

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

Mémoire de Magister

En Génie Mécanique

Option : Énergétique

Présenté par : DOKKAR Abdelghani

Thème

Etude numérique de l'optimisation de l'angle de calage du ventilateur d'extraction de fumée dans un système de ventilation longitudinal de tunnel

Membres du jury :

Président :	Mr Salah LARBI	Prof, ENP
Rapporteur :	Mr Bouzid BENKOUSSAS	MC (A), ENP
Examineur :	Mr Amor BOUHDJAR	DR, CDER
Examineur :	Mr Abdelhalim BENTEBBICHE	Prof, USTHB

Année 2014

ملخص:

نظام التهوية الطولية هو خيار مهم لتهوية أنفاق الطريق الطويلة، هذا النظام يقلل من مخاطر غازات العادم الملوثة. وعلاوة على ذلك، يستخدم هذا النظام أيضا في الحالات الطارئة لإزالة الدخان من الأنفاق. المروحة هي العنصر الرئيسي في أي نظام تهوية طولية. تعمل المروحة على تسريع حركة كمية الهواء التي يتم إعادة حقنها في هواء النفق من أجل خلق تدفق طولي بسرعة معينة. يتم تثبيت المراوح أفقيا على مسافة معينة من السقف. المروحة القريبة من السقف تولد إجهاد قص و تعكر التدفق في النفق، وبالتالي يمكن اعتبار مسافة المروحة بالنسبة للسقف عاملا حاسما. للحد من المعوقات وتحسين كفاءة نظام التهوية، يمكن استخدام مروحة مائلة نحو الأرض بزاوية معينة. نقوم بتحديد أداء أنظمة التهوية بالمراوح الأفقية على مسافات مختلفة من السقف وكذلك بالمراوح المائلة رقميا باستخدام برنامج كمبيوتر FDS. يتم الحصول على الموقع الأمثل للمروحة في كلتا الحالتين. و يستخدم الحد الأدنى من إجهاد القص وشروط أقصى دفع للمروحة لتحديد هذا الموقع الأمثل. و قد أظهرت نتائج الحالتين أنه من الضروري الجمع بين تحسين موضع المروحة و دراسة سلوك الأدخنة أثناء إجلائهم للوصول الى أحسن موضع للمروحة .

الكلمات المفتاحية: مروحة, زاوية ميلان, تهوية طولية, حريق, أدخنة.

Résumé

Le système de ventilation longitudinale est un choix majeur pour les longs tunnels routiers. Il minimise le risque des gaz d'échappements. Ce système est également utilisé en cas d'urgence pour évacuer les fumées dans les tunnels. Les ventilateurs sont l'élément clé de tous les systèmes de ventilation. Ils accélèrent une quantité de flux d'air qui est réinjectée dans l'environnement du tunnel, afin de créer un écoulement longitudinal à une certaine vitesse. Les extracteurs sont installés horizontalement à une certaine distance du plafond. Le jet en contact avec la paroi du plafond génère une contrainte de cisaillement et perturbe l'écoulement dans le tunnel, par conséquent, la position de l'extracteur par rapport au plafond peut être considérée comme un facteur déterminant. Pour réduire la contrainte de cisaillement et améliorer l'efficacité du système de ventilation, des extracteurs inclinés avec un angle donné par rapport au sol du tunnel sont utilisés. Les performances des systèmes de ventilation avec les extracteurs horizontaux pour différentes distances du plafond, ainsi que des systèmes avec extracteurs inclinés sont déterminées numériquement par l'utilisation du code FDS. L'emplacement optimal des extracteurs dans les deux cas est déterminé. La contrainte de cisaillement minimum et les conditions maximales de poussée sont utilisées pour identifier la position critique des extracteurs. Les résultats pour les deux cas ont montré qu'il est nécessaire de coupler l'optimisation de la position de l'extracteur avec le comportement de la fumée au cours de leur évacuation pour définir une configuration plus critique.

Mots clés: Extracteur, angle d'inclinaison, ventilation longitudinale, feu, fumés.

Abstract

The longitudinal ventilation system is a major choice for long road tunnels in common ventilation. It minimizes the risk of exhaust gases. Moreover, this system is also utilized in emergency cases to remove smoke from tunnels. Jet fans are the key element of any ventilation systems. They set in motion a quantity of air flowing which is re-injected into the environment of the tunnel in order to create a longitudinal flow at some velocity. The extractors are installed horizontally at a certain distance from the ceiling. The jet, once in contact with the wall of the ceiling generates a shear stress and disturb the flow in the tunnel, therefore, the position of the extractors with respect to the ceiling can be considered as a determining factor. To reduce the constraint and to improve the efficiency of the ventilation system, tilted extractors towards the tunnel floor with a given angle are used. The performances of ventilation systems with extractors in the horizontal location at different distances from the ceiling as well as systems with tilted extractors are determined numerically using FDS computer software. The optimal location of the extractors in both cases is obtained. The minimum shear stress and maximum thrust conditions are used to identify the critical position of extractors. The results for the two cases have shown that it is necessary to couple the optimization of the position of the extractor with the behavior of the smoke during their evacuation in order to define a more critical configuration.

Key words: jet fan, inclination angle, longitudinal ventilation, fire, smoke.

Dédicace

Je tiens à dédier ce modeste travail :

*Avant tout à mon très cher père, l'homme qui donné le désir
d'apprendre et le savoir vivre.*

A ma mère, ma fierté et mon bonheur.

A mes frères

A mes sœurs.

A mes collègues

A tous mes amis

ET a tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à accomplir ce travail.

Dokkar Abdelgani

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier notre DIEU, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à mon promoteur Dr Bouzid BENKOUSSAS pour m'avoir diligenté tout au long de ce travail, pour sa compréhension, sa patience, sa compétence et ses remarques qui m'ont été précieuses,

Je présente mes chaleureux remerciements aux enseignants du département de Génie Mécanique qui ont participé à ma formation tout au long de cette période.

Merci aux membres du jury, Prof Salah LARBI, Dr Amor BOUHDJAR, et Prof Abdelhalim BENTEBBICHE d'avoir pris le temps et le soin de lire ce rapport.

Je remercie ma famille, mes amis et mes collègues pour leurs encouragements et leur soutien.

Mes derniers remerciements et pas les moindres vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Nomenclature

Lettres latines

A	Section [m ²]
D _i	Coefficient de diffusion de l'élément i [s ⁻¹]
<i>f</i>	Vecteur de forces extérieures [N]
F	Force de poussée [N]
FR	Facteur de performance [-]
g	Gravité [m/s ²]
h	Enthalpie [kj/kg]
H	Hauteur des points de mesure [m]
H ₁	Hauteur utile dans le tunnel [m]
k	Energie cinétique turbulente [Joules]
M	Masse molaire [kg/mol]
N	Nombre de particule [-]
p	Pression [Pa]
<i>q'''</i>	Taux de dégagement de chaleur par unité de surface [w/m ²]
Q	Débit volumique [m ³ /s]
R	Constante des gaz parfait [j/mole.K]
t	Temps [s]
T	Température [K]
u	Vitesse [m/s]
V	Volume [m ³]
<i>V_{jet}</i>	Vitesse de jet [m/s]
X _{CO}	Concentration en CO [mol/mol]
X _{CO2}	Concentration en CO2 [mol/mol]
Y _i	Fonction massique de l'élément i [-]
Z _p	Position de ventilateur par rapport au plafond [m]

Lettres grecques

α	Angle d'inclinaison [°]
λ	Conductivité thermique [w/m.K]
μ	Viscosité dynamique [Pa.s]

ρ	Masse volumique [kg/m ³]
τ_{ij}	Composantes du tenseur de contraintes [N/m ²]
Φ	Fonction de dissipation [-]

Indices

CO ₂	Dioxyde de Carbone
CO	Monoxyde de Carbone
O ₂	Oxygène
CH ₃ OH	Méthanol

SOMMAIRE

Introduction.....	1
Chapitre 1 : Description générale de la ventilation des tunnels.....	3
1. Enjeux de la ventilation.....	3
1.1.1. Rôles de la ventilation dans un tunnel.....	3
1.1.2 Types de ventilation en tunnel	3
1.1.3. Emplacement des équipements de ventilation	5
1.2. Désenfumage en cas d’incendie	8
1.2.1. Incendie en tunnel	8
1.2.2. Notions sur le comportement des fumées	10
1.2.3. Stratégies de désenfumage	12
Chapitre 2 : Revue bibliographique	17
2.1. Bari et Naser	17
2.2. Bailfy et al.....	18
2.3. Carvel	19
2.4. Giesen et al.....	20
2.5. Hitoshi et al	20
2.6. Karim et al.....	20
2.7. M. Galdo Vega.....	20
2.8. Jojo et al.....	21
2.9. F Wang et al.....	22
2.10. K.C. Karki et al.....	22
Chapitre 3 : Simulation numérique	24
3.1. Description de l’outil numérique FDS	24
3.2. Modèles présents dans FDS	25
3.3. Modélisation de la turbulence	27

3.4. Domaine de calcul sur FDS.....	28
3.5. Maillage sur FDS	30
3.6. Problématique.....	30
3.7. Domaine de calcul de cette étude.....	32
3.8. Conditions initiales et aux limites	33
3.9. Choix de maillage.....	33
3.10. Temps de simulation	34
3.11. Validation de calcul.....	35

Chapitre 4 : Résultats et interprétation37

4.1. Cas 1: Extracteur horizontal (angle de calage $\alpha= 0^\circ$, Z_p différent).....	37
4.1.1 Evolution de la vitesse axiale en fonction de la position de ventilateur	37
4.1.2. Champs de vitesse et de la contrainte de cisaillement pour les différentes positions	40
4.1.3. Performances de la position d'extracteur	42
4.2. Cas 2: Extracteur incliné avec différents angles de calage.....	43
4.2.1. Evolution de la vitesse axiale en fonction de l'angle de calage	44
4.2.2. Champs de vitesse et contrainte de cisaillement pour les différentes inclinaisons	46
4.2.3 Performances de la ventilation avec l'inclinaison du ventilateur.....	49
4.3. Optimisation de la position de l'extracteur dans le cas de l'existence d'un incendie dans le tunnel	49
4.3.1. Cas d'incendie d'une voiture (HRR=10MW) positionné après le jet	49
4.3.2. Cas d'incendie d'une voiture (HRR=100MW) positionné après le jet	53

Chapitre 5 : Tentative d'elaboration d'un programme de calcul pour l'optimisation de la ventilation longitudinal.....55

5.1. Domaine de calcule... ..	55
5.1. Hypothèses	55
5.2. Modèle mathématique	56
5.3 Résolution par la méthode des volumes finis.....	56
5.3.1 Géométrie et maillage du domaine de calcul	56
5.3.2 Formulation de la méthode des volumes finis.....	57

5.3.3 Les conditions aux limites.....	60
5.3. Solution de l'équation	61
5.4.Valeurs des paramètres de cas de base.....	61
5.5. L'algorithme et le programme de calcul	61
5.5.1. L'algorithme.....	61
5.5.2. L'organigramme.....	62
5.6. Résultats	63
Conclusion.....	64
Références	65
Annexe.	67

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 : description générale de la ventilation des tunnels

Figure 1.1 Schéma descriptif du système de ventilation longitudinale.....	4
Figure 1.2 Schéma descriptif du système de ventilation transversale.....	5
Figure 1.3 Implantation de ventilateurs en voûte de tunnel	5
Figure 1.4 Exemples d'implantation de ventilateurs pour un tunnel à section rectangulaire	6
Figure 1.5 Exemples de configurations de gaines de ventilation en tunnel voûté ; AV est mis pour la gaine d'air vicié et AF pour la gaine d'air frais.	7
Figure 1.6 Exemples de configurations de gaines de ventilation en tranchée couverte.....	7
Figure 1.7 Exemple de nappe de fumée stratifiée	10
Figure 1.8 Comportement des fumées en l'absence de pente et de courant d'air	10
Figure 1.9 Comportement des fumées en l'absence de pente et en présence de courant d'air	11
Figure 1.10 Comportement des fumées dans un tunnel en pente.....	11
Figure 1.11 Principe d'une ventilation longitudinale avec extraction massive.....	15
Figure 1.12 (a) Photo d'une trappe de désenfumage télécommandée ; (b) photo d'une bouche d'insufflation d'air frais.	16

Chapitre 2 : Revue bibliographique

Figure 2.1. Comparaison entre les modèles	18
Figure 2.2 Variation de la vitesse axiale maximale en fonction de la distance a l'extracteur .	20

Chapitre 3 : Calcul sur FDS

Figure 3.1 Schéma de fonctionnement de FDS.....	24
---	----

Figure 3.2 Exemple d'un fichier d'entrée (Pré-Processeur)	29
Figure 3.3 : Exemple d'un ventilateur de jet.....	29
Figure 3.4: Exemple simple de "SAWTOOTH=.FALSE"	30
Figure 3.5 : Maillage sur FDS.....	31
Figure 3.6 : Champ de la contrainte de cisaillement au plafond.....	32
Figure 3.7 : Schéma descriptif du domaine de calcul	32
Figure 3.8 : Maillage de domaine du calcul	33
Figure 3.9 : Profile de vitesse pour différents maillages à x=116 m.....	34
Figure 3.9 : Profile de vitesse pour différents maillages à x=246 m.....	34
Figure 3.10:Variation de la vitesse axiale en fonction de temps , à la hauteur 5,88 m.....	35
Figure 3.10:Variation de la vitesse axiale en fonction de temps , à la hauteur 2,14 m.....	35
Figure 3.11:Variation de la vitesse axiale maximale en fonction de la distance a l'extracteur.	36

Chapitre 4 : Les résultats et l'interprétation

Figure 4.1 : Vitesse axiale à X = 108 m pour différentes positions de l'extracteur.....	37
Figure 4.2 : Vitesse axiale à X = 116 m pour différentes positions de l'extracteur.....	37
Figure 4.3 : Vitesse axiale à X = 136 m pour différentes positions de l'extracteur.....	38
Figure 4.4 : Vitesse axiale à X = 176 m pour différentes positions de l'extracteur.....	38
Figure 45 : Vitesse axiale à X = 210 m pour différentes positions de l'extracteur.....	38
Figure 4.6 : Vitesse axiale à X = 246 m pour différentes positions de l'extracteur.....	38
Figure 4.7 Variation de la vitesse axiale maximale en fonction de la position de ventilateur .	39
Figure 4.8 Variation de la hauteur de la vitesse axiale maximale en fonction de la position de ventilateur.....	39

Figure 4.9. Champ de la vitesse axiale dans un plan symétrique (XZ).....	41
Figure 4.10. Champ de la contrainte de cisaillement au plafond (plan X, Y).....	42
Figure 4.11 Champ de la contrainte de cisaillement au plancher (plan X, Y)	42
Figure 4.12 Facteur de performance pour les différentes positions du ventilateur	43
Figure 4.13 Vitesse axiale à X = 108 m pour différents angles de calage	44
Figure 4.14 Vitesse axiale à X = 116 m pour différents angles de calage	44
Figure 4.15 Vitesse axiale à X = 136 m pour différents angles de calage	44
Figure 4.16 Vitesse axiale à X = 176 m pour différents angles de calage	44
Figure 4.17 Vitesse axiale à X = 210 m pour différents angles de calage	45
Figure 4.18 Vitesse axiale à X = 246 m pour différents angles de calage	45
Figure 4.19 Variation de la vitesse axiale maximale en fonction de l'angle de calage	46
Figure 4.20 Variation de la hauteur de la vitesse axiale maximale en fonction de l'angle de calage	46
Figure 4.21 Champ de la vitesse axiale dans un plan symétrique (XZ).....	47
Figure 4.22 Champ de la contrainte de cisaillement au plafond (plan XY).....	48
Figure 4.23 Champ de la contrainte de cisaillement au plancher (plan XY)	48
Figure 4.24 Facteur de performance pour les différents angles	50
Figure 4.25 Variation de la température et des concentrations de CO ₂ et CO en fonction de la longueur du tunnel à la hauteur de 2 m (10 MW)	52
Figure 4.26 Variation de la température et des concentrations de CO ₂ et CO en fonction de la longueur du tunnel à la hauteur de 2 m (10 MW)	52
Figure 4.27 Variation de la température et des concentrations de CO ₂ et CO en fonction de la longueur du tunnel à la hauteur de 2 m (100 MW)	53
Figure 4.28 Variation de la température et des concentrations de CO ₂ et CO en fonction de la longueur du tunnel à la hauteur de 2 m (100 MW)	54

Chapitre 5 : Tentative d'élaboration d'un programme de calcul pour l'optimisation de la ventilation longitudinal

Figure 5.1 Schéma descriptif du domaine de calcul.....	55
Figure 5.2 Géométrie et maillage du domaine de calcul.....	57
Figure 5.3 Système de notation.....	57
Figure 5.4 : Vitesse axiale pour un angle de calage 0°	63

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1 : description générale de la ventilation des tunnels

Tableau 1.1 Incendies de dimensionnement.....	9
Tableau 1.2 Ordre de grandeur des températures des fumées en voûte sous le vent du foyer pour une vitesse du courant d'air de l'ordre de la vitesse critique.....	11
Tableau 1.3 Cas pour lesquels l'absence de dispositif de désenfumage est autorisée pour les tunnels de gabarit supérieur à 3,5 m.....	12
Tableau 1.4 Cas pour lesquels la ventilation longitudinale est autorisée pour les tunnels de gabarit supérieur à 3,5 m.....	13
Tableau 1.5 Prescriptions pour la ventilation longitudinale.....	14
Tableau 1.6 Critères de contrôle du courant d'air en ventilation transversale pour les tunnels de gabarit supérieur à 3,5 m.....	16

Chapitre 2 :

Tableau 2.1: Tests avec ventilation forcée et naturelle.....	14
--	----

Chapitre 3 : Simulation numérique

Tableau 3.1 : Différents maillages de domaine du calcul.....	33
--	----

Chapitre 4 : Les résultats et l'interprétation

Tableau 4.1 : Différents positions du ventilateur et les hauteurs utiles.....	37
Tableau 4.2 : Force de poussé et facteur de performance pour les différentes positions.....	42
Tableau 4.3 : Différents positions du ventilateur et ses hauteurs utiles.....	44
Tableau 4.4 Force de poussé et facteur de performance pour les différentes angles.....	49

Chapitre 5 : Tentative d'élaboration d'un programme de calcul pour l'optimisation de la ventilation longitudinal

Tableau 5.1 : Les valeurs des paramètres de cas de base.....	61
--	----

Introduction

En cas d'incendie dans un tunnel, les fumées qui s'accumulent diminuent la visibilité et constituent un danger mortel pour les usagers. Par conséquent il est impératif que leur évacuation soit assurée. L'enjeu de la compréhension du phénomène de propagation de la fumée et l'effet de la ventilation sont très importants. Dans ce contexte une diversité des travaux a été réalisée.

Plusieurs solutions sont proposées pour le contrôle et la maîtrise de la propagation de la fumée dans les tunnels. L'une de ces solutions est la ventilation forcée. Cette dernière a deux objectifs principaux. L'un est pour le confort dans la situation normale d'exploitation, pour maintenir la qualité de l'air à un niveau requis et l'autre, dans le cas d'un incendie, pour mettre les usagers à l'abri des fumées et pour qu'ils puissent évacuer le tunnel. La ventilation d'un tunnel constitue un système complexe, car elle est dépendante du comportement aérodynamique de l'ouvrage. Deux types de ventilation sont généralement utilisés dans les tunnels : la ventilation transversale et la ventilation longitudinale. Le principe de la ventilation transversale est de maintenir les fumées stratifiées afin de les extraire par des trappes situées aux plafonds. Le principe de la ventilation longitudinale est de créer un courant d'air longitudinal dans le tunnel afin de pousser les fumées dans un sens pour les évacuer.

En général, les tunnels unidirectionnels qui ont des longueurs inférieures ou égales à 3000 m sont équipés par des systèmes de ventilation longitudinale pour assurer un bon niveau de confort de service ordinaire et une sécurité en cas d'urgence (incendie) (Kempf [1], Jojo Li and Chow [2], Carvel et al [3], Bailey et al [4], Betta et al [5]). Ce système est composé de ventilateurs appelés aussi extracteurs qui empêchent le "retour des fumées", mais les évacuent dans les conditions qui garantissent un air à faible concentration de polluants (produit toxiques) et une visibilité suffisante.

Le principe de fonctionnement d'un extracteur se base sur la mise en mouvement ou l'accélération d'une quantité d'air qui est réinjectée dans l'environnement du tunnel afin de générer un flux longitudinal à une certaine vitesse pour repousser les fumées.

Actuellement, dans le système de ventilation longitudinale, les extracteurs sont installés horizontalement à une certaine distance du plafond. Le jet en contact de la paroi de plafond génère une contrainte de cisaillement et perturbe l'écoulement dans le tunnel. Pour réduire cette contrainte et améliorer l'efficacité de l'installation, une inclinaison des extracteurs vers

le sol d'un angle donné a été proposé par (Martegani et al [6], Witt and Schütze [7], Martegani et al [8], Armstrong et al [9], Lotsbeg [10]).

C'est dans ce contexte que la présente étude a été définie et proposée pour chercher numériquement la position optimale de l'angle d'inclinaison des extracteurs ainsi que son effet sur le désenfumage d'un tunnel lors d'un incendie de puissance équivalente à celle d'un véhicule léger en feu de 10 MW et d'un véhicule lourd en feu de 100 MW. Différents angles de calage sont expérimentés numériquement pour déterminer le calage optimum. Ce mémoire inclut aussi, une étude numérique de l'optimisation de la position du ventilateur à des fins de comparaison pour valider l'utilisation du ventilateur incliné.

Après une introduction générale, nous décrivons dans le premier chapitre, la ventilation dans les tunnels. Les enjeux de la ventilation lors d'un incendie et pendant l'exploitation courante sont mis en évidence du point de vue à leur importance dans la protection des usagers et de l'équipement.

Dans le chapitre deux, nous résumons les principaux travaux pertinents sur le comportement des fumées dans les tunnels. L'accent est porté sur les vitesses de la propagation des fumées, de leur température ainsi que sur la vitesse de soufflage (vitesse critique) lors de l'évacuation des fumées. La nécessité de comprendre le transfert de la quantité de mouvement créée par les extracteurs au flux du tunnel pour le mettre en mouvement est jugé importante au travers de l'analyse des travaux précédents. Ceci justifie le choix de la thématique.

Le chapitre trois est réservé à la description de l'outil de simulation FDS (Fire Dynamic Simulator). Le modèle physique représentatif de notre cas est présenté avec les conditions initiales et aux limites, ainsi que le choix de maillage.

Dans le chapitre quatre, les principaux résultats avec leurs interprétations sont donnés.

Le chapitre cinq concerne une tentative d'élaboration d'un code de calcul pour simuler l'optimisation de la ventilation longitudinal dans les tunnels. Des résultats préliminaires sont obtenus mais ne décrivent pas assez correctement l'écoulement et le jet.

Une conclusion est présentée pour résumer les pertinents résultats obtenus.

Chapitre 1

Chapitre 1 : Description générale de la ventilation des tunnels

1.1. Enjeux de la ventilation

1.1.1. Rôles de la ventilation dans un tunnel

La ventilation dans le tunnel a deux objectifs principaux, l'un en situation normale d'exploitation, pour maintenir la qualité de l'air au niveau requis et l'autre en cas d'incendie, pour mettre les usagers à l'abri des fumées pour qu'ils puissent évacuer le tunnel. Dans un second temps, permettre l'intervention des services de secours et de lutte contre l'incendie. La ventilation d'un tunnel constitue un système complexe, car il dépend du comportement aérodynamique de l'ouvrage.

D'un point de vue aérodynamique, un tunnel se distingue d'une construction particulière du fait de l'existence de courants d'air longitudinaux et les débits de renouvellement d'air très grands, de l'ordre d'une centaine de mètres cubes d'air par seconde, soit 10 à 100 fois plus grand que dans la plupart des locaux à usage d'habitation ou industriel [10].

1.1.2. Les types de ventilation dans les tunnels

Certains tunnels ne nécessitent pas de ventilation mécanique, parce que la ventilation naturelle est suffisante. Il s'agit de tunnels courts ou à faible trafic. Quand une ventilation mécanique est nécessaire, plusieurs choix sont possibles.

En situation normale d'exploitation, la méthode retenue pour faire baisser les niveaux de pollution dans un tunnel ventilé est la dilution des polluants. En général, il y a deux systèmes fondamentaux de ventilation de tunnels basés sur l'usage de la ventilation en situation d'exploitation normale. Ces deux cas s'effectuent par procédés de dilution [10].

- **La ventilation longitudinale**

Les équipements de cette stratégie sont plus visibles pour le grand public car on peut voir les gros ventilateurs (accélérateurs) disposés le plus souvent au plafond ou éventuellement sur les piliers.

Cette ventilation sert à repousser toutes les fumées à l'aval de l'incendie. Les usagers bloqués à l'amont se retrouvent ainsi dans une zone libre de fumées et peuvent être évacués à pied vers une issue de secours ou vers l'entrée du tunnel.

