

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



Ecole Nationale Polytechnique  
Département : Génie Mécanique

## Mémoire de Magister en Génie Mécanique

Option : Energétique

Présenté par :

**Abdelkader Aouaichia**

Ingénieur d'état en Génie Mécanique

**Intitulé**

# Contribution à l'étude des stratégies d'extraction des fumées lors d'un incendie dans un long tunnel routier - Application au tunnel routier de **Bouira -**

Soutenue publiquement le 31/09/2012 devant le jury composé de:

<b>Président :</b>	S.Larbi	Professeur	ENP
<b>Rapporteur :</b>	Bouzid Benkoussas	MC (A)	ENP
<b>Examineurs :</b>	M.Boumedane	Professeur	Université de BLIDA
	A.Bouhdjar	MC (A)	CDER

**ENP 2012**

Laboratoire Ecole Nationale Polytechnique (ENP)  
10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP.182, 16200 el Harrach Alger, Algérie [www.enp.edu.dz](http://www.enp.edu.dz)

## ملخص

في هذه الدراسة، تم إنشاء نموذج لانتشار الدخان خلال وقوع حريق في نفق للمرور مجهز بفتحة أو أكثر لإخراج الدخان، والتي تقع في أماكن مختلفة على طول النفق. المعادلات التي تصف تدفق الدخان استخدمت لوضع نموذج للتنبؤ الحسابي من أجل التنبؤ بآثار بعض الخصائص الفيزيائية، مثل عدد فتحات الإخراج، سرعة النفخ وقوة مصدر النار... ، على تطور درجات الحرارة وتركيز الدخان على طول النفق. وقد تم استعمال طريقة عددية مرتكزة أساساً على مفهوم الحجم المنتهية وذلك لمعالجة المعادلات الرياضية المترجمة لظاهرة تدفق الدخان، واعتمدنا في ذلك على مخطط Quick لتقييم التدفق على الواجهات. نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها بواسطة البرنامج الحسابي المنشأ تمت مقارنتها مع تلك التي حصلنا عليها باستخدام البرنامج التجاري المتاح لمحاكاة تدفق النار والدخان FDS على عدة سيناريوهات للإخراج. في بعض الحالات النتائج المتحصل عليها تتطابق تماماً، وفي حالات أخرى نلاحظ وجود بعض الفروق. وهذا راجع إلى المنهجية المختلفة المستخدمة في كل برنامج. مكنتنا هذه الدراسة من التعرف على شكل الإخراج الأمثل لعملية الإخلاء والإنقاذ في ظل ظروف مواتية للسلامة.

**كلمات مفتاحية:** محاكاة، انتشار الدخان، إخراج الدخان، فتحات، سلامة

## Résumé

Dans cette étude, une modélisation de la propagation des fumées lors d'un incendie dans un tunnel équipé d'une ou de plusieurs trappes d'extraction, situées à différents endroits par rapport à la longueur du tunnel est réalisée. Les équations qui décrivent l'écoulement des fumées ont été exploitées pour élaborer un modèle de calcul afin de prédire les effets de certaines propriétés physiques, telles que le nombre de trappes d'extraction, la vitesse de soufflage, la puissance de la source de feu..., sur l'évolution de la température et la concentration de la fumée le long de tunnel. Elles sont discrétisées par la méthode des volumes finis en associant un schéma Quick pour évaluer le flux aux interfaces. Les résultats de simulations obtenus avec le code élaboré ont été confrontés à ceux obtenus à l'aide du code commercial disponible de simulation des écoulements type feu et fumées FDS (Fire Dynamics Simulator) sur plusieurs scénarios d'extractions. Dans certains cas les résultats concordent parfaitement, dans d'autres des différences sont constatées. Cela est dû aux approches différentes utilisées dans les deux codes. Cette étude nous a permis d'identifier les configurations d'extractions les plus optimales pour une évacuation et un sauvetage dans des conditions de sécurité favorable.

**Mots clés:** simulation, propagation de fumée, extraction de fumée, trappes, sécurité.

## Abstract

In this study, a model of the spread of smoke during a fire in a tunnel fitted with one or more extraction trap doors, located in different places over the length of the tunnel is completed. The conservation equations describing the flow of smoke were used to develop a computational model to predict the effects of certain physical properties such as the number of extraction trap doors, the speed of blowing, the power of the source of fire ..., on the change of temperature and concentration of smoke along the tunnel. These equations are discretized by the finite volume method by associating a Quick scheme to evaluate the flow at the interfaces. The simulation results obtained with the developed code were compared to those obtained using the commercial code available for simulation of flow type such as fire and smoke "FDS" (Fire Dynamics Simulator) on several scenarios extractions. In some cases the results agree perfectly, other differences are found. This is due to different approaches used in both codes. This study enabled us to identify the configurations of the most optimal extractions for an evacuation and a rescue under safe conditions.

**Key words:** simulation, propagation of smoke, extraction of smoke, trap doors, safety.

## *Dédicaces*

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

*... Abdekader.*

## ***Remerciements***

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

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

*Je remercie également Monsieur S.Larbi, professeur à l'ENP, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant d'être le président du jury.  
Merci à Monsieur M.Boumedane, professeur à l'université de BLIDA  
, à Monsieur A.Bouhdjar, Docteur à CDER. Pour avoir accepté de faire partie des membres du jury.*

*Mes remerciements et ma profonde sympathie vont aussi à tous mes collègues de SONELGAZ D.E.G/EXPLOITATION GAZ*

*Enfin, c'est dans un état d'esprit mitigé que je rédige ces quelques lignes afin de remercier toutes les personnes qui ont*



---

## Nomenclatures

---

$D_1$	Coefficient de diffusion de l'élément '1'	-
$g$	Accélération de la pesanteur	m/s <sup>2</sup>
H	Hauteur du tunnel	m
$h$	Enthalpie par unité de masse	J/kg
$h_0$	Enthalpie par unité de masse de l'élément '1'	J/kg
$k$	Conductivité thermique; Energie cinétique turbulente	W/m.K
L	Longueur caractéristique	m
M	Masse molaire ; Nombre de Mach	-
P	Pression	Pa
Q	Puissance thermique	W
HRPPUA	Puissance thermique par unité de surface	Pa
$q_r$	Flux radiatif	W/m <sup>2</sup>
$\nabla.q$	Somme des deux flux de chaleur par conduction et par rayonnement	W/m <sup>2</sup>
t	Temps	s
T	Température	°C
T <sub>0</sub>	Température ambiante	°C
u	Vitesse caractéristique	m/s
v	Vitesse de l'écoulement d'air longitudinal	m/s
HRR	Taux de dégagement de chaleur	W M
RAD	Chaleur dégagée par rayonnement	W
CONV	Chaleur dégagée par convection	W
COND	Chaleur dégagée par conduction	W
$W_\alpha$	Masse molaire de l'espèce chimique $\alpha$	mol
$Y_1$	Fraction massique de l'élément '1'	-
$Y_o^\infty$	Fraction massique de l'oxygène à l'ambiance	-
$Y_F^I$	Fraction massique de combustible dans le jet	-
Z	Fraction de mélange	-
$\Phi$	Fonction de dissipation	-
$\nu_\alpha$	Coefficient stœchiométrique de l'élément $\alpha$	-
$\rho$	Masse volumique du combustible	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_0$	Masse volumique de l'air à l'ambiance	kg/m <sup>3</sup>
Cp	Chaleur spécifique	J/g.k
k	Energie cinétique turbulente	
m	Masse	g

r	Rayon du panache	m
V	Volume	m <sup>3</sup>
R	Constante des gaz parfait (8,314)	J/mole.K
Y <sub>i</sub>	Fonction massique de l'élément i	-
μ	Viscosité dynamique du fluide	Pa.s
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	-
ε	Taux de dissipation ; valeur de précision	-
τ <sub>ij</sub>	Composantes du tenseur de contraintes [N/m <sup>2</sup> ]	Pa

### Indices et Exposants

0	Ambiant
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de Carbone
CO	Monoxyde de Carbone
N <sub>2</sub>	Azote
O <sub>2</sub>	Oxygène
H <sub>2</sub> O	Vapeur d'eau
He	Hélium
Soot	Suies

### Abbreviations

LES	Large Eddy Simulation
DNS	Direct Numerical Simulation
FDS	Fire Dynamics Simulator
NIST	National Institut of Standardisation and Technology
CFD	Computational Fluid Dynamics
EVS	The Emergency Ventilation System
TMD	Transportant de Matières Dangereuses

---

# Liste des figures

---

Figure 1.1: Schéma d'un système de ventilation longitudinal.....	8
Figure 1.2: Schéma d'un système de ventilation transversale.....	8
Figure 1.3: Flamme et longueur de mélange dans le tunnel.....	10
Figure 3.1: Schéma de fonctionnement de FDS.....	21
Figure 3.2: Schéma représente la dimension du Tunnel.....	21
Figure 3.3: Evolution de la température pour les cas simulés.....	29
Figure 3.5: Temps de calcul pour les cas simulés, 1, 2, 3, 4 et 5.....	30
Figure 3.9: Profile de puissance pour $v=20\text{m/s}$ .....	32
Figure 3.9.b: Profile de puissance pour $v=30\text{m/s}$ .....	33
Figure 3.9.c: Profile de puissance pour $v=50\text{m/s}$ .....	34
Figure 3.10 : Schéma d'un tunnel routier muni d'une ventilation longitudinale.....	35
Figure 3.11 : Evolution de la vitesse longitudinale U par rapport à la longueur du tunnel pour différentes vitesses d'insufflation, après 07 s de simulation.....	36
Figure 3.12 : Schéma d'un tunnel routier muni d'une ventilation transversale.....	39
Figure 3.13 : Evolution de la vitesse longitudinale U par rapport à la hauteur du tunnel pour différentes vitesses d'insufflation, après 20 s de simulation.....	40
Figure 4.2 : Volume de contrôle dans le cas 2D.....	47
Figure 4.3 : Visualisation des points utilisés avec le schéma Quick.....	49
Figure 5.1 : Vue d'ensemble du domaine de calcul.....	56
Figure 6.a : Profils de température et de concentration de CO2 moyennes à $v = 20\text{m/s}$ , $t = 300$ s.....	58
Figure 6.b : Profils de température et de concentration de CO2 moyennes à $v = 20\text{m/s}$ , $t = 300$ s.....	58
Figure 7.a : Profils de température et de concentration de CO2 moyennes à $v = 30\text{m/s}$ , $t = 300$ s.....	58
Figure 7.b : Profils de température et de concentration de CO2 moyennes à $v = 30\text{m/s}$ , $t = 300$ s.....	59
Figure 8.a : Profils de température et de concentration de CO2 moyennes à $v = 50\text{m/s}$ , $t = 300$ s.....	59
Figure 8.b : Profils de température et de concentration de CO2 moyennes à $v = 50\text{m/s}$ , $t = 300$ s.....	59
Figure 9.a : Profils de température et de concentration de CO2 à $x = 100$ m, $v = 20$ m/s.....	60
Figure 9.b : Profils de température et de concentration de CO2 à $x = 100$ m, $v = 20$ m/s.....	60
Figure 10.a : Profils de température et de concentration de CO2 à $x = 100$ m, $v = 30$ m/s.....	60
Figure 10.b : Profils de température et de concentration de CO2 à $x = 100$ m, $v = 30$ m/s.....	62
Figure 11.a : Profils de température et de concentration de CO2 à $x = 100$ m, $v = 50$ m/s.....	62
Figure 11.b : Profils de température et de concentration de CO2 à $x = 100$ m, $v = 50$ m/s.....	63
Figure 12.a : Profils de température et de concentration de CO2 à $x = 300$ m, $v = 20$ m/s.....	64
Figure 12.b : Profils de température et de concentration de CO2 à $x = 300$ m, $v = 20$ m/s.....	64



Figure 13.a : Profils de température et de concentration de CO <sub>2</sub> à x = 300 m, v = 30 m/s....	64
Figure 13.b : Profils de température et de concentration de CO <sub>2</sub> à x = 300 m, v = 30 m/s ....	65
Figure 14.a : Profils de température et de concentration de CO <sub>2</sub> à x = 300 m, v = 50 m/s....	65
Figure 14.b : Profils de température et de concentration de CO <sub>2</sub> à x = 300 m, v = 50 m/s ...	65
Figure 15.a : Profils de température et de concentration de CO <sub>2</sub> moyennes pour 100 MW, t = 300 s .....	66
Figure 15.b : Profils de la température et de concentration de CO <sub>2</sub> moyennes pour 100 MW, t = 300 s .....	66
Figure 16.a : Profils de la température et de concentration de CO <sub>2</sub> moyennes pour 20 MW, t = 300 s .....	67
Figure 16.b : Profils de la température et de concentration de CO <sub>2</sub> moyennes pour 20 MW, t = 300 s .....	67
Figure 17.a : Profils de la température et de concentration de CO <sub>2</sub> à x = 300 m, v = 20 m/s.	68
Figure 17.b : Profils de la température et de concentration de CO <sub>2</sub> à x = 300 m, v = 20 m/s.	69
Figure 18.a : Profils de la température et de concentration de CO <sub>2</sub> à x = 300 m, v = 30 m/s.	69
Figure 18.b : Profils de la température et de concentration de CO <sub>2</sub> à x = 300 m, v = 30 m/s.	70
Figure 19.a : Profils de la température et de concentration de CO <sub>2</sub> à x = 300 m, v = 50 m/s.	70
Figure 19.b : Profils de la température et de concentration de CO <sub>2</sub> à x = 300 m, v = 50 m/s.	70

---

## Liste des tableaux

---

Tableau 1.1 : Incendies de dimensionnement retenus par l'instruction technique .....	9
Tableau 3.1 : Millage, température et temps de calcul pour cinq cas .....	28
Tableau 3.2 : Températures Maximales obtenues par FDS et par la corrélation de Heskestad	31
Tableau 3.3 : Tableau récapitulatif des différentes situations de migration des fumées .....	37
Tableau 4.2 : Coefficients de diffusion et termes sources pour les variables de l'écoulement ( $\emptyset$ ) .....	46
Tableau 5.1 : Dimension des trappes d'extraction .....	56
Tableau 5.2 : Compartiment de l'ouvrage étudié .....	56

---

# Table de matières

---

---

<b>Introduction Générale</b> .....	1
------------------------------------	---

---

## **Chapitre 1 : Généralités sur les incendies en tunnel**

---

1 Les risques de l'incendie en tunnel routier .....	6
1.1 La ventilation en tunnel.....	7
1.1.1 Stratégie de ventilation longitudinale.....	7
1.1.2 Stratégie de ventilation transversale.....	8
1.2 Stratification des fumées dans un tunnel.....	9
1.3 Méthodes d'investigation.....	10
1.3.1 Les expériences grandeur nature.....	10
1.3.2 Les expériences sur maquettes.....	11
1.4.3 Les expériences numérique.....	11

---

## **Chapitre 2 : Travaux antérieurs**

---

## **Chapitre 3 : Simulation de la dynamique des fumées avec le code FDS : Application à une géométrie type tunnel du Bouira**

---

3.1 Modèles présents dans FDS .....	19
3.1. 1 Modèle hydrodynamique .....	19
3.1.2 Les modèles de turbulence.....	20
3.1.2.1 Modèle $k - \varepsilon$ et ses variantes .....	20
➤ Modèle $k - \varepsilon$ Standard .....	20
➤ Modèle $k - \varepsilon$ RNG .....	21
➤ Modèle $k - \varepsilon$ Realizable .....	22
3.1.2.2 Modèle LES (Large Eddy Simulation) .....	22
3.1.3 Modèle de combustion .....	23
➤ Modélisation de la combustion sur FDS de la présente étude .....	23
3.2 Définition du problème .....	25
3.3 Présentation de fichier Input sur FDS.....	26
3.4 Maillage.....	26
3.5 Résultats générés par le code FDS et recherche de conditions critiques de désenfumage .....	27
3.5.1 Choix du maillage et étude de sensibilité .....	27
➤ Étude de sensibilité et validation.....	27
3. 5.2 Flux de chaleur mis en jeu lors d'un incendie .....	31
➤ Effet de la vitesse d'extraction sur le dégagement de chaleur .....	32
3.6 Validation du code FDS (stratégie longitudinale) .....	34
3.6.1 Simulations et résultats.....	34
3.6.1.1 Conditions initiales et aux limites .....	34
3.6.1.2 Evaluation de la vitesse critique.....	35

3.7 Validation du code FDS (stratégie transversale) .....	37
3.8 Modélisation de la stratégie transversale .....	38
3.8.1 Simulations et résultats .....	38
3.8.1.1 Conditions initiales et aux limites .....	38
3.8.1.2 Evaluation de la vitesse de confinement.....	38
<hr/>	
<b>Chapitre 4 : Élaboration d'un code CFD pour simuler la propagation de la fumée dans un tunnel routier</b>	
<hr/>	
4.1 Equations du phénomène étudié .....	42
4.1.1 Conservation de la masse.....	42
4.1.2 Conservation de la quantité de mouvement.....	42
4.1.3 Conservation des espèces .....	42
4.1.4 Conservation de l'énergie.....	43
4.1.5 Equation d'état et propriétés thermo-physiques.....	43
4.1.6 Hypothèses simplificatrices .....	44
4.2 Récapitulation des équations de transport.....	45
4.2.1 Méthode des volumes finis .....	46
4.2.2 Forme générale de l'équation discrétisée .....	46
4.3 Evaluation des flux aux façades des cellules de contrôle .....	47
4.4 Schéma QUICK.....	49
4.5 Traitement du couplage pression-vitesse .....	50
4.6 Convergence .....	51
4.6.1 Procédure de Calcul.....	51
4.7 Traitement des limites du domaine.....	52
4.8 Relaxation et convergence .....	52
4.9 Séquences de calcul .....	53
<hr/>	
<b>Chapitre 5 : Résultats et interprétations</b>	
<hr/>	
5.1 Description du modèle physique .....	54
5.2 Conditions aux limites .....	56
5.3 Résultats générés par le code élaboré et FDS.....	56
5.3.1 Evolution de la température et de la concentration de CO <sub>2</sub> le long du tunnel...56	
5.3.2 Effet du nombre de trappe sur le comportement des fumées.....	59
• Scénario 1: mesure à 100 m, V = 20 m/s, puissance = 100 MW.....	59
• Scénario 2: mesure à 100 m, v = 30 m/s, puissance = 100 MW .....	60
• Scénario 3: mesure à 100 m, V = 50 m/s, puissance = 100 MW.....	61
• Scénarios 4, 5 et 6: mesure à 300 m, v = 20, 30 et 50 m/s, puissance = 100 MW .....	63
5.3.3 Effet de vitesse de soufflage sur la distribution de la température et CO <sub>2</sub> .....	65
5.3.4 Effet de la puissance sur la température des fumées et de la concentration de CO <sub>2</sub> dans la fumée .....	67
<hr/>	
<b>Conclusions</b> .....	72
<b>Bibliographie</b>	
<b>Annexe</b>	

# Introduction Générale

---

# Introduction Générale

---

Les tunnels, quelle que soit leur type, sont exposés chaque année à des risques (incendie, inondation...) et sont amenés à causer des dommages à la vie humaine et aux matériels utilisés dans les installations. Les dommages causés montrent qu'une évaluation particulière de la protection contre l'incendie dans ces installations doit être réalisée. Corrélativement, des recherches doivent être entreprises pour mieux quantifier ces risques et essayer d'apporter des solutions crédibles au problème posé.

Un tunnel est un ensemble d'éléments qui peuvent avoir une incidence sur les choix en matière de ventilation. En particulier, la longueur, le type de trafic, la configuration des trappes d'extraction, la façon dont est assurée l'exploitation, ont une influence déterminante. Du point de vue aéraulique, un tunnel se distingue d'un bâtiment essentiellement du fait de l'existence de courants d'air longitudinaux et parce que les débits de renouvellement d'air y sont très grands, de l'ordre de centaine de mètres cubes d'air par seconde, soit 10 à 100 fois plus que dans la plupart des locaux à usage d'habitation ou industriel. Les contraintes qui déterminent le choix du système de ventilation sont les impératifs de sécurité contre l'incendie en tunnel [1].

La plupart des incendies peuvent se produire en tout endroit du tunnel particulièrement les tunnels routiers, avec n'importe quel type de véhicule et de chargement du véhicule par défaillance technique (échauffement anormal, court-circuit,...) et les matériaux et les installations de l'espace de circulation lui-même. Les caractéristiques de l'incendie seront fortement variables d'un cas à l'autre. La puissance thermique d'un incendie de véhicule varie entre moins de 2 MW (petit incendie de véhicule de tourisme) et 200 MW (incendie d'une citerne d'hydrocarbures) [1].

La fumée d'un feu peut, non seulement, réduire la visibilité et causer une évacuation plus lente mais les gaz toxiques contenus dans la fumée peuvent être mortels. Les risques provoqués par une fumée du feu sont plus critiques dans les longs tunnels qui peuvent être en mass occupés par plus véhicules et suivant le temps d'exposition.

Les programmes de recherche sur les feux se focalisent sur la compréhension des phénomènes physico-chimiques et leurs effets sur les équipements en se basant sur des reproductions expérimentales sur des maquettes accompagnées d'un développement de la modélisation. L'outil numérique peut jouer un rôle important dans l'analyse des résultats expérimentaux.

La ventilation en tunnel a pour objectif, en situation normale d'exploitation, de maintenir la qualité de l'air au niveau requis. En cas d'incendie, elle a pour rôle de mettre les usagers à l'abri des fumées pour qu'ils puissent évacuer le tunnel et, dans un second temps, de permettre l'intervention des services de secours et de lutte contre l'incendie. La visibilité et la température sont les facteurs clés de l'évacuation des usagers et du personnel dans un tunnel.

En ventilation transversale ou en ventilation longitudinale avec extraction massive, quand il s'agit de s'assurer de la vitesse longitudinale du courant d'air selon les régimes de ventilation des différents cantons pour en déduire le mouvement des fumées, il est nécessaire de faire des calculs de caractérisation de l'écoulement.

L'incendie dans les milieux confinés ou semi-confinés tels que dans les tunnels de Métro pose un risque majeur pour la construction, le matériel et les occupants à cause des hautes températures et des fumées toxiques. Les phénomènes de propagation de feu et de fumée dans les tunnels de métro sont très complexes en comparaison avec ceux des tunnels routiers à cause de l'architecture de l'ouvrage, des systèmes de ventilation adoptés et les locaux de surveillance..., qui rendent difficile ou pratiquement impossible de concevoir une stratégie de sécurité globale pour tout le tunnel de Métro. Nous nous intéressons dans ce travail à une adaptation d'une stratégie de ventilation par trappes appliquées à un tunnel routier.

Le développement de code de calcul pour une caractérisation de l'écoulement des fumées selon les conditions données est très complexe et nécessite des efforts considérables du fait de l'interaction entre différents phénomènes physico-chimiques qui interviennent dans ces écoulements.

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

Notre étude s'intègre dans le cadre d'une initiation à la recherche. Elle porte sur le déroulement et les conséquences d'un feu dans un tunnel routier et ventilé. L'objectif global de l'étude est la compréhension et la description du mécanisme de propagation des fumées dans une configuration avec une ou plusieurs trappes, situées en différents endroits par rapport à la longueur du tunnel. On s'intéresse au contrôle et à la propagation des fumées lors d'un incendie, en s'appuyant sur des simulations numériques réalisées à l'aide d'un logiciel élaboré et un code commercial disponible de simulation des écoulements type feu et fumées FDS (Fire Dynamique Simulator). Une comparaison entre les résultats numériques est réalisée pour évaluer les performances du code élaboré et utilisé dans des problèmes similaires.

Cette mémoire est composée de cinq chapitres :

Après une introduction, dans un premier chapitre, on rappellera quelques généralités sur les incendies en tunnel routier dont les risques pour les usagers se trouvant dans le tunnel et les conditions de mise en sécurité. On définira ensuite les stratégies de ventilation les plus couramment utilisées plus particulièrement la stratégie combiné longitudinale-transversale. Enfin, on décrira les règles qui s'appliquent à la conception des systèmes de ventilation.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les principaux travaux effectués dans le domaine de la propagation de fumées dans les tunnels, ainsi que les approches mathématiques et numériques utilisées.

La problématique est définie dans le troisième chapitre. Une présentation du code de calcul FDS « Fire Dynamics Simulator » est faite. Ce code de calcul basé sur la résolution des équations de la dynamique de l'écoulement dans le tunnel, en présence de zones d'aspiration et d'obstacles, est présenté. Des simulations ont été réalisées pour déterminer les conditions critiques de soufflage pour les deux stratégies de désenfumage. La précision de la prédiction de l'évolution de la température et de la concentration en CO<sub>2</sub> dans les fumées a été vérifiée par le choix de maillage.

Dans le quatrième chapitre nous présentons les détails de la formulation mathématique et la méthode de résolution relatifs au code élaboré pour prédire le comportement des fumées dans le tunnel équipé de trappes au plafond. Ce modèle est utilisé pour simuler le comportement des fumées dans divers scénarios. Ces résultats ont été confrontés à ceux obtenus par le code FDS. La validation est faite avec des résultats obtenus par l'application de relations empiriques au niveau de la source de feu pour les deux codes.



Le cinquième chapitre présente les résultats et les interprétations pour différents scénarios. L'influence de différents paramètres opératoires est mise en évidence. Les conditions de fonctionnement optimal sont présentées.

Enfin nous terminerons cette étude par une conclusion générale dans laquelle nous rappellerons les principaux résultats et leurs interprétations. Ces dernières nous ont permis de d'identifier les scénarios optimum.

# CHAPITRE 1

## Généralités sur les incendies en tunnel

## Généralités sur les incendies en tunnel

---

Les incendies en tunnels représentent une lourde menace pour la vie des personnes et causent des dommages importants aux infrastructures. Le nombre limité d'issues de secours et les difficultés rencontrées par les équipes de sauvetage pour avoir accès aux zones concernées nécessitent d'importants dispositifs de sécurité, à la fois, complémentaires et coordonnés.

Les tunnels et les ouvrages souterrains constituent des moyens de communication importants, non seulement en termes de réduction de temps de parcours, mais également en termes de qualité de vie de riverains, de respect de l'environnement et de soutien à l'économie et à l'industrie locale. D'une manière générale, les grandes voies souterraines sont censées être opérationnelles sans restrictions ni incidents, à toute heure du jour ou de la nuit. Les interruptions provoquées par les accidents, les incidents techniques ou les travaux de maintenances occasionnent rapidement embouteillages et retards et se répercutent sous formes de pertes économiques dans les statistiques relatives aux transports.

Le transfert de fumée dans un tunnel se fait à travers une ou plusieurs ouvertures de différentes tailles, sous l'effet d'un élément externe, ou bien selon la propre dynamique du panache. De même que, sous l'effet de la ventilation, la propagation est fortement imposée par l'effet de brassage interne généré par des ventilateurs s'ils existent dans l'ouvrage (la ventilation a pour rôle principal d'apporter la quantité d'air nécessaire à l'hygiène et au confort des occupants). Son débit dépend des conditions ambiantes et de l'environnement extérieur. L'enjeu de la compréhension du phénomène de propagation est très important. On verra donc dans cette partie les risques dans une situation d'incendie, les moyens de sauvegarde et enfin les diverses méthodes d'étude utilisées pour concevoir ces systèmes.

## **1 Les risques de l'incendie en tunnel routier**

Depuis la catastrophe du Tunnel du Mont-Blanc en 1999 (qui a fait 39 morts) [2], de nombreuses études ont été menées et les experts s'accordent sur les difficultés rencontrées lorsqu'on tente de prévoir le développement de tels incendies. En effet, le comportement du feu et ses différents effets sont très variables en fonction du nombre et du type de véhicules mis en cause, ainsi que de leur cargaison respective. Ainsi, une petite voiture de tourisme (représentant un incendie d'une puissance de 2 MW) ne cause pas les mêmes dégâts d'incendie qu'un camion-citerne rempli d'essence (incendie dont la puissance peut dépasser 200 MW). De plus, les conditions spécifiques à chaque tunnel (géométrie, pente, conditions météorologiques,...) ont beaucoup d'influence sur le feu [2].

