REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHESCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE LA TECHNOLOGIE



Mémoire de Fin d'Étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Sciences et génie de l'environnement
Spécialité : Génie des Procédés de l'environnement

Étude des transferts et d'évacuation d'un polluant dans un tunnel

Soutenue le 25 / 06 / 2020

Présenté Par : KALOUNE Naziha
BELLILI Khadidja

Encadré par :
Dr. HADIDI NOUR EDDINE
Dr. REBHI Redha

Année universitaire : 2019-2020

Remerciement

Je remercie tous d'abord « Allah » de m'avoir donné le courage d'entamer et de finir ce mémoire dans de bonnes conditions.

Je remercie vivement mes encadreurs : le docteur Dr HADIDI NOUR EDINE pour l'aide compétente qu'il nous a apportée, pour sa patience, sa confiance, son encouragement, et Son œil critique qui nous a été très précieux pour structurer le travail , nous le remercions vivement.

Nous remercions très chaleureusement notre Co-promoteur Mr REBHI REDHA pour sa précieuse aide au sujet du logiciel ANSYS- CFX.

Nous tenons aussi à remercier : le chef de département de la technologie de la faculté de la technologie de l'université « Yahia Fares » de Médéa.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à

Mes très chers parents, pour leurs soutient moral et financier

Et d'être la lumière de ma vie, qui m'ont toujours encouragé

Pour terminer mes études, en leur espérant une longue vie et

Que Dieu les gardes.

A toutes la famille *Kaloune et Tahtah *sans exception, << Khalo Ahmed>>

A Tous ceux qui sont proches de mon cœur et que je n'ai pas cités le nom.

Tous **mes frères** et **mes sœur** Mohamed et Yasmine, Nisa et Ahmed, Lebna et Fatah, Chaima et Amina et mon petit qui je l'adore <<Abd El Basset>>. J'ai partagé avec vous des moments de joie.

Celles qui m'ont toujours aidée, écoutée, soutenue et encouragée tout au long de mon Parcours; celles qui ont toujours été présentes pour moi.

A Ma **binôme Sissa,** Sans oublier mes chers copines : fatima, hadjer, sabrina, halima, wafae, hania, meriem, lynda, Hizia, Amel

À mes nouveaux nièces **Nadjib** et **Chakib**

En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble

A toute la promotion 2020 GPE

Naziha

Dédicace :

A l'homme de ma vie, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde a toi mon père.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, maman qui j'adore.

A ma belle mère et mon beau père

A mon mari « **Khaled** »

Aux personnes que j'ai bien aimé leur présence dans ma vie :

Mes **chères sœurs** : Amina,Naima et Safia

Mes frères :Kasmos et Sofiene

Mes nièces : Ahmed ,Djihad ,Arwa ,Malak ,Firas Wissal et Anfal

Tous la famille BOUDOUDOU spécialement mes oncles

Ma binôme : Naziha mes amies : Sabrina ,Meriem Hadjer ,Fatima , Khadidja , Ines ,Chaima, Hizia a toute la promotion 2020 GPE

SiSSa

ملخص:

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة انتشار غاز ملوث في مساحة مغلقة أو شبه مفتوحة ممثلة بنفق ، أخذنا غاز ثاني أكسيد الكربون كغاز عادم يمثل خطرًا كبيرًا الاختناق. تم اعتماد برنامج Ansys–CFX للمحاكاة في هذه الدراسة.

لقد أظهرنا من خلال هذا الدراسة دور استخراج الدخان في هذا النوع من الفضاء. تم عرض النتائج التي تم الحصول عليها في شكل أعمدة تشتت الملوثات في الغلاف الجوي والتي تمثل اختلاف نسبة حجمية ودرجة الحرارة و السرعة مسارات الجزيئات وكذلك ملامح هذه المتغيرات للحالات المختلفة لطبيعة التهوية للمكان.

الكلمات المفتاحية: نفق ، تلوث ، تشتت ، تهوية ، محاكاة عددية

Résumé :

L’objectif principal de ce travail est l’étude de la dispersion d’un polluant gazeux Dans un espace clos ou semi ouvert représenté par un Tunnel, nous avons pris le gaz dioxyde de carbone comme un gaz d’échappement qui représente un risque majeur d’asphyxie. Le logiciel Ansys-CFX à été adopté pour la simulation dans cette étude.

Nous avons montré à travers de cette investigation le rôle de désenfumage dans ce type espace. Les résultats obtenus ont été présenté sous formes des panaches de dispersion des polluant dans l’atmosphère qui représente la variation de la fraction volumique, la température, les composantes de vitesse et les lignes de courant ainsi les profiles de ces variables pour les différents cas de dispositif d’évacuation.

Mots clés : tunnel, pollution, dispersion, ventilation, simulation numérique.

Abstract :

The main objective of this work is the study of the dispersion of a gaseous pollutant In an enclosed or semi-open space represented by a Tunnel, we took carbon dioxide gas as an exhaust gas which represents a major risk asphyxiation. The Ansys-CFX software was adopted for the simulation in this study.

We have shown through this investigation the role of smoke extraction in this type of space. The results obtained were presented in the form of plumes of dispersion of pollutants in the atmosphere which represents the variation of the volume fraction, the temperature, the speed components and the current lines as well as the profiles of these variables for the different cases of evacuation device.

Keywords: tunnel, pollution, dispersion, ventilation, numerical simulation.

