

*République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*

**ÉCOLE NATIONALE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE**



*Département de Génie Mécanique*

*Projet de fin d'études*

*Présenté pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur*

*d'état en Génie Mécanique*

*Thème*

**Etude Numérique du Désenfumage  
en cas d'Incendie dans une Station  
de Métro à Deux Niveaux**

Réalisé par:

**Rabah DJEDJIG**

**Proposé et dirigé par :**

B. Benkoussas, M.C., ENP

A. Bouhdjar, D.R., CDER

**En collaboration avec :**

Ph. Bournot, Prof., U. Med. Marseille

O. Vauquelin, M.C., U. Med. Marseille

*Promotion 2009*

---

# Remerciements



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

Au terme de ce projet de fin d'étude, il m'est indispensable de m'acquitter d'une dette de reconnaissance auprès de toutes les personnes dont l'intervention a favorisé son aboutissement.

Je remercie Monsieur B. BENKOUSSAS et Monsieur A. BOUHDJAR pour m'avoir sélectionné pour ce stage, pour avoir cru en moi et pour leur soutien et leurs conseils.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur Ph. BOURNOT pour m'avoir accueilli au sein de l'UNIMECA, pour la confiance qu'il m'a accordée et pour m'avoir permis de réaliser ce stage dans de si bonnes conditions.

Je remercie Monsieur O. Vauquelin pour son encadrement remarquable et pour son aide et ses conseils avisés.

Je remercie les membres du jury, Mr. Larbi, Mr. Benbraïka et Mr. Boubkeur pour avoir pris le temps et le soin de lire ce rapport.

En fin, je remercie ma famille, mes amis et mes collègues de l'ENP et du MED'ACCUEIL pour leurs encouragements et leur soutien durant mon séjour à Marseille.

---

---

# Dédicaces

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

A mes très chers parents, qu'Allah les protège

A mes frères et sœurs

A toute ma famille et tous mes amis

Je dédie ce travail

*Rabah...*

---

---

## ملخص:

هذا العمل عبارة عن دراسة رقمية لاستخراج الأدخنة في حالة نشوب حريق في محطة لقطارات الأنفاق ذات طابقين . تتمثل هذه الدراسة في تفحص فعالية قواعد التنظيم الفرنسية الخاصة باستخراج أدخنة الحرائق من المحطات تحت أرضية, و من ثم البحث عن أنسب الطرق لاستخراج الأدخنة و ذلك في حالة عدة سيناريوهات بهدف ضمان أمن و سلامة الأشخاص عند عمليات الإخلاء و الإنقاذ و هذا باستخدام البرنامج FDS في المحاكاة الرقمية.

كلمات مفتاحية: الوقاية من الحرائق - دخان - انتشار - استخراج الأدخنة - محطة أنفاق.

## Résumé:

Ce travail est une étude numérique du désenfumage en cas d'incendie dans une station de métro à deux niveaux. Le travail consiste à examiner l'efficacité des textes réglementaires français relatifs au désenfumage en stations souterraines, et à rechercher les meilleures stratégies de désenfumage pour différents scénarios afin d'assurer la sécurité des personnes lors des opérations d'évacuation et de sauvetage. Les simulations numériques sont faites à l'aide du code FDS.

**Mots clés:** Sécurité incendie, Fumée, Propagation, Désenfumage, Station de métro.

## Abstract:

This work is a numerical study of smoke extraction in case of fire happened in a two-storeyed subway station. This work consists in examining the effectiveness of the French regulations relating to smoke extraction in underground stations, and looking for the best means to extract smoke for different scenarios in order to ensure the safety of persons during the evacuation and rescue. Numerical simulations are done using the FDS code.

**Key words:** Fire safety, smoke, Propagation, Smoke extraction, Subway station.

---

---

# Table des matières

## CHAPITRE 1: Contexte général

1.1- Introduction.....	1
1.2- Problématique .....	3
1.3- Etudes antérieures .....	4
1.4- Contexte réglementaire : .....	8
1.4.1- Objectifs de la réglementation .....	8
1.4.2- Sécurité incendie dans les Établissements recevant du public .....	8
1.4.3- Désenfumage dans les ERP .....	10
1.4.4- Règles de sécurité applicables aux gares .....	13
1.4.5- Conclusion .....	14

## CHAPITRE 2: Incendies en milieu confiné et propagation des fumées

2.1- Définitions .....	15
2.1.1- Incendie .....	15
2.1.2- Fumée.....	16
2.2- Phénomènes inhérents aux incendies en milieu confiné.....	16
2.2.1- Phase initiale .....	17
2.2.2- Phase de propagation .....	17
2.2.3- Le Flash-Over .....	18
2.2.4- L'incendie pleinement développé .....	18
2.2.5- Déclin .....	18
2.2.6- Phénomènes particuliers liés aux locaux sous-ventilés.....	19
2.3- Incendies en milieux confinés et production des fumées.....	20
2.4- Phénomènes régissant le mouvement des fumées.....	21
2.4.1- La dilatation thermique .....	22
2.4.2- Les forces de flottabilité .....	23
2.4.3- Effet de cheminée .....	23
2.4.4- La surpression causée par le feu.....	24
2.5- Taux de dégagement de chaleur .....	25
2.5.1- Facteurs contrôlant le taux de dégagement de chaleur .....	25
2.5.2- Effets de confinement .....	26
2.5.3- Incendies de dimensionnement .....	26

---

---

## **CHAPITRE 3 : Etude Numérique**

3.1- Introduction.....	28
3.2- Modèles de transport des fumées .....	30
3.3- Description du code FDS .....	30
3.3.1- Modèles mathématiques présents dans FDS .....	31
3.3.2- Potentialités et limitation de FDS .....	34
3.4- Définition de la configuration retenue pour l'étude .....	35
3.5- Hypothèses générales – Maillage.....	37
3.6- Définition des scénarios .....	38
3.7- Moyens d'analyse des résultats .....	38

## **CHAPITRE 4 : Résultats et Interprétations**

4.1- Résultats de l'application des prescriptions de la réglementation en vigueur .....	40
4.2- Présentation et analyse des résultats du 1er scénario .....	42
4.2.1- Cas de soufflage par les tunnels.....	43
4.2.1.1- Effet du soufflage.....	43
4.2.1.2- Effet de l'extraction par les trappes de la mezzanine .....	48
4.2.1.3- Conclusion .....	49
4.2.2- Cas d'extraction par les tunnels.....	49
4.2.2.1- Effet de l'extraction par les tunnels .....	49
4.2.2.2- Effet de l'extraction par les trappes de la mezzanine .....	53
4.2.3- Cas avec ventilation antisymétrique par les tunnels.....	54
4.2.4- Comparaison entre les différentes stratégies.....	58
4.2.4.1- comparaison entre les modes de désenfumage et choix.....	58
4.2.4.2- Effet de la position du train.....	59
4.3- Présentation et analyse des résultats du 2ième et du 3ième scénario.....	60
4.4- Solution avec écrans de cantonnement .....	64
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>67</b>
<b>Références.....</b>	<b>69</b>
<b>Annexe.....</b>	<b>71</b>

---

---

## Liste des Figures

Fig. 1-1: L'incendie en station de métro de Daegu, Corée du Sud, 2003 .....	2
Fig. 1-2: Configuration de la station retenue pour l'étude de l'année 2008 .....	4
Fig. 1-3: Schéma de la station de Gung-Guan avec 4 sortie et 4 escaliers au milieu des quais .....	6
Fig. 1-4: Déplacement de la fumée vers le puits d'aération le plus large.....	7
Fig. 2-1: Phénomènes inhérents aux incendies en milieu confiné .....	17
Fig. 2-2: Principe de la propagation de la combustion par transmission de chaleur .....	18
Fig. 2-3: Production des fumées lors d'un feu confiné .....	21
Fig. 2-4: Dilatation thermique .....	22
Fig. 2-5: Effet de cheminée dans les bâtiment à grande hauteur .....	24
Fig. 2-6: Mouvement d'air et différence de pression lors d'une phase de développement d'un incendie dans un local ayant une porte ouverte .....	25
Fig. 2-7: Effet de confinement sur le taux de masse perdue.....	26
Fig. 3-1: Définition de la configuration retenue pour l'étude .....	36
Fig. 3-2: Emplacement des trappes d'extraction.....	36
Fig. 3-3: Maillage .....	37
Fig. 3-4: Définition des scénarios.....	38
Fig. 3-5: Répartition des points de mesure dans les deux niveaux de la station .....	39
Fig. 4-1: Conditions aux limites imposées pour tester l'efficacité des textes réglementaires.....	40
Fig. 4-2: Enfumage de la station et de la mezzanine malgré le soufflage en mezzanine conforme aux prescriptions de la réglementation .....	41
Fig. 4-3: Débits mis en jeu dans la station, cas réglementaire .....	41
Fig. 4-4: Distribution de la température dans la mezzanine, cas réglementaire .....	41
Fig. 4-5: 1 <sup>ier</sup> Scénario, Définition des stratégies de désenfumage testées .....	42
Fig. 4-6: 1 <sup>ier</sup> Scénario, Enfumage de la station en cas de soufflage par les tunnels .....	43
Fig. 4-7: Profil de la vitesse débitante à la sortie de la station pour différents débits de soufflage.....	44
Fig. 4-8: Débits mis en jeu dans la station avec soufflage de 34 m <sup>3</sup> /s et 68 m <sup>3</sup> /s par les tunnels .....	44
Fig. 4-9: Distribution de la température dans la mezzanine à 1.5m du plancher pour différents débits de soufflage (Vue de dessus tronquée aux zones où la température dépasse 40°C).....	46
Fig. 4-10: Distribution de la température à une hauteur de 1.5m en dessus des quais pour différents débits de soufflage (Vue de dessus tronquée aux zones où la température dépasse 45°C).....	46
Fig. 4-11: Profil de température le long du quai en fonction du débit de soufflage .....	47
Fig. 4-12: Blocage des escaliers par les fumées chaudes qui remontent à la mezzanine, 1 <sup>ier</sup> scénario – cas de soufflage par les tunnels .....	47
Fig. 4-13: Distribution de la température dans la mezzanine à 1.5m du plancher pour différents débits d'extraction par les trappes de la mezzanine et un soufflage de 34m <sup>3</sup> /s par les tunnels.....	48
Fig. 4-14: Distribution de la température dans la mezzanine à 1.5m du plancher pour différents débits d'extraction par les trappes de la mezzanine et un soufflage de 68m <sup>3</sup> /s par les tunnels .....	49
Fig. 4-15: 1 <sup>ier</sup> Scénario, Enfumage de la station en cas d'extraction par les tunnels .....	50
Fig. 4-16: Débits mis en jeu dans la station avec soufflage de 34m <sup>3</sup> /s et 68m <sup>3</sup> /s par les tunnels .....	51
Fig. 4-17: Profil de température le long du quai en fonction du débit d'extraction .....	52
Fig. 4-18: Distribution de la température à une hauteur de 1.5m en dessus des quais pour différents débits d'extraction .....	52
Fig. 4-19: 1 <sup>ier</sup> Scénario, Enfumage de la station en cas de ventilation antisymétrique par les tunnels ..	54

---

---

Fig. 4-20: Débits mis en jeu dans la station avec soufflage-extraction de 34m <sup>3</sup> /s .....	55
Fig. 4-21: Débits mis en jeu dans la station avec soufflage-extraction de 136m <sup>3</sup> /s .....	55
Fig. 4-22: Profil de température le long du quai avec soufflage-extraction de 34m <sup>3</sup> /s dans les 2 sens .....	56
Fig. 4-23: Profil de température au quai avec soufflage-extraction de 136m <sup>3</sup> /s dans les 2 sens .....	57
Fig. 4-24: Distribution de la température à une hauteur de 1.5m en dessus des quais pour différents débits de soufflage-extraction dans les deux sens .....	57
Fig. 4-25: Comparaison de la distribution de la température au quai pour les différentes stratégies avec leurs débits optimaux .....	59
Fig. 4-26: Effet de la position du train sur les champs de vitesse et de température dans la station .....	60
Fig. 4-22: Profil de température le long du quai avec soufflage-extraction de 34m <sup>3</sup> /s dans les 2 sens .....	61
Fig. 4-27: Système de désenfumage adopté pour le 2 <sup>ème</sup> scénario .....	61
Fig. 4-28: Distribution de la température dans le plan passant par le milieu des escaliers les plus proches au wagon en feu – 2 <sup>ème</sup> scénario .....	61
FIG. 4-29: Distribution de la température à une hauteur de 1.5m en dessus des quais, 2 <sup>ème</sup> scénario (vue de dessus tronquée aux zones où la température dépasse 45°C) .....	61
Fig. 4-30: Profil de température le long du quai le plus proche au feu, 2 <sup>ème</sup> scénario .....	62
Fig. 4-31: Système de désenfumage adopté pour le 3 <sup>ème</sup> scénario .....	62
Fig. 4-32: Distribution de la température dans le plan passant par le milieu des escaliers les plus proches au wagon en feu – 3 <sup>ème</sup> scénario .....	63
Fig. 4-33: Distribution de la température à une hauteur de 1.5m en dessus des quais, 3 <sup>ème</sup> scénario .....	63
Fig. 4-34: Profil de température le long du quai le plus proche au feu, 3 <sup>ème</sup> scénario .....	63
Fig. 4-35: Emplacement de écrans de cantonnement .....	64
Fig. 4-36: Enfumage de la station sans et avec écrans de cantonnement pour des débits de soufflage de 34 m <sup>3</sup> /s et 68 m <sup>3</sup> /s .....	65
Fig. 4-37: Montée en température moyenne dans la mezzanine dans le cas de soufflage avec 34m <sup>3</sup> /s avec et sans écrans de cantonnement .....	66
Fig. 4-38: Montée en température moyenne dans la mezzanine dans le cas de soufflage avec 68m <sup>3</sup> /s avec et sans écrans de cantonnement .....	66

## Liste des Tableaux

Tableau 1-1: Classement des ERP par type d'exploitation .....	9
Tableau 1-2: Classement catégoriel des ERP .....	9
Tableau 2-1: Incendies de dimensionnement .....	27
Tableau 3-1: Correspondance Débits/Vitesses pour les différentes ouvertures de la station .....	39
Tableau 4-1: Relevés de température des points de mesure – 1 <sup>er</sup> scénario, Soufflage par les tunnels .....	45
Tableau 4-2: Relevés de température des points de mesure – 1 <sup>er</sup> scénario, Extraction par les tunnels .....	51
Tableau 4-3: Effet de l'extraction par les trappes de la mezzanine – Extraction par les tunnels .....	53
Tableau 4-4: Relevés de température des points de mesure – 1 <sup>er</sup> scénario, Vent. antisymétrique .....	56
Tableau 4-5: Comparaison entre les différentes stratégies de désenfumage testées .....	58
Tableau 4-6: Relevés de température des points de mesure en présence et en absence des écrans de cantonnement pour des débits de soufflage de 34m <sup>3</sup> /s et 68m <sup>3</sup> /s .....	65

---

---

## Nomenclature

$t$	<i>temps</i>
$p$	<i>Pression</i>
$\bar{p}_m$	<i>Pression de référence "background pressure"</i>
$\tilde{p}$	<i>Perturbation sur la pression</i>
$\rho$	<i>Masse volumique</i>
$T$	<i>Température</i>
$R$	<i>Constante des gaz parfaits</i>
$g$	<i>Gravité</i>
$\bar{W}$	<i>Masse moléculaire du mélange</i>
$\vec{u}$	<i>Vecteur vitesse</i>
$H$	<i>Pression totale divisé par la masse volumique</i>
$H_g$	<i>Chaleur de gazéification</i>
$Y_i$	<i>Fraction massique de l'élément <math>i</math></i>
$D_i$	<i>Coefficient de diffusion de l'élément <math>i</math></i>
$\dot{m}_i'''$	<i>Taux de production massique de l'élément <math>i</math> par unité de volume</i>
$\dot{m}''$	<i>Taux de masse perdue</i>
$\dot{q}''$	<i>Flux de chaleur par unité de surface</i>
$\vec{\omega}$	<i>Vecteur de vorticité</i>
$\vec{f}_b$	<i>Forces extérieurs sauf gravité</i>
$\tau_{ij}$	<i>Tenseur de contraintes visqueuses</i>

## Abréviations:

CFD	Computational Fluid Dynamics
FDS	Fire Dynamics Simulator
NIST	National Institut of Standardisation and Technology
RANS	Reynolds-averaged form of the Navier-Stokes equations
LES	Large Eddy Simulation
DNS	Direct Numerical Simulation
HRR	Heat Release Rate
HRRPUA	Heat Release Rate Per Unit Area
ERP	Etablissement Recevant du Public
BGH	Bâtiment à Grande Hauteur

---

# Chapitre 1

## Contexte général

1.1- Introduction .....	1
1.2- Problématique .....	3
1.3- Etudes antérieures .....	4
1.4- Contexte réglementaire .....	8

### 1.1- Introduction:

Le métro est le moyen de transport urbain principal dans les grandes villes de ce fait un incendie qui se déclare dans une de ses stations causerait des dégâts humains considérables si jamais des mesures judicieuses de sécurité incendie ne soient pas prises. A noter que dans le cas des incendies en milieux confinés, la majorité des victimes sont asphyxiées par les fumées intenses qui se dégagent du feu, par contre très peu de victimes meurent par suites des brûlures.

Plusieurs incendies dans des stations de métro se sont produits dans le passé. Certains cas sont de purs accidents, tandis que d'autres ont été causés par des actes de vandalisme, parmi ces sinistres on cite les trois les plus importants qui ont laissé leurs traces indélébiles dans l'histoire des accidents en stations de métro. Le premier a eu lieu dans la station de métro King's Cross à Londres (Nov. 1987) et a causé 31 morts et 47 blessés. Le deuxième dans le tunnel de métro de la capitale de la République de l'Azerbaïdjan l'Oléoduc Baku (Oct. 1995) où l'air chaud et les fumées toxiques ont provoqué la mort de 337 personne et ont blessé gravement 227 personnes. Le troisième à la station Daegu en Corée du Sud (Fév. 2003) avec environ 200 morts [1].

La prévision du mouvement des fumées dans les espaces confinés et la conception d'un système de contrôle des fumées sont donc des éléments importants dans l'établissement d'une

stratégie de sécurité de feu qui soit capable de permettre d'éviter ce nombre important de victimes.

Pour être capable de concevoir une telle stratégie, on a besoin d'établir plusieurs paramètres qui décrivent la dynamique et le mouvement des fumées et leurs impacts sur les passagers et le personnel de la station. Toutefois il est très onéreux d'examiner le comportement de la chaleur et de la fumée issues d'un incendie éventuel par le biais de tests réalisés dans une véritable station de métro.

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 de transport inhérents aux développements des feux. Ces codes peuvent être validés par la suite sur des maquettes à échelle réduite. En effet, à partir des résultats d'une étude effectuée sur la station de King's Cross [1], on a trouvé que la prévision du mouvement des fumées était difficile dans une station d'une telle complexité, et que le contrôle des fumées serait primordial en cas d'urgence. Plus précisément la fumée flottante peut se déplacer très rapidement à travers les cages d'escaliers, bloquant ainsi les passages par lesquels les passagers sont supposés évacués.

Plusieurs logiciels ont été développés afin de simuler les phénomènes de transport en cas d'incendie et dans la mécanique des fluides en général. Dans la présente étude le code FDS est utilisé pour étudier la propagation et le contrôle des fumées dans une station de métro. FDS est un programme CFD destiné à l'étude des feux et la simulation des incendies et qui a été développé spécialement pour cette finalité.



**Fig. 1-1: L'Incendie en station de métro de Daegu,  
Corée du sud, 2003**

## **1.2- Problématique:**

Dans la présente étude, il s'agit de poursuivre et de compléter la thématique développée dans une étude [2] faite durant l'année 2008, et qui portait sur le désenfumage mécanique en cas d'incendie dans une station de métro. Cette étude a permis de mettre en évidence l'effet de la ventilation longitudinale sur le transfert de fumées le long du niveau des quais. A noter que dans cette étude les voies de communications avec les volumes adjacents étaient des ouvertures localisées au niveau des quais.

Dans le cas des stations souterraines de métro, on constate généralement que les voies d'évacuation non protégées se situent au-dessus du volume des quais. Il se peut que la position en plafond du volume des quais des communications entre les volumes soit très défavorable pour prévenir le transfert des fumées, vu que c'est là où les fumées ont tendance à se stratifier. Cette configuration diffère notablement de celle qui avait été prise en compte lors de l'étude de 2008. Il s'agit donc de compléter l'approche précédente en abordant le thème particulier du règlement de sécurité incendie concernant la protection des volumes adjacents aux volumes où l'incendie se déclare.

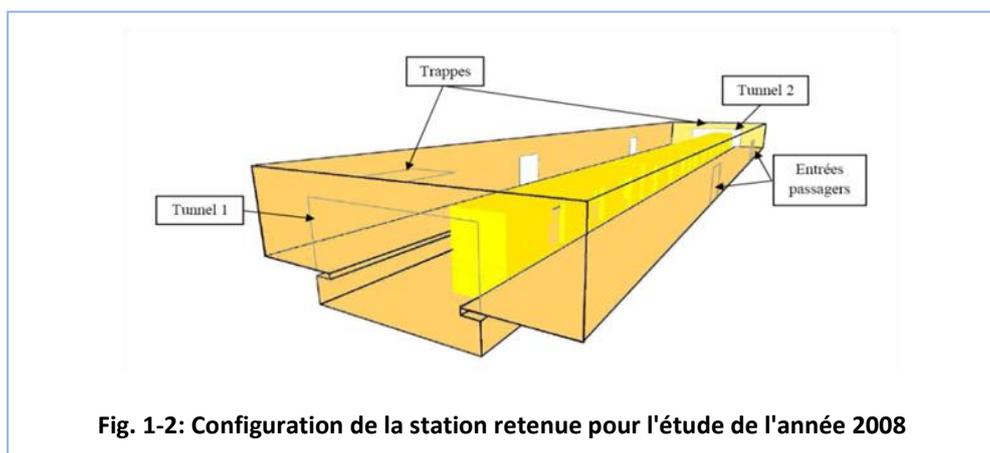
La réglementation française précise que lorsqu'un incendie affecte une zone d'un établissement, les volumes protégés doivent être mis en surpression, afin d'éviter la propagation des fumées dans leurs directions. L'approche consiste généralement à assurer un soufflage mécanique d'air dans chacun des volumes à protéger. En outre, les résultats tirés des études précédentes montrent que les fumées disposent d'un mouvement qui n'est dominé que partiellement par les effets de ventilation, que celle-ci soit d'origine mécanique ou naturelle, il est très probable que malgré le soufflage assuré au niveau supérieur de la station les fumées y remontent, et dans ce cas non seulement on ne parvient pas à empêcher la remontée des fumées, mais on s'y retrouve avec des niveaux de turbulence incompatibles avec le développement de la stratification naturelle, ce qui est généralement le résultat recherché pour assurer l'évacuation des personnes en toute sécurité. Il s'agit donc de rechercher les dispositions passives et les stratégies de ventilation qui permettent d'assurer la sécurité des personnes durant les opérations d'évacuation et de sauvetage.

### 1.3- 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 calculs commerciaux restent insuffisantes et devront être validées par des essais expérimentaux faits sur des maquettes à échelle réduite.

Deux exemples d'études sont présentés ci-après: la première est l'étude précédemment mentionnée dans la problématique, et la seconde avait pour but la mise en évidence de l'influence de l'effet de cheminée sur la propagation des fumées en station de métro souterraine.

M. Hadj Nacer [2], a étudié l'effet de la ventilation longitudinale sur le contrôle du mouvement des fumées au niveau des quais d'une station de 70 m de long, 14 m de largeur et hauteur sur le quai de 4 m (à noter que ce sont les mêmes dimensions des quais dans la configuration retenue pour la présente étude). Le feu était défini par sa puissance de HRR=15MW.



Deux scénarios ont été considérés:

1<sup>er</sup> scénario : Le feu se produit au niveau de la plateforme de l'un des wagons.

2<sup>ème</sup> scénario : Le feu se produit au niveau des roues pneumatiques de l'un des wagons.

Dans chacun des deux scénarios, deux cas ont été considérés, selon la position du feu. La recherche de la meilleure stratégie de désenfumage consistait à faire varier l'intensité et la direction de la ventilation par les tunnels, tout en maintenant l'extraction par les trappes situées au plafond. Plusieurs cas ont été ainsi définis selon que l'on souffle ou que l'on extrait par les deux tunnels, ou que l'on souffle par l'un et que l'on extrait par l'autre.

Dans les calculs, il a été supposé que la totalité d'énergie est transportée par convection et l'influence de la radiation est négligée. L'étude numérique a été faite en utilisant le code FDS4.07.

L'objectif de cette partie était de rechercher les scénarios les plus critiques par le biais de l'analyse des enregistrements des points de prises de mesure localisés dans la station. Pour distinguer les scénarios critiques, un classement des résultats des différents cas était nécessaire.

Le système adopté pour classer les résultats était basé sur la température moyenne calculée sur la base de quatre prises de mesure, ces points de mesure ont été placés à une hauteur de 1.5 m au milieu du quai le plus proche du wagon en feu. Cette moyenne a été faite sur 5min de simulation.