Dans tous les cas, les opérations de sécurité s'organisent en deux phases. Dans un premier temps, les usagers doivent quitter le tunnel par leurs propres moyens (phase d'auto-évaluation), puis lorsque les secours arrivent sur place, ceux-ci interviennent pour évacuer les éventuelles personnes encore bloquées dans le tunnel et lutter contre l'incendie pour sauvegarder l'ouvrage. Le premier danger (par ordre chronologique) pour les usagers présents dans le tunnel au moment de l'incendie est l'opacité des fumées dégagées par le feu. En effet, dans un environnement où la visibilité ne dépasse pas quelques mètres, les usagers se perdent et ne trouvent plus les issues de secours.

L'élévation de la température à des valeurs allant jusqu'à 1300 °C ne devient problématique que plus tard [2]. En effet, le rayonnement émis par la flamme peut affecter les personnes qui en sont proches, mais il décroît avec la distance. Loin du foyer, ce rayonnement est faible. La chaleur peut aussi compromettre l'intégrité des équipements d'éclairage ou de ventilation et des objets lourds peuvent se détacher du plafond. Dans des cas extrêmes, on peut même observer un effondrement de la structure. Cela peut poser des problèmes aux pompiers, dans leur lutte contre l'incendie.

D'une manière générale, on peut considérer que le principal danger, vient des fumées qui envahissent rapidement tout l'espace. Malheureusement, l'expérience montre que la plupart des usagers en sous-estiment les risques car le foyer est situé parfois à plusieurs centaines de mètres d'eux et qu'ils n'en perçoivent pas la chaleur. De plus, ils se sentent souvent en sécurité dans l'habitacle de leur véhicule et ne se rendent pas toujours compte que les gaz toxiques et les suies finiront par y pénétrer et qu'à ce moment, il sera trop tard pour évacuer.

Il faut donc ménager du temps aux personnes pour leur laisser prendre conscience de la nécessité de sortir du véhicule puis de leur permettre de se diriger vers les issues de secours qu'ils n'ont en général jamais repérées auparavant. Pour cela, la priorité est donc de maintenir le tunnel exempt de fumées, hauteur d'homme, dans toutes les zones où des personnes sont susceptibles de se trouver, pour assurer leur sécurité et ensuite permettre aussi aux secours de combattre le feu dans des conditions encore acceptables. A cette fin, divers systèmes de désenfumage sont donc développés [2].

## 1.1 La ventilation en tunnel

La ventilation en tunnel a deux objectifs principaux. En situation normale d'exploitation, elle sert à maintenir une bonne qualité de l'air, en limitant les taux des polluants issus des gaz d'échappement et en maintenant une bonne visibilité par le contrôle de l'opacité. C'est ce qu'on appelle la ventilation sanitaire. En situation de crise, elle sert à limiter l'envahissement du tunnel par les fumées le plus longtemps possible. C'est ce qu'on appelle le désenfumage.

Pour atteindre ces objectifs, deux grandes stratégies peuvent être mises en place, dont le choix dépend du type d'ouvrage (mono ou bidirectionnel), de sa géométrie (longueur, section, pente), du nombre de véhicules par jour et du risque de congestion du trafic, ainsi que du passage de poids lourds transportant ou pas des matières dangereuses (TMD).

### 1.1.1 Stratégie de ventilation longitudinale

Cette première stratégie est la plus visible pour le grand public car il peut voir les gros ventilateurs, appelés accélérateurs, disposés le plus souvent au plafond (ou éventuellement sur les piédroits). Ceux-ci servent à repousser toutes les fumées à l'aval de l'incendie (pour un tunnel unidirectionnel, on définit amont et aval en prenant comme référence le sens de circulation). Les usagers bloqués à l'amont se retrouvent ainsi dans une zone libre de fumées et peuvent évacuer à pied vers une issue de secours ou vers la tête d'entrée du tunnel, figure 1.1.

Cette stratégie consiste à appliquer une poussée  $Pv$  effective à l'air contenu dans le tunnel pour créer un courant d'air orienté vers la sortie du tunnel. Il a l'avantage d'être simple à concevoir. Il suffit de s'assurer que les fumées ne se propagent pas à l'amont de l'accident, c'est-à-dire que le courant d'air induit par les accélérateurs est suffisant pour repousser intégralité des fumées vers l'aval. Pour cela, on refoule l'air à des vitesses données qui

assurent le déplacement des fumées vers l'aval de la source de l'incendie. Ce système a aussi l'avantage d'être facile à mettre en œuvre.

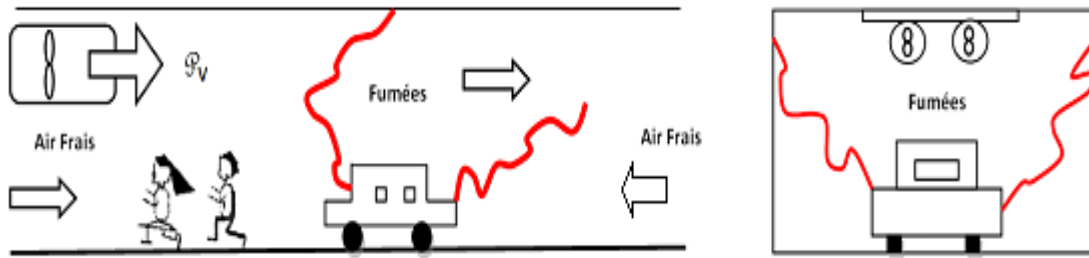


Figure 1.1 : Schéma d'un système de ventilation longitudinale.

Cette stratégie n'est malheureusement pas applicable pour tous les tunnels. En effet, on ne peut recourir à cette méthode, qui enfume une partie du tunnel, dans le cas d'une circulation congestionnée qui empêcherait les usagers à l'aval de sortir du tunnel, ou encore dans le cas d'un tunnel bidirectionnel, où des usagers sont bloqués des deux côtés de l'incendie. Il faut donc recourir à d'autres stratégies.

### 1.1.2 Stratégie de ventilation transversale

Dans ce cas, une idée possible est de profiter du fait que, dans un tunnel, en l'absence de courant d'air dans le tunnel, ou tant qu'il demeure relativement faible, les fumées chaudes ont tendance à se coller au plafond par flottabilité, en préservant une couche d'air frais en partie basse. Ce phénomène naturel est appelé stratification.

Le système de ventilation transversale vise à profiter de cet état et à chercher à le maintenir par extraction et en soufflage de manière réduite de l'air frais à proximité du sol. Pour cela, on peut, par exemple aménager deux gaines dans un faux-plafond: la première est percée de trappes et sert à aspirer l'air vicié, la seconde est reliée aux systèmes de soufflage près du sol et injecte de l'air frais dans le tunnel, figure 1.2.

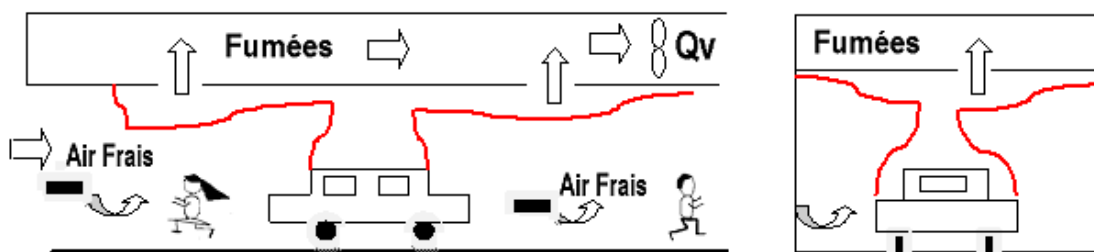


Figure 1.2: Schéma d'un système de ventilation transversale.

Pour que ce système soit efficace, il faut que l'extraction en plafond soit suffisante et répartie, mais aussi que le courant d'air frais soit limité. En effet, le phénomène de stratification est relativement difficile à conserver : il suffit qu'il y ait un courant d'air trop important dans le tunnel pour que les fumées se déstratifient et envahissent tout l'espace.

## **1.2 Stratification des fumées dans un tunnel**

L'écoulement de fumée dans les tunnels est généralement une succession de remplissage suivi de stratification. Dans le cas d'un feu, le flux d'air dans un tunnel est modifié en raison du feu lui-même, l'opération du système de ventilation de secours (EVS) (The Emergency Ventilation System) et le changement du flux de trafic dans le tunnel. Le flux d'air, le taux de dégagement de la chaleur, la ventilation naturelle, la pente de tunnel et le flux de trafic sont paramètres qui affectent le flux de fumée et sa stratification [3].

Sans flux d'air dans la zone de feu, la fumée flottante monte et se diffuse le long du plafond symétriquement des deux côtés de la source de feu. Au-dessous de la couche de fumée, l'air frais est aspiré vers la source de feu en sens opposé de la direction à la fumée en s'étendant. Cette séparation entre les couches chaudes supérieures et le refroidisseur des couches inférieures est nommée "la stratification".

Les effets combinés de convection entre les murs de tunnel et le mélange entre la fumée et la couche d'air refroidissent la fumée. Elle perd par conséquent sa stratification [4]. Après une période, typiquement de 5 à 10 minutes, l'amont et les sections aval du tunnel peuvent être complètement rempli de fumée. Ainsi la stratification est un phénomène transitaire. Cette période est essentielle pour la sauvegarde des utilisateurs de tunnel. De là, la stratification fait partie de la stratégie d'opération de secours, donc le contrôle fiable et robuste de la vitesse de courant atmosphérique longitudinal est essentiel [4].

Le modèle analytique employé dans une telle situation suppose que les gaz chauds sont éjectés à l'emplacement du feu et le flux en aval. Comme ils coulent le long du tunnel, ils se mélangent avec l'air frais et s'étendent avant que les gaz chauds ne remplissent la section entière du tunnel. Ce phénomène de mélange aboutit au refroidissement du gaz et a lieu dans une longueur  $L_m$ , de taille initiale  $r_0$  à  $R$  [4].

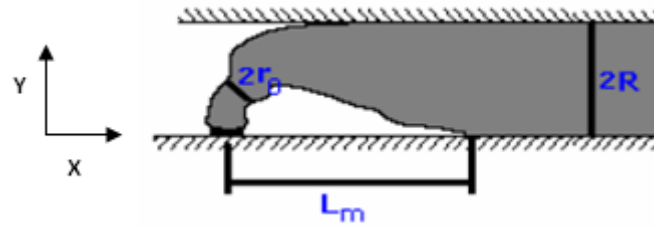


Figure 1.3: Flamme et longueur de mélange dans le tunnel

L'équation gouvernante pour la température du gaz est exprimée par:

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = -\frac{2}{r} \left( (T_g - T_0) \frac{R-r_0}{L_m} \right) \text{ pour } x < L_m \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial x} = 0 \quad \text{pour } x \geq L_m \quad (1.2)$$

La température des gaz au point de feu (la condition initiale) est exprimée par :

$$T_g(0, t) = T_{fire} = \frac{1}{C_{pg} \pi r_0^2} \frac{Q}{\dot{m}} + T_0$$

et

$$T_g(x = \infty, t) = T_0$$

Les valeurs de  $L_m$  peuvent être employées pour représenter l'interaction des gaz de feu avec les éléments se trouvant dans le tunnel lors de l'incendie [4]. C'est-à-dire les véhicules, les aspirateurs, les ventilateurs....

### 1.3 Méthodes d'investigation

Pour atteindre les niveaux de sécurité de plus en plus élevés, demandés par la législation, ainsi que pour aider les concepteurs de ventilation, de nombreuses études ont été menées. Elles sont groupées en trois types principaux:

#### 1.3.1 Les expériences grandeur nature

On peut, à moindre frais, faire des essais sur des ouvrages existants, par exemple avant l'ouverture d'un ouvrage neuf. Cependant, pour ne pas abîmer la structure, il faut une bonne préparation de protection et surtout des sources de feu de faible puissance, ce qui n'est pas forcément représentatif des incendies les plus graves. De plus, les résultats sont conditionnés par les caractéristiques particulières de chaque tunnel et ne sont pas forcément faciles à généraliser.

Enfin, les essais en vraie grandeur ne permettent pas toujours de contrôler tous les paramètres de l'expérience, (notamment les conditions climatiques) et les mesures sont très difficiles à obtenir. Les instruments doivent supporter les très fortes températures, être



positionner dans la section du tunnel tout en faisant attention à ce que leur nombre ne perturbe pas l'écoulement.

### **1.3.2 Les expériences sur maquettes**

Les expériences sur maquettes sont une bonne alternative, puisqu'elles permettent non seulement de maîtriser toutes les conditions mais aussi de faire assez facilement des mesures locales. Il en existe deux types : les maquettes dites chaudes, qui utilisent de la fumée réelle et les maquettes dites froides, qui utilisent des fluides à différentes densités sans les chauffer.

Dans le premier cas, citons les expériences d'Ingason et Werling en 1999 [2], qui utilisent un petit bac de kérosène ou des palettes de bois pour simuler le foyer.

Dans le second cas, citons deux exemples très différents :

- la maquette aéraulique de Valenciennes [2], dans laquelle les fumées sont modélisées par un mélange air-hélium plus léger que l'air ambiant et dont les propriétés sont parfaitement connues,
- la maquette hydraulique de l'Imperial Collège de Londre [2], qui utilise un canal en eau dans laquelle on déverse de l'eau salée pour simuler les fumées. La représentation est alors inversée puisque l'eau salée est plus dense que l'eau et coule au fond du canal.

Malheureusement, pour toutes ces maquettes, la similitude des dimensions ne peut être respectée pour tous les paramètres à la fois. De plus, elles peuvent elles aussi se révéler coûteuses, en particulier lorsqu'on souhaite changer la configuration du tunnel de nombreuses fois.

### **1.4.3 Les expériences numériques**

Pour ce type d'expériences, on a recours à des codes de CFD (Computational Fluid Dynamics) de plus en plus complexes et précis. L'augmentation importante des capacités des calculateurs lors de ces dernières années permet maintenant de mettre en place des modèles détaillés, tout en gardant des temps de calculs raisonnables. Cela permet de faire un grand nombre d'expériences à moindre coût. C'est dans ce type d'expériences que se situe notre travail. Lorsqu'un incendie se déclare dans un tunnel, les 20 premières minutes [2], entre la détection de l'incendie et l'arrivée des secours, sont décisives. On a vu qu'il est primordial de conserver dans le tunnel de bonnes conditions à hauteur d'homme pour permettre aux usagers de s'auto-évacuer. Pour cela, on met en place un système de ventilation.

Pour concevoir et dimensionner des systèmes répondant à la réglementation de plus en plus stricte, il est nécessaire de comprendre les différents phénomènes physiques ayant lieu

dans le tunnel, comme le « backlayering » ou la déstratification. Ces phénomènes sont complexes et doivent être pris en compte dans la modélisation du système. Dans le cas de la ventilation transversale, les deux paramètres importants dans la conception sont le contrôle du courant d'air et l'efficacité du système d'extraction.

# CHAPITRE 2

## Travaux antérieurs

# Travaux antérieurs

---

Les programmes de recherche sur les feux se focalisent sur la compréhension des phénomènes physico-chimiques et leurs effets sur les équipements en se basant sur des reproductions expérimentales sur des maquettes accompagnées d'un développement de la modélisation. L'outil numérique peut jouer un rôle important dans l'analyse des résultats expérimentaux.

De nom deux travaux ont été réalisés pour comprendre le phénomène physique de l'incendie en tunnel. Parmi ces travaux, plusieurs sont axés sur le désenfumage, pour les quelles on peut citer Ono [5] ; Chen Xiaojun [6] ; Nilsen et Log [7] ; Huo et [8] ; Haukur Ingason [9] ; Marc Gandit [10] ; Nmira [11] ; Tong Yan [12] ; Dongil Han [13] ; Romano Borchiellini [14] ; Yang [15].

Karki et [16] ont réalisé une étude par le modèle CFD COMPACT-3D pour étudier un système de ventilation longitudinale dans un tunnel routier. Le code COMPACT-3D utilise le modèle  $k-\epsilon$  pour la turbulence. Ils ont conclu que le code peut prédire le courant d'air produit par le système de ventilation longitudinale et l'approche qui consiste à simplifier la représentation du feu par une source de chaleur volumétrique, ainsi que, la négligence du rayonnement étaient des choix adéquats pour prédire les effets du feu dans les régions lointaines du tunnel.

Beaucoup de tunnels sont équipés de systèmes longitudinaux de ventilation pour évacuer la fumée en cas d'un feu. Carvel [17] ont utilisé différents modèles de combustion pour simuler un feu en tunnel routier et ont étudié l'influence de la ventilation longitudinale sur le développement du feu et la propagation de fumée dans les tunnels. Les résultats étaient relativement satisfaisants, ils ont trouvé que l'effet de la ventilation longitudinale est sensible aux modèles de combustion et à la position de la source de feu.

Chow [18] ont étudié le problème du feu de véhicule qui s'est produit dans un tunnel à Hong Kong. Dans cet incendie, heureusement personne n'a été blessé, mais le trafic a été bloqué pendant plusieurs heures, conduisant à des pertes économiques considérables. Ils ont décrit le feu et ont proposé des solutions pour éviter les incendies à l'avenir, notamment les conditions de sûreté du tunnel, l'exécution des systèmes de lutte contre l'incendie.

Ils ont rapporté dans leur étude les aspects de sûreté relative aux feux des voitures utilisant le GPL (gaz de pétrole liquéfié) et ont conclu que la gestion de sûreté est plus importante que la structure elle-même. Ils ont montré aussi que l'amélioration de la qualité d'air passe par le remplacement des véhicules diesels avec les véhicules roulant au GPL.

Vonizhilov [19] ont utilisé un modèle CFD et le code JASMINE (Analysis of Smoke Movement In Enclosures) pour la simulation d'un feu dans un tunnel causé par un renversement de l'oxyde d'éthylène dans un accident. Cette étude a permis d'évaluer la distribution de la température produite par le feu. Précisément, ils ont évalué les concentrations des polluants et des fumées dans un cas de ventilation naturelle et un cas de ventilation forcée. Ils ont montré que l'utilisation d'un système de ventilation forcée permet l'évacuation des usagers et le sauvetage sur le côté amont du feu en toute sécurité. Aussi, ils ont conclu qu'il est opportun de reconsidérer pour la construction des tunnels de route et de chemin de fer où des produits chimiques et des marchandises dangereuses sont transportées, que des systèmes de ventilation appropriés soient intégrés.

Chen [20] ont examiné l'effet de la quantité de feu sur la propagation des fumées dans les stations de métro. L'étude est réalisée en trois dimensions sur différents scénarios d'incendies se produisant dans la station de métro Gong-Guan du système de transport rapide de Taipei. La station comporte deux étages, l'étage inférieur est une plateforme et l'étage supérieur est un hall. La technique CFD a été utilisée pour examiner le mouvement des fumées et spécialement l'effet de quantité de feu. Ils ont employé le code de simulation numérique CFX4, qui utilise la méthode des éléments finis. Il a été signalé qu'un choix judicieux du modèle de turbulence est essentiel afin d'avoir une meilleure précision des résultats. La source de chaleur et de fumée est représentée par une injection de CO<sub>2</sub> sans combustion. Ils ont déduit que le facteur d'emplacement du feu est déterminant pour le mouvement des fumées.

Afin de comprendre l'écoulement proche du feu dans un tunnel, Hitoshi Kurioka [21] ont réalisé des expériences avec trois types de tunnel ayant des sections transversales rectangulaires. Des effets du changement de l'allongement de la section transversale de

tunnel, la chaleur, le taux de rejets, la vitesse longitudinale de ventilation forcée, et la puissance du feu. Ils ont mesuré la température maximale de la couche de fumée et sa position. Les résultats ont montré que l'utilisation de relations empiriques pour les trois types de tunnel donnent des résultats similaires pour les différents termes considérés.

Olivier Vauquelin [22] ont développé une méthodologie expérimentale en représentant a les fumées produites par un incendie par l'émission continue d'un fluide de faible densité (un mélange d'air et d'hélium) à la température ambiante. Ils ont représenté expérimentalement un feu sans flamme, sans chaleur et sans transferts thermiques. Les auteurs ont montré que cette technique expérimentale représente fidèlement les fumées issues d'un incendie et peut être utilisée pour étudier la propagation des fumées dans une maquette à échelle réduite. Ils ont obtenu des résultats qui concordent avec une géométrie à échelle réelle et la phénoménologie des écoulements est partiellement retrouvée. De plus, ils proposent que cette technique doive maintenant adaptée à l'étude des feux dans des locaux faiblement ventilés.

Crouzix [23] ont introduit plusieurs corrélations dans le modèle dit « Filling box » pour étudier le phénomène dans un local adiabatique et non adiabatique, avec et sans ventilation. Ils ont, en parallèle, mené des expérimentations dans un grand local. Leurs expériences ont permis de déduire qu'il était possible de rendre ce modèle plus complet en incluant les pertes de chaleur au niveau des murs.

Choi [24] ont présenté une analyse détaillée sur les caractéristiques de propagation de fumée dans un tunnel aéré transversalement, en se basant sur des théories qui considèrent la taille du feu et les taux de flux d'air de soufflage et d'extraction. Les simulations ont été réalisées avec FDS (Fire Dynamics Simulator). Les résultats obtenus ont été comparés avec les résultats expérimentaux. Ils sont concorde bien et ils ont montré que la simulation numérique pourrait être un outil utile pour examiner les diverses particularités de propagation de fumée dans des tunnels transversalement aérés.

Stefopoulos et Damigos. [25] ont examiné la conception d'un système de ventilation de secours, qui assurera le contrôle nécessaire de la fumée et des gaz chauffés dans un entrepôt souterrain. Le système de ventilation de secours doit être une partie de l'étude complète de leur projet. L'analyse a montré la nécessité d'intégration de système de ventilation de secours dans ce type d'ouvrage. Ils ont conclu qu'il est important de considérer le dimensionnement d'un système de ventilation de secoure dès la conception de l'ouvrage.

Feng-Dong Yuan et Shi-Jun You [26] ont étudié l'optimisation de la ventilation dans une plateforme souterraine par l'évolution des distributions de la température et de la vitesse. Ils ont montré que le mode de ventilation est lié aux distributions de la température et de la vitesse de soufflage. Leur étude a montré que le modèle de turbulence à deux équations est le plus approprié

Juan Abanto [27] ont employé deux modèles numériques pour calculer la diffusion du feu et de la fumée dans un tunnel routier, le premier est le code FDS et le second est un programme développé. Tous les deux peuvent manipuler des géométries dans trois dimensions. L'application spécifique de ce travail est une étude d'un scénario du feu dans le tunnel de Louis-Hippolyte-Lafontaine qui fonctionne sous un fleuve dans la région de Montréal. La recherche a montré la viabilité de la technologie de CFD comme alternative sérieuse utilisée pour la compréhension du feu et de la propagation de la fumée dans les tunnels. Ils ont montré que les modèles de combustion plus évolués peuvent contribuer à la précision des résultats. Afin de valider les prédictions, des comparaisons quantitatives sont faites avec des données expérimentales à échelle réduite et avec d'autres résultats numériques. Ils ont montré que les simulations numériques peuvent remplacer les expériences coûteuses pour la sécurité des infrastructures.

Ono [5] ont présenté une méthode de contrôle pour la ventilation longitudinale de tunnels de route. Cette méthode consiste en la détermination du nombre de ventilateurs pour assurer un niveau de pollution acceptable. L'étude est basée sur les mesures d'intensité de trafic et des conditions météorologiques dans le tunnel pour évaluer les niveaux de polluants et les tenir dans les limites prédéterminées. La méthode proposée est numérique. Ses résultats sont comparés avec ceux obtenus par une méthode actuellement employée dans le système de ventilation du tunnel Ucka (Croatia). L'algorithme proposé peut prédire les teneurs en polluants et selon la ventilation adaptée, déterminer les limites de ces polluants.

Chen Xiaojun. [6] a essayé de comprendre la propagation des fumées dans un tunnel. Le modèle physique considéré est un tunnel munis de trappes d'extraction situées au plafond. L'évacuation des fumées est transversale. Il a utilisé le code FDS et a supposé que le domaine est divisé en un nombre arbitraire de couches horizontales dans lesquels la température et les propriétés physiques (la densité, la masse volumique...) et les espèces (CO, CO<sub>2</sub>, etc....) sont supposées uniformes. Les résultats ont montré une bonne concordance avec ceux des expériences.

YanfuWanga et al. [28] ont proposé l'étude d'un modèle simple de tunnel avec des ouvertures au toit. Leur étude a décrit le mouvement des produits de combustion et de l'air frais dans un tunnel. Les auteurs ont décrit l'impact du panache sortant ou détaché sur le plafond du tunnel adjacent. Les résultats de simulation montrent que l'évacuation préférée est la celle qui se fait loin, celle dernière peut refouler et se mélanger avec l'air et mène à la chute dans la visibilité et rend défavorable l'évacuation des usagers

Haukur Ingason [9] a représenté une étude sur l'évolution de grands feux dans les tunnels routiers. Il a montré qu'il y a différents liens entre le taux de croissance du feu, les niveaux de taux de dégagement de chaleur et le temps de l'incendie. Ceci signifie que l'évolution du feu doit être représentée avec différentes expressions mathématiques pour différentes périodes de temps. Il a aussi conclu qu'il y a plusieurs facteurs qui influent sur l'évolution du feu dans les tunnels comme la longueur, la densité et la position du feu.

Romano Borchiellini et al. [14] ont présenté une étude sur la ventilation en cas du feu dans les tunnels. Ils ont traité les stratégies de ventilation appliquées. Ils ont utilisé le tunnel de route de Fréjus pour l'application. Ils ont analysé quelques scénarios particuliers à partir du changement de la taille, de la position du feu, et de la pression et la température aux sorties. Ils ont conclu que la configuration optimale du système de ventilation dépend non seulement de la taille du feu et de sa position, mais également de la pression aux sorties (qui est un facteur important dans le cas d'un long tunnel).

L'étude de la propagation de fumées réalisée par Bari [29] sur un tunnel de lien a permis d'évaluer les fractions massiques maximales de l'oxygène, du CO<sub>2</sub> et de CO. Les auteurs ont montré que les obstacles influent fortement sur l'écoulement du panache et qu'ils doivent être pris en compte lors de la conception de la ventilation. Ceci montre que la géométrie de la structure influe aussi sur la nature de l'écoulement.

Yang [15] ont réalisé des expériences sur la stratification et la flottabilité de feu dans un tunnel routier avec des ouvertures situées en bas des deux cotés opposés de la structure. Leurs expériences se sont déroulées avec plusieurs coefficients d'entraînement qui lient le degré de flottabilité et le débit d'injection à la source. Ils déduisent que l'écoulement de fumée est abaissé aux espaces inférieurs du tunnel. Aussi il existe des facteurs qui gèrent le phénomène de l'écoulement comme la vitesse de l'air, la longueur du tunnel et la densité de fumée. Ces facteurs doivent être pris en considération dans la conception de la stratégie de



ventilation pour une meilleure prise en charge de l'incendie dans le tunnel. Ils ont montré aussi que le phénomène de flottabilité a un très grand effet dans les petits tunnels.

La modélisation de la propagation de feu et des fumées dans les milieux confinés est préférée à cause des coûts élevés des expériences à grande échelle et aussi à la disponibilité des moyens informatiques puissants qui permettent les simulations numériques. De nombreux codes ont été mis au point pour étudier les phénomènes de propagation des fumées et de feu, mais jusqu'à maintenant il n'existe pas un code qui permet de simuler tous les phénomènes liés au feu. Les résultats de ces derniers travaux doivent être validés par des résultats d'essais expérimentaux. Les phénomènes de propagation des fumées et de feu sont liés aux systèmes de ventilations utilisés, surtout dans les milieux confinés, ce qui est le cas de tunnels. D'autres études sur le comportement des fumées et du feu dans les milieux confinés et ventilés mécaniquement sont encore indispensables pour l'amélioration des stratégies de sécurité. Cette étude entre dans ce cadre. Elle est réalisée pour une configuration-type tunnel routier.

Lorsqu'un incendie se déclare dans un tunnel, nous avons vu que le danger réside principalement dans la propagation des fumées chaudes, denses et toxiques et que ce danger peut être amplifié d'une manière ou d'une autre.

La modélisation de la propagation des feux dans le tunnel est principalement recherchée. Cette prédominance est liée d'une part aux coûts élevés des expériences à grande échelle, et d'autre part à l'accroissement de la puissance des moyens informatiques, favorisant la simulation numérique. L'objectif visé est de caractériser l'écoulement des fumées à travers la simulation de l'aéraulique dans un scénario de propagation des fumées. La compréhension de l'interaction entre le panache d'incendie qui se développe au-dessus du foyer et la ventilation dans le tunnel est aussi recherchée.

