the structures of underground stations, present some inconsistency to an effective smoke control. The results also showed that a modification in the position of the extractors is required, in addition, the introduction of a cantonment screen improves the effectiveness of the smoke control.

Key Words: Underground Station, Fire safety, Smoke extraction, Regulations, Effectiveness

Dédicaces



Aux martyrs qui se sont insurgés 60 ans plus tôt pour nous offrir la liberté dont on jouit aujourd'hui.

A mes parents qui ont tout mis en œuvre pour ma réussite, et qui m'ont soutenu, orienté et encouragé tout au long de mes études. « Vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts. Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Je vous suis redevable d'une éducation dont je suis fier ».

A mes frères qui représentent tout pour moi.

A toute ma famille.

A mes amis Anis, Rachid, Adnane, Chawki, Yacine, Mehdi et Salim qui comptent beaucoup pour moi.

A tous mes camarades de la promotion Génie Mécanique 2012-2015.

Je dédie ce travail

Remerciement

Je remercie avant tout Allah le tout puissant pour m'avoir donné le courage et la motivation pour arriver à ce stade du savoir et de présenter ce modeste travail.

Ce projet de fin d'études a été réalisé conjointement au sein de l'Ecole Nationale Polytechnique et de l'université d'Aix-Marseille. Ce travail a été mené sous la direction du Docteur B. Benkoussas (ENP) et du Professeur associé E. Casalé (AMU).

Je suis très reconnaissant envers Monsieur B. Benkoussas pour m'avoir sélectionné pour ce stage, pour avoir cru en mes capacités et pour son soutien. Je le remercie aussi pour le savoir et la méthodologie transmis et ces conseils.

Je tiens à adresser ma profonde gratitude à Monsieur E. Casalé pour son encadrement, pour son aide et ses conseils avisés.

Je remercie Monsieur Ph. Bournot et Monsieur O. Vauquelin pour leurs accueils au sein du département de mécanique, pour la confiance qu'ils nous ont accordé et pour nous avoir permis de réaliser ce stage dans de si bonne conditions.

Mes remerciements vont aux membres du jury, Mr S. Larbi (ENP) président du jury ainsi que les membres examinateurs Mr M.T. Attouchi (ENP) et Mr M. Bousbai (ENP) et mon promoteur Mr B. Benkoussas (ENP).

Je tiens à remercier ma famille et mes professeurs sans qui, je n'aurai jamais pu atteindre ce stade des études supérieurs.

A tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

A tous mes camarades de ma promotion.

À tous les intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Table des matières

Introduction	1
Problématique	3
Chapitre 1: Généralités	4
1.1. Définitions	4
1.1.1. Incendie	4
1.1.2. Fumée	4
1.2. Phénomènes inhérents aux incendies en milieu confiné	5
1.3. Incendies en milieux confinés et production des fumées	6
1.4. Phénomènes régissant le mouvement des fumées	7
1.4.1. La dilatation thermique	8
1.4.2. Les forces de flottabilité	8
1.4.3. Effet de cheminée	8
1.5. Taux de dégagement de chaleur	9
1.6. Contexte réglementaire	9
1.6.1. Établissement recevant du public	9
1.6.2. Réglementation relative à la sécurité incendie dans les ERP	9
1.6.3. Désenfumage des gares souterraines	10
1.7. Outils numériques	11
1.7.1. Description du code FDS	11
1.7.2. Potentialités et limitation de FDS	12
1.7.3. BlenderFDS	13
Chapitre 2 : Etude Bibliographique et construction du modèle	14
2.1. Etude bibliographique.....	14
2.1.1. Puissance du feu	14
2.1.2. Influence de la ventilation sur la stratification de la fumée	14
2.1.3. Stratégies de désenfumage	15
2.1.4. Effets du feu sur les personnes	16
Conclusion :	17
2.2. Construction du modèle.....	18
2.2.1. Configuration retenue pour l'étude	18
2.2.2. Hypothèses générales	19
2.2.3. Moyens d'analyse des résultats	19

2.2.4.	Positions de la source du feu	20
2.2.5.	Répartition de la station en différentes zones.....	20
Chapitre 3 :	Résultats et interprétations.....	22
3.1.	Introduction	22
3.2.	Stratégie de désenfumage actuelle.....	22
	Conclusion	28
3.3.	Stratégie de désenfumage proposée.....	28
	Conclusion	33
Conclusion générale	34
Références bibliographiques	35
Annexe A	36
Annexe B	39

Listes des figures

Figure 1-1 : Courbe de développement du feu en milieu confiné [3]	5
Figure 1-2 : Etapes de production des fumées dans un local [4].....	7
Figure 1-3 : Propagation d'un incendie par effet de cheminée [5]	8
Figure 1-4 : Modélisation sous Blender et rendu sous Smokeview	13
Figure 2-1 : Définition de la station prise pour l'étude sans le plafond	18
Figure 2-2 : Distribution des points de mesure au niveau du quai	19
Figure 2-3 : Position du local en feu	20
Figure 2-4 : Répartition des zones considérées	21
Figure 3-1 : Position des bouches d'extraction dans le cas de la stratégie actuelle	22
Figure 3-2 : Conditions aux limites de la stratégie actuelle	23
Figure 3-3 : Evolution de la température moyenne dans le cas réglementaire - (48m ³ /s)	24
Figure 3-4 : Champs de température pour un désenfumage dans le cas réglementaire	25
Figure 3-5 : Evolution de la visibilité dans le cas réglementaire (48m ³ /s)	26
Figure 3-6 : Evolution de l'enfumage dans le cas réglementaire	27
Figure 3-7 : Débits induits dans le cas réglementaire en regime permanent.....	27
Figure 3-8 : Modifications proposées.....	29
Figure 3-9 : Détails des modifications proposées	29
Figure 3-10 : Conditions aux limites aux tunnels dans le cas de la stratégie proposée (9 m ³ /s à chaque tunnel)	30
Figure 3-11 : Evolution de la température moyenne dans le cas de la stratégie proposée – extraction de 48 m ³ /s - soufflage tunnel 9 m ³ /s.....	30
Figure 3-12 : Champs de température dans le cas de la stratégie proposée	31
Figure 3-13 : Evolution de la visibilité dans le cas de la stratégie proposée.....	32
Figure 3-14 : Evolution de l'enfumage dans le cas de la stratégie proposée	32

Liste des tableaux

Tableau 0-1: Historique des incendies principaux dans les stations de métro [1]	1
Tableau 2-1 : Effets de la température sur les personnes — données US Navy [3]	17

Abréviations

CFD	Computational Fluid Dynamics
FDS	Fire Dynamics Simulator
NIST	National Institute of Standardization and Technology
HRR	Heat Release Rate
HRRPUA	Heat Release Rate Per Unit Area
ERP	Etablissement Recevant du Public
BGH	Bâtiment à Grande Hauteur

Introduction

Il a été prouvé durant les années 1850 que les transports en commun et le transport individuel ne pouvaient pas coexister dans les zones urbaines. La première ligne de chemin de fer métropolitain a été inaugurée le 10 janvier 1863 à Londres afin de soulager la congestion du trafic urbain dans la ville. Depuis, de nombreux systèmes de transports en commun rapide portant sur des installations de métro ont été construits. Le taux de croissance de la population et l'augmentation de la congestion 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, des 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 matérielles 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. En effet, plusieurs incendies se sont produits dans des stations de métro par le passé, causé pour la plupart des cas par un dysfonctionnement électrique dans l'une des voitures du métro. Ci-dessous un tableau récapitulatif des incendies clés qui se sont produit jusqu'à ce jour.

Tableau 0-1: Historique des incendies principaux dans les stations de métro [1]

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 metro. Etats-Unis	Câble	2 morts et 200 blessés
01/06/1991	Moscow metro. Russie	Dysfonctionnement électrique	7 morts et plus de 10 blessés
28/10/1995	Baku metro. Azerbaïdjan	Dysfonctionnement électrique	289 morts et 265 blessés
18/02/2003	Jungangno metro, Daegu. Corée du Sud	Incendie criminel	192 morts et 151 blessés
06/02/2004	Moscow metro. Russie	Attaque terroriste	39 morts et beaucoup de blessés

*BART : Bay Area Rapid Transit

On peut citer par exemple l'incendie de Daegu en Corée du Sud, le 18 février 2003 et qui a fait plus de 190 morts et plus de 150 blessés. Le bilan était lourd du fait que les mesures de sécurité contre les incendies n'ont pas été prises, ajouté à cela la mauvaise gestion de l'incendie par les responsables et le manque d'équipement de sécurité. En effet, Il n'y avait pas d'extincteurs à bord des trains et les stations n'étaient pas équipées de sprinklers (Extincteurs automatiques à eau), ni d'éclairage d'urgence. De nombreuses victimes sont mortes asphyxiées alors qu'elles essayaient de trouver une sortie à la station enfumée.

Le premier objectif des études d'ingénierie de sécurité incendie est la préservation des personnes. Cet objectif consiste à évaluer les risques induits par le feu sur les personnes avoisinantes d'une part en termes d'incapacitation, ce qui sous-entend la préservation de la capacité des personnes à évacuer les lieux d'un sinistre par leurs propres moyens, mais aussi en termes de létalité. La prédiction du mouvement des fumées et la conception d'un système de contrôle efficace de celles-ci sont donc primordiales pour atteindre l'objectif sus-cité. Toutefois, il est très difficile de vérifier l'efficacité d'une stratégie donnée par le biais de tests réalisés sur site pour des raisons logistiques évidentes.

Une solution à ce problème consiste à faire des études numériques afin de simuler la propagation et le comportement de la chaleur et des fumées, et ce, sur des codes et des logiciels commerciaux qui soient capables de reproduire avec un niveau de fidélité acceptable les phénomènes liés au développement du feu. Plusieurs logiciels ont été développés afin de simuler les phénomènes de transports en cas d'incendie et dans la mécanique des fluides en général. Dans la présente étude le code FDS (Fire Dynamics Simulator) est utilisé pour étudier la propagation et le contrôle des fumées dans une station de métro.

Problématique

Pour être en mesure de concevoir des stratégies de désenfumage efficaces, on a besoin d'établir les paramètres qui décrivent au mieux la dynamique et le mouvement des fumées. C'est pourquoi, une compréhension approfondie des phénomènes régissant les incendies et plus particulièrement les fumées est indispensable pour, d'une part, construire un modèle numérique qui se rapproche le plus possible des conditions réelles et, d'autre part, pour ne pas s'attarder à essayer des stratégies de désenfumage inefficaces car il faut rappeler que ce genre de calculs est très gourmand en ressources matérielles et en temps (des calculs qui peuvent durer jusqu'à une semaine).

En cas d'incendie, la gestion de la ventilation dans les stations de métro relève de la réglementation des ERP (Etablissement Recevant du Public).

Les textes réglementaires ne décrivant que qualitativement les exigences techniques relatives au désenfumage des stations de métro, une étude au cas par cas est nécessaire pour définir les meilleures conditions de la gestion des systèmes de ventilation permettant d'aboutir à des conditions de sécurité recevables.

Cette étude a donc pour objectif la récolte d'informations liées aux paramètres relatifs aux incendies dans les stations de métro dans le but de les reproduire fidèlement dans l'étude numérique. Puis, de tester dans un premier temps la stratégie de désenfumage adoptée dans une station de métro type, tout en respectant les directives présentes dans la réglementation. Une stratégie de désenfumage sera proposée par la suite pour mieux exploiter les ressources dont dispose la station.

Chapitre 1: Généralités

1.1. Définitions

1.1.1. Incendie

L'incendie est un embrasement qui se propage à une forêt, un édifice ou autre. Il peut être défini comme une réaction de combustion non maîtrisée dans le temps et l'espace qui produit un feu violent destructeur des activités humaines.

L'incendie présente d'énormes dangers pour les personnes qui y sont exposées. Les risques liés au feu sont principalement de trois natures.

- La perte de visibilité : elle retarde l'évacuation, désoriente les foules et peut les exposer plus longtemps ou de manière plus importante aux autres effets ;
- Les risques thermiques liés au feu et aux fumées : ils peuvent entraîner l'incapacitation ou une létalité au sein des populations. Ils sont liés au flux thermique et à la température ;
- Les risques toxiques du feu : ils sont liés aux espèces chimiques présentes dans les fumées, et sont les plus importants. Ils sont incapacitants ou létaux, parfois à des distances considérables des foyers.

Les incendies sont de deux types : incendies en milieu ouvert et incendies en milieu confiné.

1.1.2. Fumée

La fumée est un nuage formé de particules très fines suspendues dans le gaz de combustion. Elle est ainsi un mélange formé des trois états de la matière : des particules solides qui forment ce qui est appelé communément la suie (carbone imbrulé), des aérosols et des condensats divers qui sont à l'état liquide et le gaz de combustion.

La vitesse horizontale du front de fumées est de l'ordre de 1 à 2 m/s pour un incendie de véhicule léger, de 2 à 3 m/s pour un incendie de poids lourd, et ne dépasse pas 4 m/s pour un incendie de citerne d'essence [2]. Les fumées ont tendance à occuper le maximum de volume et à créer une légère surpression dans le local incendié. Elles sont sujettes à un tirage thermique vertical favorisant leur migration dans les étages supérieurs.

1.2. Phénomènes inhérents aux incendies en milieu confiné

Les incendies en milieu confiné constituent un problème complexe. Il est en effet impossible de décrire et de prédire tous les développements spécifiques possibles d'incendie. Toutefois, sur la base de l'accidentologie et du retour d'expérience, il est possible d'identifier différentes phases types de développement.

On peut, sauf cas particulier identifier quatre périodes ou stades distincts dans le développement du feu. La phase de croissance initiale du feu peut soit aboutir à un embrasement généralisé éclair (flashover) si les conditions pour qu'il ait lieu se réunissent, soit à un de déclin dans le cas contraire. Dans le cas où l'embrasement se produit, le feu atteint sa phase entièrement développée correspondant à un pic de puissance et de température. Lors de cette phase les paramètres restent plus ou moins constants. Enfin, le feu commence à atteindre sa phase de déclin pour s'éteindre par manque de combustible.