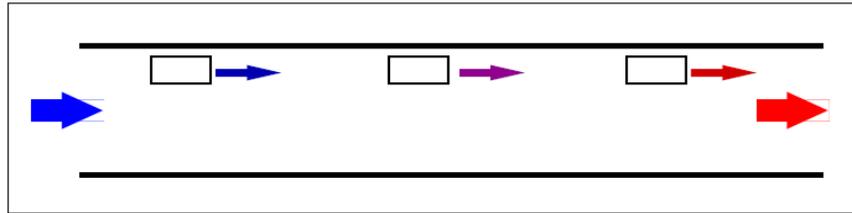


Figure 1.1 : Schéma descriptif du système de ventilation longitudinale

Cette stratégie consiste à appliquer une poussée à l'air contenu dans le tunnel pour créer un courant d'air orienté vers la sortie du tunnel. Elle a l'avantage d'être simple à concevoir. Il suffit de s'assurer que les fumées ne se propagent pas à l'amont de l'accident, c'est-à-dire que le courant d'air induit par les ventilateurs est suffisant pour repousser l'intégralité des fumées vers l'aval. Pour cela, on dispose de valeurs de vitesses fiables. Ce système a aussi l'avantage d'être facile à mettre en œuvre. Cette stratégie n'est malheureusement pas applicable pour tous les tunnels. En effet, on ne peut recourir à cette méthode qui enfume une partie du tunnel, que dans le cas d'une circulation congestionnée qui empêcherait les usagers à l'aval de sortir du tunnel, ou encore dans le cas d'un tunnel bidirectionnel, où des usagers sont bloqués des deux côtés de l'incendie. Il faut donc recourir à d'autres stratégies. [10]

- **La ventilation transversale**

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

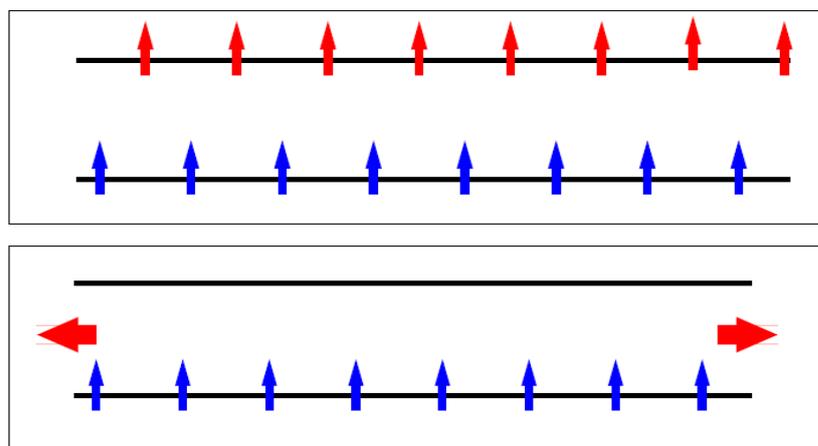


Figure 1.2 : Schéma descriptif du système de ventilation transversale

Le système de ventilation transversale vise à profiter de cet état et à chercher à le maintenir en aspirant les fumées au plafond et en soufflant de manière réduite de l'air frais à proximité du sol. Pour cela, on peut par exemple aménager deux gaines dans un faux-plafond: la première est de percer de trappes qui servent à aspirer l'air vicié, la seconde est de relier aux bouches de soufflage près du sol et injecter de l'air frais dans le tunnel.

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

1.1.3. Emplacement des équipements de ventilation

Selon le système de ventilation (longitudinale ou transversale) et le type d'ouvrage (géométrie voûtée ou rectangulaire), les contraintes d'installation des équipements de ventilation sont différentes. Cela peut impliquer des travaux de génie civil importants, qui peuvent avoir une grande incidence sur le coût d'un tunnel.

- **Ventilation longitudinale d'un tunnel voûté**

En ventilation longitudinale, le courant d'air est en général créé par des accélérateurs. Quand le tunnel est voûté, la meilleure implantation des ventilateurs est en sous-face de la voûte et généralement ne nécessite pas de sur- excavation (figure 1.3).

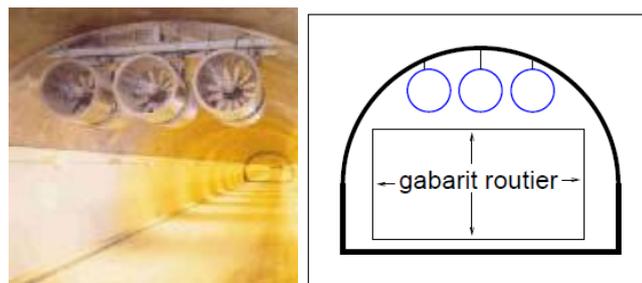


Figure 1.3 : Implantation de ventilateurs en voûte de tunnel [10]

Dans le cas où une extraction massive est nécessaire, il faut prévoir l'implantation d'une station de ventilation (très grossièrement, entre 1 000 et 5 000 m³) à localiser à proximité du point d'extraction. Cette station doit être reliée à l'extérieur pour permettre la sortie des fumées en cas d'incendie. Cela peut conduire, le cas échéant, à construire des puits ou des galeries de transit pour le passage de l'air.

- **Ventilation longitudinale d'un tunnel à section rectangulaire**

Dans le cas d'un tunnel à section rectangulaire, on ne peut pas utiliser l'espace qui serait libéré par la voûte au dessus du gabarit routier. Il est donc nécessaire de prévoir un sur-gabarit pour l'implantation des ventilateurs (figure 1.4.a). Cela peut être fait sur toute la longueur de l'ouvrage ou localement au droit des ventilateurs, au moyen d'un bossage (figure 1.4.c). Une solution possible mais déconseillée pour des raisons d'efficacité aéraulique est d'implanter les accélérateurs latéralement (cela permet parfois d'intégrer une tranchée couverte dans des sites où il est impossible d'augmenter le gabarit vertical de l'ouvrage sans un surcoût considérable, voir figure 1.4.b).

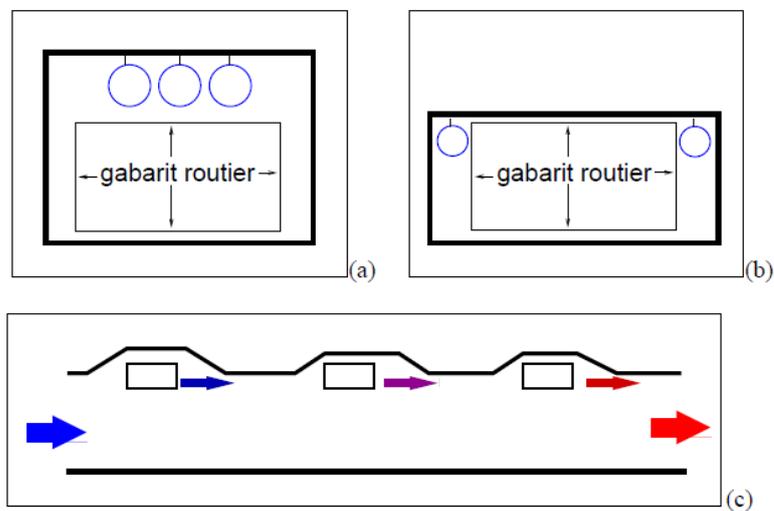


Figure. 1.4 : Exemples d'implantation de ventilateurs pour un tunnel à section rectangulaire

- **Ventilation transversale d'un tunnel voûté**

Pour la ventilation transversale d'un tunnel voûté, il est généralement nécessaire d'implanter des gaines de ventilation pour le soufflage d'air frais et pour l'extraction d'air vicié ou de fumées. Dans la plupart des cas, les gaines sont implantées à l'intérieur du tube principal. Si la section du tube est en fer à cheval, on fait, en général, passer les gaines en plafond (figure 1.5 a et b). En cas d'incendie, selon les caractéristiques du tunnel, il peut être nécessaire d'insuffler de l'air frais en bas de la section. On aménage alors des carneaux d'amenée d'air frais depuis les gaines jusqu'au niveau de la chaussée. Si la section du tube est circulaire, on fait, en général, passer l'air frais sous la chaussée et l'air vicié ou les fumées en plafond (figure 1.5.c)). Selon la largeur du tunnel, on peut être amené à insuffler de l'air frais des deux côtés de la chaussée (figure 1.5.b).

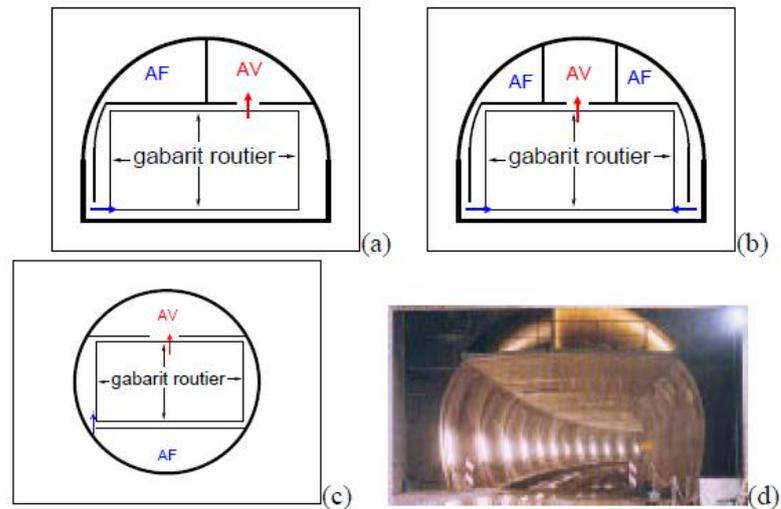


Figure 1.5 : Exemples de configurations de gaines de ventilation en tunnel voûté ; AV est mis pour la gaine d'air vicié et AF pour la gaine d'air frais. [10]

- **Ventilation transversale d'un tunnel à section rectangulaire**

Dans le cas d'un tunnel à section rectangulaire, on n'a plus l'espace dégagé par la forme de voûte de l'ouvrage pour mettre en place les gaines de ventilation. Dans ce cas, il est souhaitable de conserver les bouches d'extraction en plafond et le soufflage en bas de piedroit s'il est nécessaire en cas d'incendie. Quelques solutions possibles sont schématisées sur la figure 1.6.

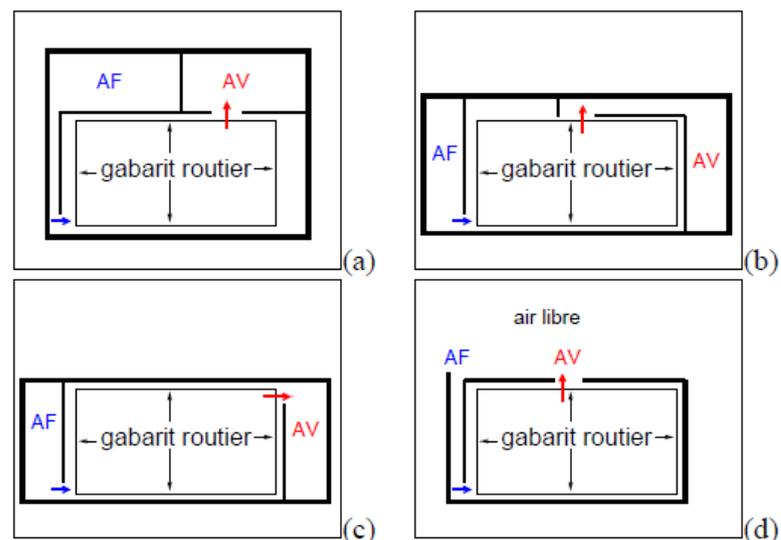


Figure. 1.6 : Exemples de configurations de gaines de ventilation en tranchée couverte

1.2. Désenfumage en cas d'incendie

1.2.1. Les incendie en tunnel

- **Risques d'incendie en tunnel**

Les sources potentielles d'incendie en tunnel sont les véhicules présents en tunnel, les matériaux et les installations de l'espace de circulation lui-même ou des locaux techniques. Mais, dans le seul cas de l'inflammation de la chaussée causée par un incendie de véhicule, la contribution à la puissance thermique peut atteindre un niveau important, mais uniquement quand l'incendie du véhicule dégage lui-même une très forte puissance, et relativement tard dans le développement de l'incendie.

Les incendies en tunnel qui sont dangereux pour les usagers sont donc les incendies de véhicules présents dans le tunnel. La puissance thermique d'un incendie de véhicule varie entre moins de 2 MW (petit incendie de véhicule de tourisme) et 200 MW (incendie d'une citerne d'hydrocarbures). La plupart de ces incendies sont causés par une inflammation spontanée des véhicules par défaillance technique (échauffement anormal, court-circuit, . . .).

- **Les risques lors d'un incendie en tunnel**

Les incendies peuvent causer des dommages aux personnes, aux biens et à l'ouvrage.

L'ordre d'apparition des dangers est en général le suivant :

- le premier effet est l'arrivée des fumées qui sont très opaques et gênent considérablement l'évacuation des usagers,
- dans un second temps, les usagers qui n'ont pas pu évacuer le tunnel à cause du manque de visibilité sont incommodés voire asphyxiés par les fumées dégagées par l'incendie, dont le niveau de toxicité augmente progressivement,
- enfin, la chaleur dégagée par l'incendie provoque de fortes élévations de température, pouvant mettre en danger directement des personnes (par convection ou par rayonnement), mais aussi détruire ou endommager des véhicules ou des composants du tunnel parfois indispensables à la sécurité des usagers (éclairage, ventilation, systèmes de communications, faux plafonds, . . .) ou provoquer la chute d'objets lourds fixés en plafond (signalisation, ventilateurs, . . .). Ce risque concerne essentiellement les services de lutte contre l'incendie qui peuvent pénétrer dans le tunnel munis d'appareils respiratoires.

Les ordres de grandeur des conditions ambiantes critiques pour les usagers sont une visibilité de moins de 10 m, une température entre 50 et 80°C selon l'humidité de l'air, et un

rayonnement de l'ordre de 2 kW/m^2 . La toxicité reste en général acceptable tant que les conditions minimales de visibilité décrites ci-dessus sont assurées. C'est donc bien la perte de visibilité qui est le danger fondamental, car sans visibilité, il devient impossible d'évacuer l'espace enfumé, ce qui conduit à devoir respirer un air chargé en substances toxiques pendant un temps trop long pour permettre la survie.

Pour les services de lutte contre le feu munis d'équipements adaptés (en particulier des appareils respiratoires), la température critique est de l'ordre de 100°C et le rayonnement critique de 5 kW/m^2 .

Il convient d'évoquer brièvement le risque d'explosion en tunnel. Un tunnel est un espace confiné dans lequel toute explosion a des conséquences dramatiques (formation d'une onde de choc puissante qui est mortelle sur toute la longueur du tunnel et dangereuse à l'extérieur à proximité immédiate des têtes). Priver complètement d'air un incendie en tunnel est donc dangereux, car cela peut conduire à la formation de poches de gaz explosives.

- **Incendies de dimensionnement**

Pour prendre en compte le risque d'incendie dans le dimensionnement des installations de ventilation, les incendies de dimensionnement dont les caractéristiques sont précisés dans le tableau 1.1. Ces incendies ont été choisis car ils recouvrent l'immense majorité des cas d'incendie. Ce ne sont pas cependant les incendies les pires qui puissent arriver.

Le surcoût pour concevoir une installation de ventilation (surtout en transversal) adaptée à un incendie supérieur à 30 MW est très important. En outre, les connaissances actuelles ne permettent pas d'affirmer qu'une installation transversale dimensionnée plus largement permettrait de faire face efficacement à un incendie dépassant fortement 30 MW. Comme des incendies supérieurs à 30 MW sont très rares, il est plus efficace de porter l'effort sur d'autres installations de sécurité visant à mieux alerter et évacuer les usagers.

Tableau 1.1 : Incendies de dimensionnement [10]

type de tunnel	définition de l'incendie de dimensionnement	Puissance Totale	débit de fumées
gabarit < 2 m	2 ou 3 véhicules légers	8 MW	—
2 m < gabarit < 3,5 m	un fourgon	15 MW	50 m ³ /s
gabarit > 3,5 m sans TMD avec TMD	gros incendie de poids lourd	30 MW	80 m ³ /s
	poids lourd chargé d'hydrocarbures	200 MW	> 300 m ³ /s

1.2.2. Notions sur le comportement des fumées

Un incendie produit des fumées chaudes qui tendent à se plaquer en sous-face de la voûte ou du plafond du tunnel. Selon le courant d'air longitudinal, mais aussi selon la pente du tunnel, le comportement des fumées est différent.

- **En l'absence de courant d'air longitudinal**

En l'absence de courant d'air longitudinal, les fumées se maintiennent en partie haute du tunnel sur d'assez longues distances (figure 1.7). Si le tunnel n'est pas en pente, les fumées se propagent de façon symétrique dans les deux directions à une vitesse de l'ordre de 1 à 2 m/s pour un incendie de véhicule léger, et vraisemblablement à plus de 4 m/s pour une citerne d'essence (figure 1.8.a). Au fur et à mesure de sa progression, la couche de fumées se refroidit et sa vitesse diminue. Une couche d'air frais se maintient sous la couche de fumée sur plusieurs centaines de mètres. Elle est entraînée en direction de l'incendie.

En continuant de s'éloigner, les fumées se rapprochent du sol et sont susceptibles d'être renvoyées vers le feu par le courant d'air contraire. Elles occupent alors tout l'espace du tunnel (figure 1.8.b).



Figure 1.7 : Exemple de nappe de fumée stratifiée [10]

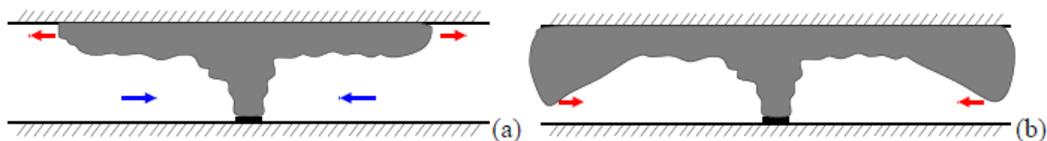


Figure 1.8 : Comportement des fumées en l'absence de pente et de courant d'air

- **Influence d'un courant d'air longitudinal**

En présence d'un courant d'air longitudinal suffisant (sans pente), l'ensemble des fumées est poussé d'un seul côté par le courant d'air. On appelle vitesse critique (VC) la vitesse de l'air à partir de laquelle toutes les fumées sont poussées d'un seul côté. Les figures 1.9 (a) et (b) montrent la situation quand la vitesse de l'air est inférieure à VC . On y voit en particulier le phénomène de nappe de retour (*backlayering*), qui consiste en une couche stable

de fumées au vent du foyer. La figure 1.9.c montre la situation quand la vitesse de l'air est nettement supérieure à V_C . La vitesse critique V_C est de l'ordre de 1 à 2 m/s pour un incendie de véhicule léger, de 2 à 3 m/s pour un incendie de poids lourd, et ne dépasse pas 4 m/s pour un incendie de citerne d'essence.

On définit la vitesse de déstratification V_d , telle que si la vitesse du courant d'air est inférieure à V_d alors l'écoulement reste stratifié, et si elle est supérieure à V_d il devient déstratifié (cas b et c de la figure 1.9).

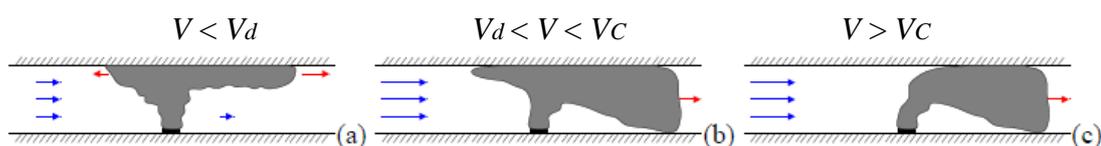


Figure 1.9 : Comportement des fumées en l'absence de pente et en présence de courant d'air

Tableau 1.2 : Ordre de grandeur des températures des fumées en voûte sous le vent du foyer pour une vitesse du courant d'air de l'ordre de la vitesse critique [10]

distance au foyer	10 m	100 m	200 m	400 m
véhicule léger	250° C	80°C	40°C	30°C
poids lourd	700°C	250°C	120°C	60°C
citerne d'essence	>1000° C	400°C	200°C	100°C

- **Effet de la pente**

L'éventuelle déclivité longitudinale du tunnel a pour conséquence de modifier le mouvement des fumées, à cause de la poussée d'Archimède exercée sur les fumées chaudes (*effet cheminée*). De même que dans le cas où la déclivité est nulle, selon la valeur du courant d'air, les fumées restent stratifiées ou non, comme illustré sur la figure 1.10. En toute rigueur la vitesse de déstratification V_d et la vitesse critique V_C dépendent de la pente. Compte tenu des ordres de grandeur des pentes (inférieures à 10 %), on ne tient pas toujours compte de cette dépendance.

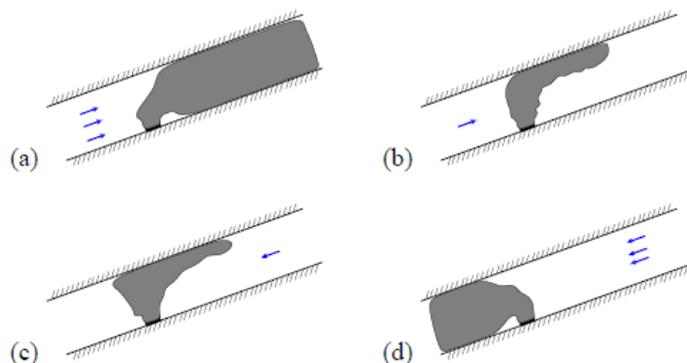


Figure 1.10 : Comportement des fumées dans un tunnel en pente

1.2.3 Les stratégies de désenfumage

- **Principes généraux**

Deux aspects sont à priori envisageables :

- Chercher à avoir un courant d'air longitudinal suffisamment fort pour pousser toutes les fumées vers l'un des côtés du tunnel, à condition que ce côté ait pu être évacué,
- Chercher à limiter le courant d'air longitudinal pour conserver la stratification des fumées et les aspirer en plafond.

Le premier aspect correspond à une stratégie de ventilation longitudinale, la seconde à une stratégie de ventilation transversale.

Dans certains cas, il peut être utile de distinguer la phase d'évacuation, pendant laquelle il peut y avoir des usagers de deux côtés de l'incendie, et donc pendant laquelle il faut conserver la stratification des fumées, de la phase de lutte contre l'incendie, pendant laquelle il peut être avantageux de repousser les fumées d'un côté de l'incendie seulement pour permettre un accès dégagé de fumées de l'autre côté de l'incendie.

- **Cas où l'absence de dispositif de désenfumage est autorisée**

En l'absence de dispositif de désenfumage, les fumées s'échappent par les têtes du tunnel ou par des ouvertures en plafond sous l'action de la poussée d'Archimède et du courant d'air existant naturellement dans l'ouvrage.

Tableau 1.3 : Cas pour lesquels l'absence de dispositif de désenfumage est autorisée pour les tunnels de gabarit supérieur à 3,5 m [10]

Type de tunnel	absence de dispositif spécifique autorisée
Urbain de longueur inférieure à 300 m de longueur supérieure à 300 m	Oui Non
Non urbain à un ou deux tubes à trafic non faible de longueur inférieure à 500 m de longueur comprise entre 500 et 800 m de longueur supérieure à 800 m	oui selon les cas non
Non urbain à un tube bidirectionnel à trafic faible de longueur inférieure à 1000 m de longueur supérieure à 1000 m	oui non

- **Stratégie en ventilation longitudinale**

En ventilation longitudinale, l'objectif est de repousser toutes les fumées d'un même côté du foyer à une vitesse suffisante pour éviter tout « backlayering ». Comme on l'a vu, les fumées sont donc déstratifiées sous le vent du foyer. La fonction de désenfumage ne peut dans ce cas être valablement assurée dans un tunnel où cohabitent les deux sens de circulation (les véhicules peuvent être bloqués un côté et le nuage de fumées l'autre côté). En revanche, dans un tunnel unidirectionnel non congestionné, une action très efficace est obtenue en poussant l'air. Les usagers bloqués au vent du foyer sont protégés par le courant d'air, alors que les véhicules situés sous le vent du foyer peuvent poursuivre leur route librement vers la sortie du tunnel. Les services de secours peuvent accéder à l'incendie par le côté libre de fumées (ainsi que par les issues de secours). Ce raisonnement est mis en défaut si la circulation est bloquée ou fortement congestionnée, ce qui est fréquent dans les tunnels urbains ; il faut alors limiter les longueurs désenfumées en stratégie longitudinale à des valeurs bien inférieures à la longueur maximale possible en ventilation longitudinale pour la seule dilution des polluants. On peut dans ce cas installer des extractions massives distantes de moins de 500 ou 800 m selon la stratégie de mise en œuvre du désenfumage. Le tableau 1.4 résume les cas où la ventilation longitudinale est autorisée pour les tunnels de gabarit supérieur à 3,50 m. Pour les tunnels de gabarit inférieur à 3,50 m, il convient de mettre en place systématiquement des extractions massives.

Tableau 1.4 : Cas de ventilation longitudinale autorisée - gabarit supérieur à 3,5 m [10]

type de tunnel	ventilation longitudinale autorisée	
	Sans extraction massive	avec extraction massive
urbain unidirectionnel		
de longueur inférieure à 500 m	oui	—
de longueur comprise entre 500 et 800 m	oui	oui
de longueur supérieure à 800 m	non	oui
urbain bidirectionnel	non	non
non urbain unidirectionnel à trafic non faible		
de longueur inférieure à 5000 m	oui	—
de longueur supérieure à 5000 m	non	oui
non urbain bidirectionnel à trafic non faible		
de longueur inférieure à 1000 m	oui	—
de longueur supérieure à 1000 m	non	non
non urbain bidirectionnel à trafic faible		
de longueur inférieure à 1500 m	oui	—
de longueur supérieure à 1500 m	non	non

Dans le cas d'un tunnel

- bidirectionnel
- unidirectionnel urbain de plus de 500 m sans extractions massives
- unidirectionnel urbain avec des extractions massives distantes de plus de 500 m, on vise à maintenir la stratification des fumées en limitant le courant d'air à des valeurs inférieures à 1 à 2 m/s tant que des usagers sont susceptibles d'être présents dans la zone vers laquelle seront poussées les fumées.

Le tableau 1.5 résume les incendies de dimensionnement à considérer et les vitesses minimales de courant d'air à assurer selon le type de tunnel.

Tableau 1.5 : Prescriptions pour la ventilation longitudinale [10]

Type de tunnel	Puissance de l'incendie de dimensionnement	Vitesse de courant d'air
gabarit < 2 m	8 MW	2 m/s
2 m < gabarit < 3,5 m	15 MW	2,5 m/s
gabarit > 3,5 m		
sans TMD	30 MW	3 m/s
avec TMD	200 MW	4 m/s

- **Cas des tunnels autorisés aux transports de marchandises dangereuses**

Pour les tunnels autorisés aux transports de marchandises dangereuses, l'échauffement progressif des parois peut rendre impossible le maintien d'un courant d'air de 4 m/s pendant 2 heures. Dans ce cas, on s'efforce de garantir un courant d'air de 4 m/s le plus longtemps possible, et en tout état de cause pendant au moins les 15 premières minutes de l'incendie, et supérieur à 3 m/s pendant au moins les 45 minutes suivantes.

- **Ventilation longitudinale avec extractions massives**

Dans le cas de la ventilation longitudinale, au delà d'une certaine longueur de tunnel, il est nécessaire d'installer des stations d'extraction massives. Dans les tunnels urbains, ces stations doivent être réparties tous les 500 m (5000 m pour les tunnels non urbains). Pour un tunnel urbain, si le contrôle du courant d'air est assuré, l'inter-distance entre les extractions massives peut être portée à 800 m.