Sommaire

Sommaire

Sommaire……..…….……..I
Liste Des Figures……....V
Liste Des Tableaux……..VII
Abréviations……...……..…..…….VIII
Nomenclature……IX
INTRODUCTION GÉNÉRALE ……..……02
CHAPITRE I : Recherche bibliographique …….....….....……05

CHAPITRE II : GÉNÉRALITÉ SUR LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE ET LA VENTILLATION DANS LES TUNNEL

II-1-introduction 13
II-2-Les pollutions atmosphériques..... 13
II-2-1-Définition de la pollution atmosphérique……...13
II-2-2-Sources de pollution atmosphérique…….....13
II-2-2-1-Les sources naturelles .....….....13
II-2-2-2-Les sources artificielles ...…….....…….....……14
II-2-2-2-1-Les sources fixes…….....…….……..15
II-2-2-2-2-Les sources mobiles…….....….16
II-2-3-les différents types de polluants atmosphériques…….....…18
II-2-4-Les impacts sur la santé des polluants atmosphériques…….....……..19
II-2-5-Peut-on se protéger…….....19
II-2-6-La pollution atmosphérique, problème sanitaire de grande ampleur….....20
II-2-7-les solutions contre la pollution de l'air…….....20
II-2-8-La qualité de l'air…….....…….20
II-2-9-Les effets de pollution atmosphérique…….....…21
II-2-10-Les effets sur la santé ……...…21
II-2-11-Les effets sur l'environnement…….....22
II-2-12-Facteurs intervenant dans le transport et la diffusion de polluants….....22
II-2-12-1-Facteurs météorologiques…….....22
II-2-12-1-1-Le vent…….....….22
II-2-12-1-2-Le gradient vertical de température…….....23
II-2-12-1-3-La turbulence…….....23
II-2-12-2-Facteurs physiques…….....23

Sommaire

II-3-Tunnel…….24
II-3-1-Introduction…….24
II-3-2-Origine du mot…….24
II-3-3-Définition…….25
II-3-4-Des types de tunnels très variés…….25
II-3-5-Tunnel ou pont…….26
II-3-6-Tunnels remarquables…….27
II-4-1-Définition de la ventilation…….28
II-4-2-Rôles de la ventilation dans un tunnel…….29
II-4-3-Les différents systèmes de ventilation…….29
II-4-4-Les différents types de ventilation…….33
II-4-5-Importance de la ventilation dans la conception générale d'un tunnel…….34
II-4-6-Les types de ventilation en tunnel…….37
II-4-7-Incidence sur le projet de tunnel…….41
II-4-8-Qualité de l'air en tunnel en exploitation normale…….41
II-4-9-Qualité de l'air et bruit au voisinage des tunnels …….41
II-4-10-Stratégie en ventilation longitudinale……. 42
II-4-11-Stratégie en ventilation transversale…….43
Conclusion…….45

CHAPITRE III : Modélisation physique et formulation mathématique

III-1-1-La couche de surface urbaine…….47
III-1-1-1-Introduction…….47
III-1-2-Structure de la couche de surface urbaine …….47
III-1-3-Dispersion des polluants dans l'atmosphère urbaine …….49
III-1-4-Ecoulements moyens et turbulents dans la couche de surface…….49
III-1-4-1-Les équations fondamentales dans la couche de surface…….49
III-1-4-2-Prise en compte de la turbulence…….52
III-1-5-Influence de la structure urbaine…….54
III-1-5-1-Effets dynamiques…….55
III-1-5-2-Effets thermiques…….55
III-1-5-3-Effets sur la dispersion…….55
III-1-6-Conclusion…… ……..56

Sommaire

III-2-Outils de modélisation……..56
III-2-1-Modélisation numérique**……..…….…....56**
III-2-1-1-La Simulation Numérique Directe (Direct Numerical Simulation ou DNS)**…….....56**
III-2-1-2-La Simulation des Grandes Echelles (Large Eddy Simulation ou LES)**.....56**
III-2-1-3-La modélisation statistique des équations de Navier-Stokes (Reynolds Average Navier-Stokes équations ou équations RANS)**…….....…..57**
III-2-2-Différentes modèles de la dispersion atmosphérique……....**58**
III-2-2-1-Les modèles gaussiens **…..……..….58**
III-2-2-2-Les modèles lagrangiens**…….....…….....59**
III-2-2-3- Les modèles de la mécanique des fluides CFD**…….....59**

CHAPITRE IV : Résultats et discussion

IV-1- Introduction**…….....…….…….61**
IV-2- Calcul numérique **…….....…….…….……..61**
IV-3- La simulation par le logiciel**…….....……61**
IV-4- Présentation Du Code De Calcul**…….....……..……..61**
IV-5-Analyse et évaluation des résultats**…….....71**
IV-6-Conclusion**……..……73**
Conclusion général **……...…….....75**
Référence**……..…….....77**

LISTE DES FIGURES

Figure II.1 :épisode de pollution atmosphérique sur le climat **……...…18**

Figure II.2 : le passage en tunnel est souvent la meilleure solution pour diminuer la fragmentation des écosystèmes par les voies de transport. **……..24**

Figure II.3 : Le tunnel de Malpas sur le canal du Midi **……..26**

Figure II.4: Tunnel dans une région montagneuse à Boumerdès, Algérie **……..…33**

FIG II.5: Implantation de ventilateurs en voûte de tunnel**……..34**

FIG II.6 : Exemples d'implantation de ventilateurs pour un tunnel à section rectangulaire ((a) et (b) : coupe en travers; (c) profil en long; la solution (b) n'est pas recommandée. **……35**

FIG II.7 : 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. **……..…36**

FIG II.8 : Exemples de configurations de gaines de ventilation en tranchée couverte; AV est mis pour la gaine d'air vicié et AF pour la gaine d'air frais; (c) est à éviter car peu efficace; (d) nécessite des ventilateurs insufflateurs et extracteurs répartis sur toute la longueur de l'ouvrage. **…….37**