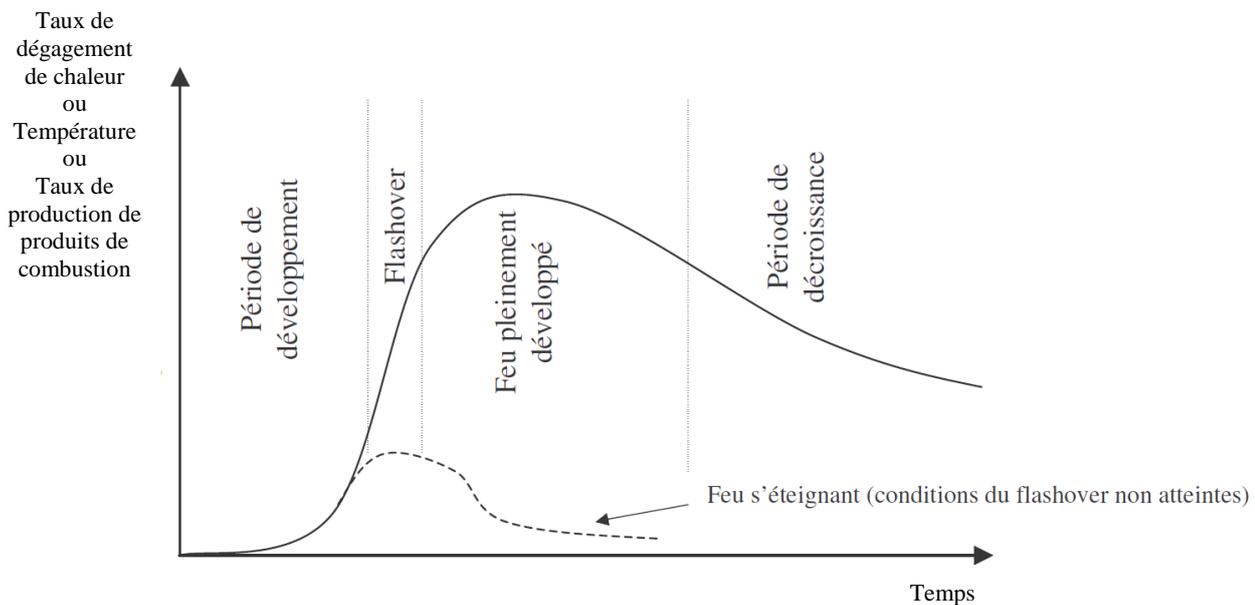


Figure 1-1 : Courbe de développement du feu en milieu confiné [3]

1.3. Incendies en milieux confinés et production des fumées

Les incendies en milieu confiné sont connus pour leur grande production de fumées noire et dense. Généralement on l'explique par le fait que dans ces incendies le feu se trouve sous ventilé mais en réalité le phénomène est plus complexe. Le feu et la production des fumées dans un local passe par trois étapes:

1^{ère} étape:

Au début, le feu est de petite taille, il produit des gaz de combustion incolores qui montent et se trouvent bloqués sous le plafond. Tant que le feu est encore petit, il reste correctement ventilé et prend de l'ampleur, la flamme augmente donc en diamètre et en hauteur.

2^{ème} étape:

Au bout d'un certain temps, le haut de la flamme va se trouver dans une zone dans laquelle le comburant aura été remplacé par les produits de combustion, qui à ce stade sont toujours invisibles. Mais nous avons ici une flamme de diffusion, donc une flamme qui capte son comburant par sa périphérie. La partie basse de la flamme capte toujours du comburant, puisqu'elle est dans une zone correctement ventilée. Par contre, le haut de la flamme va commencer à avoir du mal à trouver le comburant dont elle a besoin. Visuellement, cela se remarque, le bas de la flamme est jaune, tandis que le haut est orange. Le carbone, présent dans la partie basse de la flamme, réagit donc correctement puisqu'il est associé à une quantité suffisante d'oxygène, mais le carbone qui est dans le haut de la flamme, ne peut plus réagir correctement puisqu'il ne dispose pas d'assez d'oxygène. Ce carbone va donc commencer à s'échapper sans avoir réagi et va commencer à former une couche de fumée visible.

3^{ème} étape:

A ce stade, le feu a déjà pris une bonne ampleur. Le cycle séchage pyrolyse inflammation est devenu très rapide et le feu prend de l'ampleur, de seconde en seconde. L'étape durant laquelle la flamme ne touche pas encore le plafond, tout en ayant sa partie haute sous oxygénée, dure en fait très peu de temps. En quelques instants, le feu a continué à progresser et désormais la flamme touche le plafond.

D'un seul coup, la situation va se dégrader car la flamme de diffusion va maintenant être détériorée «mécaniquement» par le plafond, et la quantité de fumée produite devient étonnante. Pour comprendre cette dégradation soudaine des conditions, il suffit de prendre une bougie, qui, habituellement ne fume pas. Mais, dès qu'on la touche avec la lame d'un couteau, un filet de fumée noire apparaît.

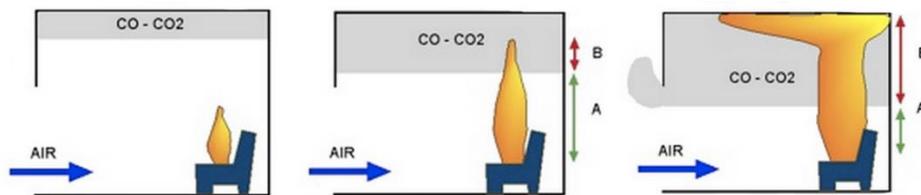


Figure 1-2 : Etapes de production des fumées dans un local [4]

1.4. Phénomènes régissant le mouvement des fumées

L'une des causes qui rend les fumées très dangereuses est certainement son déplacement rapide, surnois et difficile à prévoir dans un bâtiment incendié. Contournant les obstacles, les fumées transmettent leurs chaleurs et endommagent les matériaux qu'elles touchent.

La compréhension du mouvement des fumées est donc essentielle non seulement pour les intervenants qui doivent combattre un incendie et sauver des personnes, mais aussi pour les ingénieurs spécialisés dans la sécurité incendie et qui espèrent la mise en place de dispositifs efficaces de contrôle des fumées.

Pour pouvoir prédire la propagation des fumées dans un bâtiment, il faut tenir compte principalement:

- Des ouvertures présentes.
- Disposition des pièces, types de plafonds, ouvertures verticales.
- Des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation.
- Des conditions climatiques extérieures

1.4.1. 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 [4].

1.4.2. 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.

1.4.3. Effet de cheminée

Lorsqu'un incendie prend naissance aux niveaux inférieurs d'un bâtiment de grande hauteur (BGH), la fumée a tendance se propager rapidement vers les étages supérieurs par les ouvertures verticales telles que les cages d'escaliers et les puits de lumière.

Dans les stations de métro, l'effet de cheminée joue un rôle significatif dans le contrôle des fumées, car il y existe plusieurs espaces superposés verticalement connectés entre eux, et à travers lesquels les fumées vont être conduites par action des forces de flottabilité.

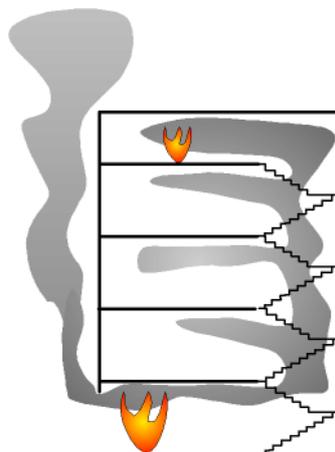


Figure 1-3 : Propagation d'un incendie par effet de cheminée [5]

1.5. Taux de dégagement de chaleur

Lorsqu'un objet est siège d'une réaction de combustion, celui-ci dégage une certaine quantité d'énergie par unité de temps, cette quantité est appelée taux de dégagement de chaleur (Heat Release Rate HRR) et est mesuré en Watt, kW et MW. Pour la plupart des matériaux, cette quantité varie au cours du temps.

Le taux de dégagement de chaleur dépend principalement du type, de la quantité et de l'arrangement des matériaux combustibles ainsi que du degré de confinement. Il est aussi fonction du temps.

1.6. Contexte réglementaire

A la suite de graves incendies ayant provoqué la mort de plusieurs personnes, une réglementation, visant à imposer des règles de sécurité dans les établissements recevant du public (ERP), a été élaborée. Depuis, et en fonction d'une part de l'évolution de la technologie et d'autre part des enseignements tirés lors de sinistres réels, cette réglementation s'est enrichie tout en s'affinant, mais en gardant le même esprit : la sauvegarde du public, qui doit pouvoir évacuer les lieux dans les meilleures conditions possibles.

1.6.1. Établissement recevant du public

Le terme établissement recevant du public (ERP) désigne les lieux publics ou privés accueillant des clients ou des utilisateurs autres que les employés (salariés ou fonctionnaires). Cela regroupe un très grand nombre d'établissements comme les cinémas, théâtres, magasins, bibliothèques, écoles, universités, hôtels, restaurants, hôpitaux... que ce soient des structures fixes ou provisoires (chapiteau, structures gonflables) [6].

1.6.2. Réglementation relative à la sécurité incendie dans les ERP

Les articles R. 123-2 à R. 123-17 du chapitre III sous le titre II du LIVRE I du code de la construction et de l'habitation définissent les grandes lignes concernant la protection contre le risque d'incendie et de panique dans les immeubles recevant du public [7]. Les principaux points sont les suivants :

- Les bâtiments et les locaux où sont installés les établissements recevant du public doivent être construits de manière à permettre l'évacuation rapide et en bon ordre de la totalité des occupants.

- Les matériaux et les éléments de construction employés doivent présenter, en ce qui concerne leur comportement au feu, des qualités de réaction et de résistance appropriées aux risques courus. La qualité de ces matériaux et éléments fait l'objet d'essais et de vérifications en rapport avec l'utilisation à laquelle ces matériaux et éléments sont destinés.

- L'éclairage de l'établissement lorsqu'il est nécessaire doit être électrique. Un éclairage de sécurité doit être prévu dans tous les cas.

- L'établissement doit être doté de dispositifs d'alarme et d'avertissement, d'un service de surveillance et de moyens de secours contre l'incendie appropriés aux risques.

1.6.3. Désenfumage des gares souterraines

Le paragraphe 7 de l'article GA 6 précise : Les dispositions de l'instruction technique relative au désenfumage ne sont pas applicables aux gares souterraines. Ces dernières sont désenfumées selon les règles suivantes :

- Pour les gares à un seul niveau : le désenfumage peut être naturel ou mécanique.
- Pour les gares à plusieurs niveaux, il est exclusivement mécanique.

Désenfumage mécanique :

Le désenfumage mécanique est réalisé par zones définies au cas par cas. Dans chaque zone le débit minimal de renouvellement d'air doit être de 15 volumes par heure. De plus, chaque zone devra être équipée d'un ensemble de ventilation indépendant (extraction et soufflage), de manière telle qu'en cas de sinistre le niveau incendié soit mis en dépression et les autres niveaux en surpression.

Les ventilateurs de désenfumage doivent assurer leur fonction, avec des fumées à 400°C, pendant une heure.

1.7. Outils numériques

Les premiers modèles analytiques, issus des travaux de quelques pionniers comme Howard Emmons, Philip Thomas ou Kunio Kawagoe entre les années 1950 et 1970 ont abouti à l'établissement des modèles numériques actuels, en parallèle du développement de l'informatique.

Ces modèles ont pour but de représenter une situation d'incendie, afin de permettre des calculs prédictifs du déroulement des sinistres. Ainsi, ils sont l'outil principal dont dispose l'ingénieur afin de quantifier les effets du feu dans un ouvrage, pour un scénario de feu donné. Cet outil doit permettre de connaître l'évolution de l'environnement d'un ouvrage en fonction du scénario, en particulier les variations de température (locales ou globale).

1.7.1. Description du code FDS

FDS est un logiciel CFD (Computational Fluid Dynamics) qui a été développé par le NIST (National Institute of Standards and Technology) et le VTT Technical Research Centre of Finland 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 2004, et la version utilisée dans la présente étude est la version 6.

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, ses développeurs l'ont 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 quantities), 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 calcule aux surfaces solides la température, le flux de chaleur, Taux de dégradation massique, et autres quantités variées. L'utilisateur doit choisir soigneusement les informations à récupérer.

1.7.2. 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 puisse aborder plusieurs types de scénarios, il existe des limitations dans tous ses algorithmes dont les plus proéminentes 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.

1.7.3. BlenderFDS

Blender est un logiciel de modélisation, d'animation et de rendu en 3D libre et gratuit. BlenderFDS est un add-on qui permet d'exporter tout ce qui est modélisé dans une scène Blender sous format d'input pour FDS. L'utilisation d'un tel outil permet non seulement d'être beaucoup plus rapide dans la conception du fichier input FDS, mais aussi présente l'avantage de pouvoir créer avec des géométries assez complexes en subdivisant automatiquement la géométrie souhaitée en petits cubes de la taille du maillage.

Pour pouvoir l'exploiter convenablement, l'utilisateur doit savoir coder un fichier input FDS manuellement et savoir aussi modéliser sous Blender.