Les extractions massives doivent être dimensionnées afin de pouvoir aspirer la totalité du débit d'air provenant de la direction de l'incendie ainsi que l'air provenant de l'autre direction à la vitesse minimale de 1 m/s et le débit Q_d dû à la dilatation causé par la puissance thermique de l'incendie. Il peut être nécessaire d'extraire un débit supérieur au débit total

ainsi déterminé si le courant d'air n'est pas contrôlé avec une précision suffisante. Le principe d'un système à extraction massive est indiqué sur la figure.1.11.

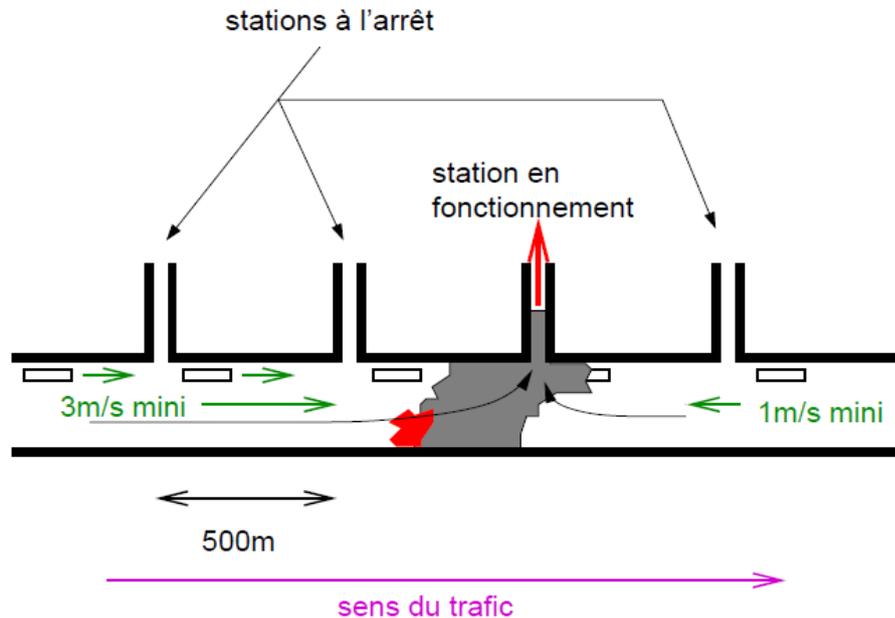


Figure 1.11 : Principe d'une ventilation longitudinale avec extraction massive

- **Stratégie en ventilation transversale**

- a) **Principes**

En ventilation transversale, la stratégie est de préserver la stratification des fumées et de les aspirer par le plafond du tunnel en conservant une couche d'air frais sous la couche de fumée. La ventilation transversale peut donc être employée dans des cas où la ventilation longitudinale serait dangereuse, en particulier :

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

Elle ne s'applique cependant pas aux tunnels de gabarit inférieur à 2,70 m.

Pour assurer la stratification des fumées, la vitesse du courant d'air doit être inférieure à une valeur limite de déstratification V_d . Cette vitesse est de l'ordre de 1,5 à 2 m/s pour un incendie de poids lourd. Or en ventilation transversale la vitesse de l'air n'est pas constante le long du tunnel, car on souffle et on extrait de l'air et de la fumée en divers endroits dans le tunnel.

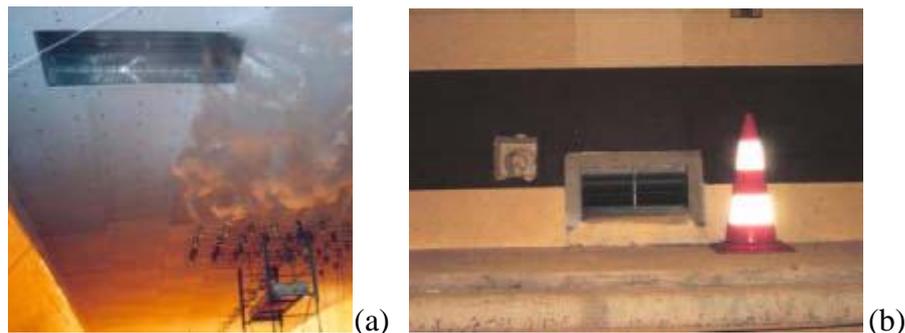


Figure 1.12 : (a) Photo d'une trappe de désenfumage télécommandée ; (b) photo d'une bouche d'insufflation d'air frais. [10]

b) Prescriptions pour le contrôle du courant d'air

On définit V_A la vitesse du courant d'air dans la zone de l'incendie, positive dans le sens du trafic pour les tunnels unidirectionnels et de signe arbitraire pour les tunnels bidirectionnels.

Pour le calcul de V_A , il faut prendre en compte l'effet des contre-pressions atmosphériques et de la poussée d'Archimède.

Le tableau 1.6 reprend les prescriptions en matière de contrôle du courant d'air pour les tunnels de gabarit supérieur à 3,50 m. Pour les tunnels bidirectionnels de gabarit compris entre 2,70 m et 3,50 m et ventilés transversalement, le contrôle du courant d'air est obligatoire dans tous les cas.

Tableau 1.6 : Critères de contrôle du courant d'air en ventilation transversale pour les tunnels de gabarit supérieur à 3,5 m [10]

type de tunnel	contrôle du courant d'air	V_A
urbain unidirectionnel de longueur inférieure à 1500 m de longueur comprise entre 1500 m et 3000 m de longueur supérieure à 3000 m	non obligatoire souhaitable obligatoire	— $0 \leq V_A \leq 2 \text{ m/s}$ $0 \leq V_A \leq 2 \text{ m/s}$
urbain bidirectionnel de longueur inférieure à 1500 m de longueur comprise entre 1500 m et 3000 m de longueur supérieure à 3000 m	non obligatoire souhaitable obligatoire	— $-1,5 \text{ m/s} \leq V_A \leq 1,5 \text{ m/s}$ $-1,5 \text{ m/s} \leq V_A \leq 1,5 \text{ m/s}$
non urbain unidirectionnel de longueur inférieure à 3000 m de longueur supérieure à 3000 m	non obligatoire obligatoire	— $0 \leq V_A$
non urbain bidirectionnel de longueur inférieure à 3000 m de longueur supérieure à 3000 m	non obligatoire obligatoire	— $-1,5 \text{ m/s} \leq V_A \leq 1,5 \text{ m/s}$

Chapitre 2

Chapitre 2 : Revue bibliographique

Dans le but de contrôler la fumée en cas d'incendie, beaucoup de tunnels sont équipés par des systèmes de ventilation longitudinale. Cependant, l'influence d'une telle ventilation sur la production du feu et la propagation de la fumée nécessite plus d'études pour le bien cerner.

La modélisation de la ventilation, la propagation de la fumée et du feu est un domaine en perpétuel évolution. Une fois les connaissances sont acquises et les ressources sont disponibles, les modèles sont développés pour rendre les prévisions plus précises.

Bari et Naser [13] ont étudié le mouvement de la fumée d'un incendie de véhicule dans un tunnel routier de la ville de Melbourne. Ce tunnel est un tunnel routier unidirectionnel. Il a les dimensions suivantes qui sont une longueur de 3500 m, une largeur de 12 m et une hauteur de 7 m. Il est équipé par 12 extracteurs de 1,8 m de diamètre qui débitent chacun 80 m³/s. Le code FLUENT 6.0 est utilisé pour la résolution des équations moyennes de la vitesse, la pression, la température et de la fraction massique des gaz. Pour l'analyse, ils ont supposé que l'incendie d'un autobus libère une énergie équivalente à la combustion de 500 litres de carburant « diesel » (puissance de 44.4 MW) en 6 minutes. Les véhicules en amont du feu sont restés à l'arrêt tandis que les véhicules en aval du feu ont eu assez de temps pour sortir du tunnel. Grâce à l'action des extracteurs, la plupart de la fumée a été poussée en aval du feu. La fumée était également dispersée à environ 55 m en amont du feu, exposant ainsi les passagers dans cette région à un grand risque. À moins de 8 minutes après que le feu ait commencé, les concentrations de masse d'oxygène (O₂), de dioxyde de carbone (CO₂) et de l'oxyde de carbone (CO) étaient dans les marges de 0.12- 0.15, 0.08-0.11 et 0.0006-0.0014 respectivement. D'où la nécessité d'une évacuation rapide et immédiate des passagers dans le cas d'un feu dans un tunnel.

Ils ont rapporté que ces concentrations des O₂, CO₂ et CO sont à des niveaux de concentration défavorables pour la santé humaine. Dans ce cas, la recherche de nouveaux systèmes de ventilation ou l'amélioration du ceux existants est nécessaire pour réduire les impacts de l'incendie.

Bailfy et al. [4] ont utilisé le modèle de zone de feu consolidé et de transport de fumée CFAST (Consolidated Fire And Smoke Transport) développé par le NIST (National Institute of Standards and Technology), et le nouveau complément qui est désigné sous le nom du sous-modèle d'écoulement de couloir (the Corridor Flow Sub model), pour prédire d'une manière plus exacte l'écoulement de la fumée en bas d'un couloir afin de surmonter les problèmes de protection liés aux incendies, à savoir le temps de détection et d'évasion. Le CFAST suppose avant l'introduction de ce nouveau sous-modèle que la fumée se déplace instantanément d'un côté du compartiment à l'autre.

Les résultats des différentes versions en comparaison avec ceux obtenus expérimentalement sont présentés sur la figure 2.1. On remarque qu'il reste encore des efforts à faire pour améliorer les modèles de calcul.

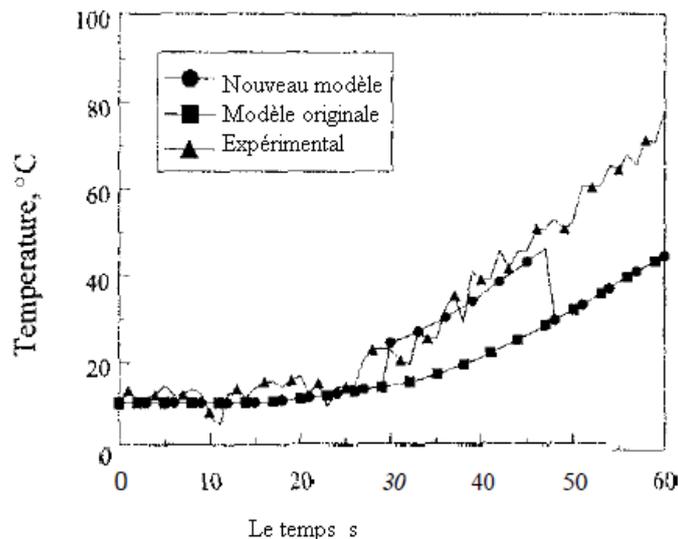


Figure 2.1 : Comparaison entre les modèles [4]

Carvel [3] présente les résultats d'une étude d'influence de la ventilation longitudinale forcée sur les incendies survenus sur les voitures, les citernes et les véhicules lourds dans les tunnels. L'approche probabiliste Bayésienne est utilisée pour affiner les évaluations faites par un nombre d'experts. Joint aux données d'essais expérimentaux du feu dans les tunnels, les résultats sont présentés et les implications sont discutées. L'influence de la ventilation longitudinale sur le feu survenu sur les marchandises des véhicules lourds est prévue pour être beaucoup plus intense que les estimations d'experts, faisant accroître le feu dix fois plus comparativement à une ventilation naturelle si elle était utilisée. L'effet de la ventilation sur un incendie d'une citerne dans un tunnel dépend de sa taille ; en effet le taux de dégagement de la chaleur des petits feux

de bac peut être réduit par la ventilation forcée, en revanche il peut être attisé dans le cas des grands feux. La taille d'un feu de voiture n'est pas prévue d'être considérablement affectée par la ventilation forcée à basses vitesses de ventilation (voir tableau 2.1).

Tableau 2.1: Tests avec ventilation forcée et naturelle

Test avec ventilation forcée	Test avec ventilation naturelle	La vitesse	R_q
CETU incendie de voiture	EUREKA & FOA incendie de voiture	2.0 m s^{-1}	1.0
VTT test 1	EUREKA & FOA test	1.3 m s^{-1}	1.0
VTT test 2	EUREKA & FOA test	1.3 m s^{-1}	1.0
EUREKA test de feu	EUREKA test de feu	2.9 m s^{-1}	2.8

R_q : Rapport de HRR, $R_q = Q_{\text{vent}} / Q_{\text{nat}}$

Q_{vent} : HRR avec ventilation forcée

Q_{nat} : HRR de même feu avec ventilation naturelle

HRR: Quantité de chaleur par unité de surface [w/m²]

Giesen et al. [14] ont étudié les ventilateurs. Ces derniers sont installés pour contrôler le courant d'air et diminuer les concentrations des gaz polluants dans les grands compartiments. Aux Pays Bas, leur application est bien connue dans les parkings comme un élément de sécurité contre les incendies. Dans la conception, la technique CFD (Computational Fluid Dynamics) est utilisée pour vérifier le niveau de sécurité qui est attribué par l'utilisation des ventilateurs. Cependant, il y a que peu d'information sur les conditions de modélisation des ventilateurs de jet en CFD. Ceci inclut surtout le manque des données expérimentales qui peuvent être appliquées pour la validation du modèle de ventilateur. Dans cette étude les résultats sont présentés comme des mesures pour un type spécial de ventilateur de jet dans un grand espace. Pour la modélisation du ventilateur de jet, le point de départ est peu compliqué, car le modèle devra être inclus généralement dans de grands domaines de calcul. L'applicabilité de l'approche développée et de l'évaluation d'efficacité de la position du ventilateur de jet dans les grandes espaces est présentée.

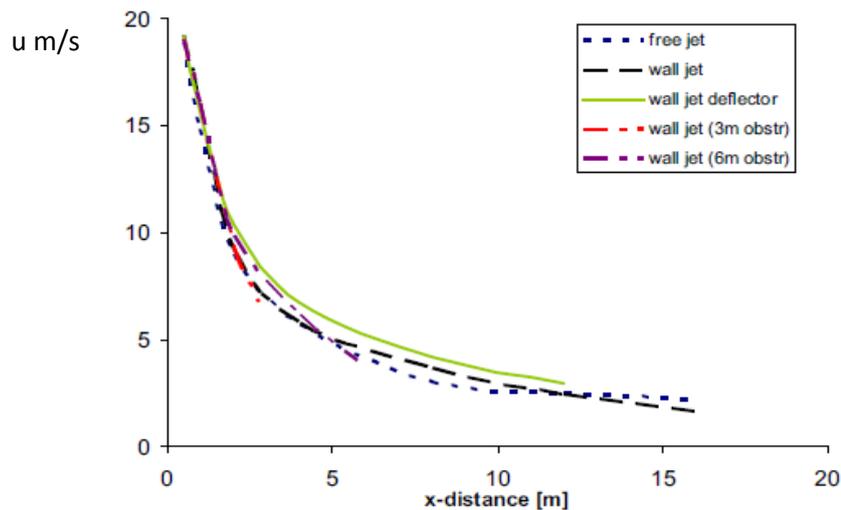


Figure 2.2 : Variation de la vitesse axiale maximale en fonction de la distance a l'extracteur [14]

Hitoshi et al. [15] ont étudié les propriétés du feu dans le domaine proche d'une source du feu dans un tunnel. Des expériences ont été entreprises en utilisant trois types de modèles de tunnels dont les dimensions sont à l'échelle 1/10, l'échelle 1/2 et l'échelle 1/1, ayant des sections rectangulaires et voûtés. Les sources carrées de feu ont été utilisées comme des modèles de sources du feu. La variation de l'allongement de la section transversale de tunnel, le taux de la chaleur évacuée et la vitesse longitudinale de ventilation forcée ont été examinés. En se basant sur les résultats obtenus dans le modèle de tunnel avec l'échelle 1/10, différents paramètres ont été déterminés à savoir la hauteur apparente de la flamme, la température maximale de la couche de fumée ainsi que sa position et également la formule empirique pour la flamme inclinée. L'effet de l'allongement de la section transversale de tunnel a été aussi introduit dans ces modèles. On constate que la longueur définie par $H^{3/3}/b^{1/2}$ (H: la hauteur de tunnel (m) et b: la largeur du tunnel (m)) est devenue une longueur représentative pour les phénomènes d'investigation du feu dans les tunnels. Ils ont conclu que ces formules empiriques sont suffisamment applicables pour les phénomènes de prévision du feu dans des domaines proches de la source carrée du feu

Karim et al. [16] ont étudié l'application de la méthode RANS et LES pour prévoir la vitesse critique de ventilation. Les résultats de modèle de champ sont présentés pour les incendies dans les tunnels horizontaux bien-ventilés. Les deux approches RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) et LES (Large-Eddy Simulations) sont appliquées au modèle de turbulence. Les incendies expérimentaux de tunnel ont été simulés sur un tunnel virtuel de longueur réduite. Ceci est possible du fait que l'écoulement en aval de la source de l'incendie devient essentiellement unidimensionnel. En se basant sur l'échelle de l'intégrale de la longueur

turbulente obtenue à partir des calculs de RANS, un critère pour la dimension du maillage locale doit être pris en considération dans le but d'obtenir des résultats fiables avec les simulations par LES. On illustre que l'exactitude des résultats de LES dépend fortement de la qualité de maillage. Ils prouvent également qu'il y a une diffusion thermique plus turbulente dans les simulations par LES en comparaison avec les simulations par RANS. Il est à noter que les simulations de RANS sont effectuées par FLUENT. Le modèle réalisable $k-\epsilon$ est employé en combinaison avec un modèle de flottabilité basé sur l'hypothèse généralisée du gradient de diffusion. Les calculs de LES sont réalisés par FDS (Fire Dynamics Simulator) du NIST. Les prévisions de la vitesse critique de ventilation obtenue par les deux approches RANS et LES sont comparées l'une à l'autre.

M. Galdo Vega [17] a présenté une simulation numérique en trois dimensions d'un système de ventilation longitudinal (LVS). Ce type de ventilation est développé pour analyser le comportement d'incendie à l'intérieur du tunnel routier bidirectionnel de Mémorial. Ce tunnel d'une longueur de 853 m est utilisé pour la modélisation numérique et utilisé pour les études expérimentales. Sur ce tunnel, 98 essais d'incendies à échelle réelle de ventilation avec différents systèmes de ventilation ont été effectués, constituant ainsi la première approche expérimentale significative pour analyser les incidents du feu à l'intérieur de tunnel routier. Un nombre total de 24 ventilateurs réversibles de jet ont été installés en groupes de trois ventilateurs, équidistants au-dessus du tunnel, et en porte-à-faux au plafond du tunnel. La validation du modèle numérique développé pour produire le comportement de la fumée produite pendant un incendie à l'intérieur d'un tunnel routier est réalisé par comparaison aux données expérimentales précédentes rassemblées dans le projet de tunnel de Memorial.

Jojo et al [2] ont étudié la performance des systèmes de sécurité dans les tunnels pour la protection contre les incendies. La technique CFD (Computational Fluid Dynamics) a été utilisé pour l'évaluation de cette performance. Les systèmes communs de sécurité de ventilation utilisés dans les tunnels sont premièrement examinés. Les aspects de sécurité liés à l'incendie en tunnel et la ventilation sont ensuite discutés. Le débit d'air induit par un incendie des véhicules dans un tunnel est simulé à l'aide de CFD. Les résultats montrent que les performances des différents systèmes de sécurité sont évaluées et comparées. Les systèmes considérés sont longitudinales, semi transversal, transversal, transversale partielle, et des systèmes de ventilation longitudinale et semi-transversales combinés. Les analyses de sensibilité sont effectuées sur les effets de la taille des mailles, le nombre d'itérations, le temps de calcul nécessaire et la précision des résultats.

F Wang et al [18] ont présenté une étude numérique qui a été réalisée pour étudier le comportement aérodynamique de ventilateurs de jet dans un tunnel routier incurvé et ses effets sur le système de ventilation du tunnel. Il a été constaté que les variations de la pression statique et dynamique dans un tunnel incurvé sont non monotones. Après les jets, la pression augmente progressivement, mais cette augmentation est suivie par une chute brusque et ensuite une récupération d'augmentation. C'est attribué à l'interaction entre les jets et les parois incurvées du tunnel.

Une augmentation brusque de la pression est entraînée quand le jet atteint la paroi incurvée, et comme la paroi est proche aux ventilateurs, elle cause une réduction sur la pression. L'écoulement devient dissymétrique en aval des jets. La mise au point des jets dépend de la séparation des ventilateurs et la distance entre les ventilateurs et les parois du tunnel. L'augmentation de l'espace entre les ventilateurs ou l'éloignement de plafond du tunnel rend les jets répandus plus rapidement à travers la section transversale.

La distance nécessaire pour le rétablissement complet de la pression est à environ 90-120 m dans cette étude. Le coefficient de l'augmentation de pression le plus grand est obtenu lorsque les ventilateurs sont disposés selon la distance de 2,4 m entre les ventilateurs, les ventilateurs compensés de 0,5 m à partir de la ligne médiane vers la paroi convexe, et le rapport de la distance entre les ventilateurs et le plafond au diamètre de fans de 1.77 m

K.C. Karki et al [19] ont réalisé une étude pour valider le modèle CFD (computational fluid dynamics) pour un système de ventilation longitudinale des tunnels. Le modèle utilisé inclut la turbulence, le feu, le transport radiatif et les fumées ainsi que la ventilation. Le code utilisé est appelé COMPACT-3D, où la turbulence est représentée par le modèle $k-\epsilon$. Les modèles de ventilation, de transfert radiatif et de fumée sont inclus. Le feu est représenté par une source de chaleur et de fumée. Le modèle ne simule pas le processus de combustion. Par contre le taux de transfert de chaleur dû à la combustion est représenté par une source de chaleur volumétrique au voisinage du feu.

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

Au vu de cette étude bibliographique, la modélisation de la ventilation, de la propagation des fumées et des feux dans les tunnels est principalement recherchée. Cette tendance est liée d'une part aux coûts élevés des expériences à grande échelle, et d'autre part à l'accroissement de la puissance des moyens informatiques, favorisant la simulation numérique. Les codes utilisés sont souvent validés sur une série d'expérience menée dans une configuration bien définie. La qualification de ces codes nécessite dès lors des résultats expérimentaux supplémentaires.

Des études complémentaires sur le comportement des feux et des fumées en milieu confiné et ventilé mécaniquement sont encore indispensables pour l'amélioration de la sécurité dans des tunnels routiers. Dans notre étude, l'objectif principal est la simulation numérique de l'optimisation de l'angle d'inclinaison et la position de fixation des ventilateurs par rapport au plafond et l'étude de certains effets sur le comportement de la fumée en aval dans un tunnel.

Chapitre 3

Chapitre 3 : Simulation numérique

L'étude numérique présentée dans ce chapitre s'appuie sur l'utilisation du code FDS version 5. Ses principales caractéristiques sont résumées ci-après. Une attention particulière est portée aux modélisations du ventilateur de jet, de la source de feu et de choix du maillage. La description de FDS est basée sur les informations contenues dans le guide de l'utilisateur [21] et le guide des références techniques [22] accompagnant le programme.

3.1. Description de l'outil numérique FDS

FDS (Fire Dynamic Simulator) est un code de simulation numérique, spécialisé dans la simulation de la propagation des fumées et des feux. En plus, il peut simuler d'autres types des problèmes tels que les transferts thermiques entre les solides et les gaz. Il est basé sur la résolution des équations de Navier-Stokes pour les écoulements avec transfert de chaleur.

Il a été originalement conçu pour analyser les feux à grandes échelles. 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. Le code FDS est muni de 3 modèles intégrés [21] qui permettent de simuler un feu.

FDS comme tous les logiciels CFD passe par trois étapes pour la simulation des phénomènes (voir figure 3.1). Premièrement, le préprocesseur qui est un fichier d'entrée de type texte (extension : .fds) sur le quel on spécifie le domaine de calcul, la géométrie et les conditions aux limites. Ce fichier doit être compilé et exécuté par le solveur qui est dans ce cas FDS.5. Finalement, les résultats des simulations peuvent être visualisés sur le post-processeur qui est accompagné par un fichier appelé Smokeview et un autre fichier Excel.

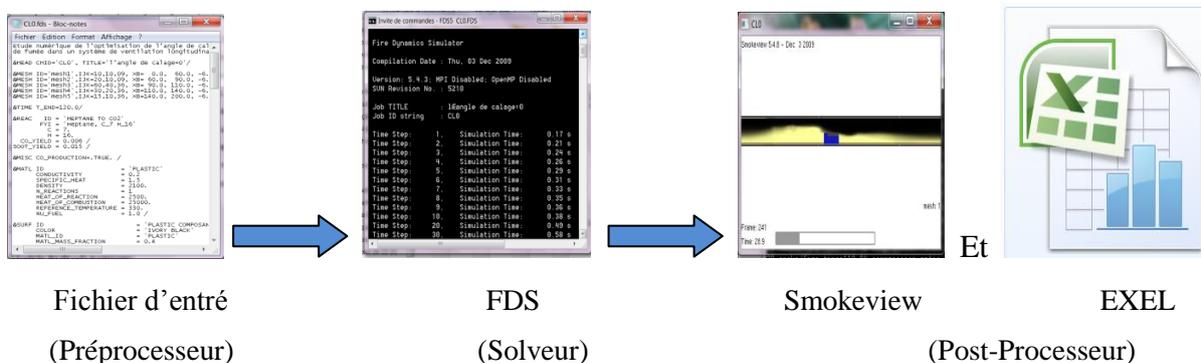


Figure 3.1 : Schéma de fonctionnement de FDS

3.2. Modèles présents dans FDS

- **Modèle hydrodynamique:**

Il permet de résoudre une forme des équations de Navier et Stokes appropriée aux écoulements de faible nombre de Mach à l'aide d'un algorithme explicite de type prédiction - correction d'une précision du second ordre. La turbulence est traitée à l'aide de la méthode LES (mode par défaut). Le code FDS peut également faire la résolution en mode DNS si le maillage considéré est assez fin. Les termes dissipatifs sont calculés directement.

