REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Faculté des Sciences et de la Technologie

Université de Médéa





Département du Génie des procédés et environnement

PROJET DE FIN D'ETUDES

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Professionnel

en Génie des procédés et environnement

Option gestion des risques et crises

Thème :

Etude Numérique de la Propagation des Fumées et du Désenfumage dans un Immeuble à Plusieurs Etages en cas d'un Incendie

Proposé et dirigé par :

Dr. ALLICHE Mounir

Etudié et présenté par :

LT.KECHAFFI Mohamed

Promotion 2012- 2013

Remerciement

Nous formulons notre profonde gratitude à Dieu tout Puissant, qui nous a donné la volonté pour la réalisation de ce modeste travail.

Ainsi notre respectueuse gratitude va à mon promoteur Dr : Alliche.M qui a bien voulu me prodigué ses précieux conseils et m'a orienté tâche tout le long de mon travail.

Jes remerciements à tous ceux qui m'ont aidé pour la réalisation de ce modeste travail.

Nos remerciements vont également aux membres de jury qui ont bien voulu examiner mon travail.

Dédicaces

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

... Mohamed

ملخـــص:

العمل المقدم هو عبارة عن دراسة رقمية لسريان و استخراج دخان حريق من عمارة مشكلة من خمس طوابق ، حيث أن هدف الدراسة هو إيجاد الحالات الحاسمة للحريق من أجل سلامة السكان و ذلك لعدة سيناريوهات بواسطة برنامج رقمي (**FDS**) الخطة المتبعة لاستخراج الأدخنة تتمثل في إبعاد الأدخنة على شكل طبقات في السقف ثم استخراجها بواسطة مهوءات في السقف .

الكلمات المفـــتاحية : تمثيل ، أدخنة ، حريق ، انتشار ، تهوية ، **FDS** .

Résumé :

Le travail présenté consiste à étudier numériquement le transfert de chaleur à travers la propagation des fumées dans le cas d'un incendie dans un immeuble à plusieurs étages (ici 5 étages). Il s'agit de déterminer les scénarios d'incendie critiques dans l'immeuble afin de prévoir la sécurité de ses usagers, en s'appuyant sur des simulations numériques à l'aide du logiciel FDS (Fire Dynamic Simulator). La stratégie de désenfumage consiste à maintenir la stratification des fumées et leurs extractions sera utilisée.

Pour un feu se déclenchant en un point quelconque de l'immeuble, différentes configurations seront considérées. On a montré, à travers cette étude, les cas les plus critiques pour la sécurité des usagers et déduire en fin le temps minimal d'intervention.

Mots clés : *Simulation, fumées, incendie, propagation de flamme, ventilation, FDS.*

Abstract :

The present works is to study numerically the heat transfer through the spread of smoke in the event of a fire in multi storey building (5 stages here) these scenarios identify critical simulations using the FDS (fire dynamic simulation) software.

The strategy of smoke evacuation on maintaining smoke stratification and extraction.

For triggering a fire at only point of the building, different configurations wall be considered at has been shown through this study, the mast critical case for the safety of users and deduct the minimum response time.

Keywords : *Simulation, Smokes, Fire, Flamme Propagation, Ventilation, FDS*

SOMMAIRE

Introduction générale 1

Chapitre 1 *Généralistes sur l'incendie* 5
1-1- Feu et combustion 5
1-2- Inflammation 5
1-3- Effets d'un incendie 6
1-4- Feux en espace confine 7
1-5- Les fumées 9
1- 5-1- Quelque caractéristique des fumées 9
1-5-2- Mode de propagation des fumées 10
1-5-2-1- Mode de diffusion 10
1-5-2-2- Mode de dispersion 10
1-5-2-3- Mode de mélange 10
1-5-3- les forces qui conduisent le mouvement des fumées 11
1-5-3-1- La poussée d'archimède (force de flottabilité) 11
1-5-3-2- La surpression causée par le feu 12
1-5-3-3- La dilatation thermique 12
1-5-3-4- La différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment 13
1-5-3-5- Les différences de pression en fonction de la hauteur d'un bâtiment 14
1-5-3-6- La densité et la composition de la fumée 15
1-5-4- Dangers des fumées 16
1-5-5- Le désenfumage 17
1-5-5-1- les objectifs de désenfumages 17
1-5-5-2- Stratégie de désenfumage 17
1-6- Les risque incendie 18
1-6-1- Rappel sémantique relatif à la notion de risque 19
1-6-1- les principes sources de danger liées au feu 19

Chapitre 2 *La modélisation des incendies* 22
2-**1-** Introduction 23
2-**2-** Principe de la modélisation des incendies 23
2-**2- 1-** Etat de l'art de simulation numérique de l'incendie 23
2-**2- 2-** Modes de zone 23
2-**2- 3-** Modes de champs 25
2-**2-3-1-** Généralités 25
2-2-3-2- Sous-modèle de combustion 26
2-2-3-3- Sous-modèle de rayonnement 27
2-2-3-4- Sous-modèle de Turbulence 28

Chapitre 3 *Formulation mathématique du code FDS* 31
3-**1-** Modèles présents dans FDS 31
3-1-1- Modèle hydrodynamique 31
3-1-2- Modèle de combustion 33
3-1-3- Modèle de rayonnement 34
3-1-4- Modèle de Combustion 34
3-2-Résolution numérique 35
3-2-1- Equation simplifiées (modèle hydrodynamique) 35
3-2-2- Discrétisation temporelle 35
3-2-3- Discrétisation spatiale 36
Chapitre 4 *Présentation du code fire dynamics simulator FDS* 38
4-1- Introduction 38
4-**2-** Le code fire dynamics simulator 38
4-2-1- Principe et objectifs du modèle 39
4-2-2- Description de FDS 39
4-2-3- Définition des conditions de simulation sous FDS (Fichier input) 41
4-2-4- Résultats générés 42
4-2-5- Modélisation en utilisant la technique LES 42
4-2-6- Domaine de calcul 43
4-2-7- Maillage 43

Chapitre 5 *Résultats et études de cas avec FDS* 44
5-**1-** Etude et simulation du désenfumage dans un tunnel routier 44
5-**2-** Stratégie longitudinale 44
5-**2-1-** Modélisation de la stratégie longitudinale 46
5-2-2- Simulation et résultats 46
5-2-2-1- Condition initiales et aux limites 46
5-2-2-2- Evaluation de la vitesse critique 48
5-3- Stratégie transversale 52
5-**3-1-** Modélisation de la stratégie transversale 53
5-3-2- Simulation et résultats 53
5-3-2-1- Condition initiales et aux limites 53
5-3-2-2- Evaluation de la vitesse de confinement 54
5-4- Etude et simulation du désenfumage dans un bâtiment 55
5-**4-1-** Simulation 57
5-4-1-1- Condition aux limites 58
5-4-1-2- Résultats de la simulation 58
5-4-2- Analyse de la migration des fumées 62
5-4-3- Champ de température 64
5-4-4- Champ de vitesse 67
5-4-5- Champ de concentration de CO_2 69

Conclusion générale 71
Bibliographies 72
Annexes 74

Notations :

Lettres latines

Di : Coefficient de diffusion de l'élément i [s-1]

$\vec{f}$: Vecteur de forces extérieures [N]

g : Gravité [m/s2]

h : Enthalpie [kj/kg]

h_0: Enthalpie par unite de masse de l'élément i [kj/kg]

H : Hauteur des points de mesure [m]

k : Conductivité thermique ; Energie cinétique turbulente [w/m.K]

m_i''': Débit massique par unité de volume [kg/m3.s]

M : Masse molaire ; Nombre de Mach [-]

N : Nombre de particule [-]

p : Pression [Pa]

p_0 : Pression moyenne [Pa]

$\tilde{P}$: Perturbation de la pression

Q : Puissance thermique [W]

q_r : flux radiatif

$\nabla . q$: Somme des deux flux de chaleur par conduction et par rayonnement

R : Constante des gaz parfait [j/mole.K]

s : vecteur unitaire dans la direction de l'intensité

t : Temps [s]

q'': Taux de dégagement de chaleur par unité de surface [w/m2]

T : Température [K]

T_0 : Température ambiante [K]

U : Vitesse d'écoulement d'air longitudinal [m/s]

U_c : Vitesse critique en stratégie longitudinal [m/s]

u : Vitesse [m/s]

V : Composant de la vitesse verticale [m/s]

V_c : Vitesse critique [m/s]

V_d : Vitesse de déstratification [m/s]

V_e : Vitesse d'extraction [m/s]

V_{in} : Vitesse d'insufflation [m/s]

$\overline{W}$: Poids moléculaire du mélange gazeux [Neton]

W_c : Vitesse de confinement [m/s]

W_e: Vitesse d'extraction en stratégie transversale [m/s]

W : Poids moléculaire de l'espèce gazeuse [kg]

Yi : Fraction massique de l'élément i [-]

Y_0^{∞} : Fraction massique de l'oxygène à l'ambiance

Y_F^1 : Fraction massique de combustible dans le jet

Z : Fraction de mélange

HRPPUA : Puissance thermique par unité de surface

Lettres grecques

Φ : Fonction de dissipation [-]

μ : viscosité dynamique [Pa.s]

ν_α: coefficient stœchiométrique de l'élément α

ρ : Masse volumique [kg/m^3]

ρ_0 : Masse volumique de l'air à l'ambiance [kg/m^3]

τ_{ij}: Les Composantes du tenseur des forces de viscosité [N/m2]

ω : La vorticité

ε : Taux de dissipation [-]

Indices

Pi : Point de mesure de la température

CO2 : Dioxyde de Carbone

CO : Monoxyde de Carbone

N2 : Azote

Ar : Argon

O2 : Oxygène

CH3OH : Méthanol

HCL : Acide Chlorique

Abréviations

BGH : Bâtiment de Grand Hauteur.

LES: Large Eddy Simulation

DNS: Direct Numerical Simulation

FDS: Fire Dynamics Simulator

PPN: Plan de Pression Neutre

Liste des figures:

Figure.1 Construction de la géométrie. 2
Figure.1.1 Triangle du feu 5
Figure.1.2 Entraînement d'air dans le panache d'un feu 7
Figure.1.3 Etapes d'un feu en espace confiné 8
Figure.1.4 Poussée d'archimède 11
Figure.1.5 Mouvement d'air par différence de pression dans un milieu fermé [7] 12
Figure.1.6 Dilatation thermique 13
Figure.1.7 Mouvement de l'air en fonction de la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment [7] 14
Figure.1.8 Dégagement de fumée par différents matériaux [9] 16
Figure.4.1 Schéma de fonctionnement de FDS 40
Figure.4.2 Exemple d'un fichier texte généré pour la simulation sous FDS 41
Figure.4.3 Maillage sur FDS avec système de coordonné 43
Figure.5.1 Mise en évidence de la vitesse critique [4] 45
Figure.5.2 Vitesse critique en fonction de la puissance 46
Figure.5.3 Schéma d'un tunnel routier muni d'une ventilation longitudinale 47
Figure.5.4 Evolution de la vitesse longitudinale U par rapport à la hauteur du tunnel pour différentes vitesses d'insufflation et à différents points de mesure, après 10s et 60s de simulation 50
Figure.5.5 Evolution de la vitesse de l'air U par rapport à la hauteur après 60s de simulation 51
Figure.5.6 Vitesse de confinement en fonction de la puissance 52
Figure.5.7 Schéma d'un tunnel routier muni d'une ventilation transversale 53
Figure.5.8 Variation de la longueur de la couche de fumée en fonction de vitesse d'extraction 54
Figure.5.9 Schéma d'un logement du bâtiment 55
Figure.5.10 Schéma d'un bâtiment muni d'une ventilation transversale 56
Figure.5.11 Vue domaine de calcul 57
Figure.5.12 Profils de température et de concentration de co_2 à t=120 s 59
Figure.5.13 Profils de température et de concentration de co_2 à x=11.9m 60
Figure.5.14 Profils de température et de concentration de co_2 à x=2.55m 61
Figure.5.15 Profils de la vitesse de l'écoulement à t=120 s 61
Figure.5.16 Enfumage du tunnel après 120s de simulation 64
Figure.5.17 Champ de température selon les plans X=2.55m, X=11.9m 66
Figure.5.18 Champ de vitesse selon les plans X=2.55m, X=11.9m 69
Figure.5.19 Champ de concentration de CO_2 selon les plans X=2.55m, X=11.9m 71

Liste des tableaux

Tab.1.1 Principales sources de danger pour les personnes et les biens lors d'un feu dans un bâtiment 21
Tab.2.1 La démarche générale d'ingénierie de sécurité incendie 22
Tab.2.2 Les différents modèles de zone existants 25
Tab.2.3 Les différents modèles de champ existants 30
Tab.5.1 Puissances thermique dégagée 47
Tab.5.2 Récapitulation des différentes situations de migration des fumées 51

Introduction générale

Introduction Générale

La prédiction du mouvement des fumées dans les bâtiments et la conception d'un système de contrôle des fumées sont des éléments importants pour concevoir une stratégie de sécurité de feu pour un bâtiment.

Pour être capable de concevoir une stratégie de contrôle des fumées convenable, un expert de la sécurité de feu a besoin d'établir plusieurs paramètres qui décrivent la dynamique de mouvement des fumées et son impact sur les occupants du bâtiment.

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

Dans cette étude on s'intéresse au contrôle et à la propagation des fumées lors d'un incendie dans un bâtiment, en s'appuyant sur des simulations numériques réalisées à l'aide d'un logiciel CFD (Computational Fluid Dynamics). On utilisé le logiciel FDS [1].

1. Historique des incendies dans les tunnels et bâtiments :

Le premier système ferroviaire urbain et la première ligne souterraine du monde Métropolitain a ouvert le 10 janvier 1883 à Londres [1]. Le taux d'augmentation de la population, de l'embouteillage et de la circulation croissant dans les grandes villes du monde sont les raisons principales pour l'exigence de transport de façon plus rapide. Comme ces lignes de transport deviennent plus fréquentes, le contrôle de l'environnement dans les véhicules, dans les postes de métro et les tunnels devient plus crucial pour la sécurité et le confort des passagers.

Les incendies dans les stations de métro se sont produits fréquemment dans le passé, en particulier au cours des deux dernières décennies. Certains cas sont de purs accidents, tandis que d'autres ont été causés par des actes de vandalisme et des attaques terroristes. Trois bien connus des accidents majeurs ont fait l'empreinte indélébile sur notre mémoire, causant un grand nombre de victimes. Le premier s'est passé à la station de métro King's Cross à Londres et le deuxième dans le tunnel de métro de l'Oléoduc Baku (capitale de la République de

Azerbaïdjan) et le troisième à la station Dae Gu en Corée du Sud. L'incendie de la station de métro de King's Cross s'est passé le 18 Novembre 1987 causant un mort et 47 blessés graves. L'incendie de Baku le 29 Octobre 1995 été encore plus grave, l'air chaud et les fumées toxiques ont tué 337 personnes et ont blessé gravement 227 personnes. Celui de Dae Gu qui s'est passé le 18 février 2003 a causé presque 200 morts [2].

2. Description du problème :

L'objective de notre étude est de rechercher les scénarios les plus critiques, pour un incendie qui se déclare dans une structure et émit des fumées qui se propagent dans le bâtiment, en utilisant une approche CFD qui peut simuler le mouvement des fumées et prédire l'élévation de la température et les vitesses d'écoulement dans la structure.

Le modèle physique utilisé est un bâtiment (figure 1) pour rechercher les scénarios de désenfumage les plus critiques pour la sécurité des habitants dans un tel bâtiment [2].

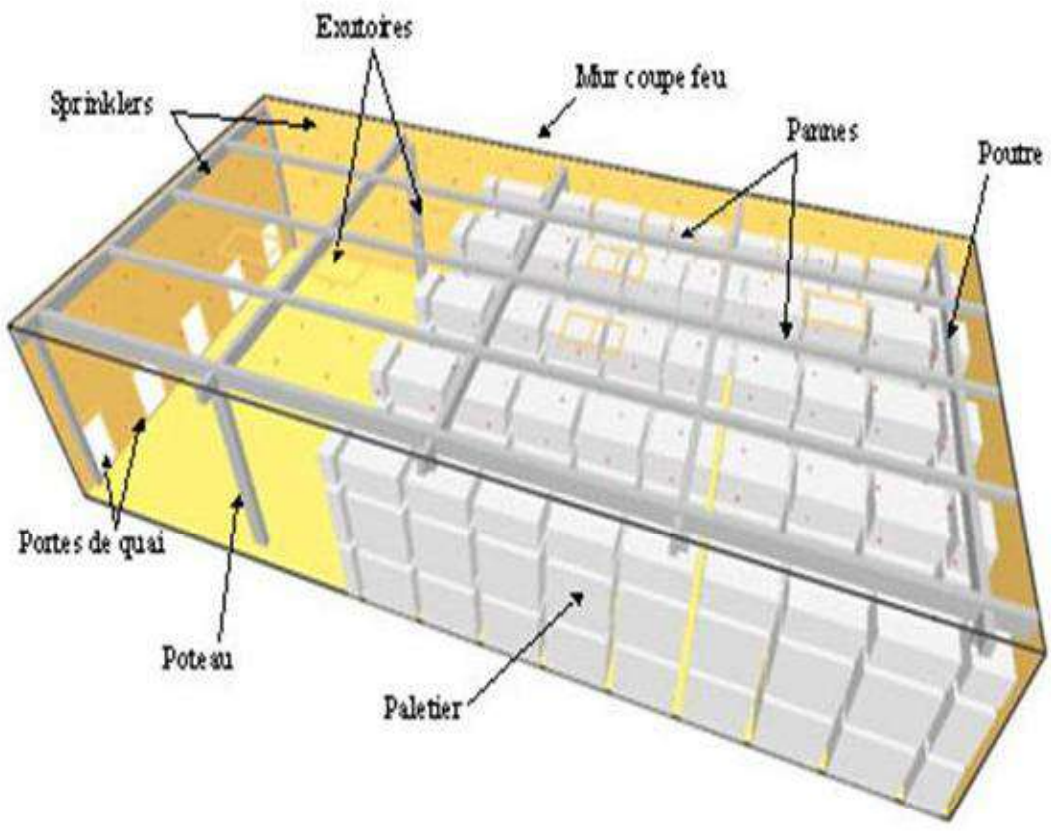


Figure.1: Construction de la géométrie

3. Scénarios de propagation du feu à l'intérieur d'un bâtiment :

Pour réaliser la simulation de scénarios de propagation du feu à l'intérieur d'un bâtiment, plusieurs étapes sont nécessaires :

- Identifier le terme source de l'incendie: cette étude vise à fournir tout à la fois l'énergie liée au combustible et la cinétique de l'incendie. Cette étude peut être réalisée au moyen d'essais ou de modèles.
- Identifier les zones où le risque d'initiation du feu est le plus important ;
- Modéliser le développement de l'incendie.

Pour réaliser cette dernière étape, on utilise souvent des codes à zones aussi bien que des codes à champs. Le plus utilisé de ces outils est le code à champs FDS (Fire Dynamic Simulator) qui a été développé par le NIST (National Institute of Standards and Technology).

Il permet de simuler un écoulement réactif à faible nombre de Mach, donc peu compressible, dont l'établissement est piloté par des phénomènes thermiques. Il nécessite la résolution des équations de Navier Stokes couplées à des modèles chimiques et thermiques.

Le code de calcul considère un domaine 3D et intègre un modèle de combustion, des modèles d'échange de chaleur (radiation, convection, conduction) et des modèles de turbulence (L.E.S : Large Eddy Simulation ou D.N.S : Direct Numerical Simulation).

FDS est principalement utilisé pour les incendies à moyenne et grande échelles qui nécessitent l'utilisation du modèle L.E.S. Les phénomènes physiques que FDS peut simuler sont triés en 4 classes :

- Les phénomènes fluides, représentés par le modèle hydrodynamique,
- Les phénomènes chimiques, représentés par le modèle de combustion adapté au modèle de turbulence choisi,
- Les phénomènes thermiques, représentés par un ensemble de modèles thermiques,
- Les actions et évènements externes, dont chacun est représenté par un modèle spécifique.

Le domaine de simulation est un espace 3D contenant principalement un mélange gazeux. Il s'agit principalement d'un mélange d'air et de produits de combustion. Certaines zones de l'espace peuvent être occupées par des objets solides. La problématique principale est la détermination des mouvements de cette partie gazeuse et des échanges énergétiques au sein même de ce gaz mais aussi avec les obstacles. Le point central de la simulation est la résolution des équations de conservation généralement appelées équations de Navier-Stokes pour un domaine fluide. Ceci comprend les équations de conservation de la masse, des

espèces chimiques, de la quantité de mouvement et de l'énergie. La fermeture est effectuée par une équation d'état : la relation des gaz parfaits appliquée à un mélange [2].

Chapitre 1
Généralités sur l'incendie

1.1. FEU ET COMBUSTION

Un feu est un phénomène physico-chimique. Il est basé sur la réaction d'un combustible avec un comburant. Dans la grande majorité des cas, le comburant est de l'oxygène présent à 21% dans l'air. Pour que la réaction soit possible, une quantité d'énergie, appelée énergie d'activation doit être apportée (exemple de l'allumette sur le grattoir). Très souvent le phénomène de combustion est illustré par le triangle du feu (Figure .1.1).

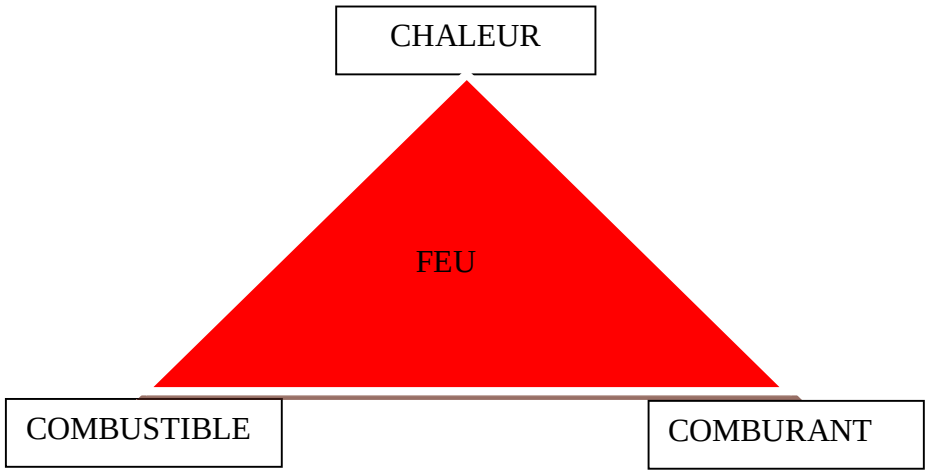


Figure.1.1: Triangle du feu

1.2. INFLAMMATION

Le combustible peut être initialement un liquide, un gaz ou un solide. Mais le phénomène de combustion s'effectue sur un produit à l'état gazeux ou sous forme de vapeurs. Pour que l'inflammation ait lieu, une condition nécessaire est que la concentration de gaz dans le mélange combustible-comburant soit comprise entre la limite inférieure et supérieure d'inflammabilité (respectivement LII et LSI).

Pour un solide, l'énergie calorifique apportée a ensuite pour rôle de porter le mélange à une température minimale appelée température d'auto-inflammation. Pour un liquide, on parlera de point éclair [3].

1.3. EFFETS D'UN INCENDIE

Un feu est caractérisé par le flux d'énergie qu'il dégage par unité de temps en Watts (J/s) ou par un débit calorifique (énergie par unité de temps et de masse) responsable des augmentations de température. Cette énergie dépend des caractéristiques et de la quantité de combustible et du comburant (oxygène) mis en jeu. La flamme qui est observée lors d'un feu représente la libération d'une certaine quantité de cette énergie par un rayonnement dans le domaine du visible.

Il y a quatre formes de propagation de l'énergie produite :

- La radiation,
- La conduction,
- La convection,
- Les brandons (pyrolyse).

La radiation est l'émission d'ondes électromagnétiques qui transportent une partie de l'énergie. Cette énergie est proportionnelle à la puissance 4 de la température. C'est le transfert de chaleur prédominant dès lors que la température est supérieure à 400°C.

La convection est le transport de l'énergie par les mouvements de fluide. Ainsi, la couche limite thermique le long d'une paroi est en relation avec les variations de vitesse des particules à cette paroi (couche limite cinématique).

La conduction est le transfert de chaleur à travers les solides (murs, plafond, etc.). Le transfert d'énergie de cette manière est relié au gradient de température par la loi de Fourier.

Les brandons sont des petites flammeletts qui se dégagent des flammes principales d'un foyer.

La consommation d'oxygène (présent dans l'air) et la production de chaleur génère également d'autres phénomènes et en particulier un écoulement au-dessus de la source combustible qui constitue le panache. La température est plus importante et sous l'effet des forces d'Archimède, il y a une montée des produits de la réaction (fumées, gaz imbrûlés, suie) créant ainsi un mouvement d'entraînement d'air qui alimente le feu en oxygène [3] (Figure1.2).

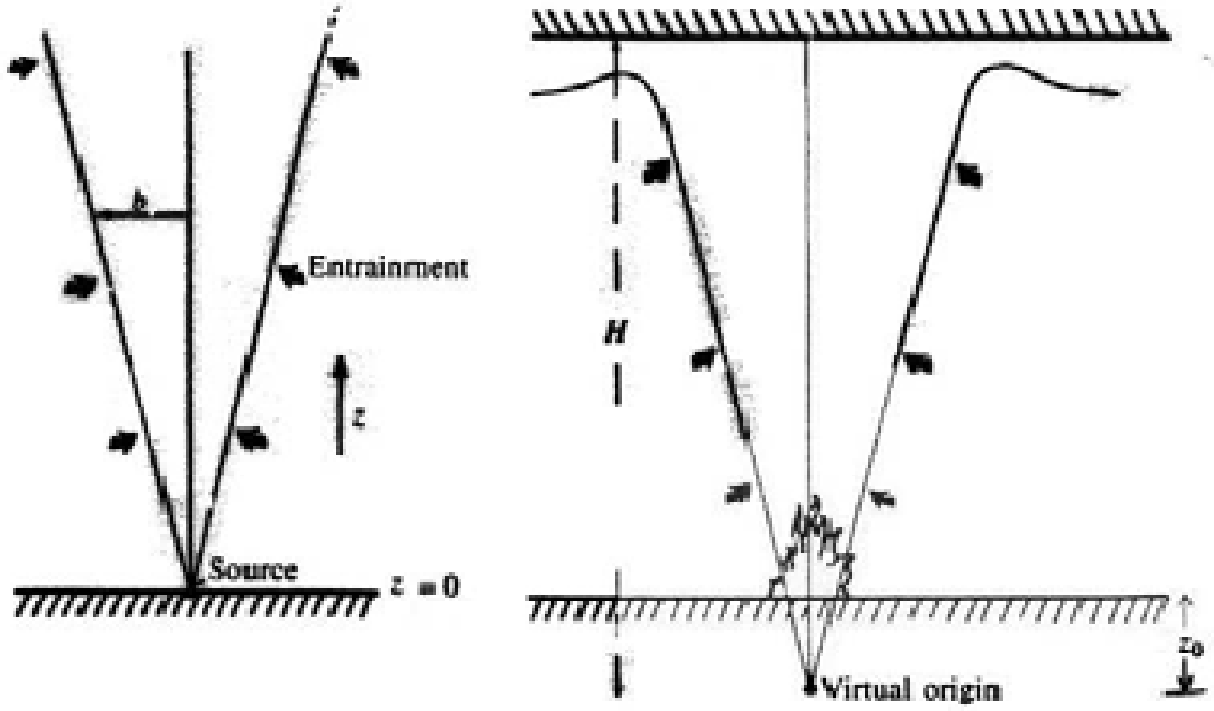


Figure.1.2 : Entraînement d'air dans le panache d'un feu

1.4. FEUX EN ESPACE CONFINE

La complexité de l'ensemble de ces phénomènes est nettement accentuée lorsque l'on considère un feu en espace clos car un grand nombre d'objets et d'interactions doivent être pris en compte pour étudier les transferts de matière et les transferts thermiques.

La difficulté vient du fait qu'en espace clos, la quantité d'air et plus spécifiquement la quantité d'oxygène disponible est un paramètre fondamental qui va gouverner le développement ou non du feu.

Ainsi, selon la ventilation, la combustion peut être ralentie voire s'arrêter et on parle alors de feux sous ventilé.

Ces feux peuvent être décomposés en quatre étapes dans le temps (Figure1.3) :

- **Etape 1 :** Le feu commence à se développer. Lors de cette étape, le panache constitué par les gaz chauds issus de la combustion monte au plafond sous l'effet des forces d'Archimède. De l'air frais est entraîné dans cette montée et attise le foyer. L'entraînement d'air dans le panache augmente le volume de fumées. Dès que ces gaz ont atteint le plafond, ils s'étalent radialement formant ainsi une mince couche appelée le jet de plafond.

- **Etape 2** : La fumée constituée de particules fines commence à descendre du plafond sous l'effet de la gravité car sa température a diminué. Elle occupe peu à peu la pièce. Si la pièce n'est pas bien ventilée la température dans l'enceinte peut être très importante. De plus, le manque d'oxygène rend la combustion incomplète et la quantité de gaz imbrûlés importante. L'atmosphère peut devenir alors explosive.
- **Etape 3 :** Ces fumées s'étendent à d'autres pièces par l'intermédiaire des minces ouvertures. Si les portes sont fermées, la combustion peut cesser et la température lentement diminuer. Cependant, même si la réaction de combustion est arrêtée, un apport d'oxygène peut enflammer les gaz imbrûlés car la température est suffisamment élevée. Si par exemple une porte s'ouvre, alors il y un phénomène de flash over et l'ensemble de ces gaz dispersés dans toute la pièce réagit fortement et l'incendie se généralise.
- **Etape 4 :** Le feu est complètement généralisé à toute la pièce grâce au contact de l'air frais. On atteint le pic de chaleur qui va diminuer très rapidement.