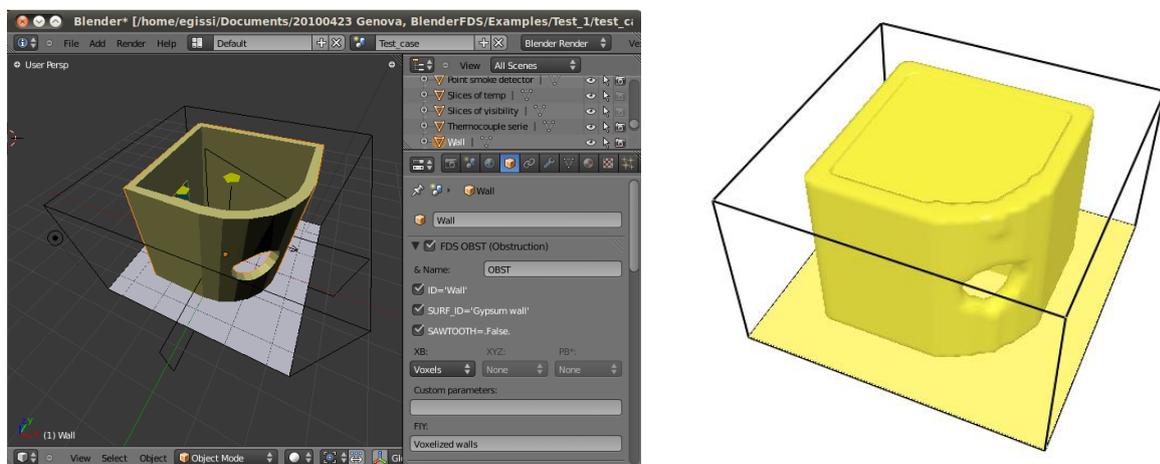


Figure 1-4 : Modélisation sous Blender et rendu sous Smokeview

Chapitre 2 : Etude Bibliographique et construction du modèle

Afin que les résultats obtenus lors des simulations numériques soient valides, les données d'entrée doivent être choisies méticuleusement de telle sorte à se rapprocher le plus possible des conditions réelles. Une recherche bibliographique a ainsi été effectuée pour déterminer les paramètres clés qui décrivent au mieux l'incendie en station de métro.

2.1. Etude bibliographique

2.1.1. Puissance du feu

Hyeong-Jin Kim et David G. Lilley [8] ont présenté une expérience concernant le taux de dégagement de chaleur de différentes fournitures en cas d'incendie. Les tests ont été effectués à grandeur réelle. Les résultats des tests ont montré un pic du taux de dégagement de chaleur de 3120, 2886 et 2100 kW pour un canapé, un divan et une chaise respectivement, et cela après environ 4 minutes de la déclaration du feu.

Pour la présente étude, et étant donné qu'on va imposer un taux de dégagement de chaleur constant, la puissance du feu retenue est de 3 MW.

2.1.2. Influence de la ventilation sur la stratification de la fumée

B. Benkoussas et al. [9], ont examiné l'effet de la ventilation longitudinale sur le contrôle du mouvement des fumées au niveau des quais d'une station de métro. Les débits de soufflage forts qui correspondent à une vitesse de 2 m/s ou plus, causaient la destratification de la couche de fumée ce qui faisait descendre les fumées à des niveaux bas. De plus de tels débits engendraient un courant d'air sortant par les entrées destinées aux passagers, ce qui fait qu'une grande partie des fumées sortait par ces ouvertures. Cela a été jugé dangereux pour l'évacuation des personnes. Les cas de cette catégorie ont été classés dans le cadre des cas très dangereux.

Dans la catégorie des débits faibles au niveau des tunnels, les simulations 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 induisaient un courant d'air entrant important par les entrées des passagers. Ce qui engendrait la déstabilisation de la couche de fumée stratifiée, causant ainsi une augmentation significative de la température à l'intérieur de la station. Les cas qui représentent un danger faible pour la sécurité des passagers sont les cas avec soufflement par les deux tunnels avec des vitesses faibles, où les fumées restent stratifiées et collées au plafond.

2.1.3. Stratégies de désenfumage

Gil-Lopez et al. [10], ont présenté une étude où ils mettent l'accent sur l'influence de la géométrie d'un espace confiné, sa localisation et les gens qui le fréquentent sur l'efficacité du désenfumage en cas d'incendie. De plus, ils recommandent une étude approfondie avec ratissage de toutes les possibilités de stratégies en utilisation la CFD, et cela dans le but d'optimiser la ventilation pour le désenfumage car la réglementation et les normes ne proposent que des solutions génériques dont l'efficacité peut varier d'une infrastructure à un autre et c'est précisément le cas en ce qui concerne les infrastructures souterraines.

Kalech et al. [11], ont présenté un travail où l'étude du désenfumage d'un tunnel routier est faite par la méthode de simulation des grandes échelles (LES), avec le code de calcul FDS. L'ensemble des résultats présenté dans ce document donne des informations et indications sur les conditions de sécurité ainsi que l'efficacité d'extraction en utilisant une ventilation longitudinale, naturelle et transversale. La ventilation transversale a montré une grande performance en termes de désenfumage contrairement aux deux autres types de ventilation, exploitant à bien le phénomène de stratification des fumées.

Park et al. [12], ont examiné l'efficacité du désenfumage dans une station de métro en utilisant des extracteurs situés au plafond de la station. La puissance de feu (HRR) retenu pour cette étude est de 12 MW. Leurs résultats montrent l'efficacité de l'extraction des fumées par les plafonds et que la capacité des ventilateurs influe sensiblement sur la propagation des fumées et par conséquent de la capacité des gens à évacuer en toute sécurité.

Meng et al. [13], ont examiné l'efficacité du désenfumage en cas d'incendie dans une station de métro. Des cas de soufflage et d'extraction ont été testés sur des trappes se situant sous le quai et sous le plafond. La meilleure stratégie auquel ils ont aboutie consiste à exercer un soufflage par les bouches sous le quai tout en extrayant les fumées chaudes par le plafond. Les débits imposés aux niveaux des trappes sous le quai doivent être suffisant pour permettre aux fumées de maintenir leurs stratifications, mais il est montré que dépasser une certaine vitesse d'écoulement dans les trappes entraîne la destratification des fumées et par conséquent engendre exactement l'opposé du résultat voulu. Enfin il a été montré que l'utilisation de portes de sécurité (PSD) s'avère très efficace pour empêcher les fumées de se propager aux autres niveaux de la station.

2.1.4. Effets du feu sur les personnes

Guillaume [3] a publié une synthèse bibliographique sur les différents effets du feu sur les personnes. Il classe les effets thermiques du feu en trois principales origines :

- Un débordement de la thermorégulation qui engendre une élévation de la température corporelle. Comme la fièvre, cette élévation engendre des maux de tête et peut entraîner la mort au-dessus de 42 °C. L'évacuation de la chaleur par thermorégulation étant basée sur le principe de l'évaporation de la sueur, l'humidité ambiante est primordiale.
- Une atteinte des voies respiratoires, caractérisée par un dessèchement ou des brûlures à différents niveaux : gorge, trachée et bronches, alvéoles pulmonaires.
- Un effet direct sur la peau qui peut être d'origine radiative (flux radiatif incident), sans contact de la peau avec les fumées, ou lié à la convection et au contact des tissus avec les fumées.

Toujours d'après cette synthèse bibliographique, les recherches réalisées lors de l'essai de feu d'école de Los Angeles de 1959 ont montré qu'une température de 66 °C à une hauteur de 1,5 m conduisait à des conditions critiques pour l'évacuation. D'autres études ont montré qu'une exposition à 100 °C représente un niveau suffisant pour engendrer l'hyperthermie et des brûlures locales en 2 à 5 minutes. Une table croisant température, effet physiopathologique et durée de tenabilité a été établie par l'US Navy et est présentée dans le tableau ci-après.

Tableau 2-1 : Effets de la température sur les personnes — données US Navy [3]

Température	Incapacitation	Létalité
90 °C	35 minutes	60 minutes
150 °C	5 minutes	30 minutes
190 °C	Immédiate	15 minutes
200 °C	Dommages irréversibles aux voies respiratoires	
340 °C	Mort instantanée	

A noter que ces valeurs sont données pour de jeunes soldats entraînés et ne reproduisent donc pas nécessairement le comportement d'une population civile, la population considérée étant vraisemblablement plus résistante du fait de son jeune âge et de sa condition physique.

Conclusion :

Dans la présente étude, et compte tenu de tout ce qui a été présenté ci-dessus, le taux de dégagement de chaleur sera considéré constant et d'une valeur de 3 MW. Les débits imposés au niveau des tunnels seront des débits entrant et d'une valeur faible et cela, d'une part, pour éviter la déstabilisation de la couche de fumée stratifiée par l'air entrant de la sortie de la station et d'autre part parce que lors d'un incendie il se peut que l'alimentation du train de métro soit coupée, extraire de la fumée par les tunnels pourrait être catastrophique si par exemple un train de métro se retrouve bloqué à proximité de la station. Dans le cas où la stratégie actuelle se révèle inefficace, des modifications seront apporté pour permettre une extraction sous le plafond pour exploiter au mieux le phénomène de stratification des fumées. Les températures en dessous de 60°C à une hauteur de 1.6 m sont considérés comme acceptables pour l'évacuation des passagers hors de la station en feu.

2.2. Construction du modèle

2.2.1. Configuration retenue pour l'étude

La configuration retenue pour la présente étude nous a été assigné par la société FluidAlp. Cette station souterraine se compose de deux niveaux reliés entre eux par deux escaliers, le premier faisant 3 m de largeur et le deuxième 1.6 m. Le niveau inférieur consiste en un quai central de 68 m de longueur et d'une largeur de 8.8 m. Le niveau supérieur quant à lui se compose de deux parties, une partie comprenant les locaux du personnel et qui donne accès à la sortie de la station et la deuxième, qui consiste en une plateforme communiquant avec le niveau du quai. La station comporte un total de quatre tunnels, deux de chaque côté et qui ont une section transversale de 18 m^2 . Un train composé de quatre wagons est présent sur l'un des côtés du quai. Chaque wagon a 16 m de longueur, 2.4 m de largeur et une hauteur au-dessus du niveau du quai de 2.4 m. A noter que les plafonds des tunnels et de la station sont voûtés avec un profil elliptique très proche d'un demi-cercle. Des plans de la station nous ont été fournis pour respecter au mieux les dimensions de celle-ci.

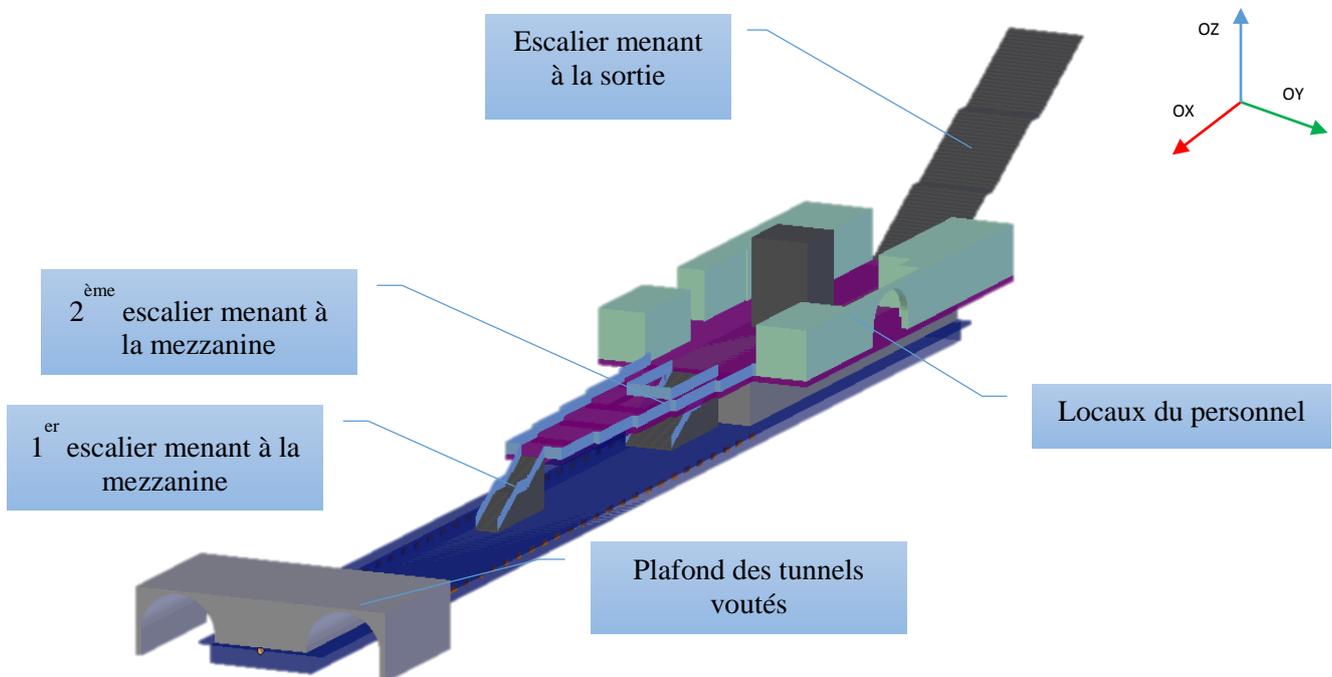


Figure 2-1 : Définition de la station prise pour l'étude sans le plafond

2.2.2. Hypothèses générales

Dans le cadre de cette étude, nous nous intéresserons aux transports des fumées chaudes issues d'un éventuel incendie se déclarant dans l'un des quatre wagons du train de métro présent à proximité du quai. La puissance du feu (taux de dégagement de chaleur) est ici imposée et non recherchée. Dans tout ce qui suit, un taux de dégagement de chaleur de 3 MW réparti uniformément sur la surface intérieure (sol) du wagon en feu est imposé. Cette puissance a été choisie en prenant en compte les incendies de dimensionnement présenté dans le chapitre 1 et les données recueillies et mentionnées dans l'étude bibliographique ci-dessus.

Pour ce qui est des conditions aux limites, on impose une condition de type OPEN à la sortie de la station, quant aux tunnels et aux trappes d'extraction on imposera des conditions en fonction de la stratégie de ventilation testée.

2.2.3. Moyens d'analyse des résultats

Les variables sur lesquelles l'analyse des résultats sera basée sont la température, la visibilité, l'enfumage et les débits induits. Des coupes (slices) qui montrent la distribution de ces derniers sont prévues au niveau de tous les plans de la station à un intervalle de temps de 10 secondes. Des prises de mesure ponctuelle répartit uniformément et espacées entre elles de 1.6 mètres sont aussi prévues à une hauteur de 1.6 mètres du sol aussi bien au niveau de la mezzanine qu'au niveau du quai et des escaliers.