Le choix entre LES et DNS dépend de la nature du problème et de l'objectif du calcul. Par exemple, pour une simulation de la propagation des fumées dans un large espace, il n'est pas possible de calculer les équations de transport et de combustion directement. Par contre, pour simuler une combustion à petite échelle, le calcul des équations de transport et de combustion peut se faire dans un certain niveau. Les équations associées aux modèles hydrodynamiques sont :

- Conservation de la masse :

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

- Équation de conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \nabla (uu) + \nabla P = \rho f + \nabla \tau_{ij} \quad (3.2)$$

- Équation de conservation de l'énergie :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla (uh) = \frac{DP}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla q + \Phi \quad (3.3)$$

- Équation d'état pour les gaz parfaits :

$$P = \frac{\rho RT}{M} \quad (3.4)$$

Où :

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

u , représente le champ de vitesse ;

P , représente le champ de pression ;

T , représente le champ de température ;

f , représente le terme des forces (forces de gravité, frottement entre les particules...) ;

$$\nabla \tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} = \mu \left(2\delta_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla u) \right) \quad (3.5)$$

$$\delta_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.6)$$

δ_{ij} : Symbole de Krönecker

q''' : la chaleur dégagée par unité de volume ;

q : la densité de flux de chaleur.

- **Modèle de combustion :**

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

- **Transport des effets radiatifs**

La représentation des effets radiatifs est incluse dans le modèle par la résolution de l'équation de transport radiative pour un gaz gris non diffusif. La résolution est similaire à la méthode utilisée dans les volumes finis pour le transport convectif.

Toutes les surfaces solides sont associées à une condition limite thermique outre des informations sur le comportement du brûlage du matériau. Les transferts de masse et de chaleur sont estimés en utilisant des corrélations empiriques. Sur FDS, toutes les émissivités des solides sont prises par défauts égaux à 0.9.

3.3. Modélisation de la turbulence

Le code FDS permet l'utilisation de la méthode LES ou bien DNS. Il faut noter que, le temps de calcul avec la méthode DNS est presque 100 fois celui de la méthode LES

- **Modélisation en utilisant la technique LES**

La différence importante entre les codes CFD réside dans le traitement de la turbulence. Sur FDS, il n'existe que les deux méthodes de traitement de la turbulence LES et DNS. La technique LES est utilisée pour modéliser les processus dissipatifs (viscosité, conductivité thermique) qui se produisent à une petite échelle par rapport aux échelles explicitées pour la résolution numériques. Les coefficients μ_{LES} , k et D correspondant à ces processus ne peuvent être utilisés directement. Dans la majorité des cas, ils sont remplacés par des expressions qui modélisent leurs impacts sur la forme approximative des équations associées. A titre d'exemple, la viscosité modélisée en LES est donnée par Smargorinsky [20] :

$$\mu_{LES} = \rho \cdot (C_s \Delta)^2 \sqrt{\left(2\overline{S_{ij}} \overline{S_{ij}} - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \overline{u})^2\right)} \quad (3.7)$$

Avec :

C_s : une constante empirique

Δ : la taille de la maille

S_{ij} : les termes « filtrés »

Le modèle, qui utilise la viscosité modélisée, μ_{LES} , permet de stabiliser l'algorithme numérique, spécialement où la vorticité est générée [20]. Les termes de diffusivité et de conductivité sont exprimés de la même manière.

- **Modélisation en utilisant la DNS**

Dans cette technique, la viscosité, la conductivité thermique et la diffusivité sont approchées par des lois cinétiques. La viscosité en DNS, peut se modéliser à partir de :

$$\mu_{DNS} = \sum_l Y_l \mu_l \quad , \quad \mu_l [Kg / m \ s] = \frac{26.69 \times 10^{-7} \sqrt{M_l T}}{\sigma_l^2 \Omega_v} \quad (3.8)$$

Où :

σ_l : le diamètre de la sphère de Lennard-Jones [Å];

Ω_0 : le coefficient de diffusion par collision;

l : l'indice de l'espèce.

Cette viscosité est d'autant plus importante dans la combustion et la dépendance en température de chaque coefficient est importante. La résolution des équations spécifiques pour les deux méthodes dépend du filtre spectral, l'intervention du nombre de Reynolds joue toujours le premier rôle puisqu'on peut montrer que ce dernier est une puissance inverse de la taille de la maille. Autrement dit, à partir d'un certain nombre de Reynolds, le calcul avec la DNS devient impossible. On note que ces paramètres sont définis par défaut sur FDS 5 et leur changement ne peut se faire qu'en accédant au code source du logiciel.

3.4. Domaine de calcul sur FDS

Tout le calcul sur FDS 5 repose sur des données enregistrées dans un fichier «*nom.fds*» qui représente la première étape avant de procéder au calcul. Les données d'entrée déterminent la taille physique du domaine, le maillage et d'autres géométries additionnelles. L'écriture des données se fait à l'aide de liste de noms intégrés dans le code (GRID, VENT, OBST.....), suivies par des paramètres de repérage.

Le domaine de calcul est spécifié par le groupe MESH. L'attribution d'un système de coordonnées est nécessaire. Les tunnels sont représentés conformément aux dimensions spécifiées.

La génération de l'ouverture et de la cloison pourra se faire de deux manières : la première consiste à créer des obstructions. Ceci se fait à l'aide du groupe OBST. La deuxième méthode est légèrement moins longue que la première. Elle consiste à générer une cloison à l'aide de OBST et de spécifier la présence d'une ouverture l'aide de HOLE qui décrit la présence d'un trou dans l'obstacle. Ainsi toute maille solide présente dans l'intervalle décrit par HOLE sera éliminée.

Un exemple de fichier texte est présenté par la figure (3.2). Cet exemple correspond à la simulation de la ventilation longitudinale par un ventilateur de jet dans un tunnel.

```

CSP2.fds - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
Etude numérique de l'optimisation de l'angle de calage du ventilateur d'extraction
de fumée dans un système de ventilation longitudinal de tunnel.

&HEAD CHID='CS0-2', TITLE='l'angle de calage=0, position 2' /

&MESH ID='mesh2',IJK=36,10,09, XB= 60.0, 90.0, -6.42,6.42,0.0,6.42/
&MESH ID='mesh3',IJK=80,40,36, XB= 90.0, 110.0, -6.42,6.42,0.0,6.42/
&MESH ID='mesh4',IJK=40,20,36, XB=110.0, 140.0, -6.42,6.42,0.0,6.42/
&MESH ID='mesh5',IJK=72,10,18, XB=140.0, 260.0, -6.42,6.42,0.0,6.42/

&TIME T_END=100.0/

&SURF ID='BLOW', POROUS=.TRUE., VEL=52.2 /

&OBST XB= 98.5, 101.5,-0.32,-0.32, 5.14, 5.78, COLOR='BLUE' /
&OBST XB= 98.5, 101.5, 0.32, 0.32, 5.14, 5.78, COLOR='BLUE' /
&OBST XB= 98.5, 101.5,-0.32, 0.32, 5.14, 5.14, COLOR='BLUE' /
&OBST XB= 98.5, 101.5,-0.32, 0.32, 5.78, 5.78, COLOR='BLUE' /

&OBST XB= 100.0, 100.0,-0.32, 0.32, 5.14,5.78, COLOR='RED', SURF_ID='BLOW' /

&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /

&SLCF PBX=0.0,QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=0.0,QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBX=0.0,QUANTITY='U-VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBZ=0.0,QUANTITY='VELOCITY' /
&SLCF PBZ=6.42,QUANTITY='VELOCITY' /

&SLCF PBZ=0.0,QUANTITY='U-VELOCITY' /
&SLCF PBZ=6.42,QUANTITY='U-VELOCITY' /

&DEVC XYZ=108.0,0.0,0.535, QUANTITY='U-VELOCITY' /
&DEVC XYZ=108.0,0.0,1.070, QUANTITY='U-VELOCITY' /
&DEVC XYZ=108.0,0.0,1.605, QUANTITY='U-VELOCITY' /
&DEVC XYZ=108.0,0.0,2.140, QUANTITY='U-VELOCITY' /
&DEVC XYZ=108.0,0.0,3.210, QUANTITY='U-VELOCITY' /
&DEVC XYZ=108.0,0.0,3.745, QUANTITY='U-VELOCITY' /
&DEVC XYZ=108.0,0.0,4.280, QUANTITY='U-VELOCITY' /
&DEVC XYZ=108.0,0.0,4.815, QUANTITY='U-VELOCITY' /
&DEVC XYZ=108.0,0.0,5.350, QUANTITY='U-VELOCITY' /
&DEVC XYZ=108.0,0.0,5.885, QUANTITY='U-VELOCITY' /
&DEVC XYZ=108.0,0.0,6.420, QUANTITY='U-VELOCITY' /
    
```

Figure 3.2 : Exemple d'un fichier d'entrée (Pré-Processeur)

a) Ventilateur de jet (extracteur)

Pour créer un ventilateur de jet dans FDS.5, il est nécessaire d'utiliser cinq obstructions « OBST ». Les quatre premiers « OBST » présentent les parois qui couvrent le ventilateur, et le dernier « OBST » présente le ventilateur lui-même. La vitesse de jet qui est générée par le ventilateur, est présentée par « VEL= ».

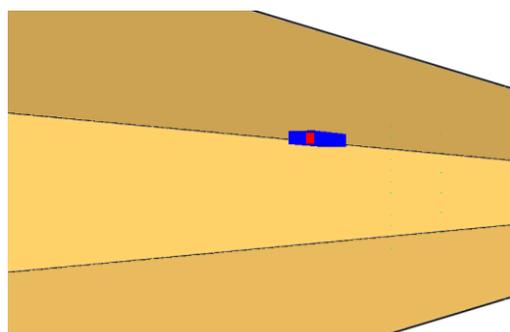


Figure 3.3 : Exemple d'un ventilateur de jet

L'inconvénient dans l'utilisation du code FDS réside dans la génération de surfaces circulaires, ce qui est le cas du ventilateur de jet. Il est remplacé par une forme rectangulaire de section équivalente à une forme circulaire. Si l'utilisateur est amené à créer des surfaces circulaires, il pourra le faire en la décomposant en petits carrés.

b) Géométrie non-rectangulaire

Comme il est expliqué précédemment, il est nécessaire de créer une géométrie non-rectangulaire telle que, une paroi inclinée, dans ce cas-là on peut utiliser des petits carrés avec la commande « SAWTOOTH=.FALSE » pour éviter l'impact de ces carrés sur l'écoulement (Figure 3.2).

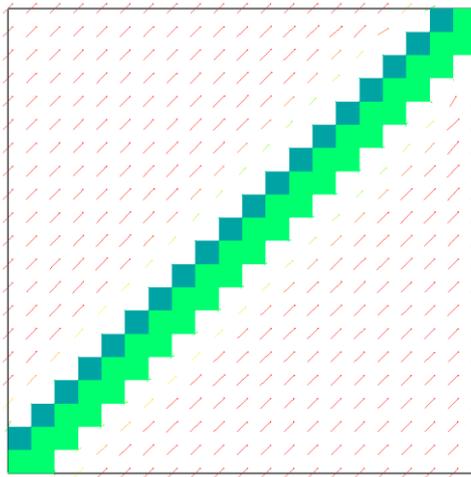


Figure 3.4: Exemple simple de "SAWTOOTH=.FALSE"

3.5. Maillage sur FDS

Le choix du maillage dépend de la complexité de la géométrie. Le seul maillage existant sur FDS est le maillage structuré, c'est-à-dire la forme de mailles est parallélépipédique. La taille des mailles est spécifiée dans chaque direction du système de coordonnées à l'aide de (&MESH ID='mesh1', IJK=, XB= /) (IJK : nombres de mailles suivant x, y et z). De plus, il est conseillé de choisir des tailles de mailles de la forme : j et $k = 2^l 3^m 5^n$. Ceci revient au fait que, l'algorithme de calcul utilise un filtrage statistique, basé sur les transformées de Fourier rapides.

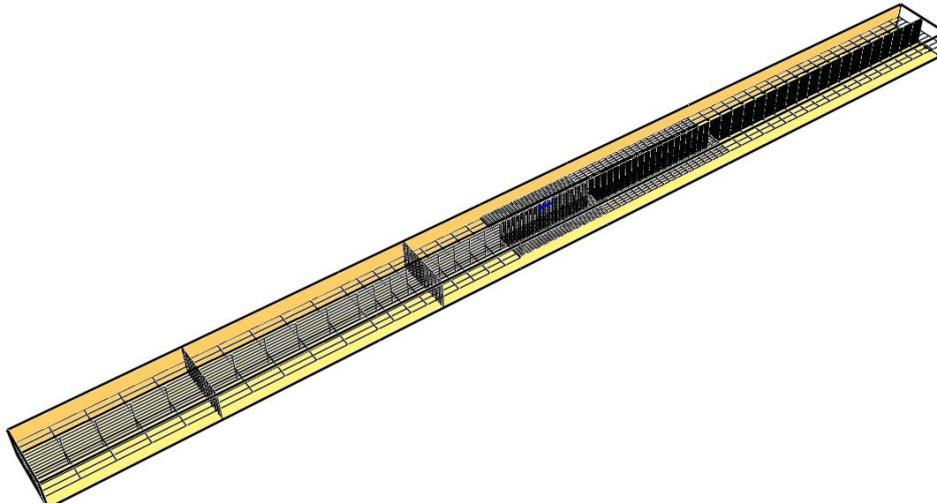


Figure 3.5 : Maillage sur FDS

Après l'établissement de ces données sur le fichier correspondant, il faudra spécifier les données de sorties, s'ils sont des iso-surfaces, des distributions de vitesses ou de concentration... Il est nécessaire de savoir que toutes ces données doivent être validées avant le lancement du calcul. Aucune modification ne pourra être faite après le démarrage du calcul itératif.

L'avantage FDS est qu'on peut spécifier une commande de mesure au cours du calcul, ce qui permet de retrouver facilement la distribution temporelle d'une variable (densité, vitesses, flux de chaleur). Donc son utilisation dans notre étude est fortement recommandée.

3.6. Problématique

Les tunnels unidirectionnels qui ont des longueurs inférieures ou égales à 3000 m sont équipés de systèmes de ventilation longitudinale pour assurer un bon niveau de confort de service ordinaire et une sécurité en cas incendie.

Dans le système de ventilation longitudinale, les extracteurs sont installés horizontalement à une certaine distance du plafond. Le jet en contact de la paroi de plafond génère une contrainte de cisaillement et perturbe l'écoulement dans le tunnel (figure 3.6). Pour réduire cette contrainte et améliorer l'efficacité de l'installation, une inclinaison des extracteurs vers le sol d'un angle donné est introduite.

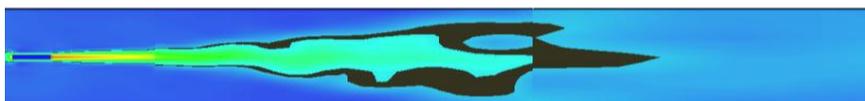


Figure 3.6 : Champ de la contrainte de cisaillement au plafond

3.7. Domaine de calcul de l'étude

Un tunnel avec la ventilation longitudinal est présenté dans la figure 3.7 (a). Une partie de ce tunnel de 250 m de long, 12,84 m de large et 6,42 m de hauteur est illustrée dans la figure 3.7 (b). Le système de ventilation du tunnel est réalisé avec un extracteur. Ce dernier est installé à une distance de 100 m à partir de la section d'entrée et de 150 m de la section de sortie au milieu du domaine physique par rapport à la largeur. Le feu considéré est juste après l'extracteur à 112m de l'entrée du tunnel (cas d'étude 2). Ces distances ont été choisies pour permettre la décharge complète du flux d'air généré par le ventilateur dans le flux d'air du tunnel. En plus, ils permettent le développement suffisant du profile de vitesse dans le tunnel. Dans le cas d'étude 1, aucun véhicule n'est pris en compte dans le tunnel, alors que dans le cas d'étude 2, le seul véhicule en feu est présent dans le tunnel.

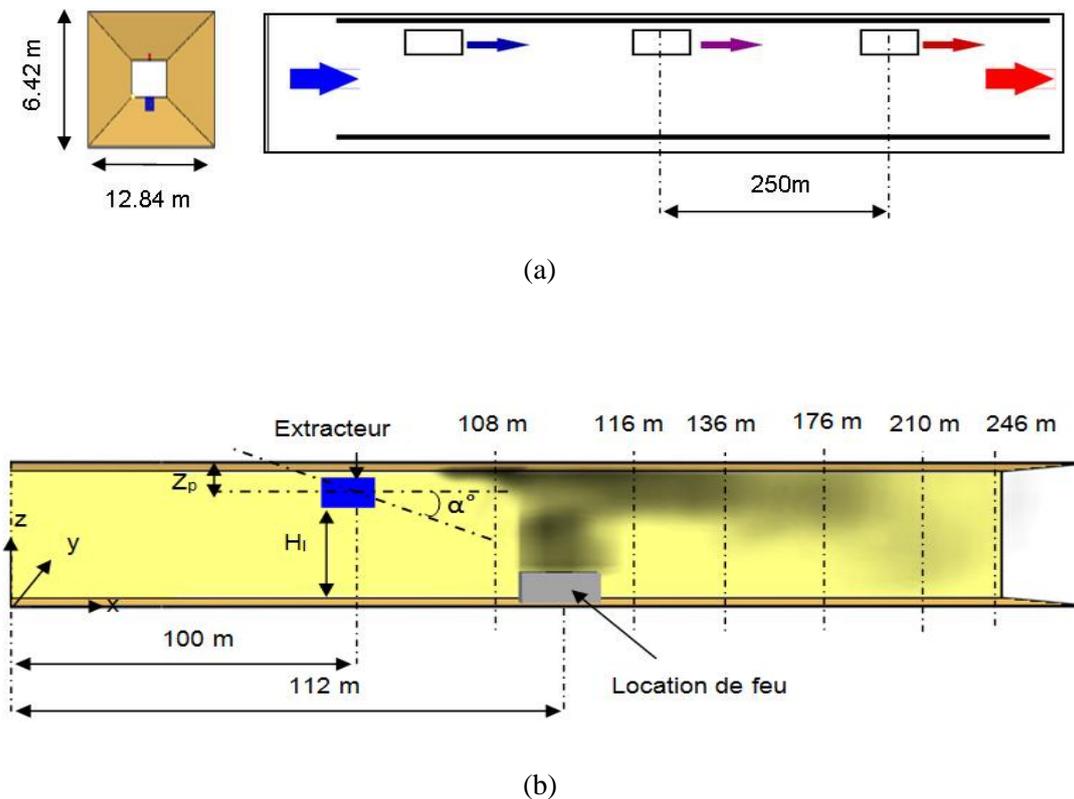


Figure 3.7 : Schéma descriptif du domaine de calcul

H_i présente la hauteur utile (m) dans le tunnel

3.8. Conditions initiales et aux limites

Dans le cas d'étude 1, il n'y a aucun feu, l'écoulement dans le tunnel est isotherme. Sur les parois, une condition de non-glissement, une température constante (prise égale à 20 ° C) et un flux initial nul de tunnel à l'entrée sont considérés. À l'entrée et à la sortie du tunnel, la température et la pression sont celles de l'ambiance. La vitesse de sortie du ventilateur est de 50 m/s. Le ventilateur est de 0,64 m de diamètre et 3 m de longueur. Les profils de vitesse axiales sont mesurés au niveau de sections transversales $x = 108$ m, $x = 116$ m, $x = 136$ m, $x = 176$ m, $x = 210$ m et $x = 246$ m à partir de l'entrée du tunnel, figure 3.8. Dans le cas d'étude 2, les conditions initiales et aux limites du cas 1, et un incendie d'un véhicule, situé à 112 m de l'entrée du tunnel, générant une puissance thermique constante de 10 MW sont considérés. Cela correspond à 1390 W/m^2 pour une plate-forme de $(4 \times 1.8) \text{ m}^2$. Pour mesurer la température, des capteurs sont placés le long du milieu du tunnel ($y = 6,42$ m) à 2 m de hauteur. La simulation numérique est effectuée pour l'ensemble du domaine.

3.9. Choix de maillage

Dans cette étude, le domaine physique est divisé en trois sous-domaines A, B et C (tableau 3.1), avec différents nombres des mailles dans les trois directions de la forme (figure 3.8).

Pour assurer des résultats acceptables, il est nécessaire de choisir un bon maillage. La technique est de minimiser la taille des mailles avec la comparaison entre les résultats des simulations, jusqu'à l'obtention d'un maillage plus favorable, figure 3.9 et 3.10.

Tableau 3.1 : Différents maillages de domaine du calcul

	A	B			C
ΔX	1,5	0,6	0,16	0,11	1
ΔY	0,8	0,32	0,32	0,32	0,32
ΔZ	0,6	0,18	0,18	0,18	0,35

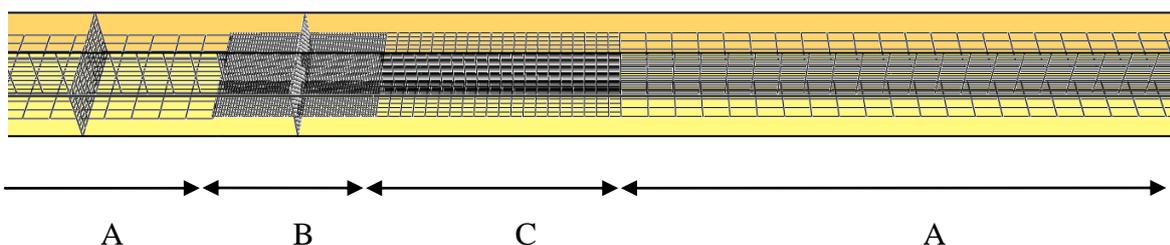


Figure 3.8 : Maillage de domaine du calcul

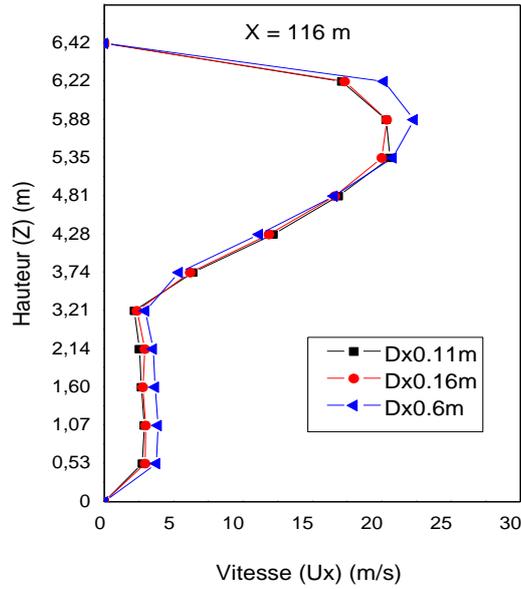


Figure 3.9 : Profile de vitesse pour différents maillages à x=116 m

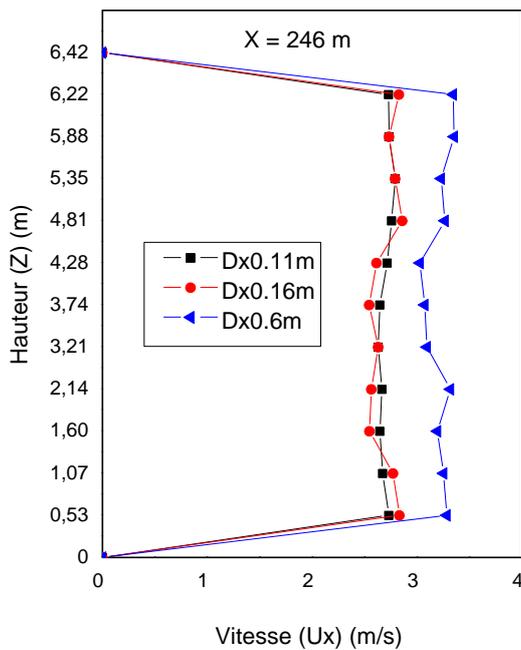


Figure 3.10 : Profile de vitesse pour différents maillages à x=246 m

3.10. Temps de simulation

Les simulations sont réalisées sur un temps de 180 s. A la hauteur de 5,88 m, on remarque qu'à partir de 10 s, les valeurs de vitesse axiale fluctuent entre 10 et 20 m/s. A partir de 120 s, les valeurs de vitesse axiale fluctuent autour de 16 m/s.

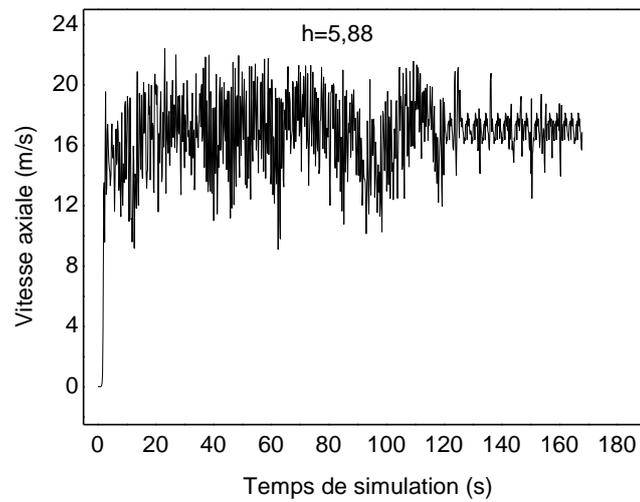


Figure 3.11 : Variation de la vitesse axiale maximale en fonction du temps, à la hauteur 5,88 m

A l' hauteur de 2,14 m, les valeurs de vitesse axiale augmente jusqu'à 2,8 m/s à 100 s. A partir de 100 s, les valeurs de vitesse axiale fluctuent autour de 2,8 m/s.

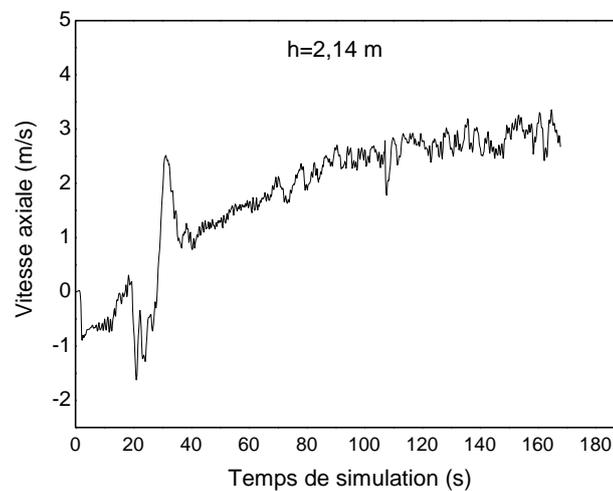


Figure 3.12 : Variation de la vitesse axiale maximale en fonction du temps, à la hauteur 2,14 m

3.11. Validation de calcul

La figure 3.9 présente l'évolution de la vitesse axiale maximale en fonction de la distance a l'extracteur pour trois configurations ($\alpha = 0^\circ$ et $Z_p = 0,96$ m), ($\alpha = 0^\circ$ et $Z_p = 1,28$ m) et ($\alpha = 0^\circ$ et $Z_p = 1,92$ m).