A l'issu de cette recherche bibliographique, il ressort que l'extraction des fumées à travers la multiplication des nombres de trappes, positionnées d'une manière bien étudiée n'a pas été exploitée, ceci justifie le choix de cette étude.

# CHAPITRE 3

Simulation de la  
dynamique des fumées  
avec le code FDS :  
Application à une  
géométrie type tunnel du  
Bouira

---

## Chapitre 3

# Simulation de la dynamique des fumées avec le code FDS : Application à une géométrie type tunnel du Bouira

---

Le mouvement de fumée est un processus instable à travers le tunnel. C'est un phénomène qui affecte la qualité de l'air intérieur. Il peut contribuer d'une façon significative aux déperditions énergétiques. L'amplitude de cette contribution dépend de plusieurs facteurs dont, en particulier, la qualité de construction et les conditions environnementales. La complexité des phénomènes, en matière d'incendie, rend parfois les simulations numériques délicates ou très complexes, surtout s'il est question de simuler tous les phénomènes. La présence d'un nombre élevé d'équations non linéaires rend le calcul long et difficile.

En vue d'une meilleure compréhension des phénomènes physiques qui régissent le phénomène de transit de fumée dans les tunnels. Ce chapitre vise à donner un cadre théorique et méthodologique de modélisation mathématique adoptée dans le code FDS. Ce dernier permet d'obtenir les valeurs des différents paramètres tels que la température, la concentration de fumée... L'utilisation de ce code pour prédire ou étudier les phénomènes liés aux tunnels est devenue de plus en plus fréquente les dernières années avec l'augmentation de la puissance des moyens de calcul et le développement des méthodes numériques.

### 3.1 Modèles présents dans FDS

#### 3.1.1 Modèle hydrodynamique

Il permet de résoudre une forme des équations de Navier et Stokes appropriée aux écoulements à faible nombre de Mach à l'aide d'un algorithme explicite de type prédiction correction d'une précision du second ordre. Pour un écoulement de fluide, les équations gouvernant l'écoulement sont : les équations de continuité, de conservation de la quantité de mouvement et de conservation de l'énergie ...

Les équations associées aux modèles hydrodynamiques s'écrivent en régime transitoire:

- Conservation de la masse :

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

- Équation de conservation de la quantité de mouvement :

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

- Équation de conservation de l'énergie :

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

- Équation d'état pour les gaz parfaits :

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

Où :

$h$ , représente le champ d'enthalpie (fonction de la température);

$u$ , représente le champ de Vitesse ;

$p$ , représente le champ de pression ;

$T$ , représente le champ de température ;

$f$ , représente le terme des forces (forces de gravité...);

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

$\dot{q}'''$ , représente la chaleur dégagée par unité de volume ;

$q$ , représente la densité de flux de chaleur ;

### 3.1.2 Les modèles de turbulence

#### 3.1.2.1 Modèle $k - \epsilon$ et ses variantes

##### ➤ Modèle $k - \epsilon$ Standard

Ce modèle est le plus répandu actuellement et le plus utilisé par les codes de calculs. C'est un modèle semi empirique incluant l'énergie cinétique turbulente  $k$  et son taux de Dissipation. L'équation de conservation en  $k$  est obtenue à partir d'un développement

d'équations moyennées, alors que l'équation en  $\varepsilon$  est obtenue en utilisant des raisonnements mathématiques [33]. Les équations du modèle sont :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_K \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (3.6)$$

Avec :

$G_k$ , Génération de la turbulence par les gradients de vitesses moyennes ;

$G_b$ , Génération de la turbulence par les forces de flottabilité ;

$\sigma_\varepsilon$ , Nombre de Prandtl turbulent pour  $\varepsilon$  ;

$\sigma_K$ , Nombre de Prandtl turbulent pour  $K$  ;

Les constantes  $C_{1\varepsilon}$  et  $C_{2\varepsilon}$  sont des constantes empiriques respectivement égales à 1.44 et 1.92.  $\sigma_\varepsilon$  et  $\sigma_k$  sont égales respectivement à 1.92 et 1.3 (suggérées par Jons & Lauder [30] en (1972),  $\sigma_\varepsilon$  et  $\sigma_k$  sont les termes sources spécifiés. Les valeurs de la constante  $C_{3\varepsilon}$  ont été proposées par Viollet.P.L [30] en 1988 (0 pour  $G_b < 0$  et 1 pour  $G_b > 0$ ).

### ➤ **Modèle $k - \varepsilon$ RNG**

Ce modèle dérivé du modèle précédant a été déduit à partir d'une technique mathématique de rénormalisation des groupes. L'analyse permet d'aboutir à des constantes différentes de celles du modèle standard. Les équations du modèle s'écrivent :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_K \quad (3.7)$$

Les différents termes  $G_k$  et  $G_b$  décrivent les mêmes phénomènes que ceux du modèle standard. La viscosité effective peut être obtenue en résolvant une équation différentielle

associée à la théorie de rénormalisation. Les constantes du modèle deviennent alors :  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.68$ .

### ➤ **Modèle $k - \varepsilon$ Realizable**

Un autre modèle dérivé du modèle  $k - \varepsilon$  standard appelé modèle  $k - \varepsilon$  Realizable, est ainsi utilisé. Le terme Realizable traduit le fait que le modèle satisfait certaines contraintes mathématiques liées à la physique de l'écoulement turbulent. L'utilisation de ce modèle contribue à résoudre les problèmes liés au taux de dissipation. L'équation de conservation de l'énergie cinétique turbulente est identique à celle utilisée dans le modèle  $k - \varepsilon$  standard. Seule l'équation du taux de dissipation est différente.

### **3.1.2.2 Modèle LES (Large Eddy Simulation)**

Les écoulements turbulents sont caractérisés par la présence de tourbillons d'une grande étendue. Les plus grands tourbillons ont typiquement la même taille que la longueur caractéristique de l'écoulement moyen et les plus petits s'occupent de la dissipation de l'énergie cinétique turbulente. On rencontre souvent deux méthodes de modélisation basées sur la résolution des spectres associés à l'écoulement. La première, connue sous le nom de DNS (Direct Numerical simulation), consiste à résoudre tout le spectre d'échelles de turbulence présente dans l'écoulement. Cependant, elle reste limitée pour des cas très particuliers, car elle nécessite des maillages très raffinés et demeure pratiquement non applicable pour les écoulements à nombre de Reynolds élevé.

La LES consiste à simuler exactement les grandes structures de l'écoulement ayant une taille caractéristique supérieure à une échelle «  $l$  » et à modéliser les phénomènes turbulents de taille caractéristique inférieure à «  $l$  ». Cette méthode de calcul, des écoulements turbulents, offre un bon compromis entre le coût de calcul et la description adéquate de la turbulence instationnaire. Les équations de la LES sont obtenues par un filtrage réalisé à l'échelle «  $l$  » des équations de Navier- Stokes.

Dans un code de calcul LES, l'opération de filtrage est réalisée implicitement par le maillage et le schéma numérique : les structures de la turbulence de taille inférieure à «  $l$  » ne sont pas résolues par le calcul mais prises en compte par le modèle LES. Les erreurs de dissipation et de dispersion du schéma numérique contribuent à l'augmentation de la taille du filtre [30].

L'avantage de la technique des LES est qu'elle permet des maillages moins raffinés et des pas de temps larges que ceux du DNS. Les équations employées par les « LES » sont obtenues en utilisant une technique de filtrage des équations de Navier et Stokes par le temps, ce qui permet d'éliminer les structures dont l'échelle est plus petite que le filtre imposé où la taille de maille utilisée dans le calcul. Ce filtre est dépendant de la taille de maille.

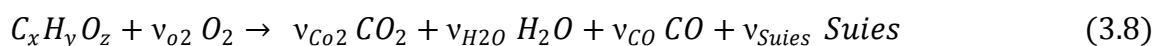
La turbulence est traitée à l'aide de la méthode LES (mode par défaut) dans le cas de cette étude.

### 3.1.3 Modèle de combustion

Dans la plupart des cas, le code FDS utilise un modèle de combustion avec une fraction de mélange qui représente une quantité scalaire conservative d'un gaz en un point donné du domaine. Le modèle suppose que la combustion se produit par un mélange contrôlé et que la réaction du combustible et de l'oxygène est infiniment rapide. La fraction massique de tous les réactants et produits peut être dérivée de la fraction de mélange par le moyen d'équations d'état, ou bien d'expressions empiriques obtenues par analogie entre des analyses simplifiées et des expériences.

#### ➤ Modélisation de la combustion sur FDS de la présente étude

La modélisation du phénomène de la combustion nécessite la connaissance de la cinétique chimique des réactions présentes. Une méthode simplifiée pouvant être utilisée, consiste à considérer le feu comme une source de chaleur volumique. Sur FDS, un feu peut être désigné de deux façons. La première façon consiste à prescrire sur la surface considérée la chaleur dégagée par unité de surface et de temps (HRRPUA). La deuxième façon consiste à spécifier la chaleur de vaporisation, dans laquelle le taux de combustion du combustible dépend de l'énergie nette rétro-cessée de la surface [34]. Dans le cas de cette étude, le modèle de fraction de mélange est utilisé. La combustion d'un hydrocarbure est régie par la réaction suivante :



La spécification propre au code est utilisée, on suppose que le feu ne présente pas de développement ou d'autres phénomènes tels que le réallumage et l'oxydation. Les réactions chimiques sont considérées se dérouler au niveau de la surface où on spécifie la HRRPUA. Ainsi, les coefficients stœchiométriques sont ajustés pour prendre en compte la production de suies et du monoxyde de Carbone au début du calcul. Ces coefficients sont donnés par [34] :

$$v_{o2} = \left( x - \frac{M_f}{2 M_{co}} y_{co} - \frac{M_f}{2 M_c} y_s \right) + \frac{y}{4} - \frac{z}{2} \quad (3.9)$$

$$v_{co2} = x - \frac{M_f}{2 M_{co}} y_{co} - \frac{M_f}{2 M_c} y_s \quad (3.10)$$

et :  $v_{o2} = \frac{y}{2}$  ,  $v_{co} = x - \frac{M_f}{M_{co}} y_{co}$  ,  $v_{Suies} = \frac{M_f}{M_c} y_s$

Ces coefficients doivent être mentionnés dans la ligne de commande réservée à la réaction chimique présente dans le répertoire Data base de FDS. La quantité de CO produite,  $y_{co}$  , correspond à la fraction de combustible convertie en CO. Elle peut être estimée à partir de [34] :

$$y_{co} = \frac{12x}{M_f v_f} 0.0014 + 0.37y_s \quad (3.11)$$

Cet ajustement des coefficients stœchiométriques se fait pour la raison que ces nombres sont fréquemment reportés en termes de quantités massiques [34].

Pour spécifier que c'est un combustible liquide, on écrit dans la ligne de commande de la réaction PHASE='LIQUID'. Après cette étape, il suffit de spécifier la réaction dans la surface correspondante dans le domaine de calcul. Sur FDS, le choix du maillage nécessite une bonne optimisation.

Le FDS, comme tous les logiciels CFD, passe par trois étapes pour simuler un phénomène (figure 3.4). Premièrement le Pré-Processeur qui est un fichier d'entrée de type texte sur lequel on spécifie la géométrie et les conditions aux limites. Ce fichier sera compilé et exécuté par le Solveur qui est dans ce cas FDS. Finalement les résultats des simulations peuvent être visualisés sur le Post-processeur qui est un programme compagnon appelé *Smokeview*. Dans cette étude, on utilise FDS version 4.07, lequel a été publié en mars 2006 [32].



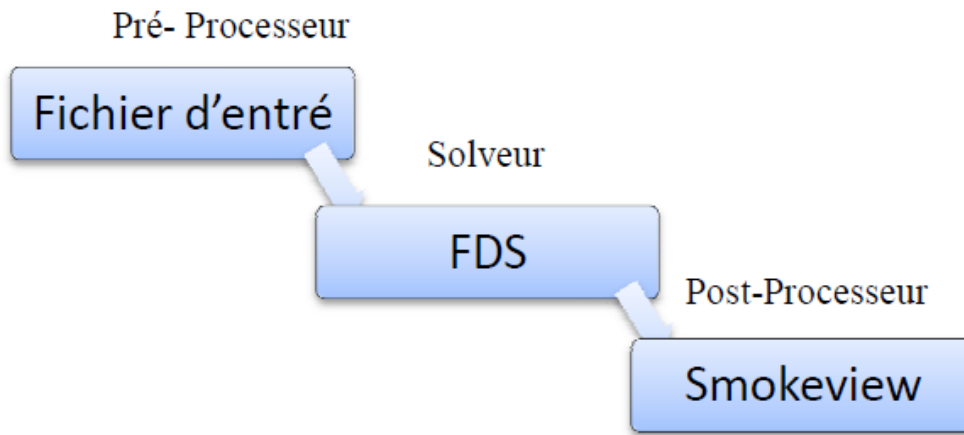


Fig.3.1: Schéma de fonctionnement de FDS

### 3.2 Définition du problème

Le renforcement de la sécurité au feu d'installations urbaines passe par une compréhension des phénomènes impliqués lors de l'incendie et exige le développement d'outils numériques spécifiques d'analyse de sûreté. De plus, une meilleure connaissance de premiers instants de l'incendie permet une détection du feu plus précoce en évitant son grossissement rapide, et la création des conditions favorisant la déstratification des fumées. Le cadre de cette étude s'inscrit dans les programmes de recherches sur la propagation de fumées dans les tunnels. Les simulations sont faites sur le tunnel routier de Bouira de 1200 m de long, 9.75 m de large et 5.5 m de haut. La figure (3.2) présente le schéma du tunnel. L'étude a pour objectif le dimensionnement optimiser de la ventilation dans le cas d'un incendie.

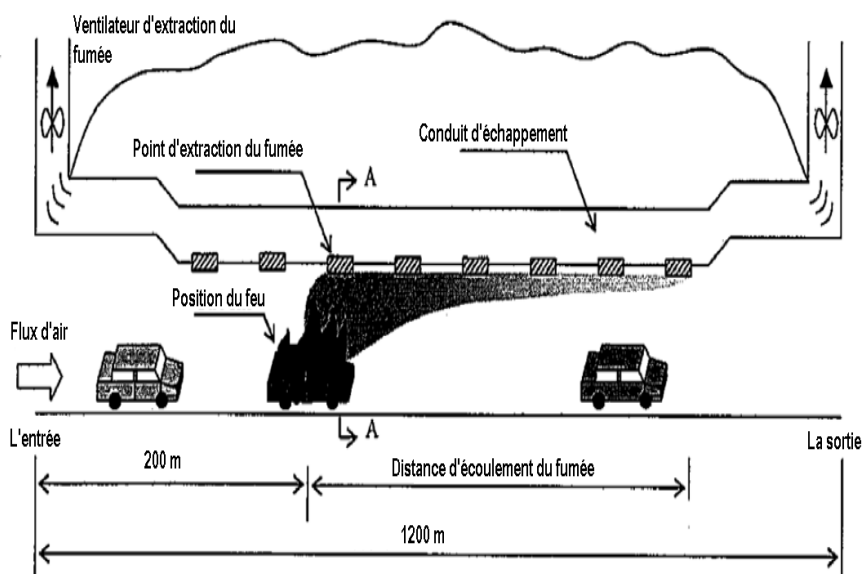


Figure 3.2 schéma représente la dimension du Tunnel.

### 3.3 Présentation de fichier Input sur FDS

Tout le calcul sur FDS repose sur des données enregistrées dans un fichier «*nom.data* » qui représente la première étape avant de procéder au calcul. Les données d'entrée déterminent la taille physique du domaine, le maillage et d'autres géométries additionnelles. L'écriture des données se fait à l'aide de liste de noms intégrés dans le code (GRID, VENT, OBST.....), suivies par des paramètres de repérage. Le domaine de calcul est spécifié par le groupe PDIM. L'attribution d'un système de coordonnées est nécessaire. Les locaux de tunnel adiabatique sont représentés conformément aux dimensions spécifiées. L'inconvénient dans l'utilisation du code FDS réside dans la génération du maillage de surfaces circulaires.

### 3.4 Maillage

La spécification du maillage dépend de la complexité de la géométrie. Sur FDS, le seul maillage existant est structuré, c'est-à-dire de formes de mailles parallélépipédiques. La taille des mailles est spécifiée dans chaque direction du système de coordonnées à l'aide de IBAR (nombre de mailles suivant x), JBAR (nombre de mailles suivant y) et KBAR (nombre de mailles suivant z), et cela après le groupe GRID. Notons qu'il serait mieux pour le calcul, si les mailles étaient cubiques. De plus, il est conseillé de choisir des tailles de mailles de la forme :  $2^l 3^m 5^n$  (pas une règle absolue) [32]. Ceci revient au fait que, l'algorithme de calcul utilise un filtrage statistique, basé sur les transformées de Fourier rapides. On note que, dans notre étude précisionnisme, le calcul est avec un P4 1.73 GHZ et 512 Mo de RAM.

Après l'établissement de ces données sur le fichier correspondant, il faudra spécifier les données de sortie, s'ils sont de même dimensions, des distributions de température ou de concentration...Il est nécessaire de savoir que toutes ces données doivent être validées avant le lancement du calcul. Aucune modification ne pourra être faite après le démarrage du calcul itératif. Aussi le temps de simulation est fixée. L'avantage sur FDS est qu'on peut spécifier une commande de mesure au cours du calcul, ce qui permet de retrouver facilement la distribution temporelle d'une variable (densité, vitesses, flux de chaleur). Donc, son utilisation dans notre étude est fortement recommandée, particulièrement au niveau de l'ouverture d'extraction.

### 3.5 Résultats générés par le code FDS et recherche de conditions critiques de désenfumage

Le code Fire Dynamics simulator (FDS), [35] calcule la température, la densité, la pression, les vitesses de l'écoulement, la composition chimique des fumées et la visibilité dans chacune des cellules du domaine maillé à chaque pas de temps. Il calcule aussi au niveau des surfaces solides dans le cas de la dégradation thermique et la combustion d'un solide, la température, le flux de chaleur, le taux de perte massique et diverses autres grandeurs caractéristiques. Les données retenues dans le cas de l'écoulement des fumées sont généralement la température des gaz, la vitesse, la concentration des espèces gazeuses (CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, ...), la pression, la densité et la fraction de mélange. Certaines données sont directement enregistrées par les programmes tels que le taux de production calorifique, la concentration des espèces émises durant les réactions. Les autres données sont visualisables à l'aide du logiciel *Smokeview*. Smokeview est un logiciel conçu pour visualiser les résultats des calculs numériques produits par des modèles de feu tels que FDS. Il visualise aussi la fumée et autres paramètres physiques de feu. Il montre les visualisations d'écoulement de particules en 2D ou en 3D.

#### 3.5.1 Choix du maillage et étude de sensibilité

##### ➤ Étude de sensibilité et validation

Les simulations numériques sur FDS nécessitent des temps de simulation assez long selon le maillage choisi. Ceci se compte en plusieurs heures ou même des jours pour s'exécuter sur les Pc de dernières générations. Un des facteurs les plus significatifs influençant le temps de calcul est la taille de la maille. Puisqu'il est possible de choisir des tailles de maille raffinées ou larges, il est donc important de déterminer une taille appropriée pour un domaine donné [36].

Dans notre cas, Cinq tailles de maille ont été employées pour étudier l'influence de celles-ci sur la précision des résultats (distribution de température, de concentration de CO<sub>2</sub>) dans le tunnel considéré. Les simulations ont été effectuées sur un modèle physique qui est un tronçon de tunnel de Bouira de 550 m de long, 9.75 m de large et 5.5 m de haut. Pour toutes les simulations, un feu d'heptane avec dégagement de chaleur constant de 100 Mégawatts est employé pour représenter un feu de type camion citerne dans le tunnel.

Le tableau 3.1 montre les cinq cas de simulation considérés avec les tailles et le nombre de maille suivant les trois directions, le nombre total des cellules, les températures maximales atteintes à la section médiane de la source de chaleur et le temps de calcul pour les cinq cas.

Tableau 3.1: Millage, température et temps de calcul pour cinq cas.

cas	Taille (m)			Nb de mailles suivant les trois directions	Nombre total des cellules	Température Max (°C)	Temps de calcul (h)
	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$				
1 <sup>er</sup> cas	1.0	0.4	0.2	550 × 24 × 23	303600	919	7.783
2 <sup>e</sup> cas	1.0	0.4	0.36	550 × 24 × 13	171600	836	3.933
<b>3<sup>e</sup> cas</b>	<b>1.0</b>	<b>0.4</b>	<b>0.92</b>	<b>550 × 24 × 5</b>	<b>66 000</b>	<b>700</b>	<b>3.216</b>
4 <sup>e</sup> cas	1.0	0.8	0.2	550 × 12 × 23	151 800	587	0.954
5 <sup>e</sup> cas	1.0	0.8	0.92	550 × 12 × 5	33 000	490	0.487

Les résultats de simulation pour les cinq cas sont présentés dans la figure 3,3 relatifs à la variation de température des gaz. Ils montrent l'évolution de la température moyenne en fonction de la longueur du tunnel. Les divers maillages montrent que la taille de l'élément a un effet sur la valeur de la température à la section du tunnel correspondant à la position de la source. On remarque que plus le maillage est raffiné plus la température maximale à section de la source est élevée. La figure 3.3 montre aussi que l'effet du maillage sur les résultats de simulations relatifs à la température du fluide de part et d'autre de la section de la source est négligeable.

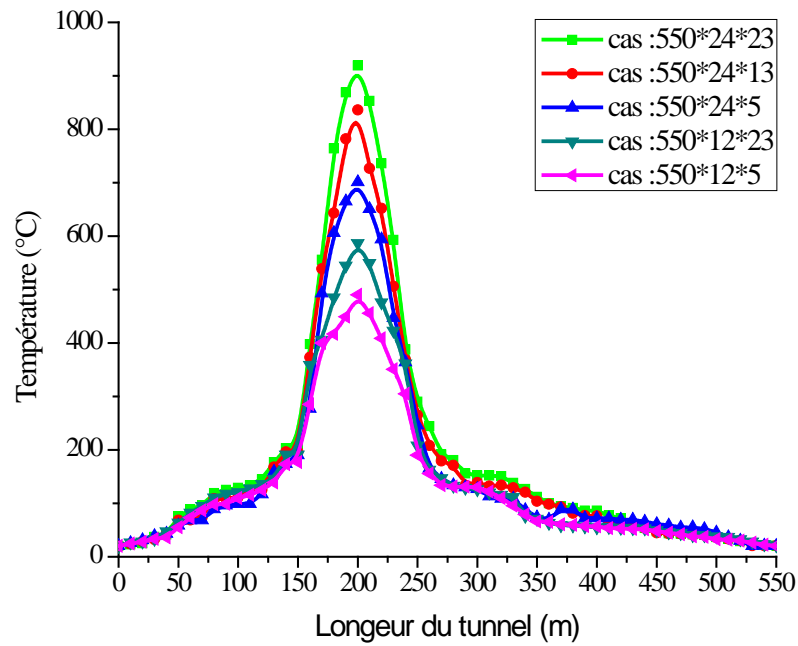


Figure 3.3: Evolution de la température pour les cas simulés.

La comparaison entre les cas 1, 2, et 3 de la figure 3.4, montre que la valeur de la température maximale est affectée par le raffinement du maillage suivant la direction Z, alors que suivant x et y, l'effet est moins important. Ceci s'explique certainement par l'effet de la flottabilité du fluide, qui se manifeste dans la direction Z (direction opposée à la gravité).

Il ya compétition entre la gravité et la flottabilité. Le temps de calcul varie considérablement pour les trois cas.

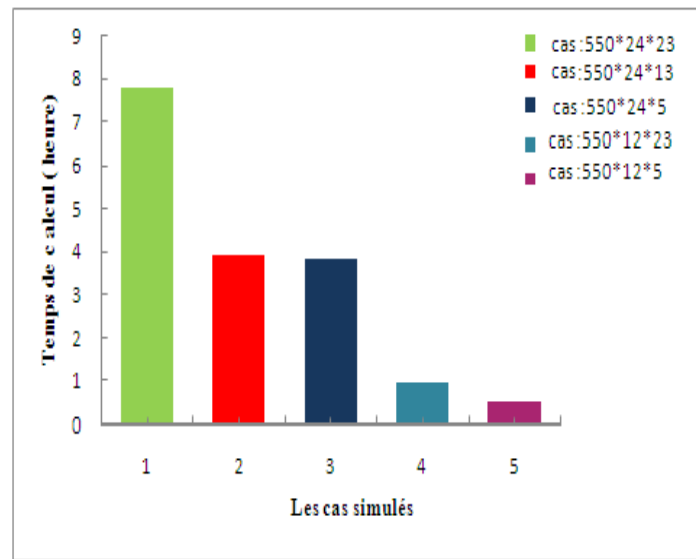


Figure 3.4: Temps de calcul pour les cas simulés, 1, 2, 3, 4 et 5.

Le temps de simulation est un facteur déterminant. Il est plus commode d’opter pour un temps de calcul plus faible dans le cas où les résultats sont très proches les uns des autres. La différence dans les résultats du quatrième et cinquième cas relative à la température se situe au voisinage du foyer où les perturbations sont importantes. Le choix du maillage est important pour une bonne prédiction de la température dans la zone de feu. On a toujours besoin de comparaison pour valider le choix de maillage et sa fiabilité. Heskestad [36] utilise une corrélation empirique pour déterminer la température maximale à la ligne médiane de feu (section transversale médiane de la source de feu). Cette corrélation est utilisée dans notre cas pour valider le choix de notre maillage. La corrélation est définie par la relation suivante:

$$T_{cp} = 9.1 \left[ \frac{T_{\infty}}{g \cdot c_p^2 \cdot \rho_{\infty}} \right]^{1/3} \cdot Q_c^{2/3} \cdot (Z - Z_0)^{-5/3} + T_{\infty} \quad (3.12)$$

$T_{cp}$  : Température à la section médiane de la source de feu ,  $K$  ;

$Q_c$  : flux de chaleur,  $KW$  ;

$(Z - Z_0)$  : hauteur du tunnel,  $m$  ;

$\rho_{\infty}$  : masse volumique de combustible,  $Kg/m^3$  ;

$c_p$  : Chaleur spécifique de gaz,  $KJ/Kg.K$  ;

$T_{\infty}$  : Température ambiante,  $K$  ;

$g$  : Accélération de la gravité,  $m.s^{-2}$  ;

Dans le tableau 3.2, on présente les résultats de la température maximale à la ligne médiane de la source de chaleur obtenus par la corrélation de Heskestad et ceux obtenus par le code FDS.

Tableau 3.2: Températures Maximales obtenues par FDS et par la corrélation de Heskestad.

la corrélation de Heskestad, (°C)	Température Maximale (°C) par FDS				
	Cas1	Cas2	Cas3	Cas4	Cas5
738,9	919	836	<b>700</b>	587	490

Les résultats montrent que la corrélation de Heskestad donne des valeurs de la température plus proches de ceux des cas 2 et 3. Le maillage du cas 3 est plus raffiné que celui du cas 2. La prédiction du cas 3 est plus précise, elle concorde bien avec le résultat de la corrélation. Ceci s'explique par le fait que, plus en raffine le maillage plus le phénomène de combustion et son comportement sont modélisés avec précision.

Le maillage du troisième cas semble être le plus approprié. Ainsi, nous adopterons les dimensions des cellules du troisième cas pour le reste de nos investigations.