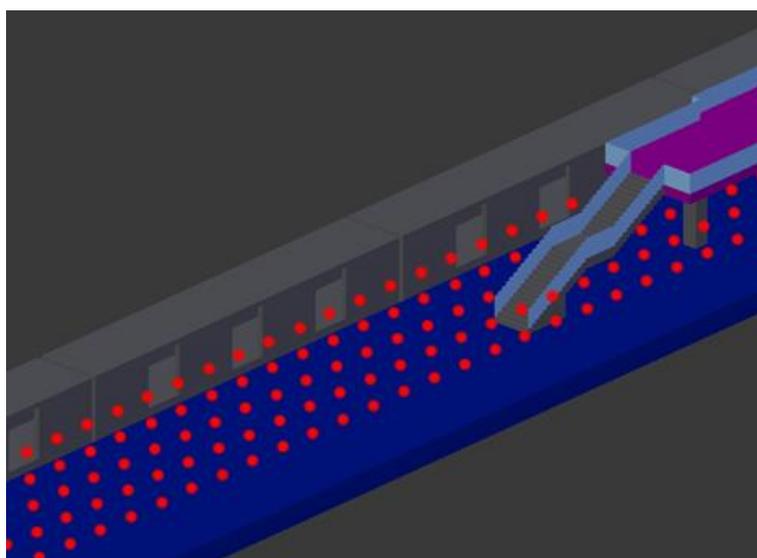


Figure 2-2 : Distribution des points de mesure au niveau du quai

2.2.4. Position de la source du feu

La position du feu considérée dans la présente étude se situe dans l'un des locaux du personnel, comme il est montré dans la figure ci-dessous.

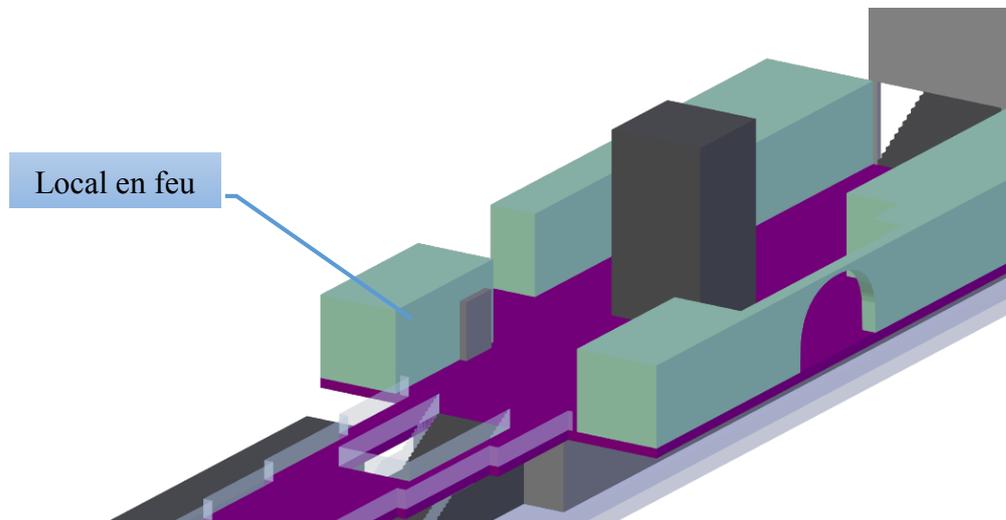


Figure 2-3 : Position du local en feu

2.2.5. Répartition de la station en différentes zones

La station a été répartie en plusieurs zones distinctes. La zone 1 correspond à la mezzanine et la zone 2 correspond à la plateforme qui communique avec le quai à travers les escaliers. La zone 3 et 4 correspondent aux deux moitiés du quai (le quai a été divisé en deux parties, la partie à proximité du train de métro et l'autre), la zone 3 étant la partie à proximité des wagons. Enfin, la zone 5 correspond à l'escalier principal (celui de 3 mètres de largeur), et la zone 6 correspond au deuxième escalier (celui de 1.6 mètres de largeur). Cette répartition est représentée dans la figure 2-4.

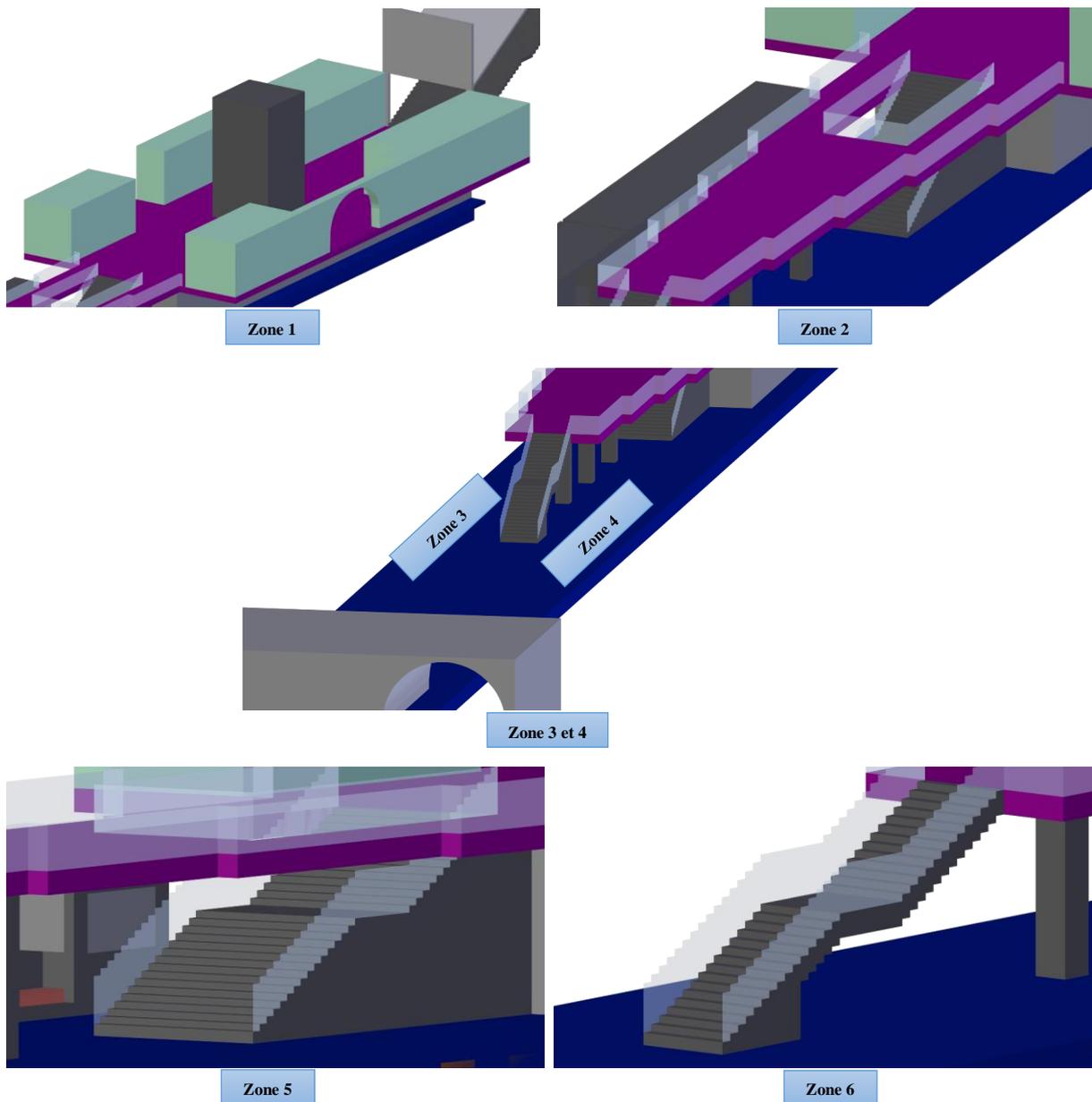


Figure 2-4 : Répartition des zones considérées

Les prises de mesure ponctuelle mentionnées précédemment sont répartit sur toutes les zones représentées ci-dessus à une hauteur de 1.6 m du sol.

Chapitre 3 : Résultats et interprétations

3.1. Introduction

Le désenfumage d'une station consiste à évacuer les fumées chaudes et toxiques issue d'un incendie par les trappes d'extraction prévues à cet effet à l'aide d'un système de ventilation adéquat. Les voies réservées aux usagers doivent rester dégagées des fumées pour permettre une évacuation en toute sécurité. Pour se faire, il est recommandé qu'un débit d'air induit entrant par l'issue de sortie soit maintenu.

Dans ce qui suit, et dans son premier volet, des tests numériques sur le désenfumage de la station considérée dans le cas de la réglementation en vigueur qui recommande un minimum de débit d'extraction de 15 volumes/heure.

3.2. Stratégie de désenfumage actuelle

La stratégie adoptée actuellement (selon la réglementation en vigueur [7]) dans la station considérée consiste à évacuer les fumées issues du feu par des bouches d'extractions situées sous le quai (bouches réparties sur les deux côtés), Figure 3-1. Toutes les autres ouvertures sont maintenues aux conditions initiales OPEN (conditions de pression et de température atmosphériques). Cette stratégie impose l'évacuation des fumées avec un minimum de débit de 15 volumes à désenfumer/heure. Dans notre cas le volume à désenfumer est de 11520 m³/s.

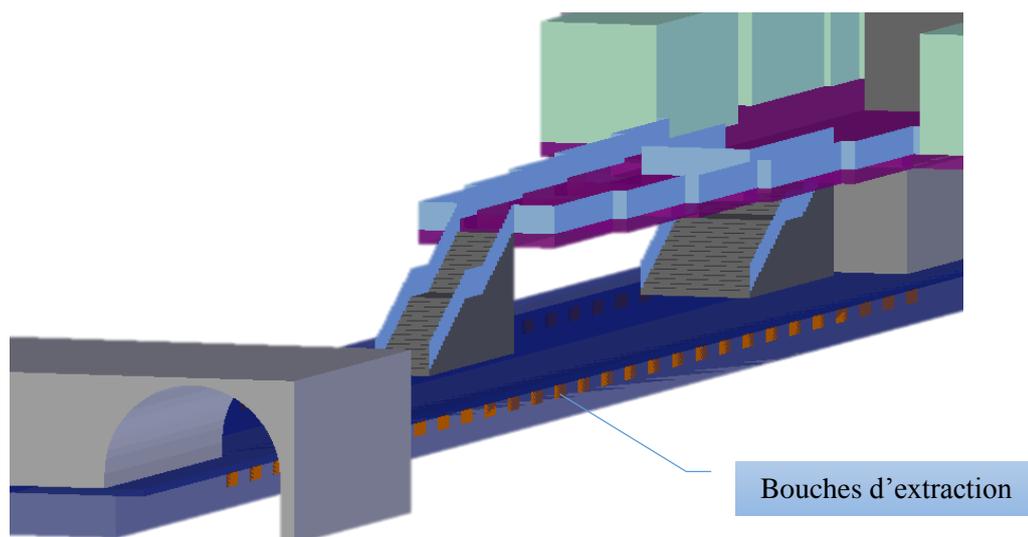


Figure 3-1 : Position des bouches d'extraction dans le cas de la stratégie actuelle

La stratégie de désenfumage actuelle impose un débit minimum total au niveau des bouches d'extraction correspondant à 15 volumes/heure (volume à désenfumer i.e. tout le volume de la station). Ce débit minimum est de $48 \text{ m}^3/\text{s}$, il est réparti sur un total de 64 bouches d'extraction (32 de chaque côté). Ce qui donne un débit d'extraction de $0,75 \text{ m}^3/\text{s}$ par bouche d'extraction, correspondant à une vitesse moyenne à la section de cette dernière d'environ $1,9 \text{ m/s}$.

Les conditions aux limites au niveau des tunnels ainsi qu'au niveau de la sortie de la station sont du type OPEN, c'est-à-dire qu'aucun débit n'est imposé ni en soufflage ni en extraction.

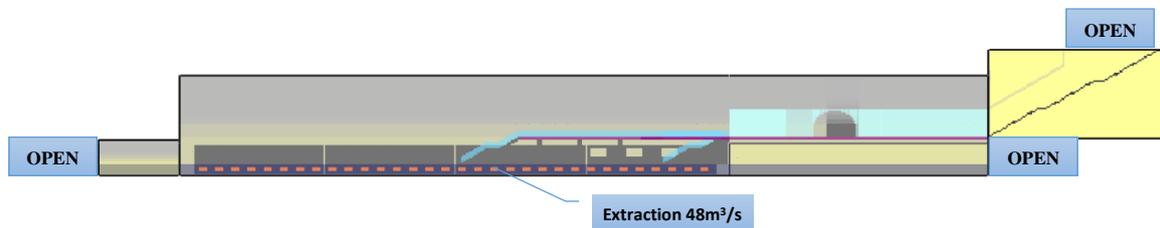


Figure 3-2 : Conditions aux limites de la stratégie actuelle

Dans la Figure 3-3, sont présentées les courbes de l'évolution de la température moyenne à une hauteur de 1.6 m du sol sur les six zones définies précédemment.

La courbe en bleu représente la température moyenne spatiale instantanée et la courbe rouge représente la température moyenne spatiale moyennée sur le temps.

Les résultats des simulations montrent que pour toutes les zones, la température seuil de 60 °C n'est pas atteinte.

Néanmoins, la zone 1 se démarque par des températures plus élevées que pour le reste des zones de la station, ceci s'explique par le fait que la source du feu est à l'intérieur de cette zone.