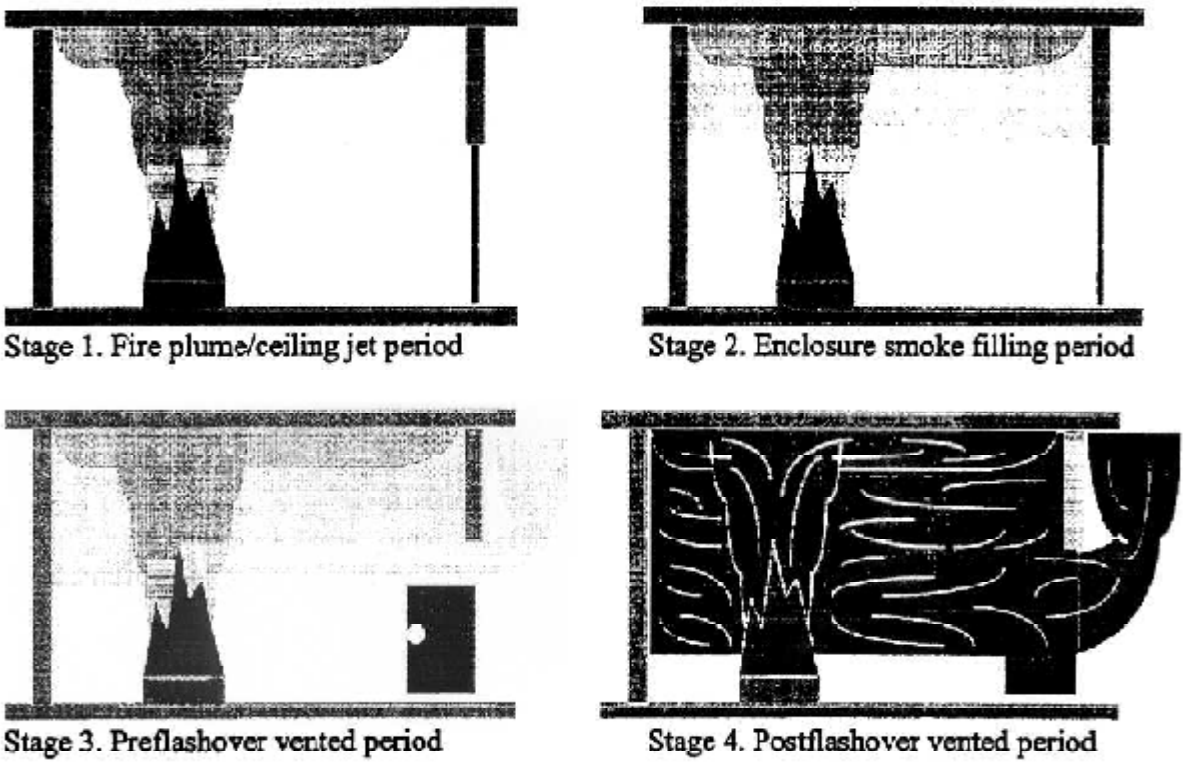


Figure 1.3 : Etapes d'un feu en espace confiné

Le flash over est une étape de transition rapide entre la croissance et le plein développement du feu, ce qui provoque un incendie généralisé.

Un phénomène apparenté est le back raft ou retour de flamme qui concerne les milieux très confinés. Dans ce cas, le contact des imbrûlés contenus dans une pièce avec de l'oxygène par l'ouverture brutale d'une ventilation provoque une explosion.

Le flash over comme le back raft sont des phénomènes qui sont très redoutés par les pompiers car ils sont à l'origine de nombreux accidents mortels [3].

1.5. Les Fumées

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

1.5.1. Quelques caractéristiques des fumées

La fumée produite au cours d'un incendie est une combinaison des trois états de la matière : l'état solide (particules solides imbrulées riches en carbone), l'état gazeux (gaz de combustion, hydrocarbure, etc.) et l'état liquide, suspension dans la phase gazeux (aérosol, condensats divers, vapeur d'eau, etc.). La taille des particules de fumée peut varier entre 0.01 et 10 µm. La couleur résultante nous renseigne sur la composition : fumées blanche révélatrice d'aérosol et de vapeur d'eau, fumée grise pour les mélanges d'aérosols et de particules solides, enfin fumée noire pour les grosses particules solides. Le débit des fumées dépend de la surface du feu, de la température et de la hauteur des flammes et de l'épaisseur de la couche de fumée. La vitesse horizontale du front de fumée est de l'ordre de 0.2 m/s à 1 m/s [4]. Les fumées ont tendance à occuper le maximum de volume et à créer une légère surpression dans le locale incendié. Elles sont sujettes à un tirage thermique vertical favorisant leur migration vers les étages supérieurs. Si ces paramètres influencent directement sur l'opacité et le mode de déplacement des fumées, ils ne donnent aucune information sur les dangers réels dus à la température et la présence des gaz toxiques associés à un éventuel manque d'oxygène [4].

1.5.2. Mode de propagation des fumées :

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j C) = \frac{\partial}{\partial x_j}(D\frac{\partial C}{\partial x_j}) \quad \text{..... (1.1)}$$

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

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

1.5.2.1. Mode de diffusion :

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

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

$$D = \frac{\alpha}{2}\sqrt{\frac{4k^3}{m\pi^3}}\frac{T\sqrt{T}}{P} \quad \text{.....(1.2)}$$

Avec $\alpha = 0.499$

1.5.2.2. Mode de dispersion

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

1.5.2.3. Mode de mélange

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

1.5.3. Les forces qui conduisent le mouvement des fumées

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

Les forces en cause dans le déplacement des fumées sont essentiellement [7] :

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

Lorsqu'un feu prend naissance, la chaleur qu'il dégage réchauffe l'air ambiant et crée un courant ascendant d'air chaud ; des gaz inertes (Azote N2, Argon Ar…), un gaz oxydant (Oxygène O2) et des produit de combustion (fumées). En montant, ce courant d'air chaud entraîne un courant d'air frais qui alimente la base du feu (figure 1.4). La différence de densité entre l'air chaud et l'air froid engendre des mouvements de convection, c'est-à-dire des déplacements d'air causés par des différences de températures. Etant plus léger que l'air frais, l'air chaud monte par la poussé d'Archimède, qui est une force permettant d'élever les objets dont la densité est plus faible que celle de l'air. Au contraire, l'air frais est plus dense que l'air chaud et la gravité provoque sa descente. En résumé, plus la température ambiante est élevée, plus la fumée monte.

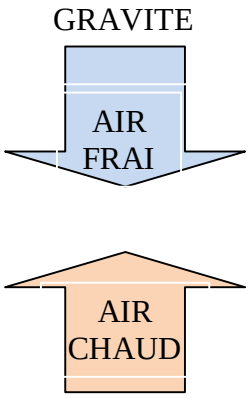


Figure.1.4 : Poussée d'archimède

Les mouvements de convection engendrée par ces deux forces opposées expliquent des phénomènes comme la forme pointue des flammes en V d'un panache de fumée, la propagation d'un incendie aux étages supérieurs d'un bâtiment en laissant le milieu intact, de même que l'effet de roulement de la fumée au plafond. Cet effet est obtenu surtout au début d'un incendie, lorsque la fumée transmet sa chaleur au plafond par diffusion, provoquant ainsi son refroidissement et sa descente. En descendant, la fumée refroidie se mélange encore par

diffusion avec les gaz chauds qui montent, ce qui la fait monter à nouveau. Ce mouvement de montée/descente continue jusqu'à ce que le plafond ait atteint la même température que la fumée.

1.5.3.2. La surpression causée par le feu

Dans un incendie, la fumée s'accumule au plafond pour former une couche de fumée et créer une hausse de pression (pression positive ou surpression), expliquant par la loi des gaz parfaits (ou la loi de Gay Lussac). Cette loi stipule que l'augmentation de température T d'un volume V de gaz engendre directement une élévation de sa pression P, d'où la formule : PV=nRT. Cette surpression en hauteur engendre une baisse de pression au niveau du sol (pression négative ou dépression), créant ainsi un mouvement d'air qui entraîne l'air frais vers le haut. En milieu fermé, l'air frais est aspiré par les ouvertures à des niveaux inférieurs, comme le bas des portes, les fenêtres et les pertes d'étanchéité d'un bâtiment (figure1.5). On appelle ce mouvement d'aspiration d'air frais un appel d'air. Lorsqu'un équilibre de pression est atteint, c'est-à-dire lorsqu'il y a autant de fumée qui quitte la pièce que d'air frais entre, le niveau de la couche de fumée se stabilise [7].

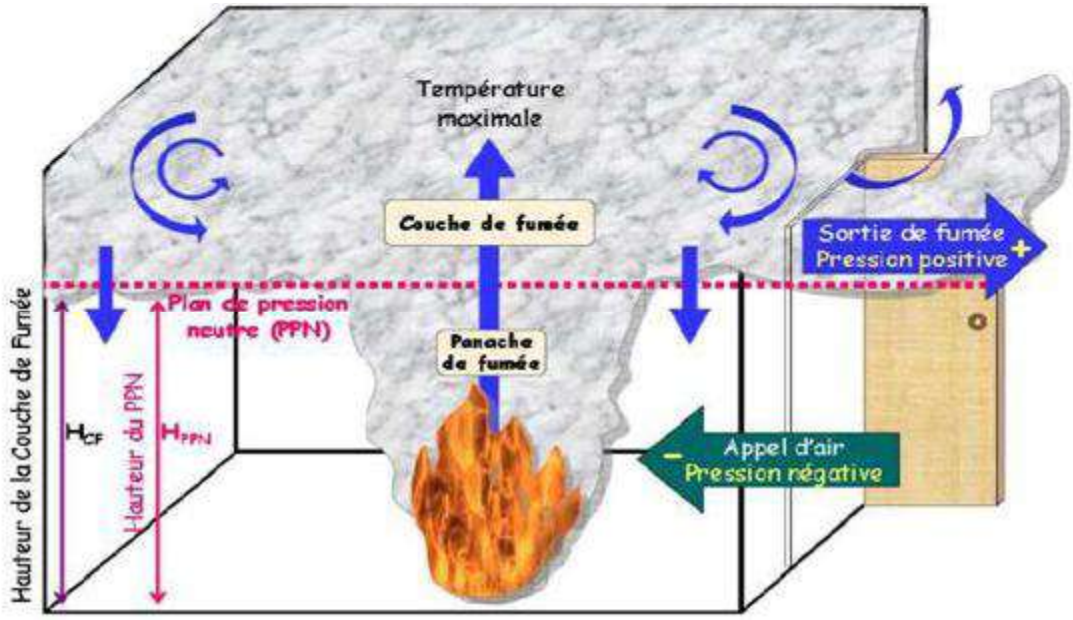


Figure .1.5 : Mouvement d'air par différence de pression dans un milieu fermé [7]

1.5.3.3. La dilatation thermique

La chaleur engendrée par un incendie augmente la température de l'air ambiant. Ainsi réchauffée, les molécules gazeuses de l'air et de la fumée s'agitent et leurs collisions créent une dilatation de leurs volumes (figure1.6). Cette expansion des gaz chauds s'explique

également par la loi des gaz par faits (ou la loi de Charles), qui précise que le volume d'un gaz est directement proportionnel à sa température et à sa pression [7].

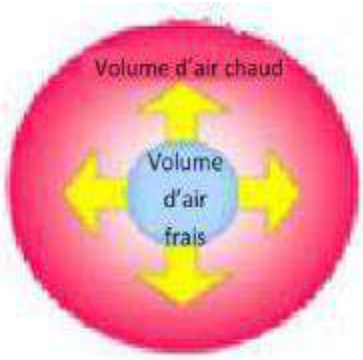


Figure .1. 6 : Dilatation thermique

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

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

1.5.3.4. La différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur

La différence de température entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment crée une différence de pression puisque, toujours selon la loi des gaz parfaits, une augmentation de température engendre directement une augmentation de pression. Lorsqu'il fait plus chaud à l'intérieur qu'à l'extérieur, comme par exemple en hiver, la pression devient alors plus positive dans le haut d'un bâtiment. Un appel d'air est alors créé dans la partie inférieure et l'air est aspiré vers l'intérieur (figure.1.7).

Dans une pièce ou un bâtiment, le plan de pression neutre (PPN) ou ''zone neutre'' correspond à la hauteur à la quelle la pression est la même en dehors qu'en dedans, lorsqu'il y a pas de vent. Au-dessous du PPN d'un édifice, l'écart de pression fait pénétrer l'air à l'intérieur et la pression devient négative. Au-dessus du PPN, l'air est expulsée à l'extérieur et

la pression devient donc positive. Lors d'un incendie la chaleur intense et la pression engendrée font déplacer le PPN vers le bas et il se promène ensuite vers le haut ou vers le bas en fonction des baisses ou des hausses de chaleur.

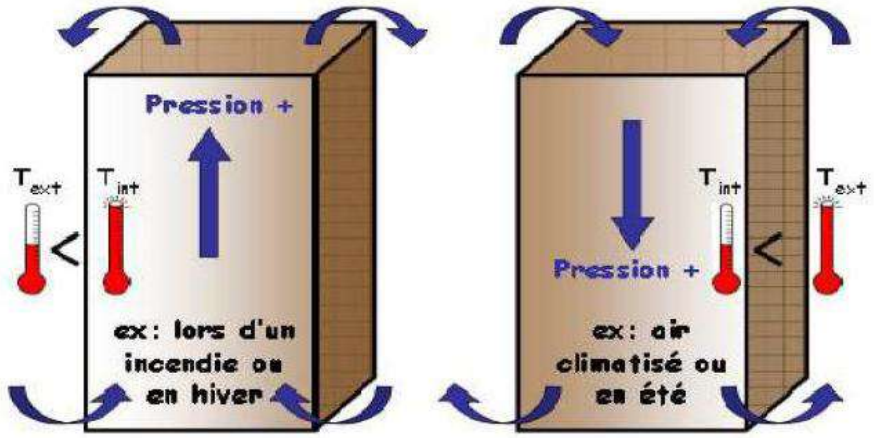


Figure .1.7 : Mouvement de l'air en fonction de la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment [7]

Les variations de hauteur de PPN peuvent servir d'indication visuelle des phases d'incendie. Par exemple, un PPN très bas dans une pièce peut indiquer qu'un incendie est dans une phase très avancée et qu'il risque d'engendrer une explosion de fumée. Un PPN très haut peut au contraire indiquer le début d'un incendie. La vitesse de déplacement du PPN peut également donner des indices sur les variations d'intensité de l'incendie [7].

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

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

En effet, un appel d'air est créé du bas vers le haut en raison d'une décroissance de la pression en fonction de la hauteur, elle-même causée par une diminution du poids total de l'air par surface. On compare cet appel d'air dans les cages ouvertes à celui d'un effet de tirage dans une cheminée, c'est pour quoi il est nommé « effet de cheminée ». Cet effet dépend essentiellement de deux facteurs : la hauteur du bâtiment, de même que la différence

de pression entre l'intérieur et l'extérieur. Dans le cas d'un incendie dans un BGH en hiver, la différence de température entre la fumée et l'air extérieur étant plus grande, l'appel d'air devient donc plus important. Durant l'été, on peut observer le phénomène inverse lorsqu'il fait très chaud ; la fumée à tendance à s'écouler vers le bas au début de l'incendie.

1.5.3.6. La densité et la composition de la fumée

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

Les suies jouent un rôle non négligeable dans la propagation de la fumée, puisque leur taille influence la densité de la fumée. Plus une fumée contient de suie, plus elle est lourde et elle aura tendance à s'écouler vers le sol. Voici quelques caractéristiques physico-chimiques des suies :

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

En résumé, il y a plusieurs facteurs qui influencent le mouvement des fumées lors d'un incendie et certains mécanismes sont encor mal élucidés. Prévoir les déplacements de la fumée demeure donc un art pour un intervenant en incendie. Pour devenir maître de cet art, il

est donc nécessaire de maîtriser plusieurs concepts de physique et de chimie, additionnés à une bonne compréhension des bases de la combustion et de l'environnement de l'incendie.

1.5.4. Dangers des fumées

Les incendies dans les milieux confinés sont parmi les plus dangereux. L'augmentation de la concentration des fumées peut créer rapidement des conditions impropres à la survie des personnes. En effet, leur opacité diminue la visibilité, ce qui gêne l'évacuation des occupants et l'intervention des services de secours. Des gaz dangereux tel que (CO, HCL, etc.) résultant de la combustion, auxquels s'ajoutent le manque éventuelle de l'oxygène, rend cette ambiance rapidement mortelle, une victime intoxiqué est incapable de fuir, mais une simple exposition aux fumées, même très brève peut donner lieu à un handicape à vie: asthme chronique, insuffisance rénale, hépatique, cardiaque et respiratoire [8]. En fin, l'élévation de la température constitue un obstacle infranchissable. Ces dangers concernent les occupants des lieux sinistrés, temporaires ou permanents, les personnes situées dans les locaux communiquant avec la zone incendiée et les équipes de secours venus lutter sur place contre l'incendie.

Les fumées sont aussi un facteur important de l'incendie en raison de leur température qui favorise la pyrolyse et l'inflammation des matériaux combustibles. De plus l'aspect corrosif de certains de leurs composants (HCL par exemple) représente aussi bien un danger pour les éléments du bâtiment que pour les biens stockés à l'intérieur (structures métalliques, informatiques, électroniques, etc.) [9].

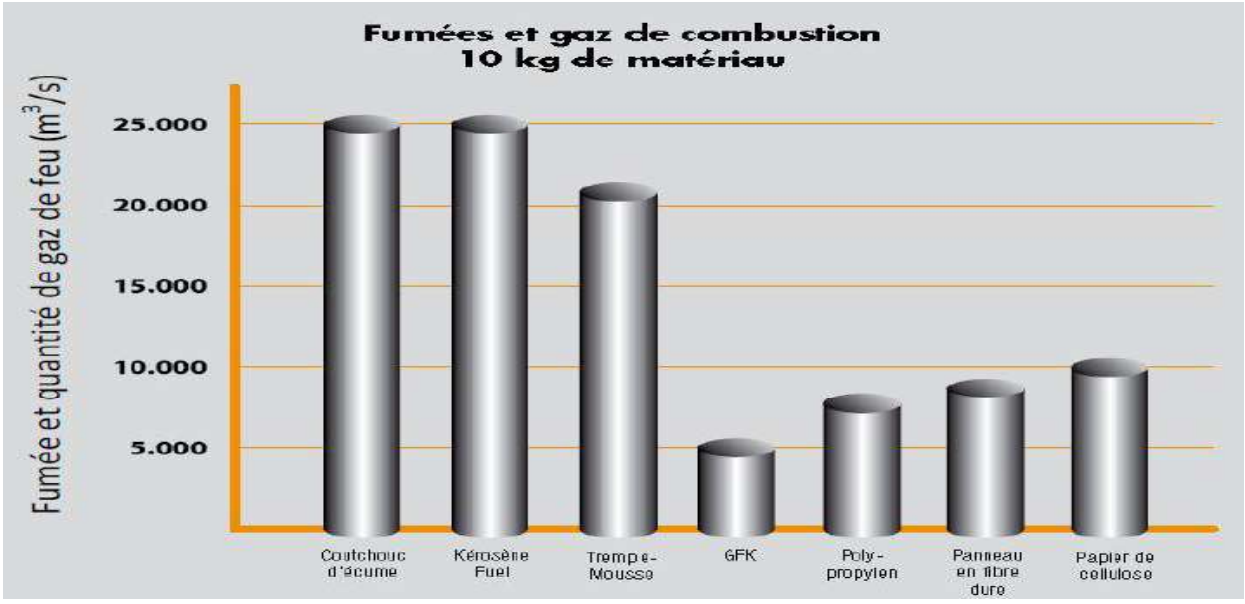


Figure.1.8 : Dégagement de fumée par différents matériaux [9]

Ces dangers peuvent avoir lieu pour plusieurs raisons, on site parmi eux ; la cigarette qui est la principale cause identifiée. Il existe néanmoins d'autres causes telles que les surtensions d'équipements électriques ou leurs mauvaises utilisations. Dans les bâtiments, l'chauffage de est à l'origine de plusieurs incendies. Il existe d'autres origines telles que les défauts des matériels et les câbles qui peuvent contribuer à la propagation et l'émission nocive de fumée.

Le graphe de la (figure.1.8) illustre la quantité de fumée dégagée par différents matériaux.

1.5.5. Le désenfumage

1.5.5.1. Les objectifs de désenfumages

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

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

1.5.5.2. Stratégie de désenfumage

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

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

- Pousser les fumées vers les zones sans usagers ou les extraient directement, en utilisant une ventilation verticale situé dans les bâtiments, ou en mettant en surpression les zones protégées.
- Maintenir la stratification des fumées et extraire celle-ci par des trappes situées aux plafonds. La vitesse longitudinale doit alors être inférieure à une vitesse dite de dé stratification de manière à ne pas déstabiliser la couche stratifiée de fumées chaudes. Cette vitesse de dé stratification reste en l'état actuel des connaissances difficiles à

déterminer car les fumées peuvent être stratifiées au niveau du foyer et se dé stratifier plus loin.

1.6. Le risque incendie :

La sécurité incendie repose sur un ensemble de mesures de mise en sécurité incendie, de nature aussi bien technique (p. ex. : une installation de détection) qu'organisationnelle (p. ex. : procédures d'évacuation). Un ensemble de mesures en interactions définit une stratégie de sécurité incendie. Aujourd'hui en France, le choix des stratégies de sécurité incendie { mettre en œuvre dans un bâtiment est fortement réglementé, et dépend { la fois du type de l'ouvrage en présence (p. ex. : bâtiment d'habitation, établissement recevant du public, bâtiment industriel etc.) et de sa taille (p. ex. : supérette ou centre commercial). Toute fois, dans certaines circonstances exceptionnelles (p. ex. : ouvrages d'art, réhabilitation de bâtiments anciens, bâtiments hors normes), la mise en place des mesures réglementaires peut s'avérer techniquement ou financièrement délicate. Le recours { une étude d'ingénierie en sécurité incendie est alors envisageable. L'objectif d'une telle étude est de proposer des mesures de sécurité compensatoires, alternatives aux mesures réglementaires. Sachant qu'une mesure compensatoire n'est acceptable qu'{ la condition que sa mise en oeuvre ne diminue pas le niveau de sécurité par rapport à la stratégie réglementaire, une étude de sécurité incendie repose sur l'analyse de la performance des différentes stratégies envisagées dans le but de les comparer.

Cette analyse de performance est obtenue en calculant le risque incendie pour différentes stratégies et pour des scénarios d'incendies jugés pertinents. Les difficultés { surmonter pour réaliser une étude de sécurité incendie sont, entre autres, la sélection des scénarios à analyser, la définition de la méthode de calcul du risque, l'élaboration de critères de comparaison des stratégies et de sélection des mesures. Pour pallier ces difficultés, certains auteurs ont mis au point des outils de simulation parmi lesquels quelques exemples reposant sur des approches similaires peuvent être cités.

Un incendie désigne une réaction de combustion non maîtrisée dans l'espace et dans le temps. Un incendie peut se produire aussi bien en milieu naturel (p. ex. : dans la forêt) qu'en milieu anthropique (p. ex. : en ville). La présente recherche master se limite aux incendies dans les bâtiments, c'est-à-dire en milieu anthropique.

Le présent paragraphe a pour objectif de définir ce qu'est le risque incendie. Après un rappel sémantique, nous identifierons les dangers occasionnés par un incendie ainsi que leurs

conséquences sur les cibles (la vie, les biens, le milieu naturel). Ensuite, nous balayerons quelques données statistiques afin de cerner l'ampleur du risque incendie en France, ampleur sur laquelle nous conclurons. Enfin, nous présenterons le déroulement d'un incendie réel afin de mettre en évidence la complexité du problème traité [16] .

1.6.1. Rappel sémantique relatif à la notion de risque :

Le risque (R) est défini (Perilhon, 2003) comme un concept quantitatif dont l'estimation fait intervenir les notions :

- De fréquence d'occurrence (F) d'un événement non souhaité, souvent appelée, par abus de langage, probabilité.
- De gravité (G) de cet événement en termes d'ampleur des dommages causés { des cibles (également appelées « enjeux ») ;
- D'acceptabilité (A) de cet événement par les individus qu'il concerne.

$$R=>f(F ;G ;A)$$

Les termes R, F, G et A n'étant pas de même nature, il n'est pas possible de définir le risque R comme étant égal à une quelconque convolution des trois autres.

Un événement non souhaité (ou « événement redouté »), noté E.N.S., se définit alors comme un événement ayant un impact destructeur sur l'un ou plusieurs enjeux à protéger. Un E.N.S. est d'autant plus fréquent que les facteurs de risques sont importants. La notion de facteur de risque trouve son origine dans le domaine de la médecine et englobe aujourd'hui toutes les caractéristiques d'une entité entrainant une augmentation du risque pour elle ou pour les autres entités en présence. Perilhon, quant à lui, parle de source de danger pour désigner le facteur de risque. Il parle également de flux de danger pour désigner le support par lequel la source de danger atteint et dégrade la cible du danger. Enfin, le terme danger exprime la potentialité d'un système à produire un ou plusieurs E.N.S. qui ont été identifiés plus ou moins objectivement. Ce terme de danger est un concept qualitatif [16].

1.6.2. Les principales sources de danger liées au feu :

Le feu présente un danger pour des cibles telles que les individus présents sur les lieux (p. ex. les occupants d'un bâtiment, les sapeurs-pompiers, les promeneurs dans une forêt, etc.), les biens, le patrimoine (p. ex. : un bâtiment, son contenu et son équipement, les moyens de secours, etc.), l'activité commerciale (p. ex. : l'exploitation des forêts, la capacité d'accueil

d'un hôtel, le travail fournit dans des bureaux, etc.) et le milieu naturel (p. ex. : la forêt, les sols, l'air, etc.) .

Le tableau (tableau.1.1) récapitule de manière grossière les sources, les flux et les cibles de danger pour un feu dans un bâtiment sur les personnes et les biens (seules cibles étudiées dans la présente thèse) [16].

Cible	Flux	Source	Commentaire
Personnes	Rayonnement thermique	Flamme, objets solides chauds, gaz chauds	Des courbes {éclairement énergétique-durée d'exposition}4 ou sensation de douleur-éclairement énergétiques ont été définies
Personnes	Convection, conduction	Flamme, objets solides chauds, gaz chauds	La température du gaz est un facteur important d'échange avec la peau. Des courbes {température-durée d'exposition}6 ont été définies Toutefois, les seuils supportables sont très dépendants de l'individu (son âge, son stress, etc.) et du taux d'humidité du gaz
Personnes	Flux thermique (gaz inhalé	Gaz chauds	L'inhalation de gaz chauds peut provoquer un oedème pulmonaire létal. Les seuils sont assez similaires à ceux cités ci-dessus à ce près que la toxicité des gaz inhalés ajoute un facteur de risque considérable
Personnes	Fumée	Gaz	La perte de visibilité peut désorienter stresser et être un verrou à l'évacuation. Le taux d'humidité du gaz impacte la visibilité par diffusion de la lumière. Des relations simples permettant de calculer la distance de visibilité peuvent être utilisées en sécurité incendie
Personnes	Composition du gaz inhalé	Gaz	Les effets toxiques sont liés - à la déplétion de l'oxygène asphyxie si la fraction molaire est <10 %) ; - au dioxyde de carbone (accélère le rythme respiratoire et donc potentiellement l'inhalation d'autres molécules plus toxiques) ; - au monoxyde de carbone8 (association irréversible avec l'hémoglobine en carboxyhémoglobine et asphyxie) ; - aux autres gaz (acide chlorhydrique et cyanhydrique, dioxyde de souffre, oxyde et dioxyde d'azote, etc.) ;
Cible	**Flux**	**Source**	**Commentaire**
Personnes	Angoisse, comportement	Personnes	En cas d'angoisse, les individus peuvent générer des situation

	non contrôlé		dangereuses pour eux-mêmes ou pour les autres personnes. On notera par exemple que : - une évacuation dans la panique peut causer des blessures et des morts par compression et écrasement - des individus angoissés peuvent choisir des options dangereuses comme emprunter un escalier enfumé ou sauter par une fenêtre au lieu d'attendre les secours derrière une porte fermée Pour être perçu comme sûr, il est préférable de ne pas fournir d'informations angoissantes mais donner des consignes de façon neutre, de ne pas alimenter la crainte du confinement, et de prendre en charge l'évacuation
Structure du bâtiment	Flux thermique	Flamme, objets solides chauds, gaz chauds	L'élévation de température dans éléments de structure peut causer des dilations et des déformations entrainant des contraintes mécaniques supplémentaires, une dégradation des caractéristique mécaniques des matériaux ou encore une perte de la stabilité du matériau (p.ex. : éclatement du béton, rupture de l'acier).
Contenu des bâtiments	Flux thermique	Flamme, objets solides chauds, gaz chauds	Sous l'effet de la chaleur, les biens peuvent : - subir une pyrolyse et participer à la combustion ; - se liquéfier, se rompre, etc.
Contenu et structure des bâtiments	Composition du gaz avoisinant	Gaz	Les biens de nature métallique peuvent être corrodés par les gaz acides issus de la pyrolyse et de la combustion (acide chlorhydrique, oxyde d'azote, de soufre, etc.).

Tableau.1.1 : Principales sources de danger pour les personnes et les biens lors d'un feu dans un bâtiment

Chapitre 2
La modélisation des incendies

La modélisation des incendies

2.1. INTRODUCTION:

L'ingénierie de la sécurité contre les incendies se développe depuis plusieurs années et tend à être introduite dans différents domaines réglementés : bâtiment, transports, etc. La démarche générale d'ingénierie de sécurité incendie consiste à [19]:

- D'une part rechercher systématiquement tout les enchaînements d'événement susceptibles de constituer un risque. Chaque enchaînement, appelé scénario, est recensé, décrit et associé à une probabilité d'occurrence dans le cas de l'ouvrage, du système de transport ou du bâtiment considéré ;
- D'autre part, parmi tous les outils disponibles, sélectionner, qualifier et utiliser ceux qui sont nécessaires et pertinents pour évaluer les performances de l'ouvrage, des produits et des systèmes étudiés.