### 3. 5.2 Flux de chaleur mise en jeu lors d'un incendie

Afin de mieux appréhender le niveau de sécurité fourni par un système de ventilation, il est nécessaire de connaître l'évolution des flux de chaleur générés lors de l'incendie car la production et la température des fumées y dépendent étroitement . Pour mettre en évidence les différentes puissances de chaleur mis en jeu lors d'un incendie, nous avons considéré un scénario dans lequel on suppose que l'incendie est provoqué par une inflammation d'un camion citerne (transport d'hydrocarbure). On a supposé que le carburant est un pétrole brut. Les paramètres du combustible sont considérés dans le fichier input du programme FDS. Les résultats de simulation sur FDS dans le cas d'une extraction longitudinale, montrent que le taux de dégagement de chaleur de 100 MW est atteint après un temps de 50 s. Ce dégagement est maintenu durant toute la durée de la simulation qu'est de 300 s,

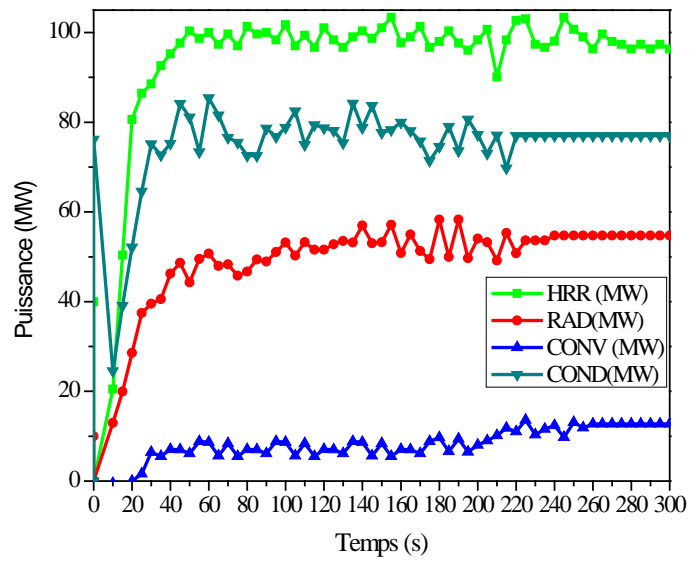


Figure 3.5: Profile de puissance pour  $V=20\text{m/s}$ .

- **Effet de la vitesse d'extraction sur le dégagement de chaleur**

Les figures 3.9, 3.10, 3.11 qui montrent le dégagement de chaleur en fonction du temps lors d'un incendie dans un tunnel avec différentes vitesses d'extraction mettent en évidence, les diverses quantités de chaleur ; le taux de dégagement de chaleur HRR, la chaleur dégagée par rayonnement et la distribution de transfert de chaleur par convection et conduction.



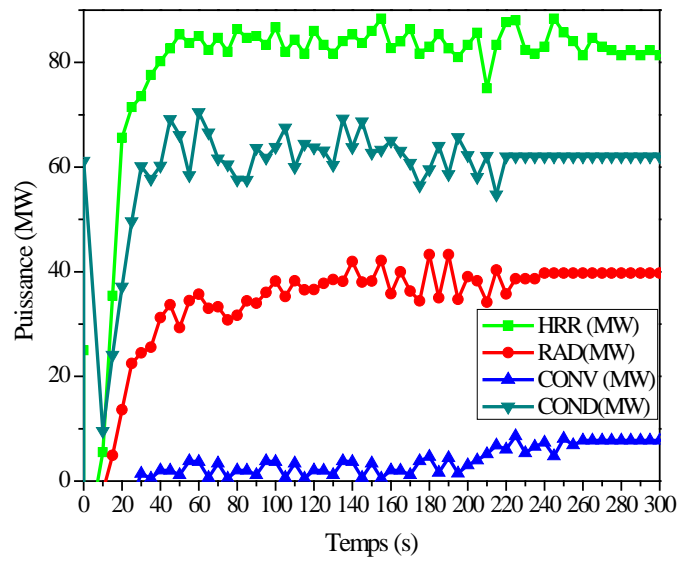


Figure 3.6: Profile de puissance pour  $V=30\text{m/s}$ .

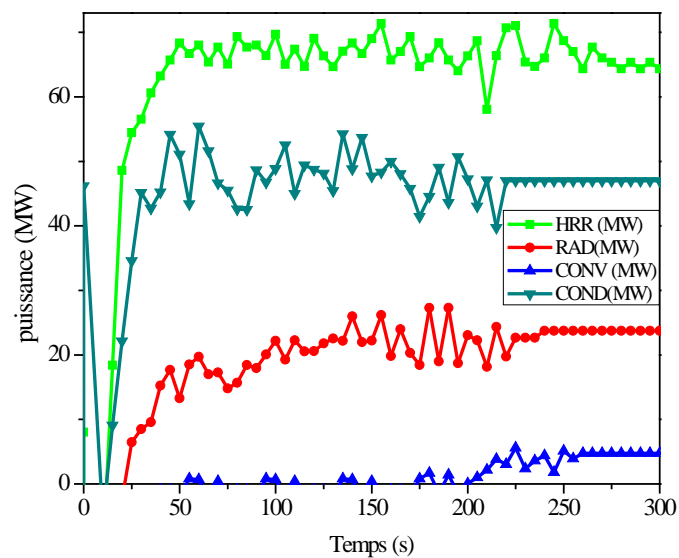


Figure 3.7: Profile de puissance pour  $V=50\text{m/s}$ .

Pour les vitesses d'essai qui sont variés de  $v = 20$  à  $50$  m/s. On observe sur les trois figures 3.5, 3.6, 3.7 qui présentent l'évolution de la puissance de la chaleur à travers l'entrée du tunnel à 300 secondes :

- Une dominance du transfert de chaleur via les murs intérieurs du tunnel, le transfert par rayonnement est comparable à celui par conduction, par contre celui par

convection est relativement moins important par rapport aux deux autres. Aussi on augmente la vitesse d'extraction plus la diminution de la puissance devient importante.

### 3.6 Validation du code FDS (stratégie longitudinale)

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

Pour valider l'utilisation du code FDS4.07, la vitesse critique de désenfumage est obtenue par visualisation en fonction de la puissance du feu aux conditions initiales et aux limites. Un tunnel routier de géométrie parallélépipédique de 200 m de long, 10 m de large et 5 m de hauteur est choisi. La source de chaleur est un feu utilisant l'heptane comme combustible et elle est située au milieu du tunnel.

#### 3.6.1 Simulations et résultats

##### 3.6.1.1 Conditions initiales et aux limites

La figure (3.8) présente le schéma d'un tunnel routier unidirectionnel de 200 m de long, 10 m de large et 5 m de haut. Il est équipé, à l'entrée, d'un système de ventilation mécanique. Le feu est simulé par la combustion de l'heptane, sa puissance thermique par unité de surface est égale à  $25000 \text{ KW/m}^2$ . La température de l'atmosphère et des murs latéraux est prise égale à  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  et la pression dans l'ouvrage est supposée atmosphérique.

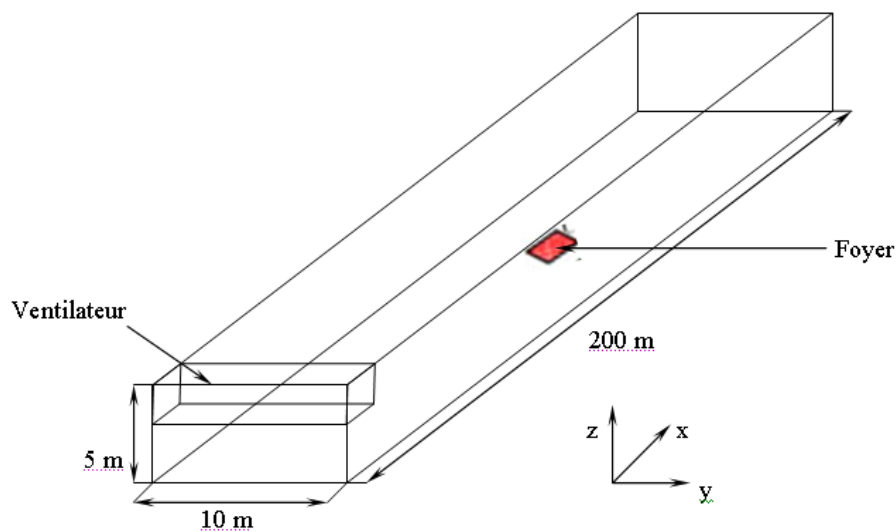


Figure 3.8 : Schéma d'un tunnel routier muni d'une ventilation longitudinale.

### 3.6.1.1 Evaluation de la vitesse critique

A partir de l'analyse de l'évolution de la fumée en écoulement en fonction de la longueur du tunnel, on trouve la vitesse critique.

Pour la puissance du feu de 100 MW ( $25000 \text{ KW/m}^2$  pour une surface de  $4 \text{ m}^2$ ), une série de tests ont été réalisés à des vitesses de soufflage variant entre 5 m/s et 28 m/s pour localiser la vitesse d'insufflation qui générerait le tourbillon caractérisant l'état critique. Ce dernier est identifié approximativement pour les vitesses d'insufflation entre 5 m/s et 28 m/s. Afin de localiser exactement l'état critique et par conséquent la vitesse critique, les résultats de simulation aux vitesses d'insufflation de 5 m/s à 28 m/s sont présentés sur la figure (3.9) concernant les 07 premières secondes.



(a) :  $v=5 \text{ m/s}$



(b) :  $v=10 \text{ m/s}$



(c) :  $v=15 \text{ m/s}$

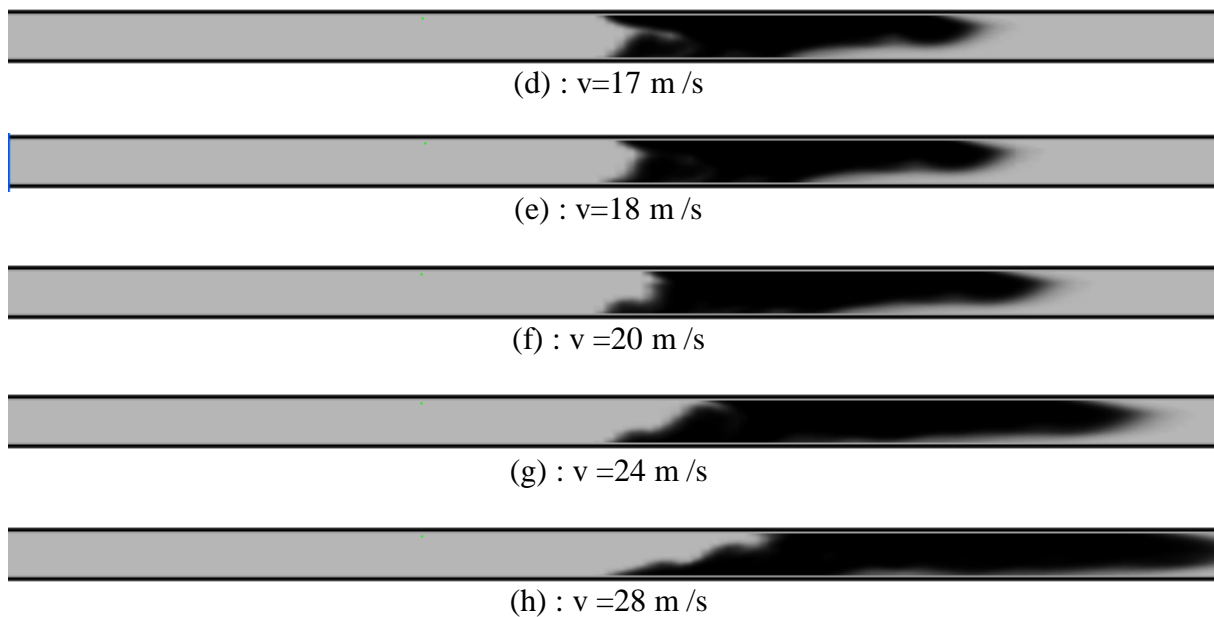


Figure 3.9 : Evolution de la vitesse longitudinale  $U$  par rapport à la longueur du tunnel pour différentes vitesses, après 07 s de simulation.

Dans les figures 3.9 (a) 3.9 (d), on remarque qu'une couche stratifiée de fumées se développe en amont en contre-courant du flux longitudinal. Juste au dessus du foyer à  $x = 100$  m, la vitesse de la fumée en contre-courant augmente et elle est supérieure à celle de l'air insufflé. Le phénomène du *backlayering* est nettement présent à cet endroit. On déduit que la vitesse de l'air est inférieure à la vitesse critique ( $U < U_C$ ).

A la vitesse plus grande ( $v = 18$  m/s), la vitesse de l'air empêche la fumée à se propager en amont de la source et cela est montré à la figure 3.9(e), tandis qu'au dessus du foyer un petit retour de fumée est observé (figure (3.9) (e)). En fait, ce n'est pas un retour de fumée, mais c'est une recirculation qui caractérise l'état critique de la ventilation. Il ressort donc que la vitesse longitudinale de l'air est voisine de la vitesse critique ( $U \approx U_C$ ).

Dans les troisièmes cas, figures (3.9) ((f) à (h)), la vitesse supérieur à 18m/s, l'intégralité des fumées est repoussée en aval de la source sans aucun retour de cette dernière. La vitesse de l'air est donc supérieure à la vitesse de retour des fumées et elle est également supérieure à la vitesse critique ( $U > U_C$ ).

Sur le tableau (3.3), on récapitule les observations faites sur les différentes situations.

Tableau 3.3 Tableau récapitulatif des différentes situations de migration des fumées.

Vitesse d'insufflation	Observation	Déduction
$V = [5,17] \text{ m/s}$	une nappe stratifiée (appelée <i>backlayering</i> ) se développe à contre-courant.	$U < U_C$
$V = 18 \text{ m/s}$	Apparition d'une zone de re-circulation en amont de la zone d'impact au plafond (dans les 07 premières secondes de simulation).	$U \approx U_C$
$V = [20,28] \text{ m/s}$	l'intégralité des fumées est repoussée en aval de la source avec une vitesse longitudinale très supérieure.	$U > U_C$

### 3.7 Validation du code FDS (stratégie transversale)

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

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

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

### 3.8 Modélisation de la stratégie transversale

#### 3.8.1 Simulations et résultats

##### 3.8.1.1 Conditions initiales et aux limites

La figure (3.10) présente le schéma d'un tunnel routier bidirectionnel de 200 m de long, 10 m de large et 5 m de haut. Il est équipé d'un système de ventilation mécanique composé de deux ventilateurs situés au plafond et à une distance de 30 m de part et d'autre du foyer. Les dimensions des trappes sont identiques (3 m×4 m). Le feu est simulé par la combustion de l'heptane de surface égale à 12 m<sup>2</sup>. Sa puissance thermique par unité de surface est égale à 25000 KW/m<sup>2</sup>. La température ambiante et des murs latéraux est prise égale à 20 °C et la pression dans l'ouvrage est supposée atmosphérique.

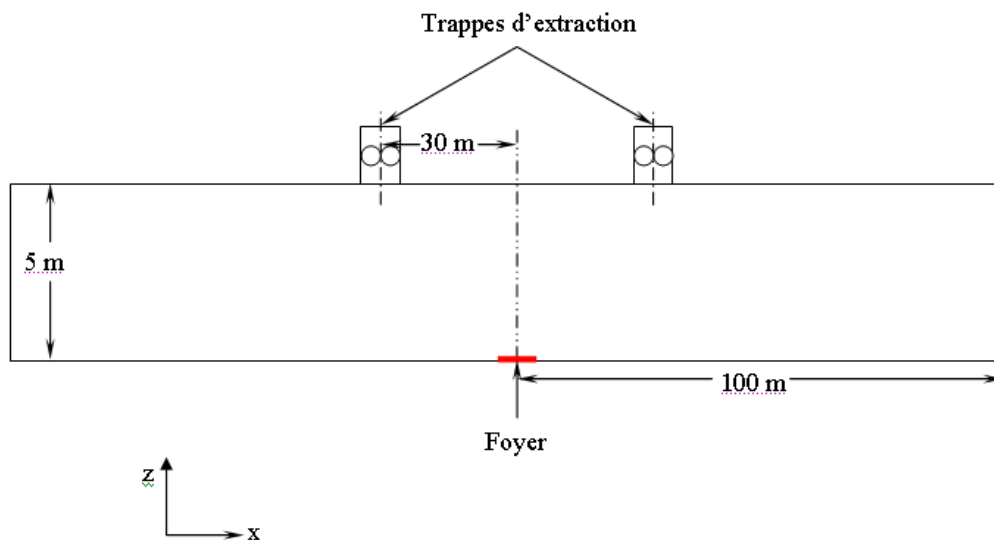


Figure 3.10 : Schéma d'un tunnel routier muni d'une ventilation transversale.

##### 3.8.1.2 Evaluation de la vitesse de confinement

Dans ce cas on va déterminer la vitesse de confinement qui consiste en la mesure de plusieurs vitesses d'extraction pour une puissance donnée (on prend  $Q=100$  MW), la longueur  $L$  de la couche stratifiée de fumée en amont ou en aval de la source de chaleur (puisque la fumée se propage de la même manière dans les deux sens). Cette méthode permet d'évaluer exactement la vitesse de confinement à partir de l'analyse de l'évolution de la fumée de l'écoulement en fonction de la longueur du tunnel  $L$ .

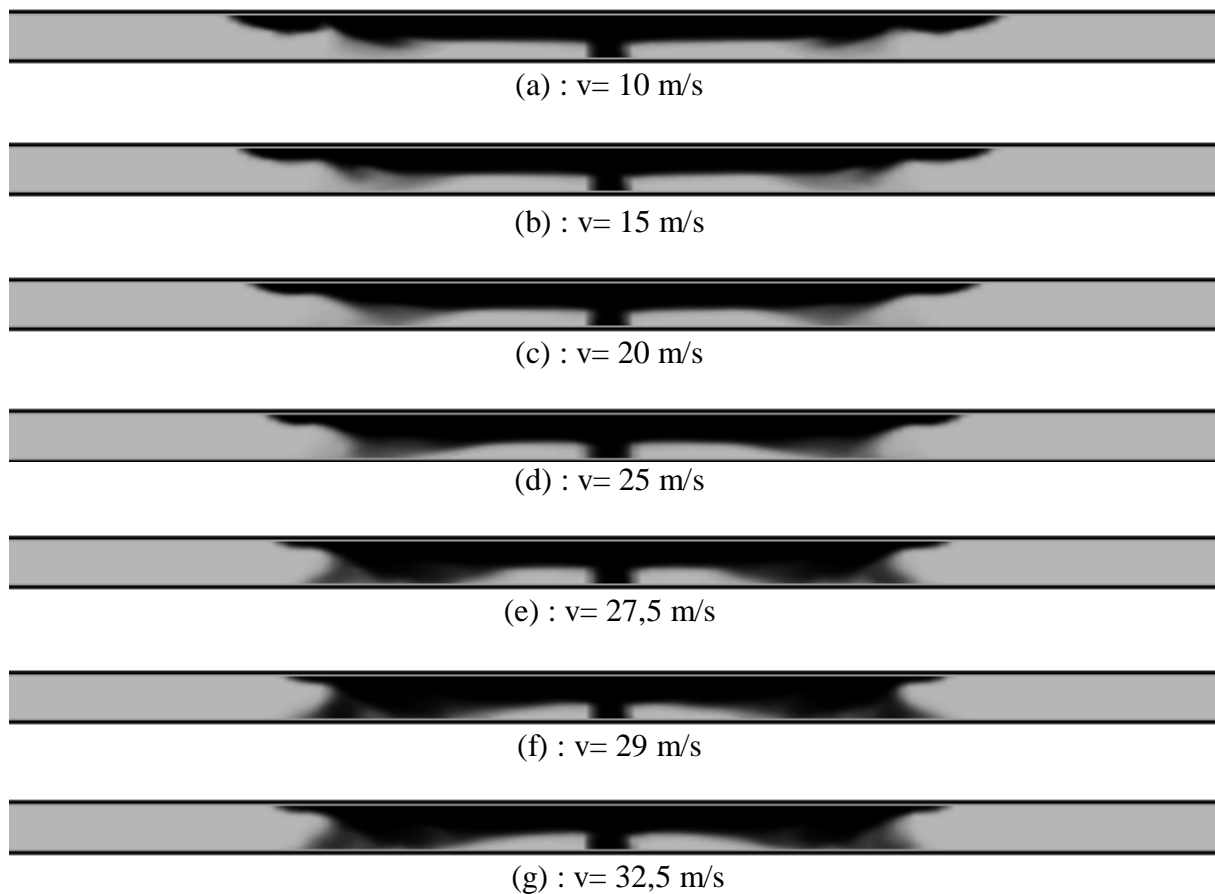


Fig. 3.11 : Evolution de la vitesse longitudinale  $U$  par rapport à la hauteur du tunnel pour différentes vitesses, après 20 s de simulation.

L'évolution de la couche de fumées stratifiées en fonction de la vitesse d'extraction est représentée dans les figures (3.11). On remarque une forte diminution de la longueur de la couche de fumées stratifiées quand on augmente la vitesse d'extraction et cela est observable jusqu'à la vitesse de 29 m/s. A des vitesses d'extraction supérieures, la longueur  $L$  commence à se stabiliser au voisinage de la longueur de 30 m. Cette distance correspond à la distance entre une trappe et le foyer. Il peut être suggéré que le « backlayering » est lié au champ d'extraction créé par les trappes. Par définition la vitesse d'extraction minimale qui permet un emprisonnement de la couche de fumée entre les deux trappes est la vitesse de confinement. Il ressort donc que cette dernière est voisine de 29 m/s.

Dans le cas général, lors d'un départ d'un feu, les produits de combustion s'élèvent sous l'effet des forces de flottabilité pour remplir le local. Ce remplissage est caractérisé par l'apparition des couches de fumées successives qui tendent à descendre verticalement. Ce mécanisme est fréquent dans le cas de feux confinés. Des trappes de fumées peuvent être

installées au plafond du tunnel, pour permettre leur évacuation. Le semi-confinement généré par les trappes permet aux fumées de s'évacuer vers l'extérieur dès qu'elles les atteignent (gaine d'échappement). Le panache de fumées subit un cisaillement brusque à cause de la rencontre de l'air frais ambiant, qui fait apparaître des tourbillons sur le contour du panache. Le panache continue sa propagation dans le milieu ambiant où il se dissipe graduellement. Au niveau de la flamme, avec un remplissage continu du local, l'oxygène nécessaire au maintien de la combustion peut manquer. Dans un milieu totalement confiné, l'extinction aura lieu si l'oxygène présent initialement dans le tunnel est totalement consommé.

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude relative à la dynamique des fumées dans les milieux confinés. Nous aussi visons à caractériser l'écoulement des fumées à travers la simulation du panache air-fumées dans différents scénarios de propagation de fumées en utilisant l'outil numérique commercial FDS « Fire Dynamics Simulator », version 4.07.

Il s'agissait tout d'abord, de réaliser une analyse de sensibilité à la taille du maillage sur le temps de calcul et la précision des résultats. Cette étude de sensibilité à permis de comprendre et de montrer l'influence du maillage suivant la hauteur et la longueur du tunnel sur le temps de calcul et surtout sur la précision des résultats. Avec l'objectif d'évaluer les potentialités du code de calcul FDS pour analyser et optimiser un système de ventilation du tunnel, nous proposons de développer un code de calcul propre qui permet la manipulation des différents paramètres physiques et chimiques du panache de fumées.



# CHAPITRE 4

Elaboration d'un code CFD  
pour simuler la  
propagation de la fumée  
dans un tunnel routier

---

## Chapitre 4

# Elaboration d'un code CFD pour simuler la propagation de la fumée dans un tunnel routier

---

Les incendies dans les milieux confinés, comme les tunnels, constituent un problème complexe, surtout pour le déplacement de la fumée et sa dispersion. Plusieurs scientifiques et spécialistes en incendies considèrent même que les problèmes engendrés par les fumées sont aussi considérables que ceux apportés par le feu [37]. Une des premières causes expliquant les dangers de la fumée, outre sa composition toxique, est certainement son déplacement rapide. Contournant les obstacles, la fumée transmet la chaleur et endommage les matériaux qu'elle effleure. Elle asphyxie et intoxique les occupants, diminue la visibilité et rend les voies de secours impraticables. En bref, elle altère tout ce qui se trouve sur son passage. Ceci sans compter les risques d'embrasement généralisés et d'explosion de fumée qu'elle peut provoquer.

La compréhension des mouvements des fumées est donc essentielle pour les intervenants qui doivent combattre un incendie, effectuer une ventilation efficace et sauver des occupants pris au piège.

Dans le présent travail, nous présentons les étapes permettant l'établissement des équations de base. Pour le phénomène de la propagation de fumée dans un tunnel ou ouvrage souterrain, premièrement on dispose d'un système d'équations dépendant basé sur les lois de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie régime turbulent. L'établissement des équations s'effectue en deux étapes. Dans la première étape, on écrit les équations de bilan dans un volume de contrôle qui conduit à l'écriture des équations locales instantanées.

La seconde étape conduit à discrétiser les équations de bilan en utilisant la méthode volume fini. Finalement, nous proposons la résolution numérique pour résoudre le problème.

## 4.1 Equations du phénomène étudié

On considère que chaque variable  $\phi$  dans le milieu réactif multi composant est décomposée en une partie moyenne  $\tilde{\phi}$ , et une partie fluctuante par rapport à la moyenne  $\phi''$ , Cette représentation n'a de sens que pour des écoulements turbulents statistiquement stationnaires.

Néanmoins, elle est étendue à tous les types d'écoulements turbulents. L'écoulement étant à masse volumique variable, une moyenne pondérée par la masse ou moyenne de Favre est appliquée. Ainsi, toute grandeur  $\phi$  peut s'écrire :

$$\phi = \tilde{\phi} + \phi'' \quad (4.1)$$

### 4.1.1 Conservation de la masse

Elle s'écrit :

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j) = 0 \quad (4.2)$$

### 4.1.2 Conservation de la quantité de mouvement

L'équation de conservation de la quantité de mouvement moyennée s'exprime par :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{u}_i) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{\tau_{ij}}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u_i'' u_j''}) + \bar{\rho} g_j \quad (4.3)$$

En introduisant la pression différentielle  $\bar{P}_d$  qui représente l'écart entre la pression atmosphérique et la pression statique ( $\bar{P}_d = p - p_\infty$ ) et en considérant l'écoulement stratifié au repos, on a :

$$-\frac{\partial p_\infty}{\partial x_i} + \rho_\infty g_j = 0 \quad (4.4)$$

Finalement nous obtenons :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{u}_i) = -\frac{\partial \bar{P}_d}{\partial x_i} + (\bar{\rho} - \rho_\infty) g_j + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\tau_{ij}} - \overline{\rho u_i'' u_j''}) \quad (4.5)$$

### 4.1.3 Conservation des espèces

Le mélange contient plusieurs espèces chimiques, parmi lesquelles on retrouve le combustible, l'air principalement composé d'oxygène ( $O_2$ ) et d'azote ( $N_2$ ) et les produits de combustion que sont le monoxyde de carbone ( $CO$ ), le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) et la vapeur d'eau ( $H_2O$ ). Ces espèces sont susceptibles de réagir entre elles. Les fractions massiques des constituants composant la phase gazeuse sont reliées par la relation suivante :

$$\sum_{\alpha} Y_{\alpha} = 1 \quad (4.6)$$

On écrit les équations de bilan de chacune des espèces afin de caractériser la composition du mélange. La diffusion des espèces obéit à la loi de Fick, ce qui nous permet d'écrire le bilan de l'espèce  $\alpha$  sous la forme :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{Y}_{\alpha}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}_{\alpha}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \overline{\rho D_{\alpha}} \frac{\partial \tilde{Y}_{\alpha}}{\partial x_j} - \overline{\rho u_j'' Y_{\alpha}''} \right) + \bar{w}_{\alpha} \quad (4.7)$$

$\bar{w}_{\alpha}$  ; représente la production / destruction de l'espèce  $\alpha$  due à la réaction de combustion.

#### 4.1.4 Conservation de l'énergie

L'équation de conservation de l'énergie constitue le point crucial du bilan énergétique de l'écoulement dans un feu. En termes d'enthalpie du mélange, elle s'écrit :

$$h = \sum_{\alpha} Y_{\alpha} h_{\alpha} \quad (4.8)$$

Avec :  $Y_{\alpha}$  et  $h_{\alpha}$  sont respectivement les fractions massiques et l'enthalpie des espèces,  $\alpha$  composant le mélange. Si de plus, on suppose que les coefficients de diffusion des espèces chimiques sont égaux, l'équation de conservation de l'énergie s'exprime par :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{h}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{h}) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \overline{\lambda} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_j} - \overline{\rho u_j'' h''} \right) + \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{q}_j^r}{\partial x_j} - \sum_{K=1}^N [\dot{Q}_{conv}]_{IK} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Avec :  $q_j^r$  désigne le flux net de chaleur rayonné.