FIG II.9 : Schéma des différents systèmes de ventilation en situation normale d'exploitation; les flèches représentent le mouvement de l'air (air frais en bleu, air vicié en rouge); (a) : système longitudinal; (b) système transversal : (b1) transversal pur ou partiel; (b2) : semi-transversal. **…….38**

FIG II.10 : Emploi de la ventilation en cas d'incendie : (a) ventilation longitudinale; (b) ventilation longitudinale avec extraction massive; (c) ventilation transversale; (d) ventilation transversale employée en stratégie longitudinale. **……...….40**

FIG II.11 :(a) Photo d'une trappe de désenfumage télécommandée; (b) photo d'une bouche d'insufflation d'air frais. **……...…45**

FIG III.1: Structure de la couche limite atmosphérique **…….47**

Figure III.2: Structure de la Couche Limite Urbaine : la couche limite de surface représente ~0.1 à 0.2 Zi de la couche limite **…….48**

FIG IV.1 : Problème physique pour les différents cas **…….....65**

FIG IV.2 : l'évolution de la fraction volumique dans le tunnel pour le cas 1 **…….67**

FIG IV.3 : l'évolution de la température dans le tunnel pour le cas 1 **……67**

FIG IV.4 : l'évolution de la vitesse dans le tunnel pour le cas 1 **……67**

FIG IV.5 : les lignes de courantdans le tunnel pour le cas 1 **……...67**

FIG IV.6 : l'évolution de la fraction volumique dans le tunnel pour le cas 2 **……..…67**

FIG IV.7 : l'évolution de la température dans le tunnel pour le cas 2 **……68**

FIG IV.8 : l'évolution de la vitesse dans le tunnel pour le cas 2 **……68**

FIG IV.9 : les lignes de courant dans le tunnel pour le cas 2 **…….68**

FIG IV.10 : l'évolution de la fraction volumique dans le tunnel pour le cas 3**……...68**

FIG IV.11 : l'évolution de la température dans le tunnel pour le cas 3**……...…69**

FIG IV.12 : l'évolution de la vitesse dans le tunnel pour le cas 3 **……..69**

FIG IV.13 : lignes de courant dans le tunnel pour le cas 3**……..…69**

FIG IV.14 : l'évolution de la fraction volumique dans le tunnel pour le cas 4 **……...70**

FIG IV.15 : l'évolution de la température dans le tunnel pour le cas 4 **……..…70**

FIG IV.16 : l'évolution de la vitesse dans le tunnel pour le cas 4 **……..……70**

FIG IV.17 : les lignes de courant dans le tunnel pour le cas 4**…….……70**

FIG IV.18 : la variation de la fraction volumique en fonction de la hauteur de tunnel pour les différents cas **……....71**

FIG IV.19 : la variation de la température en fonction de la hauteur de tunnel pour les différents cas**…….71**

FIG IV.20 : la variation de la vitesse u en fonction de la hauteur de tunnel pour les différents cas **……..…72**

FIG IV.21 : la variation de la vitesse v en fonction de la hauteur de tunnel pour les différents cas**…….72**

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 : Système A : évacuation et apport d'air naturels**.....30**

Tableau II.2 : Système B: évacuation d'air naturelle et apport d'air mécanique**.....31**

Tableau II.3 : Système C: apport d'air naturel et évacuation d'air mécanique**.....32**

Tableau II.4 : Système D (ventilation double flux): évacuation et apport d'air mécaniques**...33**

Tableau II.5 : Cas pour lesquels la ventilation longitudinale est autorisée pour les tunnels de gabarit supérieur à 3,5 m; (a) : oui s'il est possible de contrôler le courant d'air longitudinal; (b) : sous réserve d'augmenter le nombre des issues de secours; (c) : sauf si toutes les autres solutions sont pires et que des aménagements compensatoires sont réalisés **.....43**

Tableau. III. 1 : Valeurs des constantes du modèle k⁻ϵ **……..……58**

Abréviations

CFD : ComputationalFluid Dynamics

CLA : Couche Limite Atmosphérique

CLS : Couche Limite de Surface

CSU : Couche de Surface Urbaine

CLU : Couche Limite Urbaine

CERN : CentRNre européen de recherche nucléaire

DNS : Direct Numerical Simulation

HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques

INAA : Instrumental Neutron Activation Analysis

LHC : Large Hadron Collider

LES : Large Eddy Simulation

NMF : Neutral Model Format

RANS : Reynolds Average Navier Stokes

SPS : super proton synchrotron

SWARA : Step -wiseWeightAssessment Ratio Analysis

VIKOR : VlseKriterijumskaOptimizacija I KompromisnoResenje

Nomenclature

ρ : Masse volumique (kg/m3)

$\boldsymbol{uvw}$ **:** Composantes de la vitesse(m/s)

$\boldsymbol{\tau_{ij}}$ **:**Contrainte de cisaillement (N/m2)

μ **:** Viscosité dynamique (kg/ms.)

δ_{ij} **:** Indice de Kronecker (=1 si : i = j ; 0 si i ≠ j)

$\boldsymbol{\theta}$: Température potentielle (k)

$\boldsymbol{v}$ **:**Viscosité cinématique (m2/s)

$\boldsymbol{V_t}$:Viscosité cinématique turbulente (m2/s)

T_v: Température virtuelle (s)

$\boldsymbol{R^*}$ **:**Constante des gaz parfaits pour l'air sec J/kg.k

C i : Concentration du polluant i (g/m3)

C : Concentration moyenne (g/m3)

$\boldsymbol{q}$ **:**Humidité spécifique

$\boldsymbol{K_t}$ **:** Diffusivité turbulente (m2/s)

K :Énergie cinétique turbulente (m2/s)

$\boldsymbol{Pr_t}$: Nombre de Prandtl turbulent

$\boldsymbol{Sc_t}$: Nombre de Schmidt turbulent

$\boldsymbol{\lambda}$:Conductibilité thermique moléculaire (W/m.k)