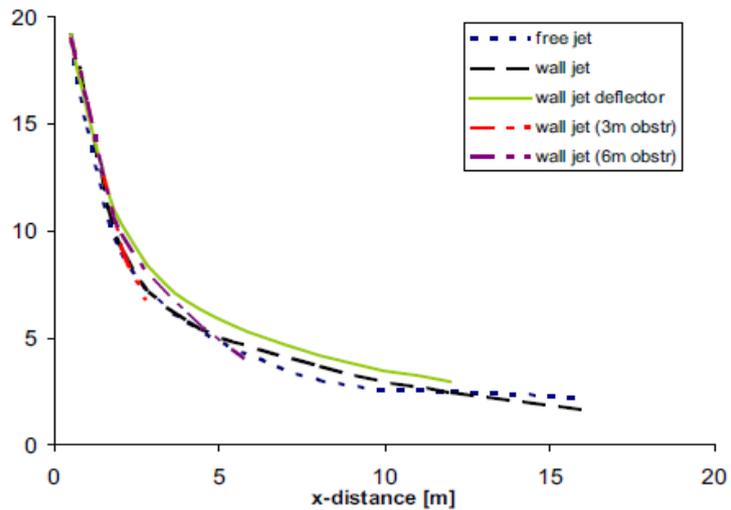
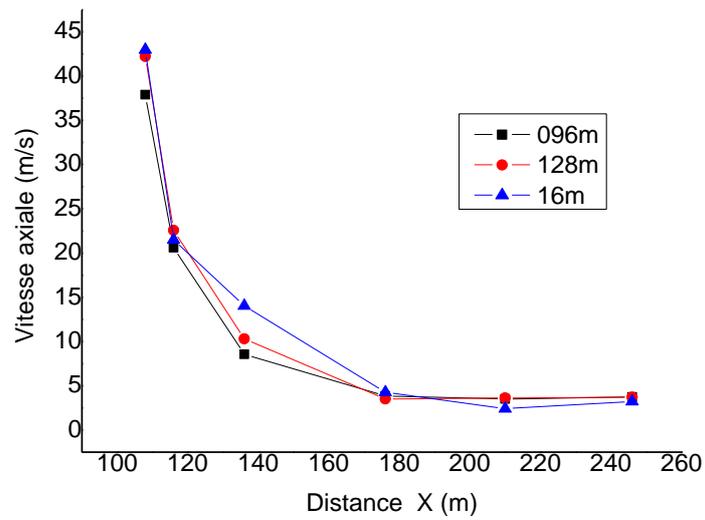


Figure 3.13 : Variation de la vitesse axiale maximale en fonction de la distance a l'extracteur

On remarque que la vitesse diminue quand on s'éloigne de l'extracteur. L'évolution de la vitesse est qualitativement similaire à de Giesen et al. [14]

Chapitre 4

Chapitre 4 : Résultats et l'interprétation

4.1. Cas 1: Extracteur horizontal (angle de calage $\alpha=0^\circ$, Z_p différent)

Les profils de vitesse d'extraction (soufflage) à des différents sections du tunnel pour les positions de fixation de l'extracteur Z_p de 0,32 m à 1,92 m par rapport au plafond sont déterminées, (figure 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 et 4.6). La vitesse axiale est représentée en fonction de la hauteur du tunnel aux sections axiales de mesure le long du tunnel, $x=108, 116, 136, 176, 210$ et 246 m. La limite inférieure de positionnement (fixation) de l'extracteur est de $Z_p=1,60$ m. Pour maintenir une hauteur utile de 4.5 m dans le tunnel (70% de l'hauteur réelle du tunnel). Par rapport aux positions de fixation de l'extracteur, les hauteurs utiles sont calculées et présentées sur le tableau 4.1

Tableau 4.1 : Différents positions de l'extracteur et les hauteurs utiles

La position Z_p (m)	0.32	0.64	0.96	1.28	1.60	1.92
L'hauteur utile H_l (m)	5,78	5,46	5,14	4,82	4,5	4,18

4.1.1. Evolution de la vitesse axiale en fonction de la position de ventilateur

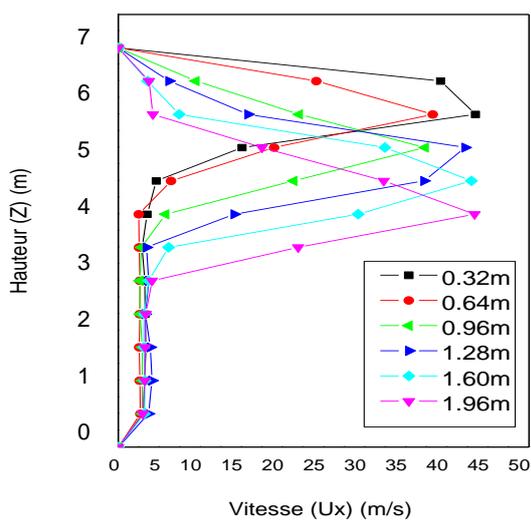


Figure 4.1 : Vitesse axiale à $X = 108$ m pour différents positions de l'extracteur

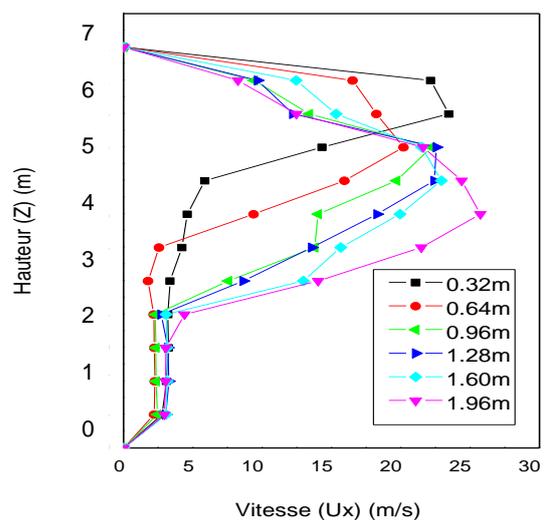


Figure 4.2 : Vitesse axiale à $X = 116$ m pour différents positions de l'extracteur

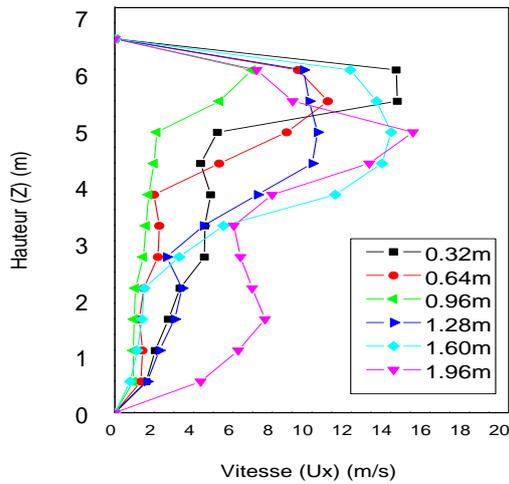


Figure 4.3 : Vitesse axiale à X = 136 m pour différents positions de l'extracteur

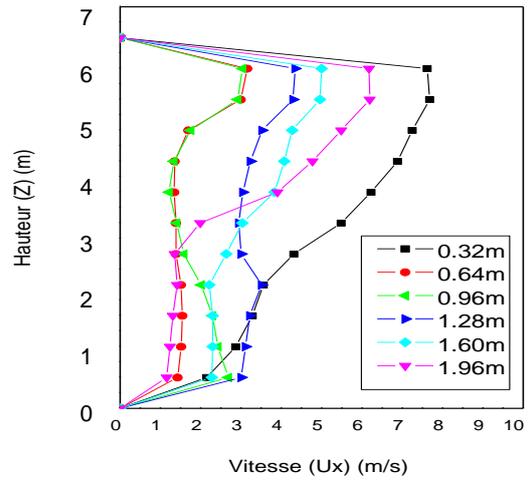


Figure 4.4 : Vitesse axiale à X = 176 m pour différents positions de l'extracteur

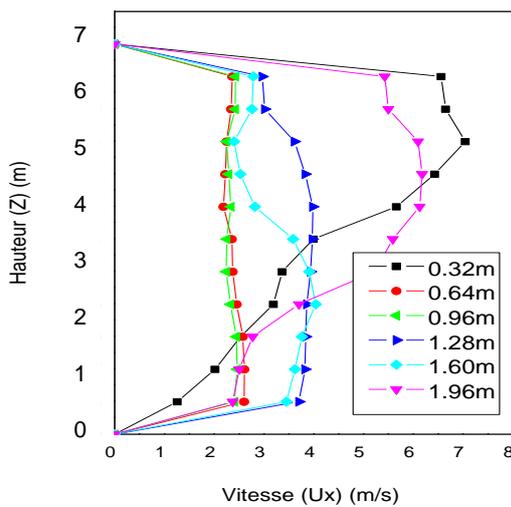


Figure 4.5 : Vitesse axiale à X = 210 m pour différents positions de l'extracteur

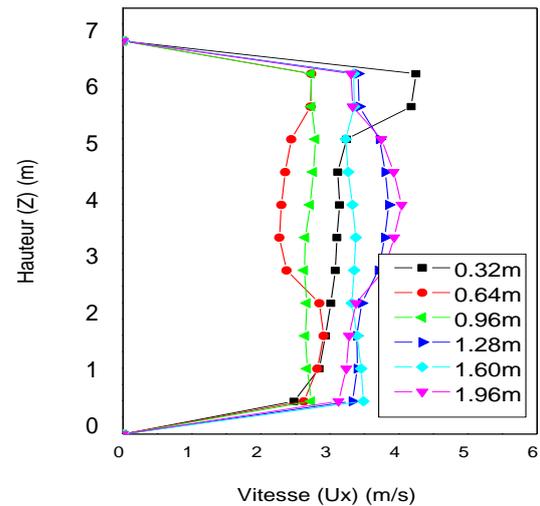


Figure 4.6 : Vitesse axiale à X = 246 m pour différents positions de l'extracteur

D'après les figures 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 et 4.6, on peut noter que :

Les profils de vitesse sont qualitativement similaires pour les différentes positions de fixation de l'extracteur. Les profils de la vitesse axiale obtenus montrent qu'un maximum est atteint à la section de mesure de $x= 108$ m. Le maximum de la vitesse axiale croît avec la position de fixation de l'extracteur à partir de $Z_p= 0,64$ m, (figure 4.7). On remarque que cette vitesse décroît quand l'extracteur est fixé entre $Z_p= 0.32$ et 0.64 m. La figure 4.8, montre

que le pic (vitesse axiale maximale) décroît avec l'augmentation de Z_p , le long de la hauteur du tunnel.

Les résultats de la vitesse axiale à la section transversale $x=116$ m présentent un même comportement que pour la position de l'extracteur $Z_p=0.32$ m. La distribution a tendance à s'élargir sur la hauteur du tunnel pour $Z_p=0.96$ m et $Z_p=1.6$ m. Dans ces deux dernières situations, le soufflage se fait sur les 2/3 de la hauteur du tunnel. Plus loin de l'éjection de l'air de l'extracteur, à $x=246$ m, les profils de la vitesse axiale deviennent uniformes mais faibles. La vitesse a diminué jusqu'à atteindre environ 3.5 m/s sur toute la hauteur du tunnel, (figure 4.6). Il peut être remarqué sur les figures 4.1 – 4.6, que le profil de vitesse axiale tend vers l'uniformité loin de l'injection de la quantité de mouvement du ventilateur, ceci est due au fait que plus l'extracteur est ramené vers le bas ($Z_p= 0.32$ m \rightarrow $Z_p = 1.6$ m) l'effet de la contrainte de cisaillement diminue et l'effet de symétrie plafond-sol augmente.

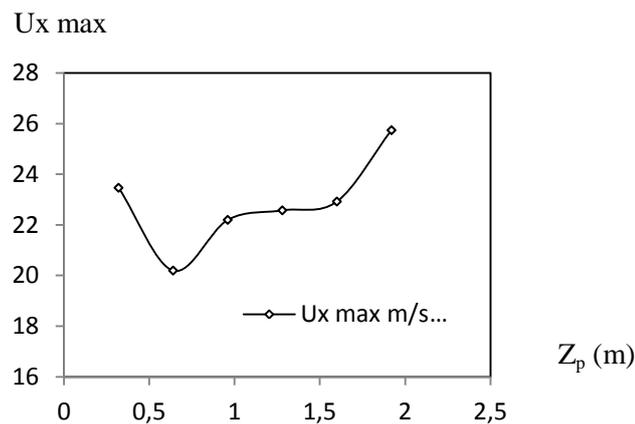


Figure 4.7 : Variation du maximum de la vitesse axiale en fonction de la position de l'extracteur

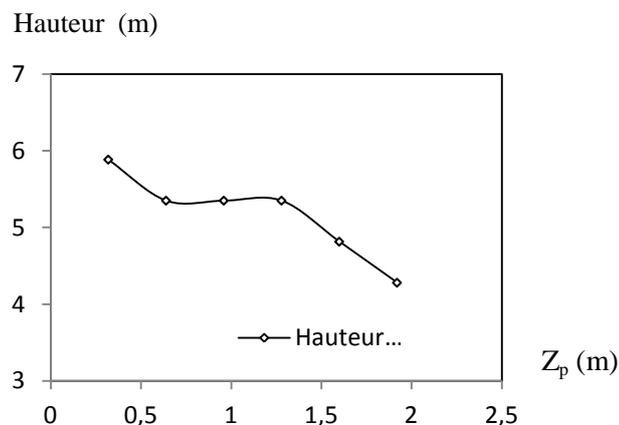


Figure 4.8 : Variation de la position de la vitesse axiale maximale par rapport à la hauteur du tunnel en fonction de la position de l'extracteur

4.1.2 Champs de vitesse et de la contrainte de cisaillement pour les différentes positions du ventilateur

Les figures 4.9, 4.10 et 4.11 représentent les champs de vitesse au plan (X, Z) et les champs de la contrainte de cisaillement au niveau du plafond et du plancher (plan X, Y) pour les différentes positions de fixation ($Z_p = 0.32, 0.64, 0.96, 1.6, 1.92$ m). L'objectif de cette étape est de visualiser l'effet de la variation de la position de l'extracteur sur la variation des contraintes de cisaillement et des champs des vitesses.

A cause du grand contact avec le plafond qui peut être vu clairement pour la position $Z_p = 0,32$ m de l'extracteur, le champ de vitesse est perturbé. Le champ de vitesse devient plus uniforme à des positions inférieures de l'extracteur et disparaît plus loin dans le tunnel.

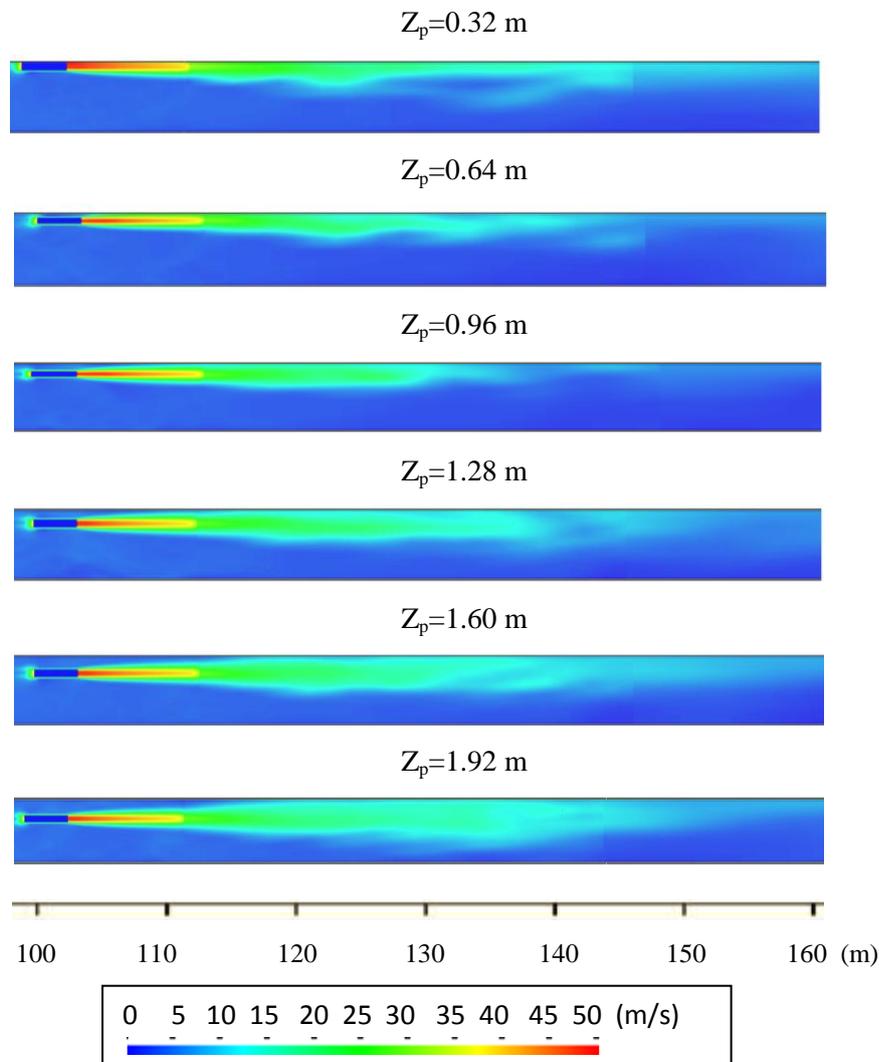


Figure 4.9 : Champ de la vitesse axiale dans un plan symétrique (XZ)

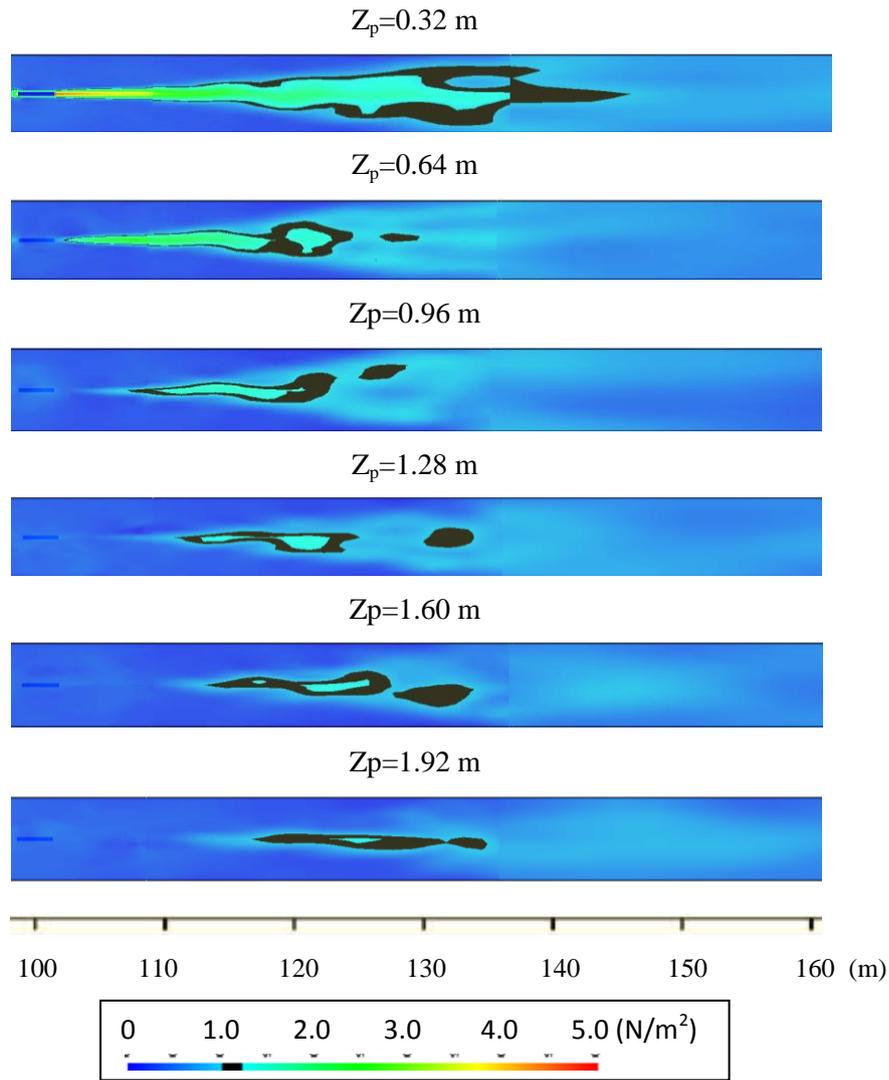


Figure 4.10: Champ de la contrainte de cisaillement au plafond (plan X, Y)

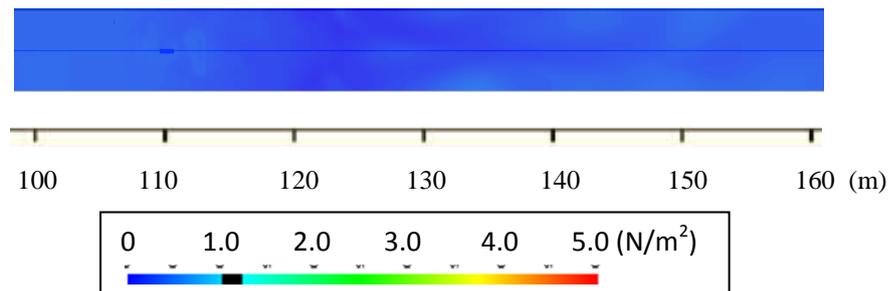


Figure 4.11 : Champ de la contrainte de cisaillement au plancher (plan X, Y)

La figure 4.10, montre les contraintes de cisaillement au plafond pour les différentes positions de fixation de l'extracteur. À $Z_p = 0.32$ m, on remarque un champ de cisaillement élevé sur une large surface au plafond et le long du tunnel. À partir de $Z_p = 0,64$ m jusqu'à

$Z_p = 1,92$ m, on peut noter que la contrainte de cisaillement au plafond du tunnel diminue et s'éloigne avec l'éloignement de l'extracteur du plafond.

La figure 4.10, montre que la contrainte de cisaillement au plancher est approximativement nulle pour toutes les positions du ventilateur.

4.1.3. Performances de la position d'extracteur

L'expression de la force de poussée de jet dans les tunnels est donnée par la relation suivante :

$$F_j = \rho A_j V_j^2 \quad (6)$$

L'expression de la force de poussée est aussi exprimée en fonction de la force de poussée de jet moyennent les coefficients k_1 de Kempf et k_2 de vitesse respectivement.

$$F_t = F_j \frac{k_1}{k_2} \quad (7)$$

$$\frac{1}{k_2} = \left(1 - \frac{v_t}{v_j}\right) \quad (8)$$

Avec

A : Section de tunnel

V_t : Vitesse moyenne de ventilation à une section donnée

V_j : Vitesse de jet

ρ : Masse volumique de l'air dans le cas isotherme.

Il est possible de déterminer la position optimale de l'extracteur en termes de facteur de performance (FP) défini comme suit :

$$FP = \frac{F_t(\text{à } Z_p=0,32 \text{ m})}{F_t(\text{à } Z_p>0,32 \text{ m})} \quad (9)$$

Le rapport entre la force de poussée de l'air qui assure un flux longitudinal dans le tunnel, pour $Z_p > 0,32$ m et celle correspondante à $Z_p = 0,32$ m est donné dans le tableau 4.2 le long du tunnel en différentes positions.

Tableau 4.2 : Force de poussé et facteur de performance pour les différentes positions

Z _p (m)	F _j (N)	803,8					
	x-section (m)	108	116	136	176	210	246
0,32	F _i (N)	454,5	484,5	509,2	513,1	520,5	532,1
	FP (-)	1	1	1	1	1	1
0,64	F _i (N)	470,9	481,7	522,8	545,9	539,9	538,1
	FP (-)	0,965	1,006	0,974	0,940	0,964	0,989
0,96	F _i (N)	465,1	467,9	541,0	543,1	540,3	536,9
	FP (-)	0,977	1,036	0,941	0,945	0,963	0,991
1,28	F _i (N)	443,5	459,1	506,9	530,5	527,6	528,7
	FP (-)	1,025	1,055	1,004	0,967	0,987	1,006
1,6	F _i (N)	443,2	447,4	495,5	530,7	531,8	530,8
	FP (-)	1,026	1,083	1,027	0,967	0,979	1,002
1,92	F _i (N)	441,6	440,3	484,8	526,9	518,1	528,9
	FP (-)	1,029	1,100	1,050	0,974	1,005	1,006

Plus on s'éloigne du jet, la force de poussée dans le tunnel augmente car elle ne dépend pas seulement à la vitesse qui a diminuée, mais des coefficients k_1 et k_2 caractérisas le tunnel.

La figure 4.12 représente la variation du facteur de performance en fonction de la longueur du tunnel pour les différentes positions de fixation ($Z_p = 0,32, 0,64, 0,96, 1,6, 1,92$ m) de l'extracteur.

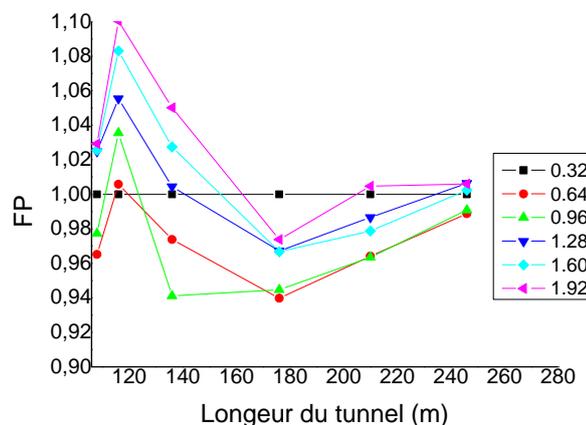


Figure 4.12 : Facteur de performance pour les différentes positions du ventilateur

4.2. Cas 2: Extracteur incliné avec différents angles de calage

Les profils de vitesse d'extraction pour les différents angles de calage ($\alpha = 0, 2, 4, 6, 8$ et 10°) de l'extracteur à $Z_p = 0,96$ m sont déterminés (figures 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 et 4.18). La vitesse axiale est représentée en fonction de la hauteur du tunnel aux sections axiales de mesure le long du tunnel, $x=108, 116, 136, 176, 210$ et 246 m.