#### 4.1.5 Equation d'état et propriétés thermo-physiques

Le gaz est considéré comme un gaz parfait. L'équation d'état s'écrit :

$$p = \rho RT \sum_{\alpha} \frac{Y_{\alpha}}{W_{\alpha}} \quad (4.10)$$

Avec :  $W_{\alpha}$  représente la masse molaire de l'espèce chimique  $\alpha$  . L'enthalpie du mélange se décompose en une enthalpie sensible et une enthalpie chimique, de sorte que :

$$h = \sum_{\alpha} Y_{\alpha} \left( \Delta h_{f\alpha}^0 + \int_{T_0}^T C_{p\alpha}(T) dT \right) \quad (4.11)$$

### 4.1.6 Hypothèses simplificatrices

Le modèle élaboré repose sur les hypothèses simplificatrices suivantes.

- Le milieu réactif satisfait la loi des gaz parfaits;
- La loi de Fick est appliquée avec l'approximation d'un mélange binaire (air-fumée);
- Les espèces chimiques sont équi-diffusives;
- Le nombre de Mach est faible. Lorsque le nombre de Mach est élevé, le fluide est soumis à un phénomène de compressibilité car les fluctuations de pression deviennent significatives;
- Le nombre de Lewis est égal à 1. Il est utilisé pour caractériser les écoulements de fluides dans lesquels ont lieu simultanément un transfert de masse et un transfert de chaleur par conduction thermique.

### 4.2 Récapitulation des équations de transport

Le phénomène de propagation de fumées est un écoulement turbulent. Dans les écoulements turbulents, on rencontre des structures de différentes tailles qui ont une certaine durée de vie. Le mouvement moyen est dicté par les grands tourbillons qui contribuent au transport de la quantité de mouvement et de chaleur. Les petits tourbillons sont la conséquence de la conversion de l'énergie cinétique en chaleur par frottement visqueux.

La propagation des fumées en milieu semi-confiné est décrite par les équations générales de la mécanique de fluides données sous la forme généralisée suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi \quad (4.12)$$

Le tableau 4.2 regroupe les termes  $\Gamma_\phi$  et  $S_\phi$  pour chacune des variables  $\phi$ . La solution est obtenue en utilisant la méthode des volumes finis, basée sur le schéma convectif de type Ultra-Sharp associant un schéma décentré d'ordre 3 (schéma QUICK) à une stratégie de limiteur de flux [38]. Le couplage pression / vitesse est résolu grâce à un algorithme basé sur une méthode de projection.

Tableau 4.2: Coefficients de diffusion et termes sources pour les variables de l'écoulement(  $\phi$  ) .

Transport de	$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$
Masse	1	0	0
Quantité de mouvement	$u_i$	$\mu_{eff}$	$-\frac{\partial P_i}{\partial x_j} + (\rho - \rho_\infty)g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right]$
Energie	$h$	$\frac{\mu}{\sigma_h}$	$q_s - q_r$
Fraction massique des espèces	$C_S$	$\frac{\mu}{\sigma_c}$	$w_S$
Energie cinétique turbulent	$K$	$\frac{\mu}{\sigma_K}$	$G - \rho\varepsilon$
Taux de dissipation de l'énergie Cinétique turbulente	$\varepsilon$	$\frac{\mu}{\sigma_\varepsilon}$	$\frac{\varepsilon}{K} (C_1 G - C_2 \rho\varepsilon)$
$\mu = \mu_l + \mu_T$	$u_T = \frac{C_\mu \rho K^2}{\varepsilon}$		$G = G_K + G_b = u_T \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - u_T \frac{g_i}{\rho} \frac{\partial P_i}{\partial x_j}$
$C_u = 0.09$ , $C_1 = 1.44$	$C_2 = 1.92$	$\sigma_K = 10$	$\sigma_\varepsilon = 1.3$ , $\sigma_h = 0.9$ , $\sigma_c = 0.9$

#### 4.2. 1 Méthode des volumes finis

Pour la résolution, nous utilisons la méthode des volumes finis pour discrétiser le système d'équations du problème. Cette méthode a été décrite pour la première fois en 1971 par Patankar et Spalding et publiée en 1980 par Patankar [32]. La méthode des volumes finis est une technique de discrétisation qui convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques qui peuvent être résolues numériquement.

Les écoulements dans les feux de combustible se caractérisent par une différence de pression et de vitesse faibles. Ils s'apparentent à la fois aux écoulements compressibles du fait de leur masse volumique très variable et aux écoulements incompressibles car les variations de pression et le couplage pression/densité sont faibles. Les flammes dans les feux de combustible sont instables et très sensibles aux variations extérieures. Ces dernières années, un gros effort a été fait pour la recherche d'algorithmes spécifiques aux écoulements présentant des gradients importants de densité. Ces algorithmes reposent sur l'idée que le champ de pression est indirectement spécifié au travers de l'équation de continuité et que lorsque le champ de pression correct est utilisé dans les équations de quantité de mouvement, le champ de vitesse satisfait l'équation de continuité. L'algorithme qui a servi de point de

départ à de nombreux auteurs est l'algorithme SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure linked Equations) développé par Patankar et Spalding [39] pour les écoulements incompressibles et qui, par la suite, à été étendu pour les écoulements compressibles. Cet algorithme a initié le développement d'autres algorithmes plus élaborés et moins coûteux en temps de calcul tels que SIMPLER (R pour "revised") ou SIMPLEC (C pour "Consistent").

### 4.2.2 Forme générale de l'équation discrétisée

Dans le présent travail, le problème est bidimensionnel. Donc le volume de contrôle est représenté par l'épaisseur  $\Delta x$  et  $\Delta y$ . La forme discrétisée des équations de transport est obtenue en intégrant localement les équations sur chaque volume de contrôle.

L'équation différentielle générale dans le cas 2D instationnaire est la suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y}\right) + S \quad (4.13)$$

Avec :  $u$  et  $v$  sont les composantes de la vitesse de l'écoulement dans les directions  $x$  et  $y$ . Si l'on note :

$$J_x = \rho u \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} ; \quad (4.14)$$

$$J_y = \rho v \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} ; \quad (4.15)$$

avec :  $J_x$  ,  $J_y$  sont respectivement le flux total (de convection et diffusion). On obtient l'équation suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x}(J_x) + \frac{\partial}{\partial y}(J_y) = S \quad (4.16)$$

On intègre l'équation (4.16) sur le volume de contrôle présenté sur la figure 4.2

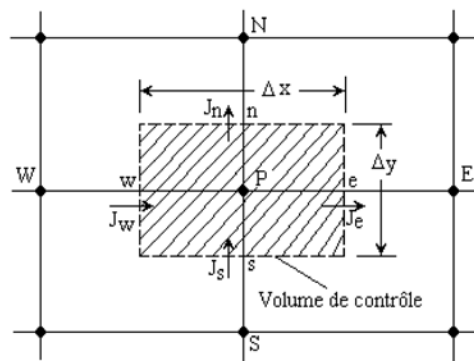


Figure 4.2: Volume de contrôle dans le cas 2D

L'intégration (4.16) donne :

$$\begin{aligned} \frac{(\rho_P^{n+1} \phi_P^{n+1} - \rho_P^n \phi_P^n)}{\Delta t} \Delta x \cdot \Delta y \cdot 1 + (J_e - J_w) + (J_n - J_s) \\ = (S_C + S_P \phi_P^{n+1}) \Delta x \Delta x \cdot \Delta y \cdot 1 ; \end{aligned} \quad (4.17)$$

On a l'équation de continuité pour un problème 2D :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} = 0 \quad \text{avec} \quad F_x = \rho u \quad \text{et} \quad F_y = \rho v \quad (4.18)$$

On intègre l'équation (4.18) sur le volume de contrôle, l'intégration donne :

$$\frac{(\rho_P^{n+1} - \rho_P^n)}{\Delta t} \Delta x \cdot \Delta y \cdot 1 + (F_e - F_w) + (F_n - F_s) = 0 \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} \text{Où :} \quad F_e &= (\rho u)_e \cdot \Delta y \cdot 1 & F_w &= (\rho u)_w \cdot \Delta y \cdot 1 ; \\ F_n &= (\rho u)_n \cdot \Delta x \cdot 1 & F_s &= (\rho u)_s \cdot \Delta x \cdot 1 ; \end{aligned}$$

En soustrayant la relation (4.19) multipliée par  $\phi_P$  de la relation (4.17), on obtient :

$$\begin{aligned} (\phi_P - \phi_P^0) \frac{\rho_P^0 \Delta x \cdot \Delta y \cdot 1}{\Delta t} + (J_e - F_e \phi_P) - (J_w - F_w \phi_P) + (J_n - F_n \phi_P) - (J_s - F_s \phi_P) \\ = (S_C + S_P \phi_P) \Delta x \Delta x \cdot \Delta y \cdot 1 \end{aligned} \quad (4.20)$$

On obtient, finalement, la forme générale de l'équation discrétisée :

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b \quad (4.21)$$

### 4.3 Evaluation des flux aux façades des cellules de contrôle

L'évaluation des flux diffusifs et convectifs aux interfaces de la cellule de contrôle s'effectue d'une manière classique à l'aide d'un schéma aux différences centrées du second ordre. Pour pouvoir déterminer la valeur  $\phi$  aux interfaces, il convient de relier la loi de variation de cette variable au nombre de Peclet  $P_e$ , ce qui permet de caractériser le rapport entre les effets diffusifs et convectifs. Les flux sont supposés uniformes sur chacune des façades des volumes de contrôle et sont liés à la variation des grandeurs entre deux volumes par une relation de la forme :

$$J_i - F_i \phi_P^{n+1} = \pm a_i (\phi_i^{n+1} - \phi_P^{n+1}) ; \quad i = w, e \quad (4.22)$$



Les coefficients  $a_i$  sont calculés à l'aide d'un schéma établi à partir d'une analyse de l'équation de transport dans un cas unidimensionnel stationnaire sans terme source [39]. La solution exacte donne une expression exponentielle de  $a_i$ . Des approximations ont été introduites pour simplifier l'expression des  $a_i$  qui s'écrivent globalement :

$$a_i = D_i A(|P_e|) + \max(0; \pm F_i) \quad (4.23)$$

Où la fonction  $A(|P_e|)$  décrit le schéma utilisé. Les principaux schémas nous donnent pour la fonction  $A(|P_e|)$  :

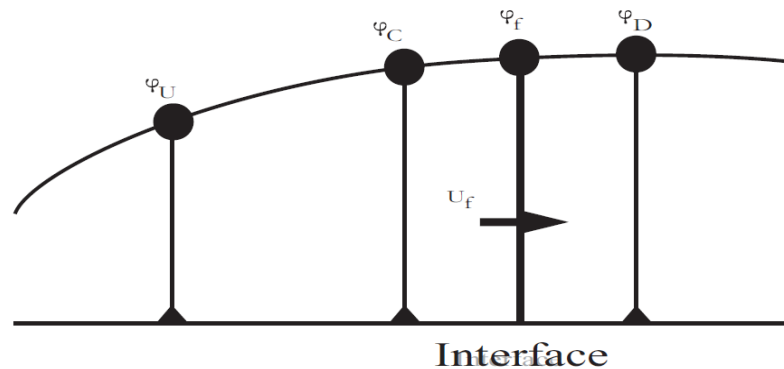


Figure 4.3: Visualisation des points utilisés avec le schéma Quick

- Schéma exponentiel :  $A(|P_e|) = |P_e| / [\exp(|P_e|) - 1]$
- Schéma amont (upwind) :  $A(|P_e|) = 1$
- Schéma hybride :  $A(|P_e|) = \max(0; 1 - 0.5|P_e|)$
- Schéma en loi de puissance :  $A(|P_e|) = \max[0; (1 - 0.1|P_e|)^5]$

Ces schémas permettent, contrairement aux schémas aux différences finies, d'éviter les oscillations et les instabilités pouvant se développer pendant le calcul ainsi que la manifestation de solutions non physiques. Cependant, l'introduction d'une approximation d'ordre spécial un, peut augmenter la diffusion numérique qui peut masquer la diffusion réelle lorsque les flux convectifs deviennent importants, comme c'est le cas des écoulements que nous voulons étudier.

Pour remédier à ce problème, nous avons été amenés à introduire un schéma d'ordre trois, le schéma QUICK.

#### 4.4 Schéma QUICK

Le schéma quick est un schéma permettant de calculer les flux aux interfaces à l'ordre trois à partir de l'expression suivante de la variable  $\phi$  :

$$\phi_{\text{quick}} = \phi_f = \frac{3}{8}\phi_D + \frac{3}{4}\phi_C - \frac{1}{8}\phi_U \quad (4.24)$$

Les points U, C et D sont représentés sur la figure 4.3 . L'utilisation d'un schéma d'ordre élevé impose l'intégration d'un limiteur de flux pour éviter les problèmes d'oscillations sur les solutions non monotones. Le flux est évalué en utilisant l'approche *Ultra Sharp*, (Universal Limiter for Tight Resolution and Accuracy with a Simple High Accuracy Resolution Program) [40]. Cette approche utilise un limiteur de flux de type DWF (Downwind Weighting Factor) qui permet de pondérer la valeur de l'inconnue à l'interface de la façon suivante :

$$\phi_f = \phi_D \text{DWF} + \phi_C (1 - \text{DWF}) \quad (4.25)$$

Le facteur de pondération DWF se calcule en écrivant les variables sous forme normalisée ( $\tilde{\phi}$ ) comme suit :

$$\tilde{\phi} = \frac{\phi - \phi_U}{\phi_D - \phi_U} \quad (4.26)$$

Dans le diagramme NVD (Normalised Variable Diagram), c'est à dire le Plan ( $\phi_C, \phi_f$ ), le DWF peut se calculer ainsi :

$$\text{DWF} = \frac{\tilde{\phi}_f - \tilde{\phi}_C}{1 - \tilde{\phi}_C} \quad (4.27)$$

si

$$\tilde{\phi}_C \leq 0 \text{ ou } \tilde{\phi}_C \geq 1 \text{ alors } \tilde{\phi}_f = \tilde{\phi}_C \rightarrow \text{DWF} = 0 \quad (4.28)$$

$$\text{si } 0 < \tilde{\phi}_C \leq 1 \text{ alors } \tilde{\phi}_f = \frac{3}{8}\tilde{\phi}_D + \frac{3}{4}\tilde{\phi}_C - \frac{1}{8}\tilde{\phi}_U \quad (4.29)$$

$$\tilde{\phi}_f = \max(\tilde{\phi}_f, \tilde{\phi}_C) \quad (4.30)$$

$$\tilde{\phi}_f = \min(\tilde{\phi}_f, C\tilde{\phi}_C) \quad (4.31)$$

$$\tilde{\phi}_f = \min(\tilde{\phi}_f, 1) \quad (4.32)$$

C est le nombre de courant local.

Le calcul du facteur de pondération DWF correspondant à chaque région NVD permet l'évaluation finale de la variable  $\phi$  à l'interface grâce à l'équation (4.25).

## 4.5 Traitement du couplage pression-vitesse

Le développement des équations de continuité et de quantité de mouvement fait apparaître des relations entre la pression et la vitesse. Le calcul du champ de pression se fait par la résolution de l'équation de conservation de la masse écrite sous une forme modifiée qui permet de tenir compte de ces relations. Les vitesses, vérifiant l'équation de quantité de mouvement, sont corrigées afin de satisfaire également l'équation de conservation de la masse.

L'équation de la vitesse discrétisée s'écrit[40]:

$$a_p^0(u_p^{n+1} - u_p^n) = b + \Delta P \quad (4.33)$$

L'étape de prédiction consiste à résoudre l'équation de quantité de mouvement grâce à l'expression explicite des termes sources de pression :

$$a_p^0 \Delta u_p^* = b^n + \Delta P^n - a_p u_p^n \quad \text{avec} \quad \Delta u^* = u_p^* - u_p^n \quad (4.34)$$

Ayant résolu les équations de transport des fractions massiques et de l'enthalpie, on dispose d'une prédiction de la masse volumique  $\rho$  sur laquelle il nous faut encore tenir compte des effets de variation de pression.

L'équation de continuité peut alors s'écrire :

$$(\rho_p^{n+1} - \rho_p^n) \frac{\Delta x}{\Delta t} = 0 \quad (4.35)$$

Si la pression est écrite en supposant que  $P^{n+1} = P^n + DP^{n+1}$ , la vitesse intermédiaire doit donc être corrigée pour prendre en compte cette nouvelle pression :

$$a_p^0(u_p^{n+1} - u_p^*) = DP^{n+1} \quad (4.36)$$

L'équation de continuité devient alors une équation de pression :

$$\left( \frac{P_p^{n+1}}{RT} - \rho_p^n \right) \frac{\Delta x}{\Delta t} = 0 \quad (4.37)$$

Ce qui peut encore s'écrire :

$$\frac{\rho_p^{n+1}}{R T} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \rho_p^n \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (4.38)$$

## 4.6 Convergence

Le système algébrique est résolu par la méthode de résolution TDMA (tri-diagonale matrice algorithm). Cette dernière est itérative. Elle nécessite de définir un critère de convergence permettant d'établir le moment où la solution calculée est acceptable. On peut donc définir une valeur résiduelle pour chaque volume de contrôle et à chaque itération :

$$R_{\phi} = a_e \phi_e + a_w \phi_w + a_n \phi_n + a_s \phi_s + b - a_p \phi_p \quad (4.39)$$

On vérifie ensuite :

$$\sum_{\phi} |R_{\phi}| \leq \varepsilon_{\phi} \quad (4.40)$$

Avec,  $\varepsilon_{\phi}$  est choisi en fonction de la précision recherchée. Il existe une autre méthode qui consiste à vérifier que la norme euclidienne des résidus  $|r_{\phi}^k|$  à une itération  $k$ , est inférieure à un pourcentage de celle du résidu avant la première itération  $|r_{\phi}^0|$  [41] :

$$|r_{\phi}^k| = \sum_{\phi} [(a_e \phi_e + a_w \phi_w + a_n \phi_n + a_s \phi_s + b - a_p \phi_p)^2]^{1/2} \quad (4.41)$$

On doit vérifier que :

$$|r_{\phi}^k| \leq \gamma_{\phi} |r_{\phi}^0| \quad (4.42)$$

Où  $\gamma_{\phi}$  est fixé.

Il existe aussi une approche basée sur l'observation de l'évolution de la solution aux points du maillage. On doit alors vérifier que :

$$\frac{|\phi_p^{K+1} - \phi_p^K|}{|\max(\phi_p^{K+1}, \phi_p^K)|} \leq \varepsilon \quad (4.43)$$

### 4.6.1 Procédure de Calcul

L'équation aux dérivées partielles (4.20) est ramenée à un système d'équations algébriques linéaires pouvant se mettre sous la forme matricielle suivante :

$$a_p \phi_p^{n+1} = a_E \phi_E^{n+1} + a_W \phi_W^{n+1} + a_N \phi_N^{n+1} + a_S \phi_S^{n+1} + b \quad (4.44)$$

Nous avons choisi la méthode TDMA (Tri Diagonal Matrix Algorithm) pour résoudre de manière itérative ce système linéaire. Cette méthode ne nécessite pas l'inversion de matrices, ce qui permet de limiter l'espace mémoire et d'obtenir une convergence plus rapide.

La linéarisation du terme source limite les oscillations sur la solution et contribue à accélérer la convergence.

### 4.7 Traitement des limites du domaine

Nous avons à traiter deux types de conditions aux limites. Les valeurs aux limites des différentes variables, à savoir les dimensions du tunnel et le taux de dissipation turbulent, la vitesse, la température, la masse volumique....., tous sont obtenues à partir de conditions type <<Neumann >> ou << Dirichlet >>.

- Condition de Neumann :

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0$$

- Condition de Dirichlet : la valeur de la variable  $\phi$  est imposée.

### 4.8 Relaxation et convergence

Dans le but de faciliter la convergence dans le processus itératif sur un pas de temps, une procédure de relaxation [42], est introduite pour amortir les variations brutales d'une variable calculée d'une itération à l'autre. On l'introduit dans les équations algébriques en posant :

$$\phi = C_r \phi_p^{n+1} + (1 - C_r \phi_p^n) \tag{4.45}$$

Ce qui modifie les coefficients de l'équation (4.20) :

$$a_p \rightarrow \frac{a_p}{C_r}$$

$$b \rightarrow b + \frac{1 - C_r}{C_r} a_p \phi_p^n$$

Avec,  $n + 1$  et  $n$  désignent respectivement l'itération en cours et l'itération précédente.  $C_r$ , est le coefficient de relaxation. On utilise  $C_r = 0.5$  (sous-relaxation) pour toutes les équations de transport, excepté celle de continuité qui n'est pas relaxée. L'algorithme de résolution TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm) nécessite une procédure itérative. Le critère de convergence utilisé est basé sur l'observation de l'évolution de la solution aux points du maillage. On doit alors vérifier que :

$$\frac{|\phi_p^{K+1} - \phi_p^K|}{|\max(\phi_p^{K+1}, \phi_p^K)|} \leq \varepsilon \tag{4.46}$$

$\varepsilon$ , est la valeur d'erreur.

## 4.9 Séquences de calcul

- Lecture des données initiales ;
- Initialisations des variables (température, pression, vitesse...etc.);
- Calcul des propriétés thermophysiques;
- Calcul des conditions initiales et des conditions aux limites;
- Création et calcul du maillage;
- Début de la boucle en temps;
- Calcul des propriétés physiques;
- Résolution des équations de conservation de la masse;
- Résolution des équations de continuité;
- Résolution des équations de la masse volumique;
- Résolution de l'équation de l'énergie;
- Résolution des équations de fractions massiques;
- Détermination et calcul des coefficients des équations précédentes ( $a_P, a_W, a_E, a_N, a_S, b$ );
- Récupération de T;
- Récupération de concentration de CO<sub>2</sub>;
- Interpolation;
- Fin de la boucle en temps;
- Impression des résultats;
- Fin de programme;

# CHAPITRE 5

## Résultats et interprétations

---

## Chapitre 5

### Résultats et interprétations

---

Le renforcement de la sécurité aux feux d'installations urbaines passe par une compréhension de l'ensemble des phénomènes impliqués lors de l'incendie et exige le développement d'outils numériques spécifiques d'analyse de sûreté.

L'objectif de cette partie est de présenter les résultats obtenus, lors d'une étude sur la propagation de fumée aux moyens de calcul l'un avec le code commercial FDS et l'autre avec le code développé dans ce même. L'accent portera principalement sur la détermination des paramètres tels que : la température, la concentration du CO<sub>2</sub>...etc., et cela pour différents scénarios.

#### 5. 1 Description du modèle physique

Dans notre étude, on a choisi un tunnel de longueur 550 m pour le nombre des grilles de calcul. Les conditions aux limites étant imposées, vitesse de soufflage entre 10-50 m/s et vitesse d'extractions entre 10-50 m/s. Le temps de calcul est fixé à 300 secondes (temps de sauvegarde recommandé), le feu à la position  $x = 200$  m. Les extrémités du tunnel ont été placées à la pression atmosphérique. Pour les divers scénarios étudiés, les aspirateurs de fumée étaient également distribués dans la zone d'échappement de fumée. Cette étude considère une position du feu fixe pour toutes distributions de trappes dans le tunnel. La section de sortie des trappes est de 24 m<sup>2</sup> quelque soit le nombre de trappes considérés. La table 5.1 présente le dimensionnement des trappes dans le tunnel.



Tableau 5.1 : Dimensions des trappes d'extraction.

	Nombre de trappes	Position de la trappe (m), figure 5.1	Surface de la trappe (m <sup>2</sup> )
Cas 1	1	175	24(24*1)
Cas 2	2	88, 263	24(12*2)
Cas 3	3	58, 175, 292	24(8*3)
Cas 4	4	44, 131, 219, 306	24(6*4)
Cas 5	5	35, 105, 175, 245, 315	24(4.8*5)

La figure 5.1 présente une vue d'ensemble du domaine de calcul. Le tunnel est représenté par une géométrie parallélépipédique en couleur verte (le code de calcul FDS ne permettant de générer que des géométries parallélépipédiques) [32]. Les positions de trappes en couleur blanche. La source de la chaleur est définie en couleur rouge. La structure est divisée en deux zones de calcul avec un maillage propre pour chaque zone, tableau 5.2.

Tableau. 5.2 : Le compartiment de l'ouvrage étudié.

Compartiments	dimensions (m)
Le tunnel	550 × 9.75 × 4.68
Conduite d'échappement de fumée	550 × 9.75 × 1.8

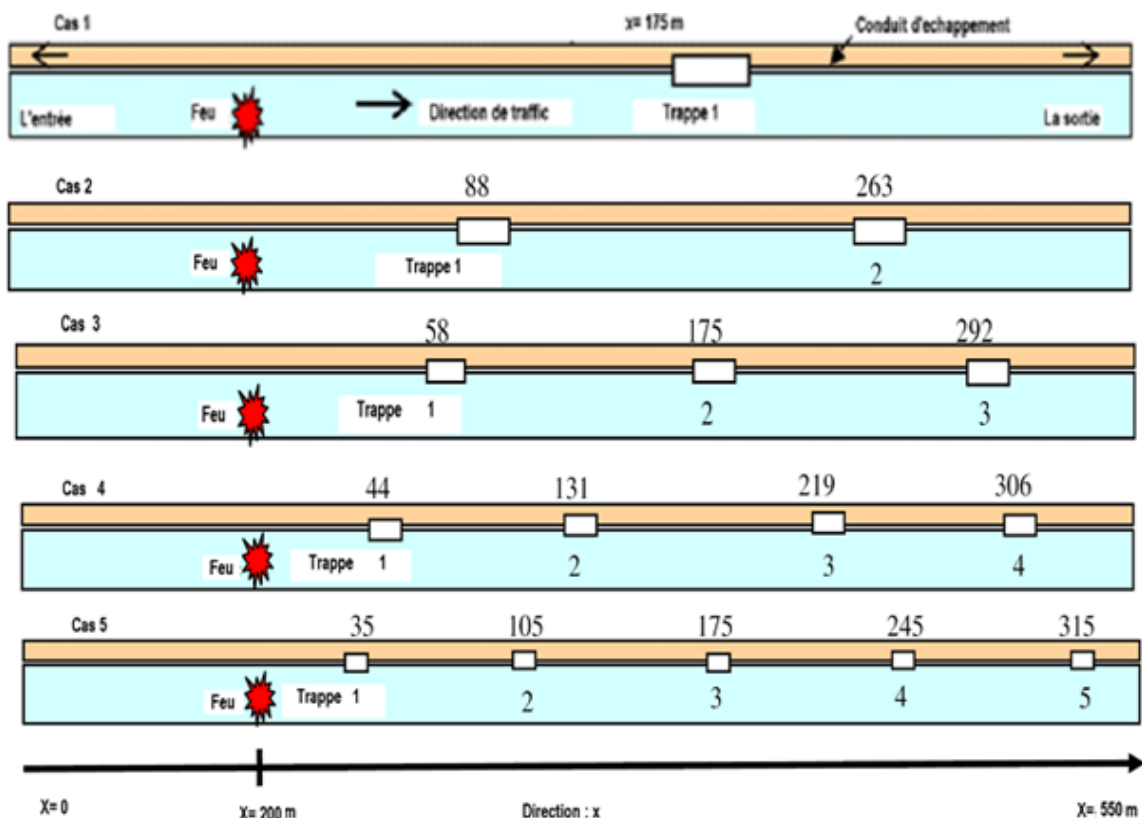


Figure 5.1 : Vue d'ensemble du domaine de calcul.

## 5.2 Conditions aux limites

Pour effectuer les simulations, les conditions aux limites sont introduites. Les régimes de ventilations sont considérés à 20, 30 et 50 m/s. La puissance thermique qui est de 100 Méga Watt définit la source de chaleur. Elle est située à une distance de 200 m de l'entrée du tunnel. Les thermocouples placés le long du domaine à une hauteur de 3 m et au milieu du domaine, permettent d'obtenir les températures du panache.

## 5.3 Résultats générés par le code élaboré et FDS

### 5.3.1 Evolution de la température et de la concentration de CO<sub>2</sub> le long du tunnel

Dans cette partie, on présente les résultats numériques obtenus (les évolutions de la température et de la concentration de CO<sub>2</sub> en fonction de la longueur du tunnel), en utilisant les deux codes de calcul FDS et celui développé.