$\boldsymbol{\lambda_t}$:Conductibilité thermique turbulente (W/m.k)

$\boldsymbol{C_p}$:Chaleurs massiques constant (J/kg.k)

$\boldsymbol{\sigma_\varepsilon}$:Nombre de Prandtl pour ε

$\boldsymbol{\sigma_k}$:Nombre de Prandtl pour k

$\boldsymbol{C_\mu}$ **,**$\boldsymbol{C_{1\varepsilon}}$ **:** Constantes du modèle K-ε

Indices

X : Coordonnée cartésienne

i : Numéro de position

i,j,k : Direction de projection

Introduction Générale

Introduction Générale

Pour mieux connaître et maîtriser la pollution de l'air, il est nécessaire de savoir quelles sont les sources de pollution, les identifier et les quantifier. Cette connaissance permet ensuite de prendre des mesures de réduction des émissions à la source. Les inventaires d'émissions sont également une donnée de base nécessaire pour réaliser des évaluations de qualité de l'air et estimer les impacts de cette pollution sur la santé et l'environnement. La pollution d'origine automobile est devenue au cours du temps un facteur notable de la dégradation de l'environnement en générale et diminution de la qualité de l'air dans les villes.

L'air contient aujourd'hui environ 0,04 % de CO2. À partir d'une certaine concentration dans l'air, ce gaz s'avère dangereux voire mortel. La valeur limite d'exposition est de 3 % sur une durée de 15 minutes. Cette valeur ne doit jamais être dépassée. Au-delà, les effets sur la santé sont d'autant plus graves que la teneur en CO2 augmente. Ainsi, à 2 % de CO2 dans l'air, l'amplitude respiratoire augmente. À 4 %, la fréquence respiratoire s'accélère. À 10 %, peuvent apparaître des troubles visuels, des tremblements et des sueurs. À 15 %, c'est la perte de connaissance brutale. À 25 %, un arrêt respiratoire entraîne le décès.

On s'attache de nos jours à mieux comprendre les divers mécanismes et impacts de ces polluants à différentes échelles à fin de pouvoir prévenir et diminuer leurs effets sur la santé et l'environnement. Plusieurs études ont été menés ces dernières années à l'issue de comprendre le comportement de l'écoulement de l'air sous différentes configurations Les travaux sont basés sur la simulation numérique.

Les données sont collectées etanalysées pour une période déterminée et sous différentes conditions atmosphériques pour la détermination des concentrations en polluants. L'objectif de notre présent travail est la simulation CFD de l'écoulement et la dispersion d'un polluant à l'intérieure d'une tunnel par l'application d'une approche RANS (Reynolds Average Naviers-Stocks) basée sur un modèle de turbulence K-epsilon implémenté dans le code CFD (Computational Fluid Dynamics) ANSYS CFX. Le mémoire est organisé de la façon suivante :

L'objet du **Chapitre 01** contient le recherche bibiographique

Le **Chapitre 02** est essentiellement consacré à la définition de la pollution atmosphérique, les sources de la pollution, présentation des principaux polluants et aussi leurs effets sur la santé et l'environnement et proposition les solutions. La ventilation des

infrastructures de transport souterraines est étroitement liée à la sécurité globale. Nous élaborons des projets de systèmes de ventilation de tunnels routiers adaptés aux dispositifs de sécurité.

La planification tient également compte des aspects environnementaux : qualité de l'air, lutte contre le bruit et protection des paysages. Notre expérience couvre toutes les phases de planification et de réalisation de l'étude de concept à l'optimisation de fonctionnement.

Le Chapitre 03 présente alors en détail l'approche CFD que nous avons appliqué pour la simulation de l'écoulement et la dispersion dans un tunnel en utilisant le code ANSYS CFX.

Au **Chapitre 04 ,**les résultats des simulations sont présentés en vu d'étudier la fraction volumique, vitesse, la température et les lignes de courants de l'écoulement et de la dispersion dans le tunnel. Les profils de turbulence et de concentration en polluants simulés par le modèle k . Enfin, une synthèse de l'étude est réalisée en conclusion et des perspectives futures de recherche sont dégagées à la fin de ce mémoire.

Chapitre I:
Recherche Bibliographique

- L'écoulement turbulent tridimensionnel et la dispersion des polluants gazeux monoxydes de carbone (CO) et oxydes d'azote (NOx) dans un tunnel routier ont été modélisés à l'aide du modèle de turbulence k – ε standard et résolus numériquement à l'aide de la méthode des volumes finis. Les émissions des véhicules ont été estimées à partir des débits de circulation mesurés et modélisées en tant que sources de lignes en bandes le long du plancher du tunnel. Les effets de la ventilation du ventilateur et de l'effet de piston des véhicules en mouvement sur le débit d'air et la dilution des polluants ont été examinés. Les résultats numériques révèlent qu'une vitesse de pointe existe près du plancher du tunnel en raison de l'effet de piston des véhicules. Les concentrations transversales de polluants atmosphériques sont distribuées de manière non uniforme et les concentrations augmentent avec la distance en aval. L'effet piston des véhicules peut à lui seul fournir une dilution de 25% à 34% des polluants atmosphériques dans le tunnel, aggravé un effet de dilution de 43% à 70% en fonction des conditions de ventilation**. [1]**
- La pollution atmosphérique liée à la circulation est associée à des effets respiratoires négatifs. Le but de la présente étude était d'étudier si l'exposition à la pollution de l'air dans un tunnel routier provoque des réponses inflammatoires et de coagulation sanguine des voies respiratoires. Au total, 16 sujets sains ont subi une bronchoscopie avec biopsies muqueuses bronchiques et lavage broncho-alvéolaire (BAL) à deux reprises, dans un ordre aléatoire: une fois à 14 h après une exposition de 2 h à la pollution atmosphérique dans un tunnel routier très fréquenté, et une fois après un contrôle journée avec des sujets exposés à l'air urbain lors d'activités normales. Du sang périphérique a été prélevé avant la bronchoscopie. Les expositions dans les tunnels routiers comprenaient des particules avec un diamètre aérodynamique à 50% de coupure de 2,5 μm, des particules avec un diamètre aérodynamique à 50% de coupure de 10 μm et du dioxyde d'azote qui avaient des concentrations médianes de 64, 176 et 230 μg · m -3, respectivement. Des nombres significativement plus élevés de nombre total de cellules de liquide BAL, de lymphocytes et de macrophages alvéolaires étaient présents après l'exposition au tunnel routier par rapport au contrôle. Une expression nucléaire significativement plus élevée du composant du facteur de transcription c-Jun a été trouvée dans l'épithélium bronchique après exposition. Aucune régulation positive des molécules d'adhésion ou d'infiltration cellulaire n'était présente et les facteurs de coagulation sanguine n'étaient pas affectés. En conclusion, l'exposition de sujets sains à la pollution de l'air liée au trafic a entraîné une réponse inflammatoire des voies respiratoires plus faible avec migration cellulaire, ainsi que des signes d'une transduction du signal initiée dans l'épithélium bronchique. **[2]**