Par rapport à la position de fixation de l'extracteur et les angles de calages, les hauteurs utiles sont calculées (tableau 4.3).

Tableau 4.3 : Différents angles de calage de l'extracteur

L'angle de calage α ($^\circ$)	0	2	4	6	8	10
La position Z_p (m)	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
L'hauteur utile H_l (m)	5,14	5,105	5,07	5,035	5,001	4,966

4.2.1 Evolution de la vitesse axiale en fonction de l'angle de calage

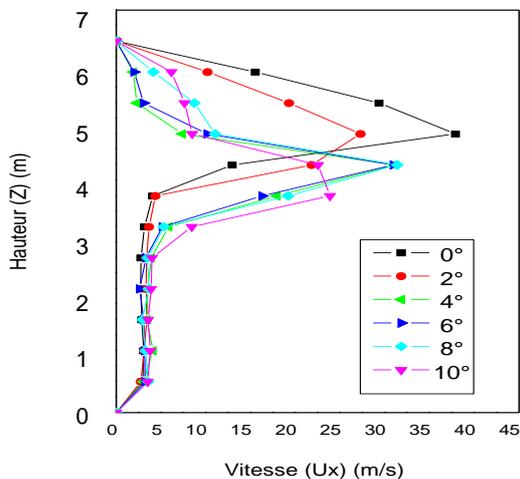


Figure 4.13 : Vitesse axiale à $X = 108$ m pour différents angles de calage

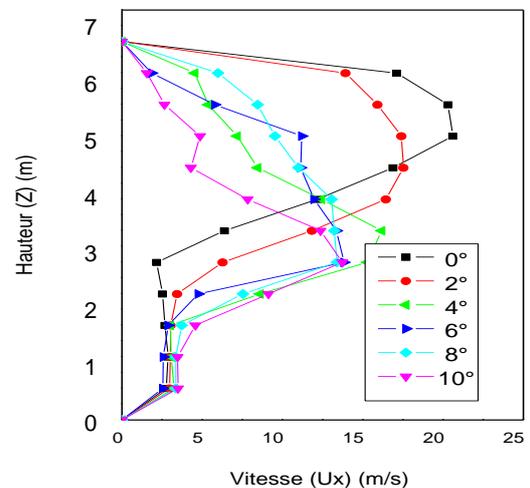


Figure 4.14: Vitesse axiale à $X = 116$ m pour différents angles de calage

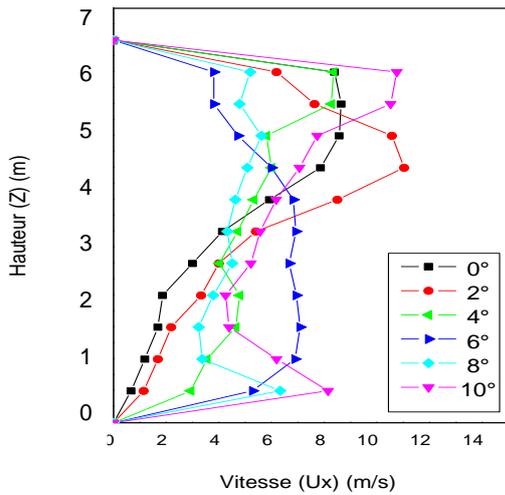


Figure 4.15 : Vitesse axiale à $X = 136$ m pour différents angles de calage

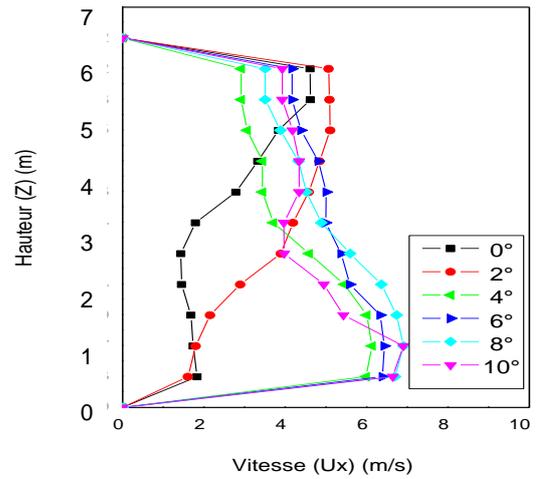


Figure 4.16 : Vitesse axiale à $X = 176$ m pour différents angles de calage

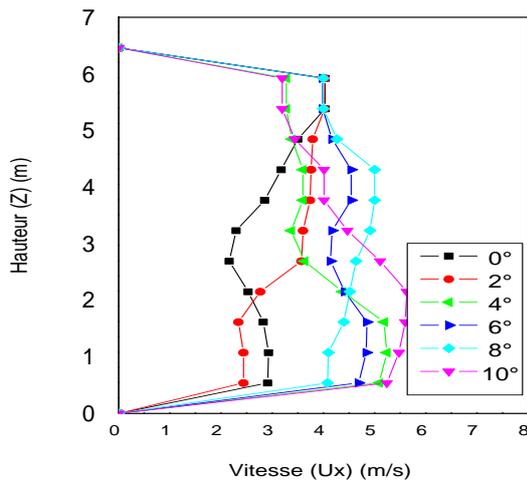


Figure 4.17: Vitesse axiale à $X = 210$ m pour différents angles de calage

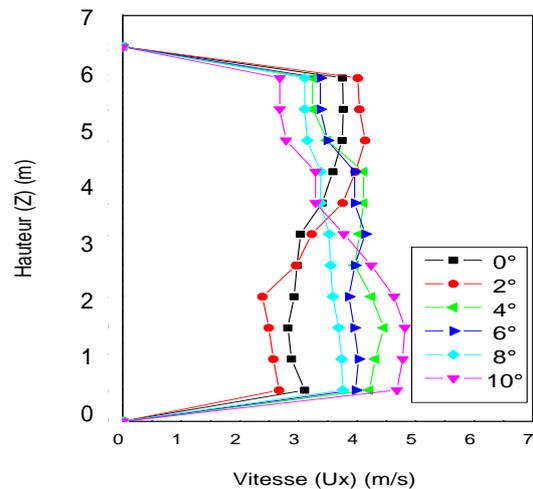


Figure 4.18 : Vitesse axiale à $X = 246$ m pour différents angles de calage

D'après les figures 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 et 4.18 on peut noter que :

Les profils de vitesse sont qualitativement semblables pour les différents angles de calage au voisinage proche et lointain de l'extracteur. Les profils de la vitesse axiale obtenus montrent qu'un maximum est atteint à la section de mesure de $x = 108$ m.

À partir de la figure 4.17, on peut noter que, à une distance $x = 210$ m la variation de la vitesse en fonction de la hauteur est faible par rapport aux profils de vitesses correspondants aux abscisses inférieures. Cette constatation est valable pour les autres angles de calage. Cela est dû à l'effet de symétrie plafond/plancher. D'après la figure 4.15, pour $\alpha = 4^\circ$ et $\alpha = 6^\circ$ cette variation devient faible à partir d'une abscisse inférieure ($x = 136$ m).

Le maximum de la vitesse axiale varie inversement proportionnellement avec l'angle de calage de l'extracteur, figure 4.19.

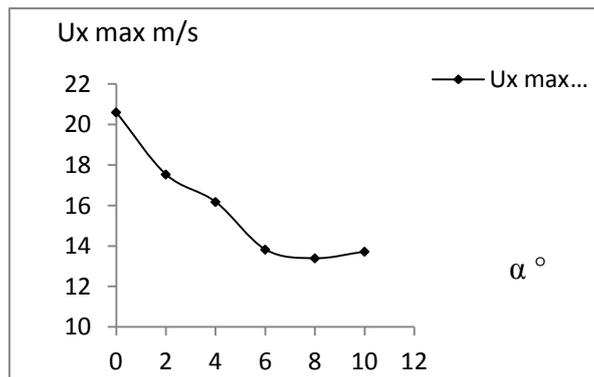


Figure 4.19 : Variation de la vitesse axiale maximale en fonction de l'angle de calage

La figure 4.20 montre que la vitesse axiale maximale varie inversement proportionnellement avec α par rapport à la hauteur du tunnel.

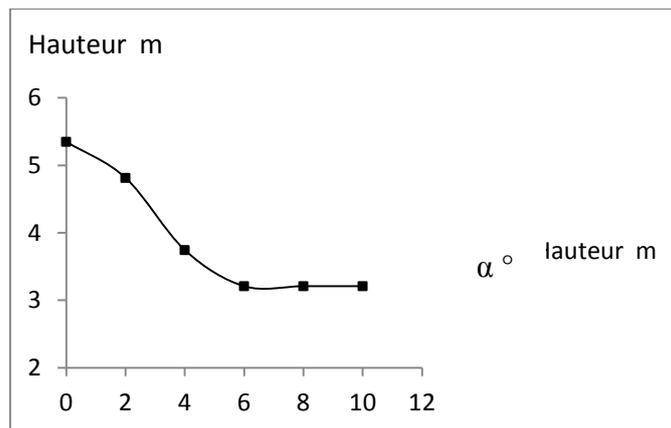


Figure 4.20 : Variation de la position de la vitesse axiale maximale par rapport à la hauteur du tunnel en fonction de l'angle de calage

4.2.2 Champs de vitesse et contrainte de cisaillement pour les différentes inclinaisons

Les figures 4.21, 4.22 et 4.23 représentent les champs de vitesse au plan (X, Z) et les champs de la contrainte de cisaillement au niveau du plafond et du plancher (plan X, Y) pour les différents angles de calage ($\alpha = 0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ$) de l'extracteur. L'objectif de cette étape est de déterminer l'effet de la variation de l'angle de calage sur la variation des champs contraints de cisaillement et sur les champs de vitesses.

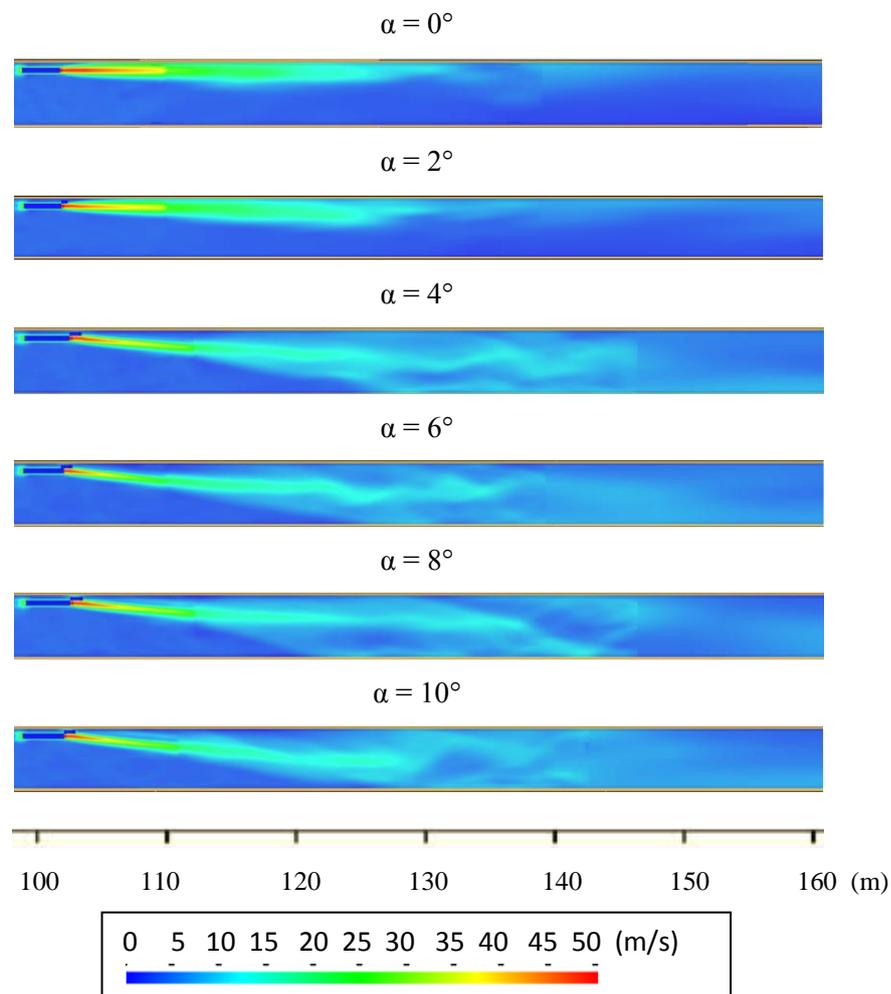


Figure 4.21 : Champ de vitesses axiales dans un plan symétrique (XZ)

La figure 4.21 montre que plus on augmente l'angle d'inclinaison plus le champ de vitesse s'étale sur la hauteur et la largeur du tunnel. Il est moins perturbé aux angles de calage petit. Il glisse sur la paroi du plafond. Aux angles de calage plus grand, il y a glissement au niveau de plancher.

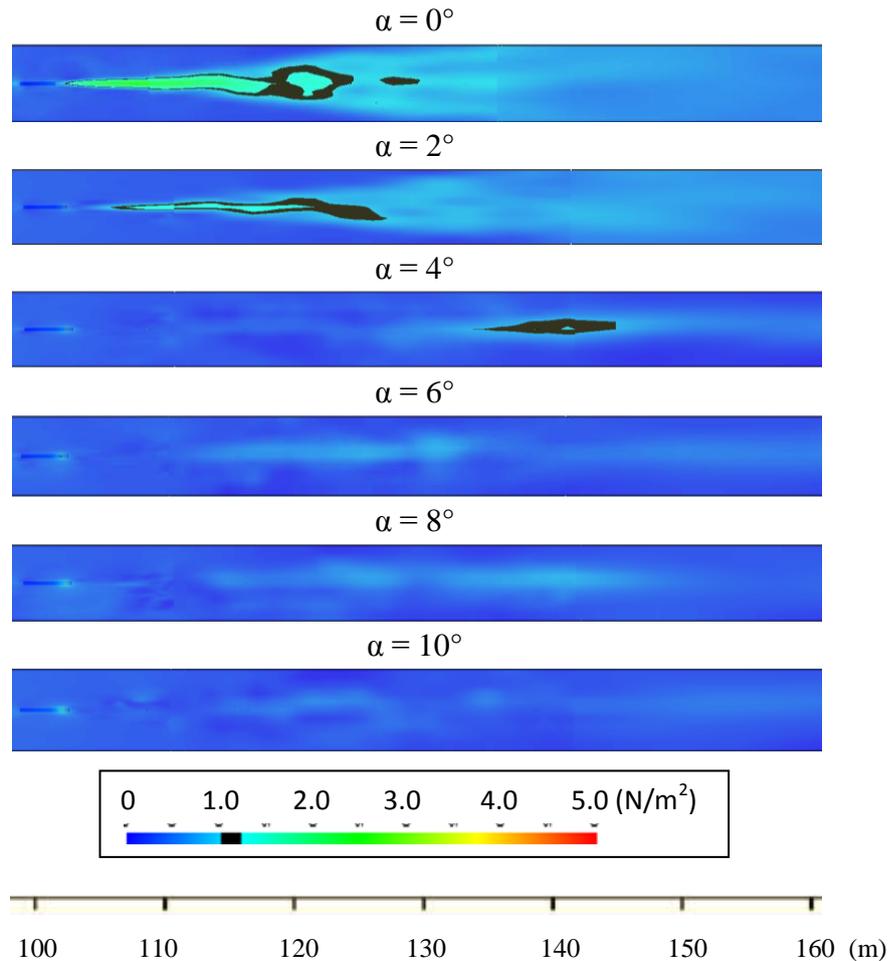


Figure 4.22 : Champ de contraintes de cisaillement au plafond (plan XY)

La figure 4.22, montre les contraintes de cisaillement au plafond pour les différents angles de calage de l'extracteur.

- Pour $\alpha = 0^\circ$: on remarque un champ de cisaillement élevé sur une large surface du plafond le long du tunnel.
- Pour $\alpha = 2^\circ$: on peut noter une diminution de la contrainte de cisaillement au plafond du tunnel, mais elle reste importante.
- Pour $\alpha = 4^\circ$: le champ de cisaillement diminue et se manifeste sur une petite surface au plafond.
- Pour l'intervalle $\alpha = 6^\circ$ à 10° : la contrainte de cisaillement au plafond est approximativement nul.

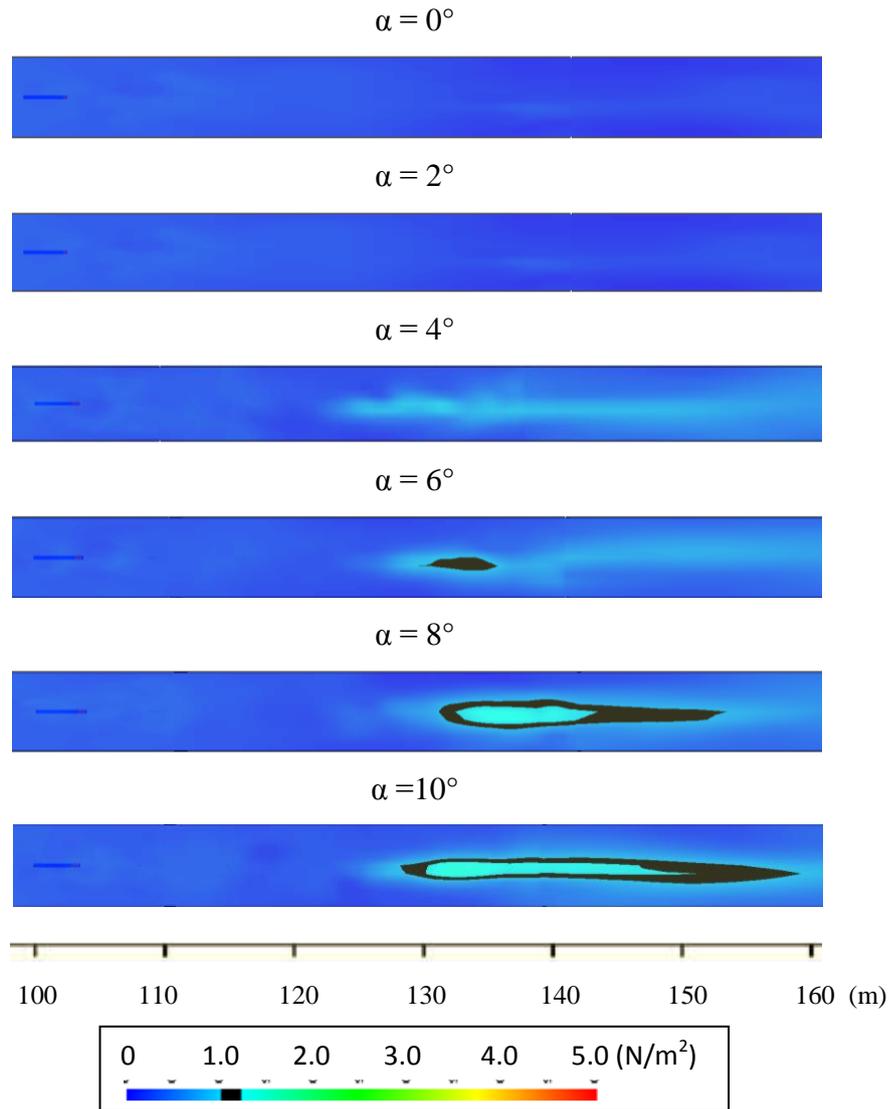


Figure 4.23 : Champ de contraintes de cisaillement au plancher (plan XY)

La figure 4.23, montre la contrainte de cisaillement au plancher pour les différents angles de calage de l'extracteur.

- Pour l'intervalle $\alpha = 0^\circ$ à 4° : la contrainte de cisaillement au plancher est nulle.
- Pour $\alpha = 6^\circ$: un champ de cisaillement très faible sur une petite surface au plancher.
- Pour $\alpha = 8^\circ$: on remarque, un champ de cisaillement élevé sur une large surface au plancher.
- Pour $\alpha = 10^\circ$: on remarque, un champ de cisaillement élevé sur une large surface au plancher.

4.2.3 Performances de la ventilation avec l'inclinaison du ventilateur

Il est possible de déterminer la position optimale de l'extracteur en termes de facteur de performance (FP) défini comme suit :

$$FP = \frac{F_t(\text{à } \alpha=0^\circ)}{F_t(\text{à } \alpha>0^\circ)} \quad (10)$$

Le rapport entre la force de poussée de l'air qui assure un flux longitudinal dans le tunnel, pour $\alpha > 0^\circ$ et celle correspondante à $\alpha = 0^\circ$ est donné dans le tableau 4.4 pour les différents angles.

Table 4.4 : Force de poussée et facteur de performance pour les différents angles

Zp(m)	F _j (N)	803,8					
	x-section (m)	108	116	136	176	210	246
0	F _t (N)	461,1	470,5	517,7	537,5	533,9	531,5
	FP (-)	1	1	1	1	1	1
2	F _j (N)	802,8					
	F _t (N)	473,2	465,3	508,6	526,4	530,4	530,7
	FP (-)	0,974	1,011	1,018	1,021	1,007	1,002
4	F _j (N)	799,9					
	F _t (N)	487,0	484,5	487,9	518,0	521,9	522,5
	FP (-)	0,947	0,971	1,061	1,038	1,023	1,017
6	F _j (N)	795,1					
	F _t (N)	485,1	486,0	487,8	506,9	514,9	520,3
	FP (-)	0,951	0,968	1,061	1,060	1,037	1,022
8	F _j (N)	788,3					
	F _t (N)	468,9	472,4	508,2	503,0	509,9	519,3
	FP (-)	0,983	0,996	1,019	1,069	1,047	1,024
10	F _j (N)	779,6					
	F _t (N)	464,0	487,8	480,9	500,9	503,6	510,2
	FP (-)	0,994	0,965	1,077	1,073	1,060	1,042

Plus on s'éloigne du jet, la force de poussée dans le tunnel augmente car elle ne dépend pas seulement à la vitesse qui a diminué, mais des coefficients k_1 et k_2 caractérisés le tunnel.

La figure 18 représente la variation du facteur de performance en fonction de la longueur du tunnel pour les différents angles d'inclinaison ($\alpha = 0, 2, 4, 6, 8$ et 10°) de l'extracteur.

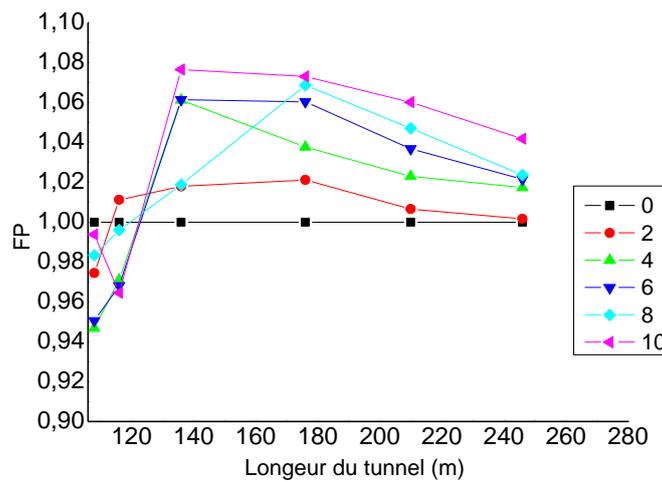


Figure 4.24 : Facteur de performance pour les différents angles

4.3. Optimisation de la position de l'extracteur dans le cas de l'existence d'un incendie dans le tunnel.

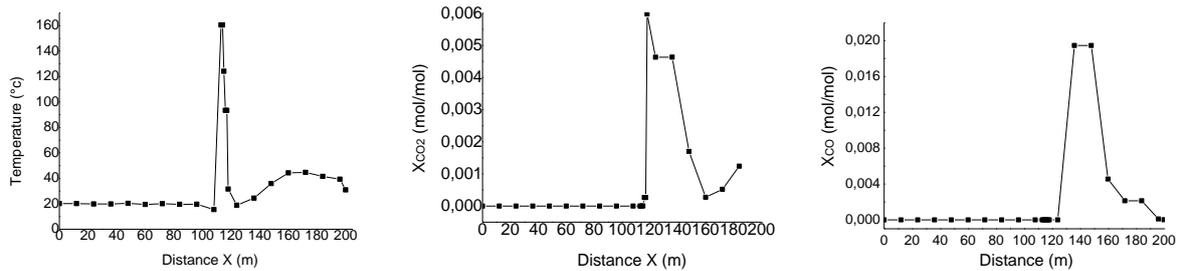
Les précédents résultats montrent que la valeur optimale de l'angle de calage avoisine $\alpha = 4^\circ$ (le profile de vitesse et les contraintes de cisaillement au plafond et au plancher sont optimisés). Les configurations $\alpha = 0^\circ$ avec $Z_p = 0,96$ m et $Z_p = 1,60$ m sont adoptés. Aussi les configurations $Z_p = 0,96$ m avec $\alpha = 4^\circ$ et $\alpha = 6^\circ$ sont adoptés. La vitesse d'écoulement à la sortie du ventilateur est prise égale à 50 m / s.

4.3.1. Cas d'incendie d'une voiture (HRR=10MW) positionné après le jet

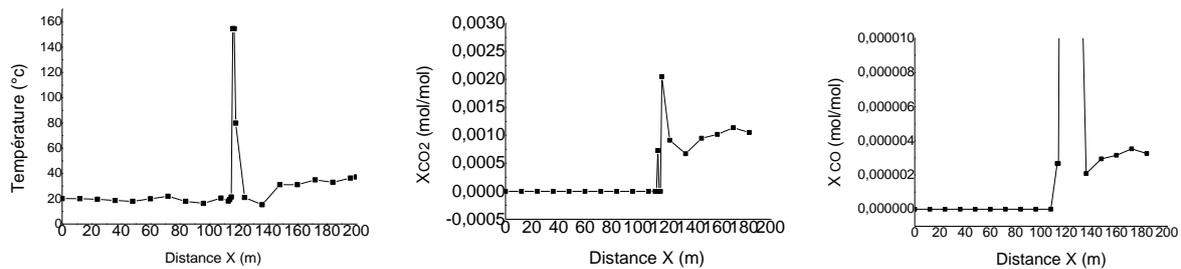
La figure 4.25 donne pour les positions $Z_p = 0,96$ m avec $\alpha = 0^\circ, 4^\circ$ et 6° , la variation de la température et la variation de la concentration de CO_2 en fonction de la longueur du tunnel à une hauteur de 2 m, et après 180s de simulation.