Dans cette étude, la température de 40°C a été choisie comme température de référence par rapport à laquelle tous les cas ont été classés:

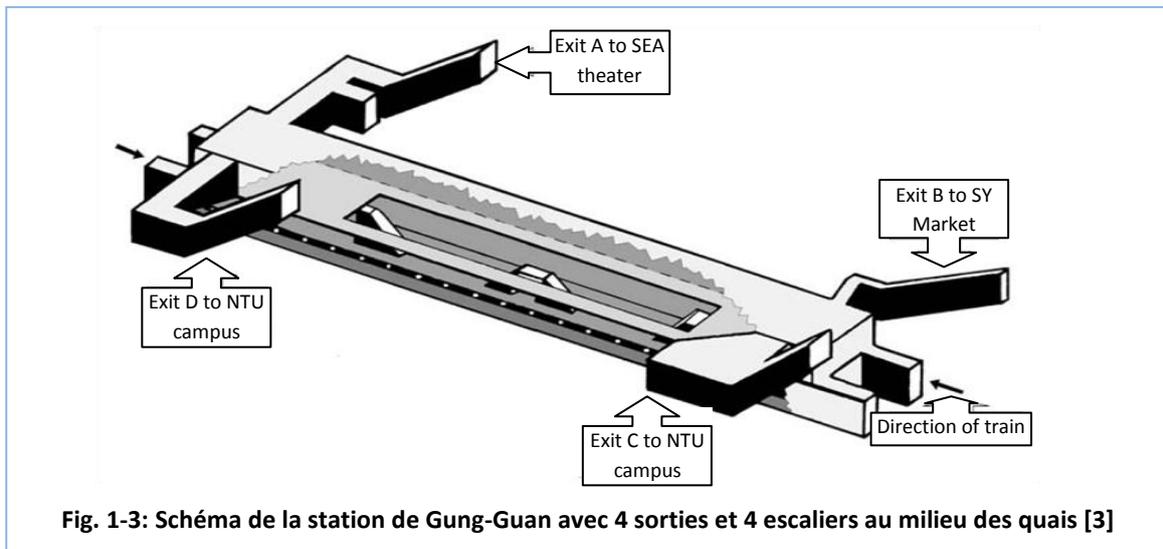
- Si la température moyenne calculée sur 4 ou 3 prises de mesure dépasse 40°C, le cas est classé très dangereux.
- Si la température moyenne dépasse 40°C dans une ou deux prises de mesure, le cas est moyennement dangereux.
- Si la température moyenne ne dépasse pas 40°C sur les quatre prises de température, le cas est classé faiblement dangereux.

Les résultats ont montré que :

- Les débits de soufflage forts par les tunnels qui correspondent à la vitesse 2 m/s ou plus, destratifient la couche de fumée et font descendre les fumées à des niveaux bas et engendrent un courant d'air sortant par les entrées passagers, ce qui fait qu'une grande partie des fumées sort par ces ouvertures. Cela a été jugé dangereux pour l'évacuation des passagers. Les cas de cette catégorie ont été classés dans le cadre des cas très dangereux.

- Dans la catégorie de débit faible sur les 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 induisent un courant d'air entrant important par les entrées des 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 stratifiées et collées sous le plafond, car ces débits jouent le rôle de confinement.

F. Chen et al [3] ont examiné l'effet de cheminée sur la propagation des fumées dans les stations de métro. Une étude en 3D de différents scénarios incendies 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  $142.1\text{ m}$  et sa largeur est de  $17.9\text{ m}$ . La hauteur de la plateforme et du hall est de  $4.15\text{ m}$  et  $5.15\text{ m}$ , respectivement.

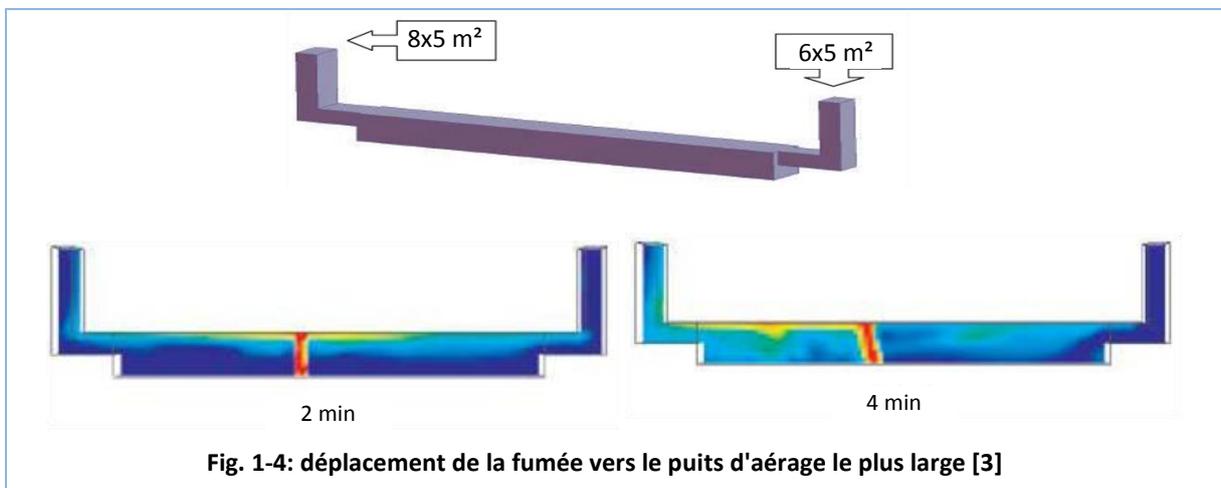


La technique CFD [3] a été utilisée pour examiner le mouvement des fumées et spécialement l'effet de cheminée. Le code de simulation numérique CFX4, qui utilise la méthode des éléments finis a été employé. Le modèle de turbulence  $k-\varepsilon$  utilisé était en mesure de simuler l'écoulement des fumées. La source de chaleur et de fumée a été représentée par une injection de  $\text{CO}_2$  sans aucune combustion considérée. L'incendie avait une puissance de  $5\text{ MW}$  et produit  $1.4 \times 10^5\text{ ppm/s}$  de fumée. Les conditions aux limites imposées sont le non glissement pour la vitesse, l'adiabacité pour les murs et la pression atmosphérique pour les 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 courant de masse qui traverse les puits. Pour pouvoir étudier l'effet de cheminée aucune ventilation mécanique n'a été considérée pendant la procédure de calcul.

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 domine le mouvement des fumées par le déplacement de la fumée au coté gauche de 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 et s'étale sur les deux extrémités de la station. La fumée arrive aux deux extrémités au même temps. A cause du petit espace, l'effet de cheminée 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 donc elle se déplace à droite. Les autres sorties aident à l'évacuation partielle des fumées à cause de leur grande section.



## **1.4- Contexte réglementaire :**

A la suite de graves incendies ayant provoqué la mort de plusieurs personnes, une réglementation dont l'objectif est d'imposer des règles de sécurité dans les établissements recevant du public (ERP) a été élaborée [4].

### **1.4.1- Objectifs de la réglementation :**

Les mesures réglementaires ont pour but :

- soit d'évacuer rapidement le public à l'extérieur du bâtiment (cas général).
- soit d'assurer sa mise à l'abri dans une première phase, vers des zones ou des volumes spécialement protégés (cas des établissements sanitaires, ou des hôtels-restaurants d'altitude isolés en montagne) [4].

### **1.4.2- Sécurité incendie dans les Établissements recevant du public:**

#### **1.4.2.1- Établissement recevant du public en droit français :**

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 (de l'échoppe à la grande surface), bibliothèques, écoles, universités, hôtels, restaurants, hôpitaux... que ce soient des structures fixes ou provisoires (chapiteau, structures gonflables) [5].

La réglementation de sécurité concernant les ERP s'articule autour de deux textes centraux :

- le Code de la Construction et de l'Habitation (CCH), consultable sur [www.legifrance.fr](http://www.legifrance.fr)
- le Règlement de sécurité, consultable sur [www.sitesecurite.com](http://www.sitesecurite.com)

Les ERP sont classés suivant leur activité et leur capacité, on distingue deux types de classements selon l'activité et selon l'effectif:

a. Classement par type d'exploitation :

**Tableau 1-1: Classement des ERP par type d'exploitation**

<i>Etablissements installés dans un bâtiment</i>	<i>Etablissements spéciaux</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- J structures d'accueil pour personnes âgées et personnes handicapées ;</li> <li>- L salles d'auditions, de conférences, de réunions, de spectacles ou à usages multiples ;</li> <li>- M magasins de vente, centres commerciaux ;</li> <li>- N restaurants et débits de boissons ;</li> <li>- O hôtels et pensions de famille ;</li> <li>- P salles de danse et salles de jeux ;</li> <li>- R établissements d'éveil, d'enseignement, de formation, centres de vacances, centres de loisirs sans hébergement</li> <li>- S bibliothèques, centres de documentation</li> <li>- T salles d'expositions ;</li> <li>- U établissements de soins ;</li> <li>- V établissements de culte ;</li> <li>- W administrations, banques, bureaux ;</li> <li>- X établissements sportifs couverts ;</li> <li>- Y musées.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CTS chapiteaux, tentes et structures itinérants, ou à implantation prolongée, ou fixes</li> <li>- EF établissements flottants</li> <li>- GA gares accessibles au public</li> <li>- OA hôtels-restaurants d'altitude</li> <li>- PA établissements de plein air</li> <li>- PS parcs de stationnement couverts</li> <li>- REF refuges de montagne</li> <li>- SG structures gonflables</li> </ul>

b. Classement catégoriel :

Le classement par type d'exploitation est complété par un classement catégoriel uniquement en fonction de l'effectif  $Q$  du public reçu et du personnel ne disposant pas de dégagements propres.

**Tableau 1-2: Classement catégoriel des ERP**

<i>ERP du premier groupe (grands établissements)</i>	<i>ERP du deuxième groupe (petits établissements, 5e catégorie)</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1<sup>ière</sup> catégorie : <math>Q &gt; 1500</math> personnes</li> <li>• 2<sup>ième</sup> catégorie : <math>70 \leq Q \leq 1500</math></li> <li>• 3<sup>ième</sup> catégorie : <math>301 \leq Q \leq 700</math></li> <li>• 4<sup>ième</sup> catégorie : (à l'exception des ERP du 2<sup>ième</sup> groupe).</li> </ul>	<p>Leurs seuils sont variables en fonction du type d'exploitation et des niveaux occupés.</p> <p>Un établissement est classé en 5<sup>ième</sup> catégorie si <math>Q</math> est inférieur au nombre minimal fixé pour chaque type d'exploitation (public seul).</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Code de la construction et de l'habitation (articles R. 123-1 à R. 123-55 et R. 152-6 et 7)</li> <li>• arrêté du 25 juin 1980 modifié ;</li> <li>• arrêtés particuliers suivant l'exploitation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Code de la construction et de l'habitation</li> <li>- Livre I (arrêté du 25 juin 1980, chapitre GN) pour certaines dispositions.</li> <li>- Livre III (articles PE).</li> <li>- arrêté du 22 juin 1990 modifié.</li> </ul>

#### **1.4.2.2- 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 [6]. 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.

#### **1.4.3- 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 [7] :

##### **1.4.3.1- Objet du désenfumage :**

L'article DF 1 indique que 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.

### **1.4.3.2- Principes de désenfumage :**

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

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

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).

### **1.4.3.3- 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.

### **1.4.3.4- 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.
- Solutions applicables aux dégagements : Pour limiter ou éviter l'enfumage des cages d'escalier et des circulations horizontales enclouonnées, celles-ci peuvent être, suivant le cas, désenfumées par un balayage naturel ou mise en surpression par rapport au(x) volume(s) sinistré(s). Pour les escaliers, en aucun cas, les fumées n'en sont extraites mécaniquement.

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 fumée. Dans le cas de locaux divisés en cantons, cette amenée d'air peut se faire par les cantons périphériques.

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.

#### **1.4.4- Règles de sécurité applicables aux gares [8]:**

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 ».

##### **1.4.4.1- Types de gares :**

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 simultanées suivantes :

- être 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.
- être 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.

#### 1.4.4.2- 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

#### 1.4.5- Conclusion :

Les textes réglementaires français relatifs à la sécurité incendie et le désenfumage dans les établissements recevant du public restent très généraux 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 en chapitre 4 – 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 déplorables sur le maintien de la stratification des fumées.

# Chapitre 2

## Incendies en milieu confiné et Propagation des fumées

2.1- Définitions .....	15
2.2- Phénomènes inhérents aux incendies en milieu confiné.....	16
2.3- Incendies en milieux confinés et production des fumées .....	20
2.4- Phénomènes régissant le mouvement des fumées .....	21
2.5- Taux de dégagement de chaleur.....	25

### 2.1- Définitions:

#### 2.1.1- 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 sur la sécurité des personnes: la grande chaleur qu'il dégage est susceptible de provoquer des brûlures soit par contact direct avec les flammes soit par le rayonnement émis par ces flammes. En outre, les fumées que l'incendie produise peuvent brûler les poumons de l'intérieur, et les gaz toxiques qui s'en dégagent peuvent causer l'empoisonnement et l'asphyxie. En plus de son impact sur les personnes, l'incendie a un impact sur l'infrastructure à cause des températures élevées qui sont susceptibles de provoquer l'effondrement, et sur l'environnement.

Les causes de l'incendie sont diverses et varient en fonction de l'environnement. Dans les métros, l'échauffement des pneumatiques est à l'origine de plusieurs incendies.

Les incendies sont de deux types: incendies en milieu ouvert et incendies en milieu confiné. Les incendies en milieu confiné peuvent toucher différents types d'environnements. On peut toutefois les classer suivant les trois catégories ci-après :

- Les bâtiments publics : habitât individuel, bureaux et lieux publics.
- Les bâtiments industriels tels que les entrepôts ou les locaux techniques.
- Les installations souterraines telles que les systèmes de transport souterrains, les mines et carrières souterraines correspondant à des infrastructures ventilées.

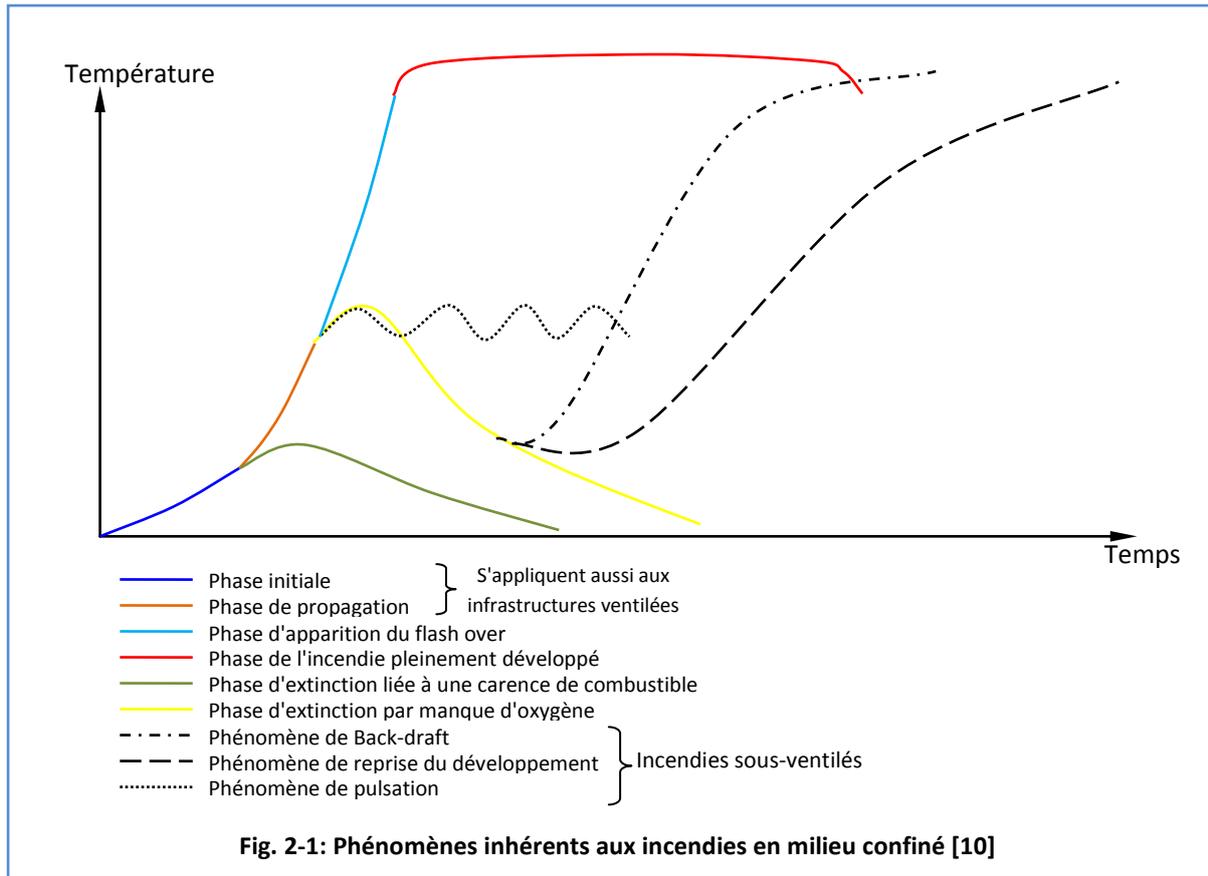
### **2.1.2- Fumée:**

La fumée est un nuage formé de particules très fines suspendues dans le gaz de combustion. La fumée 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 taille de ces particules peut varier entre 0,01 et 10  $\mu\text{m}$ . La couleur résultante nous renseigne sur la composition : fumée blanche révélatrice d'aérosols et de vapeur d'eau, fumée grise pour les mélanges d'aérosols et de particules solides, enfin fumée noire pour les grosses particules solides. La vitesse horizontale du front de fumées est de l'ordre de 0,20m/s à 1m/s. 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. Bien que la couleur de la fumée influe directement sur l'opacité et nous renseigne sur sa composition chimique, elle ne donne aucune information sur les dangers réels dus à la température et la présence de gaz toxiques associés à un éventuel manque d'oxygène [9].

## **2.2- Phénomènes inhérents aux incendies en milieu confiné:**

Grâce au retour à l'accidentologie et aux expériences vécues, il est possible, et malgré la complexité des phénomènes mis en jeu, d'identifier les différentes phases du développement d'un incendie en milieu confiné. Toutefois différentes évolutions peuvent être observées en fonction de la ventilation des locaux, de l'infrastructure et des produits de combustion et leurs agencement.



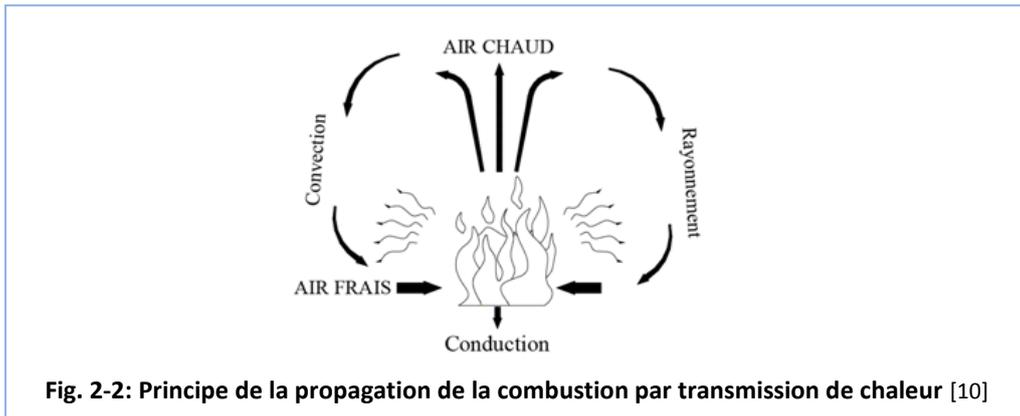
### 2.2.1- Phase initiale:

Une réaction de combustion s'amorce à l'issu d'un apport suffisant de chaleur: c'est le processus d'inflammation qui peut être très rapide ou très lent selon l'état physique du combustible (gaz, liquide ou solide).

### 2.2.2- Phase de propagation:

Cette étape se traduit par la montée accélérée de la température suite à la montée en puissance de l'incendie. Dans cette phase, la disposition des éléments combustibles joue un rôle capital, car elle permettra la propagation et le développement ou non de l'incendie. En effet, si le combustible se trouve en petite quantités insuffisantes, on se retrouve dans la phase d'extinction liée à une carence de combustible.

Comme dans le cas des incendies en milieu ouvert, la combustion peut se propager de deux façons différentes : soit par transmission de chaleur, soit par déplacement des substances en combustion.



### 2.2.3- Le Flash-Over (l'embrassement généralisé):

Lorsque l'apport en air frais est suffisant, l'incendie poursuit sa progression jusqu'à un stade particulier se traduisant par une élévation importante de la température dans le local en feu en dépassant les 500°C. Ce phénomène a été très largement étudié depuis les années 1970 autant d'un point de vue expérimental que numérique. Les conditions d'occurrence de ce phénomène se résument en l'existence d'une part d'une couche chaude constituée de fumées et gaz de combustion partiellement brûlés dans la partie supérieure du local en feu, et d'autre par d'une couche d'air frais dans la partie inférieure du local. Pour que cela arrive, le local doit être suffisamment ventilé pour alimenter le feu en oxygène lors de phase de croissance car la combustion devient difficile en dessous d'un taux d'oxygène inférieur à 12%. Dans le cas contraire on se retrouve sur la partie jaune du diagramme ci-dessus, qui représente une phase d'extinction par manque d'oxygène (grande production des gaz imbrûlés et toxiques).

### 2.2.4- L'incendie pleinement développé:

Cette étape suit l'étape d'embrassement généralisé et correspond au pic de puissance de l'incendie. Elle peut durer plusieurs heures en fonction de la quantité de combustible disponible. Elle est caractérisée par une température de l'ordre de 800-900°C. Elle suppose que l'apport d'air frais dans le local est suffisant pour assurer la combustion de l'ensemble des matériaux inflammables contenus dans l'enceinte en feu.

### 2.2.5- Déclin :

Lorsque le combustible disponible est consommé, le taux de dégagement de chaleur diminue et le feu peut alors retourner à un état de contrôle par le combustible en cherchant un équilibre avec la disponibilité en oxygène.

### **2.2.6- Phénomènes particuliers liés aux locaux sous-ventilés:**

Différents phénomènes spécifiques peuvent être observés lorsque l'incendie est fortement confiné car son développement est ainsi entièrement contrôlé par la quantité d'air disponible dans le local en feu. Il est important de rappeler à ce stade que la combustion devient très difficile pour une concentration en oxygène dans le milieu inférieure à 12%. Ces phénomènes sont les suivants :

#### **2.2.6.1- Le phénomène de pulsation:**

Par manque d'oxygène, la température dans le local chute, cela conduit à une dépression qui entraîne l'admission d'air frais de l'extérieur. Cet air permet une reprise de la combustion et une augmentation de la température et par suite une surpression dans le local. L'apport d'air frais ainsi s'arrête et le processus se répète successivement.

#### **II-2.6.2- Le BACK-DRAFT:**

Le BACK-DRAFT peut se développer à partir de feux de matériaux combustibles solides ou de liquides inflammables qui, en s'appauvrissant en oxygène, génèrent une atmosphère riche en combustibles. Si de l'air se retrouve injecté soudainement dans l'espace contenant cette atmosphère viciée par l'ouverture d'une porte ou par une fenêtre brisée, un courant d'air frais s'écoulera par gravité dans le local tandis que les gaz, riches en combustibles, plus chauds, s'évacueront vers l'extérieur par la partie haute de l'ouverture. L'air et les gaz riches en combustibles se mélangeront le long de l'interface entre les deux écoulements de gaz et d'air frais (de sens opposé). Si localement un mélange inflammable se forme, une déflagration peut se produire dès que le mélange entre en contact avec une source d'inflammation. La déflagration provoquera le réchauffement des gaz et leur expansion, poussant ainsi les gaz imbrûlés à l'extérieur du local devant le front de flamme. Ces gaz se mélangeront avec l'air extérieur à l'espace en feu. Comme la flamme traverse le local et passe par l'ouverture, elle enflamme au passage un mélange très riche en gaz imbrûlés situés à l'extérieur du local provoquant ainsi l'occurrence d'une boule de feu et d'une onde de pression [10].

### **2.2.6.3- Phénomène de reprise du développement:**

Ce phénomène apparaît dans les mêmes conditions qu'un BACKDRAFT suite à un apport soudain d'air frais dans le local à l'exception que la température initiale des imbrûlés est supérieure à leur température d'auto-inflammation. Ces gaz s'enflamment donc rapidement au contact de l'air. Le processus de mélange formant un nuage explosif tel que défini dans le BACKDRAFT n'a donc pas le temps de se réaliser. Le phénomène explosif n'apparaît donc pas et s'apparente plutôt au phénomène du Flash-Over.

## **2.3- 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 cela n'est pas tout à fait exact, et le phénomène de production de fumées est plus complexe. Le feu et la production de fumées dans un local passe par trois étapes:

### 1<sup>ière</sup> étape:

Au début, le feu est de petite taille, il produit des gaz de combustion incolores qui montent et se trouvent bloqués par 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<sup>ième</sup> étape:

Au bout de quelques instants, le haut de la flamme va se trouver dans une zone dans laquelle le comburant aura été remplacé par les produits de la 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 puis qu'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<sup>ème</sup> 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, et ce n'est qu'avec une flamme de bougie d'un peu plus d'1cm de haut et de quelques millimètres de diamètres. En imaginant que cette flamme fasse 1m de diamètre et plusieurs mètres de haut, on aurait une idée de la quantité de fumée produite.

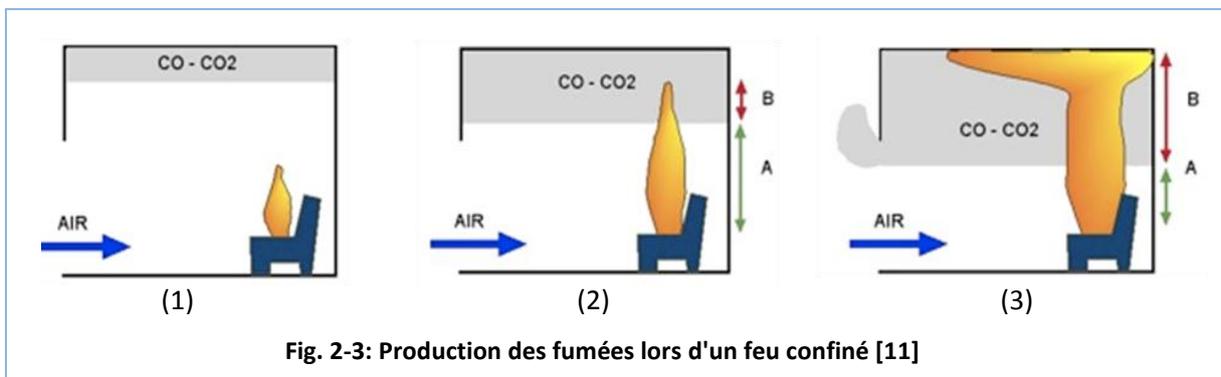


Fig. 2-3: Production des fumées lors d'un feu confiné [11]

## 2.4- Phénomènes régissant le mouvement des fumées:

En dépit de la composition toxique de la fumée, les risques d'embrassement généralisé et d'explosion de fumée, l'un des causes qui rendent la fumée très dangereuse est certainement sans déplacement rapide, surnois et difficile à prévoir dans un bâtiment incendié. Contournant les obstacles, la fumée transmet sa chaleur et endommage les matériaux qu'elle affleure, elle diminue la visibilité et asphyxie et intoxique les occupants d'un bâtiment.