- Dans cet article, nous examinons l'effet de différentes configurations de routes, y compris les murs antibruit et l'élévation ou la dépression des routes par rapport au terrain environnant, sur la dispersion des polluants liés au trafic pour les vents perpendiculaires à la route. Une expérience en soufflerie modélisant 12 configurations différentes a été réalisée pour étudier les champs d'écoulement et les distributions de concentration résultant des émissions d'une autoroute à six voies simulée. Toutes les configurations examinées ici ont réduit les concentrations au sol sous le vent par rapport à celles d'une route plate et non obstruée; cependant, la mesure dans laquelle les concentrations ont été réduites variait considérablement selon la situation particulière. Les données de concentration au niveau du sol provenant des cas considérés dans cette recherche indiquent qu'une vitesse d'entraînement constante peut être utilisée sur la région commençant sous le vent de toute perturbation initiale de l'écoulement résultant de la configuration de la route (par exemple, une région de recirculation derrière un mur antibruit) et s'étendant au moins jusqu'à la fin de nos mesures. Par exemple, dans le cas d'un seul mur antibruit du côté vent arrière de la route, cette région s'étend d'environ quatre hauteurs de barrière en aval de la chaussée à 40 hauteurs de barrière. Il a également été constaté que le concept d'origine virtuelle est utile pour décrire le mélange initial créé par la configuration particulière de la chaussée. Pour modéliser efficacement l'influence de la configuration de la chaussée sur la dispersion, une combinaison d'une origine virtuelle et d'une vitesse d'entraînement peut être efficace. L'amplitude du décalage d'origine virtuelle semble dépendre de la configuration particulière de la route, tandis que la vitesse d'entraînement semble être fonction de la vitesse de frottement et de la géométrie de la route. Ces résultats suggèrent que la configuration des routes doit être prise en compte dans la modélisation de la qualité de l'air à proximité des routes**. [3]**
- La dispersion des polluants d'un portail de tunnel routier est principalement déterminée par l'interaction entre le vent ambiant et le courant-jet provenant du portail de tunnel. En principe, les modèles microscopiques eulériens, en résolvant les équations de conservation de la masse, de l'impulsion et de l'énergie, sont ainsi capables de simuler correctement des effets tels que la flottabilité, etc. Cependant, pour les applications d'ingénierie, ces modèles nécessitent trop de temps processeur et ne sont pas faciles à manipuler par du personnel non scientifique. Seuls quelques modèles de dispersion, applicables à des fins réglementaires, sont à ce jour apparus dans la littérature. Ces modèles sont soit des modèles empiriques qui ne sont pas toujours applicables à différents sites, soit ils ne capturent pas les effets physiques importants comme les phénomènes de flottabilité. Ici, un modèle assez simple est présenté, qui prend en compte la plupart des processus

importants considérés pour régir la dispersion d'un jet stream à partir de portails. Ce sont la vitesse de sortie, la flottabilité, l'influence des fluctuations de la direction du vent ambiant sur la position du courant-jet et la turbulence induite par le trafic. Bien que le modèle contienne certains éléments heuristiques, il a été testé avec succès contre des expériences de traçage prises près d'un portail de tunnel autoroutier en Autriche. Le modèle nécessite relativement peu de temps CPU. Les limites actuelles du modèle comprennent la négligence des effets du terrain, des bâtiments et des véhicules sur la dispersion, et la négligence de la dispersion horizontale résultant de l'entraînement de l'air ambiant dans le courant-jet. Ce dernier pourrait conduire à une sous-estimation des épandages de panache pour des vitesses de vent plus élevées. La validation du modèle sera au centre des recherches futures. **[4]**