Pour les trois positions, on remarque que la température est quasi-constante et égale à 20°C de 0 à 110m. Une augmentation brusque de la température pour la position 120m est due au fait que la source de chaleur se trouve dans cette position du tunnel. À partir de 130 m, la température de la fumée dans le tunnel fluctue entre 40 et 50°C à cause de la propagation de la fumée. La concentration du dioxyde de carbone CO_2 est nulle dans l'intervalle [0,110 m]. Cela est dû à l'absence des fumées (pas de retour de fumés). La source de feu qui se trouve à l'abscisse 120 m engendre une augmentation brusque de la concentration du CO_2 , cette dernière diminue quand on s'éloigne de la source. On observe qu'il ya une différence entre les concentrations de CO_2 et de CO pour les trois positions du ventilateur. Pour ($\alpha = 0^\circ$,

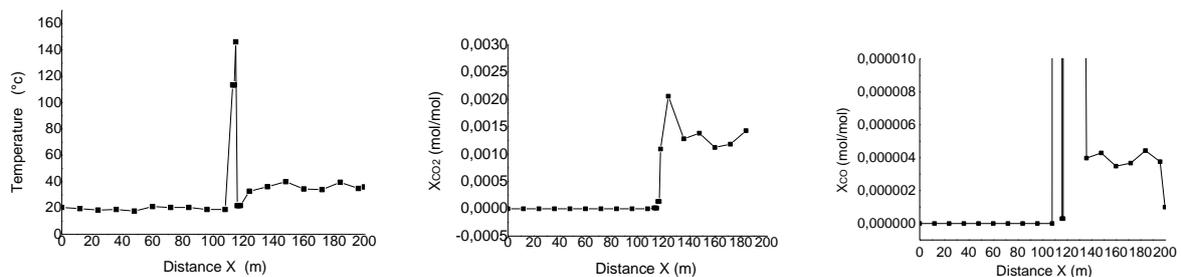
$Z_p = 0,96m$), X_{CO_2} et X_{CO} sont très importantes sur la longueur du tunnel allant de 130 m jusqu'à 160 m. X_{CO_2} atteint un minimum à 160 m puis elle croit immédiatement. Pour ($\alpha = 4^\circ$, $Z_p = 0,96m$), X_{CO} juste après la source décroît et reste constante. X_{CO_2} juste après la source décroît et atteint un minimum à 140 m, puis croit d'une manière assez marquée. Pour ($\alpha = 6^\circ$, $Z_p = 0,96m$), X_{CO_2} et X_{CO} juste après la source décroissent et restent constante le long du tunnel



(a) : $\alpha = 0^\circ$ et $Z_p = 0,96$ m



(b) : $\alpha = 4^\circ$ $Z_p = 0,96$ m



(c) : $\alpha = 6^\circ$ et $Z_p = 0,96$ m

Figure 4.25 : Variation de la température et des concentrations de CO_2 et CO en fonction de la longueur du tunnel à la hauteur de 2 m (10 MW)

La figure 4.26 donne pour les positions $\alpha = 0^\circ$ avec $Z_p = 0,96$ et $Z_p = 1,6$ m, la variation de la température et la variation des concentrations de CO_2 et CO en fonction de la longueur du tunnel à une hauteur de 2 m, et après 180s de simulation. Le comportement de la fumée est

montré à travers l'évolution de la température et des concentrations de CO₂ et CO. Pour ($\alpha = 0^\circ$ et $Z_p = 1,6$ m), les conditions d'une zone sans fumée sont clairement visible, la température est dessous de 40°C sur la majorité de la longueur du tunnel, avec des niveaux de CO₂ aussi faibles.

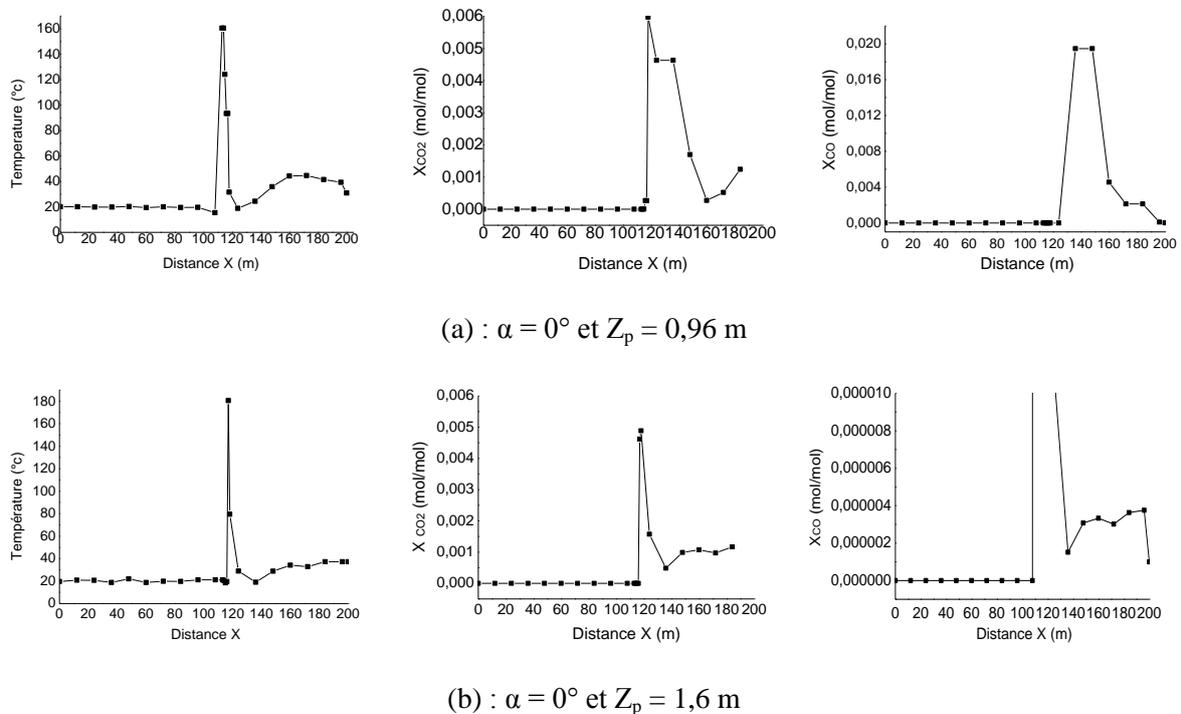
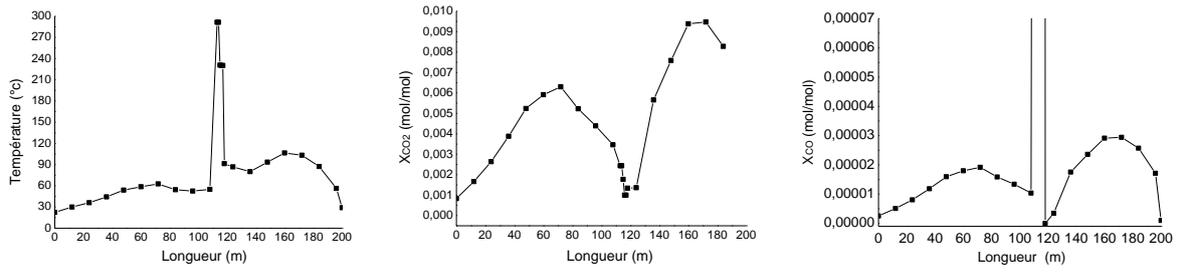


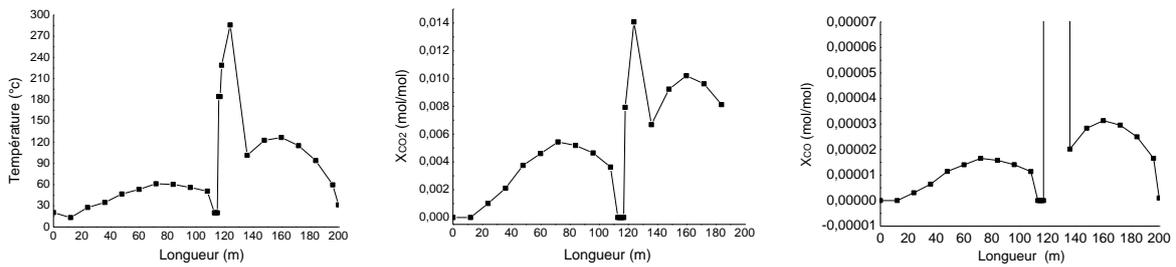
Figure 4.26 : Variation de la température et des concentrations de CO₂ et CO en fonction de la longueur du tunnel à la hauteur de 2 m (10 MW)

4.3.2. Cas d'incendie d'un camion (HRR=100MW) positionné après le jet

Pour les trois positions, on remarque qu'à de 0 à 110 m, la température de la fumée fluctue entre 50 et 60°C à cause de retour de la fumée dans le tunnel. Une augmentation brusque de la température pour la position 120m est due au fait que la source de chaleur se trouve dans cette position du tunnel. À partir de 130 m, pour ($\alpha = 0^\circ$ et $Z_p = 0,96$ m) atteint un maximum de 120 °C, puis diminue quand on s'éloigne de la source. Les concentrations du CO₂ et de CO sont à des valeurs considérables dans l'intervalle [0,110 m]. Cela est dû au retour de fumés. La source de feu qui se trouve à l'abscisse 120 m engendre une augmentation brusque des concentrations du CO₂ et CO ces dernières diminuent quand on s'éloigne de la source. On peut noter qu'il y a presque le même comportement de la température, CO₂ et CO pour toutes les configurations.

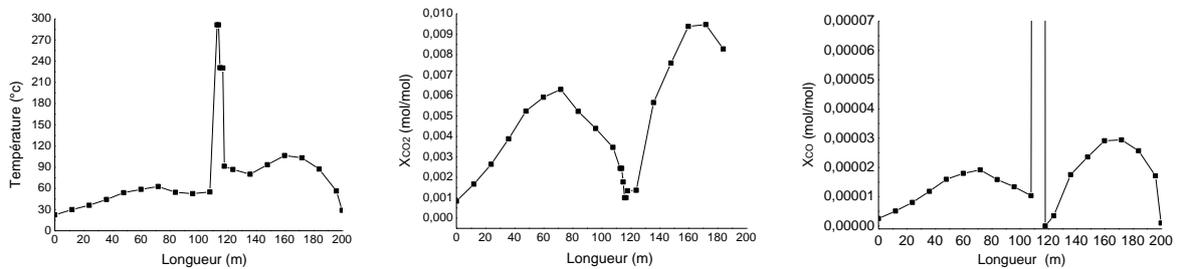


(a) : $\alpha = 0^\circ$ et $Z_p = 0,96$ m

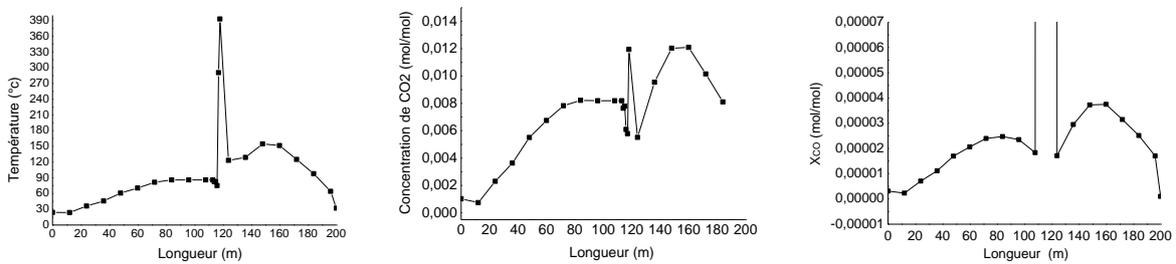


(b) : $\alpha = 6^\circ$ et $Z_p = 0,96$ m

Figure 4.27 : Variation de la température et des concentrations de CO₂ et CO en fonction de la longueur du tunnel à la hauteur de 2 m (100 MW)



(a) : $\alpha = 0^\circ$ et $Z_p = 1,6$ m



(b) : $\alpha = 0^\circ$ et $Z_p = 1,6$ m

Figure 4.28 : Variation de la température et la concentration de CO₂ en fonction de la longueur du tunnel à la hauteur de 2 m (100 MW)

Chapitre 5

Chapitre 5 : Tentative d'élaboration d'un programme de calcul pour l'optimisation de la ventilation longitudinal

5.1 Introduction

Dans ce chapitre on entame l'élaboration d'un programme pour l'optimisation de la ventilation longitudinal dans les tunnels unidirectionnels. Le langage Fortran est choisi pour programmer un algorithme spécifique au calcul des paramètres indicateurs de l'évolution du phénomène tel que la vitesse, pression, turbulence.....

5.1. Domaine de calcul

La figure 5.1 montre le domaine de calcul le long de le tunnel routier unidirectionnel. Le domaine est tridimensionnel d'un gabarit de forme rectangulaire. Les dimensions sont prises avec les valeurs réelles suivantes : 100 m de longueur, 12,84 m de largeur et 6,42 m. Les surfaces des faces intérieures du tunnel sont considérés lisses et son influence sur l'écoulement est négligeable.

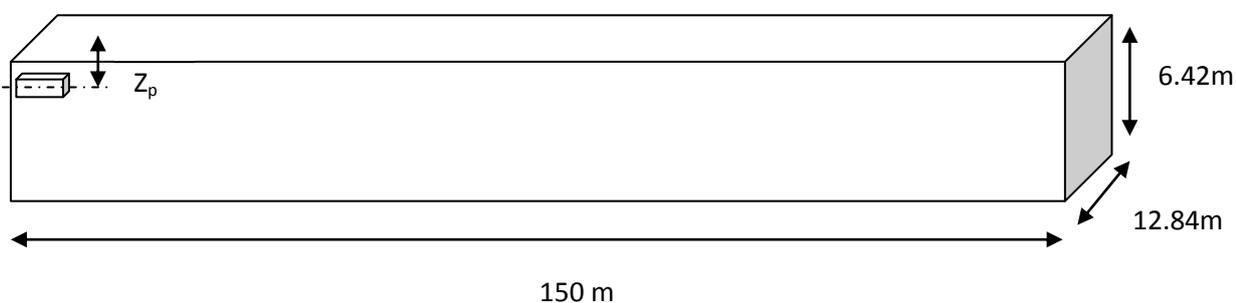


Figure 5.1 : Schéma descriptif du domaine de calcul

5.1. Hypothèses

Dans cette étude de simulation de la propagation de fumée dans un tunnel routier on considère les hypothèses suivantes :

- Le régime de l'écoulement est stationnaire.
- La température de l'écoulement demeure constante.
- Le gaz est assimilé à un gaz parfait.

5.2. Modèle mathématique

Le phénomène étudié est régi par les équations associées aux modèles hydrodynamiques qui s'écrivent sous la forme condensée comme suit :

- Équation de conservation de la masse :

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (5.1)$$

- Équation de conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_i}{\partial x_i} + (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.2)$$

- Équation d'état pour les gaz parfaits :

$$P = \frac{\rho RT}{M} \quad (5.3)$$

Où :

u : le champ de Vitesse

P : le champ de pression

T : la température

5.3 Résolution par la méthode des volumes finis

La méthode de volumes finis est un processus utilisé pour la discrétisation des équations différentielles aux dérivées partielles pour traiter les phénomènes physiques conservatives.

5.3.1 Géométrie et maillage du domaine de calcul

La première étape dans la méthode des volumes finis consiste à diviser le domaine de calcul en un nombre fini et discret de volume de contrôle, on dit qu'on génère un maillage.

L'opération consiste à subdiviser le domaine de calcul en un certain nombre de segments (volume de contrôle). Le centre de chaque volume est placé exactement au milieu du segment correspondant.

Dans le cas de la figure (5.2), le domaine de calcul est divisé en $(N \times M \times K)$ volumes de contrôles.

Pour faciliter l'écriture des pas de maillage, on opte au système de notation mentionné sur la figure 5.2 :

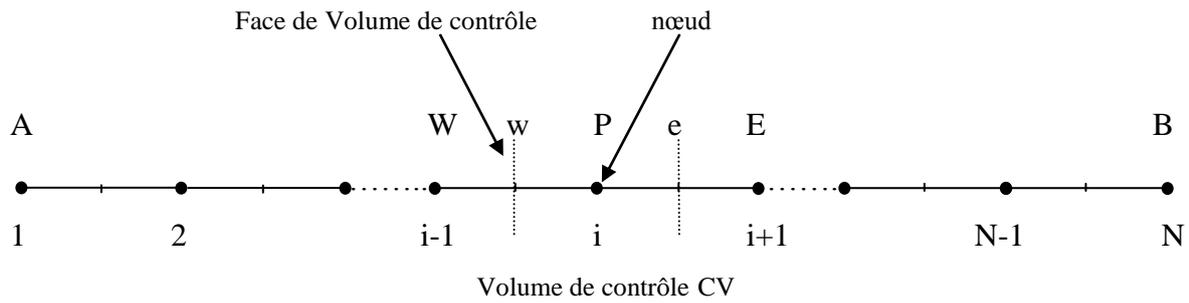


Figure 5.2 : Géométrie et maillage du domaine de calcul

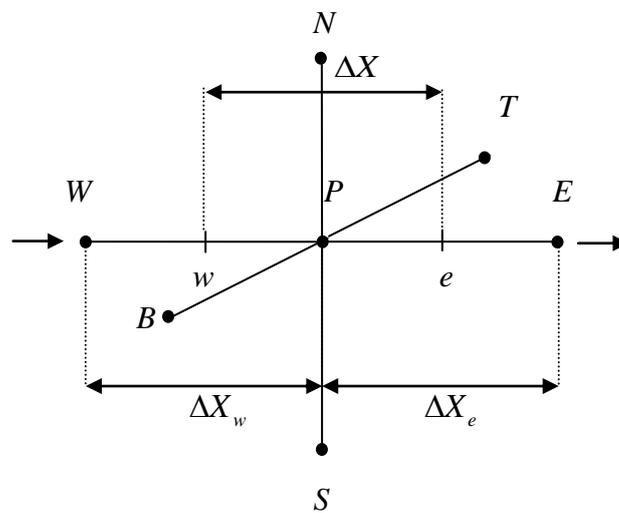


Figure 5.3 : Système de notation

5.3.2 Formulation de la méthode des volumes finis

La clé de la méthode des volumes finis réside dans l'application du théorème de la divergence ou (théorème d'Ostrogradski), qui permet de changer une intégrale de volume en intégrale de surface.

L'équation (5.2) est une équation de convection diffusion. Elle s'écrit comme suit:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\
 \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\
 \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

On suppose que : $\Gamma = \mu + \mu_t$

L'intégration de l'équation (4 ,4) sur le volume de contrôle de centre P donne :

$$\int_V \left(\frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} \right) dv = - \int_V \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} dv + \int_V \left(\Gamma \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \right) dv$$

$$\int_S (uu + uv + uw) ds = - \int_S \frac{1}{\rho} P ds + \int_S \left(\Gamma \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) ds \quad (5.6)$$

L'équation précédente traduit bien un principe de conservation, où la partie gauche exprime le flux par convection alors que celui de droite représente le flux par diffusion.

L'équation (5, 2) s'écrit :

$$(Auu)_e - (Auu)_w + (Avu)_n - (Avu)_s + (Awu)_b - (Awu)_t = \frac{1}{\rho} (AP^*)_e - \frac{1}{\rho} (AP^*)_w + \Gamma \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_e - \Gamma \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_w + \Gamma \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_n - \Gamma \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_s + \Gamma \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_b - \Gamma \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_t \quad (5.7)$$

Pour raison de simplicité nous allons utiliser un maillage uniforme $\Delta X = \Delta X_e = \Delta X_w = \Delta Y_n = \Delta Y_s = \Delta Z_b = \Delta Z_t$ et appliquer un schéma centré d'ordre deux pour remplacer les dérivés premières sur les facettes du volume de contrôle.

$$\left(\Gamma \frac{\partial u}{\partial x} \right)_e - \left(\Gamma \frac{\partial u}{\partial x} \right)_w = \left(\frac{\Gamma}{\Delta X} \right)_e (U_E - U_P) - \left(\frac{\Gamma}{\Delta X} \right)_w (U_P - U_W)$$

$$\left(\Gamma \frac{\partial u}{\partial y} \right)_n - \left(\Gamma \frac{\partial u}{\partial y} \right)_s = \left(\frac{\Gamma}{\Delta X} \right)_n (U_N - U_P) - \left(\frac{\Gamma}{\Delta X} \right)_s (U_P - U_S)$$

$$\left(\Gamma \frac{\partial u}{\partial z} \right)_b - \left(\Gamma \frac{\partial u}{\partial z} \right)_t = \left(\frac{\Gamma}{\Delta X} \right)_b (U_B - U_P) - \left(\frac{\Gamma}{\Delta X} \right)_t (U_P - U_T) \quad (5.8)$$

Dans ce cas le coefficient de diffusivité n'est pas constant sur les facettes « w », « e », « n », « s », « b » et « t » du volume de contrôle CV seront exprimées en fonction des valeurs aux points nodaux **P**, **W**, **E**, **N**, **S**, **B** et **T** par :

$$\Gamma_e = \frac{\Gamma_E + \Gamma_P}{2} \quad \Gamma_w = \frac{\Gamma_W + \Gamma_P}{2} \quad \Gamma_n = \frac{\Gamma_N + \Gamma_P}{2} \quad \Gamma_s = \frac{\Gamma_S + \Gamma_P}{2}$$

$$\Gamma_b = \frac{\Gamma_B + \Gamma_P}{2} \quad \Gamma_t = \frac{\Gamma_T + \Gamma_P}{2} \quad (5.9)$$

En prenant uniforme $S = S_e = S_w = S_n = S_s = S_b = S_t$ donc la surface S se simplifie des équations (5.8)

Pour des raisons de simplicité nous représentons le flux convectif par la variable F et le flux diffusion par la variable D, qui seront définis comme suit :

$$\begin{aligned} F_e &= u_e & F_w &= u_w & F_n &= u_n & F_s &= u_s & F_b &= u_b & F_t &= u_t \\ D_E &= \frac{\Gamma_e}{\Delta X} & D_W &= \frac{\Gamma_w}{\Delta X} & D_N &= \frac{\Gamma_n}{\Delta X} & D_S &= \frac{\Gamma_s}{\Delta X} & D_B &= \frac{\Gamma_b}{\Delta X} & D_T &= \frac{\Gamma_t}{\Delta X} \end{aligned}$$

L'équation (5.7) s'écrit :

$$\begin{aligned} F_e u_e - F_w u_w + F_n u_n - F_s u_s + F_b u_b - F_t u_t = - \left[\frac{1}{\rho} (AP^*)_e - \frac{1}{\rho} (AP^*)_w \right] + D_E (U_E - U_P) - D_W (U_P - U_W) + D_N (U_N - U_P) - D_S (U_P - U_S) + D_B (U_B - U_P) - D_T (U_P - U_T) \end{aligned} \quad (5.8)$$

Pour choisir le schéma de l'interpolation de la variable \mathbf{u} , on calcul le nombre de Peclet (P)
Peclet = le flux convectif / le flux diffusif

Dans notre cas le phénomène est faiblement convectif où le nombre de Peclet est faible ($P < 2$), donc on utilise le schéma aux différences centrées (central differencing scheme.CDS) [21]. Les valeurs de \mathbf{u} sur les facettes s'écrivent :

$$\begin{aligned} u_e &= \frac{(U_P + U_E)}{2} & u_w &= \frac{(U_P + U_W)}{2} & u_n &= \frac{(U_P + U_N)}{2} & u_s &= \frac{(U_P + U_S)}{2} \\ & & u_b &= \frac{(U_P + U_B)}{2} & u_t &= \frac{(U_P + U_T)}{2} \end{aligned} \quad (5.9)$$

Et en remplaçant dans l'équation (5.8) nous obtenons :

$$\begin{aligned} \frac{F_E}{2} (U_P + U_E) - \frac{F_W}{2} (U_P + U_W) + \frac{F_N}{2} (U_P + U_N) - \frac{F_S}{2} (U_P + U_S) + \frac{F_B}{2} (U_P + U_B) - \frac{F_T}{2} (U_P + U_T) = \\ - \left[\frac{1}{2\rho} (P_E^* - P_W^*) \right] + D_E (U_E - U_P) - D_W (U_P - U_W) + D_N (U_N - U_P) - D_S (U_P - U_S) + D_B (U_B - U_P) - D_T (U_P - U_T) \end{aligned} \quad (5.10)$$

Et après arrangement :

$$\begin{aligned} \left[\left(D_E + \frac{F_E}{2} \right) + \left(D_W - \frac{F_W}{2} \right) + \left(D_N + \frac{F_N}{2} \right) + \left(D_S - \frac{F_S}{2} \right) + \left(D_B + \frac{F_B}{2} \right) + \left(D_T - \frac{F_T}{2} \right) \right] U_P = - \left[\frac{1}{2\rho} (P_E^* - P_W^*) \right] + \\ \left(D_E - \frac{F_E}{2} \right) U_E + \left(D_W + \frac{F_W}{2} \right) U_W + \left(D_N - \frac{F_N}{2} \right) U_N + \left(D_S + \frac{F_S}{2} \right) U_S + \left(D_B - \frac{F_B}{2} \right) U_B + \left(D_T + \frac{F_T}{2} \right) U_T \end{aligned}$$

5.3. Solution de l'équation

L'équation (5.16) sera construite pour tous les volumes de contrôle du domaine de calcul. Le système d'équations résultant sera un système d'équations algébrique linéaire comportant autant d'inconnus que d'équations. La distribution discrète de la variable u sur le domaine de calcul peut être obtenue par la méthode itérative de **Gauss-Seidel**, elle est plus efficace dans ce cas.

La relation (5.16) s'écrit :

$$a_{(i,j,k)}^{t+1} = \frac{1}{w_{(i,j,k)}} [a_{(i+1,j,k)}^t w_{(i+1,j,k)} + a_{(i-1,j,k)}^t w_{(i-1,j,k)} + a_{(i,j+1,k)} w_{(i,j+1,k)} + a_{(i,j-1,k)} w_{(i,j-1,k)} + a_{(i,j,k+1)} w_{(i,j,k+1)} + a_{(i,j,k-1)} w_{(i,j,k-1)} - \left(\frac{P_{(i,j,k+1)} - P_{(i,j,k-1)}}{2} \right)] \quad 5.17$$

L'arrêt des itérations est assuré par le critère de convergence suivant :

$$|a_{(i,j,k)}^{t+1} - a_{(i,j,k)}^t| / a_{(i,j,k)}^t < \varepsilon \quad 5.18$$

5.4. Valeurs des paramètres de cas de base

Les paramètres de cas de base et les constantes sont présentés dans le tableau 5.1. Ils sont proches de celles de l'étude avec FDS qui ont travaillé avec des hypothèses presque semblables à cette étude.