Elle consiste par ailleurs à :

- Evaluer les effets nuisibles (risques pour les personnes, intégrité structurelle, perte d'exploitation par exemple) générés par la combustion non contrôlée, en fonction de paramètres précis ;
- Caractériser la potentialité d'extension du feu dans des espaces donnés et la dégradation de l'atmosphère interne à ces espaces.

Ces remarques peuvent se résumer sur le diagramme suivant [19]:

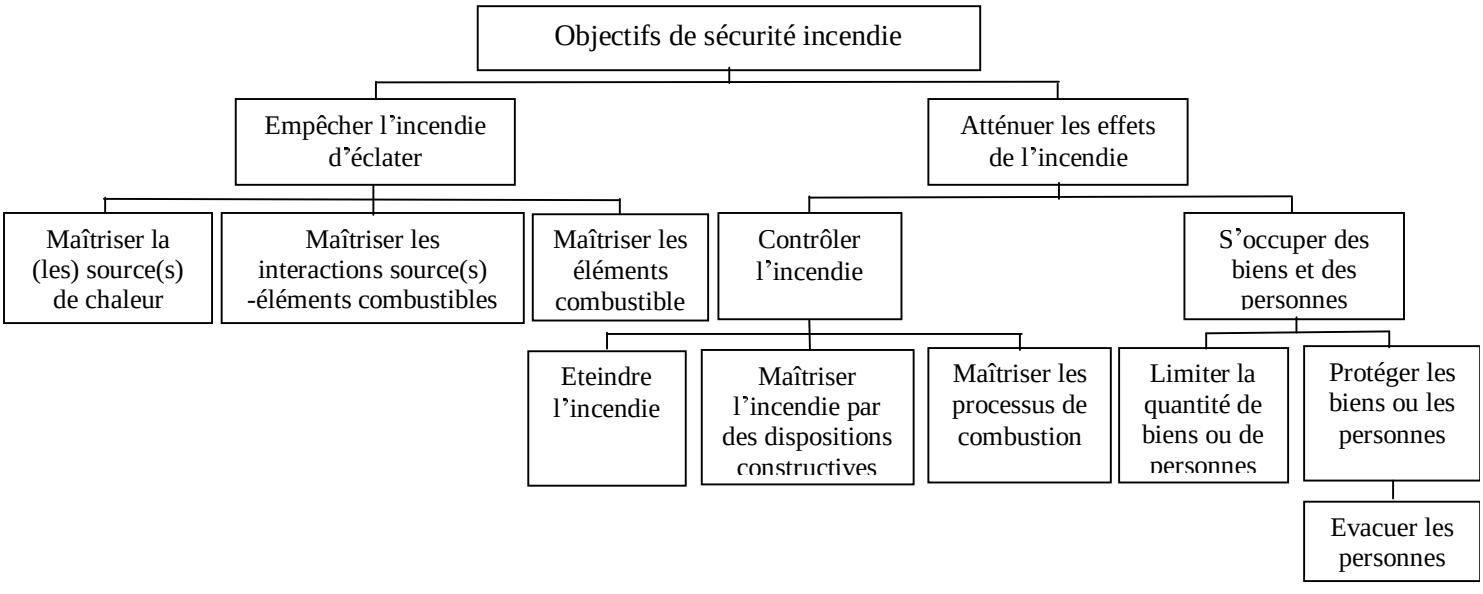


Tableau.2.1 : La démarche générale d'ingénierie de sécurité incendie

A chacune des étapes, les moyens d'action peuvent être des règlements, des essais à échelle réelle ou sur maquettes, ou des simulations numériques. L'avantage des simulations numériques est de pouvoir étudier de nombreuses configurations en un minimum de temps, en s'affranchissant des contraintes liées aux essais systématiques à échelle réelle, bien qu'elles ne puissent s'y substituer totalement.

2.2. Principe de la modélisation des incendies:

L'objectif de l'ingénierie de la sécurité incendie est d'aides à atteindre un niveau prédit acceptable de la sécurité incendie. Ce travail suppose l'utilisation des méthodes de calcul afin d'évaluer et d'obtenir des justifications permettant d'atténuer les effets nuisibles d'un incendie pour les personnes, les bâtiments et l'environnement. Il s'intéressera plus particulièrement aux modèles de zone et champ utilisés, dans l'optique de reproduire les effets de l'incendie et de son développement, et d'évaluer son effet sur les biens et les personnes.

2.2.1 Etat de l'art de simulation numérique de l'incendie :

Les codes de calcul de mouvements d'air ont été développés au début pour la météorologie, puis pour la dispersion de polluants et de radioélément. Néanmoins, l'ajout d'un terme d'un source incendie en est un raffinement récent. La quantité de données à traiter simultanément pour des calculs tridimensionnels de cette nature n'a pu se développer que depuis les dix dernières années. Lorsque les ordinateurs sont devenus assez puissants pour permettre ces calculs dans des temps raisonnables. L'objectif étant de reproduire numériquement les phénomènes physiques, différentes étapes de modélisation sont nécessaires. Deux grandes familles de calculs sont utilisées : les modèles zone, traduisant une configuration très simplifiée et les modèles champs, plus complexes, mais restant une simplification importante du monde réel.

2.2.2. Modèles de zone :

Un modèle de zone est un programme qui prévoit les effets du développement d'un feu à l'intérieur d'un volume relativement fermé. Dans la plupart des applications, le volume n'est pas totalement fermé, car les portes, les fenêtres, et les ouvertures sont habituellent considérées dans le calcul. Des modèles de zone pour des compartiments ont été développés pour des configurations de simple pièce et de pièces multiples.

La théorie zonale consiste à modéliser le panache d'un feu et la couche de fumée résultante dans un espace confiné. Dans l'approche zonale, la zone d'intérêt est divisée en un certain nombre de zones, combinées par des relations (portes, circulation…) permettant de définir le domaine complet. Dans chacune des zones, les lois de conservation de la physique sont exprimées sous forme d'équations mathématiques (les bilans matière et énergie).

La méthode consiste donc à découper le volume libre en plusieurs zones supposées isothermes, en définissant préalablement des zones solides intérieures et extérieures isothermes. La résolution des bilans massiques est réalisée entre zones, en prenant en compte les échanges de matière entre ces différentes zones. Le bilan énergétique est alors effectué en prenant en compte les échanges de chaleur (convection, conduction et rayonnement) et éventuellement l'accumulation de chaleur par les solides.

L'espace est habituellement divisé en deux zones distinctes : la couche supérieure chaude de fumée et la couche inférieure d'air plus frais. Le feu son panache agissent comme une pompe enthalpique entre la couche inférieure et la couche supérieure chaude de fumée. En réalité, selon la taille de pièce et le débit calorifique du feu, l'interface n'est pas parfaitement définie entre la couche supérieure chaude de fumée et la couche inférieure. La couche supérieure chaude de fumée n'est pas non plus à une température uniforme (on observe les températures plus élevées plus près du feu et du panache) ; cependant, l'utilisation de deux zones uniformes reproduit une approximation raisonnable du développement d'un feu dans une pièce dans de nombreuses situations [19].

Concrètement, ce type de modèles est adapté au bâtiment, où chaque pièce peut définir une zone avec des caractéristiques uniques (de température, de visibilité…), et a trouvé son essor lorsque la puissance de calcul était moindre qu'actuellement.

Les différents modèles de zone existants, sont repris ci-dessous (Tableau.2.2) :

Modèle	Description
FDM	FDM est un modèle de zone des années 1990, spécialement développée pour le cas des atriums. Il est capable de traiter les plafonds inclinés, et la ventilation forcée.
LAVENT	LAVENT a été développé pour déterminer le délai de réponse des sprinklers et détecteurs dans compartiments povant être équipés d'ouvrants fusibles
MRFC	MRFC est un modèle relativement récent, développé en Allemagne dans les année 1990. Il est spécialisé dans la détermination de l'élévation de température d'une structure dans les feux multi-locaux. Il gère les matériaux multi-couches et calcule par ailleurs le potentiel toxique des fumées.
NRCC1 et NRCC2	Ces deux modèles canadiens ont été développés pour calculer la répons structurelle à des feux mono-compartiments. NRCC1 est un modèle mono-zone et NRCC2 un modèle deux zones
OZONE	OZONE est un logiciel mono-compartiment, utilisé pour déterminer l'impact thermique d'un feu sur une structure. Il a été développé par l'université de liège.
SFIRE-4	SFIRE-4 a été développé à l'université de Lund (suède). Le modèle prend en compte un seul compartiment, plusieurs matériaux de parois et calcule la température interne des parois.
SMKFLW	SMKFLW est un code mono-zone développé pour calculer les chemins d'évacuation, à partir de la théorie des graphes.
SmokePro	SmokePro est un modèle deux zones mono-compartiment récent, permettant de calculer l'activation des détecteurs et l'influence des ventilations.
FIRM	FIRM est un modèle de zone permettant de prédire l'environnement d'un compartiment simple ayant une ouverture dans une paroi verticale.
BRANZFIRE	Est un outil multi compartiments développé en Nouvelle Zélande. Il dispose d'une fonctionnalité intéressante, qui est de posséder un algorithme d'évolution des espèces gazeuse. Il calcule aussi une extension de foyer, à partir de données issues du cône calorimètre.

Tableau.2.2 : Les différents modèles de zone existants

2.2.3. Modèles de champs :

2.2.3.1 Généralités

Le modèle champ calcule en tous points de l'espace les différentes données (concentrations, températures…). Le calcul est basé sur un traitement simultané des équation de navier-stokes, qui permettent la résolution des bilans de conservation de masse, d'énergie et de qualité de mouvement, la conduction et la turbulence sont calculées par ailleurs.

Ce type de logiciel utilise les équations de la thermique et de la mécanique des fluides. Les écoulements sont en général turbulents. Le logiciel utilisé lors des études prend en compte:

- Les propriétés de l'air et des fumées : viscosité, dilatation thermique, capacité calorifique, compressibilité…
- La turbulence de l'écoulement.
- Les propriétés thermiques des constituants solides.
- Les caractéristiques géométriques tridimensionnelles de l'environnement et du système de distribution d'air.
- Les conditions climatiques extérieures (froid, chaud. Rayonnement solaire).

L'utilisation d'un modèle champ requiert un maillage de qualité. Le maillage retenu doit être assez fin pour qu'une résolution inférieure ne montre pas d'effets significatifs. La taille minimale de la maille doit toutefois être supérieure au millionième de la taille du domaine, pour la représentativité des échelles calculées.

2.2.3.2 Sous-modèle de combustion

Dans tous les cas, le sou-modèle de combustion est un point critique à considérer, car il introduit le terme source de chaleur ainsi que la production de nouvelles espèces chimiques. La modélisation ont été développées à ce jour [19]:

- Le modèle global (mixture fraction). La cinétique des réactions chimiques de la flamme n'est pas prise en compte, les réactions étant présupposées instantanée et totales. Pour décrire la répartition des espèces chimiques, on associe alors des coefficients stœchiométriques arbitraires et une enthalpie de combustion unique par matériau. Ces modèles simplifiés utilisent habituellement des lois de type «Arrhenius » et ne peuvent donc décrire des phénomènes violents ou explosifs (réactions radicalaires) ;
- Le modèle « Flammelettes ». Ce modèle décrit la combustion de produits parfaitement connus, deux calculs préliminaires sont alors nécessaires :
    - Une première étape consiste à évaluer la composition d'une flammelette laminaire à partir des données d'enthalpie (composition en fonction de la température et du flux thermique du milieu), de fractions molaires de combustible et de comburant et du taux de contrainte, qui décrit les effets de la flamme sur elle-même.
    - La seconde étape consiste alors à appliquer des fluctuations turbulentes à cette flamme à l'aide de lois probabilistes (en général fonctions Bêta)

représentant les variations de la flamme par l'intermédiaire de variations des fractions molaires de comburant et de combustible.

- Les modèles EDM (Eddy Dissipation Model) ou EBU (Eddy Break-Up). Dans ce cas, la composition chimique de la flamme n'est pas connue. Ce modèle est basé sur la présence de monoxyde de carbone comme intermédiaire (type à deux étapes) ou de monoxyde de carbone et d'hydrogène (type à quatre étapes). Les réactions concurrentes entre H_2, CO, CO_2 et H_2O, ainsi que la variation des différentes constantes d'équilibre correspondantes en fonction de la température sont alors considérées.

2.2.3.3 Sous-modèle de Rayonnement

Le sous-modèle de rayonnement doit traduire les échanges de chaleur entre maiile concomitantes ou en regard. La flamme est un corps gris défini par sa luminance, son émissivité et sa température moyenne. L'éclairement énergétique qu'elle induit sur toutes les surfaces de l'environnement est alors calculable, et ainsi la température de surface des matériaux (en prenant en compte la chaleur qu'ils évacuent à leur tour). Cette température conditionne leur inflammation, et par là-même le développement de l'incendie.

Les échanges d'énergie par rayonnement thermique dépendent des caractéristiques des différents milieux. Chaque cellule fluide ou solide délimitée par le maillage échange avec toutes les autres cellules du domaine de calcul.

En particulier, les échanges radiatifs pris en compte doivent concerner:

- Les flux radiatifs entre les zones changées en suie ;
- Les flux radiatifs entre les zones changées en suie et les éléments solides (parois) ;
- Les flux émis et absorbés entre les éléments solides (parois)

L'équation de base utilisée pour les transferts thermiques radiatifs dans les fluides est l'équation RTE:

$$s.\nabla I_\lambda(x,s) = -[k(x,\lambda) + \sigma(x,\lambda)]I(x,s) + B(x,\lambda) + \frac{\sigma(x,\lambda)}{4\pi}\int_{4\pi}\Phi(s,s')\,I_\lambda(x,s')\,d\Omega' \quad \text{..... (2.1)}$$

S : représente le vecteur directeur de l'intensité,

$I_\lambda(x,s)$: désigne l'intensité du rayonnement à la longueur d'onde λ,

$k(x,\lambda)$: désigne le coefficient d'absorption local à la longueur d'onde λ,

$\sigma(x,\lambda)$: désigne le coefficient de diffusion local à la longueur d'onde λ,

$B(x,\lambda)$; désigne terme-source d'émission à la longueur d'onde λ,

$\frac{\sigma(x,\lambda)}{4\pi}\int_{4\pi}\Phi(s,s')\,I_\lambda(x,s')d\Omega'$: décrit la diffusion provenant des autres directions de l'espace.

La modélisation du rayonnement émis ou reçu peut être réalisée plus simplement par la loide **Stefan Boltzmann.** Dans le cas de la modélisation, une telle formulation simplifiée en T^4 est délicate, particulièrement au sein se la flamme, car une faible erreur sur la température a des effets très importants. Il est préférable de définir le flux radiatif comme une fraction du débit calorifique ramené au volume de chaque maille interne à la flamme.

Deux modèles sont alors à distingue : une formulation locale, apte à traiter le rayonnement au niveau de la flamme et une formulation apte à traiter le rayonnement au niveau des fumées. Les absorption et émissions de rayonnement par les surfaces solides ne doivent en outre pas être négligées. Pour les parois, une émissivité moyenne hémisphérique équivalente peut être considérée.

Pour les celles fluides, un coefficient d'absorption dépendant de la fraction massique de suie peut être introduit. L'émissivité des suies peut alors être assimilée à celle du coke en suspension dans un gaz (données de la littérature). En fait, un modèle plus détaillé peut prendre en compte les effets des différentes espèces présentes sur le rayonnement. En particulier, l'eau et le dioxyde de carbone peuvent avoir une importance considérable dans le bilan radiatif.

Plusieurs méthodes de résolution de l'équation de rayonnement existant :

- La méthode de Monte-Carlo, qui fait appel à des rayons tirés entre cellules de manière aléatoire ;
- La méthode de volumes finis (FVM), qui dissipe l'énergie émise par un poine dans une direction selon un angle solide prédéfini ;
- Les méthode de flux, qui répartissent sommairement le flux dans les directions du maillage.

2.2.3.4 Sous-modèle de turbulence

Le sous-modèle de turbulence traduit la principe évacuation de matière il permet de caractériser à grande échelle les mouvements tourbillonnants et à plus petite échelle la dissipation d'énergie cinétique. Plusieurs types de modèles existent. Les modèles de type k- sont adaptés à des écoulements canoniques (écoulement cisaillé, aérodynamique) et ont été développés depuis de nombreuses années. Les modèles LES (Large Eddy Simulation), d'origine universitaire et en fort développement, semblent mieux traduire les écoulements turbulents dans les cas considérés.

Pour modéliser correctement une combustion, le modèle de turbulence doit intégrer un terme source dans l'équation de l'énergie turbulence lié à la flottabilité (ou poussée d'Archimède). Une sous évaluation des mouvements turbulents peut entraîner une stratification des champs thermiques qui modifie la description du tirage thermique.

Les équations de Navier-Stokes traduisent trois phénomènes physiques fondamentaux:

- La conservation de la masse et des espèces.
- La conservation de la quantité de mouvement.
- La conservation de l'énergie totale.

Dans le cas d'un écoulement tridimensionnel, la forme conservative de ces équation s'exprime par :

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial \Psi}{\partial y} + \frac{\partial \delta}{\partial z} = S \quad \text{.....(2.2)}$$

$$\text{Avec : } \xi = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho T \end{pmatrix}, x = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \\ \rho uT \end{pmatrix}, \Psi = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ \rho vT \end{pmatrix}, \delta = \begin{pmatrix} \rho w \\ \rho uw \\ \rho vw \\ \rho w^2 + p \\ \rho wT \end{pmatrix}, \text{.....(2.3)}$$

$$S = \begin{pmatrix} 0 \\ \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) + S_x \\ \mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) + S_y \\ \mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) + S_z \\ \frac{\lambda}{C_p}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + S_T \end{pmatrix} \text{.....(2.4)}$$

ρ désigne la masse volumique

u, v et w sont les composantes de vitesse selon les axes x, y et z

P représente la pression totale

T représente la température

λ et μ sont les coefficients de viscosité de lamé

C_p est la capacité calorifique à pression constante

S_x, S_y, S_z et S_T sont des termes liés à des sources comme la convection naturelle

Les équations de Navier-Stokes peuvent être :

- Discrétisée à partir de leur forme conservative (conservation des grandeurs aérodynamiques à travers des discontinuités de type choc ou surface de glissement) ;
- Intégrées à partir de leur forme conservative par une technique de volumes finis et ensuite discrétisées ;
- Résolues dans l'espace de Fourier ;
- Résolues par la méthode d'élément finis.

Les différents modèles de champ existants, sont repris ci-dessous (Tableau.2.3) :

Modèle	Description
CFX	CFX est un logiciel de mécanique des fluides d'usage universel, applicable à la dispersion, à l'incendie et à l'explosion dans l'environnement ouverts ou fermés.
FIRE	FIRE est un code CFD multi-grilles pour des situations bidimensionnelles ou tridimensionnelles de combustion. Il peut être appliqué aux solides, liquides ou gaz.
FLUENT	Fluent est un logiciel de CFD général, fréquemment utilise en génie des procédés. Il travaille habituellement avec des écoulements canoniques.
KOBRA-3D	KOBRA est un modèle de CFD tridimensionnelle permettant le calcul du transfert thermique, développé en Allemagne. Il gère les sources prescrites, mais pas la propagation calculée.
MEFE	MEFE est un logiciel de CFD développé au Portugal. Il traite des comportements de feu dans un ou deux compartiment. Le calcul est basé sur la flottabilité et la turbulence est traitée en k-
PHOENICS	PHONICS est un logiciel de CFD général, très utilisé en génie des procédés pour les calcul de transport fluide ou d'échanges de chaleur.
SOLVENT	SOLVENT est un logiciel spécialement créé pour traiter la situation des tunnels le code est adapté aux ventilations longitudinales et transversales.
STAR-CD	STAR-CD est un logiciel générique de CFD, applicable aux situations de combustion. Il dispose de plusieurs sous-modèle de turbulence.
FDS	FDS a été développé au NIST pour répondre aux problèmes d'écoulement spécifiques du feu couplés avec la prise en compte de la propagation surfacique des matériaux. Il est utilisé au LNE pour les calculs CFD de feux en bâtiments, et transports. Il est décrit plus précisément dans la suite du document.

Tableau.2.3 : Les différents modèles de champ existants

Chapitre 3
Formulation mathématique du FDS

Formulation mathématique du code FDS

3.1. Modèles présents dans FDS

3.1.1. Modèle hydrodynamique

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

- **Conservation de la masse :**

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

- **Conservation de la quantité de mouvement :**

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

- **Conservation de l'énergie :**

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

- **Equation des gaz parfaits :**

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

Pour le terme de fraction de la masse des espèces gazeuse, l'équation de la conservation de la masse s'écrit comme suit :

- **Conservation des espèces**

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

Puisque il n'y a aucune solution analytique de l'équation de Navier-Stocks, la solution exige l'usage des méthodes numériques où le volume d'étude est divisé en une grille tridimensionnelle constituée de petits cubes (cellules de la grille). Le modèle calcul les conditions physiques dans chaque cellule comme une fonction de temps.

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

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

Dans l'équation de la quantité de mouvement, le (u.u) est le tenseur obtenu par multiplication de deux vecteur u et u^T . Le terme $(\nabla.\rho uu)$ est le vecteur obtenu par multiplication de (u.u) et $\vec{\nabla}= \left(\frac{\partial}{\partial x},\frac{\partial}{\partial y},\frac{\partial}{\partial z}\right)$.

τ_{ij} sont les composantes du tenseur de forces de viscosité, il est défini par ;

$$\tau_{ij} = \mu\left(2S_{ij} - \frac{2}{3}\delta_{ij}(\nabla.u)\right), \delta_{ij} = \begin{cases}1 & i = j\\ 0 & i \neq j\end{cases} \quad S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right); i,j = 1,2,3.$$

S_{ij} : Est le tenseur des contraintes,

μ : La viscosité dynamique du fluide,

f : Force extérieures,

u : Le vecteur vitesse,

ρ : La masse volumique

Dans l'équation de conservation de l'énergie

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla.\rho hu = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla.q + \Phi \quad \text{..... (3.6)}$$

On remarque le terme $u.\nabla$ représente la somme des deux flux de chaleur par conduction et par rayonnement. h : l'enthalpie par unité de masse $\dot{q}'''$est le taux de rejet de la chaleur par unité de volume pour une réaction chimique.

Le terme Φ est connu comme dissipation visqueuse, c'est le taux de l'énergie cinétique transférée à une énergie thermique en raison de la viscosité dynamique du fluide, et défini par :

$$\Phi=\tau_{ij}.u=\mu\left(S_{ij}.S_{ij}-\frac{2}{3}(\nabla.u)^2\right)=$$

$$\mu\begin{bmatrix}2\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+2\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2+2\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2\\ +\left(\frac{\partial w}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2+\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2\\ -\frac{2}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2\end{bmatrix}\quad\text{......................}\ (3.7)$$

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

D_i : coefficient de diffusion de l'élément 'i' ;

Y_I : la fraction massique de l'élément 'i' ;

$\dot{m}_i'''$ **:**le débit massique par unité de volume.

Pour la simulation d'incendie, le modèle hydrodynamique de FDS est couplé à un modèle de combustion à fraction de mélange (mixture fraction model) et à un modèle de rayonnement.

3.1.2. Modèle de combustion

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

Les fraction de tous les réactifs majeurs et des produits peuvent être tirées du mélange au moyen des relations d'état des mesures [12].

La fraction de mélange Z peut être définie en termes de fraction de masse de carburant et des produits de la combustion :

$$Z=Y_F+\frac{W_F}{xW_{CO2}}Y_{CO2}+\frac{W_F}{xW_{CO}}Y_{CO}+\frac{W_F}{xW_S}Y_S\text{......................}\ (3.8)$$

Y_F :Est la fraction massique du carburant.

On peut considérer que : $Z=Z_1+Z_2$, tel que :

$Z_1=Y_F$

$$Z_2 = \frac{W_F}{xW_{CO2}} Y_{CO2} + \frac{W_F}{xW_{CO}} Y_{CO} + \frac{W_F}{xW_S} Y_S \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3.9)$$

Dans le meilleur cas, nous pourrions employer ces valeurs dans un calcul pour déterminer le taux de rejet de la chaleur, ce dernier est défini par :

$$\dot{q}''' = min\left[\frac{max(\rho Y_F, s\rho Y_{O_2})}{\delta t}\Delta H, \dot{q}'''_{max}\right]; s = \frac{W_F}{\nu_{O_2} W_{O_2}} \ldots\ldots\ldots \quad (3.10)$$

Avec:

W_α :le poids moléculaire de l'espèce gazeuse α ;

S : vecteur unitaire dans la direction de l'intensité ;

ν_α :coefficient stœchiométrique de l'élément α.

La fraction de mélange satisfait l'équation de conservation : $\rho \frac{DZ}{Dt} = \nabla . \rho D \nabla Z$

Si on suppose que la combustion se produit tellement rapidement que le carburant et l'oxygène ne peuvent pas co-exiter, alors tous les deux disparaissent simultanément sur une surface de flamme :

$$Z(x,t) = Z_f; Z_f = \frac{Y_{O_2}^{\infty}}{sY_F^1 + Y_{O_2}^{\infty}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3.11)$$

Où :

$Y_{O_2}^{\infty}$: Fraction massique de l'oxygène à l'ambiance ;

Y_F^1 : Fraction massique de combustible dans le jet.

(Dans notre étude on ne prend pas compte de la combustion, mais on considère la source de chaleur comme une plaque chauffé avec une puissance fixe imposé de 15 MW.)

3.1.3. Modèle de rayonnement

Le transfert de chaleur par rayonnement est inclus dans le modèle par l'intermédiaire de la résolution de l'équation de transfert de rayonnement pour un gaz gris non dissipatif, et dans quelques cas limités en utilisant un modèle de bande large. L'équation est résolue en utilisant une technique semblable aux méthodes de volume finies pour le transfert par convection [12]

3.1.4. Modèle de combustion

Une fois que le taux de rejets de la chaleur est calculé, Z_1 et Z_2 sont discrétisée dans le temps :

$$Z_1^{n+1} = Z_1^n - \frac{\dot{q}'''\Delta t}{\rho \Delta H} ; Z_2^{n+1} = Z_2^n - \frac{\dot{q}'''\Delta t}{\rho \Delta H} \quad \text{..... (3.12)}$$

Notons que la fraction du mélange ; $Z=Z_1+Z_2$ est toujours une quantité conservée.

3.2. Résolution numérique

3.2.1 Equation simplifiées (modèle hydrodynamique)

La résolution numérique des équations de conservation simplifiées repose sur la méthode des différences finies centrées du second ordre. Le maillage est cartésien, structuré est décalé, les variable scalaires sont calculées au centre des mailles tandis que les variable vectorielles sont définies au centre des faces mailles.

En accord avec les simplifications faites, les équations de Navier-Stokes s'écrit :

- **Conservation de la masse**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{u}.\vec{\nabla}\rho = -\rho\vec{\nabla}.\vec{u} \text{.....(3.13)}$$

- **Conservation de la quantité de mouvement**

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u}.\vec{\omega} + \vec{\nabla} H = \frac{1}{\rho}\left((\rho - \rho_0)\vec{g} + \vec{f} + \vec{\nabla}.\tau_{ij}\right) \text{..... (4.14)}$$

- **Equation de la pression**

$$\nabla^2 H = -\frac{\partial(\nabla.u)}{\partial t} - \nabla.F; F = u.\omega - \frac{1}{\rho}\left((\rho - \rho_m)g - f - \nabla.\tau_{ij}\right) \text{..... (3.15)}$$

- **Equation d'état pour les gaz parfaits**

$$\overline{P_m} = \rho T R \sum_I \frac{Y_i}{W_i} \text{..... (3.16)}$$

- **Equation de la conservation des espèces**

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + u.\nabla \rho Y_i = -\rho Y_i \nabla.u + \nabla.\rho D_i \nabla Y_i + \dot{m}_i^m \text{..... (3.17)}$$

On défini H par : $H = \frac{|u|^2}{2} + \frac{\bar{P}}{\rho_0}$

ω: Le vecteur de vorticité

3.2.2 Discrétisation temporelle

1. **La discrétisation de la densité :**

$$\rho^{n+1} = \frac{1}{2}\left(\rho^n + \rho^{(n+1)e} - \delta t\left(u^{(n+1)e} + \nabla\rho^{(n+1)e} + \rho^{(n+1)e} + \nabla.u^{(n+1)e}\right)\right) \text{..... (3.18)}$$

2. La discrétisation de la pression :

$$\nabla^2 H^{(n+1)_e} = -\frac{2(\nabla.u)^{n+1}-(\nabla.u)^{(n+1)e}-(\nabla.u)^n}{\delta t} - \nabla.F^{(n+1)_e} \quad \text{(3.19)}$$

3. La discrétisation de la vitesse :

$$u^{n+1} = \frac{1}{2}\left[u^n + u^{(n+1)_e} - \delta t\left(F^{(n+1)_e} + \nabla H^{(n+1)_e}\right)\right] \quad \text{(3.20)}$$

3.2.3 Discrétisation spatiale

Les dérivées spatiaux de chaque équation sont écrites en utilisant les différences finies précises (de second ordre) sur une grille rectiligne. Le domaine global rectangulaire qui est devisée en mailles rectangulaires, chaque maille est assignée par des indices :i, j et k qui représentent la position de la maille dans les direction x, y et z respectivement. Des quantités scalaires sont assignées au centre de chaque maille [12].