Les figures (6.a) à (8.a) et les figures (6.b) à (8.b) montrent les évolutions de la température moyenne et de la concentration de CO<sub>2</sub> moyenne dans les fumées en fonction de la longueur du tunnel, pour les différents scénarios étudiés. Les résultats montrent que la distribution de la température et de la concentration de CO<sub>2</sub> le long du tunnel évolue qualitativement de la même manière pour tous les scénarios.

Les résultats obtenus par le code FDS montrent quantitativement que le maximum de température et de concentration diminue avec l'augmentation de la vitesse de soufflage. A cet effet, les maximums de température et de concentration sont atteints à la section transversale correspondant à la position de la source de chaleur, et sont égales à 840 °C et 0,012 mole de CO<sub>2</sub>/mole de fumée respectivement, pour la vitesse de soufflage  $v = 20$  m/s et décroît à 770 °C et 0,011 mole de CO<sub>2</sub>/mole de fumée pour la vitesse de soufflage  $v = 50$  m/s. les résultats sont obtenus pour une seule trappe située à 375m par rapport à l'entrée du tunnel. Les maximums décroissent proportionnellement à l'augmentation de la vitesse de soufflage, figures (6.a) à (8.a).

Les résultats obtenus par le code développé montrent quantitativement que les maximums de température et de concentration diminuent avec l'augmentation de la vitesse de soufflage. Les maximums sont atteints à la section transversale correspondant à la position de la source de chaleur, et sont égales à 840 °C et 0,012 mole de CO<sub>2</sub>/mole de fumée respectivement pour la vitesse de soufflage  $v = 20$  m/s et décroissent à 770 °C et 0,011 mole de CO<sub>2</sub>/mole de fumée pour la vitesse de soufflage  $v = 50$  m/s. les résultats sont obtenus pour

une seule trappe située à 375 m par apport à l'entrée du tunnel, figures (6.b) à (8.b). On remarque bien que les résultats obtenus par les deux codes concordent parfaitement.

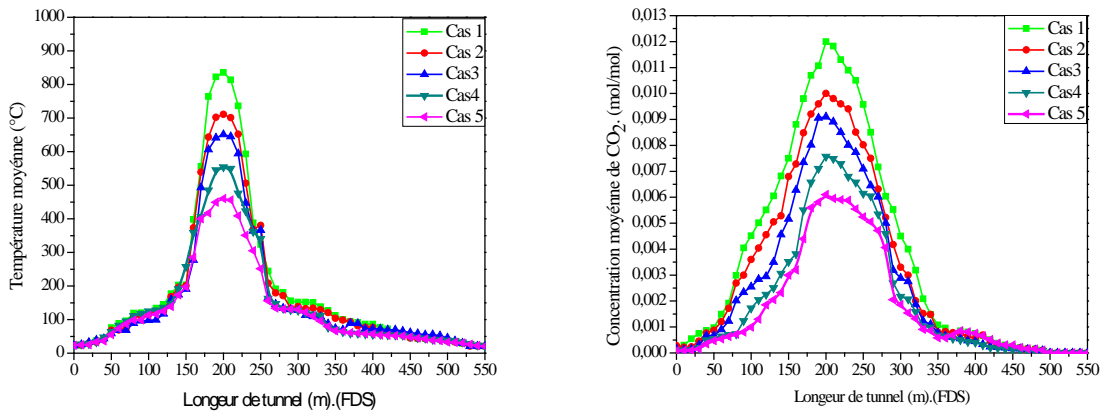


Figure 6.a : Profils de température et de concentration de CO<sub>2</sub> moyennes à v = 20m/s, t = 300 s.

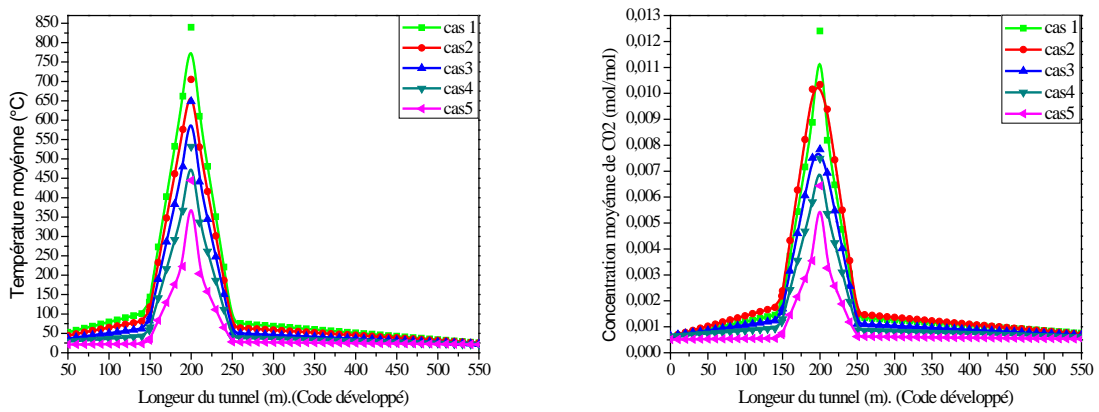


Figure 6.b : Profils de température et de concentration de CO<sub>2</sub> moyennes à v = 20m/s, t = 300 s.

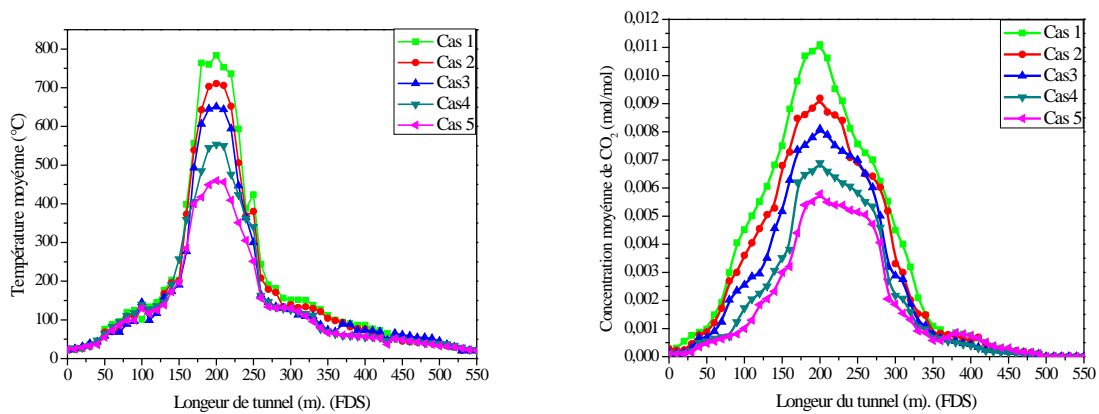


Figure 7.a : Profils de température et de concentration de CO<sub>2</sub> moyennes à v = 30m/s, t = 300 s.

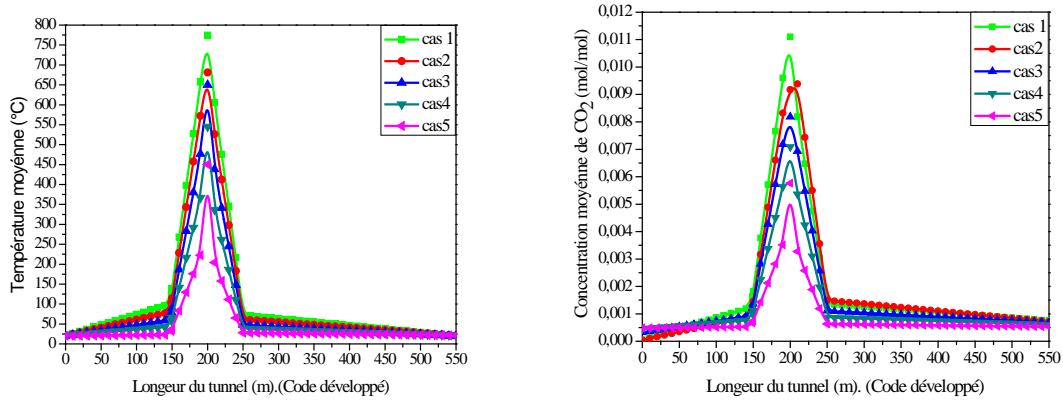


Figure 7.b : Profils de température et de concentration de CO<sub>2</sub> moyennes à v = 30m/s, t = 300 s.

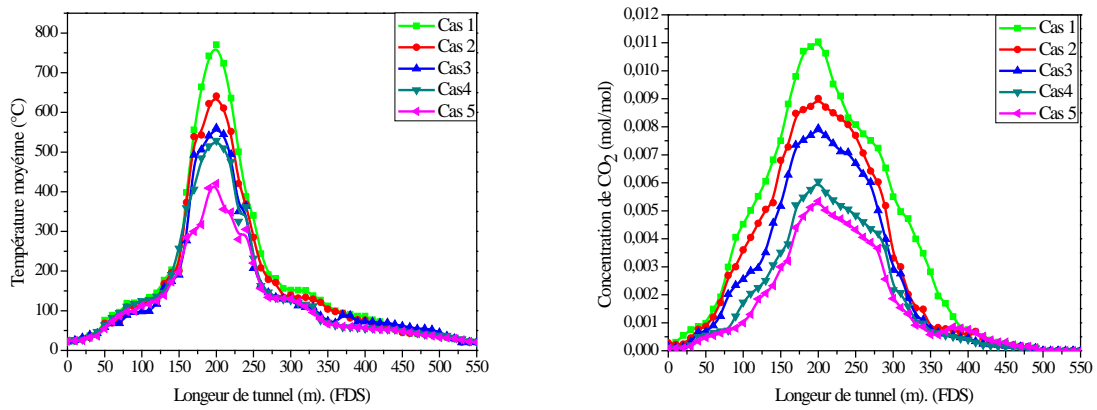


Figure 8.a : Profils de température et de concentration de CO<sub>2</sub> moyennes à v = 50m/s, t = 300 s.

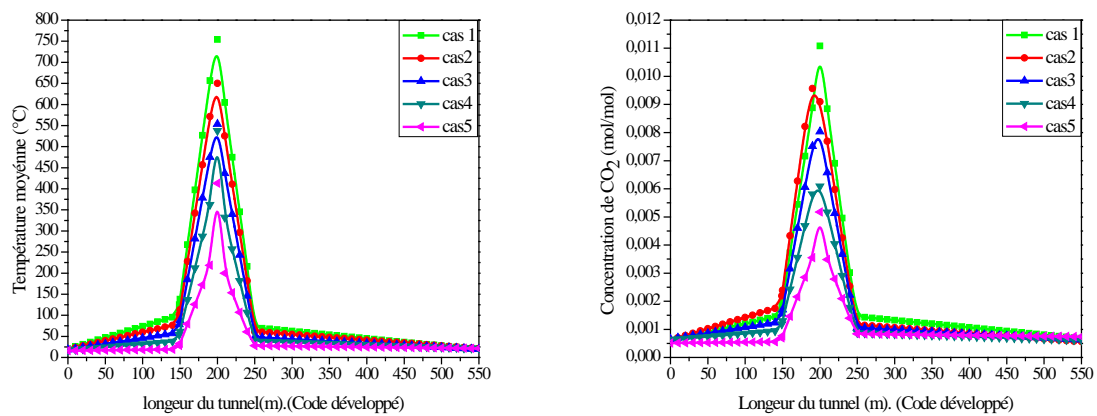


Figure 8.b : Profils de température et de concentration de CO<sub>2</sub> moyennes à v = 50m/s, t = 300 s.

### 5.3.2 Effet du nombre de trappe sur le comportement des fumées

Les résultats de l'étude de l'effet du nombre de trappes, situées au plafond du tunnel, sur le comportement des fumées pour différentes vitesses de soufflage (20, 30 et 50 m/s) sont présentés. Ces résultats concernant le profil de température et de concentration de la fumée en fonction du temps à des positions de 100 et 300 m de l'entrée du tunnel.

- **Scénario 1: mesure à 100 m , V = 20 m/s, puissance = 100 MW**

Les figures (9.a) et (9.b) présentent les résultats du scénario 1 où la vitesse de soufflage est de 20 m/s et la puissance de feu est de 100 MW. Les résultats de l'évolution de la température et de la concentration de CO<sub>2</sub> dans le tunnel, obtenus avec le code développé ont tendance à converger vers les résultats obtenus par le code FDS à partir du temps de 200 s, pour toutes les toutes les positions des trappes dans le tunnel par rapport à l'entrée gauche.

Pour la distribution de CO<sub>2</sub>, on observe une augmentation de la concentration en fonction du temps pour tous les cas d'extraction d'une manière uniforme. On remarque une faible concentration de CO<sub>2</sub> pour les cas 4 et 5 trappes. On peut conclure qu'il y a une relation entre le nombre des trappes et la concentration de CO<sub>2</sub> dans les fumées. L'augmentation du nombre de trappes conduit à une rapide extraction de la fumée ce qui permet un environnement riche en air donc moins de produits toxiques.

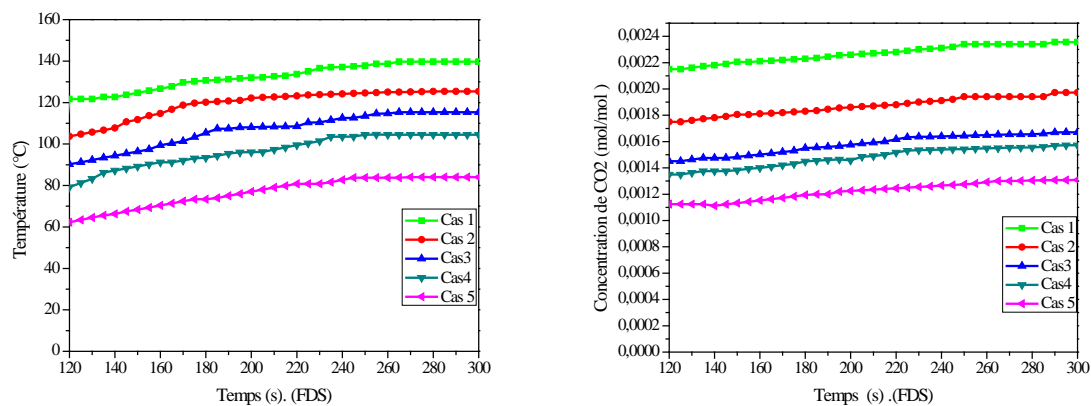


Figure 9.a : Profils de température et de concentration de CO<sub>2</sub> à x = 100 m, v =20m/s.

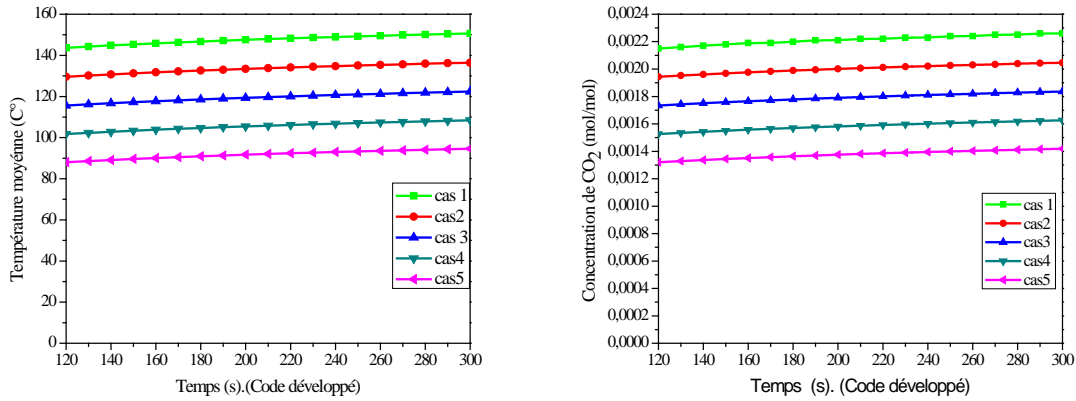


Figure 9.b : Profils de température et de concentration de CO<sub>2</sub> à x = 100 m, v = 20m/s.

- **Scénario 2: mesure à 100 m , v = 30 m/s, puissance = 100 MW**

Les différences constatées dans les résultats obtenus par les deux codes dans les premiers instants ( $t < 200$  s) peuvent être dues à la qualité du maillage choisi et au modèle de rayonnement. Les effets du modèle de rayonnement sont généralement négligés devant la convection dans les écoulements à grands flux tel est le cas de notre étude. Les profils de la température et de la concentration des fumées obtenus toujours par les deux outils de calcul pour la vitesse de soufflage de 30m/s, aux mêmes conditions d'incendie sont présentés dans les figures (10.a) et (10.b).

Les résultats concordent parfaitement à partir du temps 220s que ce soit pour la température ou pour la concentration de CO<sub>2</sub> dans les fumées. Dans la même position de mesure à une vitesse d'extraction de 30 m/s, on observe une diminution des niveaux de température et de CO<sub>2</sub> pour tous les cas.

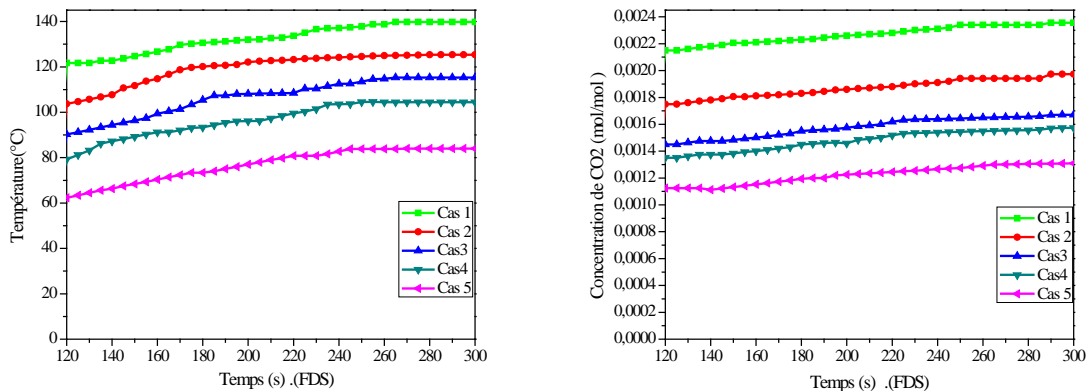


Figure 10.a : Profils de température et de concentration de CO<sub>2</sub> à x = 100 m, v = 30m/s.

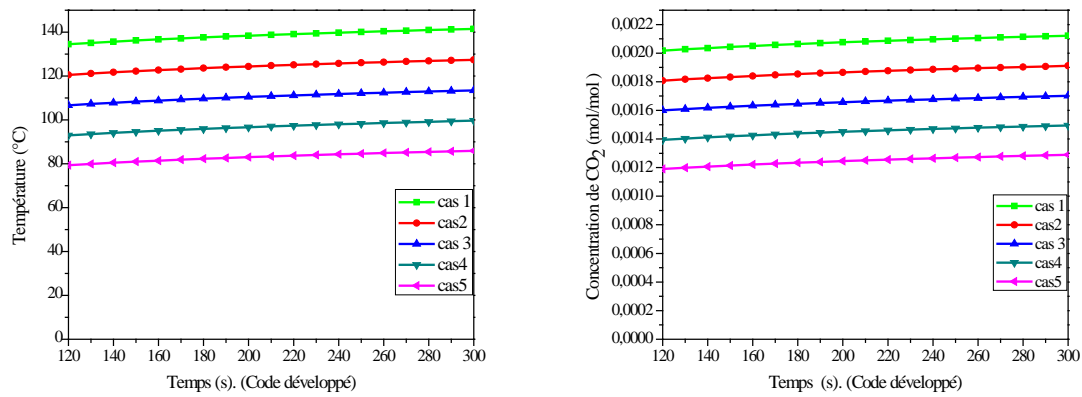


Figure 10.b : Profils de température et de concentration de CO<sub>2</sub> à x = 100 m, v = 30m/s.

• **Scénario 3: mesure à 100 m , V = 50 m/s, puissance = 100 MW**

Les résultats de l'évolution de la température et de la concentration de CO<sub>2</sub> pour la même puissance de feu illustrés dans les figures (11.a) et (11.b) pour la vitesse de soufflage de 50m/s ont la même allure qualitativement que ce soit pour ceux obtenus par FDS ou par le code développé. Les niveaux de température des fumées obtenus par le code développé sont physiquement plus logiques, vu que quand on augmente la vitesse de soufflage, on augmente le débit d'air d'où une dilution meilleure, en plus d'une extraction importante pour le cas de 5 trappes particulièrement. Les niveaux de concentration obtenus par les deux outils de calcul sont très proches partout après t = 220 s.

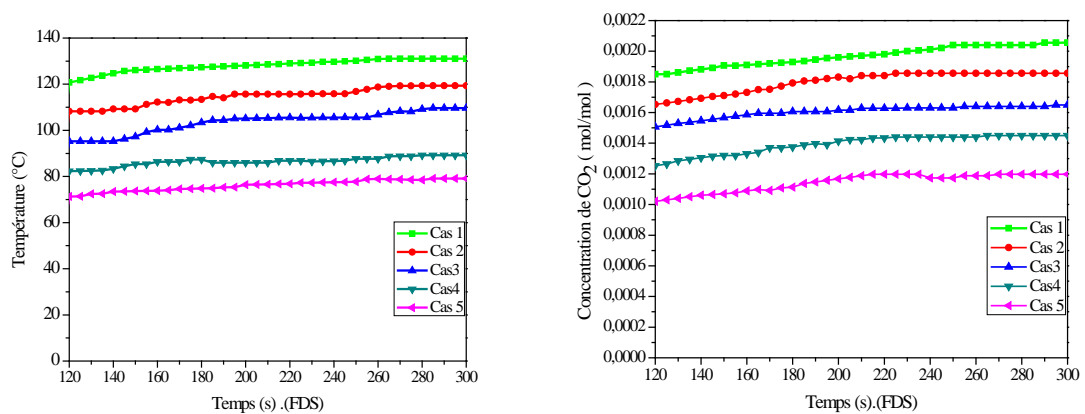


Figure 11.a : Profils de température et de concentration de CO<sub>2</sub> à x = 100 m, v = 50m/s.

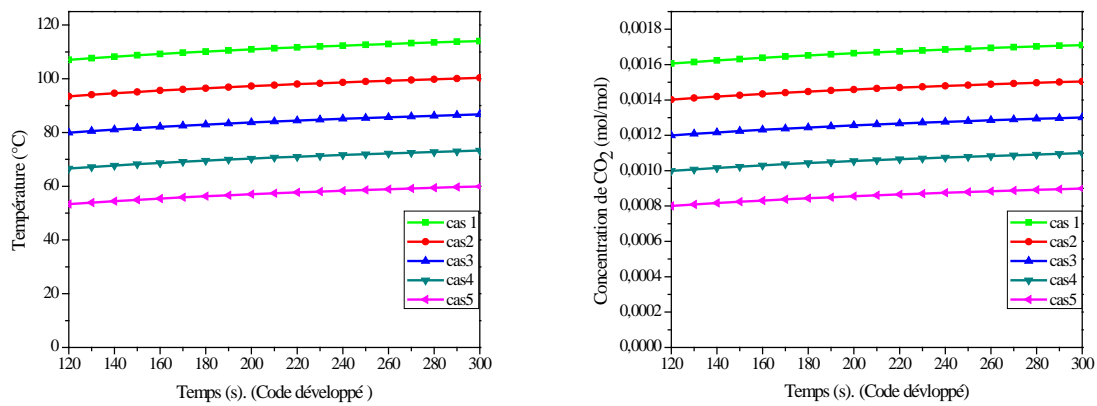


Figure 11.b : Profils de température et de concentration de CO<sub>2</sub> à x = 100 m, v = 50m/s.

• **Scénarios 4, 5 et 6: mesure à 300 m , v = 20, 30 et 50 m/s, puissance = 100 MW**

Les figures (12.a à 14.a) et (12.b à 14.b) concernent les distributions de la température et de la concentration de CO<sub>2</sub> dans les fumées obtenus par le code FDS et le code développé respectivement pour un nombre de trappe de un à cinq positionné le long de la longueur du tunnel pour cinq trappes et au centre pour une trappe. Les différentes mesures sont prises à la hauteur de 3 m.

On observe une augmentation en fonction de temps de la température et de la concentration de CO<sub>2</sub> dans les fumées pour toutes les vitesses d'extraction considérées quelque soit le nombre de trappe (cas1 à cas5). Par contre les niveaux de température et de la concentration de CO<sub>2</sub> baissent avec l'augmentation de la vitesse de soufflage. Il apparaît logique que le niveau de températures croît avec le temps du fait que les fumées s'accumulent avant d'être extraite. Les températures sont plus élevées du côté aval de la source de chaleur en comparaison à l'amont car les fumées sont refoulées sur ce côté durant l'extraction surtout aux vitesses de 30 et 50 m/s qui sont supérieur à la vitesse critique. La condition critique est obtenue pour la vitesse de 29 m/s.

A la vitesse de 20 m/s, les fumées se propagent de part et d'autre de la source de chaleur, cependant les niveaux de température doivent être très proches, ce qui est bien montré par les résultats de notre calcul. D'une manière générale les valeurs de températures varient entre 60 et 80 °C pour le cas à 5 trappes et entre 150 et 180 °C pour une trappe. A hauteur d'homme d'environ (1,50m à 2m), les niveaux de températures sont nettement inférieurs à ceux présentées dans les différents cas, figures (6.a.b à 8.a.b) aux positions lointaines au delà de 100 m de part et d'autre de la source de feu.



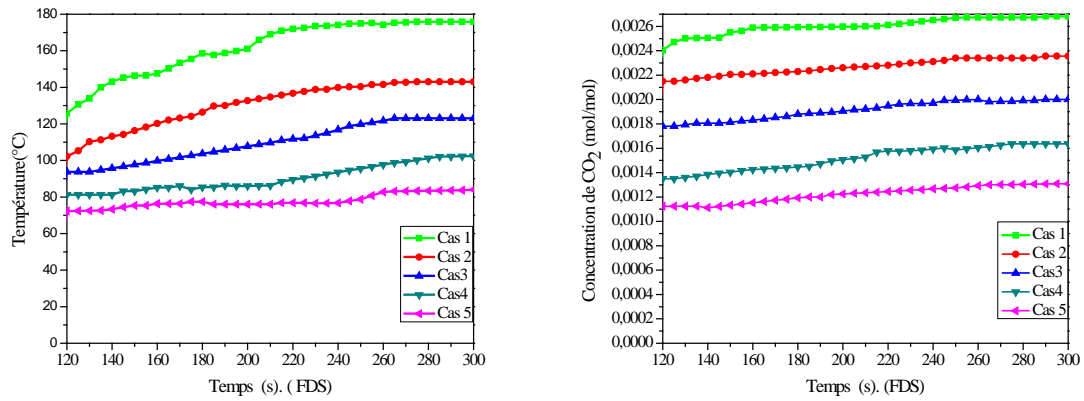


Figure 12.a : Profils de la température et de concentration de CO<sub>2</sub> à x = 300 m, v = 20m /s.

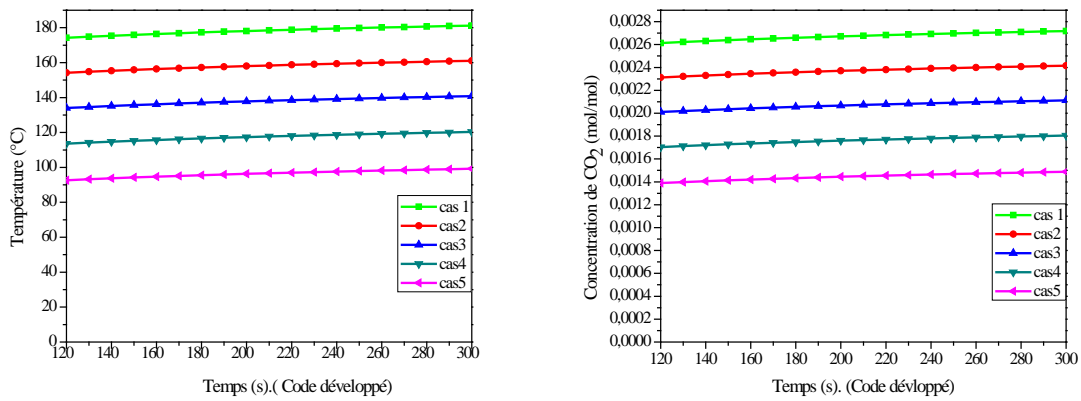


Figure 12.b : Profils de la température et de concentration de CO<sub>2</sub> à x = 300 m, v = 20m /s.