La compréhension du mouvement des fumées donc est 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:

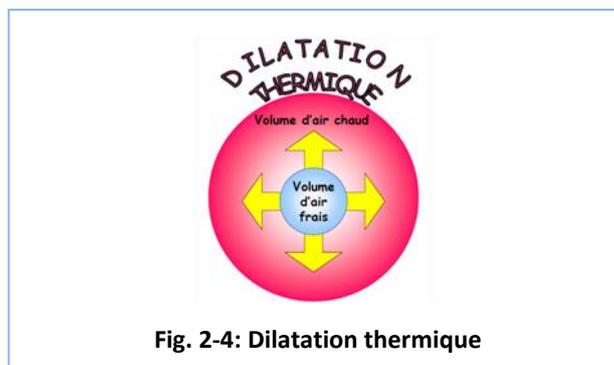
- Des ouvertures présentes.
- Disposition des pièces, types de plafonds, ouvertures verticales.
- Des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation.
- Des conditions climatiques extérieures.

L'écoulement des fumées issues d'un incendie est toujours turbulent, en raison de l'ampleur du feu et de l'énorme pression engendrée. Les forces qui conduisent les fumées sont la conséquence de plusieurs phénomènes:

1. La dilation thermique.
2. Les forces de flottabilité (poussée d'Archimède et la gravité).
3. Effet de cheminée (Stack effect).
4. La surpression causée par le feu.

### **2.4.1- 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  $800^{\circ}\text{C}$  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.



Cette augmentation importante du volume des gaz chauds provoque ainsi l'expulsion des autres gaz présents au début de l'incendie et elle continue aussi longtemps que la température augmente. Le phénomène de dilatation thermique explique en partie la rapidité de propagation de la fumée, de même que l'abaissement de la couche de fumée dans un milieu fermé [13].

#### **2.4.2- 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.

Les mouvements de convection engendrés par ces deux forces opposées expliquent des phénomènes comme la forme pointue des flammes en V inversé d'un panache de fumée, la propagation d'un incendie aux étages supérieurs d'un bâtiment en laissant le milieu intact et de même l'effet de roulement de la fumée au plafond. Cet effet est obtenu surtout au début d'un incendie, lorsque la fumée transmet sa chaleur au plafond, provoquant ainsi son refroidissement et sa descente. En descendant, la fumée refroidie se mélange encore par diffusion avec les gaz chauds qui montent, ce qui la fait remonter à nouveau. Ce mouvement de montée/descente continue jusqu'à ce que le plafond atteigne la même température que la fumée [2].

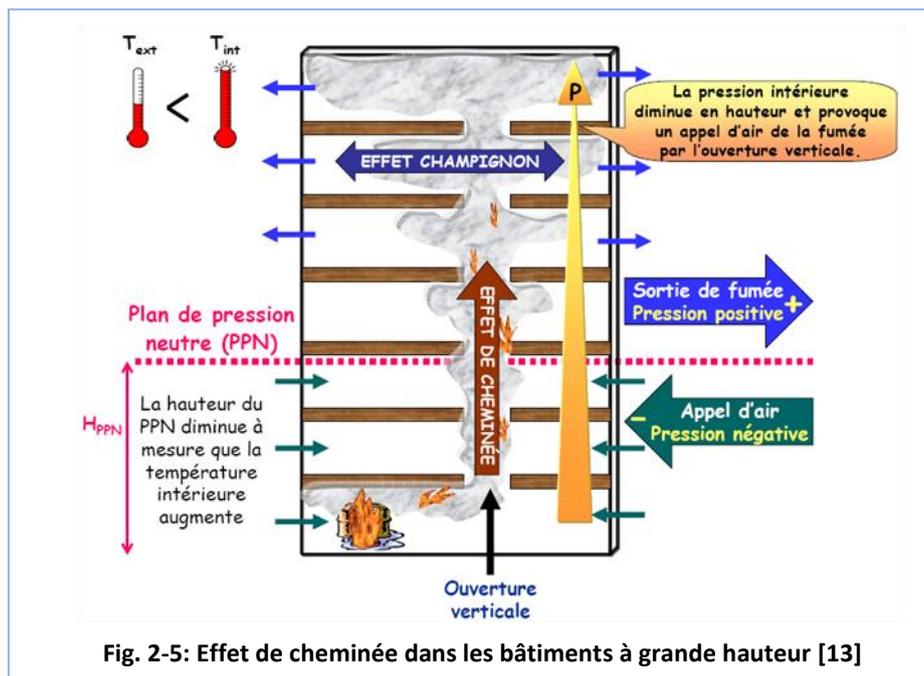
#### **2.4.3- Effet de cheminée:**

Lorsqu'un incendie prend naissance aux niveaux inférieurs d'un bâtiment de grande hauteur (BGH), la fumée a tendance à se propager rapidement vers les étages supérieurs par les ouvertures verticales telles que les cages d'escaliers et les puits de lumière. Il s'agit de l'une des forces majeures qui conduisent les fumées dans les incendies en bâtiments: l'effet de cheminée (Stack effect), en effet l'air se réchauffe et devient moins dense à cause de la chaleur dégagée par la combustion, par suite, des forces de flottabilité conséquentes se génèrent et conduisent ainsi l'air contenant les fumées à remonter par les cages d'escaliers, les ascenseurs et les puits de lumière.

Dans la plupart des incendies la différence de pression due à l'effet de cheminée est plus importante que celle causée par les autres effets comme l'expansion des gaz de combustion, et

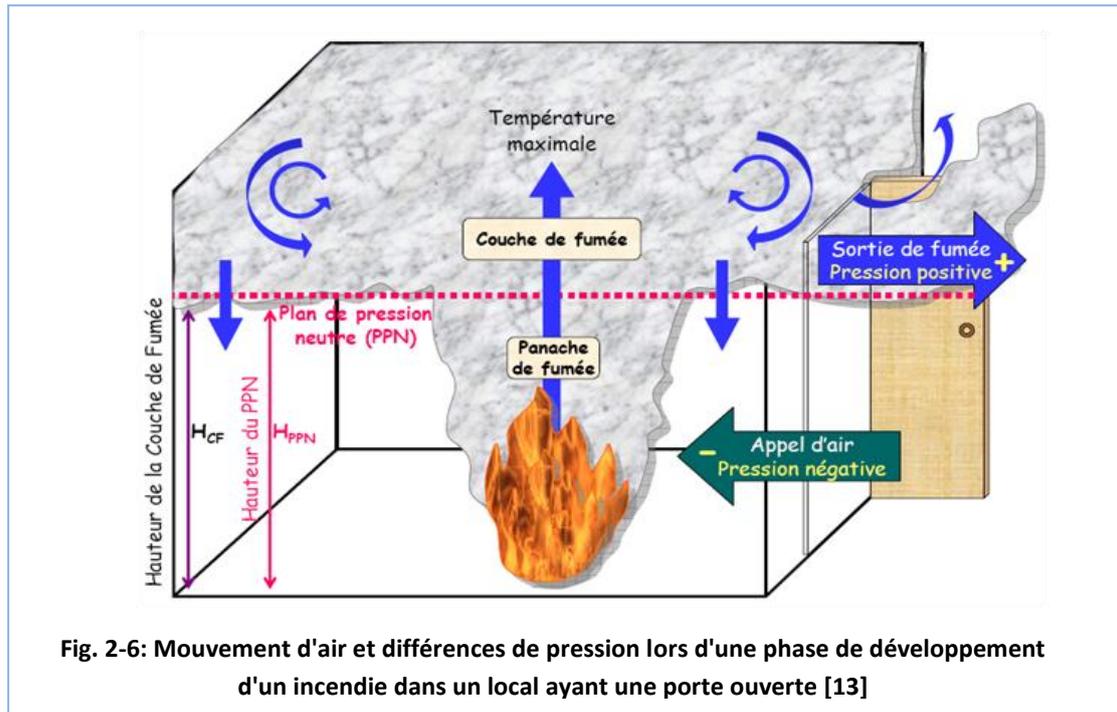
l'effet du vent. Dès que l'effet de cheminée se manifeste, la fumée produite dans un bâtiment remonte à travers les cages d'escaliers et les ascenseurs. L'effet de cheminée devient ainsi un phénomène important que les concepteurs des systèmes de contrôle des fumées doivent absolument en tenir compte.

Dans les stations de métro, l'effet de cheminée joue un rôle significatif dans le contrôle des fumées dans la station de métro, 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 [12].



#### 2.4.4- La surpression causée par le feu:

Dans un incendie, la fumée s'accumule au plafond pour former une couche de fumée et créer une hausse de pression, cette surpression en hauteur engendre une baisse de pression au niveau du sol, créant ainsi un mouvement d'air qui est aspiré, en milieu fermé, à travers les ouvertures à des niveaux inférieurs, comme le bas des portes, les fenêtres et les pertes d'étanchéité d'un bâtiment. On appelle ce mouvement d'aspiration d'air frais un appel d'air. Lorsqu'un équilibre de pression est atteint, c'est-à-dire lorsqu'il y a autant de fumée qui quitte la pièce que d'air frais entre, le niveau de la couche de fumée se stabilise.



## 2.5- 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.

### 2.5.1- Facteurs contrôlant le taux de dégagement de chaleur:

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 fonction du temps.

Le taux de masse perdue est la quantité de matière ayant été vaporisée et brûlée, il est exprimé en kg/s, mais peut quelque fois être exprimé par unité de surface (kg/m<sup>2</sup>.s), il est lié au taux de dégagement de chaleur par la relation:

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{q}''}{\Delta H_g}$$

Avec:

$\dot{q}''$ : Flux de chaleur de la flamme

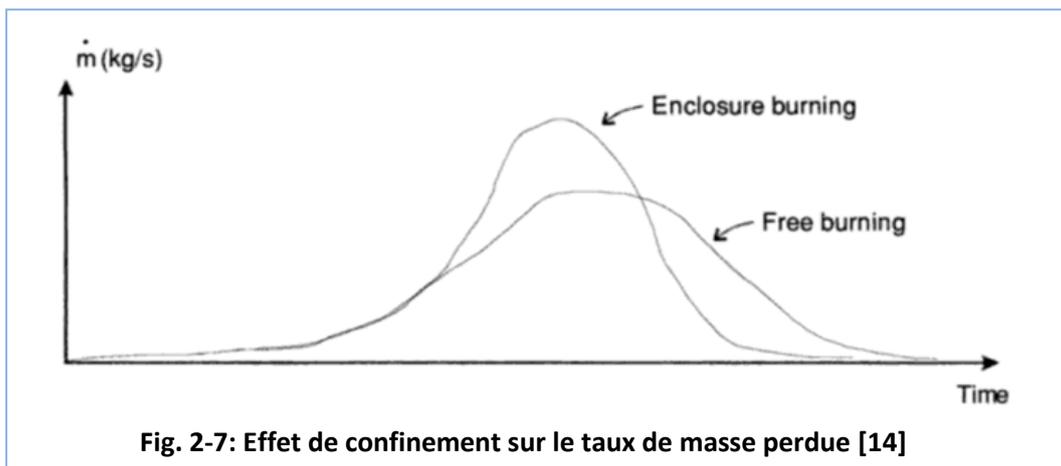
$\Delta H_g$ : Chaleur de gazéification

### 2.5.2- Effets de confinement:

Deux facteurs principaux influencent le HRR d'un incendie en milieu confiné:

Premièrement, les gaz chauds se mettent sous le plafond et chauffent ainsi le plafond et les murs. Ces surfaces et la couche de gaz chauds transmettent leurs chaleur à la surface du combustible par rayonnement ce qui augmente le HRR par augmentation de la fraction de combustible brûlée.

Deuxièmement, le confinement réduit la disponibilité en oxygène nécessaire à la combustion. Cette réduction a pour conséquence la diminution de la quantité de combustible brûlée suite à une réduction du taux de dégagement de chaleur et une augmentation de la concentration des gaz imbrûlés.



### 2.5.3- Incendies de dimensionnement:

Selon qu'un incendie se déclare dans une voiture ou un grand camion, son taux de dégagement de chaleur varie. Afin de contourner l'incertitude sur les puissances, la réglementation définit des incendies de dimensionnement. Afin de tester le niveau de sécurité d'une ouvrage des incendies violents sont pris en compte.

Le tableau 2-1 donne quelques puissances thermiques utilisées pour le dimensionnement [15]:

**Tableau 2-1: Incendies de dimensionnement**

<i>Type de véhicule</i>	<i>HRR en MW</i>
Véhicule léger	5 à 8
Camionnette	10 à 15
Poids lourd sans marchandises dangereuses	30
Poids lourd avec marchandises dangereuses	200

A noter que la puissance du feu retenue pour cette étude est de 15 MW, et qui correspond à un incendie de dimensionnement d'une camionnette.

# Chapitre 3

## Etude Numérique

3.1- Introduction.....	28
3.2- Modèles de transport des fumées.....	30
3.3- Description du code FDS .....	30
3.4- Définition de la configuration retenue pour l'étude .....	35
3.5- Hypothèses générales – Maillage – Critères d'analyse .....	37
3.6- Définition des scénarios.....	38
3.7- Moyens d'analyse des résultats .....	38

### 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 dite 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 instationnaire.
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  $\mu\text{m}$  [16].

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 ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ , 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 [17] 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 [17],[18] :

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 2004, et la version utilisée dans la présente étude est la version 5.

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 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 quelles informations devrait-il enregistrer.

### **3.3.1- Modèles mathématiques présents dans FDS:**

Ci-dessous 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 mus 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-corrrection 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:

$$p(\vec{x}, t) = \bar{p}_m(z, t) + \tilde{p}(\vec{x}, t)$$

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 :

$$\bar{p}_m = \rho T R / \bar{W}$$

La pression  $p$  dans l'équation d'état et l'équation de l'énergie est remplacée par la pression  $\bar{p}_m$  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 40 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 la 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...) [19].

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-correction d'une précision de second ordre. Le maillage est structuré, cartésien et décalé : les variables scalaires sont calculées au centre des mailles tandis que les variables vectorielles sont définies au centre des faces des mailles. Les équations simplifiées du modèle hydrodynamique se résument dans:

- L'équation de conservation de la masse:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \rho = -\rho \vec{\nabla} \cdot \vec{u} \quad (1)$$

- Conservation des espèces:

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \rho Y_i = -\rho Y_i \vec{\nabla} \cdot \vec{u} + \vec{\nabla} \rho D_i \cdot \vec{\nabla} Y_i + \dot{m}_i''' \quad (2)$$

- Conservation de la quantité de mouvement:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \times \vec{\omega} + \vec{\nabla} H = \frac{1}{\rho} [(\rho - \rho_0) \vec{g} + \vec{f}_b + \nabla \cdot \tau_{ij}] \quad (3)$$

- Equation de Poisson sur la pression:

$$\nabla^2 H = -\frac{\partial(\vec{\nabla} \cdot \vec{u})}{\partial t} - \nabla \vec{F} \cdot \vec{F} = \vec{u} \times \vec{\omega} - [(\rho - \rho_m) \vec{g} - \vec{f}_b - \nabla \cdot \tau_{ij}] \quad (4)$$

Equation des gaz parfaits:

$$\bar{p}_m = \rho RT \sum_i \frac{Y_i}{W_i} \quad (5)$$

### 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 décrites 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'autres termes, 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:

$$\dot{m}'' = \frac{f(t) \cdot q_{user}''}{\Delta H_g}$$

L'utilisateur n'introduit dans ce cas que le HRRPUA =  $q_{user}''$  et une fonction en escalier  $f(t)$ . Dans notre étude on considère un feu de puissance constante ( $f(t) = 1$ ) et égale à HRR=15MW.

### 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'impliquent 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 :

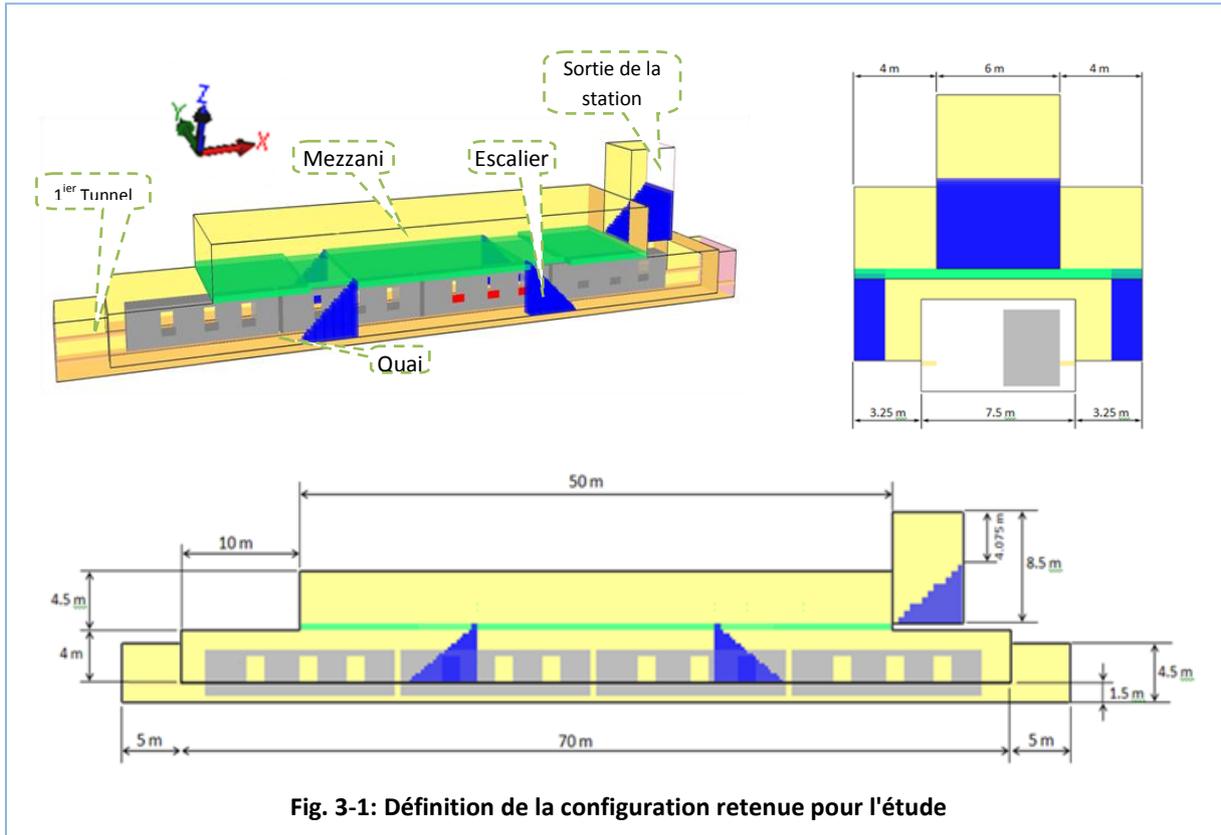
- Hypothèse de l'écoulement à faible vitesse : cette hypothèse rend FDS inapproprié pour modéliser des scénarios impliquant la présence de grandes vitesses qui approchent la

vitesse du son comme c'est le cas dans les explosions, les ondes de choc dans les tuyères et les détonations.

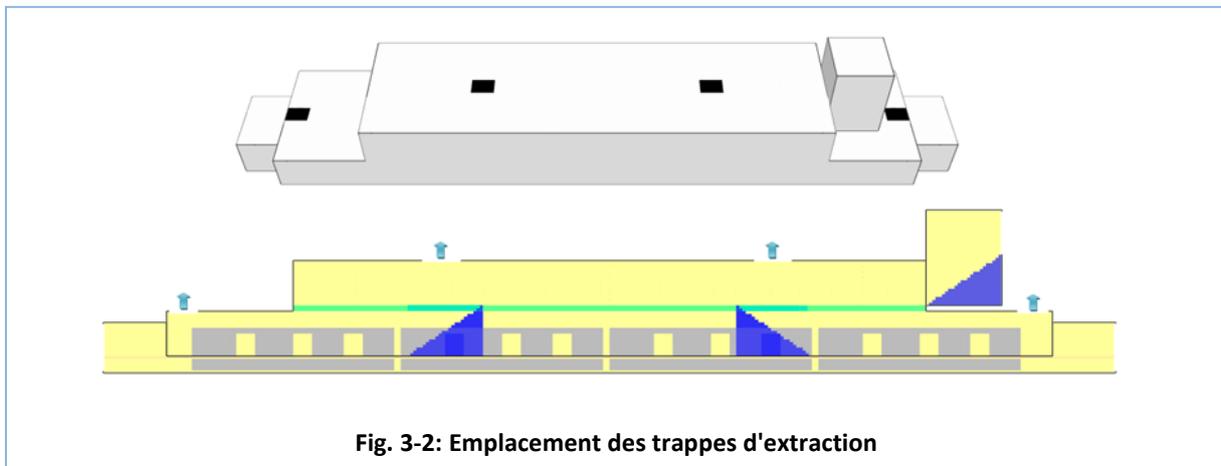
- Géométrie rectiligne : l'efficacité de FDS provient de la simplicité de la grille de résolution numérique et de l'utilisation d'un solveur direct et rapide pour le champ de pression. En contre partie, ceci constitue une limitation dans le cas où la géométrie n'est pas conforme avec le maillage rectangulaire.
- 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.3-1) nous a été assignée par la société *FluidAlp*. Il s'agit d'une station à deux niveaux: le niveau des quais et le niveau de la mezzanine. Les quais ont une longueur de 70 m, de largeur et d'une hauteur de 4 m. Les deux Tunnels ont une section transversale de  $33,75 \text{ m}^2$  (7.5 m x 4.5 m). Les seules voies de communication entre les deux niveaux sont les trémies des escaliers qui sont de quatre, et qui ont une longueur de 5 m et d'une largeur de 1.5m chacun. La mezzanine a les dimensions 50m x 14m x 4.5m. La sortie de la station est en forme de carré de  $24.45 \text{ m}^2$  (6 m x 4.075 m). Sur le quai gauche un train composé de 4 wagons de 16m chacun est garé. Les wagons ont une largeur de 2.75 m et une hauteur en dessus des quais de 2.5 m.



Le désenfumage de la station en cas d'incendie consiste à assurer la ventilation la plus adéquate pour assurer l'évacuation des fumées chaudes et toxiques. Pour cela, quatre trappes d'extractions sont placées dans la station (voir Fig. 3-2), deux au niveau des quais et deux au niveau de la mezzanine. Les quatre trappes ont une surface de  $5 \text{ m}^2$  ( $2.5 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ).



### 3.5- Hypothèses générales – Maillage:

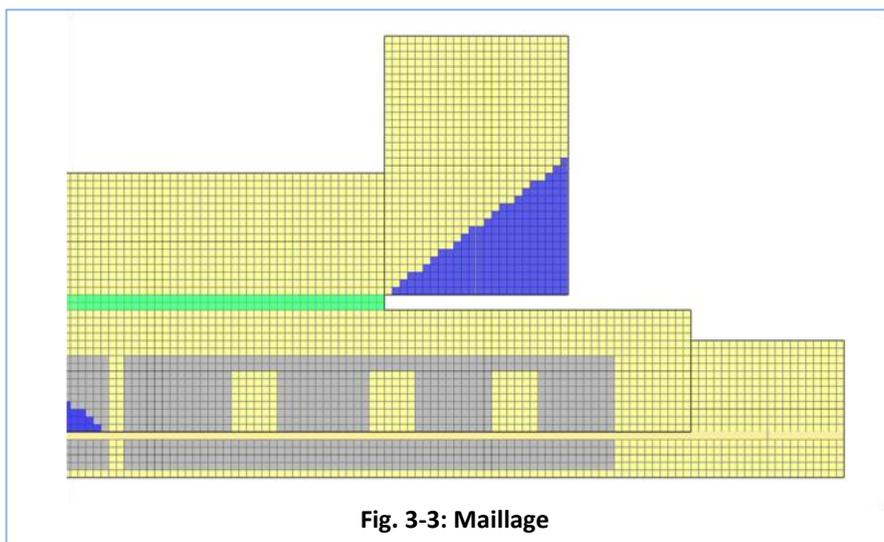
Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons au transport des fumées chaudes issues d'un éventuel incendie qui se déclare dans l'un des 4 wagons du train garé à proximité de l'un des deux quais. Dans ce cas la puissance du feu HRR est imposée et non pas recherchée. Dans tout ce qui suit, on suppose une puissance de 15MW répartie uniformément sur la surface intérieure (sol) du wagon en feu, ce qui fait un HRRPUA ou puissance surfacique de 341kW/m<sup>2</sup>.

Un autre paramètre qui sera fixé pour toutes les simulations est le débit d'extraction par les trappes du niveau des quais. Les extracteurs sont supposés fonctionnant en pleine puissance et le débit est fixé à 50 m<sup>3</sup>/s pour chacune des deux trappes.

Le transfert de chaleur n'est supposé que convectif, la résolution de l'équation des transferts radiatifs est désactivée. Cette hypothèse est bien justifiée par la présence de grands débits, soit de soufflage soit d'extraction, qui font que la chaleur est transportée quasi-intégralement par convection.

La discrétisation de géométrie est faite avec un maillage rectangulaire: la géométrie est divisée en petits cubes de 25 cm<sup>3</sup> (25 cm x25 cm x25 cm), ce qui nous fait 521564 cellules.

Les conditions aux limites on imposées sont les suivantes: sur la face de sortie une condition de type OPEN, et sur les tunnels et les trappes d'extraction des quais on imposera des débits en fonction de la stratégie de ventilation testée.