Ø Equation de la conservation de la masse

Au centre de la (ijk)^{éme} maille, la densité est mis à jour dans le temps avec un prédicateur-correcteur. Dans l'étape de la prédiction, la densité à (n+1)^{éme} temps est estimée à partir de l'information du n^{éme} temps. L'équation de la conservation de la masse peut être écrite sous la forme [12] :

$$\frac{\rho_{ijk}^{(n+1)}-\rho_{ijk}^n}{\delta t} + (u.\nabla\rho)_{ijk}^n = -\rho_{ijk}^n(\nabla.u)_{ijk}^n \quad \text{(3.21)}$$

Après la prédiction de la vitesse et de la pression à (n+1)^{éme} étape de temps, la densité est corrigée, et dont l'équation de conservation de la masse est la suivante :

$$\frac{\rho_{ijk}^{(n+1)}-\frac{1}{2}\left(\rho_{ijk}^n+\rho_{ijk}^{(n+1)e}\right)}{\delta t} + (u.\nabla\rho)_{ijk}^{(n+1)} = -\rho_{ijk}^{(n+1)}(\nabla.u)_{ijk}^{n+1} \quad \text{(3.22)}$$

L'équation de la conservation des espèces est différentiée de la même manière, après l'étape de prédiction et de correction, elle est donnée par [12] :

$$\frac{(\rho Y_i)_{ijk}^{(n+1)} - \frac{1}{2}\left((\rho Y_i)_{ijk}^{n} + (\rho Y_i)_{ijk}^{(n+1)e}\right)}{\frac{1}{2}\delta t} + \cdots = \cdots + (\nabla . \rho D_i \nabla Y_i)_{ijk}^{(n+1)} + \dot{m}_{i,ijk}''' \quad \text{(3.23)}$$

Après discrétisation l'équation d'état pour les gaz parfaits est donnée par :

$$\overline{P}_m = T_{ijk} . \rho_{ijk} . R . \sum_{l=0}^{N_s} \frac{Y_{i,ijk}}{W_i} \quad \text{(3.24)}$$

Après discrétisation, l'équation de la pression devient :

$$\frac{H_{i+1,jk} - 2H_{ijk} + H_{i-1,jk}}{\delta x^2} + \frac{H_{i,j+1,k} - 2H_{ijk} + H_{i,j-1,k}}{\delta y^2} + \frac{H_{ij,k+1} - 2H_{ijk} + H_{ij,k-1}}{\delta z^2} = \frac{F_{x,ijk} - F_{x,i-1,jk}}{\delta x} - \frac{F_{y,ijk} - F_{y,i,j-1,k}}{\delta y} - \frac{F_{z,ijk} - F_{z,i,j,k-1}}{\delta z} - \frac{\partial}{\partial t}(\nabla . u)_{ijk} \quad \text{(3.25)}$$

Chapitre 4
Présentation du FDS

Présentation du code fire dynamics simulator FDS

4.1. INTRODUCTION:

L'idée d'étudier la dynamique d'un feu par des outils de simulation numérique remonte au tout début de l'informatique. Cependant, malgré la connaissance de l'ensemble des équations relatives à la dynamique des fluides, il existe de très nombreuses difficultés auxquelles il faut faire face pour obtenir des résultats raisonnables.

La puissance toujours croissante des moyens de calcul permet aujourd'hui d'envisager de façon sérieuse de résoudre ces équations en 3 dimensions et de pouvoir ainsi simuler des écoulements. Mais dans le cas d'incendie notamment, la complexité est accrue puisqu'il faut considérer également des transferts de chaleur importants et une modélisation pour le processus et les phénomènes de combustion qui sont encore assez mal connus. La nécessité de prendre en compte les phénomènes de turbulence dans ce genre de cas constitue également une difficulté importante.

Les approches classiques du type k-ε ont permis de faire considérablement avancer les modèles numériques. Aujourd'hui, d'autres techniques différentes comme les modèles de sous-mailles ou même les simulations numériques par calcul direct de la viscosité turbulente sont en plein essor grâce à des résultats prometteurs.

C'est dans ce cadre que le NIST travaille depuis plusieurs années sur la mise au point d'un code CFD (Computational Fluid Dynamics) utilisant la technique Large Eddy Simulation (LES) et même tout dernièrement la technique de Direct Numerical Simulation (DNS).

Ce code nommé Fire Dynamics Simulator (FDS) a fait l'objet de cette étude [3].

4.2. LE CODE FIRE DYNAMICS SIMULATOR:

Ce code est basé sur la résolution des équations de Navier-Stokes appropriées aux faibles nombres de Mach et sur des considérations thermodynamiques classiques. Afin de modéliser la turbulence, la technique LES ou bien la technique de simulation directe sont employées pour prendre en compte l'influence des différentes échelles.

La méthode LES permet à partir d'un maillage "grossier" (au sens des petites structures dissipatives) de restituer de la manière la plus fidèle possible les phénomènes grâce à des

temps de calcul raisonnables. Néanmoins pour cela, on sait qu'il faut capter des structures suffisamment petites, ce qui constitue une contrainte assez importante sur le pas de maillage et les dimensions physiques du domaine considéré.

La méthode directe (DNS) permet quant à elle une résolution dans laquelle la viscosité turbulente n'est pas modélisée mais calculée directement en fonction des espèces. Cette résolution est encore en plein développement et pose toujours de très nombreuses difficultés en raison d'une part du modèle de combustion et d'autre part des temps de calcul [3].

4.2.1 Principe et objectifs du modèle:

Ce code a été spécialement développé dans le but de modéliser les conséquences d'incendie de taille industrielle.

Les objectifs poursuivis dans le développement du code FDS sont multiples. Premièrement en tant que code CFD, il permet la modélisation de la dynamique du feu. On peut penser qu'à terme avec l'amélioration croissante de la puissance de calcul il sera possible d'obtenir une résolution permettant une simulation de plus en plus proche de la réalité.

Deuxièmement il est destiné à prévoir les conséquences d'un incendie dans de très diverses géométries. Il est pour améliorer la prédiction des moyens de protection (influences entre sprinklers, cantonnements et évents) [3].

4.2.2. Description de FDS :

Ce chapitre fournit une description de FDS basée sur les informations contenues dans le Guide de l'Utilisateur [11] et le Guide des Références Techniques [12] accompagnant le programme.

Le code FDS (Fire Dynamics Simulator) est un logiciel CFD (Computational Fluid Dynamics), spécialisé dans la simulation des feux et de la propagation des fumées. Il est basé sur la résolution des équations de Navier-Stokes pour les écoulements avec transfert de chaleur. Le programme informatique principal est écrit en Fortran 90. La première version du programme a été publiée en février 2000. Depuis plusieurs améliorations majeurs et nouveaux dispositifs ont été mis en place dans le programme. Dans cette étude on utilise FDS version 5.5, lequel a été publié en october 2010.

FDS a été développé comme un outil pour résoudre des problèmes pratiques dans l'ingénierie de protection contre le feu et aussi comme un outil pour étudier la dynamique du

feu et la combustion. Les prévisions de vitesses et de températures sont déterminées avec une précision de 5 à 20% par rapport aux résultats expérimentaux selon la qualité du maillage.

FDS peut être utilisé pour modéliser les phénomènes suivants

- Transport de la chaleur et des produits de combustion (principalement les fumées), à faible vitesse.
- Transferts de chaleur entre les solides et les gaz.
- Pyrolyse.
- Développement du feu.
- Propagation du feu.
- Activation d'extincteurs de feu et détecteurs de la chaleur

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

FDS comme tous les logiciels CFD passe par trois étapes pour simuler un phénomène, figure (4.1); Premièrement le Pré- Processeur qui est un fichier d'entré de type texte sur le quel on spécifie la géométrie et les conditions aux limites, ce fichier sera compilé et exécuté par le Solveur qui est dans ce cas FDS, finalement Les résultats des simulations peuvent être visualisés sur le Post-Processeur qui est un programme compagnon appelé Smokeview.

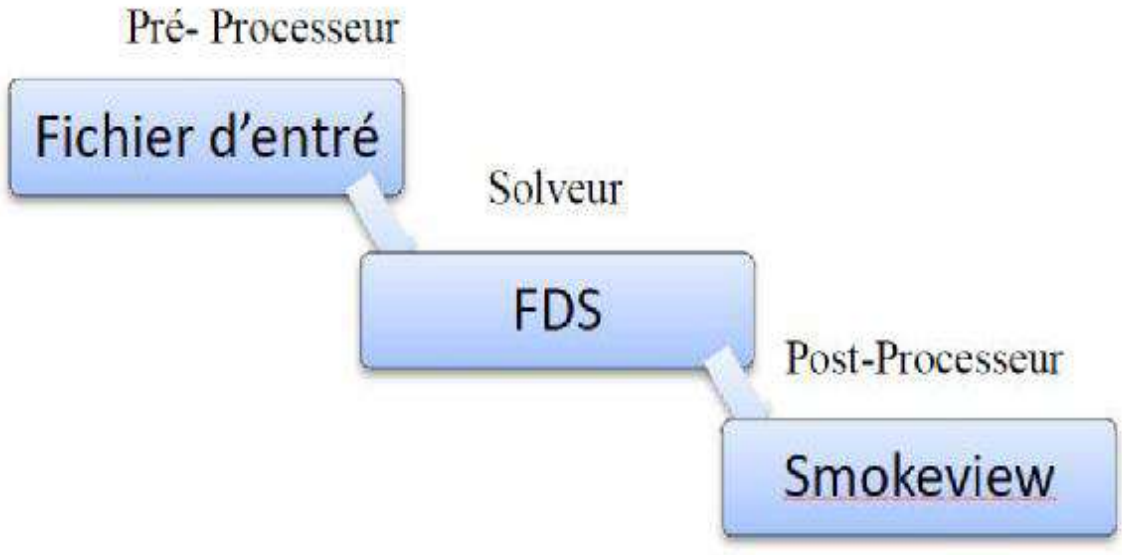


Figure.4.1 :Schéma de fonctionnement de FDS

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

4.2.3. Définition des conditions de simulation sous FDS (Fichier input)

La création du domaine de calcul et définition des conditions de simulation (maillage, conditions aux limites, emplacement de la source…)

Sont réalisée en éditant un fichier texte avec le bloc-notes Windows ou Word Pad. L'exécution du calcul ainsi que la récupération des résultats de simulation se font sous l'invite de commande. un exemple de fichier texte est présenté par la figure (4.2). Cet exemple correspond à la simulation des fumées dans un tronçon de tunnel de dimension (50m*8m*5m) 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 (100mm) suivant x, (160mm) suivant y, (200mm) suivant z qui sont représentés à la ligne (2),

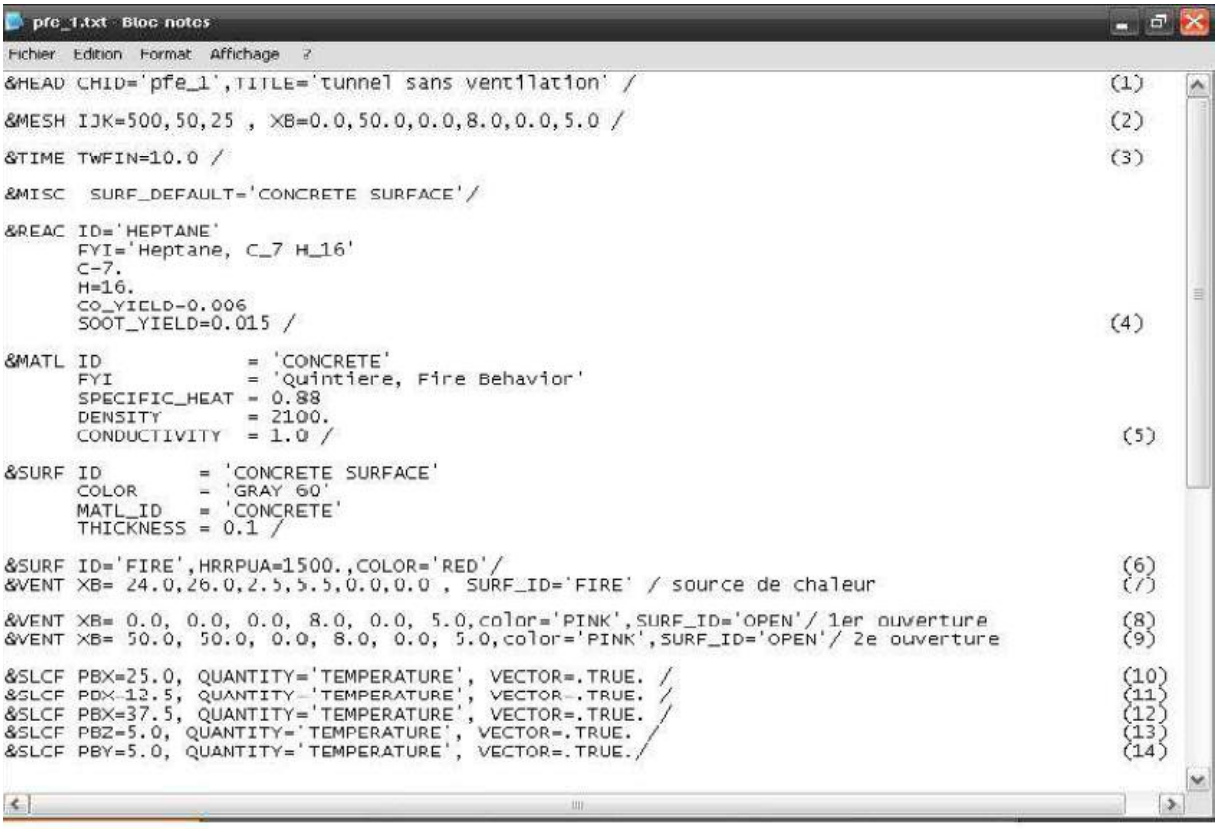


Figure.4.2 : Exemple d'un fichier texte généré pour la simulation sous FDS

- La durée de la simulation (10s), l'Heptane est_choisi comme combustible et le matériau utilisé pour la construction est le béton qui sont respectivement définis aux lignes (3), (4), (5) ;
- La réaction de combustion générée par le feu de bac dégage une puissance thermique par unité de surface de 1500 (kw/m^2), la surface du bac est de (2m*3m) aux lignes (6) et (7) ;
- Les deux ouvertures du tunnel sont considérées comme « OPEN » (condition atmosphérique 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).

4.2.4. Résultats générés :

FDS calcule la température, la densité, la pression, les vitesses, la composition chimique, la visibilité, dans chacune des cellules du domaine maillé et à chaque « pas de temps ». il calcule aussi au niveau des surfaces solides la température, le flux de chaleur, le taux de perte massique et diverses autres grandeurs caractéristique.

Les données retenues sont généralement la température des gaz, la vitesse, la concentration des espèces gazeuses (CO, CO_2, N_2…), la pression, la densité et la fraction de mélange. Certaines données sont directement enregistrées par le programme :taux de production calorifique, concentration des espèces émises durant les réaction. Les autres données sont visualisables à l'aide de *smokview.*

Smokview est un outil de logiciel conçu pour visualiser des calculs numériques produits par des modèles du feu tels que (FDS), *smokview* visualise la fumée et autres paramètres physique du feu en utilisant des méthodes scientifiques, il montre les découpes d'écoulement de particules, 2D ou 3D, des données d'écoulement de gaz telles que des vecteurs de la température et d'écoulement montrant le sens et la grandeur d'écoulement [11].

4.2.5. Modélisation en utilisant la technique LES

Une des approches ayant reçu une large part de développement ces 40 dernières années est la simulation des Grandes Echelles (en anglais LES pour Large Eddy Simulation). L'initiateur de cette approche, Smagorinsky propose dans son article fondateur en 1963, de considérer les contributions aux grandes échelles [13] (Les grands courants atmosphériques). Cette approche résout les équations de Navier–Stokes instationnaires pour tous les

mouvements de taille supérieure à une échelle fixée par le maillage disponible. Pour ce faire, on est amené à filtrer les équations pour ne simuler que les grosses structures porteuses de l'énergie et caractéristiques de l'écoulement. Les petites structures des zones inertielles et dissipatives sont modélisées par des modèles type sous maille. Cette approche, formalisée par Léonard [14], fait apparaître des termes supplémentaires de tension de sous maille qui correspondent aux interactions entre grosses et petites structures. L'étude de ces interactions montre qu'elles ont deux rôles : d'une part elles régissent le flux d'énergie à travers la coupure entre les grandes échelles et les échelles de sous mailles et d'autre part, elles contribuent à la diffusion visqueuse [15].

4.2.6. Domaine de calcul

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

4.2.7. Maillage

FDS calcule les équations gouvernantes dans un maillage rectangulaire. Ceci peut représenter une limitation, où certaine géométrie ne sont pas conformes pour les grilles rectangulaires, donc il faut les approximer par une forme rectangulaire. Sur FDS, on peut diviser la géométrie considérée plusieurs zones, si celle-ci n'est pas rectangulaire.

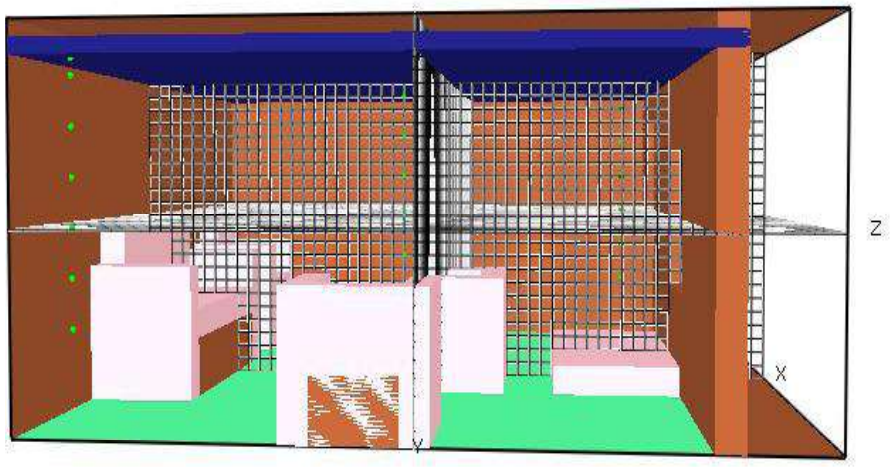


Figure. 4.3: Maillage sur FDS avec système de coordonné

Chapitre 5
Résultats et études de cas avec FDS

Résultats et études de cas avec FDS

Introduction :

On présente dans ce chapitre des résultats du calcul de simulation numérique effectuée par le code FDS de quelques d'incendie souvent rencontrées en pratique.

On a traité au début un cas de tunnel pour deux configurations différentes. On étudiera ensuite le cas de déclenchement d'un feu dans un bâtiment à cinq étages.

On reste tout d'abord que le traitement du cas d'un tunnel est choisi en vue de valider et testes la stratégie de résultat suivie en se référant aux études bibliographiques portant sur ce sujet.

Partie A :

5.1. Etude et simulation du désenfumage dans un tunnel routier :

Dans le cas des tunnels routiers, deux stratégies de désenfumage sont possibles :

- Ou bien viser à pousser toutes les fumées d'un seul coté du foyer, protégeant par là même les usagers présents du coté d'où vient le courant longitudinal. Les usagers présents en aval peuvent se diriger vers la sortie, évitant de s'exposer à la fumée. Il sagit de la **stratégie longitudinale**.
- Ou bien viser à conserver la stratification des fumées, les usagers se trouvant alors dans une couche d'air frais située sous les fumées. Il s'agit de la **stratégie transversale**.

5.2. Stratégié longitudinale (Validation du code FDS)

Quand un incendie se déclenche, les fuméés montent au plafond, et se propagent rapidement. La popagation 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 d'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 applé «**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. Commel'illustrent les photographies de la figure (5.1), lorsque la vitesse logitudinale

est inférieure à la vitesse critique, le **Backlayering** se développe à contre-courant. La configuration critique ($U \approx U_C$) est caractérisée par l'apprition d'une zone de recirculation en amont de la zone d'impact au plafond.

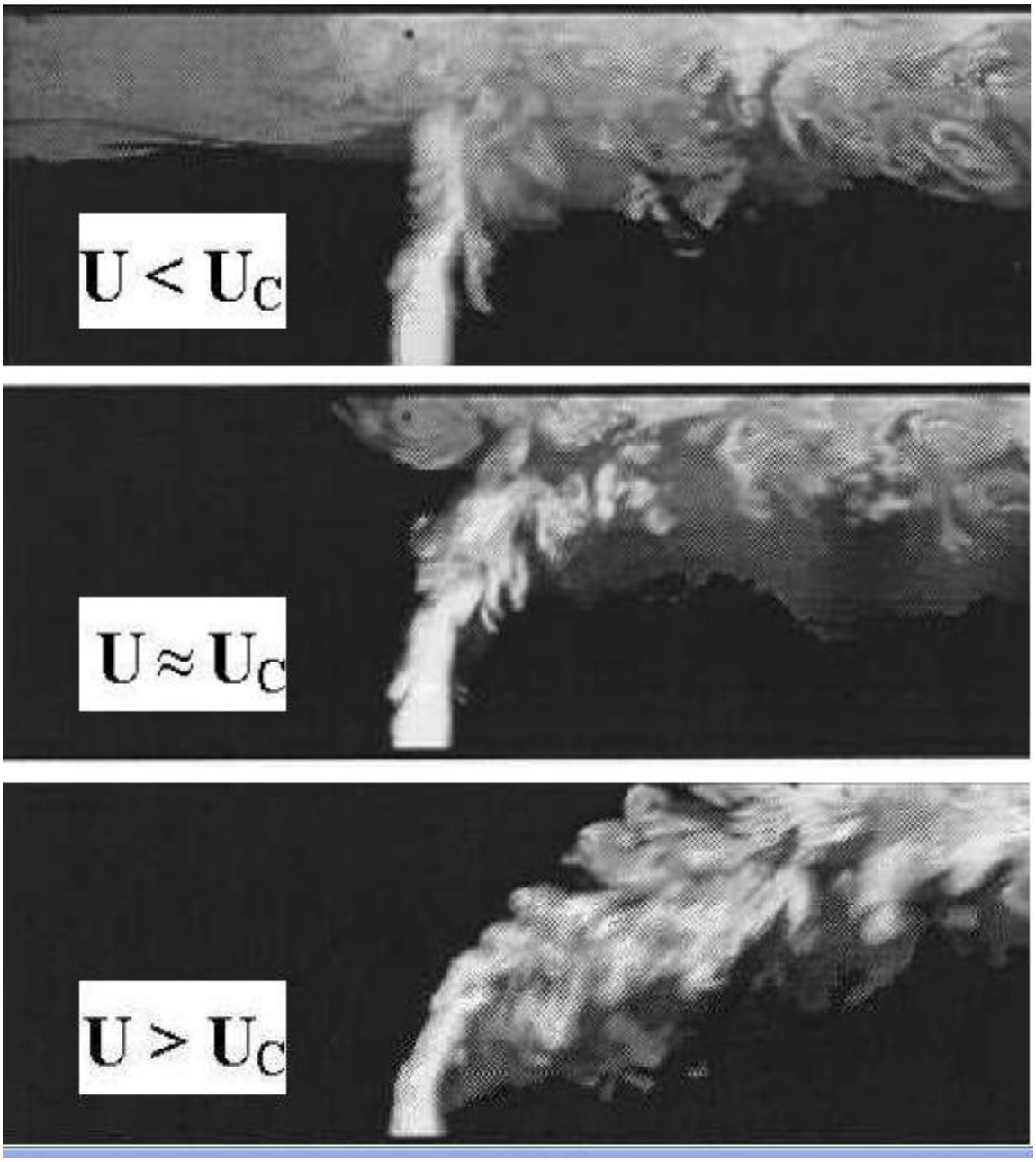


Figure.5.1 : Mise en évidence de la vitesse critique [4]

Notre contribution concerne l'évaluation et la détermination de la vitesse critique dans le cas d'un écoulement longitudinal en utilisant le code FDS.

Pour valider l'utilisation du code FDS, la vitesse critique de désenfumage est obtenue par visualisation (première méthode) en fonction de la puissance du feu aux conditions initiales et aux limites utilisée par les différents auteurs (Thomas, Kunch, Oka & Atkinson et Vauquelin). [4, 16, 19, 20]. Un tunnel routier de géométrie parallélépipédique de 200 m de long, 10 m de large et 5m de hauteur est choisi en conformité avec le choix des auteurs cités précédemment. La source de chaleur, située au milieu, est un feu de bac utilisant l'heptane comme combustible.

La figure (5.2), montre les résultats de simulation comparés avec d'autres travaux.

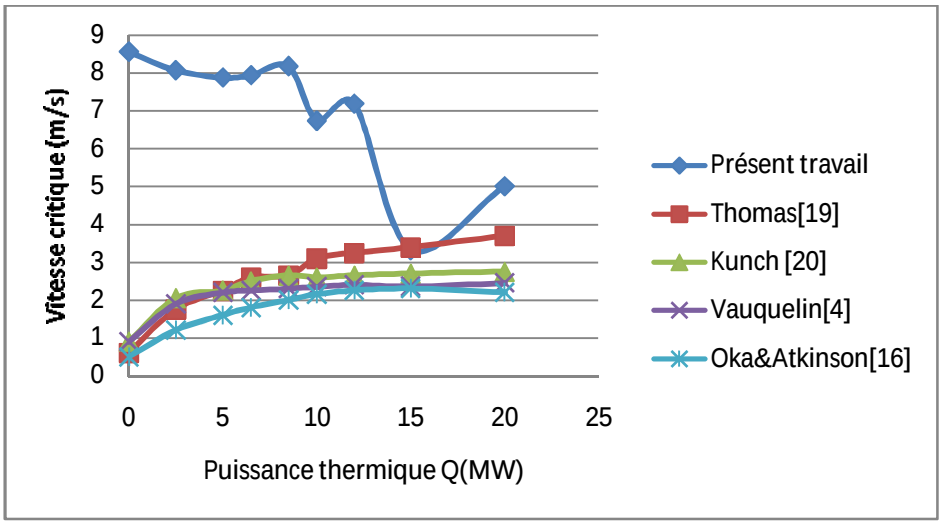


Figure.5.2 : Vitesse critique en fonction de la puissance

5.2.1.Modélisation de la stratégie longitudinale

5.2.2. Simulation et résultats

5.2.2.1. Condition initiales et aux limites

La figure (5.3) présente le schéma d'un tunnel routier de 200m de log, 10m de large et 5m de haut. Il est équipé, à l'entrée, d'un système de ventilation mécanique. Le feu est simulé par la combustion de l'heptane dans un bac, sa puissance thermique par unité de surface est égale à 3750 kw/m^2.

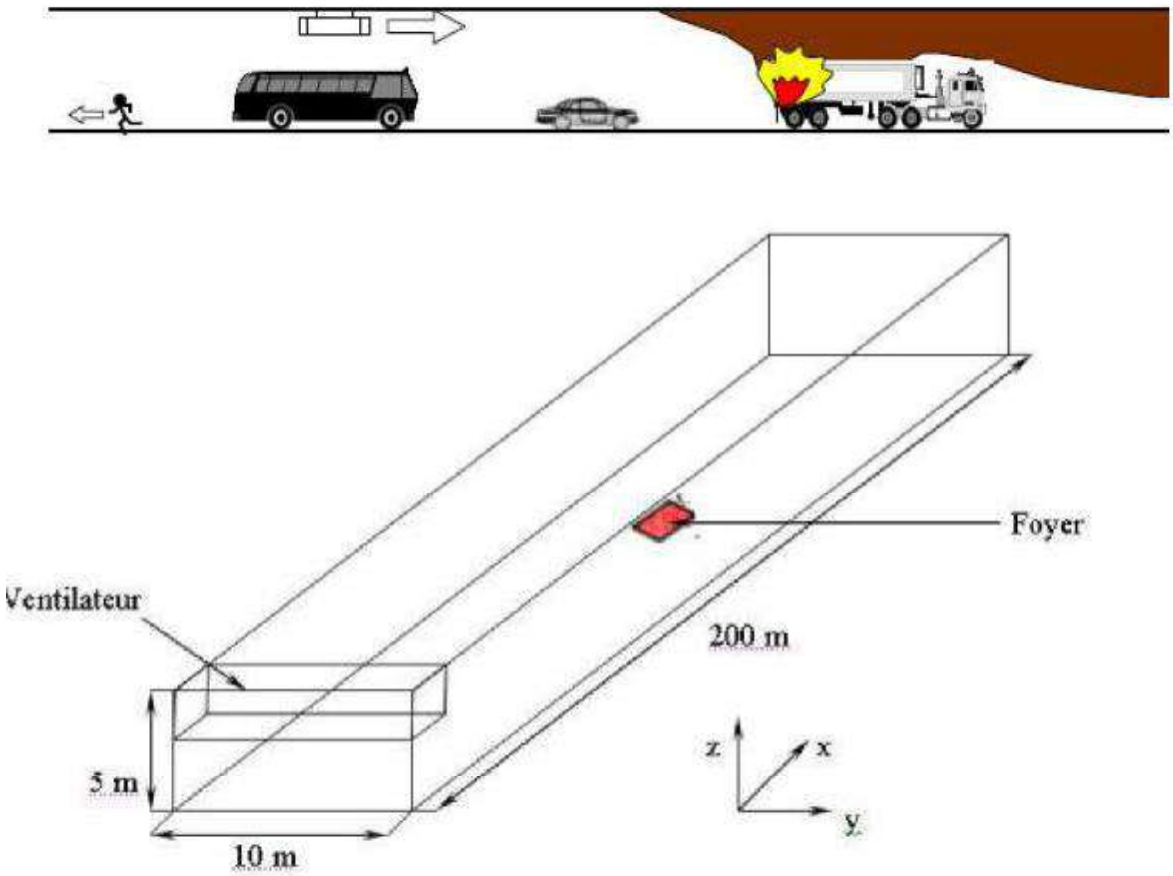


Figure.5.3 : Schéma d'un tunnel routier muni d'une ventilation longitudinale

Cette source de chaleur représente l'incendie d'une camionnette (Tableau 5.1). La température de l'atmosphère et des murs latéraux est prise égale à 20^0C et la pression dans l'ouvrage est supposée atmosphérique.

Type de véhicule	**Puissance thermique**
Véhicule léger	**5 à 8 MW**
Camionnette	**10 à 15 MW**
Poids lourds sans marchandises dangereuses	**30 MW**
Poids lourds avec marchandises dangereuses	**200**

Tableau 5.1 : Puissances thermique dégagée

5.2.2.2. Evaluation de la vitesse critique

A partir du tracé de l'évolution de la vitesse de l'écoulement en fonction de la hauteur tunnel, on calcul la vitesse critique.