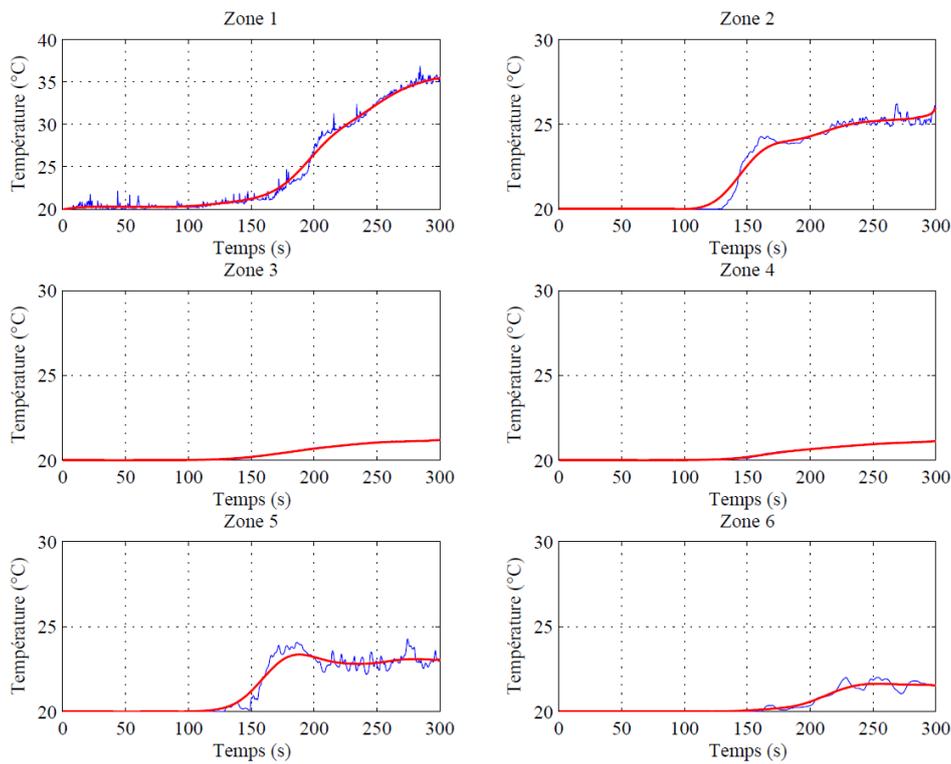


Figure 3-3 : Evolution de la température moyenne dans le cas réglementaire - ($48\text{m}^3/\text{s}$)

Dans la Figure 3-4, est présentée l'évolution du champ de température sur le plan passant par le centre de la station OXZ.

On remarque que le volume mort sous le plafond joue un rôle déterminant dans la station. En effet, à cause de la stratification des fumées, celles-ci restent sous le plafond à hauteur du niveau du sol, permettant ainsi une évacuation en sécurité des passagers. Sauf qu'au bout de 5 minutes l'escalier menant à la sortie commence à être envahie par les fumées, l'évacuation de tous doit donc s'effectuer avant 5 minutes.

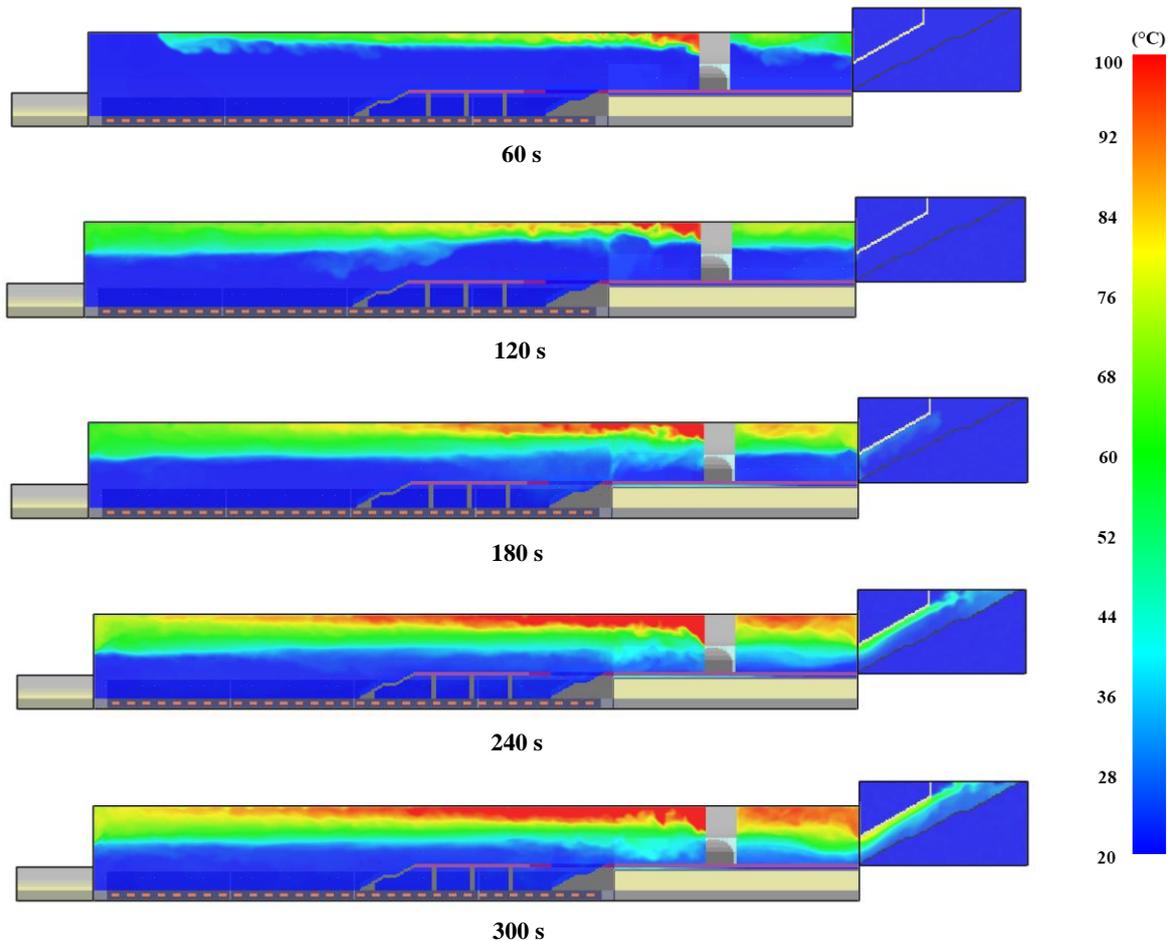


Figure 3-4 : Champs de température pour un désenfumage dans le cas réglementaire

Un autre critère très important à prendre en considération avec la température est la visibilité. Elle influe directement sur la capacité et le temps que mettent les usagers à évacuer la station.

Dans la Figure 3-5, est présentée l'évolution de la visibilité sur le plan passant par le centre de la station OXZ. L'évolution de la visibilité (en mètre) est exprimée en fonction du temps. La valeur de 30 mètres correspondant à une visibilité maximale et la valeur de 1 mètre correspondant à une visibilité très limitée.

On peut remarquer qu'à partir de 4 minutes, la visibilité diminue sensiblement à proximité de l'escalier menant à la sortie de la station ce qui constitue une gêne pour les usagers à évacuer et aux services de sauvetage à pénétrer la station.

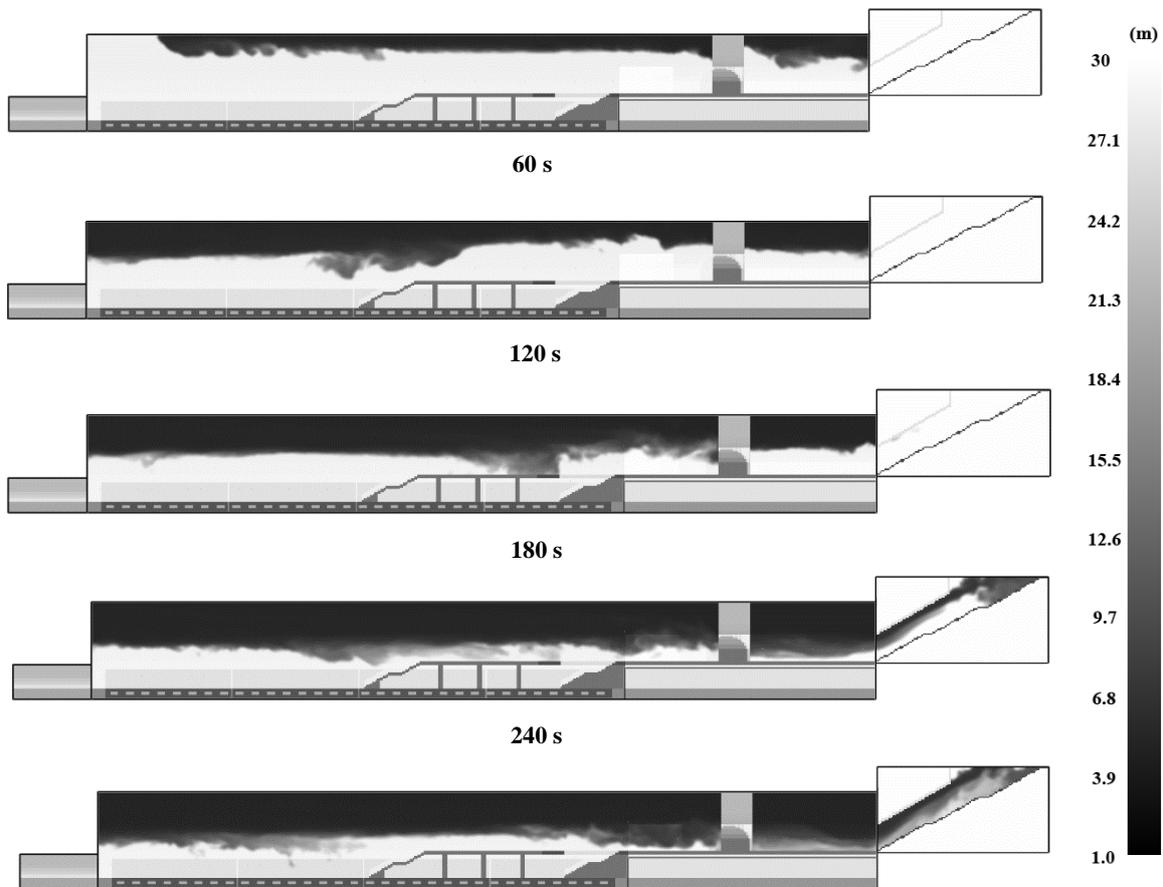


Figure 3-5 : Evolution de la visibilité dans le cas réglementaire ($48\text{m}^3/\text{s}$)

Dans la Figure 3-6, est présentée l'évolution de l'enfumage de la station. A noter que les résultats montrés représentent la distribution des fumées sur toute la station.

On remarque que le débit d'extraction imposée sous le quai n'a presque aucun effet sur les fumées au bout des 100 premières secondes. C'est à partir de 150 secondes que la couche stratifiée de fumée commence à se rompre sous l'effet de l'extraction. On peut voir qu'à la fin de la simulation, la quantité de fumées aspirées est très faible.

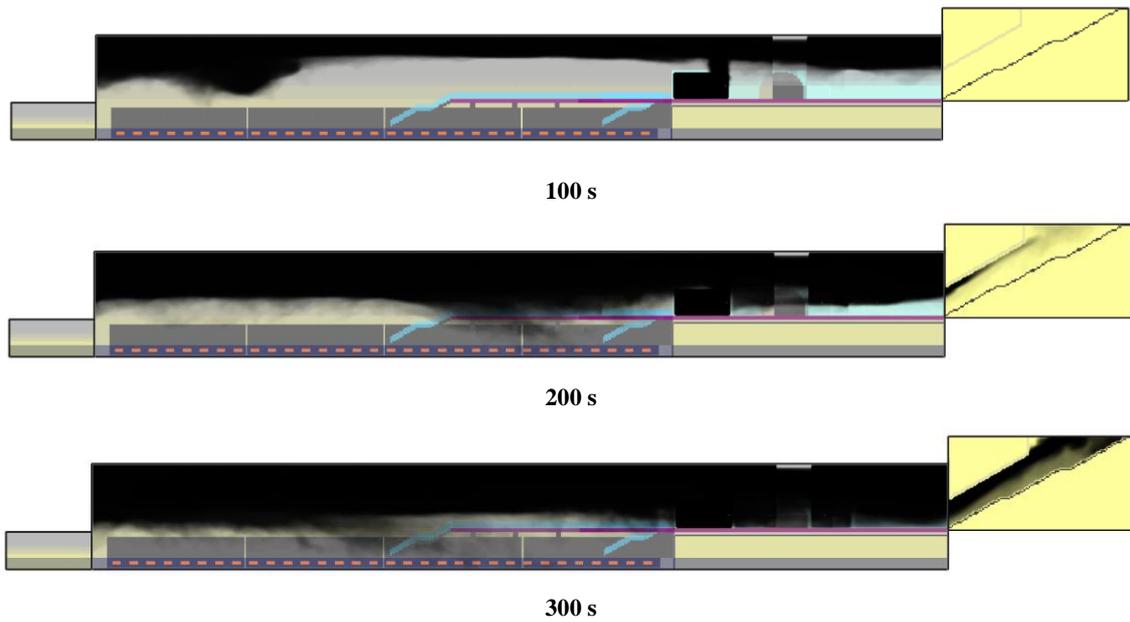


Figure 3-6 : Evolution de l'enfumage dans le cas réglementaire

Remarque : L'opacité des fumées étant directement liée au type de carburant et aux conditions dans lesquels la combustion a lieu et étant donnée qu'il est très difficile de quantifier précisément le type de carburant mis en jeu, les résultats présentés ci-dessus (visibilité et distribution des fumées) peuvent être affectés.

Enfin, les débits induits par l'extraction de l'air sous le quai aux niveaux des tunnels et de la sortie sont présentés dans la Figure 3-7.