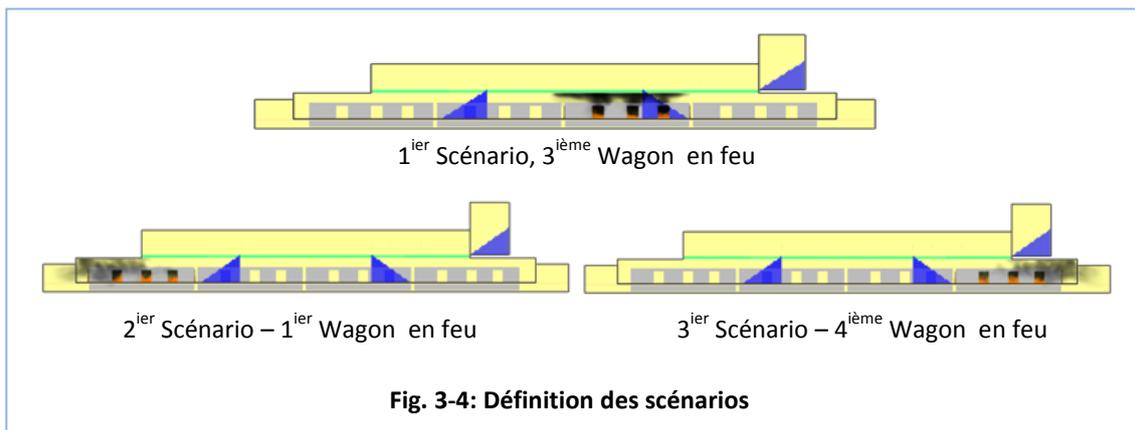


### 3.6- Définition des scénarios:

Trois scénarios seront considérés en fonction de la position du feu:

Dans le premier scénario le feu se situe dans l'un des wagons du milieu (le cas du 3<sup>ème</sup> wagon est traité) dans ce cas le feu se situe entre les escaliers et conduira à des imprévisibilités sur les écoulements mis en jeu, et ce scénario sera traité en détail car il représente le cas le plus critique. En effet les voies d'évacuation qui sont à priori les escaliers seuls, se trouveront rapidement bloquées par les fumées chaudes qui ont tendance à se stratifier sous le plafond. Dans ce cas la stratégie de ventilation la plus appropriée sera recherchée.

Dans le deuxième et le troisième scénario, une ventilation appropriée pour chacun des deux cas sera testée. En effet dans ce cas l'incendie est moins dangereux et le contrôle des fumées est plus facile.



Pour chacun des scénarios, on testera plusieurs débits de soufflage et/ou d'extraction par les tunnels, afin de rechercher la stratégie de ventilation optimale pour chacun d'eux.

### 3.7- Moyens d'analyse des résultats:

La variable sur laquelle l'analyse des résultats sera basée est la température, pour cela des coupes (*slices*) qui montrent la distribution de la température à différents niveaux sont effectuées, cela concerne principalement des plans se situant à une hauteur de 1.5 m du sol pour les deux niveaux de la station.

Un autre moyen de suivi de la température qui est mis en service, consiste à l'emplacement de prises de mesure à des endroits pertinents à l'égard de la sécurité des personnes (voir Fig.3-5). Ces points de mesure enregistrent la variation de la température en ces points du début jusqu'à la fin de la simulation. Au niveau des quais 13 points de mesures distants de 5 m entre eux sont placés à une hauteur de 1.5 m du sol, au milieu de chaque quai. Au niveau de la mezzanine 25 points de mesures sont réparties, aussi à une hauteur de 1.5 m, comme le montre la figure ci-dessous. Cette répartition a été choisie sur la base des chemins naturels que prennent les évacués en remontant les escaliers et en se dirigeant vers la sortie.

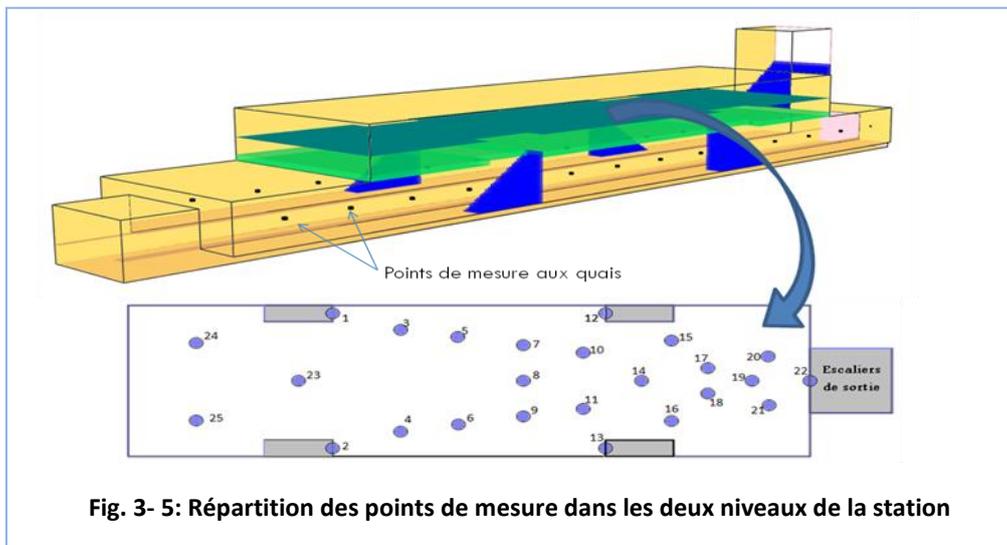


Fig. 3- 5: Répartition des points de mesure dans les deux niveaux de la station

### Correspondance Débits-Vitesses:

Les différentes stratégies de désenfumage qui seront testées, seront définies sur la base des débits imposés par les trappes et les tunnels. Le tableau 3-1 permet de faire l'analogie avec les vitesses.

Tableau 3-1: Correspondance Débits / Vitesses pour les différentes ouvertures de la station

Tunnels		Trappes		Sortie de la station	
Débits en m <sup>3</sup> /s	Vitesse en m/s	Débits en m <sup>3</sup> /s	Vitesse en m/s	Débits en m <sup>3</sup> /s	Vitesse en m/s
34	1	10	2	10	0.4
68	2	20	4	50	2
102	3	30	6	100	4.1
136	4	40	8	200	8.2
170	5	50	10	400	16.4

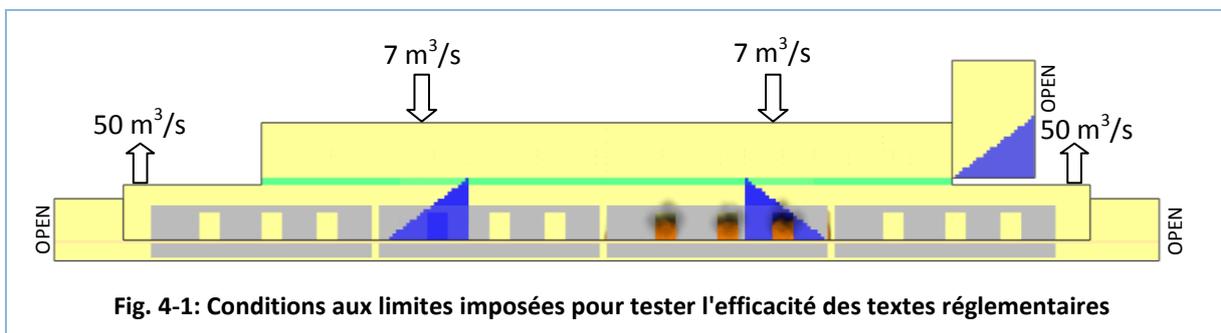
# Chapitre 4

## Résultats et Interprétations

4.1- Résultats de l'application des prescriptions de la réglementation .....	40
4.2- Présentation et analyse des résultats du 1er scénario .....	42
4.3- Présentation et analyse des résultats du 2ième et du 3ième scénario.....	60
4.4- Solution avec écrans de cantonnement .....	64

### 4.1- Résultats de l'application des prescriptions de la réglementation en vigueur:

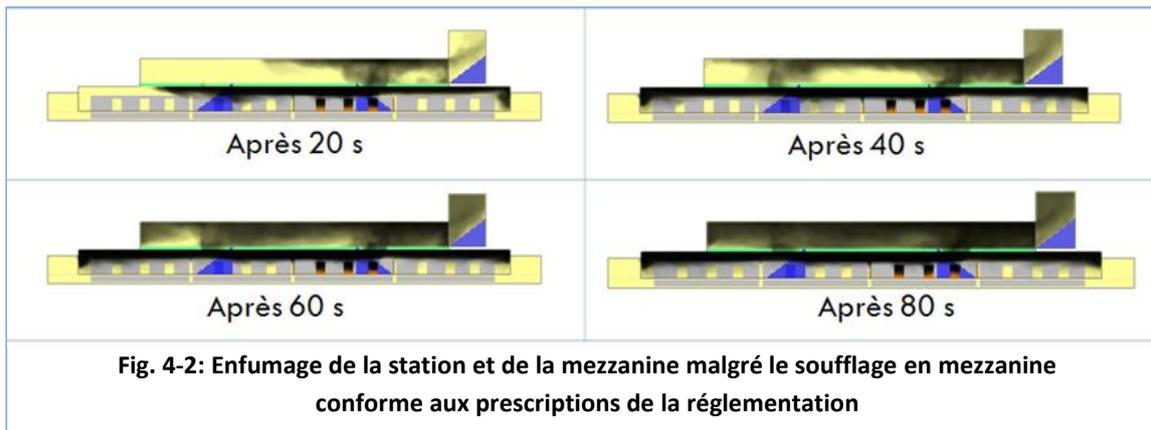
Afin de tester l'efficacité des mesures réglementaires, à savoir le soufflage au niveau des volumes protégés, un soufflage par les bouches d'aération placés au plafond de la mezzanine est mis en œuvre. Le débit choisi ( $2 \times 7 \text{ m}^3/\text{s}$ ) est légèrement supérieur à la valeur minimale prescrite par la réglementation et qui correspond à un débit de renouvellement d'air de 15 volume par heure.



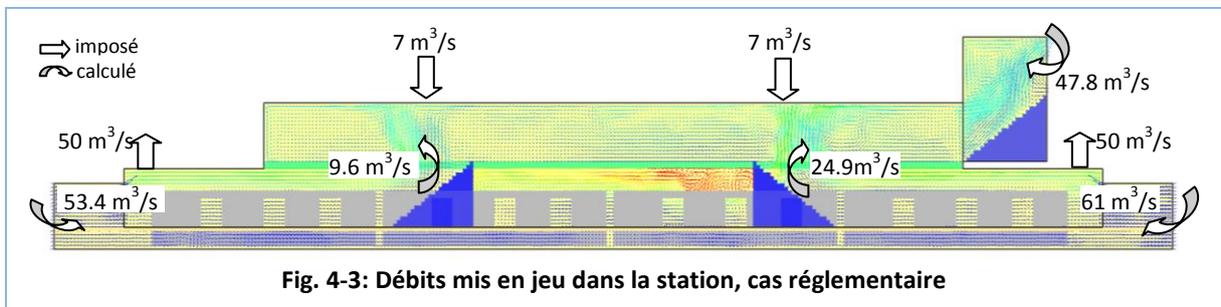
Le feu est supposé avoir lieu dans le troisième wagon, ce scénario est parmi les plus critiques comme il sera mis en évidence. L'extraction au niveau des quais est maintenue à  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  par

chacune des deux trappes, et la condition aux limites imposée sur les tunnels est la condition OPEN.

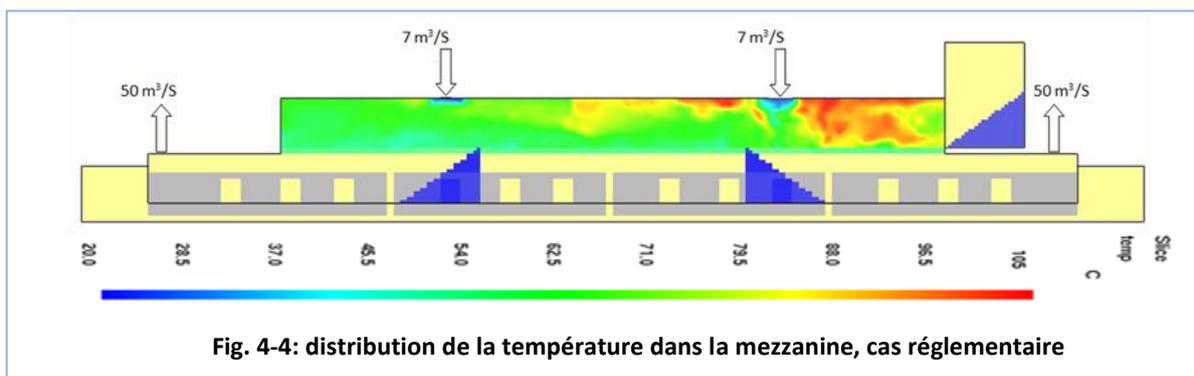
Les résultats de simulation montrent que le soufflage pratiqué dans le niveau supérieur ne peut empêcher la remontée des fumées, et qu'il crée en l'occurrence des niveaux de turbulence incompatibles avec le développement de la stratification naturelle des fumées. Ainsi, la mezzanine se trouve rapidement envahi des fumées toxiques et opaques (Fig. 4-2).



Les différents débits mis en jeu dans la station sont représentés ci-après:



Suite à l'envahissement de la mezzanine par les fumées la température y atteint des niveaux insupportables qui dépassent  $70^\circ\text{C}$  et atteignent les  $100^\circ\text{C}$  (voir Fig. 4-4).



*Conclusion: Les résultats présentés ci-dessus attestent que le soufflage dans le niveau supérieur ne dispose pas de l'efficacité escomptée par la réglementation. D'où la nécessité de la recherche des meilleures stratégies de désenfumage qui nous permettraient d'assurer la sécurité des personnes lors des opérations d'évacuation et de sauvetage.*

## 4.2- Présentation et analyse des résultats du 1<sup>ier</sup> scénario (feu dans le 3<sup>ième</sup> wagon):

Dans ce cas le feu est supposé être au niveau du troisième wagon. Trois stratégies distinctes de ventilation seront testées afin de retrouver celle qui serait l'optimale. Ces trois stratégies sont les suivantes:

- Par soufflage d'air par les tunnels: dans cette configuration on procède à un soufflage mécanique d'air par les deux tunnels, avec le même débit. Une large gamme de débits sera testée ( $17 \text{ m}^3/\text{s} - 34 \text{ m}^3/\text{s} - 51 \text{ m}^3/\text{s} - 68 \text{ m}^3/\text{s}$ ). A noter qu'un débit de  $34 \text{ m}^3/\text{s}$  correspond pratiquement à une vitesse de  $1\text{m/s}$  au niveau des entrées des tunnels.  
Un autre paramètre qu'on a testé son impact est le débit d'extraction par les trappes de la mezzanine ( $10 \text{ m}^3/\text{s} - 20 \text{ m}^3/\text{s} - 30 \text{ m}^3/\text{s} - 40 \text{ m}^3/\text{s} - 50 \text{ m}^3/\text{s}$ ).



Fig. 4-5.a: 1<sup>ier</sup> scénario, Soufflage par les tunnels

- Par extraction par les tunnels: Dans cette configuration on procède à une extraction par les deux tunnels, avec un même débit. La gamme des débits testée est ( $17 \text{ m}^3/\text{s} - 34 \text{ m}^3/\text{s} - 51 \text{ m}^3/\text{s} - 68 \text{ m}^3/\text{s} - 85 \text{ m}^3/\text{s} - 102 \text{ m}^3/\text{s} - 136 \text{ m}^3/\text{s} - 170 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ce qui correspond à une vitesse au niveau des tunnels allant de  $0.5 \text{ m/s}$  à  $5 \text{ m/s}$ . l'effet de la variation du débit d'extraction par les trappes de la mezzanine sera aussi examiné.



Fig. 4-5.b: 1<sup>ier</sup> scénario, Extraction par les tunnels

- Par ventilation antisymétrique par les tunnels: Dans cette configuration on souffle par l'un des deux tunnels et on extrait par l'autre, et ce avec différents débits ( $34 \text{ m}^3/\text{s} - 68 \text{ m}^3/\text{s} - 102 \text{ m}^3/\text{s} - 136 \text{ m}^3/\text{s}$ ) par chacun des deux tunnels.



Fig. 4-5.c: 1<sup>er</sup> scénario, Ventilation antisymétrique par les tunnels

## 4.2.1- Cas de soufflage par les tunnels:

### 4.2.1.1- Effet du soufflage:

*Nota: les résultats présentés ici correspondent à un débit d'extraction de 20 m<sup>3</sup>/s par les trappes de la mezzanine.*

Les visualisations par Smokeview (Fig.4-6) des résultats des simulations pour le cas de soufflage par les tunnels montrent l'enfumage de la mezzanine par les trémies de droite (en voisinage du feu) dans le cas des faibles débits de soufflage, et par les quatre trémies dans le cas des grands débits.

La fumée qui remonte en mezzanine se trouve perturbée par le courant d'air issu de la sortie de la station à droite et par l'obstacle que forme le mur du fond à gauche. Dans le cas des faibles débits de soufflage, la masse d'air chaud qui remonte par les trémies de droite est poussée vers la gauche par l'air frais qui entre par la l'entrée de la station, ainsi, la température dans le côté gauche augmente en premier. Par contre dans le cas des grands débits, et comme la fumée parvient à sortir de la station (Fig. 4-7), la température augmente dans tout l'espace de la mezzanine en même temps.

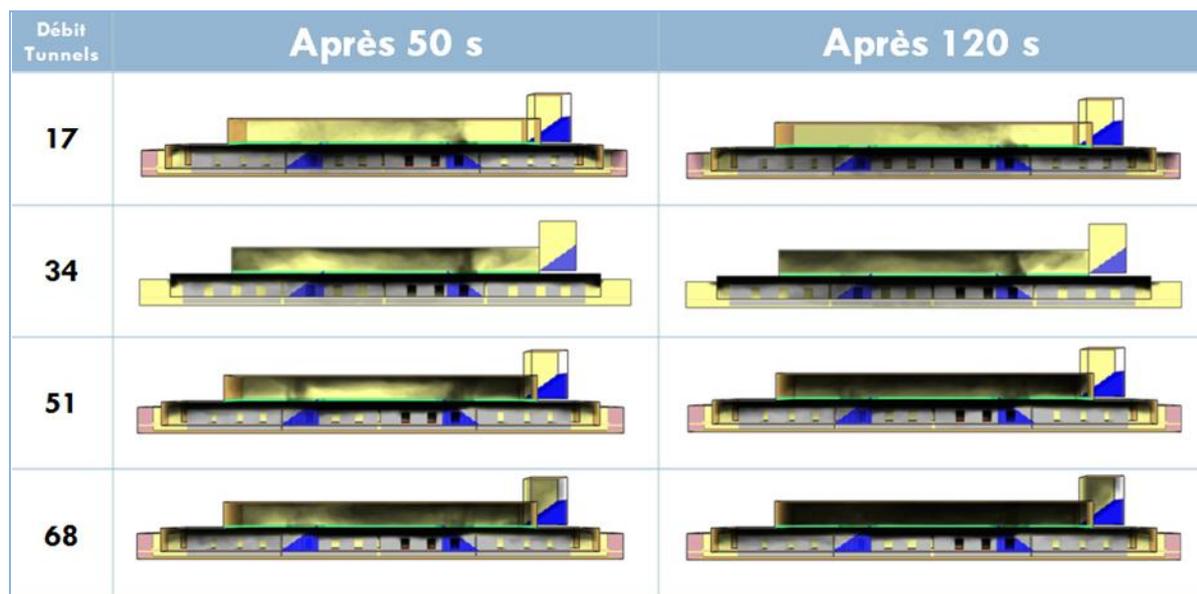


Fig. 4-6: 1<sup>er</sup> scénario, Enfumage de la station en cas de soufflage par les tunnels

On remarque aussi que l'augmentation du débit de soufflage joue le rôle du confinement au niveau des quais, et qu'en l'augmentant la couche de fumée est plaquée contre le plafond à ce niveau.

**Nota:** l'instant choisi pour les visualisations, à savoir celui après 120s de simulation est représentatif des conditions du régime établi, en effet pour une durée supérieure à 120s les conditions d'enfumage et de température varient très peu.

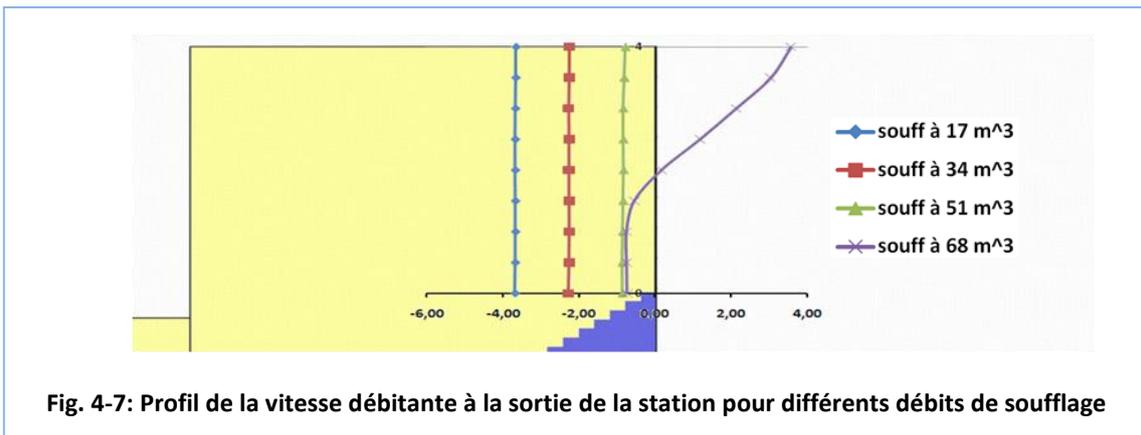


Fig. 4-7: Profil de la vitesse débitante à la sortie de la station pour différents débits de soufflage

La figure 4-8 ci-dessous illustre les débits mis en jeu dans la station. On remarque que pour les faibles débits de soufflage, la fumée ne remonte que par les escaliers de droites qui sont les plus proches au feu, et qu'il y a dans ce cas un courant d'air frais qui descend par les escaliers de gauches. Malgré que l'on extrait  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  et qu'on ne souffle que  $68 \text{ m}^3/\text{s}$ , la répartition des débits qui viennent vérifier l'équation de la conservation de la masse n'est pas égale. Ici on remarque que les forces de flottabilité prédominent au voisinage du wagon en feu.

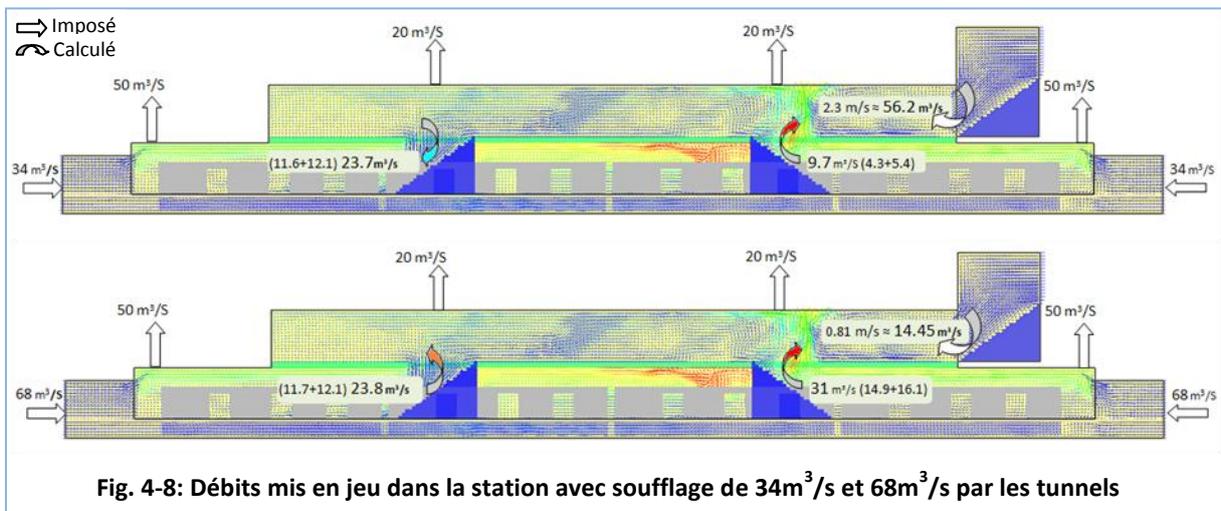


Fig. 4-8: Débits mis en jeu dans la station avec soufflage de  $34 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $68 \text{ m}^3/\text{s}$  par les tunnels

Les résultats des enregistrements des points de mesure montrent que l'augmentation des débits de soufflage par les tunnels augmente la température au niveau de la mezzanine et la diminue au niveau des quais. Les meilleures conditions dans ce cas sont enregistrées pour des débits relativement faibles. A noter que les niveaux de température deviennent déplorables dans la mezzanine pour les cas des grands débits de soufflage.

Le tableau 4-1 ci-dessous montre la variation de la température moyenne au niveau des quais et dans la mezzanine à une hauteur de 1.5 m du sol, la valeur de la température maximale enregistrée dans les deux niveaux sur les points de mesure, ainsi que le pourcentage des points de mesures qui enregistrent des températures supérieures à 40°C, et ce, pour différents débits de soufflage par les tunnels, et pour une extraction de 20 m<sup>3</sup>/s par chacune des deux trappes de la mezzanine.