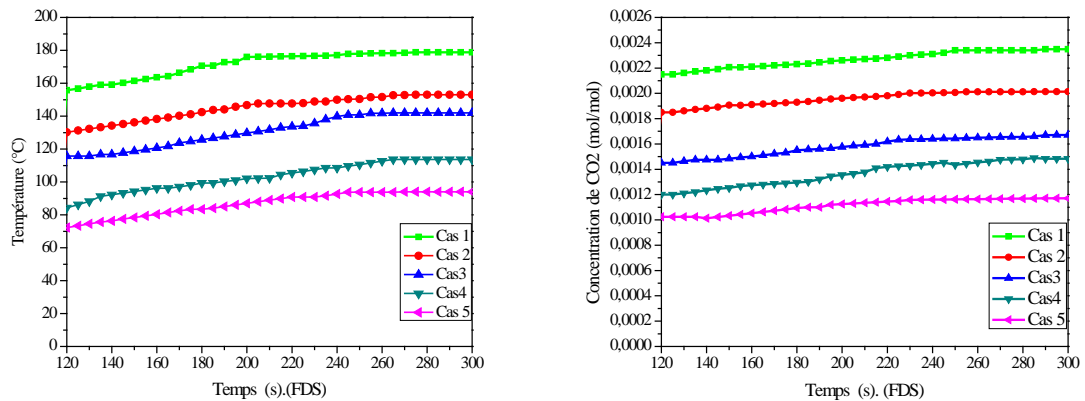


Figure 13.a : Profils de la température et de concentration de CO<sub>2</sub> à x = 300 m, v =30 m /s.

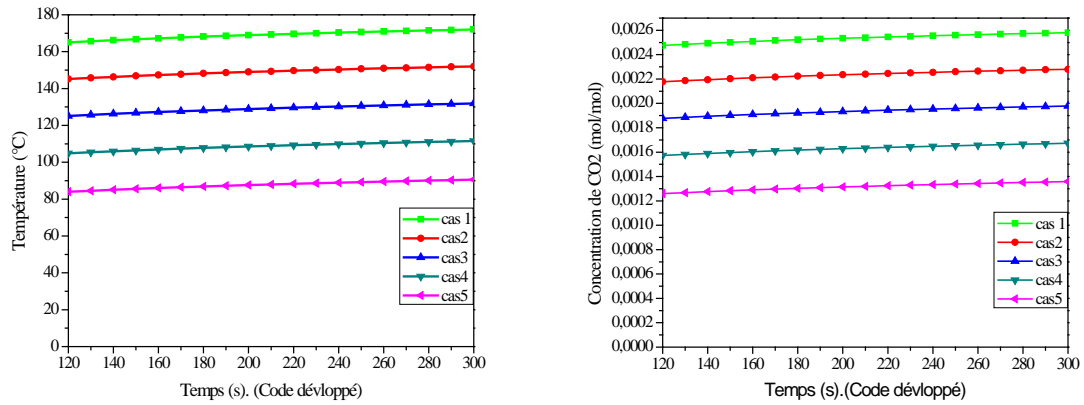


Figure 13.b : Profils de la température et de concentration de CO<sub>2</sub> à x =300 m, v=30m/ s.

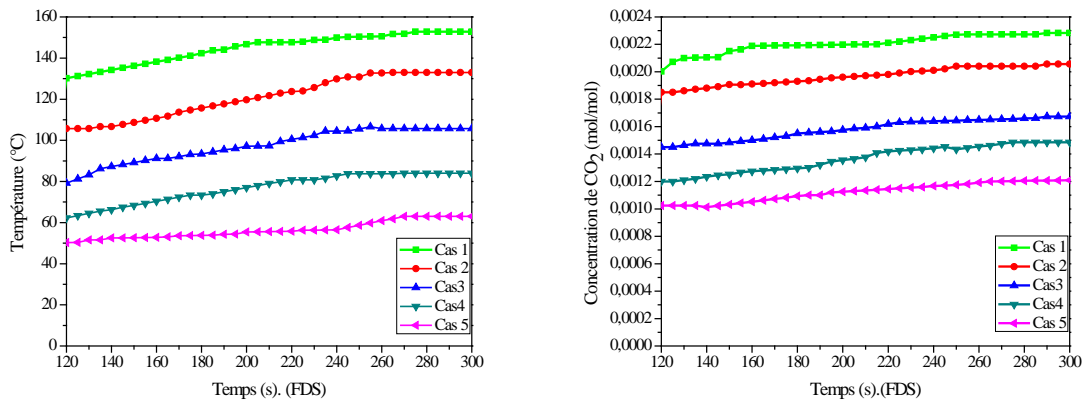


Figure 14.a : Profils de la température et de concentration de CO<sub>2</sub> à x =300 m, v=50 m /s.

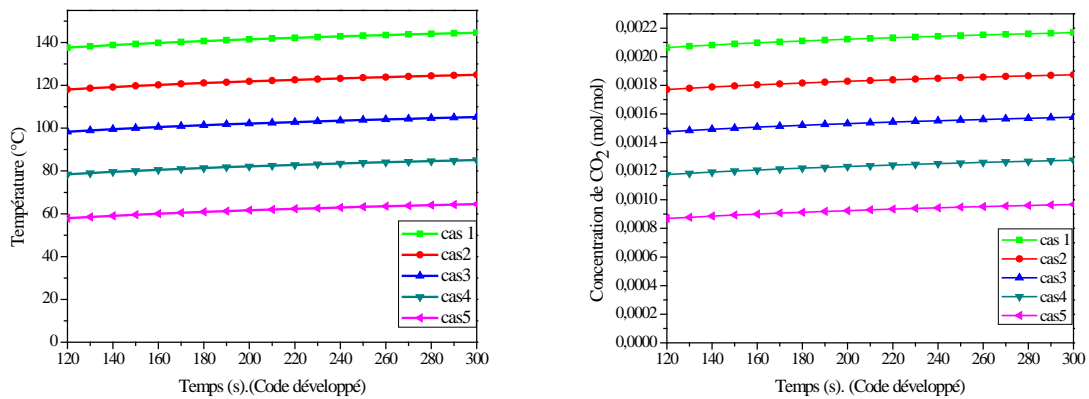


Figure 14.b : Profils de la température et de concentration de CO<sub>2</sub> à x =300 m, v=50 m /s.

### 5.3.3 Effet de vitesse de soufflage sur la distribution de la température et CO<sub>2</sub>

Les résultats de l'étude sur l'effet de la vitesse de soufflage sur le comportement des fumées sont présentés. Ces résultats concernent le profil de température et de concentration des fumées en fonction de la longueur du tunnel pour les puissances de 20 et 100MW.

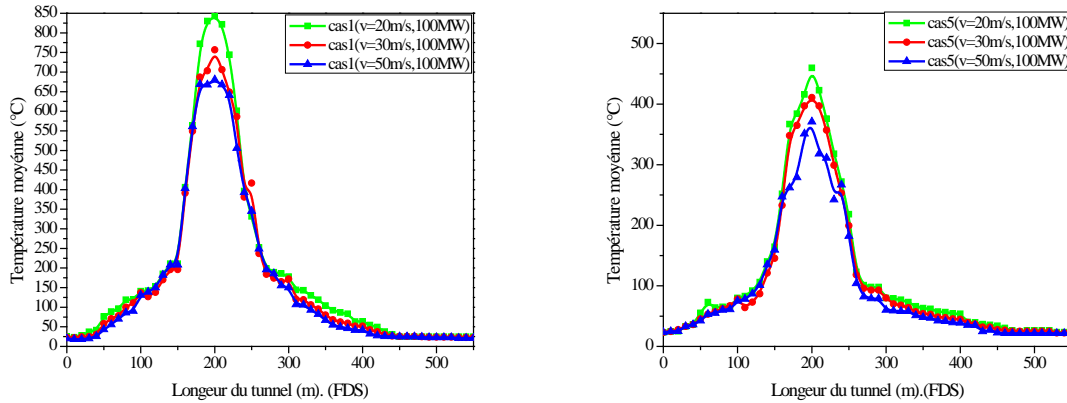


Figure 15.a: Profils de la température et de concentration de CO<sub>2</sub> moyennes pour 100 MW, t = 300 s.

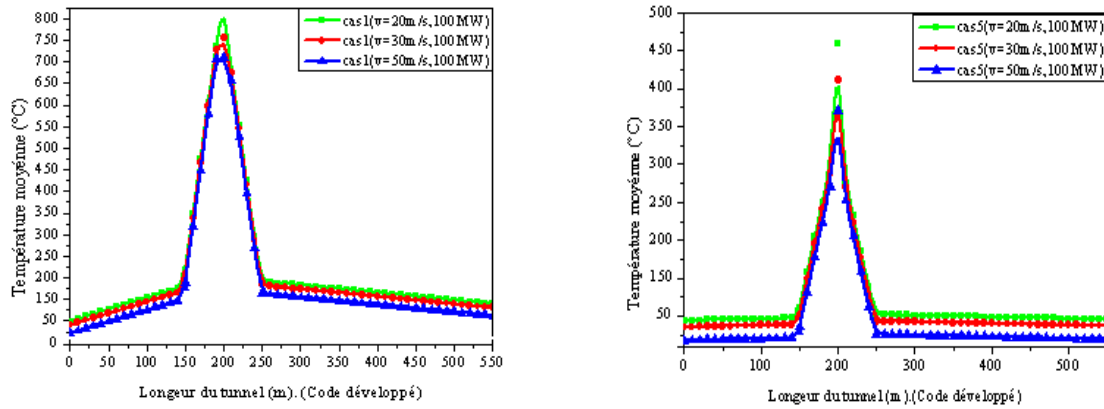


Figure 15.b : Profils de la température et de concentration de CO<sub>2</sub> moyennes pour 100MW, t = 300 s.

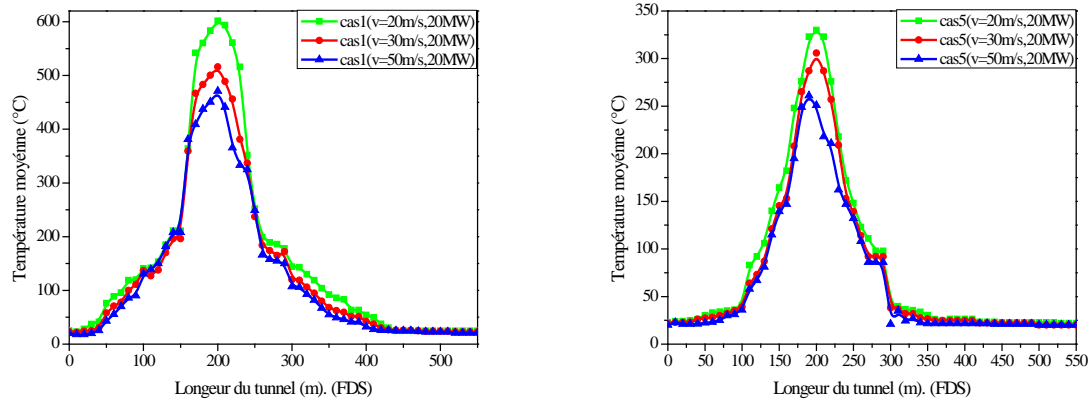


Figure 16.a : Profils de la température et de concentration de CO<sub>2</sub> moyennes pour 20 MW, t = 300 s.

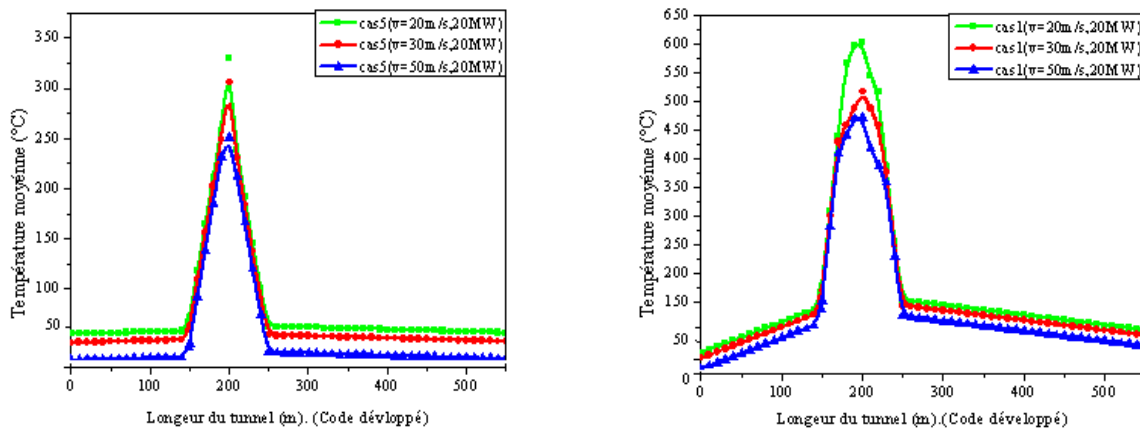


Figure 16.b : Profils de la température et de concentration de CO<sub>2</sub> moyennes pour 20 MW, t = 300 s.

Les différents cas de soufflage étudiés pour la puissance de 20 et 100 MW ont permis la collecte de données liées au phénomène thermique présent dans le tunnel où les fumées sont générées au front de flamme jusqu'à leur impact suivant la longueur du tunnel en présence d'une ou de plusieurs trappes d'extraction.

D'après les résultats présentés dans les figures 15.a à 16.a et 15.b à 16.b, on constate que la température de la fumée diminue le long du tunnel en fonction de l'augmentation de la vitesse d'extraction (20, 30 et 50 m/s) et d'une manière plus importante en fonction du nombre de trappes.

Il ressort de l'analyse de résultats que la diminution de la température des fumées est plus conséquente quand le nombre de trappe est augmenté à cinq pour la puissance du feu de 20 MW. On peut donc déduire que les conditions optimales ou favorables à une bonne évacuation sont ceux obtenues à des puissances de feu de l'ordre de 30 MW. Cette puissance est relative à un véhicule léger en feu. Du moment où on a identifié le cas critique par rapport à la vitesse de

soufflage aux puissances moyennes qui correspond à une vitesse de soufflage légèrement supérieure à 30 m/s, on peut donc recommander une extraction des fumées à des vitesses supérieures à 30 m/s et pour une configuration de cinq trappes bien réparties au plafond du tunnel.

### 5.3.4 Effet de la puissance sur la température des fumées et de la concentration de CO<sub>2</sub> dans la fumée

On a montré à travers les résultats de simulation sur l'effet de la puissance du feu sur le comportement thermique des fumées qu'il y a un lien étroit entre ces deux paramètres. Cet effet est montré à travers des simulations à deux puissances de feu de 20 et 100 MW. D'autres résultats à des puissances intermédiaires ne sont pas présentés dans ce résumé.

En variant la puissance de 20 à 100 MW, on constate que plus on augmente le nombre de trappes, plus la température des fumées diminue quelque soit la vitesse de soufflage. La multiplication des nombre de trappes et leur bonne répartition sont des facteurs déterminants dans l'évacuation rapide des fumées. Ceci malgré que la surface totale des trappes sont égale à la surface d'une seule trappe pour le cas où nous avons utilisé une seule trappe d'extraction.

Dans tous les cas étudiés, nous remarquons que les deux codes prédisent une diminution de la température pour toutes les vitesses d'extraction quand la puissance diminue. Le cas optimum est obtenu pour les puissances faibles et les vitesses supérieures à la vitesse critique.

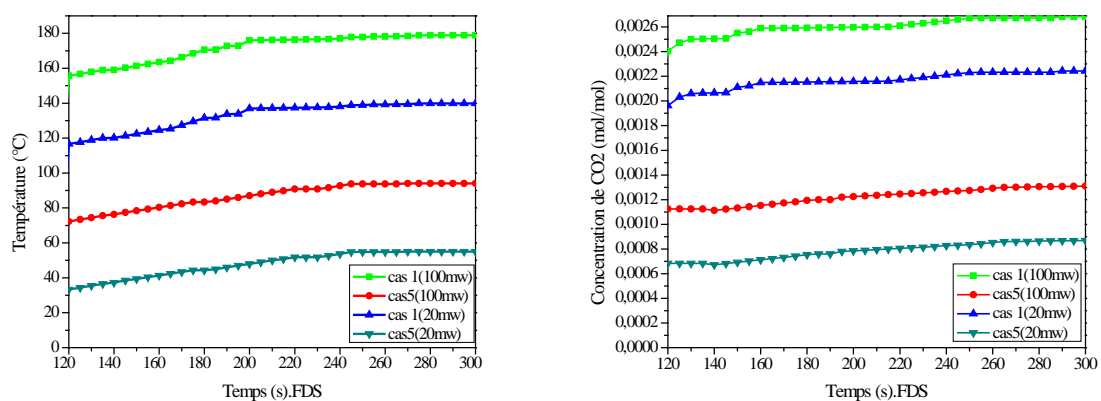


Figure 17.a : Profils de la température et de concentration de CO<sub>2</sub> à x = 300 m, v = 20 m /s.

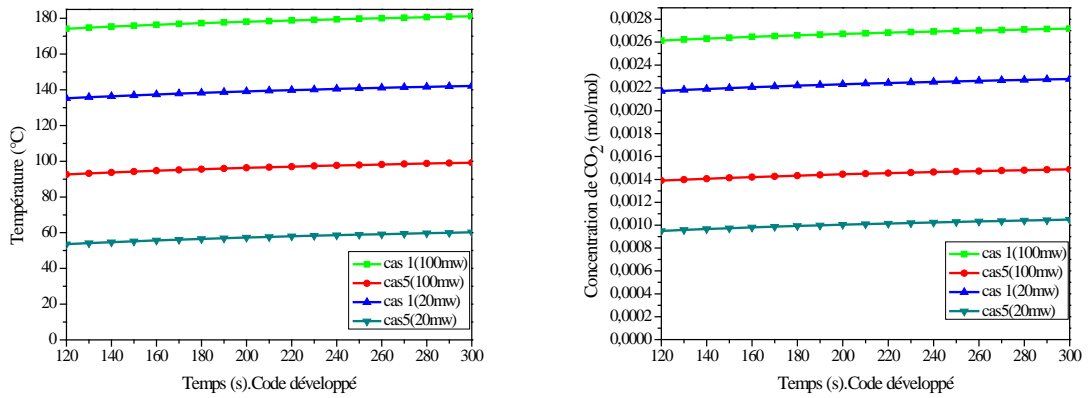


Figure 17.b : Profils de la température et de concentration de CO<sub>2</sub> à x = 300 m, v = 20 m/s.

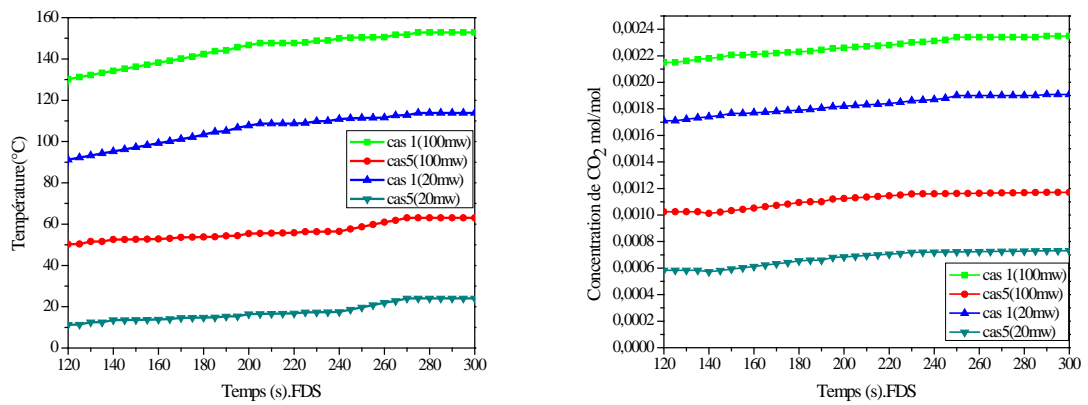


Figure 18.a : Profils de la température et de concentration de CO<sub>2</sub> à x = 300 m, v = 30 m/s.

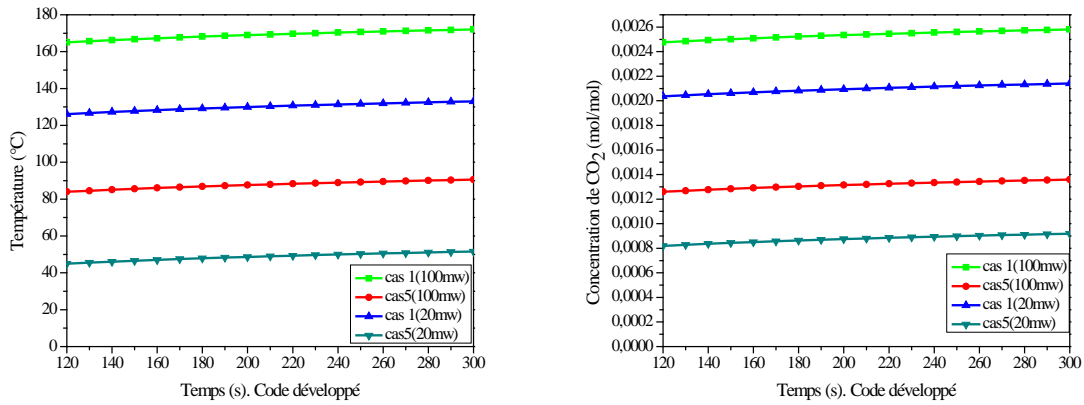


Figure 18.b : Profils de la température et de concentration de CO<sub>2</sub> à x =300 m, v=30 m /s.

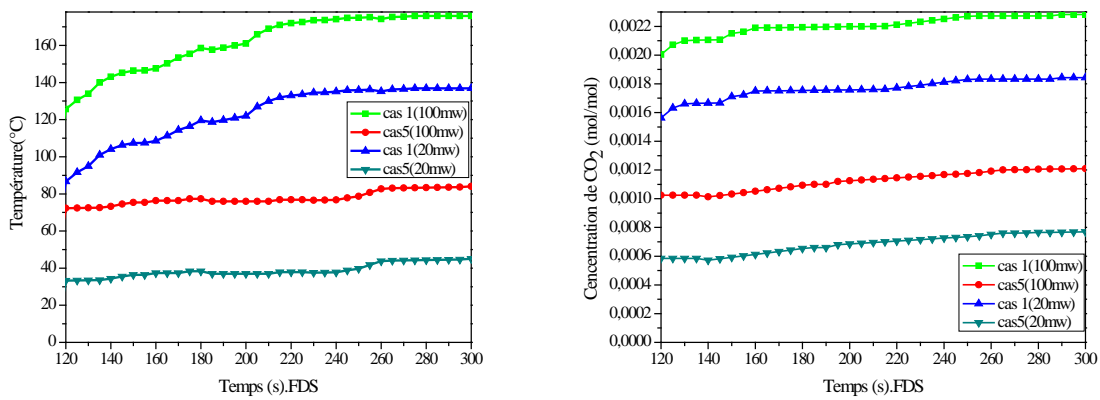


Figure 19.a : Profils de la température et de concentration de CO<sub>2</sub> à x =300 m, v=50 m /s.

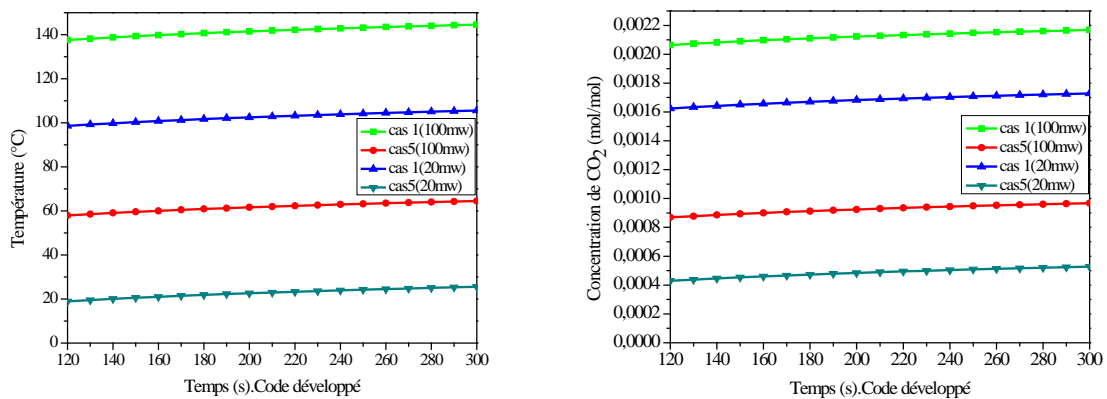


Figure 19.b: Profils de la température et de concentration de CO<sub>2</sub> à x = 300 m, v = 50 m /s.

Les profils de température présentés dans les différentes figures sont obtenus à 100 m de part et d'autre de la source de feu. Nous ne présentons que les résultats à 100 m aval. Nous avons obtenus que la température avoisine la valeur de 20 °C dans certains cas à la condition de soufflage de 30 m/s pour la puissance de feu de 20MW. C'est une situation très favorable dans le cas d'un désenfumage et d'un sauvetage.

Cette situation devient encore plus favorable pour les vitesses de 50 m/s, figure (19.a et 19.b), les températures peuvent descendre jusqu'aux valeurs entre 20 et 30°C, mais cette vitesse peut attiser le feu par l'apport excessif de l'oxygène de l'air. Nous remarquons que les conditions favorables (optimales) obtenus par le code développé sont en très bon accord avec le code FDS. Ce dernier est développé et validé sur plusieurs situations et pendant plusieurs années. Il a aussi connu plusieurs améliorations à travers le temps et beaucoup de travaux ont été réalisés avec ce code.



# Conclusion Générale

---

# Conclusions

---

Un modèle physique de propagation de fumées issues d'un feu dans un tunnel routier est développé. Il est basé sur la résolution d'un système d'équations de transport de masse, de quantité de mouvement et d'énergie. La turbulence est introduite à travers le modèle à deux variables  $k - \epsilon$ . La méthode des volumes finis est utilisée pour discrétiser les équations aux dérivés partielles de transport. Aussi, le modèle « Fire Dynamics Simulator » FDS est exploité pour confronter les résultats de simulation réalisés par le code développé sur un long tunnel routier avec extraction à multi-trappe.

Des simulations avec les deux codes ont été menées pour étudier l'effet de certains paramètres sur le comportement thermique de la fumée lors de sa propagation le long du tunnel. Un certain nombre de scénarios ont été considérés, dans lesquels on a considéré la variation du nombre de trappe ainsi que leur position relatif à la longueur du tunnel et de l'incendie. La vitesse de soufflage et la puissance du feu ont été aussi variées pour montrer leurs effets sur le comportement de la fumée. A l'issue de ces simulations les conclusions suivantes ont été tirées :

Après avoir exploité le code développé et le codes de simulation FDS les conclusions suivantes ont été tirées :

- Le nombre de trappes d'extraction et les vitesses de soufflage ont un effet sur l'évolution de la température et de la concentration de fumée dans le tunnel. Plus on augmente le nombre de trappes d'extraction, plus la température de la fumée diminue et elle diminue considérablement avec l'augmentation de la vitesse de soufflage. Ce comportement est remarqué en amont et en aval de la source de chaleur.

- La vitesse critique de soufflage est obtenue égale à environ 29 m/s pour une puissance de feu de 100 MW. Cette vitesse est un facteur déterminant dans la recherche de stratégie de désenfumage afin de procéder à des évacuations des usagers du tunnel dans de bonnes conditions.
- Au nombre de trappes maximum de cinq, la situation la plus optimale est obtenue pour les puissances de feu faibles de l'ordre de 20 MW (puissance de feu d'un véhicule léger en flamme dans le tunnel). Les deux codes ont prédit des distributions de température et de concentration de CO<sub>2</sub> dans les fumées de niveaux supportables par les usagers au-delà de 100 mètres de part et d'autre de la source de feu. Les températures atteintes descendent jusqu'à des valeurs voisines de 20 °C.
- Pour une unique trappe, malgré que son aire est égale à celui de l'ensemble des cinq trappes, l'extraction des fumées n'assure pas les conditions optimales d'évacuation. La température reste assez élevée même pour les puissances de feu faibles d'environ 20 MW. Les températures obtenues sont supérieures à 60°C.
- Le code de calcul développé prédit assez bien le comportement thermique de la fumée. Les résultats de ses prédictions sont très proches de celles obtenues par le code FDS. Nous rappelons que le code FDS est un CFD qui est développé par le NIST (National Institute of standards and technology) et qui a connu des améliorations régulières durant les dix dernières années.
- Les résultats de cette étude peuvent être considérés comme une banque d'informations. Elle nous permet la compréhension du phénomène de propagation des fumées dans les tunnels

En perspectives, nous suggérons que cette modélisation soit reprise pour apporter des améliorations au code sur la plan modèle de combustion afin de bien prédire la source de feu qui reste très complexe à déterminer à cause de la diversité de type de matériaux mise en jeu lors d'un feu. Aussi tester les différents modèles de turbulences.