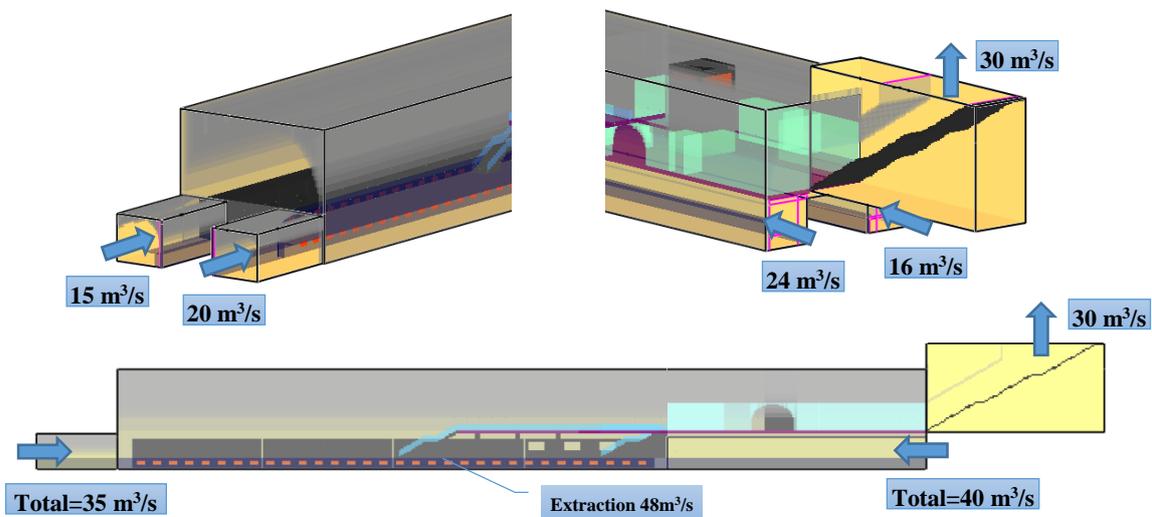


Figure 3-7 : Débits induits dans le cas réglementaire en regime permanent

Les résultats montrent que l'extraction imposée au niveau des trappes induit des débits très importants par rapport au débit d'extraction, entrants au niveau des tunnels et sortant au niveau de la sortie. On peut alors conclure que le fluide extrait sous le quai est un mélange de fumées et de l'air frais arrivant des tunnels (composé essentiellement d'air frais).

Conclusion

On peut conclure des résultats montrés précédemment que l'extraction des fumées par les trappes sous le quai ne peut pas être efficace compte tenu du comportement des fumées (stratification) et que le soufflage par les tunnels n'est pas compatible avec cette position des trappes car l'air soufflé a tendance à favoriser la stratification et amoindri donc l'efficacité des extracteurs de fumées. De plus, la position de ces trappes (hauteur basse) favorise la perturbation des fumées ce qui fait que celles-ci se dispersent dans toute la station causant une baisse de visibilité. Il est donc plus judicieux de replacer les bouches d'extraction à des hauteurs plus élevées.

3.3. Stratégie de désenfumage proposée

La stratégie proposée consiste à effectuer les modifications suivantes (Figures 3-8, 3-9) :

- Fermer les bouches d'extractions situées sous le quai.
- Faire une extension des conduits qui mènent le fluide (mélange air-fumée) aspiré vers l'extérieur en sorte d'avoir des bouches d'extraction au niveau du mur latéral gauche opposé à la sortie de la station (les conduites d'aspiration passent à travers le pilier centrale présent dans la zone 1), pour obtenir le mode 1 d'extraction (cas où l'un des wagons est en feu).
 - Prévoir des registres de control au niveau du pilier central de la mezzanine (pilier creux comprenant une conduite reliée à un ventilateur d'extraction placé en hauteur) pour obtenir un deuxième mode d'extraction (cas où le feu se situe à la mezzanine). On peut alors passer du mode 1 d'extraction au mode 2 en ouvrant ces registres.
- Placer un écran de cantonnement qui délimite l'espace entre la plateforme qui donne sur le quai et l'espace comprenant la mezzanine et les locaux du personnel.

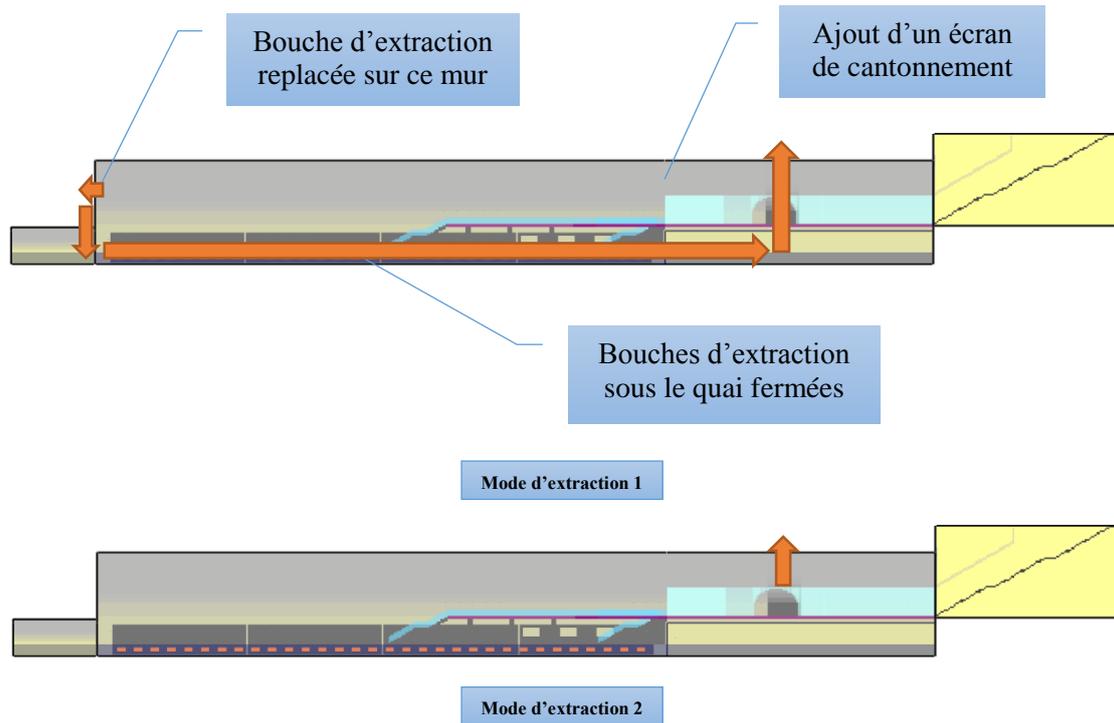


Figure 3-8 : Modifications proposées

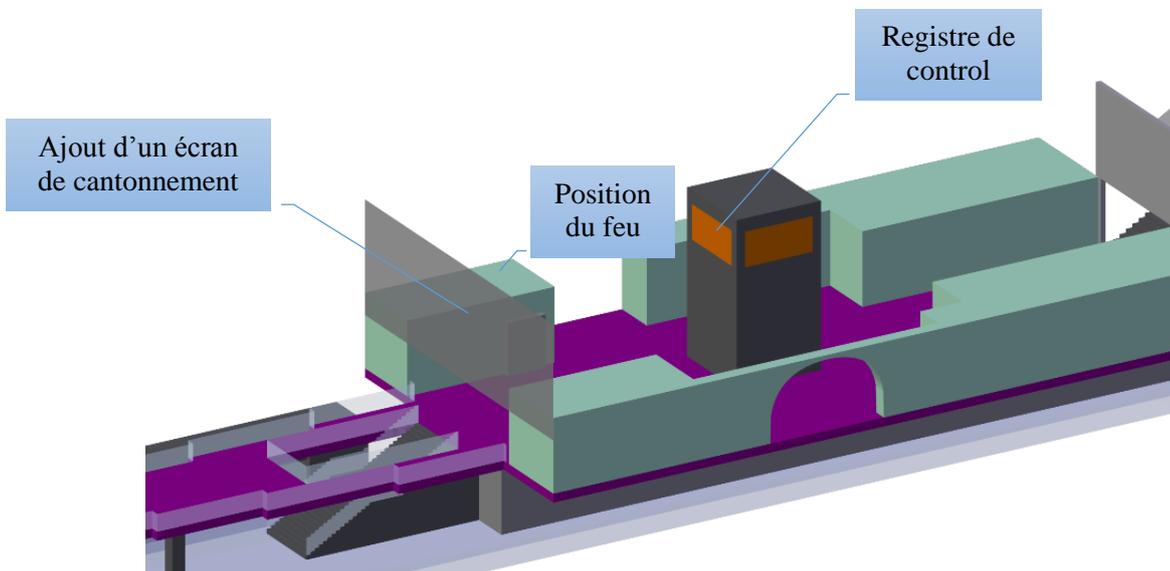


Figure 3-9 : Détails des modifications proposées

Dans cette étude, la position de la source du feu se situe dans la mezzanine, c'est donc le deuxième mode d'extraction qui est testé.

Les conditions aux limites au niveau des tunnels ainsi qu'au niveau de la sortie de la station sont représenté ci-dessous.

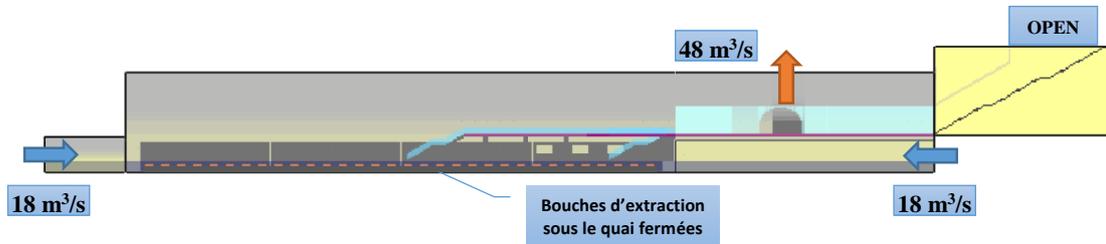


Figure 3-10 : Conditions aux limites aux tunnels dans le cas de la stratégie proposée ($9 \text{ m}^3/\text{s}$ à chaque tunnel)

Ci-après sont présentés les graphiques de l'évolution de la température moyenne à une hauteur de 1.6 m du sol et l'évolution de la distribution de la température sur le plan OXZ passant par le centre de la station.

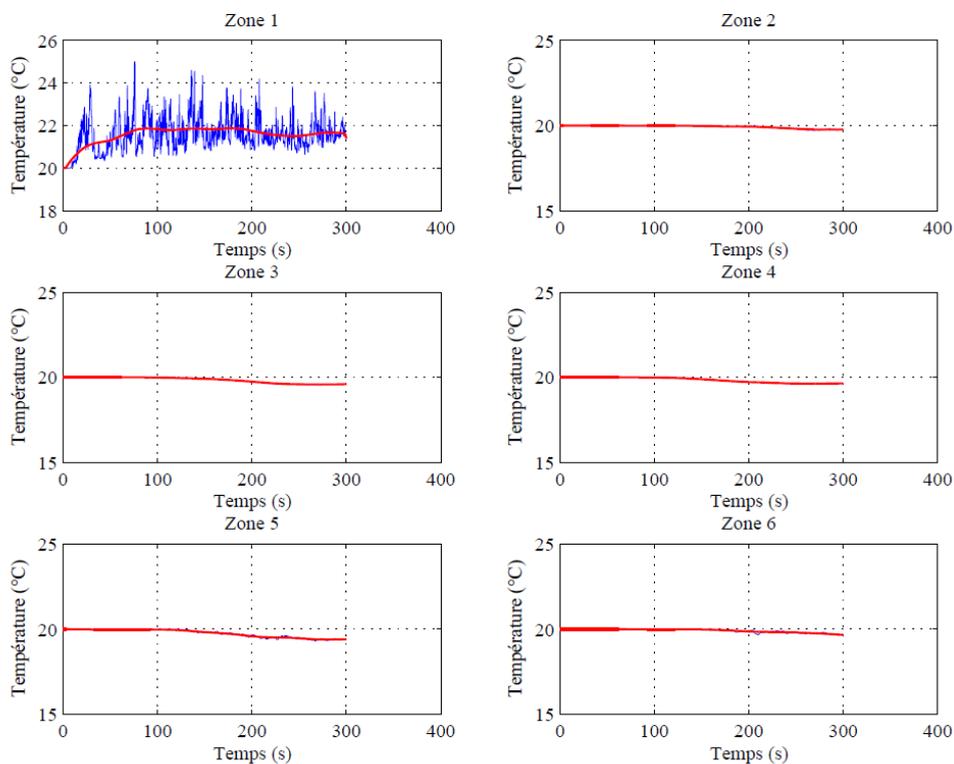


Figure 3-11 : Evolution de la température moyenne dans le cas de la stratégie proposée – extraction de $48 \text{ m}^3/\text{s}$ - soufflage tunnel $9 \text{ m}^3/\text{s}$

Les résultats de simulations montrent que la température ne dépasse pas les 22 °C dans toutes les zones de la station. Elle descend même en dessous des 20 °C (sauf dans la zone 1) à cause des débits d'air entrant par les tunnels.

Dans la Figure 3-12, est présentée l'évolution du champ de température sur le plan passant par le centre de la station OXZ.