Tableau 4-1: Relevées de température des points de mesure – 1<sup>er</sup> Scénario, Soufflage par les tunnels

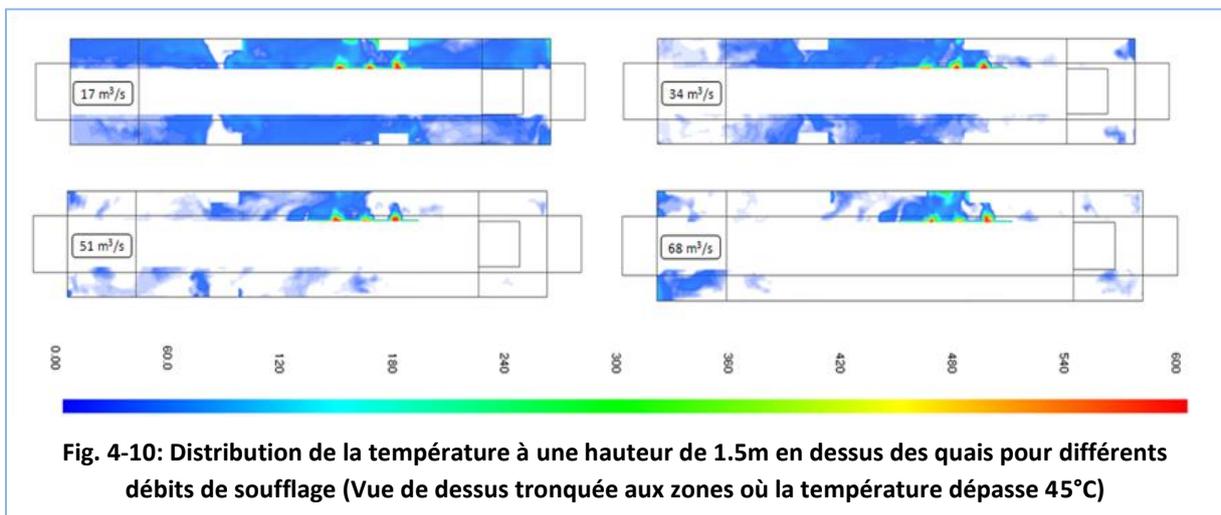
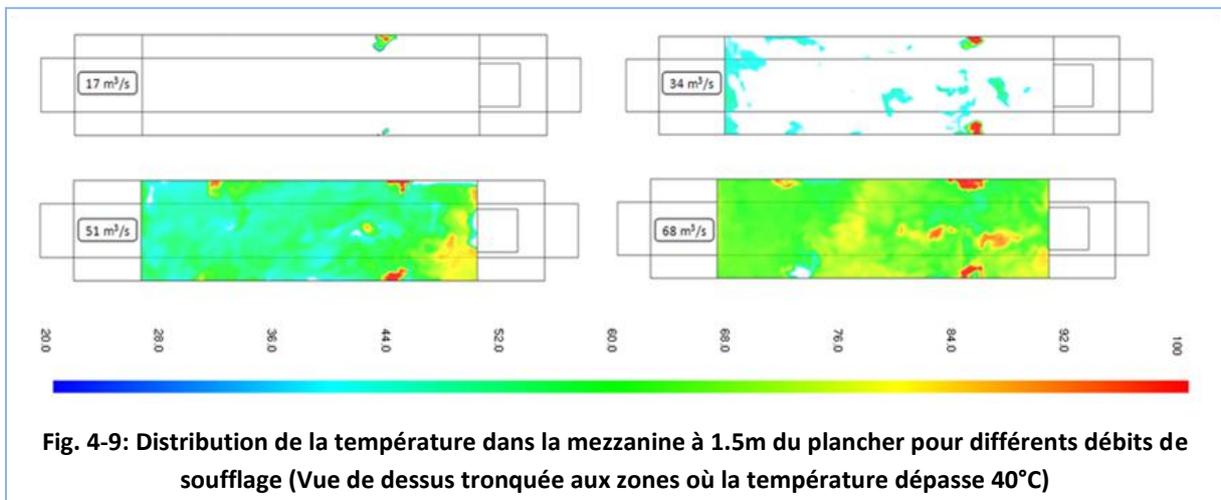
Tunnels en souff	Débits (m <sup>3</sup> /s)		Températures (°C)				% des points de mesure dépassant	
			moyennes		Maxima sur les thermocouples		% Mezz > 40	% Quai > 40
	Tunnels		Mezzanine	Quais	Mezzanine	Quais		
	17	17	23,4	54,01	36,18	77,77	0	88,74
	34	34	32,28	41,57	39,99	59,32	0	46,15
	51	51	50,05	34,12	78,01	57,1	96	11,54
	68	68	63,45	34,51	79,97	63,44	100	3,85

On remarque que bien que la sécurité au niveau des quai est privilégiée par l'augmentation du débit de soufflage par les tunnels, et que l'inverse est pour la mezzanine. En effet, la température dans la mezzanine et diminue aux quais avec l'augmentation du débit de soufflage, et de même, le nombre de points de mesure qui dépassent 40°C varie dans le même sens avec 0% dans la mezzanine pour les faibles débits et 100 pour les grands débits. Au niveau des quais c'est l'inverse on n'a que 4% des points de mesures qui dépassent 40°C pour les grands débits de soufflage, par contre on trouve plus de 88% des prises de température à ce niveau enregistrer des températures qui dépassent 40°C.

Les contours de température à des plans qui se situent à 1.5 m du sol dans les deux niveaux (Fig. 4-9 et Fig. 4-10) montrent bien cet effet d'augmentation du débit de soufflage. On remarque que les zones où la température est maximale dans la mezzanine se situent au niveau des trémies des escaliers, car c'est par là où la fumée et l'air chaud remontent à ce

niveau. Par contre, au niveau des quais on constate un maximum de température à proximité du wagon en feu.

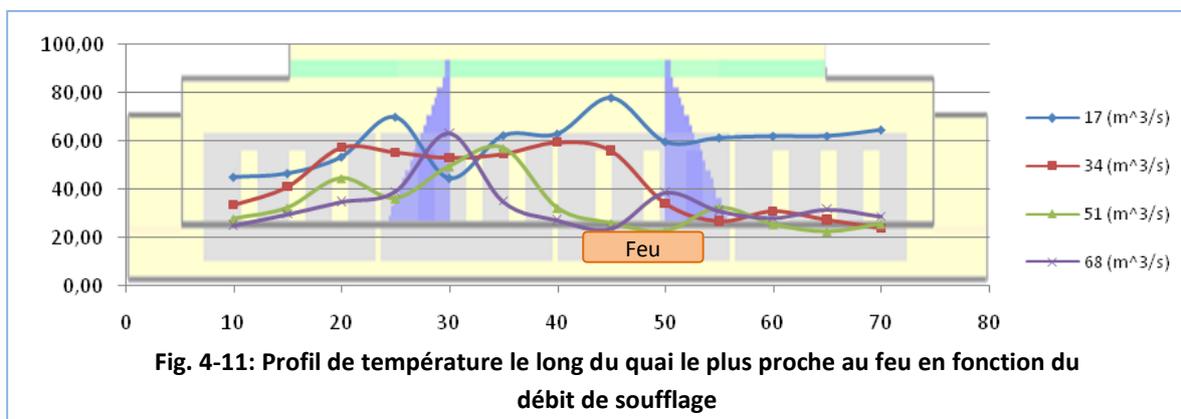
Les contours suivants sont pris pour le même instant (250 s de simulation, régime établi) pour permettre une comparaison entre les différents cas avec les différents débits. A noter que les contours de mezzanine sont tronqués aux zones où la température est supérieure à 40°C et dans le niveau des quai sont tronqués aux zones où la température dépasse 45°C, cela implique que les zones non colorés sont des zones sécurisés.



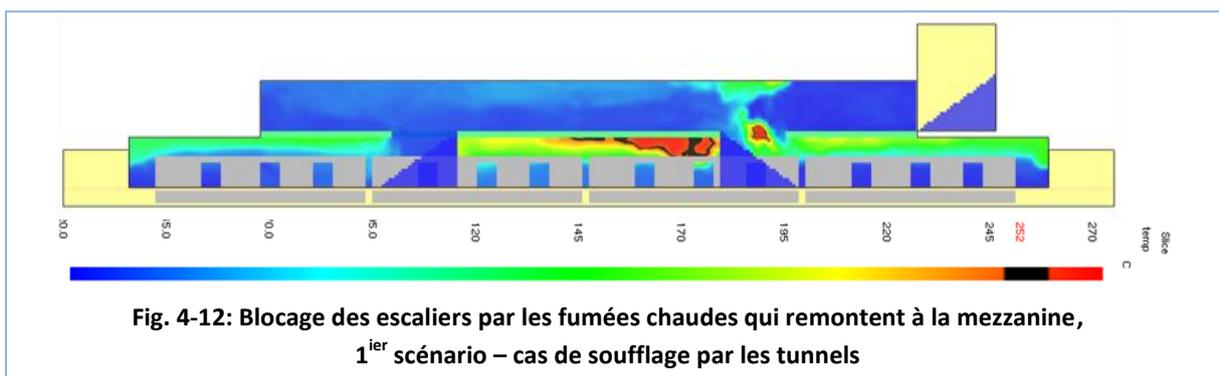
Les figures ci-dessus confirment les résultats présentés dans le tableau, et l'effet de l'augmentation du débit de soufflage y est mieux perceptible. On remarque que la situation devient critique au niveau de la mezzanine pour des débits de soufflage supérieurs à 34 m<sup>3</sup>/s, et que par contre les parties des quais de part et d'autre des escaliers sont sécurisés pour ces

grands débits. Ces zones sécurisées peuvent servir de refuge provisoire pour les passagers, et permettent d'y installer des issus de secours. Au moment où l'espace entre les escaliers reste le plus dangereux avec des températures qui ne peuvent être supportées par les passagers.

La distribution de la température le long du quai à côté duquel le train est garé pour les différents débits de soufflage (Fig. 4-11), tracée sur la base des enregistrements des 13 points de mesure sur ce quai montre que la partie centrale, qui est entre les escaliers, est la partie qui serait exposée aux températures les plus élevées, en dépit de la position du feu qu'elle soit en 3<sup>ème</sup> ou en 4<sup>ème</sup> wagon.



On remarque aussi que la zone de température maximale est déplacée vers la gauche et non pas centrée sur le wagon en feu, ceci est dû à la différence entre les débits qui franchissent les trémies des escaliers.

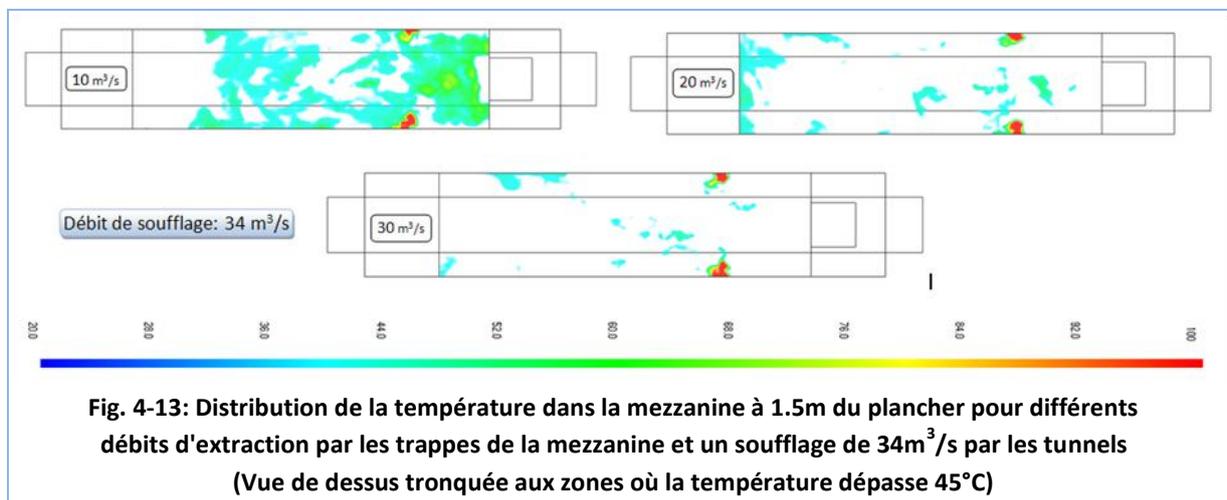


En outre, et malgré que les niveaux de température soient acceptables dans quelques cas (faibles débits), vu la faible étendue des zones chaudes, un grand problème vient se poser pour ces cas où le soufflage par les tunnels est considéré: les escaliers qui sont les seules voies de communication supposées entre les deux niveaux se trouvent bloqués (voir Fig. 4-12) par

les fumées qui sont à des températures très élevées, et l'évacuation des passagers devient plus délicate.

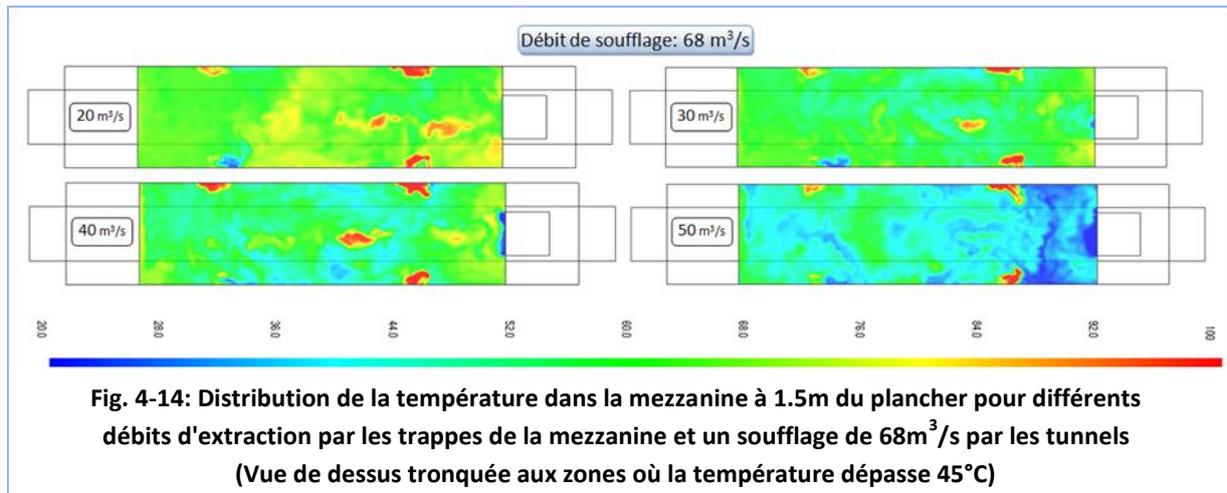
#### 4.2.1.2- Effet de l'extraction par les trappes de la mezzanine:

On constate que le débit d'extraction dans les cas de soufflage par les tunnels contribue considérablement à la diminution du niveau de la température dans la mezzanine (Fig. 4-13). En effet, sans l'extraction par les trappes situées au plafond de la mezzanine les fumées et l'air chaud qui remontent par les escaliers se trouvent piégés à ce niveau, d'où leur accumulation et l'augmentation de la température.



Le débit minimal d'extraction est fonction des débits de soufflage. Dans l'exemple précédent (Fig.4-13) avec 34 m<sup>3</sup>/s de soufflage par les chacun de deux tunnels, on constate que la distribution de la température n'est plus affectée pour des débits d'extraction de supérieurs à 20 m<sup>3</sup>/s par contre dans l'exemple suivant (Fig. 4-13), avec un débit de soufflage de 68 m<sup>3</sup>/s par chacun des deux tunnels, on voit que l'effet de l'augmentation de l'extraction continue jusqu'à la valeur maximale testée qui est de 50 m<sup>3</sup>/s.

A noter que dans les deux cas, les contours présentés sont tous pris après 250 s de simulation, pour permettre la comparaison.



#### 4.2.1.3- Conclusion:

La stratégie de désenfumage par soufflage d'air par les tunnels dans le cas où le feu a lieu entre dans l'un des wagons du milieu aide à assurer la sécurité des personnes au niveau des quais en leur permettant de trouver refuge de part et d'autre des escaliers. Il est recommandé de placer des issues de secours à dans ces zones. A noter que le soufflage permet le maintien d'une couche de fumée bien stratifiée au niveau des quais, ce qui est un résultat généralement recherché. Toutefois, les escaliers qui sont les voies d'évacuation naturels par lesquels les passagers sont descendus et par lesquelles penseraient à fuir se trouveront bloqués par les fumées chaudes qui remontent au niveau supérieur à travers. Ce dernier, dont le souci de le sécuriser était à l'origine de notre étude, voit son niveau de température augmente et par suite sa sécurité baisse rapidement avec l'augmentation du débit de soufflage. D'où la difficulté de maintenir un niveau de sécurité acceptable dans les deux niveaux.

#### 4.2.2- Cas d'extraction par les tunnels:

##### 4.2.2.1- Effet de l'extraction par les tunnels:

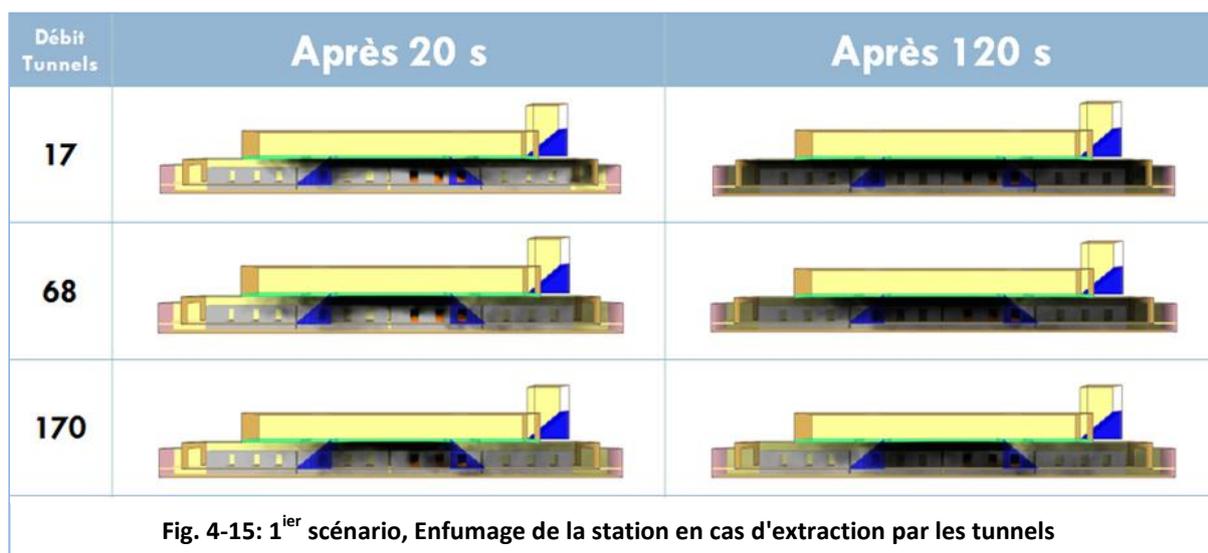
*Nota: les résultats présentés ici correspondent à un débit d'extraction de 20 m<sup>3</sup>/s par les trappes de la mezzanine.*

Les simulations montrent que dans ce cas la dépression créée par les extractions au niveau des quais entraînent des courants d'air qui descendent par les trémies des escaliers. Ainsi la fumée ne remonte pas au niveau supérieur et la température y reste constante et égale à la température ambiante initiale.

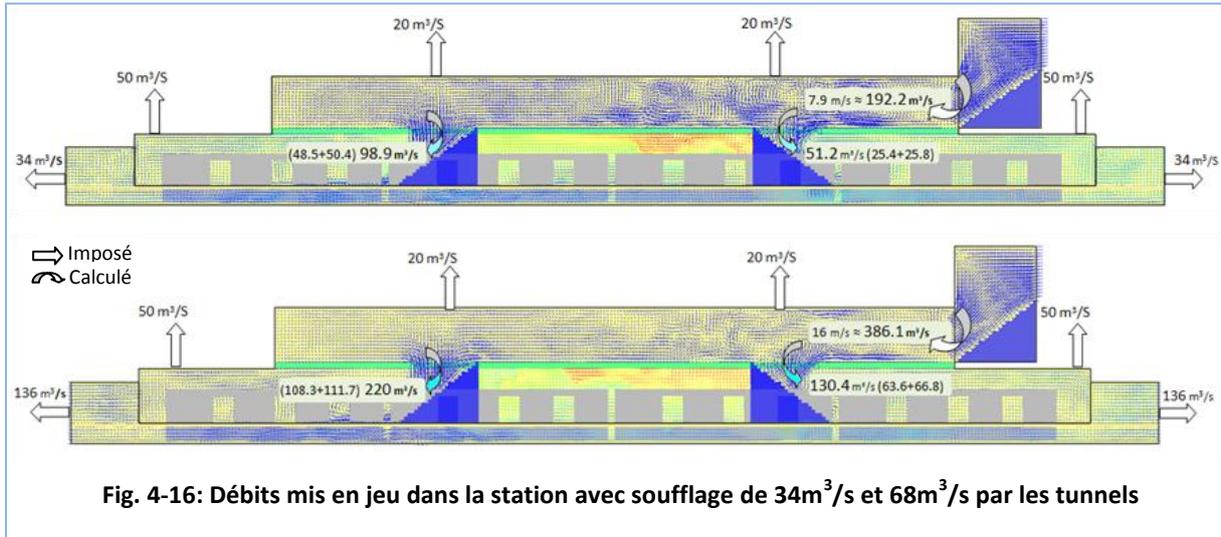
Une large gamme de débits d'extraction est testée ( $17 \text{ m}^3/\text{s}$  –  $34 \text{ m}^3/\text{s}$  –  $51 \text{ m}^3/\text{s}$  –  $68 \text{ m}^3/\text{s}$  –  $85 \text{ m}^3/\text{s}$  –  $102 \text{ m}^3/\text{s}$  –  $136 \text{ m}^3/\text{s}$  –  $170 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Les résultats les plus pertinents sont présentés ci-après.

Les résultats de visualisation (Fig. 4-15) montrent que la fumée qui tend naturellement à se stratifier sous le plafond se trouve rapidement perturbée par le courant d'air qui descend au niveau des quais par les trémies des escaliers (voir après 20 s de simulation dans Fig. 4-15), ceci cause un fort brassage à ce niveau et on se retrouve avec des niveaux de turbulences incompatibles avec le développement de la stratification naturelle.

Ces résultats montrent que la position au plafond des voies de communication entre les deux niveaux est déterminante vis à vis la propagation des fumées et la structure de l'écoulement dans le volume de contrôle en général.



On remarque que pour les faibles débits d'extraction la couche de fumée reste stratifiée dans l'espace entre les escaliers avant qu'elle ne soit perturbée par les courants d'air qui descendent par les quatre trémies. Et que la densité des fumées de part et d'autre des escaliers diminue avec l'augmentation du débit d'extraction. Ceci est dû à la dilution de ces fumées par l'air frais arrivant par les trémies. En effet, Le débit de cet air augmente avec le débit d'extraction. La figure Fig. 4-16 illustre les débits mis en jeu dans la station pour deux cas avec deux débits d'extraction différents ( $34 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $68 \text{ m}^3/\text{s}$ ).



Les enregistrements des 26 points de mesure placés au niveau des quais (voir Tableau 4-2) montrent que l'augmentation des débits d'extraction entraîne la diminution de la température moyenne au niveau des quais, mais cette dernière reste supérieure à 45°C pour la plus grande valeur des débits testés à savoir 170 m<sup>3</sup>/s (5 m/s par les tunnels), avec plus de 34% des points de mesure qui la dépassent et avec un maximum de 116°C.

Le tableau 4-2 donne la température moyenne sur les deux rectangles des quais, à une hauteur de 1.5 m du sol, ainsi que le maximum des enregistrements sur les 26 points de mesures, et le pourcentage de ces points qui enregistrent des températures qui dépassent 40°C et 45°C respectivement.

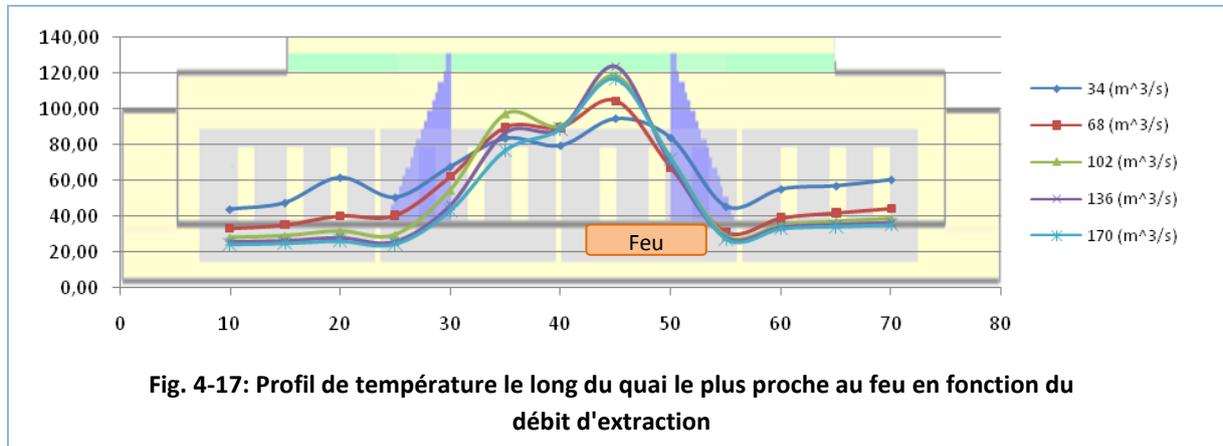
**Tableau 4-2: Relevés de température des points de mesure – 1<sup>er</sup> Scénario, Extraction par les tunnels**

Tunnels en extract.	Débits Tunnels (m3/s)	Températures au Quais (°C)			
		Moyenne	Max thermocouples	% Quais > 40	% Quais > 45
	17	70,49	110,16	100,0	100,0
	34	67,43	105,05	100,0	96,2
	51	60,03	106,63	92,3	80,8
	68	56,85	117,29	80,8	57,7
	85	55,19	125,43	61,5	57,7
	102	53,89	123,64	57,7	53,9
	136	50,44	123,64	50,0	46,2
	170	48,36	116,53	50,0	34,6

Le profil de température le long du quai à côté duquel le train est garé (voir Fig. 4-17) pour les différents débits d'extraction, tracé sur la base des enregistrements des 13 points de mesure sur ce quai montre que la partie centrale, qui est entre les escaliers, est la partie qui serait exposée aux températures les plus élevées et que les parties des quais qui se trouvent de

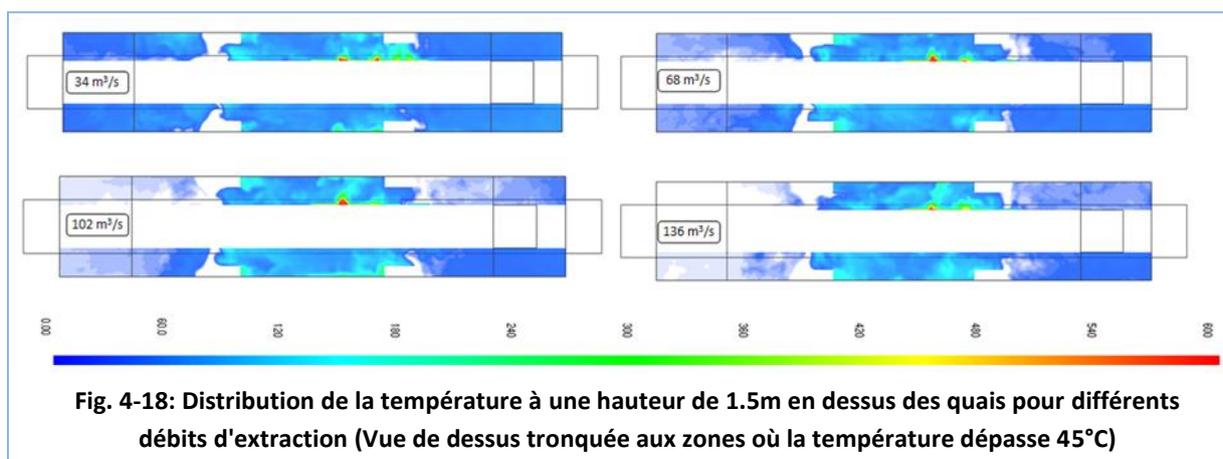
part et d'autre des escaliers constituent des zones qui peuvent être sécurisés en augmentant le débit d'extraction par les tunnels.