- Les caractéristiques des polluants atmosphériques dans un tunnel routier ont été étudiées à Osaka, au Japon. Les distributions de taille et les concentrations de carbone élémentaire (EC) et de carbone organique (OC) ont été mesurées. Les résultats ont démontré que la CE était le constituant prédominant des particules dans le tunnel, qui représentaient 71% en masse des particules (PM) de moins de 2 μm de diamètre aérodynamique. La concentration dans la CE a augmenté de façon linéaire avec l'augmentation du volume de trafic diesel et le coefficient de corrélation s'est révélé être à un niveau significatif ($r = 0,93$, $p < 0,001$). En revanche, la distribution des tailles de CO était bimodale avec des pics dans les gammes de tailles inférieures à 1 et 2 à 10 μm et ne dépendait pas clairement du volume de trafic diesel. Pour la matière gazeuse, le monoxyde d'azote (NO) s'est révélé être le principal composant des NOx (plus de 90%) et sa concentration était proportionnelle au volume de trafic des véhicules diesel ($r = 0,82$, $p < 0,001$). Les concentrations de monoxyde de carbone (CO) et de dioxyde de carbone (CO2) dans le tunnel se sont révélées, par analyse de multi-régression, dépendre à la fois des véhicules diesel et à essence**. [5]**
- Un programme informatique pour PC a été préparé pour simplifier les études sur les flux d'air dans les tunnels routiers et le problème connexe de la concentration de pollution due aux émissions des véhicules. Les résultats des simulations comprennent les pressions d'air, les débits et les concentrations de pollution le long du tunnel. Les données d'entrée sont la géométrie du tunnel, y compris les facteurs de frottement d'écoulement et les coefficients de perte, ainsi que les données de trafic et d'émission et les pressions d'air aux limites. Le programme a été préparé dans l'environnement IDA pour la simulation modulaire. Tous les modèles mathématiques ont été formulés dans le Neutral Model Format (NMF) [Sahlin 19941. Le programme a été validé par des comparaisons avec des programmes plus

anciens (Malmstrom 1980). Les avantages du nouveau programme, par rapport aux programmes traditionnels, sont sa grande flexibilité, sa facilité de maintenance et son extensibilité, ainsi que son temps de mise en œuvre très modéré. Il s'est avéré être un outil utile pour étudier des concepts de ventilation alternatifs pour les tunnels routiers. Les débits d'air ont été mesurés dans une partie du «Södersledstunneln», un tunnel routier très utilisé dans le centre de Stockholm. Les mesures ont été réalisées avec la technique du gaz traceur, qui a permis de mesurer sans perturber le flux de trafic à travers le tunnel. Les mesures ont été comparées à des simulations du débit d'air. **[6]**

- Afin d'améliorer encore les performances de suppression de la poussière d'un rideau d'air dans les tunnels, ce document a fait une analyse approfondie des effets du débit d'air de pression radiale et axiale d'un générateur de rideau d'air et du débit d'air d'échappement d'un ventilateur de dépoussiérage sur les comportements de diffusion et de pollution. de poussière. Grâce à la technologie CFD et à des mesures sur le terrain, on peut observer que: lorsque le rapport de débit d'air de pression axiale / radiale (Ra / r) du générateur de rideau d'air variait dans la plage de 1 / 9–6 / 4, la distance de diffusion de -la poussière de concentration (avec une concentration supérieure à 10 mg / m3) diminue avec la diminution de Ra / r; et lorsque Ra / r = 1/9, les rideaux de circulation d'air formés présentaient les performances de suppression de poussière les plus favorables. De plus: lorsque le rapport de débit d'air d'échappement / pression (Re / p) du ventilateur de dépoussiérage augmentait, la distance de diffusion des poussières à haute concentration diminuait; et lorsque Re / p = 1,2, la poussière produite pourrait être efficacement supprimée par les rideaux d'air. Enfin, les mesures sur le terrain révèlent que lorsqu'un ventilateur de dépoussiérage avec un Re / p de 1,2 et un générateur de rideau d'air avec un Ra / r de 1/9 ont été utilisés en combinaison, la poussière à haute concentration peut être entièrement contrôlée dans une plage de 5,49. m de la section frontale par les rideaux d'air formés, et la concentration moyenne de poussière dans la région de 5 à 50 m de la section frontale du tunnel a été réduite à 9,82 mg / m3; c'est-à-dire que le conducteur et les travailleurs de l'excavatrice peuvent être protégés efficacement. **[7]**
- L'air respirable à l'intérieur du tunnel est une nécessité indéniable et à côté de la ventilation naturelle, le tunnel doit être organisé de manière fiable, pour fournir automatiquement de l'air sain dans différentes conditions. Parmi les méthodes de ventilation en tunnel, les modes longitudinal et transversal sont les méthodes mécaniques les plus courantes. Cette recherche se concentre sur la sélection de la méthode optimale

pour la ventilation longitudinale mécanique des polluants des tunnels à partir de quatre modèles présentés. Dans le cadre de cette recherche, les auteurs ont utilisé SWARA (Step -Wise Wight Assissent Ratio Analysis) comme l'une des méthodes MCDM (prise de décision multicritères) les plus polyvalentes pour la prise de décision managériale dans des situations complexes avec des mesures multiples et variées. Quatorze experts de différents domaines étaient impliqués. Le modèle de recherche a été établi sur la base des idées d'experts et des critères suivants: contrôle des fumées (C 1), niveau de sécurité (C 2), complexité de conception (C 3), coûts d'investissement (C4), augmentation de la concentration de polluants jusqu'au portail (C5) , section chargée de fumée (C6) et évacuation simultanée et lutte contre l'incendie (C7). La méthode SWARA a été appliquée pour évaluer les critères tandis que la méthode VIKOR (VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) a été utilisée pour évaluer et classer quatre alternatives de cette recherche, à savoir: 1) ventilateurs à réaction avec extraction ponctuelle par ventilateurs axiaux (A 1); 2) ventilateurs axiaux avec buse Saccardo (A 2); 3) ventilateurs à jet avec ventilateurs axiaux à arbre (A 3); 4) ventilateurs à réaction uniquement (A 4). Les résultats finaux montrent que les ventilateurs à jet avec extraction ponctuelle par des ventilateurs axiaux sont le meilleur choix. Enfin, les auteurs pensent que ce nouveau modèle hybride de méthodes MCDM peut être utile comme nouveau cadre dans différents domaines de recherche. **[8]**