Pour la puissance du feu de 15 MW (3750 KW/m^2 pour une surface de 4 m^2), une série de tests ont été réalisés à des vitesse d'insufflation variant entre 5 m/s et 15m/s pour localiser la vitesse d'insufflation qui générait le tourbillon caractérisant l'état critique. Ce dernier est identifié approximativement pour les vitesses d'insufflation entre 8 m/s et 12 m/s. Afin de localiser exactement l'état critique et par conséquent la vitesse critique, les résultats de simulation aux vitesses d'insufflation de : 8, 10 et 12 m/s sont présentés sur la figure (5.4). Pour évaluer la vitesse longitudinale U, on a pris trois points de mesure : deux en amont du foyer x=90m, x=95m, et le troisième à x=100m, juste au dessus du foyer. Ces points de mesure sont à une hauteur de 4.4m par rapport au sol. Les résultats des simulations sur la figure (5.4) concernent les 10 premières secondes, et à 60s.

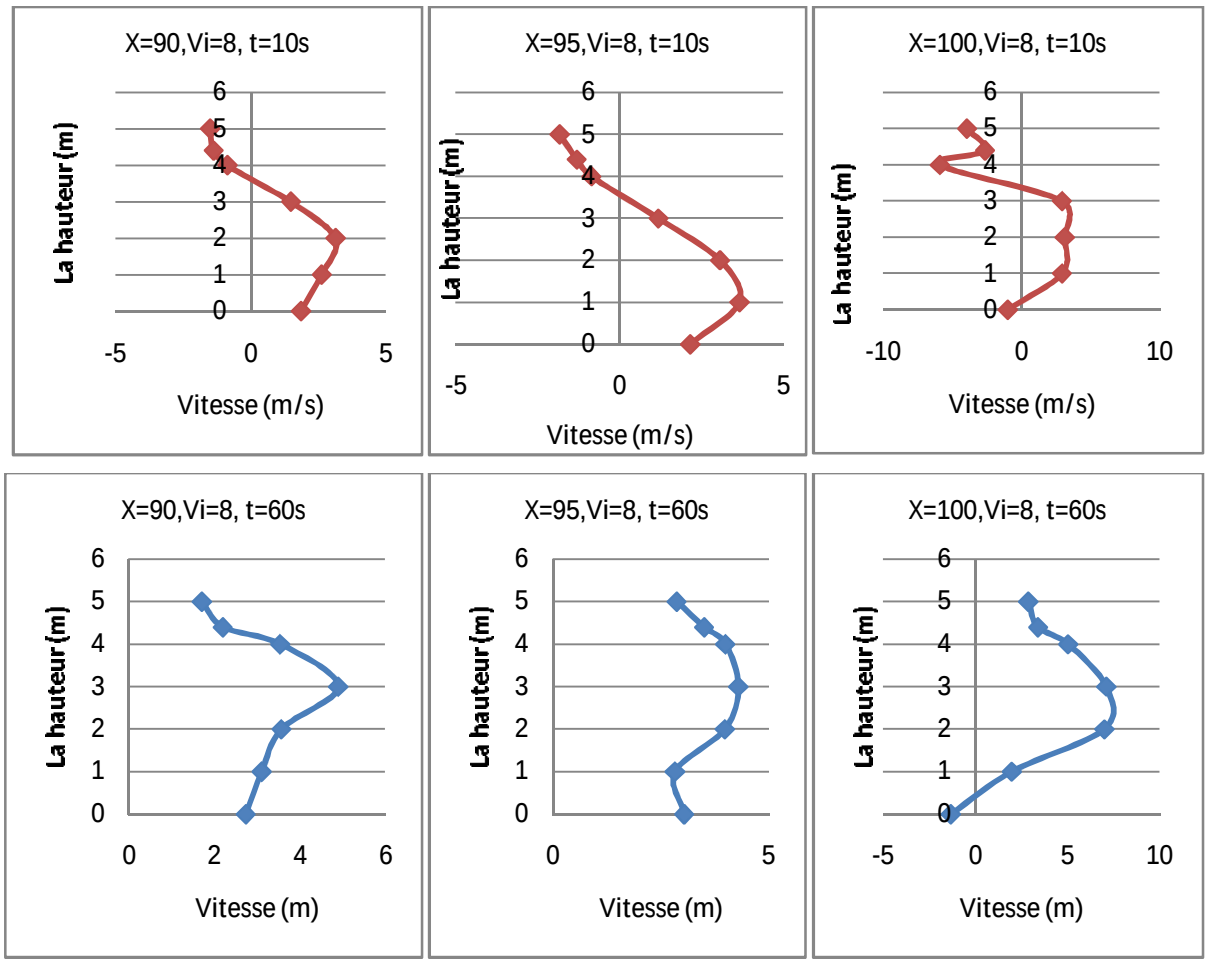


Figure. 5.4(a)

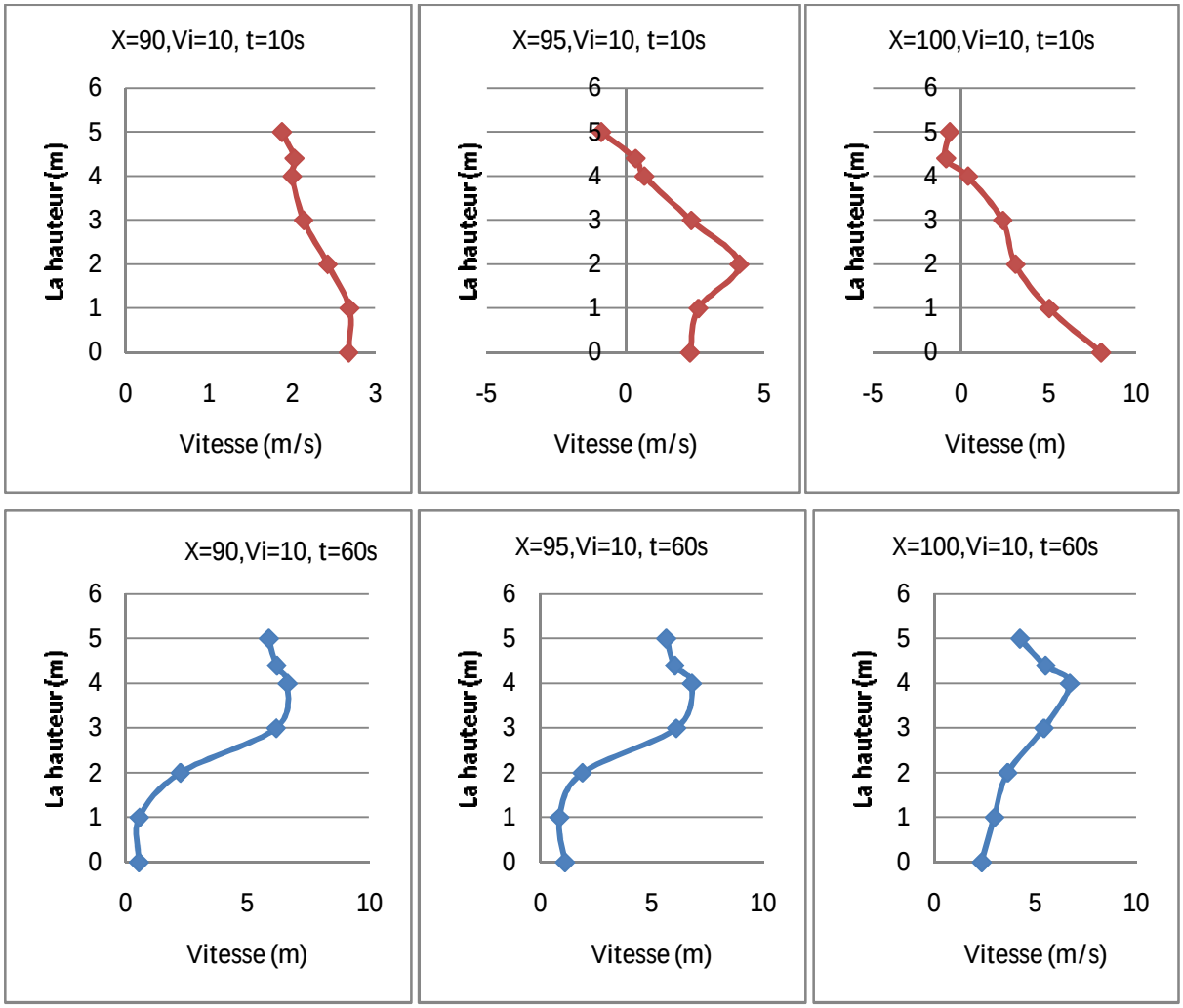

X=90,Vi=10, t=10s
La hauteur (m)
Vitesse (m/s)
X=95,Vi=10, t=10s
La hauteur (m)
Vitesse (m/s)
X=100,Vi=10, t=10s
La hauteur (m)
Vitesse (m)
X=90,Vi=10, t=60s
La hauteur (m)
Vitesse (m)
X=95,Vi=10, t=60s
La hauteur (m)
Vitesse (m)
X=100,Vi=10, t=60s
La hauteur (m)
Vitesse (m/s)

Figure. 5.4(b)

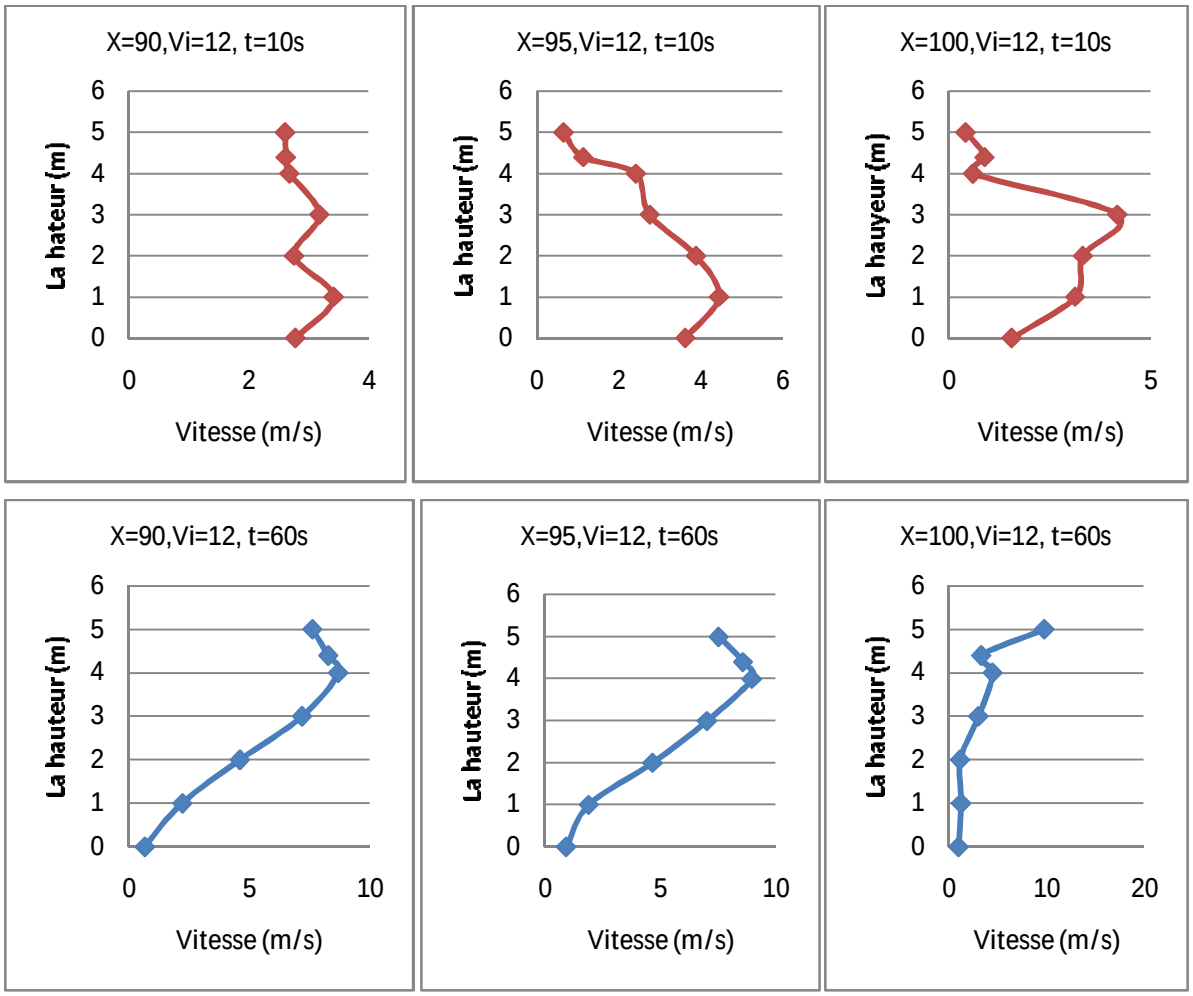


Figure. 5.4(c)

Figure.5.4 : Evolution de la vitesse longitudinale U par rapport à la hauteur du tunnel pour différentes vitesses d'insufflation et à différents points de mesure, après 10s et 60s de simulation

Dans la figure 5.4(a), à x=95m une couche stratifiées de fumées se développe en amont en contre-courant du flux longitudinal. Juste au dessus du foyer à x=100m, 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 d'insufflation plus grande (V_{in}=10m/s), la vitesse de l'air empêche la fumée à se propager en amont de la source et cela est montré aux deux points de mesure x=90m et x=95m, tandis qu'au dessus du foyer petit retour de fumée est observé figure 5.4 (b). En fait, ce n'est pas un retour de fumée c'est une re-circulation 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 le troisième cas figure 5.4(c), l''intégralité des fumées est repoussées 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, elle est également supérieure à la vitesse critique ($U > U_C$).

Dans le tableau (5.2), on récapitule les observations faites sur les différentes situations.

Vitesse d'insufflation	**Observation**	**Déduction**
V_{in}= 8m/s	Une nappe stratifiée se développe à contre-courant (**backlayering**)	**$U \quad U_C$**
V_{in}= 10m/s	Apparition d'une zone de re-circulation en amont de la zone d'impact au plafond	**$U \approx U_C$**
V_{in}= 12m/s	L'intégralité des fumées est repoussée en aval de la source avec une vitesse longitudinale très supérieure.	**$U > U_C$**

Tableau.5.2 : Récapitulation des différentes situations de migration des fumées

Après stationnarité de l'écoulement (temps de simulation**≈60s**), la vitesse critique est obtenue à l'aide du tracé du graphe représentant le profil de la vitesse de l'air U par rapport à la hauteur du tunnel (figure5.5.)

A la hauteur de 4.4m on trouve $U \approx U_C \approx 3.65$ m/s. Elle est exactement la même que celle obtenue par visualisation et proche de celles oblenus par les différents puissance (Figure 5.2).

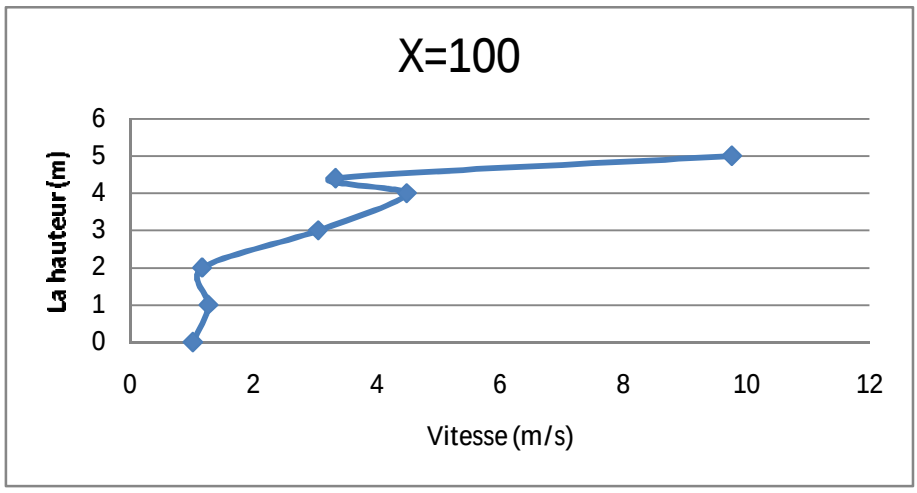


Fig.5.5 Evolution de la vitesse de l'air U par rapport à la hauteur après 60s de simulation

5.3. Stratégié transversale (Validation du code FDS)

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 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.

En cas de désenfumage, il est commode de régler les vitesses d'extraction à une vitesse dite de confinement. Vauquelin [15] a défini 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.

Dans le but de valider le code FDS, on simule le désenfumage à des puissances thermiques de : 1, 4, 10 et 20 MW et aux conditions initiales et aux limites utilisées par Vauquelin [15]. La vitesse de confinement est évaluée à l'aide des visualisations de la couche des fumées. Le domaine de calcul est un tunnel routier bidirectionnel de 200m de long, 10m de large et 5m de haut. Les résultats obtenus sont comparés avec celles trouvés expérimentalement par Vauquelin [15]. On montre que nos résultats sont en bon accord ceux obtenus expérimentalement.

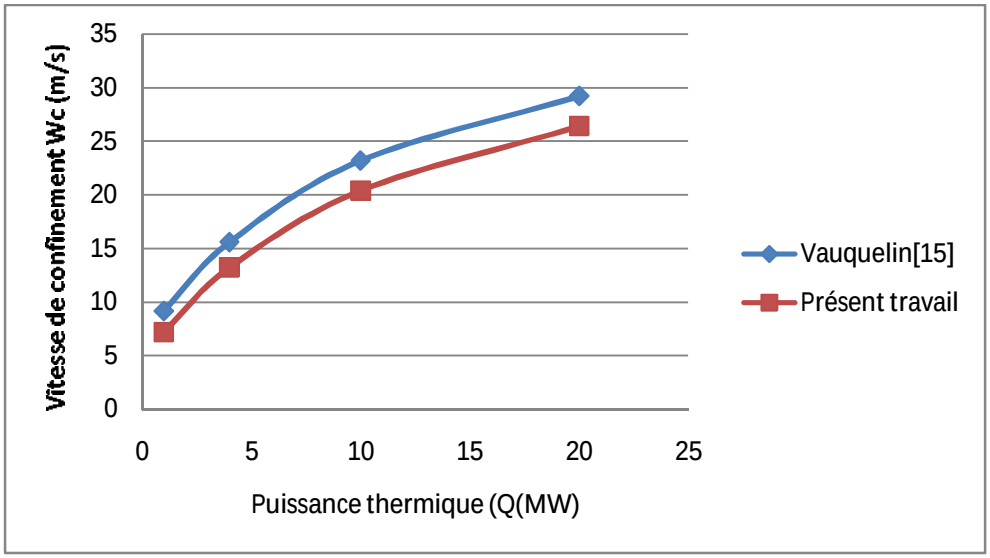


Figure.5.6 : Vitesse de confinement en fonction de la puissance

5.3.1. Modélisation de la stratégié transversale

5.3.2. Simulation et résultats

5.3.2.1. Condition initiales et aux limites

La figure (5.7) présente le schéma d'un tunnel routier de 200m de long, 10m de large et 5m de haut. Il est équipé d'un système de ventilation mécanique composé de deux ventilateurs situés au plafond et à une distance de 30m de part et d'autre du foyer. Les dimensions des trappes sont identiques (2m ×2m). le feu est simulé par la combustion de l'heptane dans un bac de surface égale à $4m^2$. Sa puissance thermique par unité de surface est égale à 4500 kw/m^2. Cette source de chaleur représente l'incendie d'une camionnette. La température de l'atmosphère et des murs latéraux est prise égale à 20^0C et la pression dans l'ouvrage supposée atmosphérique.

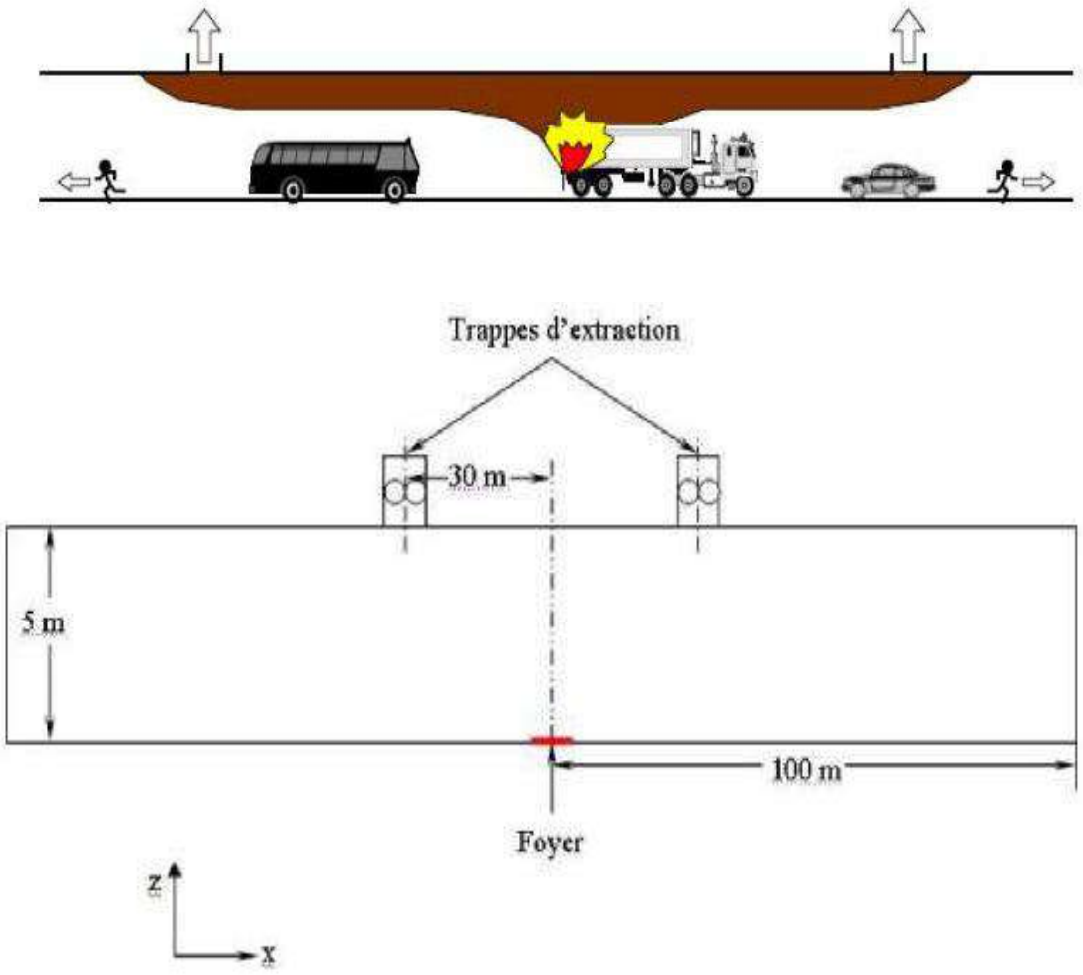


Figure.5.7 : Schéma d'un tunnel routier muni d'une ventilation transversale

5.3.2.2. Evaluation de la vitesse de confinement

La deuxième méthode de détermination de la vitesse de confinement à mesurer, pour plusieurs vitesses d'extraction et une puissance donnée (on prend Q=18 MW), la longueur L de la couche stratifiée de fumée en amont ou en aval de la source de chaleur (la fumée se propage de la même manière dans les deux sens). Cette méthode permet d'évaluer exactement la vitesse de confinement en utilisant la valeur de L.

L'évolution de la couche de fumées stratifiées en fonction de la vitesse d'extraction est représentée dans la figure (5.8). 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 20m/s. A des vitesses d'extraction supérieures, la longueur L commence à se stabiliser au voisinage de la longueur de 30m. Cette distance correspond à la distance entre trappe et le foyer. Il peut être suggéré que le « backlayering » est lié au champ d'extraction crié par les trappes.

On représente la distribution de la température au niveau du plafond du tunnel en fonction de la couche de fumées pour différentes vitesses d'extraction. Quand on s'éloigne du foyer, une diminution de température est remarquée pour toutes les vitesses d'extraction. Cette diminution n'est pas la même. Plus on augmente la vitesse d'extraction plus la diminution de la température devient plus importante jusqu'à atteindre la température ambiante pour une valeur de L=30m et cela observé à partir de 27.5 m/s. Par définition la vitesse d'extraction minimale qui permet un emprisonnement de la couche de fumée est voisine de 27.5m/s.

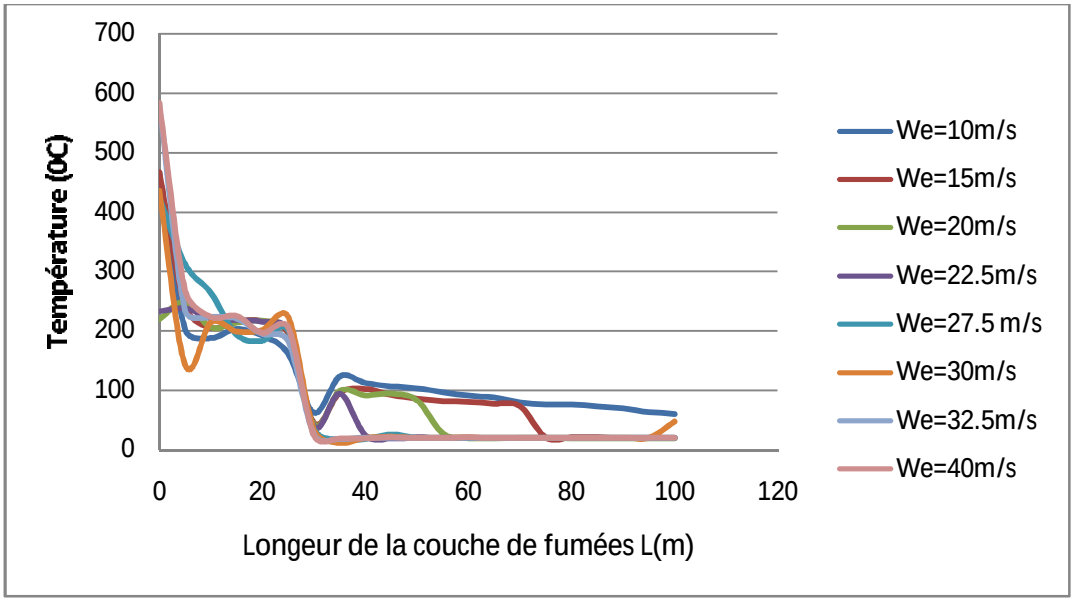


Figure.5.8 : Variation de la longueur de la couche de fumée en fonction de vitesse d'extraction

La valeur de la vitesse de confinement obtenue est comparée avec celles représentées dans le graphe de la figure (5.6). Cette valeur est proche de celle trouvée expérimentalement par Vauquelin.

Partie B :

5.4. Etude et simulation du désenfumage dans un Bâtiment :

Le renforcement de la sécurité au feu 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 risque. De plus, une meilleure connaissance des premiers instants de l'incendie permet une détection du feu plus précoce en évitant : son grossissement rapide, la création des conditions nécessaires favorisant la déstratification des fumées…etc.

L'objectif de cette partie d'étude sera de déterminer la vitesse critique qui permet d'éviter ces phénomènes. L'accent portera principalement sur la détermination des paramètres physiques tels que : la température, la concentration du CO_2, la vitesse,…etc., et cela pour différentes vitesses d'extraction.

L'étude a été réalisée sur un bâtiment de 5 étages de 18.5 m de hauteur, 23.8 m de long et 9.2 m de large. Les figures (5.9) et (5.10) présentent, respectivement, le schéma de bâtiment.