# Bibliographie

---

## Bibliographie

---

- [1] P. Carlotti, dossier pilote équipements des tunnels, section 4.1, Centre d'étude des tunnels, 25, avenue François Mitterrand, 69674, Bron cedex France, pages 7-10, **2003**.
- [2] M. Oucherfi, « Contribution à l'étude de la ventilation transversale lors d'un incendie en tunnel routier ». Thèse doctorat. École doctorale MEGA, Université Claude Bernard-Lyon I, France, pages 1-15. **2009**.
- [3] C. Lin et T. Yang, A study on long tunnel smoke extraction strategies by numerical simulation. Rapport interne. Institute of Mechanical and Electrical Engineering, National Taipei University of Technology, Taiwan, pages 1-9, **2007**.
- [4] P. Carlotti, livre « Mécanique des fluides pour la ventilation des tunnels routiers ». Centre des études des tunnels, France, pages 1-59, **2005**.
- [5] T. Ono, Application of neural network to analyses of CCD colour TV-camera image for the detection of car fires in express way tunnels. Rapport interne. Nihon University, Japan, pages 1-6, **2006**.
- [6] C. Xiaojun, Simulation of temperature and smoke distribution of a tunnel fire based on modifications of multi-layer zone model. Rapport interne: State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, PR China, pages 1-5, **2007**.
- [7] A. R. Nilsen and T. Log, Results from three models compared to full-scale tunnel fires tests, Fire Safety Journal. Rapport interne : pages 1- 17, **2009**.
- [8] L. H. Hu, R. Huo and W. K. Chow, "Studies on Buoyancy-Driven Back-Layering Flow in Tunnel Fires". Rapport interne: Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 32, No. 8, pp. 1468-1483, 2008.
- [9] H. Ingason, Design fire curves for tunnels, SP Technical Research Institute of Sweden, Box 857,50115 Boras, Sweden, pages 1-7, **2008**.
- [10] M. Gandit "Innovation Sociotechnique et Organisations Université Pierre Mendès France. Rapport interne: Road-tunnel fires: Risk perception and management strategies among users, pages 1-10, **2009**.
- [11] F. Nmira, J.L. Consalvi, A. Kaiss, A. C. Fernandez-Pello, B. Porterie, A numerical study of water mist mitigation of tunnel fires, Fire Safety Journal. Rapport interne, pages 1-14, **2009**.
- [12] T. Yan, Full-scale experimental study on smoke flow in natural ventilation road tunnel fires with shafts, School of Energy and Environment, Southeast University. Rapport interne, China, pages 1-7, **2009**.

- [13] D. Han, Flame and smoke detection method for early real-time detection of a tunnel fire. Rapport interne: Department of Computer Engineering. University of Seoul, Korea, pages 1-11, **2009**.
- [14] R. Borchiellini, A fuzzy logic procedure for ventilation control in case of fire in long tunnels. Rapport interne: Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino, Torino 10129, Italy, pages 1-8, **2009**.
- [15] D. Yang, Experimental study on buoyant flow stratification induced by a fire in a horizontal channel, State Key Laboratory of Fire Science. Rapport interne: University of Science and Technology of China, China, pages 1-7, **2010**.
- [16] K.C. Karki, S.V. Patankar, E.M. Rosenbluth, S. Levy « CFD Model For Jet Fan Ventilation Systems », livre: Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle tunnels Principles, Analysis and Design, pages 124-392, **2000**.
- [17] Carvel; The influence of longitudinal ventilation systems on fires in Tunnels. Rapport interne. Department of Civil & Offshore Engineering, Heriot-Watt University, Edinburgh, EH14 4AS, UK, pages 1-19, **2001**.
- [18] W. K. Chow, Case study: vehicle fire in a cross-harbour tunnel in Hong Kong. Rapport interne: Department of Building Services Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, PR China, pages 1- 8, **2001**.
- [19] V. Novozhilov, Computational fluid dynamics modeling of compartment fires. Rapport interne: School of mechanical and production engineering, Singapore. Pages 1-56, **2001**.
- [20] F. Chen, H. M. Jang, W. J. Chang, « Stack effects on smoke propagation in subway stations » Continuum Mechanics. Rapport interne: Thermodynamic Journal. pages 425–440, **2003**,
- [21] H. Kurioka, Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels. Rapport interne: Kajima Technical Research Institute. Japan, pages 1-22, **2003**.
- [22] O. Vauquelin, Mise en place d'une technique expérimentale destinée à simuler les fumées d'incendie par un rejet isotherme de faible densité, application à l'étude des feux en tunnels. Rapport interne: Université de la Méditerranée, Marseille, France. Pages 1-4, **2005**.
- [23] C. Crouzix, J. Mouêl, F. Perrier, P. Richon, Thermal stratification induced by heating in a non adiabatic context, Building and environment. Rapport interne: pages 1-14, **2005**.
- [24] B. Choi et H. Kurioka, A new design criterion of fire ventilation for transversely ventilated tunnels. Rapport interne: Korea. Pages 1-9, **2006**.
- [25] E. Stefopoulos, D. Damigos, School of Mining Engineering and Metallurgy, laboratory of Mining and Environmental Technology. National Technical

University of Athens Design of emergency ventilation system for an underground storage facility. Rapport interne: Pages 1-10, **2006**.

- [26] F. Yuan et S. You, School of Environment Science and Technology, Tianjin University, China. Rapport interne: CFD simulation and optimization of the ventilation for subway side-platform. Pages 1- 9, **2006**.
- [27] J. Abanto, Prediction of fire and smoke propagation in an underwater tunnel. Rapport interne: École Polytechnique de Montréal, (Québec). Canada. Pages 1-6, **2006**.
- [28] Y. Wanga et B. Choi, Nanjing University of Technology, Jiangsu Key Laboratory of Urban and Industrial Safety, China. Rapport interne: Diesel oil pool fire characteristic under natural ventilation conditions in tunnels with roof openings, pages 1-9, **2008**.
- [29] Bari, Simulation of airflow and pollution levels caused by severe traffic jam in a road tunnel. Rapport interne: Sustainable Energy Center, School of Advanced Manufacturing and Mechanical Engineering, University of South Australia, Mawson Lakes, SA 5095, Australia. Pages 1-8, **2009**.
- [30] A. Ouarem, Etude de la propagation des fumées d'incendie d'une locale source vers un local cible ventilé mécaniquement, Rapport interne : Institut UNIMECA. École Supérieur Polytechnique d'Alger, pages 13-56, **2004**.
- [31] W. Chow, Y. Cui, R. Huo, Natural smoke filling in atrium with liquid pool fires up to 1.6MW. Livre: Building and environment, vol. 36. Pages 121-127, **2001**.
- [32] K. McGrattan, Fire Dynamics Simulator (Version 4). Livre: Technical Reference Guide, National Institute of Standard Technology, pages 23-41, **2004**.
- [33] A.K.Gupta, K.Rajiv, Compartment fires: A simple Mathematical model. Rapport interne : J. Applied fire science, vol. 11(1), pages 53-75, **2003**.
- [34] C. Xiaojun, Y. Lizhong, D. Zhihua, F. Weicheng, A multi-Layer zone model for predicting fire behaviour in a fire room. Rapport interne: Fire Safety Journal, vol. 40, pages 267-281, **2005**.
- [35] K. McGrattan, User's Guide for Smokeview (version 4). livre technical reference guide. NIST special publication (1018-5). National institute of standards and technology, pages 163-225, **2007**.
- [36] A. Bounagui, A. Kashef and N. Bénichou, CFD simulation of the fire Dynamic for a section of a tunnel in the event of fire. Rapport interne: 12th Annual Conference of the Computational Fluid Dynamics Society of Canada, pages 1-8, Ottawa **2004**.
- [37] J. Ray , « le mouvement des fumées ». Rapport interne : M. Science Chimie Journal, pages 1-15, Janvier **2007**.
- [38] B. Leonard et S. Mokhtari, Beyond first order up winding: the ultra sharp alternative of nonoscillatory steady state simulation of convection. Rapport interne : Int. J. Numer. Methods Eng, Vol. 30, pages 729-766, **1990**.

- [39] Patankar S.V. and Spalding D. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three dimensional parabolic flows. livre. Int. J. Heat Mass Transf., Vol. 15, pages 1187-1806, **1972**.
- [40] F.A. Albini et Wildland, fire spread by radiation, a model including fuel cooling by convection. Rapport interne : Combust. Sci. Technol, Vol. 45, pages 101–113, 1986.
- [41] J.V. Doormall et G. Raithby, Enhancements of the simple method for predicting incompressible fluid flows. Rapport interne : Numerical Heat Transf., Vol. 7, pages 147-168, **1984**.
- [42] S.V. Patankar et D. A. Spalding, calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three dimensional parabolic flows. Rapport interne : Int. J. Heat Mass Transf., Vol. 15, pages 1187-1806, **1980**.



# ANNEXES

## Annexe A : Processus de combustion dans un feu :

La flamme est considérée comme un corps noir, c'est-à-dire qu'elle absorbe toutes les radiations quelque soit leurs directions et leurs longueurs d'ondes. Le flux radiatif de la flamme est donné par la loi de Stéphane Boltzmann sous la forme :

$$\phi_0 = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_f^4 - T_a^4) \quad (i)$$

Avec :

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$  ; [W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>] est la Constante de Stéphane Boltzmann ;

$\varepsilon$  : est émissivité ;

### ➤ Modélisation de la turbulence

La difficulté avec les écoulements turbulents réside dans le nombre d'inconnues qui est supérieur au nombre d'équations du système. Afin de palier à cet inconvénient, des modèles de turbulence sont proposés tels que :

➤ Modèles du 1<sup>er</sup> ordre, qui consiste à modéliser les corrélations en les reliant directement au mouvement moyen. Ces modèles qui reposent sur le concept de la viscosité turbulente.

➤ Modèles du 2<sup>ème</sup> ordre, pour lesquels les corrélations sont résolues après avoir modélisé directement les inconnues d'ordre 3 (Résolution des équations d'ordre n fait appel à des corrélations d'ordre n+1).

Les modèles qui reposent sur le concept de la viscosité turbulente évaluent le tenseur de Reynolds à partir de quantités moyennes connues. Boussinessq (1877) était le premier à avoir proposé une analogie avec la loi de Newton. Elle exprime la proportionnalité du tenseur des contraintes visqueuses  $\tau_{ij}$ , avec le taux de déformation à l'aide de la viscosité moléculaire dans le cas d'un écoulement visqueux.

Le tenseur de Reynolds est donc supposé fonction du taux de déformation moyen par l'intermédiaire de la viscosité dynamique turbulente  $\mu_t$ , et fonction également de l'énergie cinétique turbulente  $k$  tel que :

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (ii)$$

Le problème se résume maintenant sur l'estimation de cette viscosité turbulente qui, à l'inverse de la viscosité moléculaire, n'est pas une propriété physique du fluide. Le choix de la forme de la viscosité turbulente, différencie les modèles utilisant ce concept. Les plus populaires sont le modèle de Longueur de mélange et le modèle  $k - \varepsilon$ . Le modèle de Longueur de mélange stipule que la viscosité turbulente est décrite proportionnellement à une échelle de vitesse turbulente et une échelle de longueur. L'application de ce modèle demeure limitée compte tenu que l'échelle de longueur n'est pas toujours facile à déterminer.

Le modèle  $k - \varepsilon$  décrit au paragraphe 3.5.1.1, introduit l'énergie cinétique turbulente donnée par :  $k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_j'}$ . Le taux de dissipation,  $\varepsilon$  est déterminé à partir de :

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} .$$

La viscosité turbulente pour le modèle  $k - \varepsilon$  s'écrit :

$$\mu_t = C_\mu \cdot \rho \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (iii)$$

Où :  $C_\mu$  est une constante égale à 0.09 ;

L'inconvénient de ce modèle est qu'il prévoit des viscosités turbulentes parfois élevées dans des zones stagnantes. Dans le cas où les effets de différences de densités existent, il convient de s'assurer que la production de turbulence associée est aussi incluse dans le modèle [30].

Les modèles du 2ème ordre résolvent une équation de transport pour chaque composante du tenseur de Reynolds et des flux turbulents. Des manipulations d'équations moyennées conduisent à faire une approximation de chaque terme d'équations de transport à l'aide des lois incluant des fonctions d'ordre 2. Ces modèles ont l'avantage d'être précis, mais demande un temps de calcul excessif.

### ➤ Présentation d'exemple sur FDS

Pour spécifier que c'est un combustible liquide, on écrit dans la ligne de commande de la réaction PHASE='LIQUID'. Après cette étape, il suffit de spécifier la réaction dans la surface correspondante dans le domaine de calcul.

Sur FDS, le choix du maillage nécessite une bonne optimisation pour les raisons qu'on verra un peu plus loin. On conserve la même géométrie du tunnel. Le temps de simulation est fixé.

Le FDS a été conçu à l'origine pour des problèmes purement liés aux incendies, et qui dit incendie, pense à des équipements de détection ou de contrôle. Pour cela, il est possible d'intégrer des détecteurs de fumées ou de chaleurs, (SMOD, HEAT, SPRK..) et même des arroseurs si on veut éteindre le feu une fois propagé à n'importe quel instant du calcul. De plus, il est possible de spécifier la présence de fuites dans le domaine de calcul.

La création du domaine de calcul et la définition des conditions de simulation (maillage, conditions aux limites, emplacement de la source...) sont réalisées en éditant un fichier texte avec le bloc-notes Windows ou Word Pad. L'exécution du calcul ainsi que la récupération des résultats de simulations se font sous l'invite de commande. Un exemple de fichier texte est présenté par la figure (\*). Cet exemple correspond à la simulation des fumées dans un tronçon de tunnel de dimensions (50 m × 8 m × 5 m) non ventilé.

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

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

```

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

```

Figure (\*) : Exemple d'un fichier texte généré pour la simulation sous FDS.

- La durée de la simulation (10 s), l'Heptane est choisi comme combustible et le matériau utilisé pour la construction est le béton qui sont respectivement définis aux lignes (3), (4) et (5).
- La réaction de combustion générée par le feu de bac dégage une puissance thermique par unité de surface de 1500 (kW/m<sup>2</sup>), la surface du bac est de (2 m × 3 m) aux lignes (6) et (7).
- Les deux ouvertures du tunnel sont considérées comme « OPEN » (conditions atmosphériques de part et d'autre du tunnel) aux lignes (8) et (9).
- Et, enfin, les plan (x =12.5, 25, 37.5 ; y =5.0 ; z =5.0) et les quantités que l'on souhaite visualiser à l'aide de *Smokeview* (outil spécifiquement conçu pour analyser les données produites par FDS) aux lignes (10) à (14).

## Annexe B : Exemples d'un fichier input FDS4

### ➤ Désenfumage dans un tunnel routier (transversal)

```

&HEAD CHID='Magister', TITLE='TUNNEL.vent. trans./'
&GRID IBAR=550,JBAR=12,KBAR=23/
&PDIM XBAR=550,YBAR=9.75,ZBAR=4.68/volume bas
&GRID IBAR=550,JBAR=12,KBAR=9/
&PDIM XBAR=550,YBAR=9.75,ZBAR0=4.68,ZBAR=6.48/volume haute

&TIME TWFIN=300.0/

&MISC NFRAMES=60, REACTION='HEPTANE',
  SURF_DEFAULT='CONCRETE'/

&SURF ID='FIRE' ,HRRPUA=50000. ,RGB=1, 0, 0/

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

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

&VENT XB= 199.5,201.5,4.375,5.375,0.,0. SURF_ID='FIRE' /

/TUNNEL

&VENT XB=0.0,0.0,0.0,9.75,0.0,4.68,RGB=0.6,0.6,0.6,SURF_ID='OPEN'/1
&VENT XB=550.,550,0.0,9.75,0.0,4.68,RGB=0.6,0.6,0.6,SURF_ID='OPEN'/2e v
/TRAPPE
&SURF ID='TRAPPE',VEL=30.0,RGB=0.0,0.0,1.0/ ventilation transversale

&VENT XB=233.6,236.4,3.375,6.375,4.68,4.68,RGB=0,1,0,SURF_ID='TRAPPE 1'/
&VENT XB=303.5,306.4,3.375,6.375,4.68,4.68,RGB=0,1,0,SURF_ID='TRAPPE 2'/
&VENT XB=373.6,376.4,3.375,6.375,4.68,4.68,RGB=0,1,0,SURF_ID='TRAPPE 3'/
&VENT XB=443.6,446.4,3.375,6.375,4.68,4.68,RGB=0,1,0,SURF_ID='TRAPPE 4'/
&VENT XB=513.6,516.4,3.375,6.375,4.68,4.68,RGB=0,1,0,SURF_ID='TRAPPE 5'/

/COUNTEUR TEMPERATURE

&SLCF PBX=0. , QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBX=20. , QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBX=40. , QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBX=60. , QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBX=80. , QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBX=100., QUANTITY=' TEMPERATURE '/

```

```
&SLCF PBX=120., QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBX=140., QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBX=160., QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBX=180., QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBX=200., QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBX=220., QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBX=240., QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBX=260., QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBX=280., QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBX=300., QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBX=320., QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBX=340., QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBX=360., QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBX=380., QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBX=400., QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBX=450., QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBX=480., QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBX=500., QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBX=520., QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBX=550., QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBY=0. , QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBZ=4.8 , QUANTITY=' TEMPERATURE '/
&SLCF PBZ=6.8 , QUANTITY=' TEMPERATURE '/
```

/COUNTEUR carbon dioxide

```
&SLCF PBX=0. , QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBX=20. , QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBX=40. , QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBX=60. , QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBX=80. , QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBX=100., QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBX=120., QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBX=140., QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBX=160., QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBX=180., QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBX=200., QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBX=220., QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBX=240., QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBX=260., QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBX=280., QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBX=300., QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBX=320., QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBX=340., QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBX=360., QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBX=380., QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBX=400., QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBX=450., QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBX=480., QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBX=500., QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBX=520., QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBX=550., QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBY=0. , QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBZ=4.8 , QUANTITY='carbon dioxide'/
&SLCF PBZ=6.8 , QUANTITY='carbon dioxide'/
```

/COUNTEUR HRRPUV

```
&SLCF PBX=0. , QUANTITY='HRRPUV'/
&SLCF PBX=20. , QUANTITY='HRRPUV'/
```

&SLCF PBX=40. , QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBX=60. , QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBX=80. , QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBX=100., QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBX=120., QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBX=140., QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBX=160., QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBX=180., QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBX=200., QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBX=220., QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBX=240., QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBX=260., QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBX=280., QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBX=300., QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBX=320., QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBX=340., QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBX=360., QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBX=380., QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBX=400., QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBX=450., QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBX=480., QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBX=500., QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBX=520., QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBX=550., QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBY=0. , QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBZ=4.8 , QUANTITY='HRRPUV'/  
&SLCF PBZ=6.8, QUANTITY='HRRPUV'/

/ Les thermocouples

&THCP XYZ=0.,4.875,2. ,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='TEMP 0',DTSAM=10. /  
&THCP XYZ=20.,4.875,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL=' TEMP 20' /  
&THCP XYZ=40.,4.875,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL=' TEMP 40' /  
&THCP XYZ=60.,4.875,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL=' TEMP 60' /  
&THCP XYZ=100.,4.875,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL=' TEMP 100' /  
&THCP XYZ=120.,4.875,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL=' TEMP 150' /  
&THCP XYZ=140.,4.875,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL=' TEMP 150' /  
&THCP XYZ=150.,4.875,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL=' TEMP 150' /  
&THCP XYZ=180.,4.875,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL=' TEMP 180' /  
&THCP XYZ=200.,4.875,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL=' TEMP 200' /  
&THCP XYZ=240.,4.875,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL=' TEMP 240' /  
&THCP XYZ=260.,4.875,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL=' TEMP 260' /  
&THCP XYZ=280.,4.875,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL=' TEMP 280' /  
&THCP XYZ=300.,4.875,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL=' TEMP 300' /  
&THCP XYZ=350.,4.875,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL=' TEMP 350' /  
&THCP XYZ=380.,4.875,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL=' TEMP 380' /  
&THCP XYZ=400.,4.875,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL=' TEMP 400' /  
&THCP XYZ=440.,4.875,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL=' TEMP 440' /  
&THCP XYZ=480.,4.875,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL=' TEMP 480' /  
&THCP XYZ=500.,4.875,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL=' TEMP 500' /  
&THCP XYZ=530.,4.875,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL=' TEMP 530' /  
&THCP XYZ=550.,4.875,2.,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL=' TEMP 550' /

/ Les thermocouples

&THCP XYZ=0.,4.875,2.,QUANTITY='carbon monoxide ',LABEL='CO 0',DTSAM=10. /  
&THCP XYZ=20.,4.875,2.,QUANTITY='carbon monoxide ',LABEL='CO 20' /  
&THCP XYZ=40.,4.875,2.,QUANTITY='carbon monoxide ',LABEL='CO 40' /  
&THCP XYZ=60.,4.875,2.,QUANTITY='carbon monoxide ',LABEL='CO 60' /  
&THCP XYZ=100.,4.875,2.,QUANTITY='carbon monoxide ',LABEL='CO 100' /



```

&THCP XYZ=120.,4.875,2.,QUANTITY='carbon monoxide ',LABEL='CO 150' /
&THCP XYZ=140.,4.875,2.,QUANTITY='carbon monoxide ',LABEL='CO 150' /
&THCP XYZ=150.,4.875,2.,QUANTITY='carbon monoxide ',LABEL='CO 150' /
&THCP XYZ=180.,4.875,2.,QUANTITY='carbon monoxide ',LABEL='CO 180' /
&THCP XYZ=200.,4.875,2.,QUANTITY='carbon monoxide ',LABEL='CO 200' /
&THCP XYZ=240.,4.875,2.,QUANTITY='carbon monoxide ',LABEL='CO 240' /
&THCP XYZ=260.,4.875,2.,QUANTITY='carbon monoxide ',LABEL='CO 260' /
&THCP XYZ=280.,4.875,2.,QUANTITY='carbon monoxide ',LABEL='CO 280' /
&THCP XYZ=300.,4.875,2.,QUANTITY='carbon monoxide ',LABEL='CO 300' /
&THCP XYZ=350.,4.875,2.,QUANTITY='carbon monoxide ',LABEL='CO 350' /
&THCP XYZ=380.,4.875,2.,QUANTITY='carbon monoxide ',LABEL='CO 380' /
&THCP XYZ=400.,4.875,2.,QUANTITY='carbon monoxide ',LABEL='CO 400' /
&THCP XYZ=440.,4.875,2.,QUANTITY='carbon monoxide ',LABEL='CO 440' /
&THCP XYZ=480.,4.875,2.,QUANTITY='carbon monoxide ',LABEL='CO 480' /
&THCP XYZ=500.,4.875,2.,QUANTITY='carbon monoxide ',LABEL='CO 500' /
&THCP XYZ=530.,4.875,2.,QUANTITY='carbon monoxide ',LABEL='CO 530' /
&THCP XYZ=550.,4.875,2.,QUANTITY='carbon monoxide ',LABEL='CO 550' /

```

/ Les thermocouples

```

&THCP XYZ=0.,4.875,2.,QUANTITY='HRRPUV',LABEL='U 0',DTSAM=10. /
&THCP XYZ=20.,4.875,2.,QUANTITY='HRRPUV',LABEL='U 20' /
&THCP XYZ=40.,4.875,2.,QUANTITY='HRRPUV',LABEL='U 40' /
&THCP XYZ=60.,4.875,2.,QUANTITY='HRRPUV',LABEL='U 60' /
&THCP XYZ=100.,4.875,2.,QUANTITY='HRRPUV',LABEL='U 100' /
&THCP XYZ=120.,4.875,2.,QUANTITY='HRRPUV',LABEL='U 150' /
&THCP XYZ=140.,4.875,2.,QUANTITY='HRRPUV',LABEL='U 150' /
&THCP XYZ=150.,4.875,2.,QUANTITY='HRRPUV',LABEL='U 150' /
&THCP XYZ=180.,4.875,2.,QUANTITY='HRRPUV',LABEL='U 180' /
&THCP XYZ=200.,4.875,2.,QUANTITY='HRRPUV',LABEL='U 200' /
&THCP XYZ=240.,4.875,2.,QUANTITY='HRRPUV',LABEL='U 240' /
&THCP XYZ=260.,4.875,2.,QUANTITY='HRRPUV',LABEL='U 260' /
&THCP XYZ=280.,4.875,2.,QUANTITY='HRRPUV',LABEL='U 280' /
&THCP XYZ=300.,4.875,2.,QUANTITY='HRRPUV',LABEL='U 300' /
&THCP XYZ=350.,4.875,2.,QUANTITY='HRRPUV',LABEL='U 350' /
&THCP XYZ=380.,4.875,2.,QUANTITY='HRRPUV',LABEL='U 380' /
&THCP XYZ=400.,4.875,2.,QUANTITY='HRRPUV',LABEL='U 400' /
&THCP XYZ=440.,4.875,2.,QUANTITY='HRRPUV',LABEL='U 440' /
&THCP XYZ=480.,4.875,2.,QUANTITY='HRRPUV',LABEL='U 480' /
&THCP XYZ=500.,4.875,2.,QUANTITY='HRRPUV',LABEL='U 500' /
&THCP XYZ=530.,4.875,2.,QUANTITY='HRRPUV',LABEL='U 530' /
&THCP XYZ=550.,4.875,2.,QUANTITY='HRRPUV',LABEL='U 550' /

```

```

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

```

### ➤ Désenfumage dans un tunnel routier (longitudinal)

```

&HEAD CHID='PFE_3',TITLE='vent. long.' /
&MESH IJK=200,16,25 , XB=0.0,200.0,-5.0,5.0,0.0,5.0 /
&TIME TWFIN=50.0 /
&MISC SURF_DEFAULT='CONCRETE SURFACE' /
&REAC ID='HEPTANE'
  FYI='Heptane, C_7 H_16'
  C=7.
  H=16.
  CO_YIELD=0.006
  SOOT_YIELD=0.015 /

```

```

&MATL ID      = 'CONCRETE'
  FYI         = 'Quintiere, Fire Behavior'
  SPECIFIC_HEAT = 0.88
  DENSITY     = 2100.
  CONDUCTIVITY = 1.0 /
&SURF ID     = 'CONCRETE SURFACE'
  COLOR      = 'GRAY 60'
  MATL_ID    = 'CONCRETE'
  THICKNESS = 0.1 /

&SURF ID='FIRE',HRRPUA=3750.,COLOR='RED'/
&VENT XB= 99.,101.,-1.,1.,0.,0. , SURF_ID='FIRE' / source de chaleur
&VENT XB= 0., 0., -5., 5.0, 0.0, 5.0,color='PINK',SURF_ID='OPEN'/ 1er ouver
&VENT XB= 200.0, 200.0, -5.0, 5.0, 0.0, 5.0,color='PINK',SURF_ID='OPEN'/2e
&SURF ID='BLOWER' ,VEL=-10., TMP_Front=20., COLOR='BLUE'/ vent.long
&OBST XB=0.0,2.0,-5.0,5.0,3.0,5.0,COLOR='MELON'/1er ventilateur
&VENT XB=2.0,2.0,-5.,5.0,3.0,5.0,color='AQUAMARINE',SURF_ID='BLOWER'/ouver
/ Les thermocouples

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

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

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

```