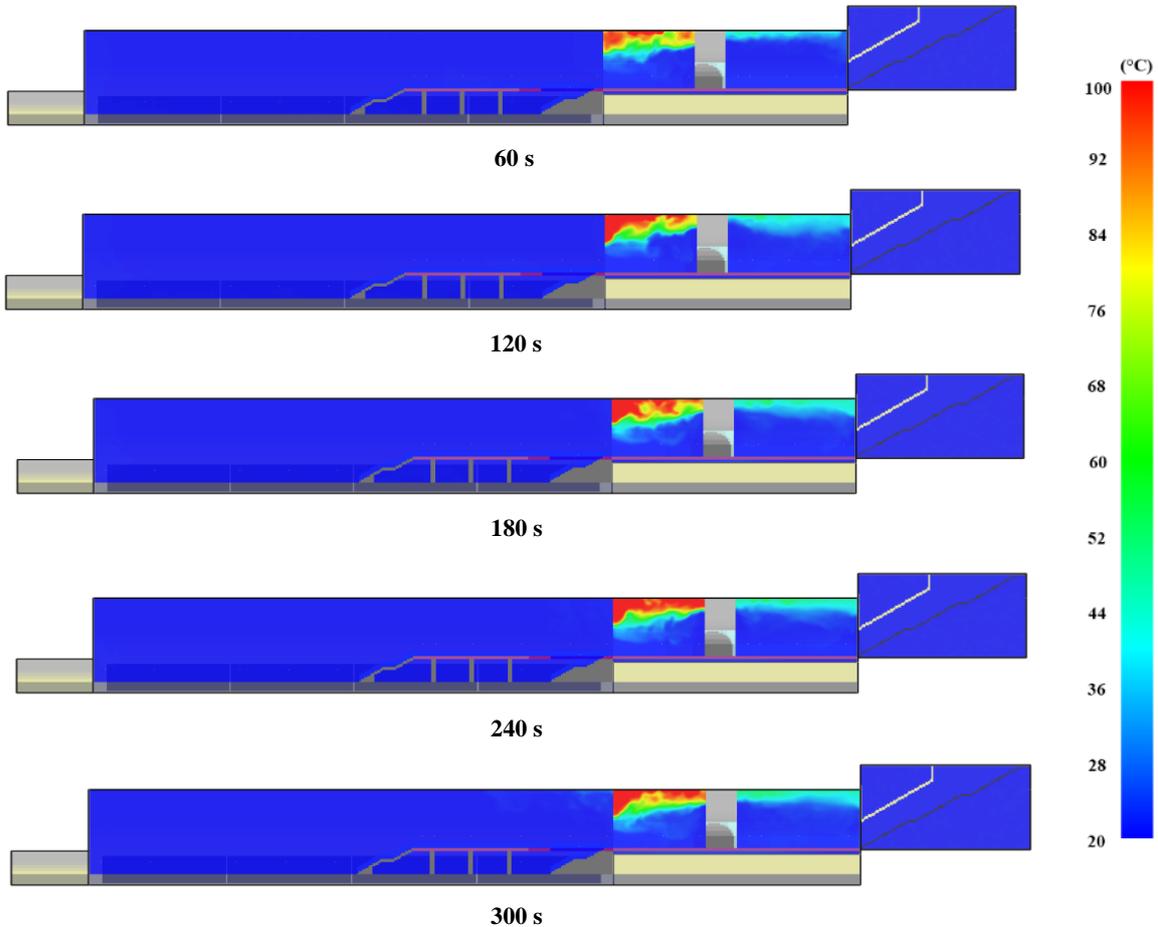


Figure 3-12 : Champs de température dans le cas de la stratégie proposée

On remarque que le régime permanent est atteint dès les deux premières minutes, et que les fumées sont efficacement aspirées par les bouches prévues à cet effet. De plus, l'écran de cantonnement empêche les fumées de se propager vers les autres zones de la station.

Ci-après l'évolution de la visibilité pour le même plan OXZ (plan médian) et l'évolution de l'enfumage global de la station (sur tout le volume de la station).

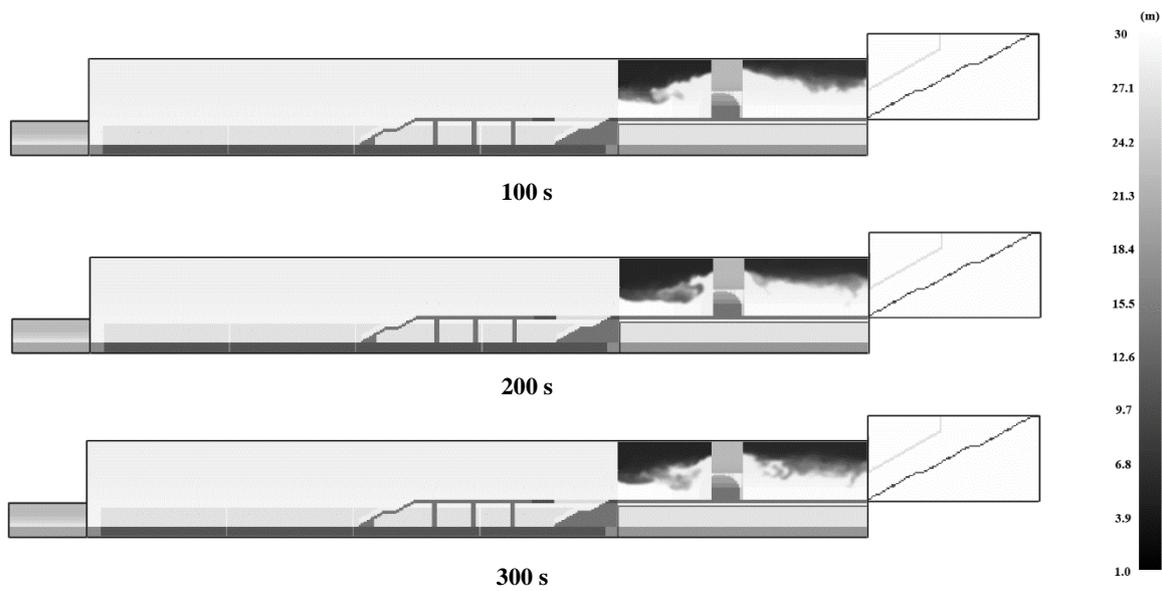


Figure 3-13 : Evolution de la visibilité dans le cas de la stratégie proposée

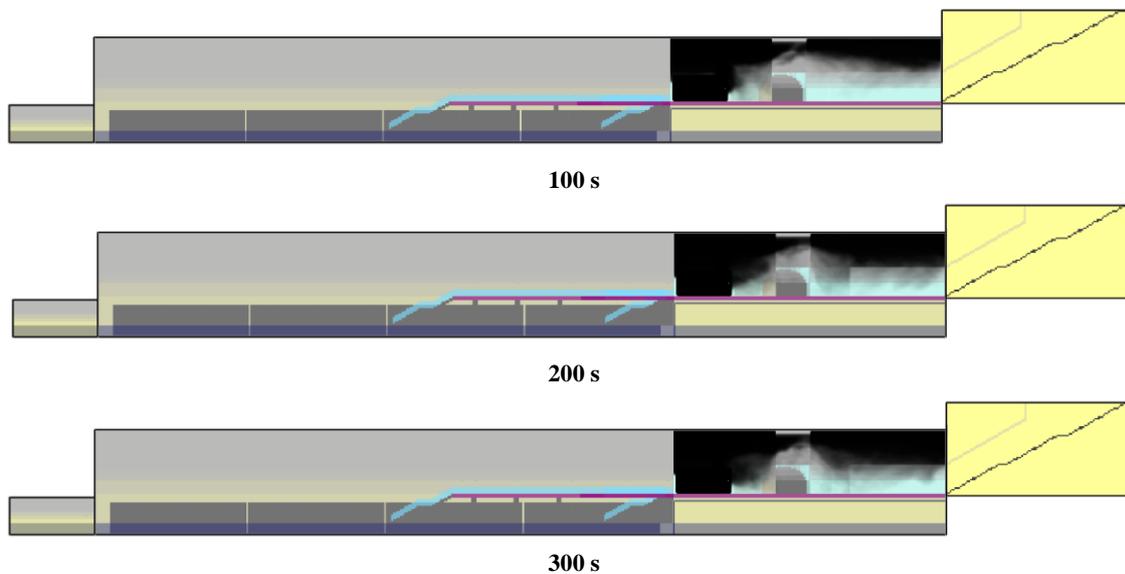


Figure 3-14 : Evolution de l'enfumage dans le cas de la stratégie proposée

On remarque que l'itinéraire que doivent prendre les usagers reste dégagé des fumées, cela facilite l'opération d'évacuation et de sauvetage. On enregistre aussi un débit entrant au niveau de la sortie de la station de $7 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce débit correspond à une vitesse longitudinale moyenne de 0.35 m/s , suffisante pour empêcher les fumées d'atteindre les escaliers menant vers la sortie de la station et ne pas gêner les usagers

Conclusion

Les résultats présentés ci-dessus montrent à quel point l'efficacité du désenfumage est sensible à la position des extracteurs de fumées. Aussi, l'exploitation des phénomènes régissant les fumées nous a permis d'optimiser le désenfumage en favorisant la stratification par apport d'air des tunnels tout en extrayant ces fumées à travers des bouches placées en hauteur. Enfin, l'écran de cantonnement nous a permis d'isoler la zone 1 qui correspond aux locaux techniques empêchant en même temps le feu de se propager grâce aux fumées.

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 qui permet d'assurer la sécurité des personnes lors d'un incendie en station de métro.

L'étude a montré la carence des textes réglementaires concernant le désenfumage en station souterraines. En effet ces textes prescrivent une mise en surpression des volumes à protéger par soufflage qui, bien qu'il soit efficace dans le cas où les volumes protégés se situent à côté et au même niveau des volumes sinistrés, ne dispose pas de l'efficacité escomptée dans le cas où le volume à protéger se situent au-dessus des zones sinistrés.

Plusieurs stratégies de désenfumage ont été testées et présentées. La modification de la position de la bouche d'extraction (son repositionnement en hauteur au niveau du pilier central de la mezzanine) et l'ajout d'un écran de cantonnement donne de bien meilleurs résultats que l'extraction sous le niveau du quai. L'étude a mis en évidence la répercussion irréfutable de la mise en place d'un écran de cantonnement sur la propagation des fumées vers les autres zones. En effet, il permet le maintien de la couche de fumée stratifié dans l'espace qu'il définit sous le plafond et au-dessus du sol.

Références bibliographiques

- [1] H. Ingason, Y. Z. Li and A. Lönnemark, *Tunnel Fire Dynamics*, Springer, 2015.
- [2] P. Carlotti, *Mécanique des fluides pour la ventilation des tunnels routiers*, Centre d'Étude des Tunnels, 2005.
- [3] E. Guillaume, *Effets du feu sur les personnes*, Laboratoire National de Métrologie et d'essais, 2006.
- [4] L. Lamballais, «<http://www.flashover.fr/>,» 2008. [En ligne]. Available: <http://www.flashover.fr/modules.php?name=News&file=article&sid=85>. [Accès en 2015].
- [5] Wikipédia, «<http://fr.wikipedia.org/>,» [En ligne]. Available: http://fr.wikipedia.org/wiki/Lutte_contre_l'incendie. [Accès en 2015].
- [6] Chambre de métiers et de l'artisanat, «Fiche sécurité 9 Les établissements recevant du public,» 2007.
- [7] «<http://www.sitesecurite.com/>,» [En ligne]. [Accès en 2015].
- [8] H.-J. Kim et G. D. Lilley, «Heat Release Rates of Burning Items in Fires,» *38th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 10 au 13 Janvier 2000*.
- [9] B. Benkoussas, A. Bouhdjar et O. Vauquelin, «Numerical Security Assessment in Case of Fire in Underground Transport Spaces,» *Nature & Technology Journal*, n°12, pp. 45-59, 2015.
- [10] T. Gil-Lopez, A. Sanchez-Sanchez et C. Gimenez-Molina, «Energy, environmental and economic analysis of the ventilation system of enclosed parking garages: Discrepancies with the current regulations,» *Applied Energy 113*, pp. 622-630, 2014.
- [11] B. Kalech, M. BOUTERRA, A. EL CAFSI et A. BELGHITH, «Etude de l'extraction des fumées dans un tunnel routier,» *16èmes Journées Internationales de Thermique*, Marrakech, du 13 au 15 Novembre 2013.
- [12] W. Park, D. Kim et H. Chang, «Numerical predictions of smoke movement in a subway station under ventilation,» *Tunnelling and Underground Space Technology 21*, p. 304, 2006.
- [13] N. Meng, L. Hu, L. Wu, L. Yang, S. Zhu, L. Chen et W. Tang, «Numerical study on the optimization of smoke ventilation mode at the conjunction area between tunnel track and platform in emergency of a train fire at subway station,» *Tunnelling and Underground Space Technology 40*, pp. 151-159, 2014.

Annexe A

Code Matlab de l'exploitation d'un fichier output, (Matlab version R2014a) :

```
clear all %supprime toutes les variables du workspace
clc %vide l'écran de commande
clf %vide la figure ouverte

set(0,'DefaultTextFontname', 'Times New Roman') %police d'écriture du text
set(0,'DefaultAxesFontname', 'Times New Roman') %police d'écriture des axes

A=csvread('G:\WD 1\PFE\D\D_10\D_10_devc.csv',3,0); %lecture du fichier csv à partir de la 3ième ligne (sans
le texte)
T=A(:,1); %première colonne, temps de simulation

%répartition des zones dans le quai

j=0;
k=858;
v2=[848,850,852,854,856];
v3=[849,851,853,855,857];

while k<=1036
    switch mod(j,4)
        case 0
            v2=[v2,k,k+1,k+2];
            k=k+3;
        case 1
            v3=[v3,k,k+1];
            k=k+2;
        case 2
            v2=[v2,k,k+1];
            k=k+2;
        case 3
            v3=[v3,k,k+1,k+2];
            k=k+3;
    end
    j=j+1;
end

T0=mean(A(:,696:796))'; %température 0
T1=mean(A(:,797:847))'; %température 1
T2=mean(A(:,v2))'; %température 2
T3=mean(A(:,v3))'; %température 3
T4=mean(A(:,1038:1041))'; %température 4
T5=(A(:,1042))'; %température 5

%lissage des températures
Ts0=smooth(T0,0.1);
Ts1=smooth(T1,0.1);
Ts2=smooth(T2,0.1);
Ts3=smooth(T3,0.1);
Ts4=smooth(T4,0.1);
Ts5=smooth(T5,0.1);
```

```

% graphes
subplot(3,2,1)
p1=plot(T,T0,'b',T,Ts0,'r');
grid on
xlabel("Temps (s)")
ylabel("Température (°C)")
title('Zone 1')

subplot(3,2,2)
p2=plot(T,T1,'b',T,Ts1,'r');
grid on
xlabel("Temps (s)")
ylabel("Température (°C)")
title('Zone 2')

subplot(3,2,3)
p3=plot(T,T2,'b',T,Ts2,'r');
grid on
xlabel("Temps (s)")
ylabel("Température (°C)")
title('Zone 3')

subplot(3,2,4)
p4=plot(T,T3,'b',T,Ts3,'r');
grid on
xlabel("Temps (s)")
ylabel("Température (°C)")
title('Zone 4')

subplot(3,2,5)
p5=plot(T,T4,'b',T,Ts4,'r');
grid on
xlabel("Temps (s)")
ylabel("Température (°C)")
title('Zone 5')

subplot(3,2,6)
p6=plot(T,T5,'b',T,Ts5,'r');
grid on
xlabel("Temps (s)")
ylabel("Température (°C)")
title('Zone 6')

% épaisseur des courbes
set(p1(2),'LineWidth',1.1)
set(p2(2),'LineWidth',1.1)
set(p3(2),'LineWidth',1.1)
set(p4(2),'LineWidth',1.1)
set(p5(2),'LineWidth',1.1)
set(p6(2),'LineWidth',1.1)

saveas(gcf,'Chemin de sauvegarde\CHID_temperatures.pdf') % sauvegarde de la figure ouverte sous format PDF

clf % vide la figure ouverte

% mesure des débits induits
Q1 = A(:,1390);
Q2 = A(:,1391);