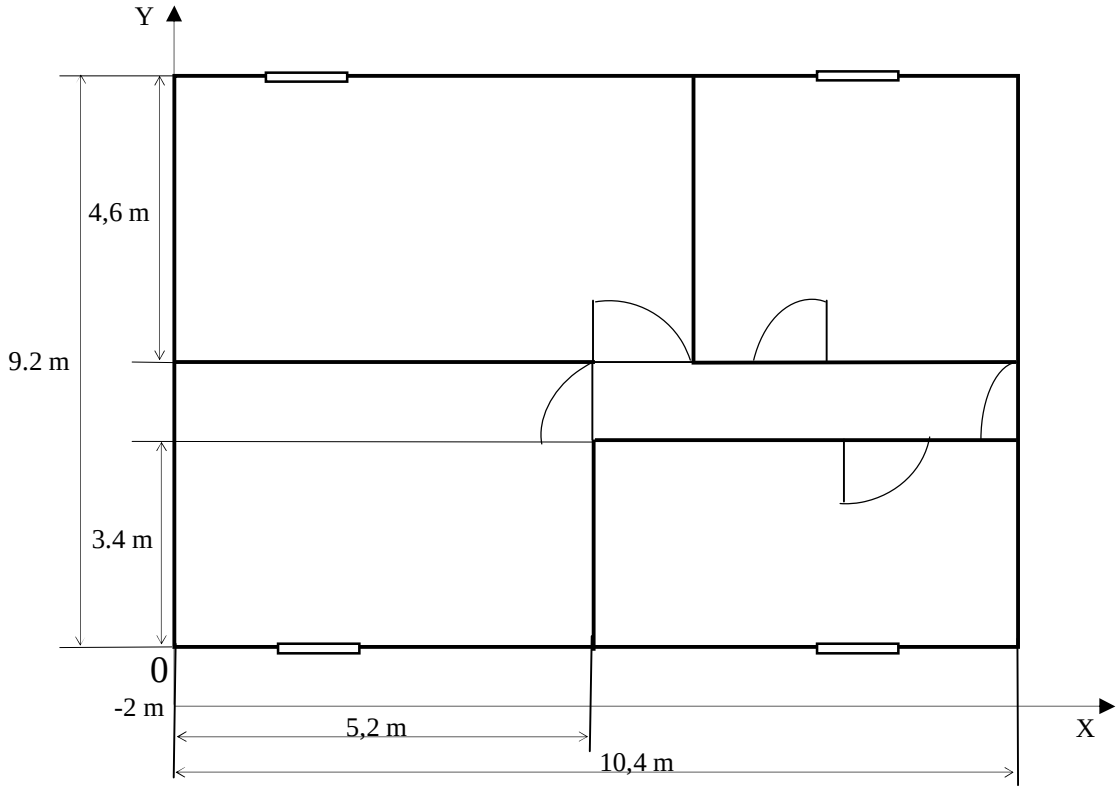


Figure.5.9 Schéma d'un logement du bâtiment

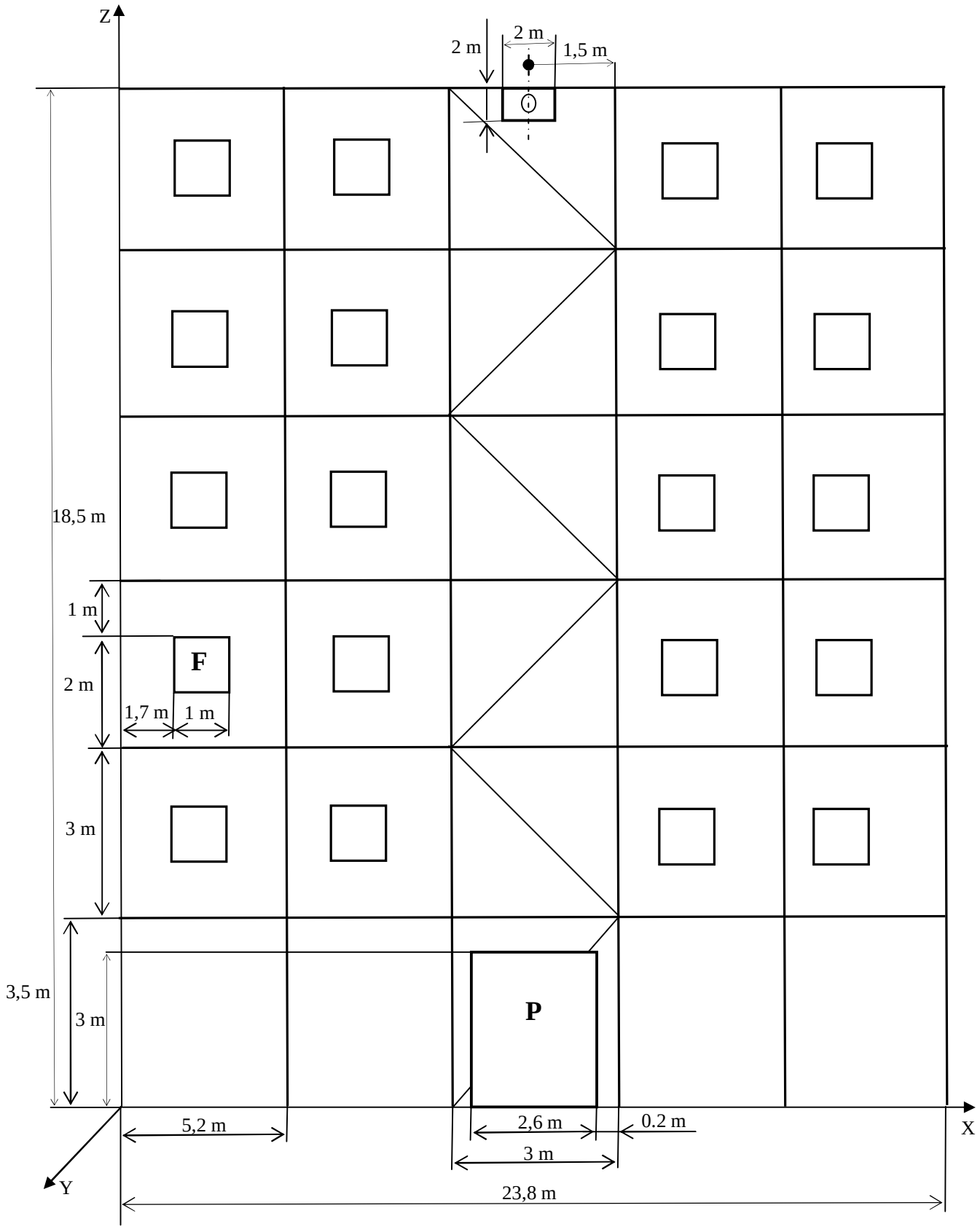


Figure.5.10 Schéma d'un bâtiment muni d'une ventilation transversale

5.4.1. Simulation :

La structure (bâtiment) composée de 5 étages, chaque étage menu 2 logement, chaque logement contient 4 pièces, le bâtiment traversée par cages d'escalier.

Le scénario de l'incendie au niveau d'une chambre d'un logement dans un bâtiment. Il s'agit de l'incendie d'un fauteuil posé dans la chambre, la source de chaleur qui amorce l'incendie est une étincelle de cigarette tombée sur ce fauteuil par exemple.

Les zones de calcul sont d'une dimensions de (23.8×20×11.2)m avec un maillage de (140×70×100), comme l'indique la figure (5.11). La simulation numérique est réalisé sur le domaine de calcul tridimensionnel. Les murs du bâtiment sont représentés en marron. La source de chaleur est définie par une surface carrée représentée en rouge violet au niveau du fauteuil qui est représentée en rose. Le ventilateur est représenté par une surface carrée de couleur verte au niveau de la dalle de la tirasse. La dalle est représentée en bleu nuit. La durée de simulation est de l'ordre de 120 s. ce temps correspond au temps de l'évacuation des habitants.

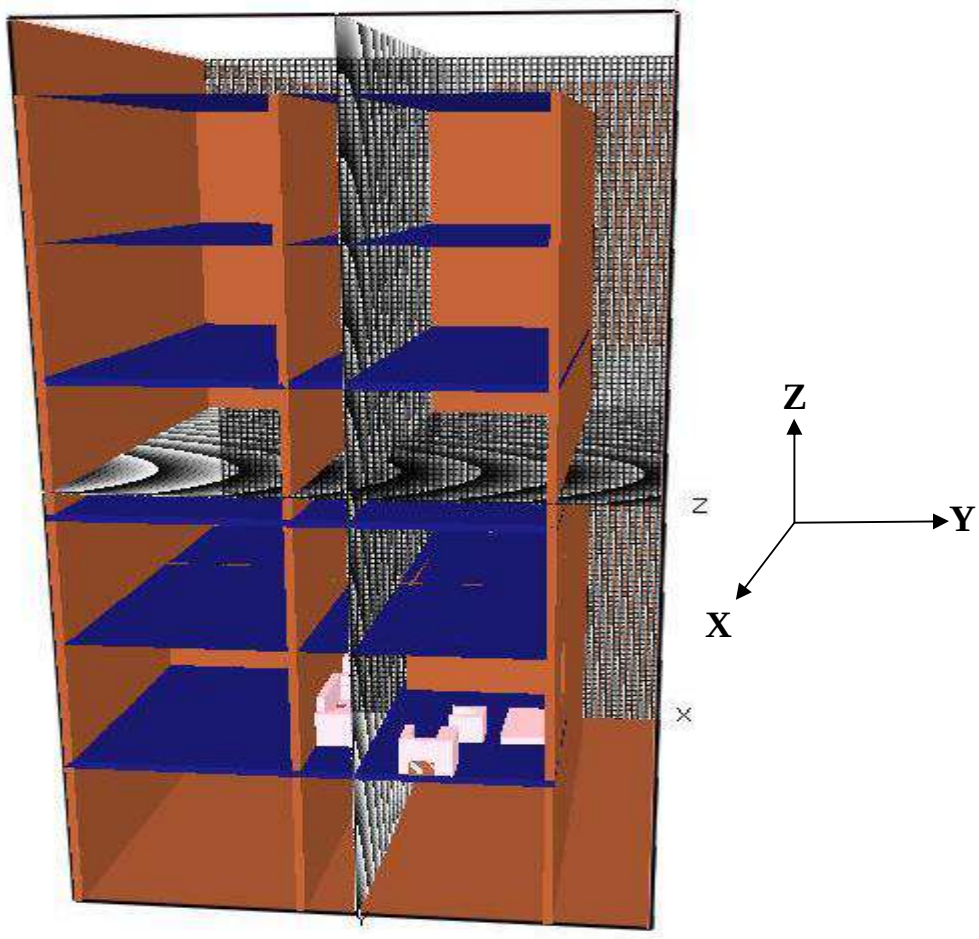


Figure.5.11 Vue domaine de calcul

5.4.1.1. Condition aux limites :

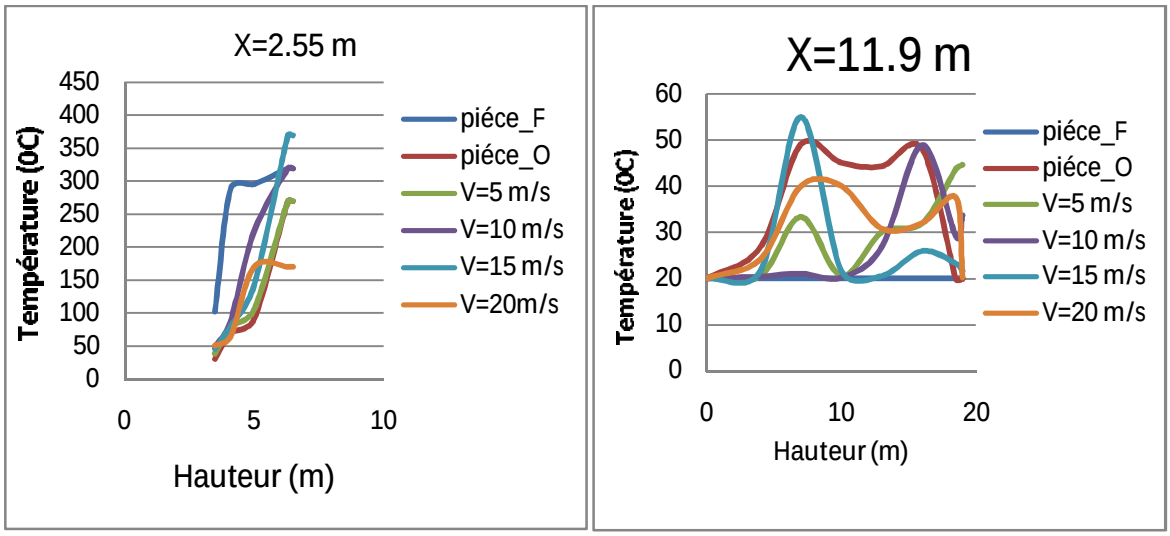
Pour effectuer la simulation, des conditions limites sont introduites. Les Régimes de ventilation 5, 10, 15, 20m/s sont considérés. La puissance thermique par unité de surface de (4000 kW/m^2) définit la source de chaleur. Elle est située aux positions (XB= 2.50, 2.70, 4.30, 4.50, 4.10, 4.10) du domaine. Les thermocouples placés le long du domaine à des hauteurs de (4.10, 5, 6.3)m sur chambre, et (0, 4, 7, 10, 13, 16, 18.5, 19)m sur cage d'escalier, permettant de mesurer les température, vitesse, CO_2 du panache.

5.4.1.2.Résultats de la simulation :

Dans cette étude on présente les résultats numériques obtenus (les distributions de concentration de CO_2 et de la température)

La figure (5.12) présente l'évolution de la température et de la concentration de CO_2 en fonction de la hauteur de la pièce, et par la cage d'escalier pour différentes vitesses d'extraction.

Les profils de température pour les vitesses : 5, 10 m/s sont pratiquement identique et cela est dû à la variation de vitesse d'extraction (température maximale =50 ^{0}C). En augmentant la vitesse 15, 20 m/s une baisse de température au hauteur (pièce, cage d'escalier) est observée. Cela se justifie par le fait que, plus on augmente la vitesse d'extraction, plus l'évacuation des fumées est rapide, plus la température dans l'ouvrage décroît.



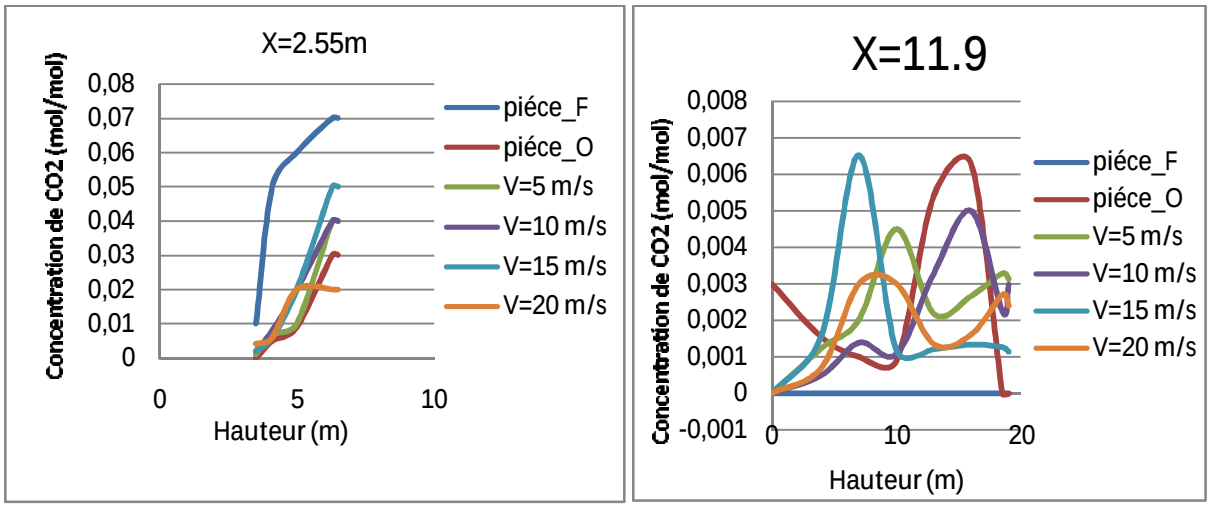


Figure.5.12 : Profils de température et de concentration de co_2 à t=120 s

Dans le graphe présentant l'évolution de la concentration de CO_2, entre 3 et 6.5m le long de la l'hauteur de pièce, on observe un même comportement avec une différence négligeable. A partir de 4m jusqu'à 18.5m, on remarque une concentration de CO_2 plus élevée pour les vitesse de : 15m/s et Vatm. Cela est due au fait qu'il y'a une turbulence au dessus du foyer qui fait obstacle à l'évacuation et par conséquent entraîne l'élévation de la concentration de CO_2. De 0 à 3.5m les concentrations diminuent jusqu'à la disparition puisque la fumée n'arrive pas durant le temps considéré à couvrir tout l'ouvrage.

Ces courbes ne montrent pas les phénomènes de déstratification des fumées. Il sera plus commode de représenter les évolutions de la température et de la concentration de CO_2 instantanées.

Les graphes (5.13) à (5.14) montrent l'évolution de la température et de la concentration de CO_2 en fonction du temps aux différents endroits situes au x=2.55m et x=11.9m.

D'après la figure (5.13), on remarque une augmentation de la température pour tous les régimes, et des fluctuations de fortes amplitudes qui apparaissent pour les vitesses V=15 et v=20 m/s. Alors que les fluctuation sont faibles dans les cas V=5 et V=10. La déstratification se produit pour les deux régimes de ventilation où V=15 et V=20m/s.

Pour la distribution de CO_2, on remarque une augmentation de la concentration avec des fluctuations faibles pour le premier et le deuxième régime de ventilation (5 et 10m/s). les grandes fluctuations sur la concentration de CO_2 pour les deux vitesses d'extraction de 15 et 20m/s sont bien marquées, à cause de la turbulence criée par le ventilateur.

La (figure 5.13) montre l'évolution de la température et de la concentration de CO_2 au niveau de la cage d'escalier à X=11,9m. La température reste acceptable jusqu'à 60s. La concentration de CO_2 est négligeable. A partir de 60s malgré que les fluctuations sont faibles, conséquence de la stratification des fumées, l'augementation de la température et de concentration de CO_2 devient importante.

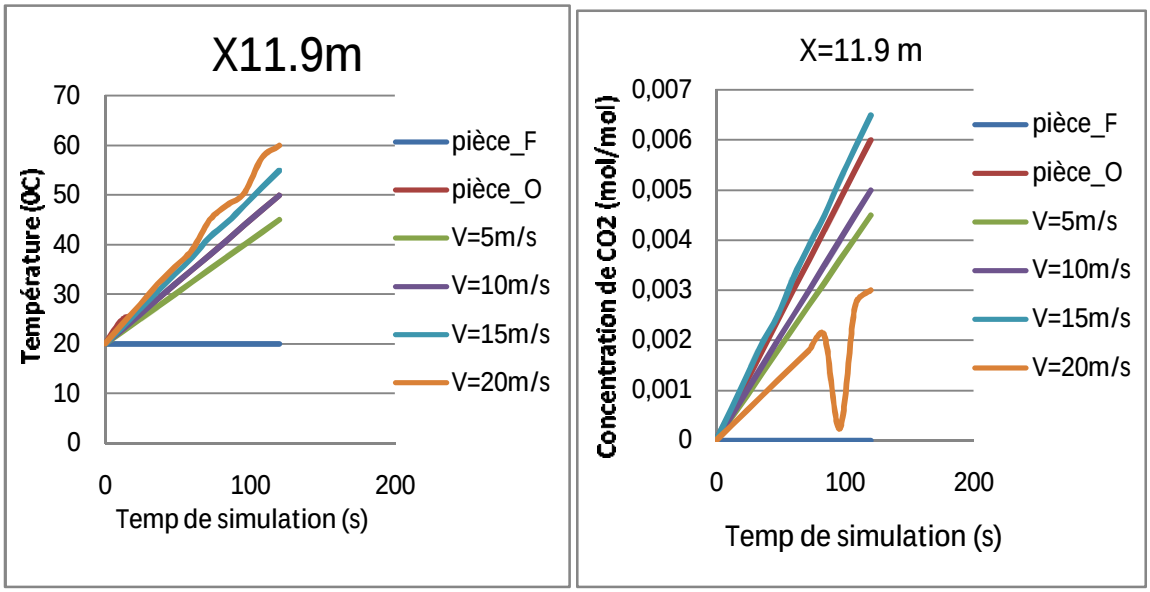


Figure.5.13 Profils de température et de concentration de co_2 à x=11.9m

Au point de mesure situé à x=2.55m à la source de chaleur figure 5.14, les fluctuations sont plus grandes pour tous les régimes de ventilation. Cela se justifie par la combinaison de deux types de turbulence causés par le foyer et le ventilateur. Le feu crée une turbulence par le dégagement de chaleur et le ventilateur par la dynamique d'extraction. Une déstratification très remarquée à ce niveau pour les deux régimes de ventilation V=15 et V=20m/s.

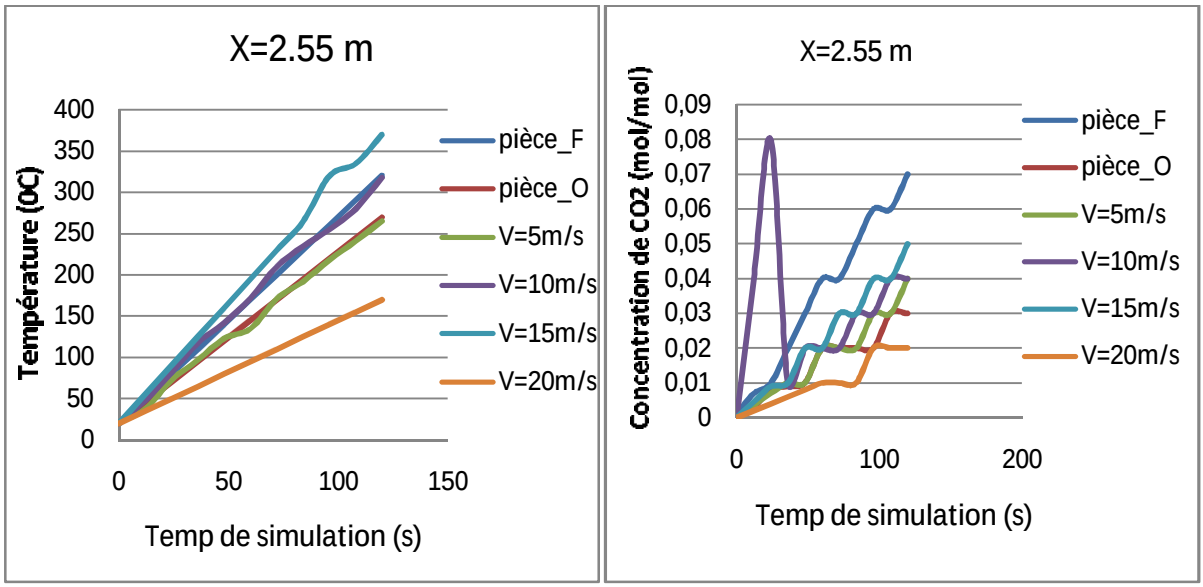


Figure.5.14 : Profils de température et de concentration de co_2 à x=2.55m

On peut observer clairement le phénomène de la turbulence et donc de la déstratification des fumées dans la figure (5.15), où on a représenté la distribution de la vitesse U en fonction de hauteur de l'ouvrage.

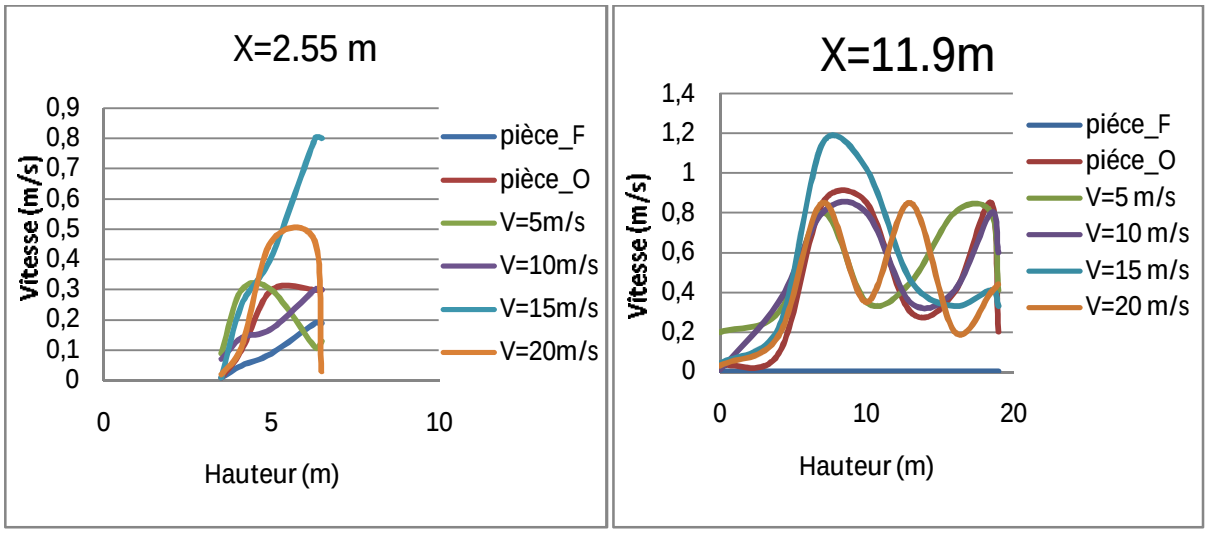
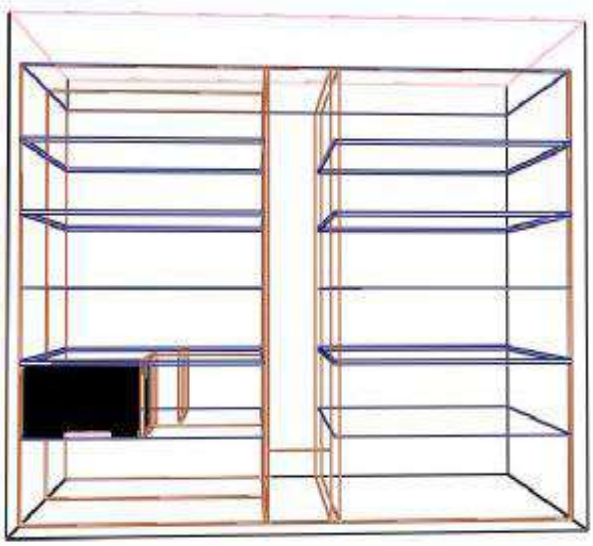


Figure.5.15 : Profils de la vitesse de l'écoulement à t=120 s

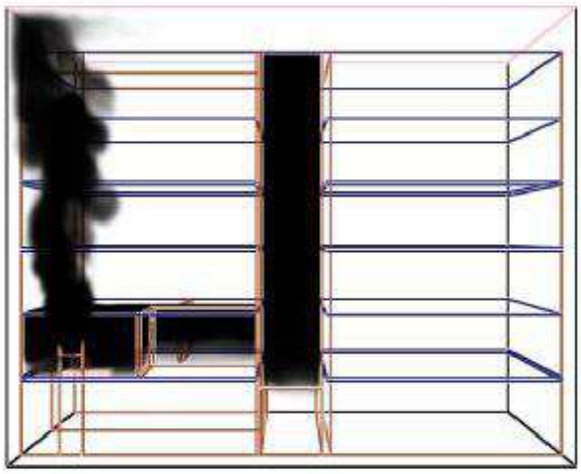
5.4.2. Analyse de la migration des fumées :

La figure (5.16) montre l'enfumage du bâtiment, après 120s de simulation. On distingue deux couches, une représente l'air ambiant qui se situe dans la partie inférieur et l'autre représente la fumée qui se situe dans la partie supérieure. La différence entre la densité de fumées et de l'air fait que les fumées ont tendance à se plaquer contre le plafond de l'ouvrage, c'est l'effet de la flottabilité. La fumée dans la partie haute, est plus structurée pour les vitesses d'extraction de 5 et 10m/s figure5.16 (c) et (d).

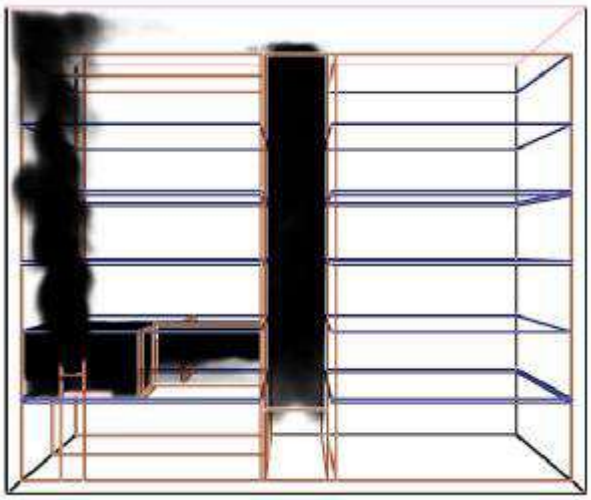
A la vitesse d'extraction de 15m/s, les couches de fumées et d'air commencent à se superposer au voisinage de l'interface verticale, alors qu'à la vitesse de 20m/s, la fumée commence à envahir toute la hauteur du bâtiment figure 5.16(e) et (f). Aux vitesses de 15 et 20m/s, on observe une extraction de fumées plus importante, mais l'écoulement est perturbé.



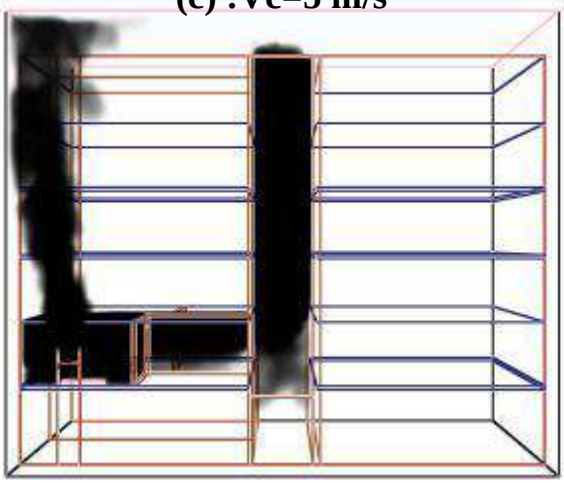
(a) :Vc=Vp



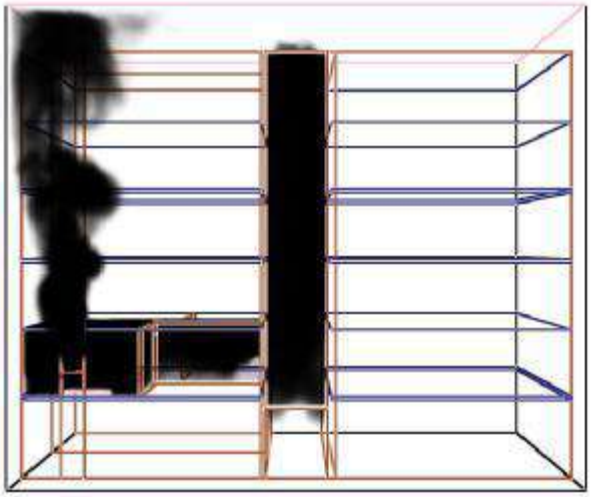
(b) :Vc=Vatm



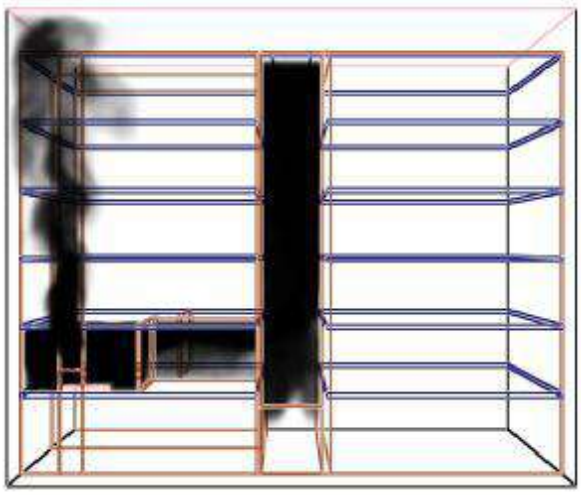
(c) :Vc=5 m/s



(d) :Vc=10 m/s



(e) :Vc=15 m/s



(f) :Vc=20m/s

Figure.5.16 : Enfumage du Bâtiment après 120s de simulation

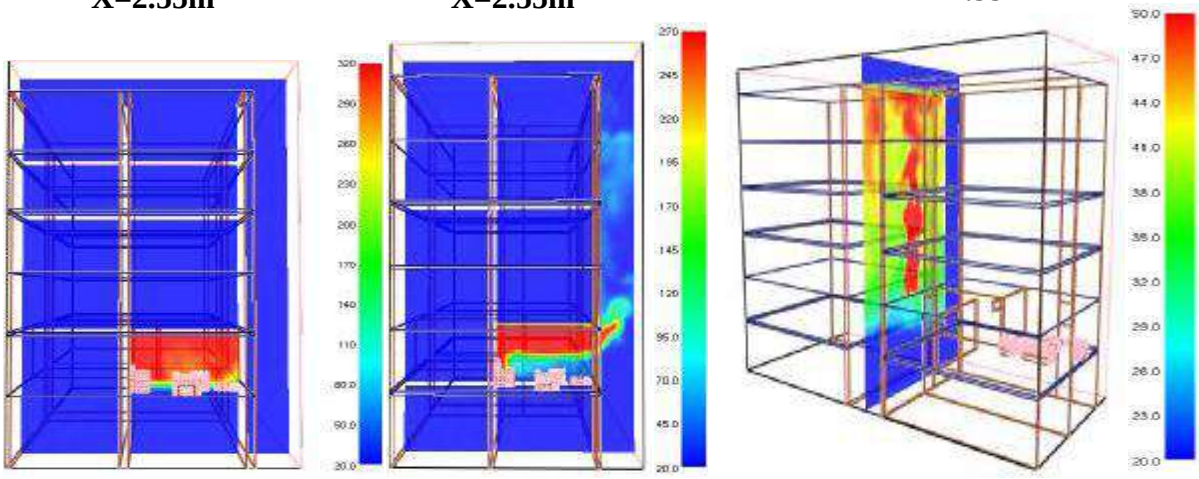
Pour les deux cas où Vc=5 et 10m/s l'évacuation des fumées est insuffisante d'où une certaine accumulation des fumées, qui reste en sa majeure partie répartie sur les couches supérieure de la pièce, et la cage d'escalier, ce qui induit une élévation de la température au niveau de cette couche. Il est évident qu'elle va s'étaler sur les deux hauteurs du bâtiment si on augmente le temps de simulation.