On remarque aussi qu'à partir d'un débit de 68 m<sup>3</sup>/s, la variation du profil de température devient de plus en plus minime.



On remarque que les différents profils tendent à se superposer quand le débit d'extraction augmente, tout en laissant la partie centrale la plus difficile à sécuriser et que par contre on trouve que le pic augmente avec l'augmentation de l'extraction, cela veut dire qu'en augmentant le débit d'extraction on augmente plutôt le débit d'air frais qui descend par les trémies et on arrive moins à extraire de la partie centrale.

La distribution de la température aux quais est illustrée par les contours de température de la figure Fig. 4-18, qui sont pris pour le même instant (250 s de simulation, régime établi) pour permettre une comparaison entre les différents cas avec les différents débits.



A noter que ces contours sont tronqués aux zones où la température dépasse 45°C, cela implique que les zones non colorés sont des zones sécurisées.

On remarque, comme avec les profils de température sur le quai, la faible différence entre la distribution de la température pour les différents débits. A noter que les zones sécurisées sont de part et d'autre des escaliers comme dans le cas avec soufflage par les tunnels.

#### 4.2.2.2- Effet de l'extraction par les trappes de la mezzanine:

Initialement la mise en place de trappes d'extraction au niveau de la mezzanine était proposée et leurs positions étaient discutée. En effet deux configurations pour l'emplacement des trappes étaient discutées (celle qui est retenue pour la présente analyse plus une dans laquelle la deuxième trappe était placée en haut du mur de fond) et des simulations ont été faites avec les deux configurations. Les résultats ont montrés qu'il n'y avait aucune différence entre les deux configurations en ce qui concerne les niveaux de température dans la station. Donc il a été conclu que seul le débit d'extraction avait un impact sur le champ de température dans la station, un impact qui a été mis en évidence pour les cas avec soufflage par les tunnels, car dans ces cas il y avait de la fumée qui remontent en mezzanine et qui devrait être évacuée. La question maintenant se pose sur l'utilité de l'extraction au niveau supérieur puisque la fumée reste dans le niveau inférieur et que l'apport d'air frais par les trémies aura lieu avec ou sans extraction en mezzanine.

Pour ces raisons, on a fixé le débit d'extraction par les tunnels à 34 m<sup>3</sup>/s et on a fait varier le débit d'extraction par les trappes de la mezzanine pour (0 m<sup>3</sup>/s – 10 m<sup>3</sup>/s – 20 m<sup>3</sup>/s – 30 m<sup>3</sup>/s).

Les résultats montrent que l'influence de la variation du débit d'extraction par les trappes de la mezzanine est minime, et que par contre à ce qu'on espère, les conditions au niveau des quais (mezzanine à température ambiante) se détériorent légèrement en augmentant cette extraction.

Tableau 4-3: Effet de l'extraction par les trappes de la mezzanine – 1<sup>er</sup> Scénario, Extraction par les tunnels

Débits (m <sup>3</sup> /s)		Températures (°C)			
Débits d'extr. Tunnels	Débit d'extr. Trappes mezz	Moyenne	Max sur pts de mesure	% Quais > 40	% Quais > 45
34	0	63,05	91,81	92,31	92,31
	10	65,56	105,26	96,15	96,15
	20	67,43	105,05	96,15	96,15
	30	68,81	108,69	100	92,31

On conclut qu'il est recommandé d'arrêter l'extraction de la mezzanine dans le cas où l'on opte pour une stratégie de désenfumage par extraction par les tunnels.

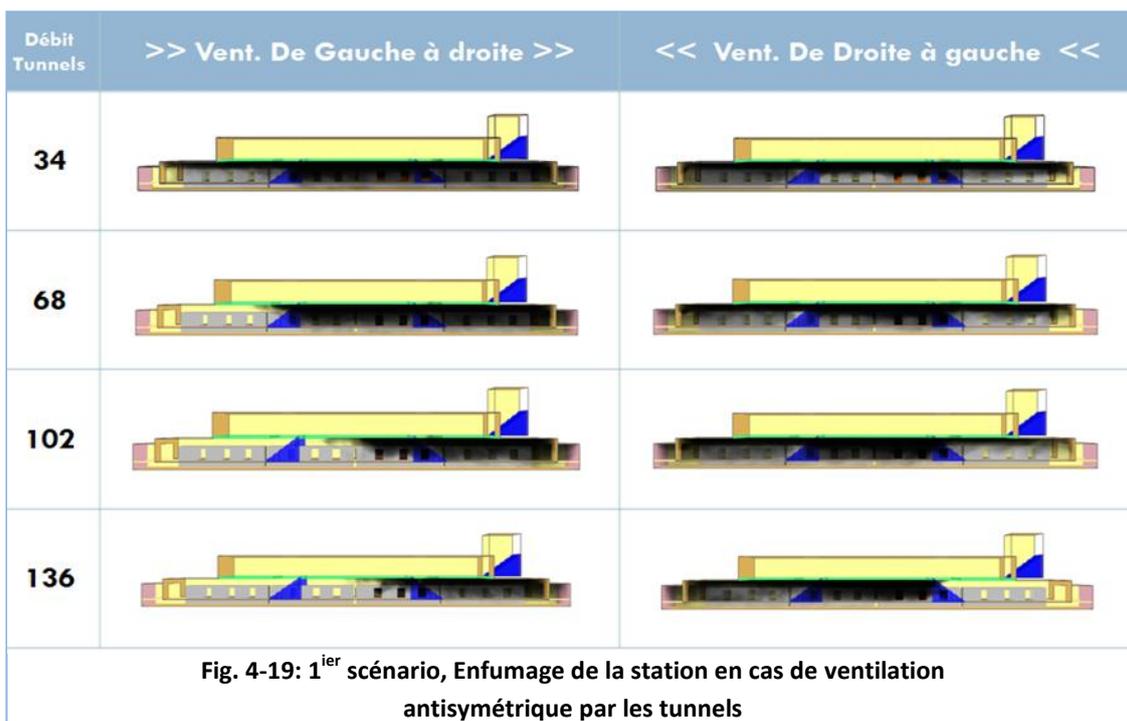
### 4.2.3- Cas avec ventilation antisymétrique par les tunnels:

*Nota: les résultats présentés ici correspondent à un débit d'extraction de 20 m<sup>3</sup>/s par les trappes de la mezzanine.*

Les visualisations de la propagation des fumées dans ces cas (Fig. 4-19) montrent que la fumée ne remonte pas à la mezzanine et montrent l'existence d'un courant d'air qui entre à la station et qui descend par les trémies des escaliers, de ce fait, la température y reste à sa valeur ambiante initiale.

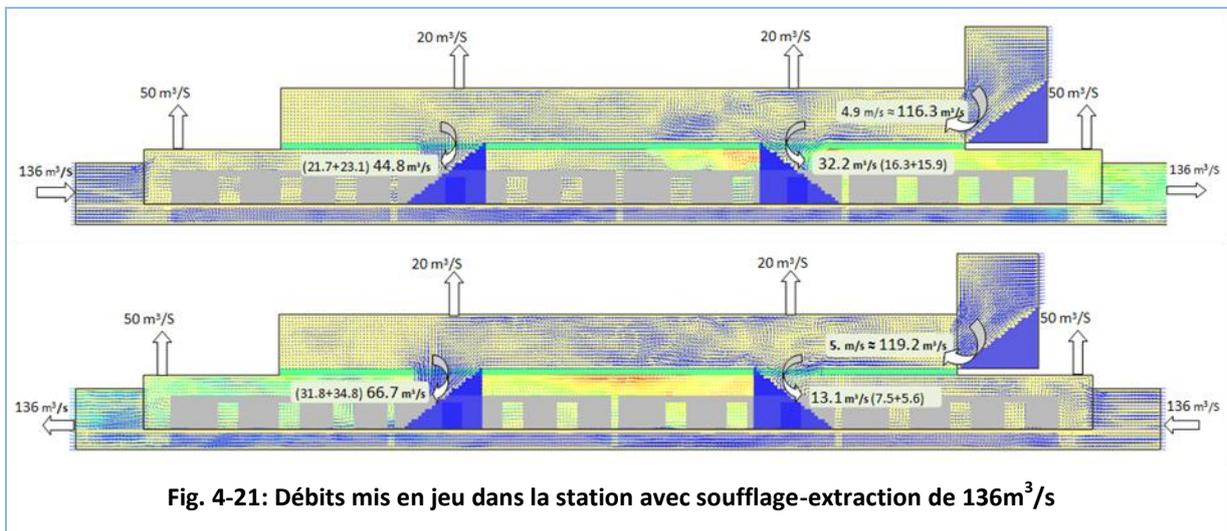
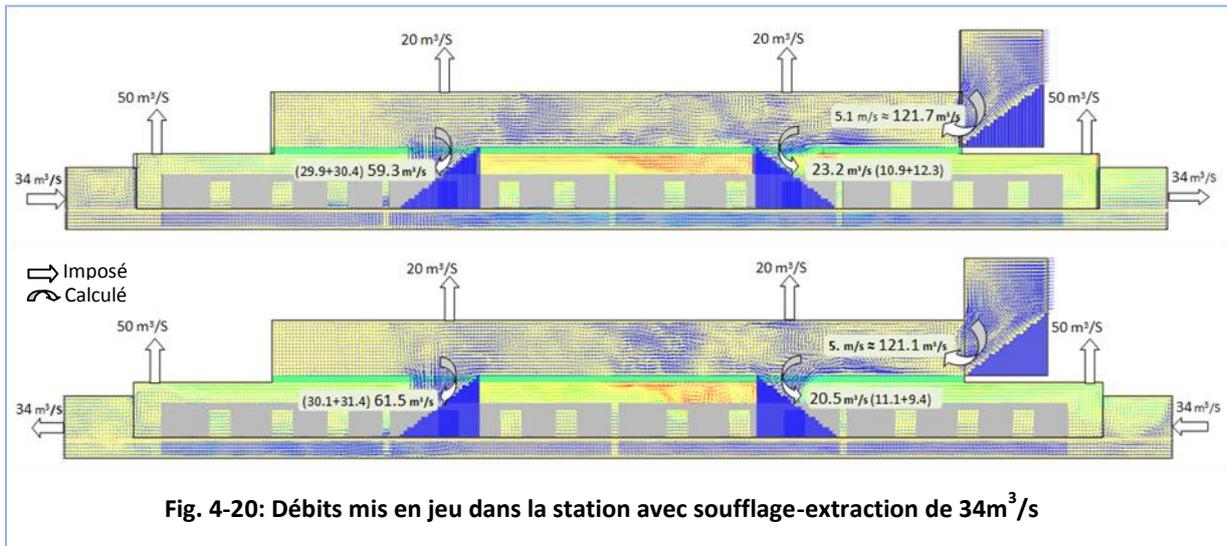
On remarque aussi qu'en augmentant le débit de ventilation par les tunnels on parvient à empêcher que la fumée se propage dans les deux directions.

A noter que pour les grands débits de ventilation (136 m<sup>3</sup>/s – 102 m<sup>3</sup>/s) le soufflage par le tunnel le plus éloigné du wagon en feu et l'extraction par le plus proche donne les meilleurs résultats de désenfumage. Par contre pour les faibles débits de ventilation (34 m<sup>3</sup>/s) on s'aperçoit que la fumée reste mieux stratifiée dans le cas de la ventilation de droite à gauche et par conséquent les conditions d'évacuation des personnes seront meilleures.



L'analyse des débits mis en jeu dans la station montrent que quel que soit le sens de la ventilation, le débit d'air frais qui descend par les trémies de gauche est nettement supérieur à celui qui descend par les trémies de droite, ceci est dû à la surpression causée par le feu et la forces de flottabilité qui agissent sur l'air chaud à proximité du wagon en feu.

La figures Fig. 4-20 et Fig. 4-21 illustrent les différents débits mis en jeu dans la station pour le cas d'une ventilation par les tunnels de  $34 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $136 \text{ m}^3/\text{s}$  respectivement:



Le tableau 4-4 récapitule les résultats des simulations faites pour ces deux configurations de ventilation. On y trouve la température moyenne aux quais à une hauteur de 1.5 m, les maxima des sur les 26 points de mesures placés aux quais ainsi que le pourcentage de ces points dépassant les  $40^\circ\text{C}$  et  $45^\circ\text{C}$  respectivement.

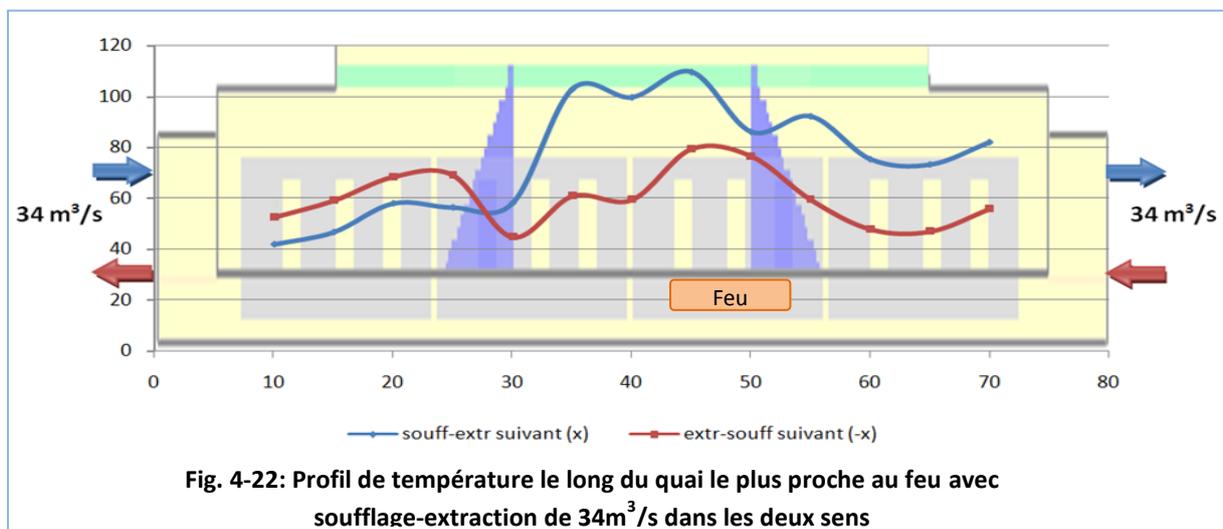
Tableau 4-4: Relevés de température des points de mesure – 1<sup>er</sup> Scénario, Ventilation antisymétrique

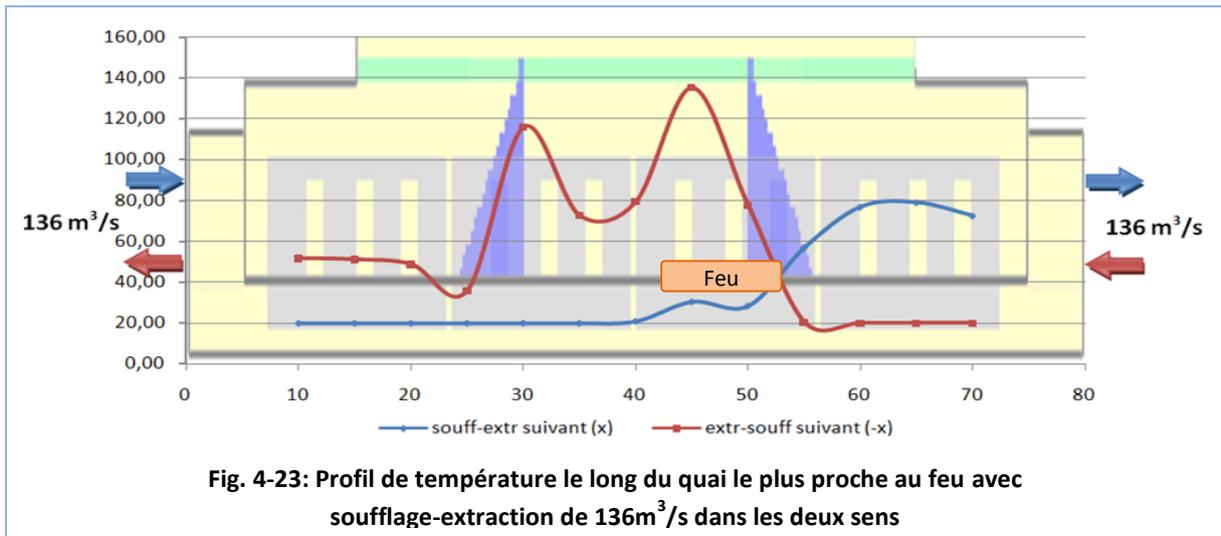
Extraction-Soufflage (antisymétrique)	Débits (m <sup>3</sup> /s) Tunnels	Températures aux quais (°C)							
		Ventil. De gauche -> droite				Ventil. De droite -> gauche			
		moyenne	Max sur Th. C.	% TC > 40	% TC >45	moyenne	Max sur Th. C.	% TC > 40	% TC >45
	34	72,28	109,85	84,62	80,77	55,28	79,49	96,15	88,46
	68	58,87	96,47	69,23	69,23	50,74	97,5	80,77	73,08
	102	44,95	99,48	38,46	30,77	55,61	150,4	73,08	65,38
	136	42,43	83,21	30,77	30,77	52,28	144,85	61,54	61,54

D'après le tableau ci-dessus:

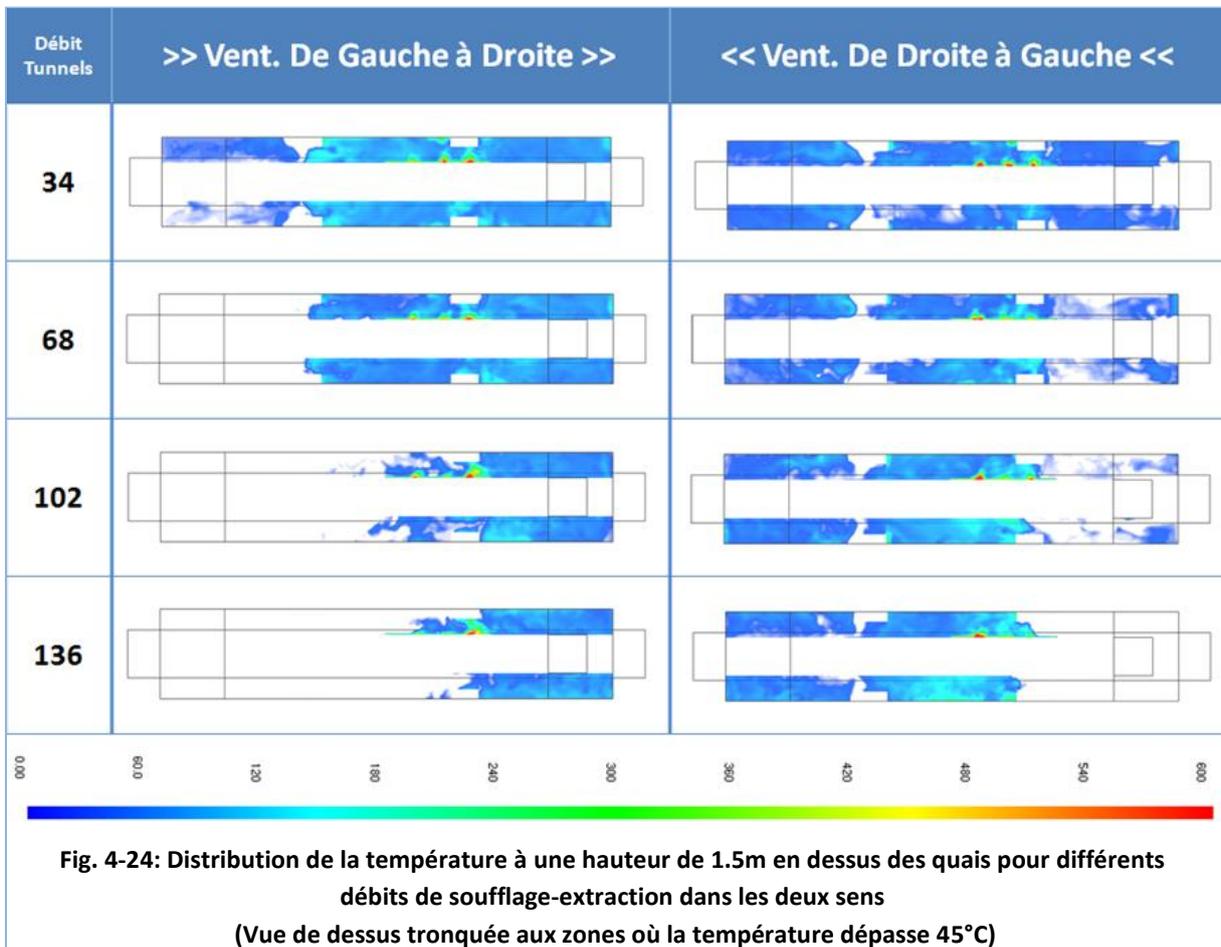
- La température moyenne dans les quais diminue dans le cas de ventilation de gauche à droite avec l'augmentation du débit de soufflage et d'extraction par les deux tunnels, par contre dans le cas de ventilation de droite à gauche, la température moyenne y reste constante quelque soit le débit.
- Le pic des températures enregistrées sur les points de mesures varie en fonction du débit de ventilation par les tunnels inversement selon le cas: dans le cas de ventilation de gauche à droite le max diminue, et dans le cas de ventilation de droite à gauche le maximum augmente avec le débit de ventilation.
- Pour les grands débits de ventilation, l'étendue de la zone chaude est plus grande dans le cas de ventilation de droite à gauche (d'après la variation des pourcentages).

Les figures Fig. 4-22 et Fig. 4-23 montrent les profils de température le long du quai le plus proche au feu, basés sur les enregistrements des 13 points de mesure localisés à une hauteur de 1.5 m.





La figure Fig. 4-24 récapitule les contours de température au niveau des quais à une hauteur de 1.5m en dessus du sol. A noter que les zones non colorés correspondent à des zones sécurisés où la température est inférieure à  $45^\circ\text{C}$ , et qu'ils sont tous pris après 250 secondes de simulation.



On conclut que pour les faibles débits de ventilation (qui sont inférieurs aux extractions de 50 m<sup>3</sup>/s), le soufflage par le tunnel le plus proche au wagon en feu et l'extraction par l'autre donne les meilleurs résultats (maintien d'une meilleure stratification des fumées). Et pour le cas des grands débits (qui dépassent l'extraction de 50 m<sup>3</sup>/s par les trappes du niveau inférieur) l'extraction par le tunnel le plus proche au feu et le soufflage par le plus éloigné donne les meilleurs résultats, car on arrive dans ce cas à pousser les fumées en dehors de l'espace entre les escaliers et donc l'évacuation des personnes sera plus aisée.

#### 4.2.4- Comparaison entre les différentes stratégies:

##### 4.2.4.1- comparaison entre les modes de désenfumage et choix:

Le tableau 4-5 récapitule les résultats pertinents des 3 stratégies de désenfumage avec les débits optimaux pour chaque cas, à savoir:

- Le cas avec soufflage par de 34 m<sup>3</sup>/s par les deux tunnels, et une extraction au niveau de la mezzanine de 20 m<sup>3</sup>/s par chacune des trappes.
- Le cas avec extraction de 136 m<sup>3</sup>/s par les deux tunnels.
- Le cas de ventilation antisymétrique avec un soufflage par le 1<sup>ier</sup> tunnel et une extraction par le second avec un débit de 136 m<sup>3</sup>/s.

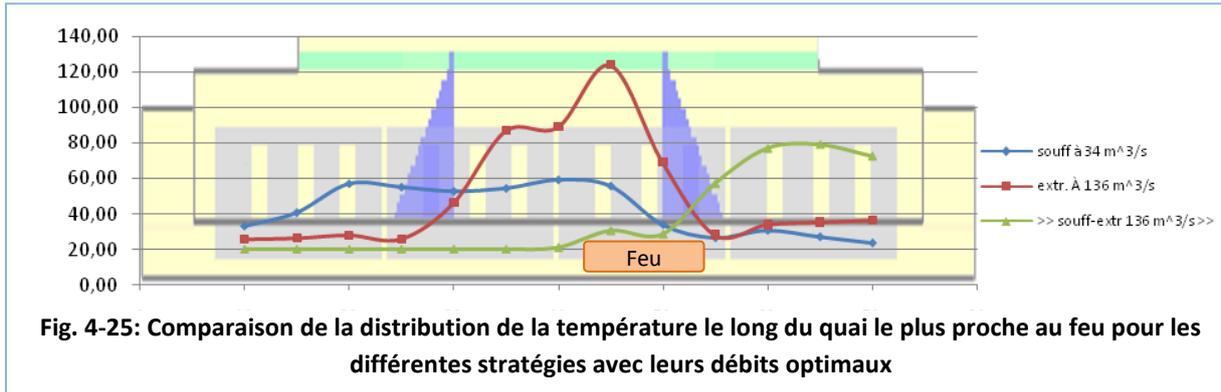
Le tableau 4-5 donne pour chaque cas la moyenne et le maximum sur les points de mesure aux quais et en mezzanine, et le maximum et le minimum des enregistrements sur quatre points de mesure situés aux centres des quatre trémies des escaliers.

A noter que la dernière colonne (température aux centres des trémies) nous donne une idée sur la situation des voies de communication entre les deux niveaux qui sont supposées être les seules.