- Dans cette étude, les résultats des concentrations chimiques à l'intérieur et à l'extérieur d'un tunnel de circulation de Lisbonne (Portugal) ont été comparés, pendant une semaine. Ils ont été obtenus par Instrumental Neutron Activation Analysis (INAA). Les valeurs des tunnels dépassent largement les valeurs prescrites par la loi sur l'air ambiant et les coefficients de corrélation de Pearson indiquent la remise en suspension du sol / la poussière de route dispersée (As, Ce, Eu, Hf, Fe, Mo, Sc, Zn), les marqueurs de circulation (Ba, Cr), l'usure des pneus (Cr, Zn), l'usure par rupture (Fe, Zn, Ba, Cu, Sb), les huiles d'échappement et de moteur (Zn) et les embruns (Br, Na). Tous les jours, ces éléments à l'intérieur du tunnel étaient plus enrichis qu'à l'extérieur; des différences statistiques significatives ont été trouvées pour Co ($p = 0,005$), Br. ($p = 0,008$), Zn ($p = 0,01$) et Sb ($p = 0,005$), tandis que les facteurs d'enrichissement de As et Sc sont statistiquement identiques. Les valeurs les plus élevées ont été trouvées pour As, Br, Zn et Sb, à l'intérieur et à l'extérieur du tunnel. **[9]**

- Les émissions des véhicules constituent une grave préoccupation environnementale, en particulier dans les espaces confinés tels que les tunnels et les parkings souterrains. Ces émissions se caractérisent par la présence de divers polluants qui, à des concentrations élevées, peuvent avoir des effets néfastes sur la santé. Cet article présente une évaluation des émissions induites par les véhicules et de la qualité de l'air dans un tunnel très fréquenté situé dans l'agglomération urbaine de Beyrouth. À cette fin, des théories de modélisation communes ont été examinées, des normes de qualité de l'air pertinentes ont été définies, les conditions existantes ont été caractérisées, un programme d'échantillonnage de l'air a été mis en œuvre et une modélisation mathématique pour simuler des mesures sur le terrain a été réalisée. L'importance de l'impact a été évaluée en comparant les concentrations de polluants mesurées et simulées avec les normes de qualité de l'air. Des simulations de modèle ont également été utilisées pour évaluer les facteurs d'émission de polluants induits par les véhicules. Enfin, des mesures d'atténuation sont proposées pour assurer une bonne gestion de la qualité de l'air à l'intérieur du tunnel. **[10]**

  .
- Les populations de véhicules en Chine ont fortement augmenté depuis les années 1990. Les émissions des véhicules, y compris divers polluants gazeux et les particules, entraînent une détérioration de la qualité de l'air. Cependant, les mesures de la matière particulaire des véhicules routiers en Chine sont à peine signalées, et donc la composition chimique des particules émises par les véhicules en Chine est inconnue. Dans cette recherche, des expériences en tunnel ont été réalisées pour mesurer les PM2,5 dans le tunnel de Wutong, Shenzhen, Chine. Des compositions chimiques détaillées de PM2,5, avec des composés organiques déterminés par GC / MS, dans le tunnel ont été présentées. Le carbone élémentaire et la matière organique représentaient respectivement 63% et 34% de la masse totale de PM2,5 dans le tunnel de Wutong. Les alcanes, les HAP, les hopanes, les acides gras et les acides dicarboxyliques étaient les principaux composés organiques identifiés, et leurs profils de source dans les PM2,5 dans le tunnel de Wutong ont été caractérisés. Les comparaisons de nos mesures avec celles de la littérature ont également été faites pour démontrer les caractéristiques des profils de source des véhicules dans le tunnel de Wutong. Les résultats expérimentaux de cet article peuvent améliorer la compréhension des particules émises par les véhicules en Chine**. [11]**
- Des concentrations d'hydrocarbures volatils émis par des véhicules spécifiques, dont le 1,3-butadiène et le benzène, ont été déterminées dans deux tunnels routiers urbains à

Göteborg, en Suède. Des comparaisons ont été faites avec d'autres environnements pollués. Des échantillons ont été prélevés sur des cartouches d'adsorbant et les hydrocarbures ont été analysés par chromatographie en phase gazeuse. Les concentrations étaient plusieurs fois plus élevées dans les tunnels que dans les rues à trafic similaire. Les niveaux d'exposition des conducteurs et des passagers à l'intérieur des voitures diffèrent de manière similaire. Les dangers qui en résultent pour les enfants et les adultes asthmatiques et les risques génotoxiques accrus pour tous les automobilistes dans les tunnels sont particulièrement préoccupants. Il est conclu que les longs tunnels routiers avec un grand nombre de voitures doivent être interrogés en ce qui concerne les risques pour la santé. Les automobilistes ont des raisons d'éviter la conduite dans les tunnels et de s'opposer aux nouveaux tunnels routiers. Néanmoins, plusieurs investissements d'un milliard de dollars dans de nouveaux tunnels sont prévus en Scandinavie et en Europe. **[12]**

Chapitre II:
Généralités sur les polluants atmosphériques, les tunnels et la ventilation dans les tunnels

II-1-Introduction :

La pollution atmosphérique est un phénomène très complexe compte tenu de la diversité des polluants susceptibles d'être présents dans l'atmosphère. ... Ces phénomènes ont lieu dans la troposphère (la plus bassecouche de l'atmosphère).

Un tunnel est une galerie souterraine livrant passage à une voie de communication (chemin de fer, canal, route, chemin piétonnier). ... On y parvient ordinairement par des systèmes d'étais reposant sur le sol des galeries, soit par un système d'ancrage par boulonnage ou de cintres provisoires.