```

```

Q3 = A(:,1392);
Q4 = A(:,1393);
Q5 = A(:,1400);

%lissage des débits
Qs1=smooth(Q1,0.1);
Qs2=smooth(Q2,0.1);
Qs3=smooth(Q3,0.1);
Qs4=smooth(Q4,0.1);
Qs5=smooth(Q5,0.1);

% graphes
subplot(3,2,1)
p1=plot(T,Q1,'b',T,Qs1,'r');
grid on
xlabel('Temps (s)')
ylabel('Débit volumique (m3/s)')
title('Tunnel 1')

subplot(3,2,2)
p2=plot(T,Q2,'b',T,Qs2,'r');
grid on
xlabel('Temps (s)')
ylabel('Débit volumique (m3/s)')
title('Tunnel 2')

subplot(3,2,3)
p3=plot(T,Q3,'b',T,Qs3,'r');
grid on
xlabel('Temps (s)')
ylabel('Débit volumique (m3/s)')
title('Tunnel 3')

subplot(3,2,4)
p4=plot(T,Q4,'b',T,Qs4,'r');
grid on
xlabel('Temps (s)')
ylabel('Débit volumique (m3/s)')
title('Tunnel 4')

subplot(3,2,5)
p5=plot(T,Q5,'b',T,Qs5,'r');
grid on
xlabel('Temps (s)')
ylabel('Débit volumique (m3/s)')
title('Sortie')

%epaisseur des courbes
set(p1(2),'LineWidth',1.1)
set(p2(2),'LineWidth',1.1)
set(p3(2),'LineWidth',1.1)
set(p4(2),'LineWidth',1.1)
set(p5(2),'LineWidth',1.1)

saveas(gcf, 'Chemin de sauvegarde\CHID_debits.pdf') % sauvegarde de la figure ouverte sous format PDF

```

Annexe B

Code type de simulation sous FDS 6.1.2, version blenderFDS 2.0.1:

!!! Generated by BlenderFDS 2.0.1 on Blender 2.64 (sub 0)

! Date: Fri, 24 Apr 2015 16:04:02

&HEAD CHID='Regl_1', TITLE='Test de la reglementation avec feu en position 1', /

!!! External config file

&MISC RADIATION=.FALSE., RESTART=.FALSE. /
&TIME T_END=300. /

&REAC FUEL = 'Mix'
SOOT_YIELD = 0.05
CO_YIELD = 0.015
C = 6.30
H = 7.10
O = 2.10
N = 1.00 /

&RAMP ID='fireramp', T= 0.0, F=0.0 /

&RAMP ID='fireramp', T= 20.0, F=1.0/

&DUMP PLOT3D_QUANTITY(1:5)='U-VELOCITY','V-VELOCITY','W-VELOCITY','TEMPERATURE','VISIBILITY', WRITE_XYZ=.TRUE., DT_PL3D=10.0, DT_RESTART=10.0 /

!!! Boundary condition defs

! CL_Tunn_000
&SURF ID='CL_Tunn_000', RGB=0,204,204, TRANSPARENCY=0.700, VEL=0.1, /
! CL_Tunn_001
&SURF ID='CL_Tunn_001', RGB=0,204,204, TRANSPARENCY=0.700, VEL=0.1, /
! CL_Tunn_002
&SURF ID='CL_Tunn_002', RGB=0,204,204, TRANSPARENCY=0.700, VEL=-0.1, /
! CL_Tunn_003
&SURF ID='CL_Tunn_003', RGB=0,204,204, TRANSPARENCY=0.700, VEL=-0.1, /
! Ceiling
&SURF ID='Ceiling', RGB=127,127,127, TRANSPARENCY=0.400, /
! Fire
&SURF ID='Fire', RGB=204,0,0, TRANSPARENCY=0.700,
HRRPUA=437.06, RAMP_Q='fireramp', /
! Glass
&SURF ID='Glass', RGB=78,155,255, TRANSPARENCY=0.400, THICKNESS=0.01, /
! Material.001
&SURF ID='Material.001', RGB=35,35,35, /
! Mesh
&SURF ID='Mesh', RGB=122,204,198, TRANSPARENCY=0.300, /
! Metro_platform
&SURF ID='Metro_platform', RGB=0,2,77, TRANSPARENCY=0.400, /
! Mezzanine
&SURF ID='Mezzanine', RGB=98,0,89, TRANSPARENCY=0.700, /
! Sub_platform.000

```
&SURF ID='Sub_platform.000', RGB=255,54,0, VOLUME_FLOW=0.75, /
! Sub_platform.001
&SURF ID='Sub_platform.001', RGB=255,54,0, VOLUME_FLOW=0.75, /
! Technical_room
&SURF ID='Technical_room', RGB=136,255,177, TRANSPARENCY=0.600, /
! Vol_flo
&SURF ID='Vol_flo', RGB=204,204,0, TRANSPARENCY=0.100, /
```

!!! Computational domain

```
! Mesh_exit_stairs, 181500 cells, cell size is 0.200 x 0.200 x 0.200, from bounding box, in 0.001 s
&MESH ID='Mesh_exit_stairs', IJK=110,30,55,
  XB=-22.000,0.000,-2.800,3.200,4.600,15.600, /
! Mesh_sub_station.000, 537600 cells, cell size is 0.200 x 0.200 x 0.200, from bounding box, in 0.000 s
&MESH ID='Mesh_sub_station.000', IJK=160,80,42,
  XB=0.000,32.000,-8.000,8.000,4.000,12.400, /
! Mesh_sub_station.001, 1686400 cells, cell size is 0.200 x 0.200 x 0.200, from bounding box, in 0.000 s
&MESH ID='Mesh_sub_station.001', IJK=340,80,62,
  XB=32.000,100.000,-8.000,8.000,0.000,12.400, /
! Mesh_sub_station.002, 73600 cells, cell size is 0.200 x 0.200 x 0.200, from bounding box, in 0.001 s
&MESH ID='Mesh_sub_station.002', IJK=160,23,20,
  XB=0.000,32.000,3.400,8.000,0.000,4.000, /
! Mesh_sub_station.003, 73600 cells, cell size is 0.200 x 0.200 x 0.200, from bounding box, in 0.000 s
&MESH ID='Mesh_sub_station.003', IJK=160,23,20,
  XB=0.000,32.000,-8.000,-3.400,0.000,4.000, /
! Mesh_sub_station.004, 27500 cells, cell size is 0.200 x 0.200 x 0.200, from bounding box, in 0.000 s
&MESH ID='Mesh_sub_station.004', IJK=50,25,22,
  XB=100.000,110.000,2.800,7.800,0.000,4.400, /
! Mesh_sub_station.005, 27500 cells, cell size is 0.200 x 0.200 x 0.200, from bounding box, in 0.000 s
&MESH ID='Mesh_sub_station.005', IJK=50,25,22,
  XB=100.000,110.000,-7.800,-2.800,0.000,4.400, /
```

!!! Geometry

```
! CL_Exit, from 1 faces, in 0.000 s
&VENT ID='CL_Exit', SURF_ID='OPEN', XB=-21.000,-9.400,-2.800,3.200,15.600,15.600, /
! CL_Tunnel.000, from 1 faces, in 0.001 s
&VENT ID='CL_Tunnel.000', SURF_ID='OPEN', XB=110.000,110.000,3.000,7.800,0.000,4.400, /
! CL_Tunnel.001, from 1 faces, in 0.000 s
&VENT ID='CL_Tunnel.001', SURF_ID='OPEN', XB=110.000,110.000,-7.800,-3.000,0.000,4.400, /
! CL_Tunnel.002, from 5 faces, in 0.000 s
&VENT ID='CL_Tunnel.002', SURF_ID='OPEN', XB=0.000,0.000,3.400,4.400,1.400,4.400, /
! CL_Tunnel.003, from 5 faces, in 0.000 s
&VENT ID='CL_Tunnel.003', SURF_ID='OPEN', XB=0.000,0.000,-7.600,-4.400,0.000,1.200, /
! Ceiling_Tunnel, from voxelization (123 voxels, voxel size is 0.050), in 6.918 s
&OBST ID='Ceiling_Tunnel_0', SURF_ID='Ceiling', XB=99.974,109.976,-7.626,-7.574,3.424,4.576, /
! Fire_Surf, from bounding box, in 0.000 s
&VENT ID='Fire_Surf', SURF_ID='Fire', XB=33.800,49.400,-7.000,-4.800,1.600,1.600, /
! Glass.000, from bounding box, in 0.000 s
! Sub_platform.000, from 32 faces, in 0.001 s
&VENT ID='Sub_platform.000', SURF_ID='Sub_platform.000',XB=34.600,35.600,3.600,3.600,0.600,1.000, /
! Technical_room.000, from bounding box, in 0.001 s
&OBST ID='Technical_room.000', SURF_ID='Technical_room',XB=0.000,11.400,3.200,7.600,4.800,8.200, /
! Technical_room.001, from bounding box, in 0.000 s
&OBST ID='Technical_room.001', SURF_ID='Technical_room',XB=25.000,32.000,4.000,7.600,4.800,8.200, /
! Technical_room.002, from bounding box, in 0.000 s
&OBST ID='Technical_room.002', SURF_ID='Technical_room',XB=11.400,13.400,5.600,7.600,4.800,8.200, /
! Technical_room.003, from bounding box, in 0.000 s
```

```

&OBST ID='Technical_room.003', SURF_ID='Technical_room',XB=0.000,11.200,-7.600,-2.800,4.800,8.200, /
! Technical_room.004, from bounding box, in 0.000 s
&OBST ID='Technical_room.004', SURF_ID='Technical_room',XB=11.200,13.600,-7.600,-5.400,4.800,8.200, /
! Technical_room.005, from bounding box, in 0.000 s
&OBST ID='Technical_room.005', SURF_ID='Technical_room',XB=13.600,19.800,-7.600,-5.600,4.800,8.200, /
! Technical_room.006, from bounding box, in 0.000 s
&OBST ID='Technical_room.006', SURF_ID='Technical_room',XB=25.000,32.000,-7.600,-4.200,4.800,8.200, /

```

!!! Control logic and output

```

! Temperature.000, from 101 vertices, in 0.000 s
&DEVC ID='Temperature.000_0', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.000,-1.400,6.400, /
! Temperature.001, from 51 vertices, in 0.000 s
&DEVC ID='Temperature.001_0', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=32.800,-2.800,6.400, /
! Temperature.002, from 190 vertices, in 0.001 s
&DEVC ID='Temperature.002_0', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=32.800,-3.200,3.000, /
! Temperature.003, from 5 vertices, in 0.000 s
&DEVC ID='Temperature.003_0', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=36.400,-0.600,5.000, /
! Visibility.000, from 101 vertices, in 0.000 s
&DEVC ID='Visibility.000_0', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=0.000,-1.400,6.400, /
! Visibility.001, from 51 vertices, in 0.000 s
&DEVC ID='Visibility.001_0', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=32.800,-2.800,6.400, /
! Visibility.002, from 190 vertices, in 0.000 s
&DEVC ID='Visibility.002_0', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=32.800,-3.200,3.000, /
! Visibility.003, from 5 vertices, in 0.000 s
&DEVC ID='Visibility.003_0', QUANTITY='VISIBILITY', XYZ=36.400,-0.600,5.000, /
! Vol_flow.000, from 1 faces, in 0.000 s
&DEVC ID='Vol_flow.000', SURF_ID='Vol_flo', QUANTITY='VOLUME FLOW',
  XB=101.000,101.000,3.000,7.800,0.000,4.400, /
! Vol_flow.001, from 1 faces, in 0.000 s
&DEVC ID='Vol_flow.001', SURF_ID='Vol_flo', QUANTITY='VOLUME FLOW',
  XB=101.000,101.000,-7.800,-3.000,0.000,4.400, /
! Vol_flow.002, from 1 faces, in 0.000 s
&DEVC ID='Vol_flow.002', SURF_ID='Vol_flo', QUANTITY='VOLUME FLOW',
  XB=31.000,31.000,3.000,7.800,0.000,4.400, /
! Vol_flow.003, from 1 faces, in 0.000 s
&DEVC ID='Vol_flow.003', SURF_ID='Vol_flo', QUANTITY='VOLUME FLOW',
  XB=31.000,31.000,-7.800,-3.000,0.000,4.400, /
! Vol_flow.004, from 1 faces, in 0.000 s
&DEVC ID='Vol_flow.004', SURF_ID='Vol_flo', QUANTITY='VOLUME FLOW',
  XB=0.000,0.000,-2.600,3.000,4.800,8.200, /
! Vol_flow.005, from 1 faces, in 0.000 s
&DEVC ID='Vol_flow.005', SURF_ID='Vol_flo', QUANTITY='VOLUME FLOW',
  XB=0.000,110.000,4.400,4.400,0.000,1.400, /
! Vol_flow.006, from 1 faces, in 0.000 s

```

&TAIL /

! Generated in 29.532 s.

Remarque : Le code ci-dessus n'est qu'un échantillon du fichier input servant pour les simulations. Le fichier original comprenant 2840 lignes de code, il est trop volumineux pour être inclus dans sa totalité.