	<i>Quais</i>		<i>Mezzanine</i>		<i>Trémies</i>	
	<i>Moyenne</i>	<i>Max</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Max</i>	<i>Maximum</i>	<i>Min</i>
<i>Soufflage</i>	<b>41,57</b>	<b>60</b>	<b>32,28</b>	<b>36</b>	<b>188</b>	<b>36</b>
<i>Extraction</i>	<b>50,44</b>	<b>124</b>	<b>20</b>	<b>-</b>	<b>20</b>	<b>-</b>
<b>&gt;&gt; souff-extr &gt;&gt;</b>	<b>42,43</b>	<b>83</b>	<b>20</b>	<b>-</b>	<b>20</b>	<b>-</b>

Tableau 4-5: Comparaison entre les différentes stratégies de désenfumage testées

Les profils de température au niveau du quai pour les 3 cas sont superposés dans la figure suivante:



Bien que l'espace entre les escaliers se trouve dans le cas d'extraction à des températures qui dépassent 100°C (40°C plus qu'en soufflage), il est préférable de point de vue température de procéder par extraction que par soufflage vu que les espaces de par et d'autre des escaliers restent sécurisés dans les deux cas et qu'avec extraction les escaliers qui sont les voies de communication entre les deux niveaux restent à la température ambiante au moment où ils se trouvent à des températures très élevés (voir tableau) dans le cas de soufflage. A noter que le soufflage par les tunnels a l'avantage de garder la stratification de la couche de fumées au niveau des quais, ce qui est un résultat recherché, d'où l'idée d'installer des écrans de cantonnement sous les trémies.

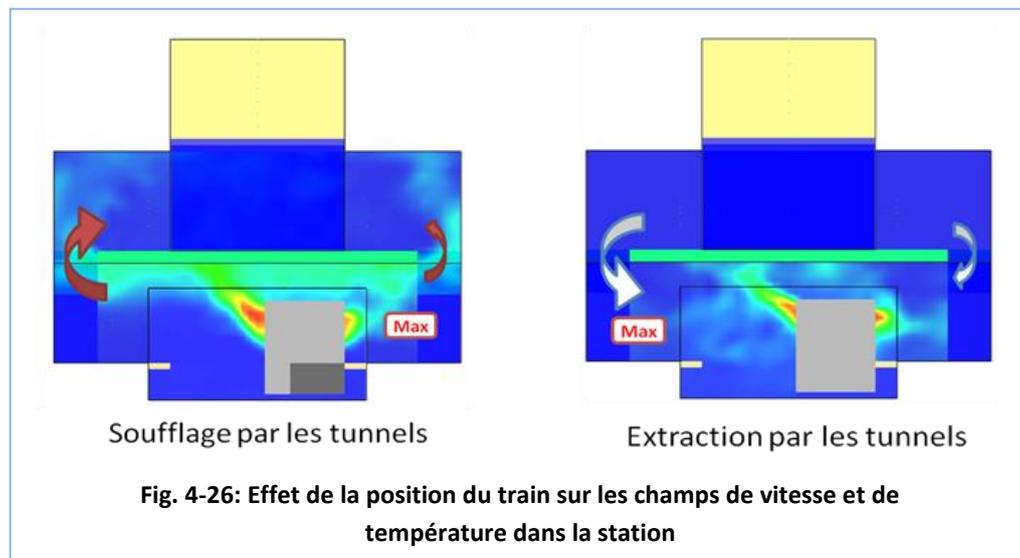
Toutefois le soufflage par le tunnel le plus loin du feu et l'extraction par l'autre avec de grands débits (136 m<sup>3</sup>/s ou plus) reste la meilleure stratégie de désenfumage. En effet, on remarque qu'avec une telle ventilation la température dans la mezzanine reste à sa valeur initiale, les escaliers ne sont pas bloqués par les fumées de haute température et les zones chaudes au niveau des quais se concentrent dans un tiers de leurs longueurs.

#### 4.2.4.2- Effet de la position du train:

On constate que la position du train a une influence sur les écoulements dans la station et sur les débits qui traversent les trémies des escaliers (voir Fig. 4-26). En effet, on trouve que dans le cas de soufflage par les tunnels les débits d'air et de fumées qui remontent par les escaliers du quai le plus loin du train sont plus grands que ceux qui remontent par les escaliers du quai le plus proche au train. De même dans le cas d'extraction par les tunnels, l'air frais qui descend par les escaliers du quai le plus loin du train sont plus grands que celui qui descend par les escaliers les plus proches au train.

Par conséquent, l'enregistrement des points de mesures montrent que le maximum de température est situé sur le quai proche du train dans le cas de soufflage et est situé sur le quai le plus loin du train dans le cas d'extraction par les tunnels.

Puisque le train est de longueur proche de celle des quais, il se trouve qu'il forme un obstacle contre la ventilation par les tunnels, et comme sa position ne peut être au milieu, il aurait forcément cet effet sur les écoulements au niveau des quais.



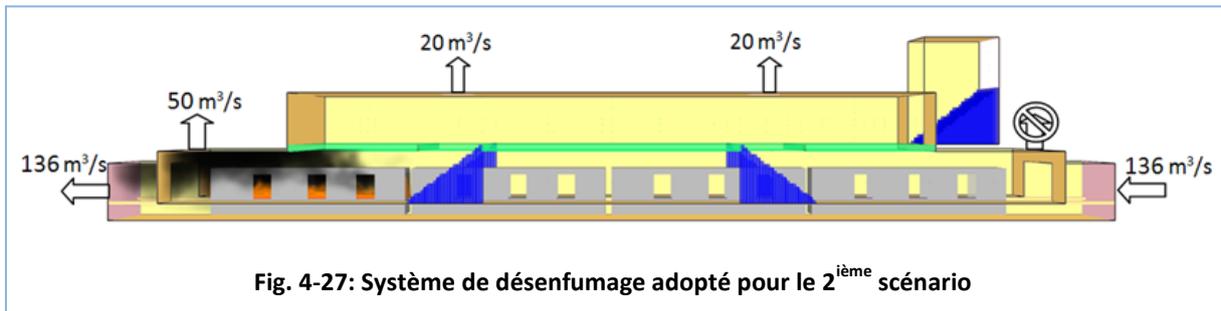
### 4.3- Présentation et analyse des résultats du 2ième et du 3ième scénario (feu dans le 1ier ou le 4ième wagon):

#### 4.3.1- Feu dans le 1<sup>ier</sup> wagon:

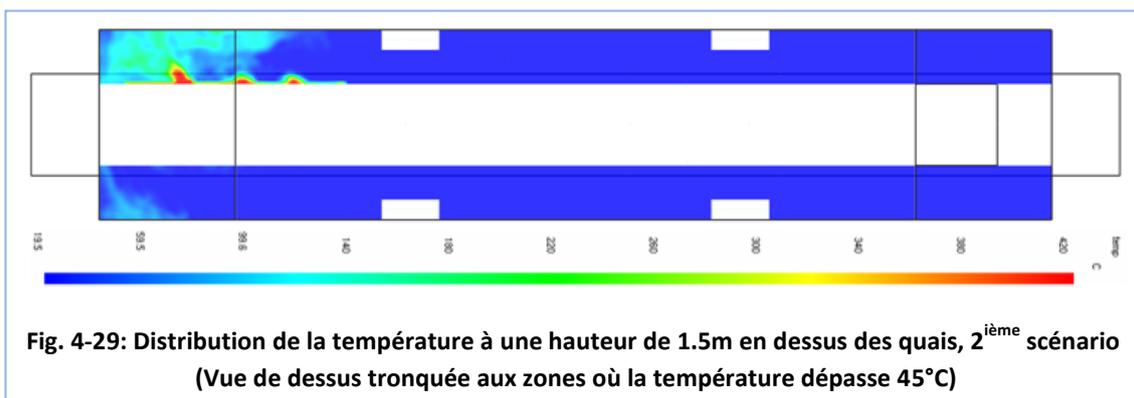
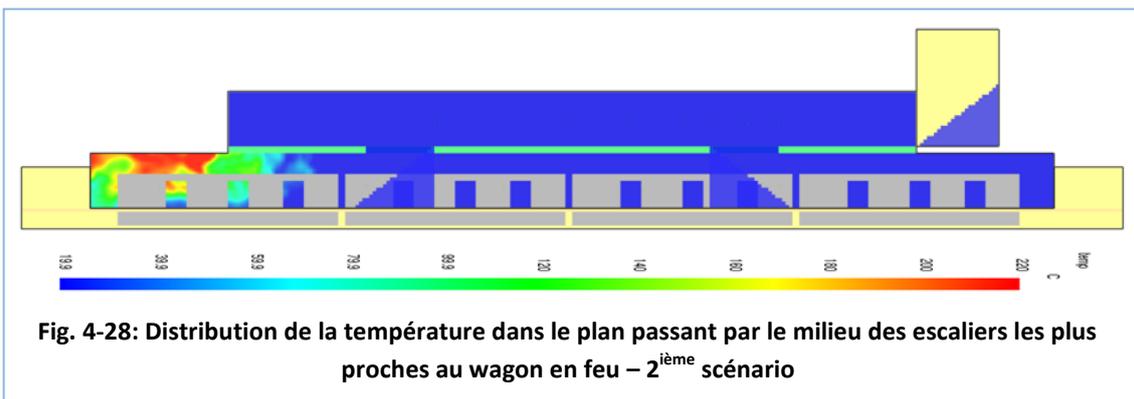
Dans ce cas le feu est supposé situé au niveau du premier wagon. Comme le feu est situé très proche du premier tunnel, la stratégie de ventilation proposée consiste simplement à extraire par le 1<sup>er</sup> tunnel (le plus proche au feu) et à souffler par l'autre et ce, à des débits convenables. Quant aux extractions par les trappes situées au niveau des quais, seule la première sera retenue. L'extraction par la deuxième trappe est arrêtée pour empêcher tout écoulement de retour.

On remarque que dans ce cas et grâce à la stratégie de désenfumage adoptée, la station est bien sécurisée. En effet les fumées et l'air chaud provenant du wagon en feu sont empêchés d'approcher les escaliers (voies de communication) et par conséquent la mezzanine, tout en les

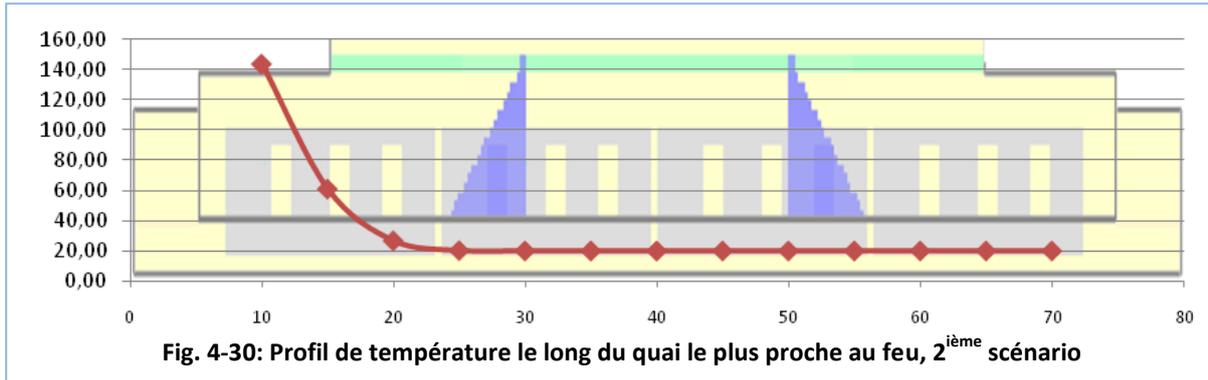
gardant localisés à proximité du wagon en feu (voir Fig. 4-27). Ceci, assure la sécurité des passagers en leur laissant les voies d'évacuation libres.



Les zones chaudes se concentrent au voisinage du wagon en feu comme le montre les contours de température (Fig. 4-28/4-29): le premier est pris au milieu du quai à coté du quel le train est garé, le deuxième montre la distribution de la température aux quais à un niveau de 1.5 m en dessus du sol.



Les relevés de température sur le quai le plus proche du train sont représentés sur le graphe de la figure Fig. 4-30:

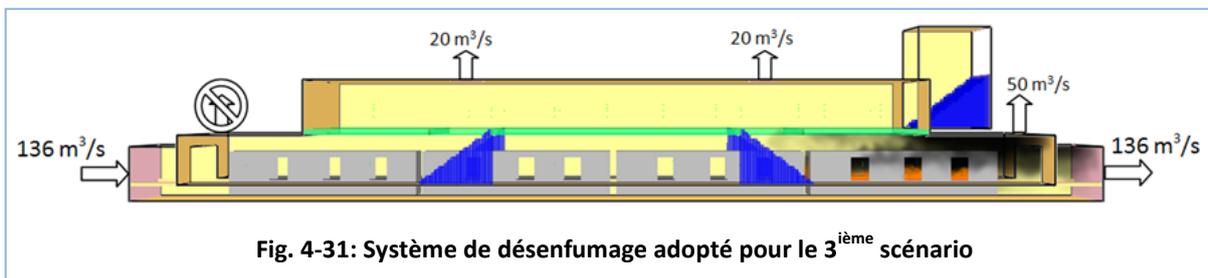


Le profil de température ci-dessus montre que la station est bien sécurisée, les escaliers non exposés aux températures élevées, l'intervention et l'évacuation des personnes pourraient se faire en toute sécurité.

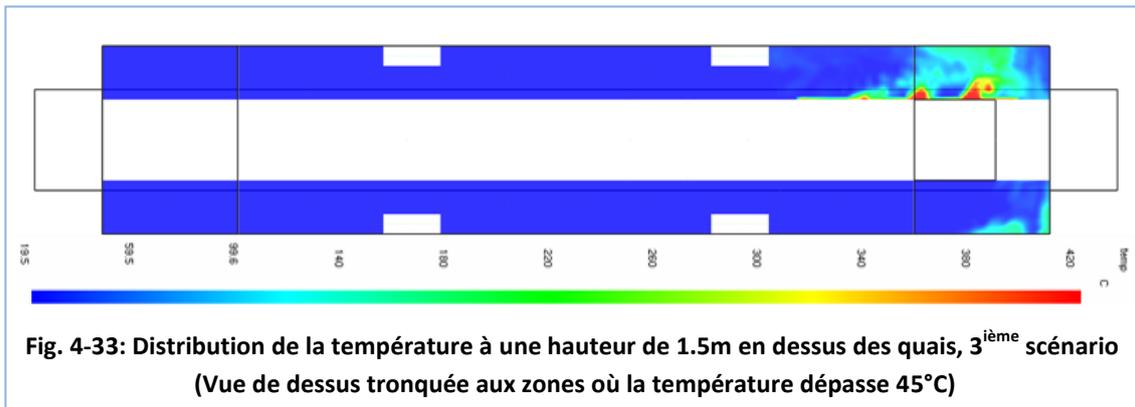
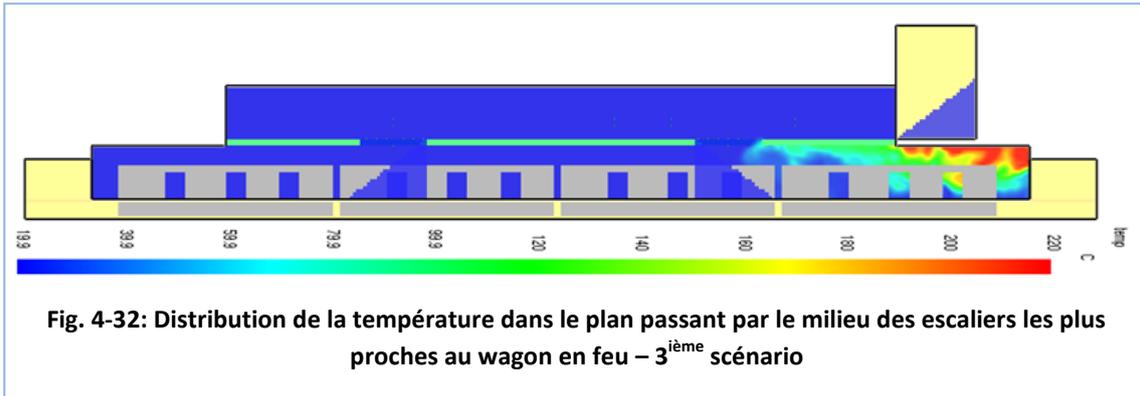
*Nota:* D'après les résultats du premier scénario, l'extraction au niveau de la mezzanine pourrait être arrêtée sans que ça n'affecte trop les résultats ci-dessus.

#### 4.3.2- Feu dans le 4<sup>ier</sup> wagon:

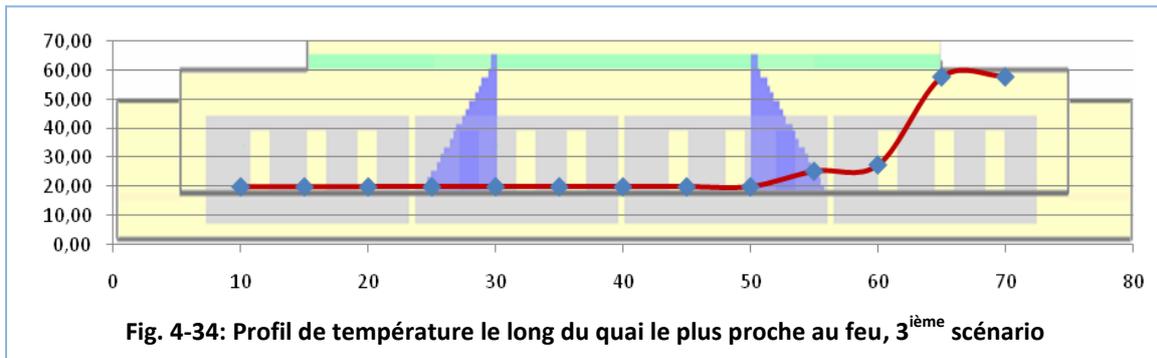
Dans ce cas le feu est supposé situé au niveau du quatrième wagon. Comme dans le cas précédent, puisque le feu est situé très proche du deuxième tunnel, la stratégie de ventilation proposée consiste simplement à souffler par le 1<sup>ier</sup> tunnel (le plus loin du feu) et à extraire par l'autre et ce, à des débits convenables. Quant à l'extraction par les trappes situées au niveau des quais, seule la deuxième sera retenue. L'extraction par la première trappe est arrêtée pour empêcher tout écoulement de retour.



Les zones chaudes se concentrent au voisinage du wagon en feu comme le montre les contours de température (Fig. 4-31/4-32) : le premier est pris au milieu du quai à côté duquel le train est garé, le second montre la distribution de la température aux quais à un niveau de 1.5 m en dessus du sol.



Le profil de température le long du quai à côté duquel le train est garé basé sur les enregistrements des 13 points qui sont y placés à une hauteur de 1.5 m est donné ci-après:



Le profil de température ci-dessus montre que la station est bien sécurisée, les escaliers non exposés aux températures élevées, l'intervention et l'évacuation des personnes pourraient se faire en toute sécurité.

#### 4.4- Solution avec écrans de cantonnement:

On avait vu que le soufflage par les tunnels dans le cas où le feu se situe au niveau du troisième wagon avait l'avantage de favoriser la stratification des fumées sous le plafond par confinement au niveau des quais. Une stratification qui est généralement recherchée dans ces cas, car bien que la température dans les cas d'extraction ou de ventilation antisymétrique ne soit pas trop élevée, tout le volume des quais se trouve dans ces cas de figure rempli de fumée plus ou moins dense, et comme il est bien su, les températures élevées ne sont pas le seul danger que les fumées présentent, mais il y a aussi les niveaux de toxicité et d'opacité.

Toutefois, la position en plafond des voies de communications entre les deux niveaux a posé un problème: ces voies se trouvent rapidement bloquées par les fumées chaudes et toxiques au bout de quelques secondes. L'idée est de placer des écrans de cantonnement sous les trémies des escaliers pour empêcher que les fumées n'envahissent les escaliers et pour qu'elles restent stratifiées sous le plafond dans le volume défini par ces écrans.

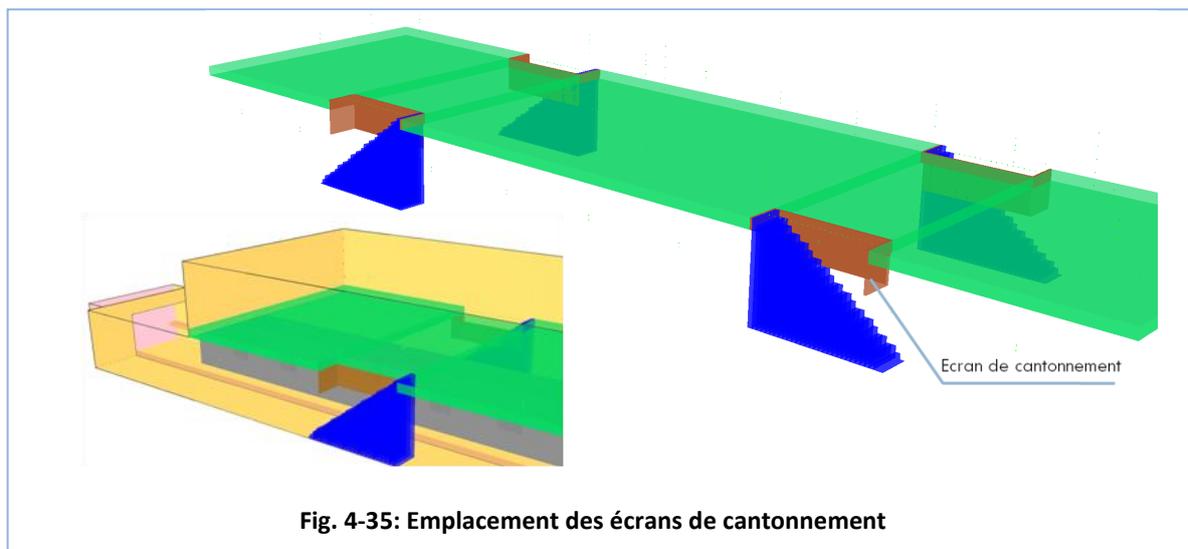


Fig. 4-35: Emplacement des écrans de cantonnement

Les écrans placés consistent en des barrières placées sous le plancher qui sépare les deux niveaux et qui ont une hauteur de 1.25 m d'une façon à ce qu'ils laissent un passage suffisamment large entre eux et les escaliers.

Les visualisations suivantes (Fig. 4-36) mettent en évidence l'effet des écrans de cantonnement sur la propagation des fumées dans la station. On remarque qu'en présence des écrans, la fumée est empêchée de remonter à la mezzanine pour un débit de soufflage modéré

qui correspond à  $34\text{m}^3/\text{s}$ , et que la densité des fumées y est nettement inférieure dans le cas de soufflage à grand débit.

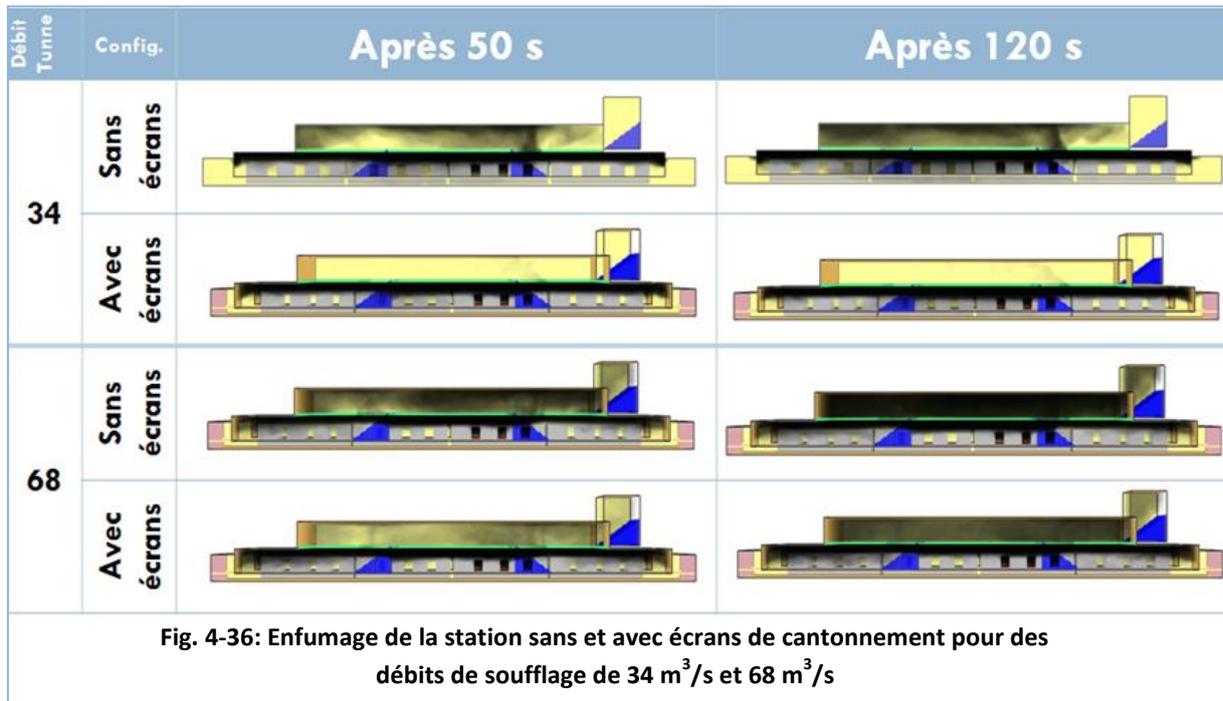


Fig. 4-36: Enfumage de la station sans et avec écrans de cantonnement pour des débits de soufflage de  $34\text{m}^3/\text{s}$  et  $68\text{m}^3/\text{s}$

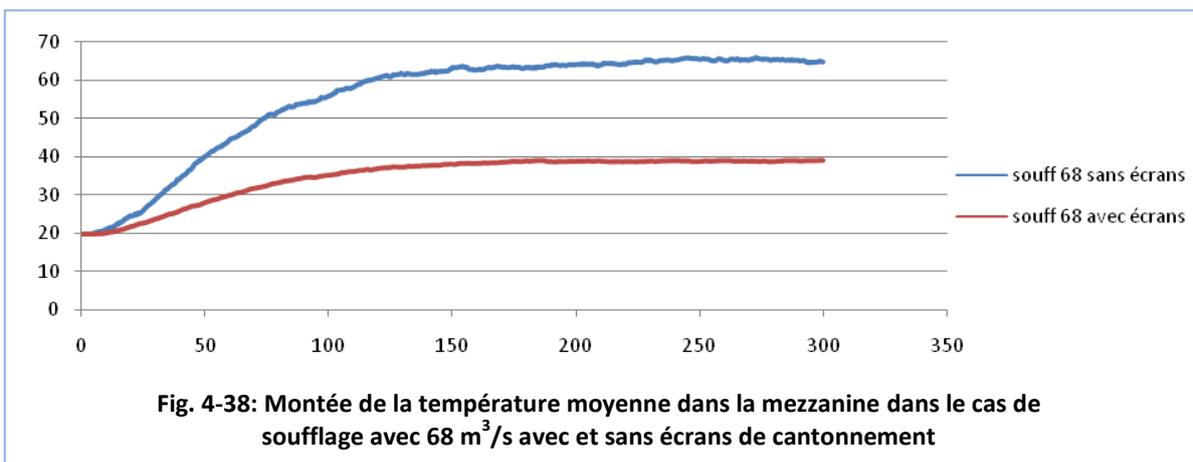
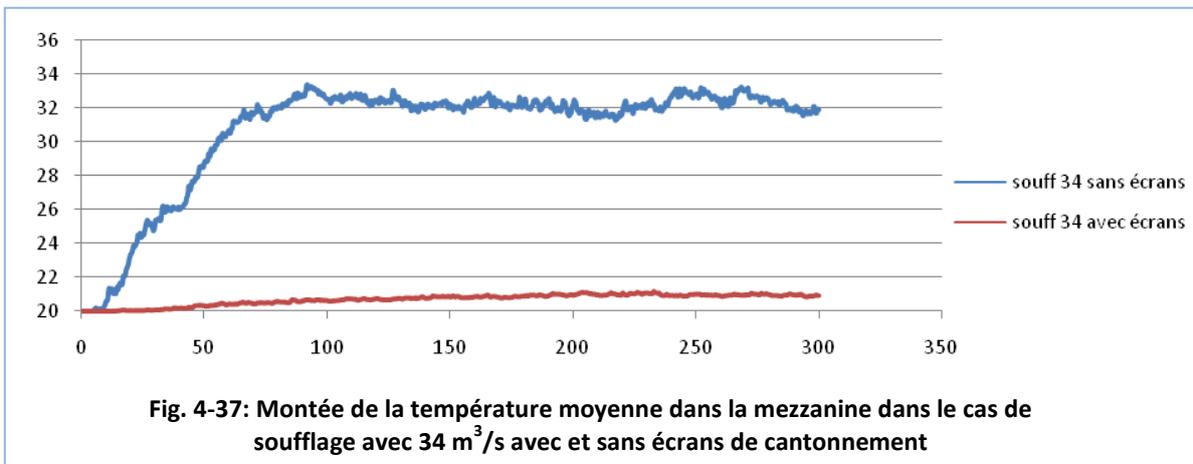
Les enregistrements des points de mesure (Tableau 4-6) montrent une baisse de la température au niveau de la mezzanine et une légère montée du maximum de température aux quais; ceci est dû au fait que la quantité de fumée qui remonte à la mezzanine est réduite en présence des écrans de cantonnement.