5.4.3. Champ de température :

Sur la figure (5.17), on signale une élévation importante de la température dans la couche supérieure accompagnée d'une légère augmentation de la température dans la partie basse du fait de l'augmentation de la vitesse d'extraction.

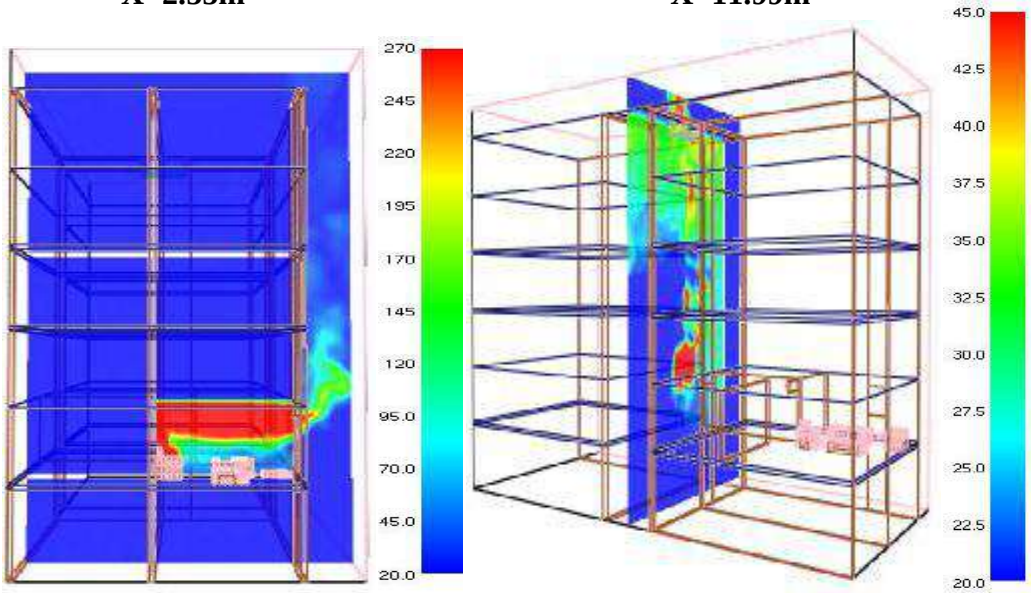
A la vitesse d'extraction de 15m/s fig.5.17(e), il y a une accumulation importante et un retour de fumées, cela génère une élévation de la température sur toute la hauteur de la pièce, et la cage d'escalier. La température est d'environ 55^0C au niveau de X=2.55m, et de 370^0C au niveau de X=11.9m. Cette élévation rend l'évacuation des sinistrés très difficile. En plus de l'élévation de la température, la toxicité des fumées par la déstratification, aggrave encore plus la situation des usagers dans le bâtiment.

X=2.55m **X=2.55m** **X=11.99m**



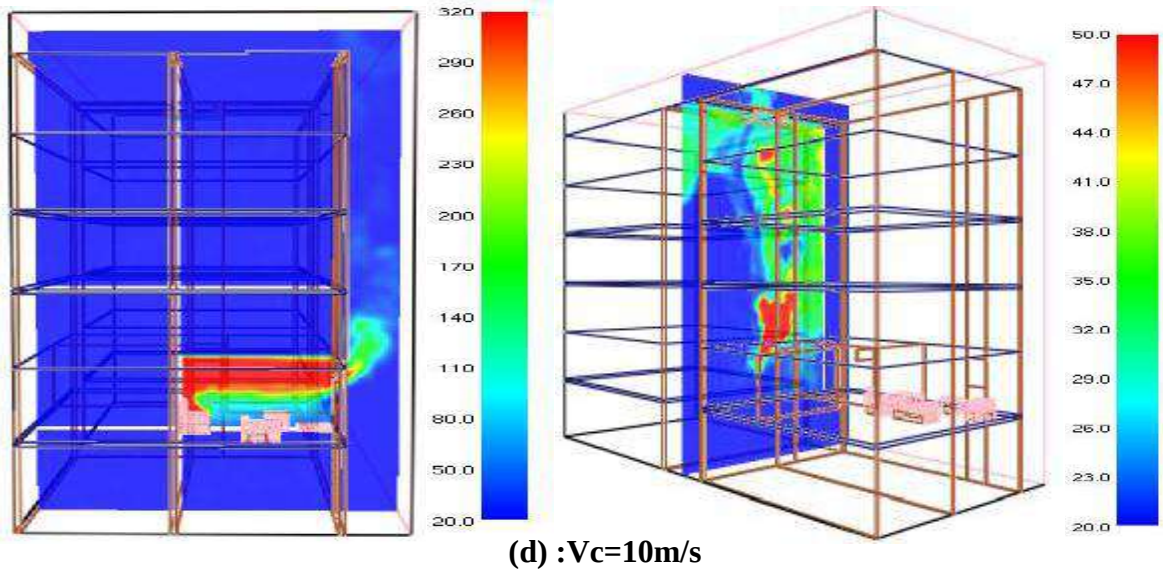
(a) :Vc=Vp **(b) :Vc=Vat**

X=2.55m **X=11.99m**



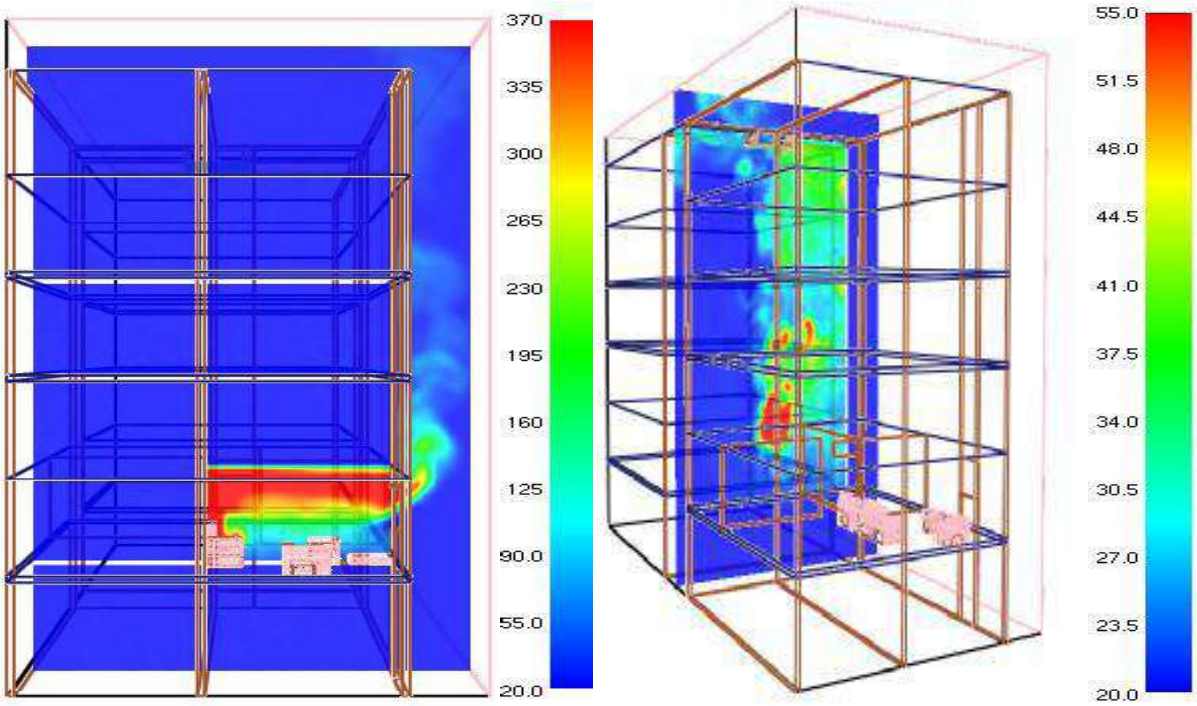
(c) :Vc=5m/s

X=2.55m **X=11.90m**



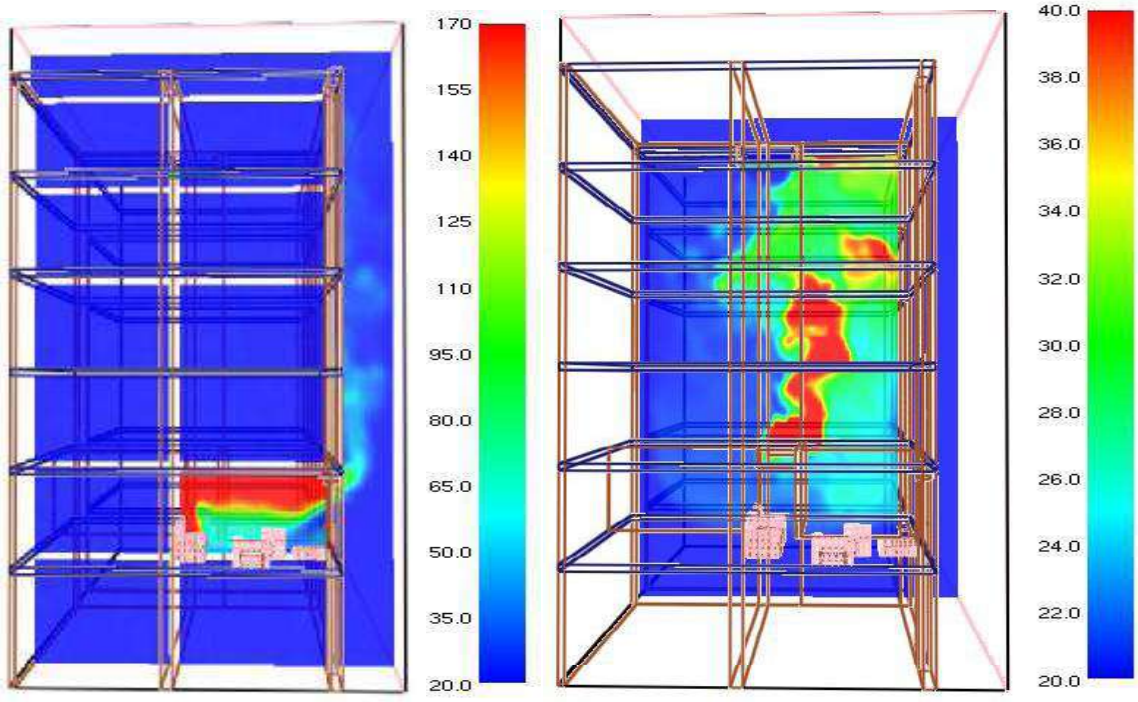
(d) :Vc=10m/s

X=2.55m **X=11.9m**



(e) :Vc=15m/s

X=2.55m **X=11.9m**



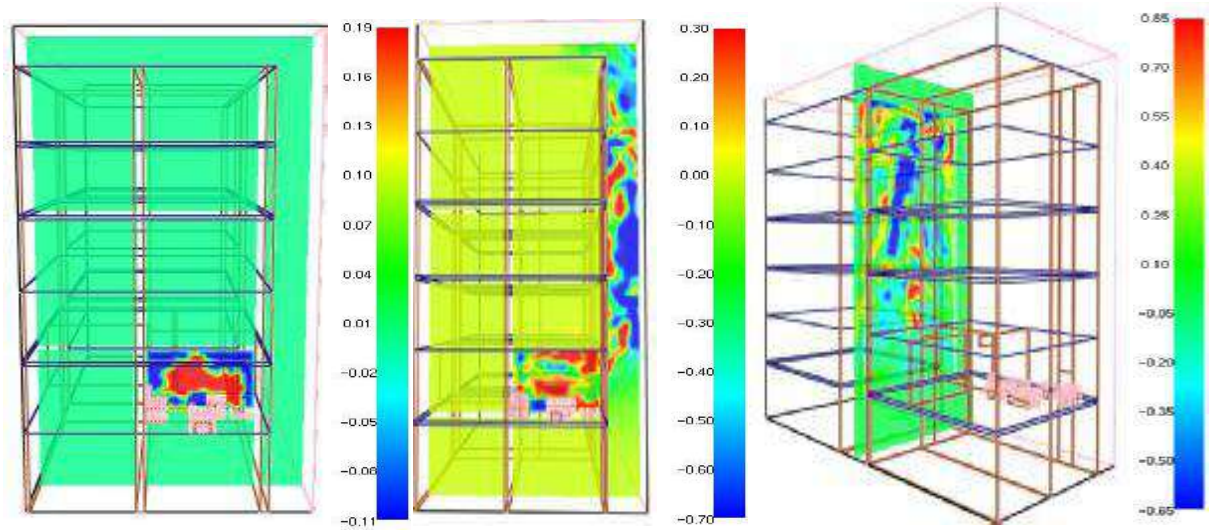
(f) :Vc=20m/s

Figure.5.17 : Champ de température selon les plans X=2.55m, X=11.9m

5.4.4. Champ de vitesse :

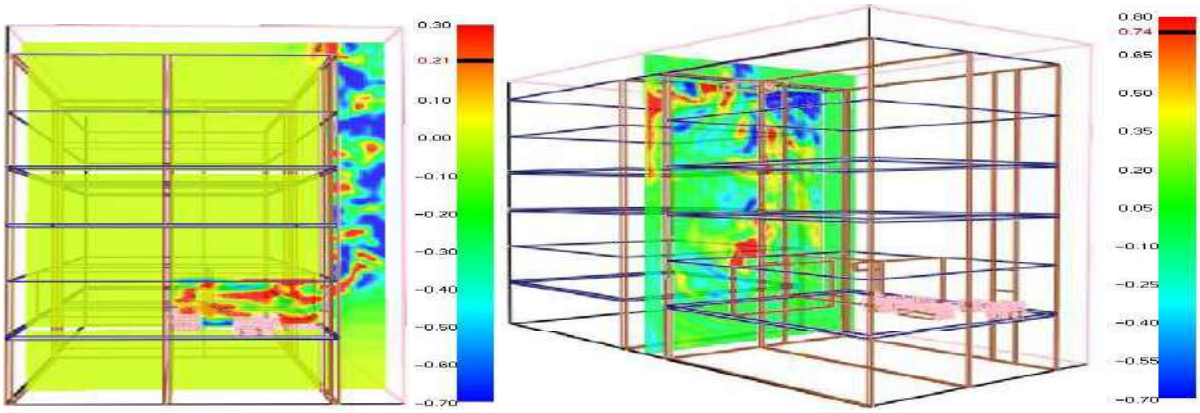
Pour bien appréheender le phénomène de déstratification, on a présenté la distribution de la vitesse après 120s de simulation pour les quatre régimes d'extraction (figure 5.18). La couleur bleue représente les vitesses des fumées dans le sens opposé (négatif). La couleur rouge représente les vitesses positives. On observe un retour de l'air chaud pour les vitesse d'extraction de 5 , 10m/s, et de la fumée pour les vitesses de 15, 20m/s. Pour la vitesse d'extraction de 20m/s, cette dernière est plus épaisse encore, mais elle est limitée en hauteur, figure5.18 (f). pour les deux vitesse 15, 20m/s, l'extraction est importante mais elle génère des perturbation des fumées.

X=2.55m **X=2.55m** **X=11.9m**



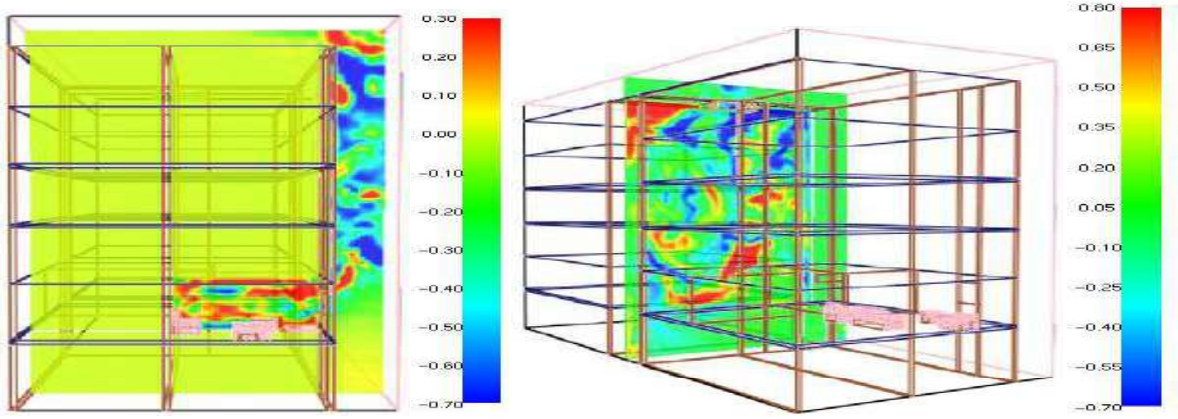
(a) :Vc=Vp **(b) :Vc=Vat**

X=2.55m **X=11.9m**



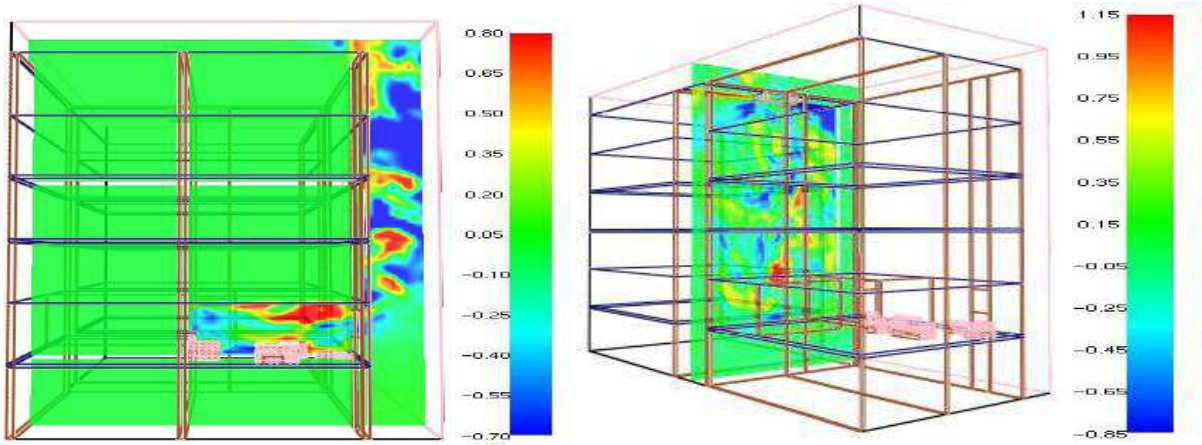
(c) :Vc=5m/s

X=2.55m **X=11.9**



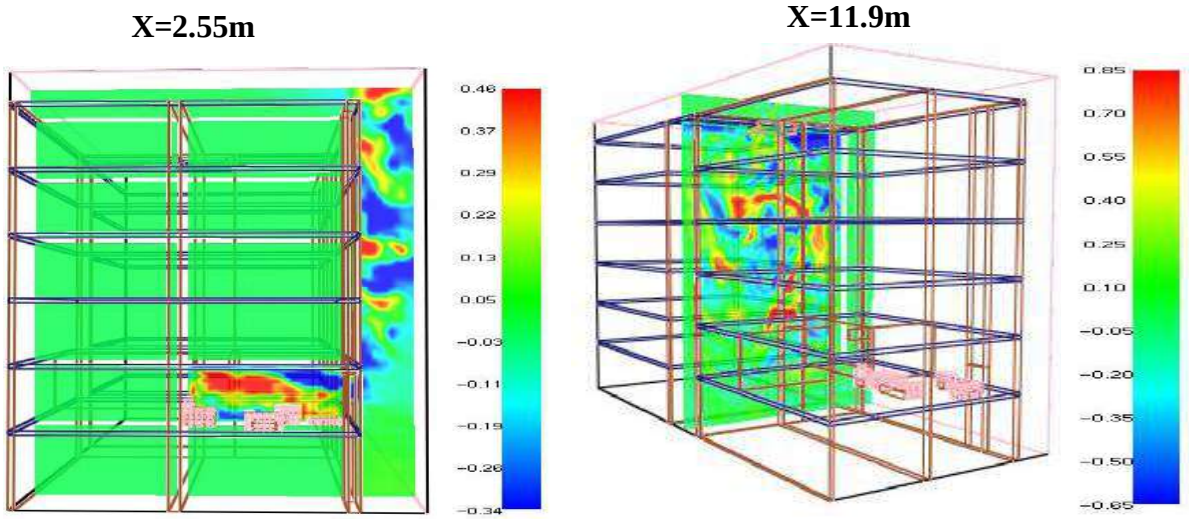
(d) :Vc=10m/s

X=2.55m **X=11.9m**



(e) :Vc=15m/s

X=2.55m **X=11.9m**

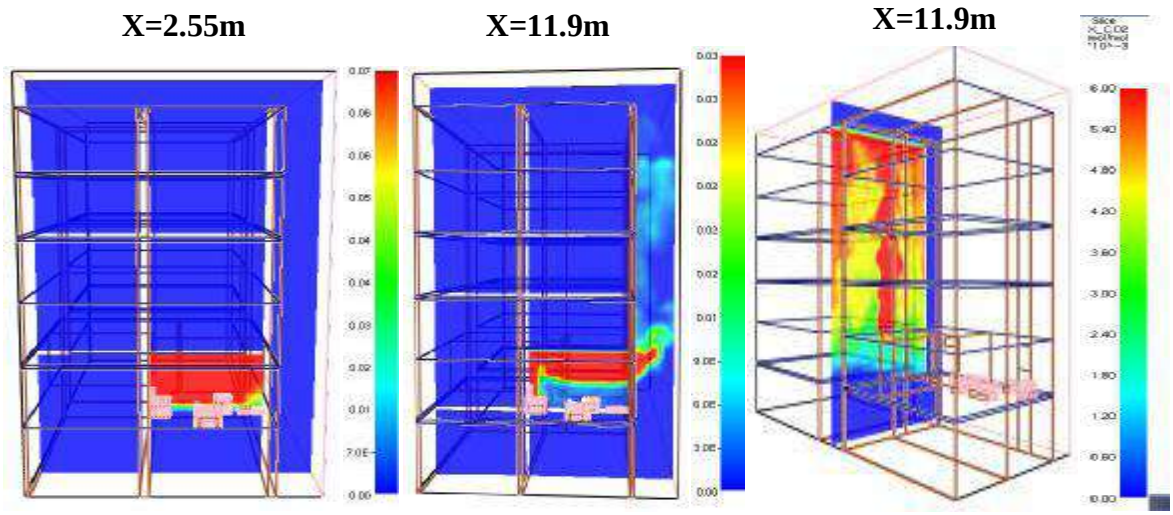


(f) :Vc=20m/s

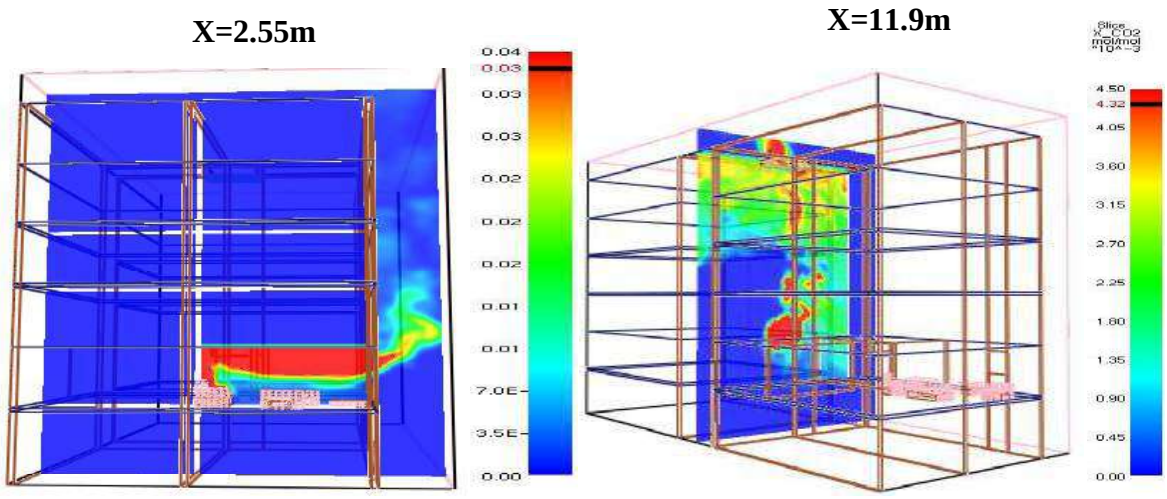
Figure.5.18 : Champ de vitesse selon les plans X=2.55m, X=11.9m

5.4.5. Champ de concentration de CO_2 :

La distribution de CO_2 est représentée dans la figure (5.19), pour les deux vitesse 5, 10m/s, on remarque que la concentration de CO_2 est très suportable pour les deux positions X=2.55m, X=11.9m. Tandis que dans les deux autre cas où V_C=15m/s, la concentration de CO_2 est un peu élevée comme conséquence de la déstratification des fumées.

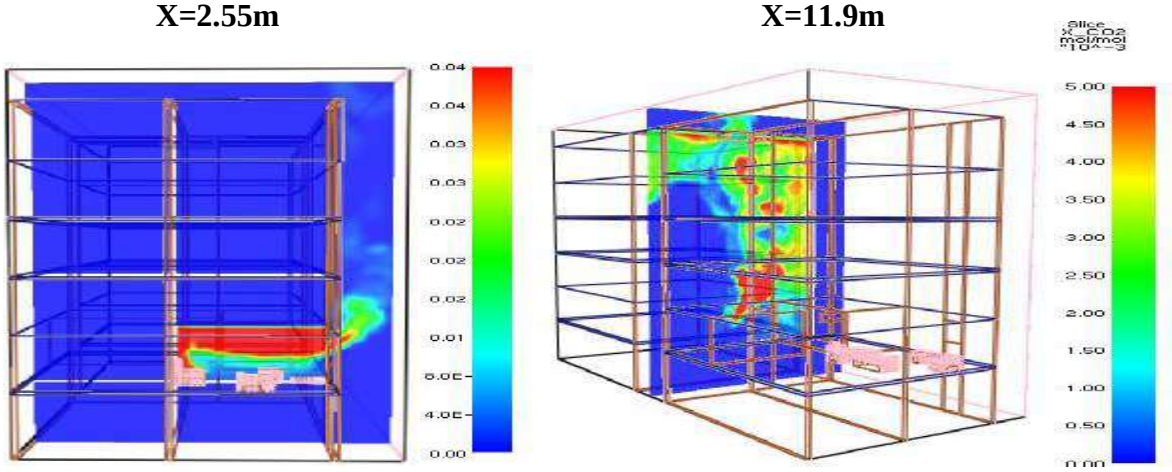


(a) :Vc=Vp **(b) :Vc=Vatm**



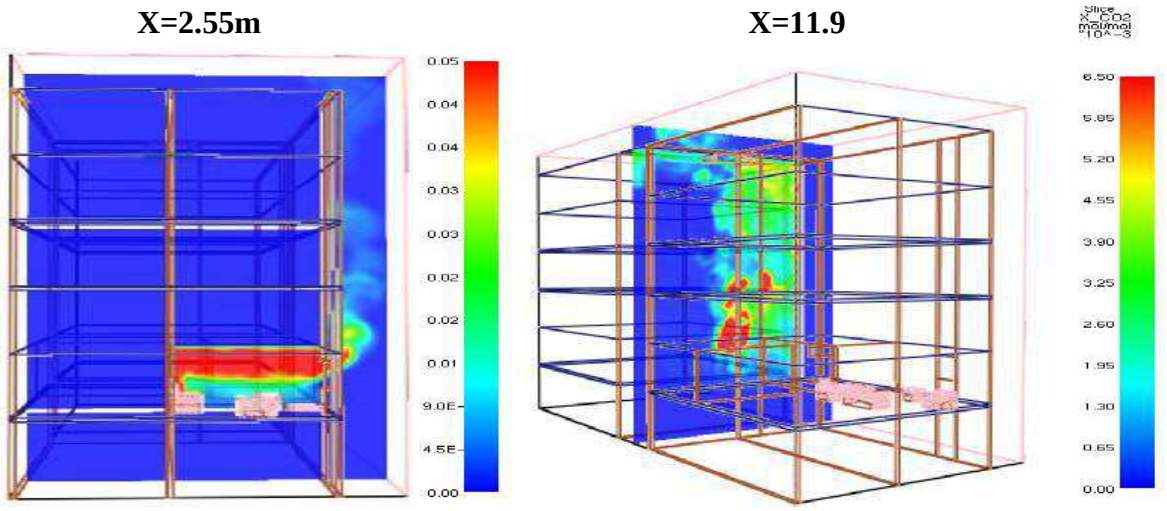
(c) :Vc=5m/s

X=2.55m **X=11.9m**



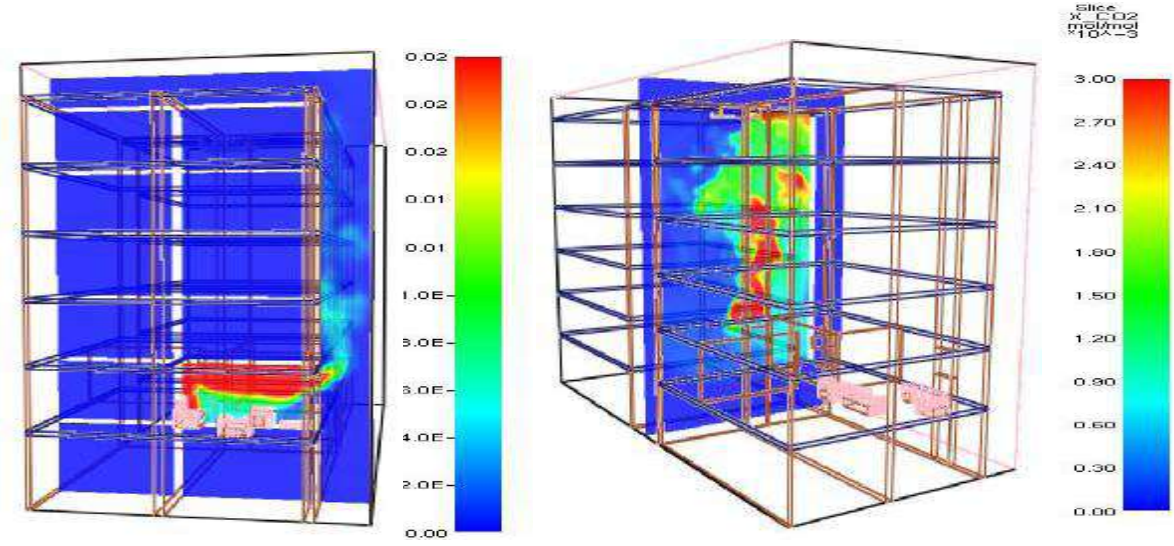
(d) :Vc=10m/s

X=2.55m **X=11.9**



(e) :Vc=15m/s

X=2.55m **X=11.9m**



(f) :Vc=20m/s

Figure.5.19 : Champ de concentration de CO_2 selon les plans X=2.55m,

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, on a présenté un ensemble d'études relatives à la dynamique des fumées dans des structures très courantes en génie civil en occurrence : les tunnels et les bâtiments.