Tableau 5.1 : Les valeurs des paramètres de cas de base

symbole	désignation	valeur	unité	Référence
V_{jet}	Vitesse de jet	50	m/s	[15]
T	Température	20	°C	/
ρ	Masse volumique	1.204	Kg/m ³	/
μ	Viscosité dynamique	1,83*10 ⁻⁵	Pa*s	/

5.5 – L'algorithme et le programme de calcul

5.5.1 - L'algorithme

- 1 – On fixe des valeurs aux limites pour les vitesses u , v , w
- 2 – On estime des valeurs initiales pour les vitesses u , v , w
- 3 – On calcul les coefficients de diffusion D
- 4 – On calcul le flux convectif F et le flux diffusif D

5 – On calcul la viscosité

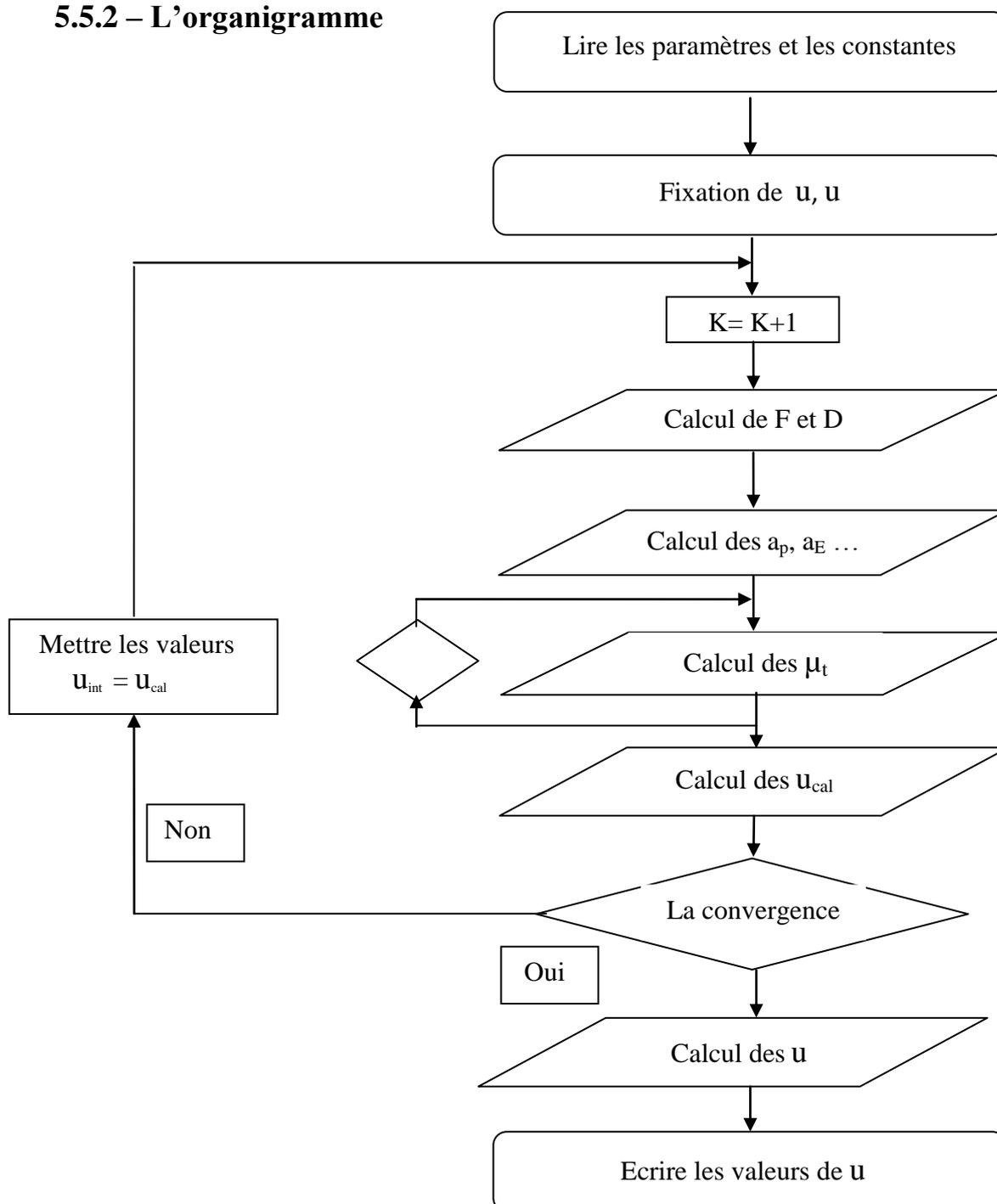
6 – On calcul les nouvelles vitesses u , v , w

7 – On effectue un test de convergence sur les vitesses u , v , w . Si on atteint la convergence, le calcul s'arrête. Si non on remplace les vitesses initiales de u , v , w par les vitesses calculés de u , v , w , et on répète le même calcul jusqu'à la convergence.

8- On calcul la valeur de la viscosité

9- On calcul les valeurs de u , v , w .

5.5.2 – L'organigramme



5.6. Résultats numériques

Le programme est écrit en langage Fortran 77. Ce programme est constitué d'un programme principal et de trois sous-programme (subroutine):

Subroutine pour calculer les coefficients de diffusion : il contient en plus la mode d'interpolation de turbulence on fonction de la vitesse u , ainsi le contrôle de la valeur de nombre sans dimension (nombre de Peclet) qui ne dépasse pas la valeur de 0,90 en valeur absolu.

Les instructions d'impression des résultats sont intégrées dans le programme principal.

L'erreur relative admissible est fixée à 10^{-x} pour la variable u .

Après 2000 itérations le programme converge et donne les résultats de calcul qui seront transférés dans les fichiers ouverts. Les résultats enregistrés seront transférés vers des fichiers avec des extensions DAT pour effectuer le traçage des courbes avec le code Originpro.

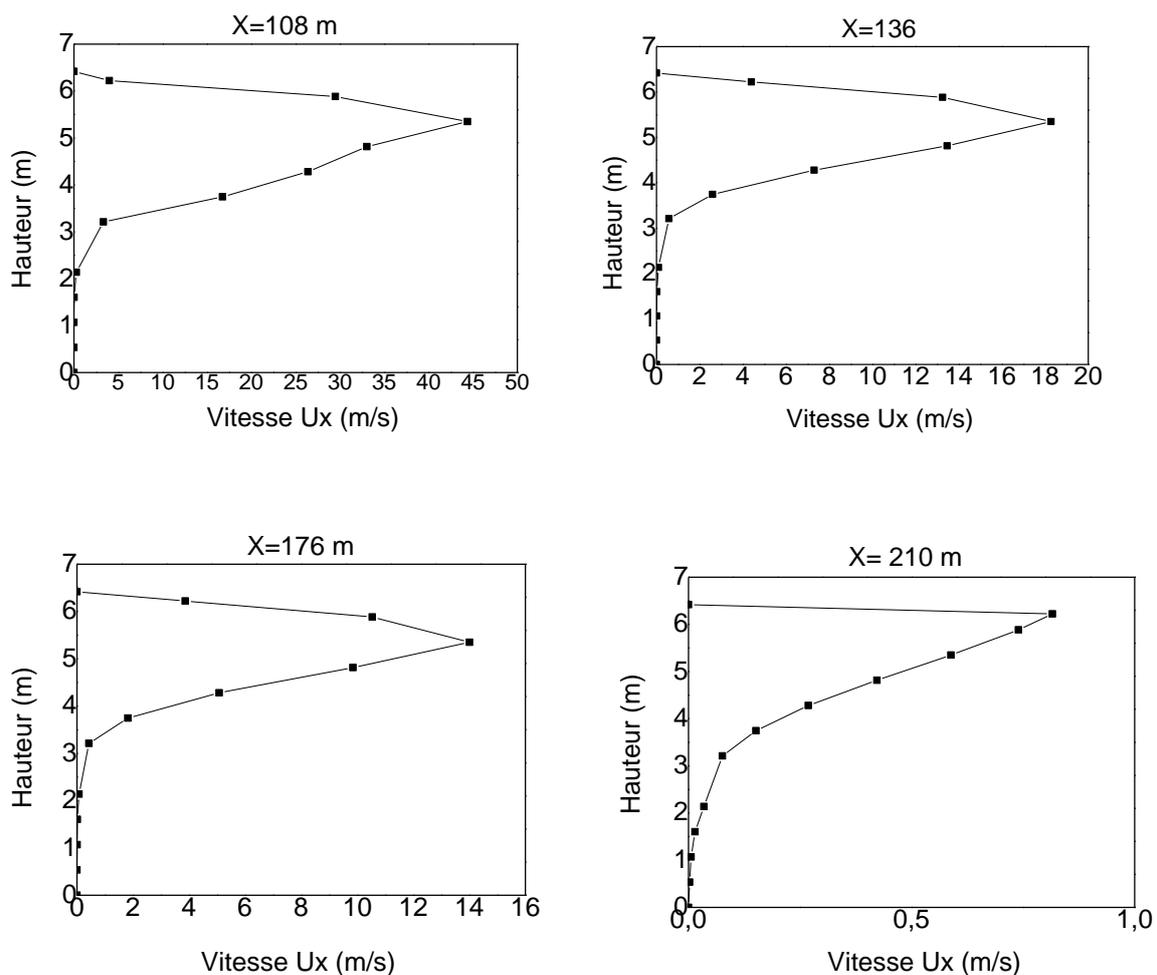


Figure 5.4 : Vitesse axiale pour un angle de calage 0°

Conclusion

L'étude menée dans le cadre de ce mémoire de magister a mis en évidence par simulation numérique l'optimisation de l'angle de calage et la position verticale d'un ventilateur de fumée dans un système de ventilation longitudinal de tunnel.

La comparaison entre les différents profils des vitesses axiales pour les différentes tailles de maillage a permis la sélection d'un bon choix de maillage avec un temps de simulation acceptable.

Dans le cas de l'extracteur horizontal (l'angle de calage $\alpha = 0^\circ$), les positions de fixation de l'extracteur Z_p varient entre 0,32 m et 1,96 m par rapport au plafond. Les résultats obtenus montrent que la contrainte de cisaillement au plafond du tunnel diminue avec l'éloignement de l'extracteur du plafond. La contrainte de cisaillement au plancher est nulle pour toutes les positions de l'extracteur. Elle est efficace pour les tunnels à grand hauteur.

Dans le cas de l'extracteur incliné vers le sol, les résultats obtenus montrent que les contraintes de cisaillement au plafond du tunnel diminuent considérablement avec l'augmentation de l'angle de calage α et ces dernières augmentent légèrement avec l'augmentation de l'angle de calage α au plancher. Ces résultats montrent que la fixation des extracteurs avec un angle de calage est plus efficace. On montre que l'angle optimal d'inclinaison vers le sol des extracteurs du système est proche de 4° .

Dans le cas d'un incendie de 10 MW, les résultats de température et les concentrations de CO et CO₂ montrent que la configuration $Z_p = 0,96$ m avec $\alpha = 4^\circ$ est la plus optimale. Autres configurations aussi influencent sur la température et les concentrations de CO et CO₂, tel que, $Z_p = 0,96$ m avec $\alpha = 6^\circ$ et $Z_p = 1,6$ m avec $\alpha = 0^\circ$.

Dans le cas d'un incendie de 100 MW, les résultats de température et des concentrations de CO et CO₂ montrent que l'optimisation de la position et de l'inclinaison du ventilateur est limitée par la puissance d'incendie dans les tunnels.

Perspectives

Dans le contexte de continuité dans cette thématique, l'optimisation de la distance entre deux ventilateurs, de la hauteur du tunnel qui permet l'ajustement des ventilateurs sur une plage plus large et l'introduction des écrans de cantonnement peuvent être envisagées.

Références

- [1] Kempf, G., 1965. "Einfluss there Wandeffekte auf die Treibstrahlwirkung eines Strahlgeblases". Schweizerische Bauzeitung 83 (4), 47–52.
- [2] Jojo Li, S.M., Chow, W.K., 2003. "Numerical studies on performance evaluation of tunnel ventilation safety systems". Tunnelling and Underground Space Technology 18, 435–452.
- [3] Carvel, R.O., Beard, A.N., Jowitt, P.W., 2001. "The influence of longitudinal ventilation systems on fires in tunnels". Tunnelling and Underground Space Technology 16, 3–21.
- [4] J.L.Bailey G.P.Tatem, Jones, W.W., xml_chg_new>Bailey et al., 2003. "Development and validation of corridor flow sub model". CFAST Journal Fire Protection Engineering 22, 139–161.
- [5] Betta, V., Cascetta, F., Musto, M., Rotondo, G., 2006. "Sicurezza da incendio nelle gallerie autostradali: analisi fluidodinamica comparata tra diversi sistemi di ventilazione". XIV Congresso Nazionale UIT Napoli 21–23 (June), 473–479.
- [6] Martegani A.D., Pavesi, G., Barbetta, C., 1997. "The influence of separation, inclination and swirl on single and coupled jet fans installation efficiency". In: Proceedings BHR Group, 9th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels.
- [7] Witt, K.C., Schütze, J., 2006. "Bend it like a Banana". In: Proceedings BHR Group, 12th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Slovenia.
- [8] Martegani, A.D., Pavesi, G., Barbetta, C., 1994. "An experimental study on the longitudinal ventilation system". In: Proceedings of BHR Group, 8th International Conference on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp. 3–15, Liverpool, U.K.
- [9] Armstrong J., Bennet, E.C., Matthews, R.D., 1994. "Three-dimensional flows in a circular section tunnel due to jet fans". In: Proceedings of BHR Group, 8th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. Mechanical Engineering Publications Ltd., pp. 743–756, Liverpool, U.K.
- [9] Lotsbeg J., 1997 "Investigation of the wall-friction, pressure distribution, and effectiveness of big jet fans with deflection blades in the Fodnes tunnel in Norway". In: Proceedings of BHR Group, 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicles Tunnels. Mechanical Engineering Publications Ltd., pp. 25–41, Aosta Valley, Italy.

- [10] Pierre Cartotti, 2003. "Dossier pilote des tunnels équipements : Ventilation", Direction des routes, France.
- [11] Carlotti P., 2005. "Mécanique des fluides pour la ventilation des tunnels", cours de master professionnel, centre d'études des tunnels, France.
- [12] S. Bari, J. Naser b., 2003. "Simulation of smoke from a burning vehicle and pollution levels caused by traffic jam in a road tunnel". *Tunnelling and Underground Space Technology* 20 281–290
- [13] V. Betta a, F. Cascetta, M. Musto, G. Rotondo. 2010. "Fluid dynamic performances of traditional and alternative jet fans in tunnel longitudinal ventilation systems". *Tunnelling and Underground Space Technology* 25 415–422
- [14] B.J.M. v.d.Giesen, S.H.A. Penders, M.G.L.C. Loomans*, P.G.S. Rutten, J.L.M. Hensen. 2011. "Modelling and simulation of a jet fan for controlled air flow in large enclosures". *Environmental Modelling & Software* 26 191e200
- [15] Hitoshi Kurioka, Yasushi Oka, Hiroomi Satoha, Osami Sugaw. 2003. "Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels". *Fire Safety Journal* 38 319–340
- [16] Karim Van Maele, Bart Merci. 2008. "Application of RANS and LES field simulations to predict the critical ventilation velocity in longitudinally ventilated horizontal tunnels ". *Fire Safety Journal* 43 598–609.
- [17] Monica Galdo Vega, Katia Maria Arguelles Diaz. 2008. "Numerical 3D simulation of a longitudinal ventilation system: Memorial Tunnel case". *Tunnelling and Underground Space Technology* 23 539–551
- [18] V. Betta a, F. Cascetta, M. Musto, G. Rotondo. 2010. "Fluid dynamic performances of traditional and alternative jet fans in tunnel longitudinal ventilation systems". *Tunnelling and Underground Space Technology* 25 415–422
- [19] Feng Wang a,b,*, Mingnian Wang a, S. Heb, Jisheng Zhang b, Yuanye Deng a 2010. "Computational study of effects of jet fans on the ventilation of a highway curved tunnel". *Tunnelling and Underground Space Technology* 25 382–390.

[20] K. C. Karki, S. V. Patankar, E. M. Rosenbluth , Sam S. Levy. 2000. “*CFD Model For Jet Fan Ventilation Systems*”, Proceedings of the 10th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle tunnels Principles, Analysis and Design.

[21] Kevin McGrattan, Simo Hostikka, Jason Floyd. 2009. "Fire Dynamics Simulator (Version 5), User's Guide", National Institute of Standard Technology, United States of America.

[22] Kevin McGrattan, Simo Hostikka, Jason Floyd. 2009. "Fire Dynamics Simulator (Version 5), Technical Reference Guide", National Institute of Standard Technology, United States of America.

Communication internationale

B. BENKOUSSAS and A. DOKKAR. “Jet fans positions optimisation in tunnel longitudinal ventilation“. Accepted in ACT 2013, Dubai 11-12 December 2013.

Annexe : Des exemples des fichiers d'entrée sur FDS**Exemple 1 : Ventilation longitudinale sans incendie**

```
&HEAD CHID='C0', TITLE='l'angle de calage=0'/
```

```
&MESH ID='mesh1',IJK=15,10,09, XB= 0.0, 60.0, -6.42,6.42,0.0,6.42/
```

```
&MESH ID='mesh2',IJK=20,10,09, XB= 60.0, 90.0, -6.42,6.42,0.0,6.42/
```

```
&MESH ID='mesh3',IJK=60,40,36, XB= 90.0, 110.0, -6.42,6.42,0.0,6.42/
```

```
&MESH ID='mesh4',IJK=30,20,36, XB=110.0, 140.0, -6.42,6.42,0.0,6.42/
```

```
&MESH ID='mesh5',IJK=15,10,18, XB=140.0, 200.0, -6.42,6.42,0.0,6.42/
```

```
&TIME T_END= 180.0/
```

```
&SURF ID='BLOW', POROUS=.TRUE., VEL=60.0 /
```

```
&OBST XB= 98.5, 101.5,-0.32,-0.32, 5.28, 5.92, COLOR='BLUE' /
```

```
&OBST XB= 98.5, 101.5, 0.32, 0.32, 5.28, 5.92, COLOR='BLUE' /
```

```
&OBST XB= 98.5, 101.5,-0.32, 0.32, 5.28, 5.28, COLOR='BLUE' /
```

```
&OBST XB= 98.5, 101.5,-0.32, 0.32, 5.92, 5.92, COLOR='BLUE' /
```

```
&OBST XB= 100.0, 100.0,-0.32, 0.32, 5.28, 5.92, COLOR='RED', SURF_ID='BLOW' /
```

```
&OBST XB= 044.0, 048.0,-0.9, 0.9, 0.4, 1.4,COLOR='GREEN'/voitur 1(4,1.8,1.4)
```

```
&OBST XB= 068.0, 072.0,-0.9, 0.9, 0.4, 1.4,COLOR='RED'/voitur 2(4,1.8,1.4)
```

```
&OBST XB= 092.0, 096.0,-0.9, 0.9, 0.4, 1.4,COLOR='BLUE'/voitur 3(4,1.8,1.4)
```

```
&OBST XB= 113.0, 117.0,-0.9, 0.9, 0.4, 1.4,COLOR='NAVY'/voitur 4(4,1.8,1.4)
```

```
&OBST XB= 136.0, 140.0,-0.9, 0.9, 0.4, 1.4,COLOR='GREEN'/voitur 5(4,1.8,1.4)
```

```
&OBST XB= 160.0, 164.0,-0.9, 0.9, 0.4, 1.4,COLOR='NAVY'/voitur 6(4,1.8,1.4)
```

```
&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
```

```
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
```

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

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

```
&SLCF PBZ=0.0,QUANTITY='VELOCITY' /  
&SLCF PBZ=6.42,QUANTITY='VELOCITY' /
```

```
&DEVC XYZ=107.0,0.0,0.535, QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=107.0,0.0,1.070, QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=107.0,0.0,1.605, QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=107.0,0.0,2.140, QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=107.0,0.0,3.210, QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=107.0,0.0,3.745, QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=107.0,0.0,4.280, QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=107.0,0.0,4.815, QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=107.0,0.0,5.350, QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=107.0,0.0,5.885, QUANTITY='U-VELOCITY' /  
&DEVC XYZ=107.0,0.0,6.420, QUANTITY='U-VELOCITY' /
```

```
&TAIL /
```

Exemple 2 : Ventilation longitudinale avec incendie

```
&HEAD CHID='C0', TITLE='l'angle de calage=0'/
```

```
&MESH ID='mesh1',IJK=30,10,09, XB= 0.0, 60.0, -6.42,6.42,0.0,6.42/  
&MESH ID='mesh2',IJK=30,10,09, XB= 60.0, 90.0, -6.42,6.42,0.0,6.42/  
&MESH ID='mesh3',IJK=60,40,36, XB= 90.0, 110.0, -6.42,6.42,0.0,6.42/  
&MESH ID='mesh4',IJK=20,40,18, XB=110.0, 140.0, -6.42,6.42,0.0,6.42/  
&MESH ID='mesh5',IJK=55,20,18, XB=140.0, 250.0, -6.42,6.42,0.0,6.42/
```

```
&TIME T_END=180.0/
```

```
&REAC ID = 'HEPTANE TO CO2'
```

```
  FYI = 'Heptane, C_7 H_16'
```

```
  C = 7.
```

H = 16.

CO_YIELD = 0.006 /

SOOT_YIELD = 0.015 /

&MISC CO_PRODUCTION=.TRUE. /

&MATL ID = 'PLASTIC'

CONDUCTIVITY = 0.2

SPECIFIC_HEAT = 1.5

DENSITY = 2100.

N_REACTIONS = 1

HEAT_OF_REACTION = 2500.

HEAT_OF_COMBUSTION = 25000.

REFERENCE_TEMPERATURE = 330.

NU_FUEL = 1.0 /

&SURF ID = 'PLASTIC COMPOSANTS'

COLOR = 'IVORY BLACK'

MATL_ID = 'PLASTIC'

MATL_MASS_FRACTION = 0.4

BACKING = 'EXPOSED'

THICKNESS = 0.01 /

&SURF ID='FIRE', HRRPUA=1390., COLOR='NAVY'/

&SURF ID='BLOW', POROUS=.TRUE., VEL=52.2 /

&OBST XB= 98.5, 101.5,-0.32,-0.32, 5.28, 5.92, COLOR='BLUE' /

&OBST XB= 98.5, 101.5, 0.32, 0.32, 5.28, 5.92, COLOR='BLUE' /

&OBST XB= 98.5, 101.5,-0.32, 0.32, 5.28, 5.28, COLOR='BLUE' /

&OBST XB= 98.5, 101.5,-0.32, 0.32, 5.92, 5.92, COLOR='BLUE' /

&OBST XB= 100.0, 100.0,-0.32, 0.32, 5.28, 5.92, COLOR='RED', SURF_ID='BLOW' /

&OBST XB= 111.0, 113.0,-0.9, 0.9, 1.3, 1.4, SURF_ID='PLASTIC COMPOSANTS' /

&OBST XB= 110.0, 114.0,-0.9, 0.9, 0.0, 1.4, SURF_IDS='FIRE','INERT','INERT',
COLOR='NAVY'/voitur(4,1.8,1.4)

&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /

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

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

&SLCF PBY=0.0,QUANTITY='carbon dioxide', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBY=0.0,QUANTITY='carbon monoxide', VECTOR=.TRUE. /

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

&SLCF PBZ=0.0,QUANTITY='VELOCITY' /

&SLCF PBZ=6.42,QUANTITY='VELOCITY' /

&SLCF PBZ=0.0,QUANTITY='U-VELOCITY' /

&SLCF PBZ=6.42,QUANTITY='U-VELOCITY' /

&DEVC XYZ=00.0,0.0,2.0, QUANTITY='carbon dioxide' /1

&DEVC XYZ=12.0,0.0,2.0, QUANTITY='carbon dioxide' /2

&DEVC XYZ=24.0,0.0,2.0, QUANTITY='carbon dioxide' /3

&DEVC XYZ=36.0,0.0,2.0, QUANTITY='carbon dioxide' /4

&DEVC XYZ=48.0,0.0,2.0, QUANTITY='carbon dioxide' /5

&DEVC XYZ=60.0,0.0,2.0, QUANTITY='carbon dioxide' /6

&DEVC XYZ=72.0,0.0,2.0, QUANTITY='carbon dioxide' /7

&DEVC XYZ=84.0,0.0,2.0, QUANTITY='carbon dioxide' /8

&DEVC XYZ=96.0,0.0,2.0, QUANTITY='carbon dioxide' /9

&DEVC XYZ=108.0,0.0,2.0, QUANTITY='carbon dioxide' /10

&DEVC XYZ=113.0,0.0,2.0, QUANTITY='carbon dioxide' /11
&DEVC XYZ=114.0,0.0,2.0, QUANTITY='carbon dioxide' /12
&DEVC XYZ=115.0,0.0,2.0, QUANTITY='carbon dioxide' /13
&DEVC XYZ=116.0,0.0,2.0, QUANTITY='carbon dioxide' /14
&DEVC XYZ=117.0,0.0,2.0, QUANTITY='carbon dioxide' /15
&DEVC XYZ=118.0,0.0,2.0, QUANTITY='carbon dioxide' /16
&DEVC XYZ=124.0,0.0,2.0, QUANTITY='carbon dioxide' /17
&DEVC XYZ=136.0,0.0,2.0, QUANTITY='carbon dioxide' /18
&DEVC XYZ=148.0,0.0,2.0, QUANTITY='carbon dioxide' /19
&DEVC XYZ=160.0,0.0,2.0, QUANTITY='carbon dioxide' /20
&DEVC XYZ=172.0,0.0,2.0, QUANTITY='carbon dioxide' /21
&DEVC XYZ=184.0,0.0,2.0, QUANTITY='carbon dioxide' /22
&DEVC XYZ=196.0,0.0,2.0, QUANTITY='carbon dioxide' /23
&DEVC XYZ=200.0,0.0,2.0, QUANTITY='carbon dioxide' /24

&TAIL /