	Débits ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Températures ( $^{\circ}\text{C}$ )				% des points de mesure dépassant $40^{\circ}\text{C}$		Temp. Max Centre trémie
		moyennes		Max. pts de mesure		% Mezz >40	% Quai >40	
		Tunnels	Mezzanin	Quais	Mezzanin			
sans écrans	34	32,28	41,57	39,99	59,32	0	46,15	131
avec écrans	34	20,9	36,95	25,39	69,82	26,92	19,23	38,6
sans écrans	68	63,45	34,51	79,97	63,44	100	3,85	130,6
avec écrans	68	38,26	39,42	44,55	76,67	26,92	11,54	55,8

Tableau 4-6: Relevés de température des points de mesure en présence et en absence des écrans de cantonnement pour des débits de soufflage de  $34\text{m}^3/\text{s}$  et  $68\text{m}^3/\text{s}$

L'avantage des écrans de cantonnement réside dans la diminution de la température au niveau des voies de communication entre les deux niveaux comme le montre la dernière colonne du tableau ci-dessus. Ainsi, les escaliers ne se trouvent plus bloqués comme c'est le cas sans écrans de cantonnement.

Les deux graphes ci-dessous (Fig. 4-37/4-38) montrent la montée en température dans la mezzanine pour deux cas de soufflage (avec 34 m<sup>3</sup>/s et 68 m<sup>3</sup>/s) avec et sans écrans de cantonnement. On s'aperçoit qu'avec les écrans la température au niveau de la mezzanine est nettement inférieure avec les écrans et qu'elle y reste à sa valeur initiale pour un débit de 34 m<sup>3</sup>/s. Par ailleurs, le cas d'un grand débit de soufflage tel que 64 m<sup>3</sup>/s nous montre que les écrans de cantonnement nous permettent de gagner un temps précieux lors des interventions de sauvetage. En effet on remarque que le temps nécessaire pour atteindre 30°C par exemple en présence des écrans de cantonnement est le double de celui en leur absence.



---

## Conclusion générale:

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

Une comparaison entre les résultats de la présente étude et ceux de l'étude [2], nous a permis de percevoir l'influence de la position des voies de communication entre les différents niveaux de la station. En effet, dans la présente étude, ces voies se situent au plafond sous lequel les fumées ont une tendance naturelle à se stratifier, or les débits importants qui franchissent les trémies perturbent cette stratification naturelle et la rendent impossible dans le cas des débits descendants autrement dit dans les cas avec extraction par les tunnels.

D'autre part, l'étude a mis en évidence la carence des textes réglementaires français en vigueur concernant le désenfumage en stations souterraines. En effet ces textes prescrivent une mise en surpression des volumes protégés par soufflage d'air 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 par réglementation dans le cas où les volumes protégés se situent en dessus des volumes sinistrés.

Plusieurs stratégies de désenfumage pour différents scénarios ont été testées, ces différentes stratégies ont consisté principalement en un soufflage ou une extraction par les deux tunnels, à noter que les scénarios où le feu se situe dans la partie centrale des quais c'est-à-dire entre les escaliers étaient les plus critiques. Chacune de ces stratégies avait ses avantages et ses inconvénients.

Le soufflage par les tunnels favorise le maintien de la stratification de la couche de fumées sous le plafond des quais par confinement, ce qui est recherché, mais les voies d'évacuation et de fuite intuitives qui sont les escaliers se trouvent dans ce cas bloqués à moins que des dispositifs comme les écrans de cantonnement ne soient mis en place.

---

L'extraction par les tunnels a l'avantage d'empêcher la remontée des fumées et de la chaleur au niveau supérieur. Au niveau des quais, les extractions par les tunnels et les trappes des quais induisent de très forts courants d'air qui descendent par les escaliers et qui perturbent la couche de fumée suite à une augmentation des niveaux de turbulence.

La ventilation antisymétrique, à savoir le soufflage par l'un des tunnels et l'extraction par l'autre, est appropriée aux cas où le feu se situe proche de l'un des tunnels. Dans ces cas les fumées sont évacuées par le tunnel le plus proche au feu et la station est sécurisée.

Finalement, l'étude a mis en évidence la répercussion irréfutable de la mise en place d'écrans de cantonnement sur la stratification des fumées et la protection de la mezzanine et de la station en général. Ces écrans permettent en effet le maintien de la stratification des fumées dans l'espace qu'ils définissent sous le plafond, la protection des voies de communication entre les deux niveaux de la station et le retardement si ce n'est pas l'empêchement de la remontée des fumées vers la mezzanine. Il est donc souhaitable que de nouvelles mesures réglementaires tenant compte de ces résultats soient instaurées, et ce, dans un cadre réglementaire relatif aux ERP moins généraliste qui tiendrait compte des spécificités géométriques de chaque type d'établissement.

---

## Références :

- [1] F. Chen, S.C. Guo, H.Y. Chuay and S.W. Chien « Smoke Control of Fire in Subway Station», *Theoretical and computational fluid dynamics Journal*, 2003, 16:349-368.
- [2] M. Hadj Nacer, "Etude numérique sur la propagation des fumées et le désenfumage en cas d'incendie dans une station de métro", ENP, Algérie, 2008.
- [3] F. Chen, S.-W. Chien, H.-M. Jang, W.-J. Chang « *Stack effects on smoke propagation in subway stations* » *Continuum Mechanic. Thermodynamic Journal*. (2003) 15: 425–440.
- [4] Cabinet CASSO et Cie, « Sécurité contre l'incendie dans les ERP », *Techniques de l'ingénieur*, traité C 3280v2.
- [5] <http://www.techno-science.net>
- [6] <http://www.sitesecurite.com>
- [7] <http://www.apsighe.fr/erp-df.htm>
- [8] 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*)
- [9] C. Martel, "Ventilation et sécurité incendie d'une zone expérimentale", CERN-ST-2000-055.
- [10] B. Debray, N. Gobeau, F. Waymel, rapport d'étude "Incendie en milieu confiné", INERIS, 2007.
- [11] Josianne Roy, "Le mouvement de fumée", M. Sc. Chimie, Janvier 2007
- [12] F. Chen, S.-W. Chien, H.-M. Jang, W.-J. Chang « Stack effects on smoke propagation in subway stations » *Continuum Mehc. Thermodyn. Journal*. (2003) 15: 425–440.
- [13] Pl. Lamballais, article "Pourquoi ça fume", site: Flashover.fr, 18 octobre 2008.
- [14] Bjöm Karlsson, James G. Quintiere, "Enclosure Fire Dynamics", CRC Press LLC, 2000.
- [15] Pierre Carlotti, "Mécanique des fluides pour la ventilation des tunnels routiers", Centre d'études des tunnels, 2005.
- [16] B. Debray, N. Gobeau, F. Waymel, rapport d'étude "Incendie en milieu confiné", INERIS, 2007.
- [17] Kevin Mc. Grattan, "Fire Dynamics Simulator (Version 5), User's Guide", National Institute of Standards and Technology, Février 2009.

- 
- [18] Kevin McGrattan, "Fire Dynamics Simulator (Version 5), Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model", National Institute of Standards and Technology, Février 2009.
- [19] Alexandre CHATELAIN, Simulation des grandes échelles d'écoulements turbulents avec transfert de chaleur, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.

---

## Annexes

Ci-après un exemple d'un fichier d'entrée écrit pour un cas de soufflage à 68 m<sup>3</sup>/s en présence des écrans de cantonnement:

```
&HEAD CHID='T-SOUFF-68_M20_3W_Canton',TITLE='T-SOUFF-68_M20_3W_Canton' /
&MESH IJK=20,30,18, XB=0.0, 5.0, -3.75, 3.75, 0.0, 4.5 / Tunnel 1 (10800) (0.25 x
0.25 x 0.25)
&MESH IJK=20,30,18, XB=75.0, 80.0, -3.75, 3.75, 0.0, 4.5 / Tunnel 2 (10800) (0.25 x
0.25 x 0.25)
&MESH IJK=280,30,6, XB=5.0, 75.0, -3.75, 3.75, 0.0, 1.5 / volume en dessous des
quais (28800) (0.25 x 0.25 x 0.25)
&MESH IJK=280,56,16, XB=5.0, 75.0, -7.0, 7.0, 1.5,5.5 / Niveau des quais
(250880) (0.25 x 0.25 x 0.25)
&MESH IJK=200,56,18, XB=15.0 65.0, -7.0, 7.0, 5.5, 10.0 / Niveau mezzanine
(201600) (0.25 x 0.25 x 0.25)
&MESH IJK=24,24,34, XB=65.0, 71.0, -3.0, 3.0, 6.0, 14.5 / Sortie (19584) (0.25 x
0.25 x 0.25) >>>>>>>>tot 521564 maille
```

```
&MISC RADIATION=.FALSE. /
&DUMP DT_RESTART=0.5 /
&TIME T_END=300. /
```

```
'Niveau des quais -----
```

```
&OBST XB=0.000,80.000,-3.75,-3.000,1.250,1.500, COLOR='MELON' /
&OBST XB=0.000,80.000,3.000,3.7500,1.250,1.500, COLOR='MELON' /
```

```
' -----Escaliers-----
```

```
&OBST XB= 24.000, 24.200, 5.500, 7.000,1.500, 1.575, COLOR='BLUE',
TRANSPARENCY=0.7, MULT_ID='m1' /
&OBST XB= 50.000, 50.200, 5.500, 7.000,1.500, 5.925, COLOR='BLUE',
TRANSPARENCY=0.7, MULT_ID='m2' /
&OBST XB= 50.000, 50.200, -7.000, -5.500, 1.500, 5.925, COLOR='BLUE',
TRANSPARENCY=0.7, MULT_ID='m2' /
&OBST XB= 24.000, 24.200, -7.000, -5.500, 1.500, 1.575, COLOR='BLUE',
TRANSPARENCY=0.7, MULT_ID='m1' /
```

```
&MULT ID='m1', DXB=0.2, 0.2, 0.0, 0.0, 0.0, 0.15 N_LOWER=0, N_UPPER=29 /
&MULT ID='m2', DXB=0.2, 0.2, 0.0, 0.0, 0.0, -0.15 N_LOWER=0, N_UPPER=29 /
```

```
'Ecrans de Cantonnement
```

```
&OBST XB=25.00, 30.00, 5.50, 5.50, 4.25, 5.50, COLOR='BRICK', TRANSPARENCY=0.9 /
&OBST XB=25.00, 30.00, -5.50, -5.50, 4.25, 5.50, COLOR='BRICK', TRANSPARENCY=0.9 /
&OBST XB=50.00, 55.00, 5.50, 5.50, 4.25, 5.50, COLOR='BRICK', TRANSPARENCY=0.9 /
&OBST XB=50.00, 55.00, -5.50, -5.50, 4.25, 5.50, COLOR='BRICK', TRANSPARENCY=0.9 /
```

```
&OBST XB=25.00, 25.00, 5.50, 7.00, 4.25, 5.50, COLOR='BRICK', TRANSPARENCY=0.9 /
&OBST XB=25.00, 25.00, -7.00, -5.50, 4.25, 5.50, COLOR='BRICK', TRANSPARENCY=0.9 /
&OBST XB=55.00, 55.00, 5.50, 7.00, 4.25, 5.50, COLOR='BRICK', TRANSPARENCY=0.9 /
&OBST XB=55.00, 55.00, -7.00, -5.50, 4.25, 5.50, COLOR='BRICK', TRANSPARENCY=0.9 /
```

```
' Niveau mezzanines -----
```

```
&OBST XB=15.0,25.0,-7.0,7.0,5.50,6.0, COLOR='EMERALD GREEN', TRANSPARENCY=0.7 /
&OBST XB=25.0,30.0,-5.50,5.50,5.5,6.0, COLOR='EMERALD GREEN', TRANSPARENCY=0.6 /
&OBST XB=30.0, 50.0,-7.0,7.0, 5.5,6.0, COLOR='EMERALD GREEN', TRANSPARENCY=0.7 /
&OBST XB=50.0,55.0,-5.50,5.5,5.5,6.0, COLOR='EMERALD GREEN', TRANSPARENCY=0.6 /
&OBST XB=55.0, 65.0,-7.0,7.0,5.50,6.0, COLOR='EMERALD GREEN', TRANSPARENCY=0.7 /
```

---

```

'ESCALIERS
&OBST XB=65.0,65.20,-3.0,3.0,6.0,6.075, COLOR='BLUE',TRANSPARENCY=0.7, MULT_ID='m3'
/
&MULT ID='m3', DXB=0.2, 0.2, 0.0, 0.0, 0.0, 0.15 N_LOWER=0, N_UPPER=29 /

'Vents -----
&VENT XB=0.0, 0.0, -3.75, 3.75, 0.0, 4.5, SURF_ID='TUNNEL1', COLOR='PINK' /
Tunnel 1
&VENT XB=80.0, 80.0, -3.75, 3.75, 0.0, 4.5, SURF_ID='TUNNEL2', COLOR='PINK' /
Tunnel 2
&VENT XB=71.0, 71.0, -3.0, 3.0, 10.425, 14.5, SURF_ID='OPEN', COLOR='PINK' /
Sortie
&VENT XB=5.0, 7.5, -1.0, 1.0, 5.5, 5.5, SURF_ID='TRAPPE_Q', COLOR='PINK' /
TRAPPE Q1 (2.5 X 2)
&VENT XB=72.5, 75.0, -1.0, 1.0, 5.5, 5.5, SURF_ID='TRAPPE_Q', COLOR='PINK' /
TRAPPE Q2 (2.5 X 2)
&VENT XB=26.25, 28.75, -1.0, 1.0, 10.0, 10.0, SURF_ID='TRAPPE_M1', COLOR='PINK' /
TRAPPE M1 (2.5 X 2)
&VENT XB=51.25, 53.75, -1.0, 1.0, 10.0, 10.0, SURF_ID='TRAPPE_M2', COLOR='PINK' /
TRAPPE M2 (2.5 X 2)

&SURF ID='TUNNEL1', VOLUME_FLUX=-68. /
&SURF ID='TUNNEL2', VOLUME_FLUX=-68. /
&SURF ID='TRAPPE_Q', VOLUME_FLUX=50. /
&SURF ID='TRAPPE_M1', VOLUME_FLUX=20. /
&SURF ID='TRAPPE_M2', VOLUME_FLUX=20. /

'Train -----
&MULT ID='m4', DXB=16.5, 16.5, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0 N_LOWER=0, N_UPPER=3 /

'Plateforme
&OBST XB=7.0, 23.0, 0.25, 3.0, 0.25, 1.5, COLOR='GRAY', MULT_ID='m4' /
'Plafond
&OBST XB=7.0, 23.0, 0.25, 3.0, 3.75, 4.0, COLOR='GRAY', MULT_ID='m4' /

'Murs entre wagons
&OBST XB=7.0, 7.0, 0.25, 3.0, 1.5, 3.75, COLOR='GRAY', MULT_ID='m4' /
&OBST XB=23.0, 23.0, 0.25, 3.0, 1.5, 3.75, COLOR='GRAY', MULT_ID='m4' /

'Murs Latéraux en dessus des portes
&OBST XB=7.0, 23.0, 0.25, 0.75, 3.5, 3.75, COLOR='GRAY', MULT_ID='m4' /
&OBST XB=7.0, 23.0, 2.75, 3.0, 3.5, 3.75, COLOR='GRAY', MULT_ID='m4' /

'Murs Latéraux DROITES entre Portes
&OBST XB=7.0, 10.5, 0.25, 0.25, 1.5, 3.5, COLOR='GRAY', MULT_ID='m4' /
&OBST XB=12.0, 15.0, 0.25, 0.25, 1.5, 3.5, COLOR='GRAY', MULT_ID='m4' /
&OBST XB=16.5, 19.0, 0.25, 0.25, 1.5, 3.5, COLOR='GRAY', MULT_ID='m4' /
&OBST XB=20.5, 23.0, 0.25, 0.25, 1.5, 3.5, COLOR='GRAY', MULT_ID='m4' /

Murs Latéraux GAUCHES entre Portes
&OBST XB=7.0, 10.5, 3.0, 3.0, 1.5, 3.5, COLOR='GRAY', MULT_ID='m4' /
&OBST XB=12.0, 15.0, 3.0, 3.0, 1.5, 3.5, COLOR='GRAY', MULT_ID='m4' /
&OBST XB=16.5, 19.0, 3.0, 3.0, 1.5, 3.5, COLOR='GRAY', MULT_ID='m4' /
&OBST XB=20.5, 23.0, 3.0, 3.0, 1.5, 3.5, COLOR='GRAY', MULT_ID='m4' /

'Feu -----
&VENT XB=40.0, 56.0, 0.25, 3.0, 1.5, 1.5, SURF_ID='FIRE' /

&SURF ID='FIRE', HRRPUA=340.91, COLOR='RED' /

'Output DATA -----

```

---

---

```
&SLCF PBX=27.5, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBX=48.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX=52.5, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./

&SLCF PBZ=3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF XB=5.0, 75.0, 3.0, 7.0, 3.0, 3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF XB=5.0, 75.0, -7.0, -3.0, 3.0, 3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./

&SLCF PBZ=7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./

&SLCF PBX=0.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=6.25, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBY=-6.25, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBY=2.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./

&SLCF PBY=0.0, QUANTITY='PRESSURE', VECTOR=.TRUE. /
```

'Point de mesure aux quais

```
&DEVC XYZ=10.0,5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ+10' /
&DEVC XYZ=15.0,5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ+15' /
&DEVC XYZ=20.0,5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ+20' /
&DEVC XYZ=25.0,5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ+25' /
&DEVC XYZ=30.0,5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ+30' /
&DEVC XYZ=35.0,5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ+35' /
&DEVC XYZ=40.0,5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ+40' /
&DEVC XYZ=45.0,5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ+45' /
&DEVC XYZ=50.0,5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ+50' /
&DEVC XYZ=55.0,5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ+55' /
&DEVC XYZ=60.0,5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ+60' /
&DEVC XYZ=65.0,5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ+65' /
&DEVC XYZ=70.0,5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ+70' /

&DEVC XYZ=10.0,-5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ-10' /
&DEVC XYZ=15.0,-5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ-15' /
&DEVC XYZ=20.0,-5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ-20' /
&DEVC XYZ=25.0,-5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ-25' /
&DEVC XYZ=30.0,-5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ-30' /
&DEVC XYZ=35.0,-5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ-35' /
&DEVC XYZ=40.0,-5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ-40' /
&DEVC XYZ=45.0,-5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ-45' /
&DEVC XYZ=50.0,-5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ-50' /
&DEVC XYZ=55.0,-5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ-55' /
&DEVC XYZ=60.0,-5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ-60' /
&DEVC XYZ=65.0,-5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ-65' /
&DEVC XYZ=70.0,-5.0,3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TQ-70' /
```

'Points de mesure en mezzanine

```
&DEVC XYZ=30., 6.25, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TM-1' /
&DEVC XYZ=30., -6.25, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TM-2' /
&DEVC XYZ=35., 4.75, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TM-3' /
&DEVC XYZ=35., -4.75, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TM-4' /
&DEVC XYZ=39.25, 4.0, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TM-5' /
&DEVC XYZ=39.25, -4.0, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TM-6' /
&DEVC XYZ=44., 3.25, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TM-7' /
&DEVC XYZ=44., 0.0, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TM-8' /
&DEVC XYZ=44., -3.25, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TM-9' /
&DEVC XYZ=48.25, 2.75, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TM-10' /
&DEVC XYZ=48.25, -2.75, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TM-11' /
&DEVC XYZ=50., 6.25, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TM-12' /
&DEVC XYZ=50., -6.25, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TM-13' /
&DEVC XYZ=52.75, 0.0, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TM-14' /
&DEVC XYZ=55., 3.75, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TM-15' /
&DEVC XYZ=55., -3.75, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TM-16' /
```

---

```
&DEVC XYZ=57.5, 1.25, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TM-17' /
&DEVC XYZ=57.5, -1.25, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TM-18' /
&DEVC XYZ=60.75, 0.0, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TM-19' /
&DEVC XYZ=62.0, 2.25, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TM-20' /
&DEVC XYZ=62.0, -2.25, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TM-21' /
&DEVC XYZ=65.0, 0.0, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TM-22' /
&DEVC XYZ=27.5, 0.0, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TM-23' /
&DEVC XYZ=20.0, 3.5, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TM-24' /
&DEVC XYZ=20.0, -3.5, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TM-25' /
```

'Profil vitesse sortie

```
&DEVC XYZ=71.0, 0.0, 10.5, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U-VELOCITY_Z=10.5' /
&DEVC XYZ=71.0, 0.0, 11.0, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U-VELOCITY_Z=11.0' /
&DEVC XYZ=71.0, 0.0, 11.5, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U-VELOCITY_Z=11.5' /
&DEVC XYZ=71.0, 0.0, 12.0, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U-VELOCITY_Z=12.0' /
&DEVC XYZ=71.0, 0.0, 12.5, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U-VELOCITY_Z=12.5' /
&DEVC XYZ=71.0, 0.0, 13.0, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U-VELOCITY_Z=13.0' /
&DEVC XYZ=71.0, 0.0, 13.5, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U-VELOCITY_Z=13.5' /
&DEVC XYZ=71.0, 0.0, 14.0, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U-VELOCITY_Z=14.0' /
&DEVC XYZ=71.0, 0.0, 14.5, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U-VELOCITY_Z=14.5' /
```

'Températures aux centres des trémies

```
&DEVC XYZ=27.5,6.25,6.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp_1ière trémie' /
&DEVC XYZ=27.5,-6.25,6.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp_2ième trémie' /
&DEVC XYZ=52.5,6.25,6.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp_3ième trémie' /
&DEVC XYZ=52.5,-6.25,6.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp_4ième trémie' /
```

'Débits par les trémies

```
&DEVC XB=25.0,30.0,5.5,7.0,5.5,5.5, QUANTITY='VOLUME FLOW', ID='vol_flow (1)' /
&DEVC XB=25.0,30.0,-7.0,-5.5,5.5,5.5, QUANTITY='VOLUME FLOW', ID='vol_flow (2)' /
&DEVC XB=50.0,55.0,5.5,7.0,5.5,5.5, QUANTITY='VOLUME FLOW', ID='vol_flow (3)' /
&DEVC XB=50.0,55.0,-7.0,-5.5,5.5,5.5, QUANTITY='VOLUME FLOW', ID='vol_flow (4)' /
&DEVC XB=71.,71.,-3.,3.,10.425,14.5, QUANTITY='VOLUME FLOW', ID='vol_flow_sortie' /
```

'Températures moyennes à des hauteurs de 1.5m

```
&DEVC XB=15.0 65.0, -7.0, 7.0, 7.5, 7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp moy
mezz_1.5', STATISTICS='AREA INTEGRAL' /
&DEVC XB=5.0, 75.0, 3.0, 7.0, 3.0, 3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp moy
Quai_1+', STATISTICS='AREA INTEGRAL' /
&DEVC XB=5.0, 75.0, -7.0, -3.0, 3.0, 3.0, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp moy
Quai_2-', STATISTICS='AREA INTEGRAL' /
```

```
&TAIL /
```