Les résultats présentés visent 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 FDS (fire dynamic simulator). Outre l'étude des mouvements des fluides issus d'un feu en bâtiment, les travaux avaient aussi pour objectif d'évaluer les potentialités du code de calcul FDS pour analyser et optimiser un système de ventilation du bâtiment. Nous avons ensuite mené des simulations dans le but de caractériser l'écoulement de fumées où on a montré l'influence de la vitesse d'extraction de la fumée. Cette vitesse implique des conditions compatibles avec l'évacuation des personnes dans la période réglementaire et pour éviter le phénomène du Backdraft (explosion de fumées).

D'autre part, les premières simulations ont été effectuées pour étudier et comprendre aussi l'effet de la ventilation sur le comportement des fumées dans une configuration type tunnel. Deux système de ventilation ont été expérimentés :la ventilation longitudinal et la ventilation transversale. L'objectif était de montrer que l'outil de simulation utilisé (FDS) très pratique est valable dans le cas de la propagation des fumée.et d'évaluer la vitesse critique permettre d'extraie cette fumée.

Par ailleurs, on note que pour avoir des résultats plus réalistes, il est commode de prolonger le temps de simulation jusqu'à 15 min au minimums pour avoir les conséquences du feu avant l'arrivée effective du groupe d'intervention. Ceci posera certainement le problème de temps de calcul (très lent) et la taille de stockage des résultats.

Bibliographies

BIBLIOGRAPHIE

[1] M. HADJ NACER, Etude Numérique sur la Propagation des fumées et le désenfumage en cas d'un Incendie dans une station de Métro, PFE, ENP, Algérie, 2008.

[2] French National Instutute for Industriel Environment and Risks, Scénarios de propagation du feu à l'intérieur d'un bâtiment, INERIS 2010.

[3] F. CRETIN, A. CARRAU, Développement d'une méthodologie d'évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d'entrepôt, INERIS 2000

[4] C. Martel « ventilation et sécurité incendie d'une zone expérimentale », CERN 2007

[5] C. Abdellaoui, K. Ben Miloud « étude expérimentale sur la propagation des fumées dans une enceinte confinée avec recirculation d'air forcée ». PFE, ENP, Algérie, 2004

[6] A. OUAREM « étude sur maquette de la propagation des fumées d'incendie d'un locale « source » vers un locale « cible » ventilé mécaniquement », PFE, ENP, Algérie, 2005.

[7] Josian Ray « le mouvement des fumées », M. Science Chimie Journal, Janvier 2007.

[8] Préfecture de Police « Prévision des incendies d'immeubles » Compagne National de Prévision des Incendies Domestiques, France 2004.

[9] Ferdinand Schad KG « détecteur de fumée », SCHAKO Aération-Ventilation, 2007.

[10] Ministre d'Etat, ministre de l'intérieur et de la décentralisation et le ministre d'Etat, ministre des transports « Règles de sécurité applicables aux gares (G A), Arrêté du 20 février » Journal officiel - Algérie 1983.

[11] Kevin McGrattan, « Fire Dynamics Simulator (Version 5), User's Guide », National Institute of Standard Technology, 2010.

[12] Kevin McGrattan, « Fire Dynamics Simulator (Version 5), Technical Reference Guide», National Institute of Standard Technology, 2010.

[13] A.CHATELAIN, « Simulation des Grandes Echelles d'Ecoulements Turbulents avec Transferts de Chaleur », Thèse de Doctorat, INP Grenoble, France (2005).

[14] A. Leonard « Energy Cascade in Large Eddy Simulation of Turbulent Fluid Flows ». Geophysics, 18,237-248, Journal, SCHAKO (1974).

[15] A. Chabni. « Etude par méthodologie de type Simulation des Grosses Structures de la dynamique de l'interaction et des échanges entre une couche limite et une encoche», Thèse de Doctorat en Sciences de l'Université Paris XI, (1997).

[16] Anne Muller, Développement d'une méthode de modélisation pour l'évaluation de la performance de stratégies de sécurité incendie, Thèse de Doctorat l'université de Haute Alsace dans la discipline du génie des procédés décembre 2010.
[17] Glenn P, « Visualizing Fire Dynamics Simulator (Version 5), User's Guide », National Institute of Standard Technology, 2010.
[18] Glenn P, « Visualizing Fire Dynamics Simulator (Version 5), Technical Reference Guide», National Institute of Standard Technology, 2010.
[19] Eric GUILLAUME, Les outils de l'ingénirie de la sécurité incendie, Laboratoire national de métrologie et d'éssais (LNE), Paris, Septembre 2006.

Annexes

Annexes

Annexe A :Exemples d'un fichier input FDS5

1- Désenfumage dans un tunnel (scénario longitudinale)

```
&HEAD CHID='TUN_3',TITLE='Désenfumage longitudinal' /
&MESH IJK=200,16,25, XB=0.0,200.0,-5.0,5.0,0.0,5.0 /
&TIME Twfin=60.0 /
&MISC SURF_DEFAULT='CONCRETE SURFACE' /
&REAC ID        = 'HEPTANE'
     FYI       = 'Heptane,C_7 H_16'
     SOOT_YIELD = 0.015
     CO_YIELD   =0.006
     C         = 7
     H         = 16 /
&MATL ID                = 'CONCRETE'
     FYI               = 'Quintiere, fire behavior'
     SPECIFIC_HEAT        = 0.88
     CONDUCTIVITY         = 1.0
     DENSITY             = 2100.0 /
&SURF ID           = 'CONCRETE SURFACE'
     COLOR         = 'GRAY 60'
     MATL_ID       = 'CONCRETE'
     THICKNESS     = 0.1 /
&SURF ID='FIRE', HRRPUA=3750.0, COLOR='RED'/
&VENT XB=99.0,101.0,-1.0,1.0,0.0,0.0, SURF_ID='FIRE' / source de chaleur
&VENT XB=0.0,0.0,-5.0,5.0,0.0,5.0, COLOR='PINK', SURF_ID='OPEN' / 1er ouvereture
&VENT XB=200.0,200.0,-5.0,5.0,0.0,5.0, COLOR='PINK', SURF_ID='OPEN' / 2eme ouvereture
&SURF ID='BLOWER', VEL=-12.0,TMP_FRONT=20.0, COLOR='BLUE'/
&OBST XB= 0.0,2.0,-5.0,5.0,3.0,5.0, COLOR='MELON' / 1ere ventilateur
&VENT XB=2.0,2.0,-5.0,5.0,3.0,5.0, COLOR='AQUAMARINE', SURF_ID='BLOWER' / ouver
&SLCF PBX=80.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBX=90.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBX=95.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBX=98.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBX=99.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBX=100.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBX=110.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBZ=4.4, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBY=0.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
 / les thermocouple
&DEVC XYZ=90.0,0.0,0.0,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U90' /
&DEVC XYZ=90.0,0.0,1.0,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U90' /
&DEVC XYZ=90.0,0.0,2.0,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U90' /
&DEVC XYZ=90.0,0.0,3.0,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U90' /
&DEVC XYZ=90.0,0.0,4.0,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U90' /
&DEVC XYZ=90.0,0.0,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U90' /
&DEVC XYZ=90.0,0.0,5.0,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U90' /

&DEVC XYZ=95.0,0.0,0.0,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U95' /
&DEVC XYZ=95.0,0.0,1.0,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U95' /
&DEVC XYZ=95.0,0.0,2.0,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U95' /
&DEVC XYZ=95.0,0.0,3.0,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U95' /
&DEVC XYZ=95.0,0.0,4.0,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U95' /
```

```
&DEVC XYZ=95.0,0.0,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U95' /
&DEVC XYZ=95.0,0.0,5.0,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U95' /
&DEVC XYZ=100.0,0.0,0.0,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U100' /
&DEVC XYZ=100.0,0.0,1.0,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U100' /
&DEVC XYZ=100.0,0.0,2.0,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U100' /
&DEVC XYZ=100.0,0.0,3.0,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U100' /
&DEVC XYZ=100.0,0.0,4.0,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U100' /
&DEVC XYZ=100.0,0.0,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U100' /
&DEVC XYZ=100.0,0.0,5.0,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U100' /
&BNDF QUANTITY='GAUGE HEAT FLUX' / FLUX DE CHALEUR MESURE
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/ TEMPÉRATURE DES MURS
&BNDF QUANTITY='BURNING RATE'   /  Perte de masse par unité
&TAIL / fin
```

Annexe B :Exemples d'un fichier input FDS5

2- Désenfumage dans un tunnel (scénario transversale)

```
&HEAD CHID='TUN_4',TITLE='Désenfumage transversal' /
&MESH IJK=200,16,25, XB=-100.0,100.0,-5.0,5.0,0.0,5.0 /
&TIME Twfin=120.0 /
&MISC SURF_DEFAULT='CONCRETE SURFACE' /
&REAC ID        = 'HEPTANE'
    FYI       = 'Heptane,C_7 H_16'
    SOOT_YIELD = 0.015
    CO_YIELD   =0.006
    C         = 7.0
    H         = 16.0 /
&MATL ID                = 'CONCRETE'
    FYI               = 'Quintiere, fire behavior'
    SPECIFIC_HEAT        = 0.88
    CONDUCTIVITY         = 1.0
    DENSITY             = 2100.0 /
&SURF ID           = 'CONCRETE SURFACE'
    COLOR         = 'GRAY 60'
    MATL_ID       = 'CONCRETE'
    THICKNESS     = 0.1 /
&SURF ID='FIRE', HRRPUA=4500., COLOR='RED'/
&VENT XB=-1.0,1.0,-1.0,1.0,0.0,0.0, SURF_ID='FIRE' / source de chaleur
&VENT XB=-100.0,-100.0,-5.0,5.0,0.0,5.0, COLOR='PINK', SURF_ID='OPEN' / 1er ouvereture
&VENT XB=100.0,100.0,-5.0,5.0,0.0,5.0, COLOR='PINK', SURF_ID='OPEN' / 2eme ouvereture
&SURF ID='SUCK', VEL=40,TMP_FRONT=20.0, COLOR='BLUE'/ ventilation transversale
&VENT XB= -31.0,-29.0,-1.0,1.0,5.0,5.0, COLOR='AQUAMARINE',SURF_ID='SUCK' / 1ere ventilateur
&VENT XB=29.0,31.0,-1.0,1.0,5.0,5.0, COLOR='AQUAMARINE', SURF_ID='SUCK' / 2eme ventilateur
&SLCF PBX=40.0, QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBX=30.0, QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBX=20.0, QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBX=10.0, QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBX=5.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBY=0.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBZ=4.4, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBZ=5.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
 / les thermocouple
&DEVC XYZ=0.0,0.0,4.4,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=5.0,0.0,4.4,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=10.0,0.0,4.4,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=15.0,0.0,4.4,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=20.0,0.0,4.4,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=25.0,0.0,4.4,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=30.0,0.0,4.4,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=35.0,0.0,4.4,QUANTITY='TEMPERATURE' /
```

```
&DEVC XYZ=40.0,0.0,4.4,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=45.0,0.0,4.4,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=50.0,0.0,4.4,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=55.0,0.0,4.4,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=60.0,0.0,4.4,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=65.0,0.0,4.4,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=70.0,0.0,4.4,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=75.0,0.0,4.4,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=80.0,0.0,4.4,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=85.0,0.0,4.4,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=90.0,0.0,4.4,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=95.0,0.0,4.4,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=100.0,0.0,4.4,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=0.0,0.0,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U00' /
&DEVC XYZ=5.0,0.0,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U05' /
&DEVC XYZ=10.0,0.0,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U10' /
&DEVC XYZ=15.0,0.0,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U15' /
&DEVC XYZ=20.0,0.0,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U20' /
&DEVC XYZ=25.0,0.0,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U25' /
&DEVC XYZ=30.0,0.0,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U30' /
&DEVC XYZ=35.0,0.0,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U35' /
&DEVC XYZ=40.0,0.0,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U40' /
&DEVC XYZ=45.0,0.0,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U45' /
&DEVC XYZ=50.0,0.0,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U50' /
&DEVC XYZ=55.0,0.0,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U55' /
&DEVC XYZ=60.0,0.0,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U60' /
&DEVC XYZ=65.0,0.0,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U65' /
&DEVC XYZ=70.0,0.0,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U70' /
&DEVC XYZ=75.0,0.0,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U75' /
&DEVC XYZ=80.0,0.0,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U80' /
&DEVC XYZ=85.0,0.0,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U85' /
&DEVC XYZ=90.0,0.0,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U90' /
&DEVC XYZ=95.0,0.0,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U95' /
&DEVC XYZ=100.0,0.0,4.4,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U100' /
&BNDF QUANTITY='GAUGE HEAT FLUX' / FLUX DE CHALEUR MESURE
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE' /TEMP  RATURE DES MURS
&BNDF QUANTITY='BURNING_RATE' / Perte de masse par unité
&TAIL / fin
```

Annexe C :Exemples d'un fichier input FDS5

3. Désenfumage dans un dans un btiment

```
&HEAD CHID='BAT5', TITLE='Essai Du Feu dans un bâtiment' /
&MESH IJK=140,70,100, XB=0.0,23.8,-2.0,9.2,0.0,20.0 /
&TIME T_END=120.0 /
&MISC SURF_DEFAULT='WALL' /
&VENT XB=0.0,23.8,-2.0,-2.0,0.0,20.0, COLOR='PINK', SURF_ID='OPEN' /
&VENT XB=0.0,23.8,-2.0,11.2,20.0,20.0, COLOR='PINK', SURF_ID='OPEN' /
&REAC ID        = 'POLYURETHANE'
    FYI       = 'C_6.3 H_7.1 N O_2.1, NFPA Handbook, Babrauskas'
    SOOT_YIELD = 0.10
    N         = 1.0
    C         = 6.3
    H         = 7.1
    O         = 2.1  /
&SURF ID='BURNER', HRRPUA=4000., COLOR='VIOLET RED'/ BRŮLEUR
&MATL ID                = 'FABRIC'
    FYI               = 'Properties completely fabricated'
```

```
    SPECIFIC_HEAT        = 1.0
    CONDUCTIVITY         = 0.1
    DENSITY              = 100.0
    N_REACTIONS          = 1
    NU_FUEL              = 1.
    REFERENCE_TEMPERATURE = 350.
    HEAT_OF_REACTION     = 3000.
    HEAT_OF_COMBUSTION   = 15000. /TISSU
&MATL ID                 = 'FOAM'
    FYI                  = 'Properties completely fabricated'
    SPECIFIC_HEAT        = 1.0
    CONDUCTIVITY         = 0.05
    DENSITY              = 40.0
    N_REACTIONS          = 1
    NU_FUEL              = 1.
    REFERENCE_TEMPERATURE = 350.
    HEAT_OF_REACTION     = 1500.
    HEAT_OF_COMBUSTION   = 30000. /MOUSSE
&MATL ID          = 'GYPSUM PLASTER'
    FYI           = 'Quintiere, Fire Behavior'
    CONDUCTIVITY  = 0.48
    SPECIFIC_HEAT = 0.84
    DENSITY       = 1440. /PLÂTRE DE GYPSE
&MATL ID                 = 'CARPET PILE'
    FYI                  = 'Completely made up'
    CONDUCTIVITY         = 0.16
    SPECIFIC_HEAT        = 2.0
    DENSITY              = 750.
    N_REACTIONS          = 1
    NU_FUEL              = 1.
    REFERENCE_TEMPERATURE = 290.
    HEAT_OF_COMBUSTION   = 22300.
    HEAT_OF_REACTION     = 2000. /PILE DE TAPIS
&SURF ID          = 'UPHOLSTERY'
    BURN_AWAY     = .TRUE.
    COLOR         = 'PINK'
    MATL_ID(1:2,1) = 'FABRIC','FOAM'
    THICKNESS(1:2) = 0.002,0.1 /  TAPISSERIE D'AMEUBLEMENT
&SURF ID          = 'WALL'
    RGB           = 160,82,45
    MATL_ID       = 'GYPSUM PLASTER'
   THICKNESS      = 0.012 /MUR
SURF ID           = 'CARPET'
    MATL_ID       = 'CARPET PILE'
    COLOR         = 'MIDNIGHT BLUE'
    BACKING       = 'INSULATED'
    THICKNESS     = 0.006 /TAPIS
&SURF ID    = 'CONCRETE SURFACE'
COLOR       ='SEA GREEN'/
&OBST XB=0.00,10.4,-0.20,9.2,3.40,3.50, SURF_ID='CARPET'/ dalle_GR
&OBST XB=0.00,10.4,-0.20,9.2,6.40,6.50, SURF_ID='CARPET'/ dalle_GL1
&OBST XB=0.00,10.4,-0.20,9.2,9.40,9.50, SURF_ID='CARPET'/ dalle_GL2
&OBST XB=0.00,10.4,-0.20,9.2,12.40,12.50, SURF_ID='CARPET'/ dalle_GL3
&OBST XB=0.00,10.4,-0.20,9.2,15.40,15.50, SURF_ID='CARPET'/ dalle_GL4
&OBST XB=13.4,23.8,-0.20,9.2,3.40,3.50, SURF_ID='CARPET'/ dalle_DR
&OBST XB=13.4,23.8,-0.20,9.2,6.40,6.50, SURF_ID='CARPET'/ dalle_DL1
&OBST XB=13.4,23.8,-0.20,9.2,9.40,9.50, SURF_ID='CARPET'/ dalle_DL2
&OBST XB=13.4,23.8,-0.20,9.2,12.40,12.50, SURF_ID='CARPET'/ dalle_DL3
&OBST XB=13.4,23.8,-0.20,9.2,15.40,15.50, SURF_ID='CARPET'/ dalle_DL4
&OBST XB=0.00,23.8,-0.20,9.2,18.40,18.50, SURF_ID='CARPET'/ dalle_Tirasse
```

```
&OBST XB= 0.00, 23.8, -0.20, 0.00, 0.00, 18.5,SURF_ID= 'WALL'/  Mur_1 avant bâtiment
&OBST XB= 5.10, 10.4, 3.30, 3.50, 3.50, 6.50,SURF_ID= 'WALL'/  Mur_2 avant bâtiment
&OBST XB= 0.00, 10.4, 4.60, 4.80, 0.00, 18.5,SURF_ID= 'WALL'/  Mur_3 avant bâtiment
&OBST XB= 0.00, 10.4, 9.0, 9.2, 0.00, 18.5,SURF_ID= 'WALL'/  Mur_4 avant bâtiment
&OBST XB= 5.10, 5.30, -0.20, 4.6, 3.50, 6.50,SURF_ID= 'WALL'/  Mur_1 gauche
&OBST XB= 6.30, 6.50, 4.60, 9.20, 3.50, 6.50,SURF_ID= 'WALL'/  Mur_2 gauche
&OBST XB= 10.40, 10.60, -0.20, 9.2, 0.00, 18.5,SURF_ID= 'WALL'/  Mur_3 gauche
&HOLE XB= 5.10, 5.30, 3.40, 4.60,3.50, 6.00/ Porte PG1
&HOLE XB= 10.40, 10.60, 3.40, 4.60,3.50, 6.00/ Porte PGL
&OBST XB= 13.20, 13.60, -0.20, 9.2, 0.00, 18.5,SURF_ID= 'WALL'/  Mur_1 droit
&HOLE XB= 10.60, 13.20, -0.20, 0.0, 0.00, 3.00/ Porte Avant bâtiment
&HOLE XB= 1.70, 2.70, -0.20, 0.00, 4.50, 5.90  /fenetre 1
**************************les bien d'un Pièce '*******************
&OBST XB= 1.50, 3.10, 3.80, 4.60, 3.50, 3.90                /coussins_1
&OBST XB= 1.50, 3.10, 3.80, 4.60, 3.90, 4.10, SURF_ID='UPHOLSTERY' /
&OBST XB= 1.30, 1.50, 3.80, 4.60, 3.50, 4.40, SURF_ID='UPHOLSTERY' /
&OBST XB= 3.10, 3.30, 3.80, 4.60, 3.50, 4.40, SURF_ID='UPHOLSTERY' /
&OBST XB= 1.50, 3.10, 4.40, 4.60, 4.10, 4.70, SURF_ID='UPHOLSTERY' /
&VENT XB= 2.50, 2.70, 4.30, 4.50, 4.10, 4.10, SURF_ID='BURNER' / Source d'allumage
&OBST XB= 4.00, 4.60, 3.80, 4.60, 3.50, 3.90                /coussins_2
&OBST XB= 4.00, 4.60, 3.80, 4.60, 3.90, 4.10, SURF_ID='UPHOLSTERY' /
&OBST XB= 3.80, 4.00, 3.80, 4.60, 3.50, 4.40, SURF_ID='UPHOLSTERY' /
&OBST XB= 4.60, 4.80, 3.80, 4.60, 3.50, 4.40, SURF_ID='UPHOLSTERY' /
&OBST XB= 4.00, 4.60, 4.40, 4.60, 4.10, 4.70, SURF_ID='UPHOLSTERY' /
&OBST XB= 0.00, 0.80, 2.00, 2.60, 3.50, 3.90                /Chaise_1
&OBST XB= 0.00, 0.80, 2.00, 2.60, 3.90, 4.10, SURF_ID='UPHOLSTERY' /
&OBST XB= 0.00, 0.80, 1.80, 2.00, 3.50, 4.40, SURF_ID='UPHOLSTERY' /
&OBST XB= 0.00, 0.80, 2.60, 2.80, 3.50, 4.40, SURF_ID='UPHOLSTERY' /
&OBST XB= 0.00, 0.20, 2.00, 2.60, 3.50, 4.40, SURF_ID='UPHOLSTERY' /

&OBST XB= 2.00, 2.40, 1.60, 2.00, 3.50, 3.90                /Chaise_2
&OBST XB= 2.00, 2.40, 1.60, 2.00, 3.90, 4.10, SURF_ID='UPHOLSTERY' /
&OBST XB= 1.80, 2.00, 1.60, 2.00, 3.50, 4.30, SURF_ID='UPHOLSTERY' /
&OBST XB= 2.40, 2.60, 1.60, 2.00, 3.50, 4.30, SURF_ID='UPHOLSTERY' /
&OBST XB= 1.80, 2.60, 1.40, 1.60, 3.50, 4.30, SURF_ID='UPHOLSTERY' /
&OBST XB= 1.80, 3.80, 0.00, 1.00, 3.50, 3.70, SURF_ID='UPHOLSTERY' / Matella
*****************************************************************************
&SURF ID='BLOWER', VEL=15.0,TMP_FRONT=25.0, COLOR='BLUE'/
&OBST XB= 10.9,12.9,3.6,5.6,18.0,18.5,COLOR='MELON' / Ventilateur
&VENT XB= 10.9,12.9,3.6,5.6,18.0,18.0, COLOR='AQUAMARINE', SURF_ID='BLOWER' / ouver
&HOLE XB= 11.00, 12.80,3.70,5.50,18.0,18.5 /trappe
*****************************sumulation domandée*************************************
&SLCF PBX=2.60, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX=4.45, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX=11.9, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBY=-1.0, QUANTITY='TEMPERATURE'/
*********************************************************************
&SLCF PBX=2.60, QUANTITY='HRRPUV' /Taux de rejets de la chaleur par volume unitaire
&SLCF PBX=4.45, QUANTITY='HRRPUV' /
&SLCF PBX=11.9, QUANTITY='HRRPUV' /
&SLCF PBY=-1.0, QUANTITY='HRRPUV' /
*****************************************************************************************
&SLCF PBX=2.60, QUANTITY='MIXTURE FRACTION' / FRACTION DE MÉLANGE
&SLCF PBX=4.45, QUANTITY='MIXTURE FRACTION' /
&SLCF PBX=11.9, QUANTITY='MIXTURE FRACTION' /
&SLCF PBY=-1.0, QUANTITY='MIXTURE FRACTION' /
*****************************************************************************************
&SLCF PBX=2.60, QUANTITY='U-VELOCITY' / vitesse
&SLCF PBX=4.45, QUANTITY='U-VELOCITY' /
```

```
&SLCF PBX=11.9, QUANTITY='U-VELOCITY' /
&SLCF PBY=-1.0, QUANTITY='U-VELOCITY' /
********************************** carbon dioxide ***** **************
&SLCF PBX=2.60, QUANTITY='carbon dioxide' /
&SLCF PBX=4.45, QUANTITY='carbon dioxide' /
&SLCF PBX=11.9, QUANTITY='carbon dioxide' /
&SLCF PBY=-1.0, QUANTITY='carbon dioxide' /
************les thermocouple température************************************
&DEVC XYZ=2.6,4.45,4.10, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=2.6,4.45,5.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=2.6,4.45,6.30, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=11.9,4.6,0.0,  QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=11.9,4.6,4.0,  QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=11.9,4.6,7.0,  QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=11.9,4.6,10.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=11.9,4.6,13.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=11.9,4.6,16.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=11.9,4.6,18.5, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=11.9,4.6,19.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /
************************************les thermocouple vitesse**********************
&DEVC XYZ=2.6,4.45,4.10,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='UP0' /
&DEVC XYZ=11.9,4.6,0.0, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U00' /
&DEVC XYZ=11.9,4.6,4.0, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U01' /
&DEVC XYZ=11.9,4.6,7.0, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U02' /
&DEVC XYZ=11.9,4.6,10.0,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U03' /
&DEVC XYZ=11.9,4.6,13.0,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U04' /
&DEVC XYZ=11.9,4.6,16.0,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U05' /
&DEVC XYZ=11.9,4.6,18.5,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U06' /
&DEVC XYZ=11.9,4.6,19.0,QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U06' /
************************les thermocouple carbon dioxide**************
&DEVC XYZ=2.6,4.45,4.10,QUANTITY='carbon dioxide', ID='co2P0'/
&DEVC XYZ=2.6,4.45,5.0 ,QUANTITY= 'carbon dioxide', ID='co22P1'/
&DEVC XYZ=2.6,4.45,6.30,QUANTITY= 'carbon dioxide', ID='co2P2'/
&DEVC XYZ=11.9,4.6,0.0 ,QUANTITY= 'carbon dioxide', ID='co20' /
&DEVC XYZ=11.9,4.6,4.0 ,QUANTITY= 'carbon dioxide', ID='co21' /
&DEVC XYZ=11.9,4.6,7.0 ,QUANTITY= 'carbon dioxide', ID='co22' /
&DEVC XYZ=11.9,4.6,10.0,QUANTITY= 'carbon dioxide', ID='co23' /
&DEVC XYZ=11.9,4.6,13.0,QUANTITY= 'carbon dioxide', ID='co24' /
&DEVC XYZ=11.9,4.6,16.0,QUANTITY= 'carbon dioxide', ID='co25' /
&DEVC XYZ=11.9,4.6,18.5,QUANTITY= 'carbon dioxide', ID='co26' /
&DEVC XYZ=11.9,4.6,19.0,QUANTITY= 'carbon dioxide', ID='CO27' /
&DEVC XYZ=2.6,2.3,3.5, QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX', IOR=3 /
&DEVC XYZ=2.6,4.4,4.1, QUANTITY='HRRPUV' /
************************************************************************************************
&BNDF QUANTITY='GAUGE HEAT FLUX' / FLUX DE CHALEUR MESURE
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE' /TEMP  RATURE DES MURS
&BNDF QUANTITY='BURNING RATE' / Perte de masse par unité
************************************************************************************************
&TAIL /
```