La ventilation des tunnels comprend l'ensemble des équipements nécessaires pour maintenir une qualité d'air suffisante à l'intérieur des tunnels, aussi bien en exploitation normale qu'en situations exceptionnelles telles que perturbations du trafic ou accidents **[13].**

II-2-Les pollutions atmosphériques :

II-2-1-Définition de la pollution atmosphérique :

On entend par pollution de l'atmosphère, l'émission dans l'atmosphère, de gaz, des fumées ou de particules solides ou liquides, corrosifs, toxiques ou odorantes de nature à incommoder la population, à compromettre la santé ou la sécurité publique ou à nuire aux végétations, la production agricole et aux produits agro-alimentaires, à la conservation des constructions et monuments ou au caractère des sites**[13].**

II-2-2-Sources de pollution atmosphérique :

La pollution de l'air est la résultante de multiples facteurs : croissance de la consommation d'énergie, développement des industries extractives, métallurgiques et chimiques, de la circulation routière et aérienne, de l'incinération des ordures ménagères, des déchets industriels, etc. Ainsi, la production et l'utilisation d'énergie en sont les principaux moteurs **[13].**

II-2-2-1-Les sources naturelles :

Les phénomènes naturels sont à l'origine d'une importante émission de particules dans l'atmosphère. Annuellement et à l'échelle mondiale, la production de particules naturelles est estimée à environ 2 096.10^6 Tonnes.

Dans certains cas, la capacité de pollution par les sources naturelles peut être considérable ; c'est le cas par exemple lors du soulèvement dans l'atmosphère des particules du sol ou lors d'éruptions volcaniques, etc.

Cependant en général, on attribue une importance moindre à la pollution due aux sources naturelles et ce pour deux raisons ;

- Elle est produite par les substances qui ont généralement un effet nocif faible ou bien qui se transforment assez rapidement en composés inoffensifs entrant dans les cycles biologiques naturels.
- Elle provient de sources émettrices dispersées et souvent éloignées des grandes agglomérations urbaines.

Parmi les sources naturelles on compte :

* L'érosion éolienne (la poussière du sol et les particules minérales emportées par le vent)

* Les éruptions volcaniques (cendres volcaniques) dans lesquelles on retrouve par exemple les particules de sulfates issues de la conversion de SO2

* Les embruns et sels marins (le brouillard marin) qui après évaporation donnent des particules de Na Cl

* Les particules d'origine extraterrestre qui proviennent de la décomposition de météorites

* Les composées biologiques (le pollen, les spores et les bactéries)

* La fumée des incendies de forêts causée par exemple par la foudre **[14].**

II-2-2-2-Les sources artificielles :

De nombreux types d'installations industrielles émettent cependant également des polluants dans l'atmosphère, constituent généralement un problème local à l'échelle d'une région ou d'un quartier, et planétaire à grande échelle.

Les sources artificielles peuvent être classées d'après plusieurs critères selon :

- Qu'elles résultent de phénomènes de combustion ou de mécanismes plus spécifiques ;
- Qu'elles soient ponctuelles ou diffuses ;
- Qu'elles soient fixes ou mobiles **[14].**

De ce dernier classement, on trouve alors :

II-2-2-2-1-Les sources fixes :

Tous les processus de combustion et la plupart des branches industrielles sont génératrices de particules dans l'air**.**

a) L'industrie thermo énergétique :

La combustion induit dans l'atmosphère plusieurs variétés minérales, des métaux et des particules carbonées (suies), ainsi que des gaz qui se transforment dans l'atmosphère en particules tels que (les NOx et le SO2).

b) L'industrie sidérurgique :

Les principaux polluants issus de ce domaine sont des poussières de composition chimique variable et de granulométrie entre 2 et 100 µm (SiO2, ALO3, CaO2, K2O, ZnO,…) et des particules fines entre autre les fumées d'oxyde de fer. Ces émissions sont le résultat de différents processus de production à savoir : l'agglomération et « frittage » des minerais, la cokéfaction, la fusion dans les hauts fourneaux, le chauffage, le transport, etc**.**

c) L'industrie des matériaux non ferreux :

Elle participe à l'émission d'importantes quantités de Pb, Zn, Cu, Cd, Ni, Hg,…. Lors du raffinage de ces métaux au cours des opérations de fusion, des vapeurs métalliques se répandent dans l'air, s'oxydent et se subliment en fines particules, qui sont entraînées sur de longues distances par la circulation de l'air.

d) L'industrie des matériaux de construction :

La production des matériaux de construction contribue fortement à la pollution particulaire à cause des procédés d'extraction, de transport, de broyage et de fusion des minerais. Les cimenteries sont des grandes émettrices de poussières, du fait de l'importance des quantités de ciment produites et des roches utilisées pour sa production.

e) L'industrie chimique :

Ne présente pas une importante source de poussière dans l'air, mais participe d'une manière indirecte dans la pollution par l'émission des gaz qui se transforment en particules.

Certains métaux (Cd) et certains hydrocarbures aromatiques polycycliques sont produits dans l'air par les raffineries de pétrole.

f) L'incinération des déchets :

Engendre l'émission de grandes quantités de particules. Ces particules peuvent contenir d'importantes quantités de métaux (Fe, Zn, Cd, Pb, Hg) et des oxydes métalliques divers dont la toxicité est considérable. En plus de ces particules, on trouve les gaz qui dans l'air se transforment en particules (SO2).

II-2-2-2-2-Les sources mobiles :

Le parc automobile, dont le volume croit continuellement, constitue en milieu urbain la principale source d'émission de particules. La pollution issue du trafic routier comprend les émissions suivantes :

a) Les particules routières :

Le trafic automobile émet surtout des halogénures (bromures et chlorures) de plomb, volatils à la température du gaz à l'échappement, mais qui ensuite, par hydrolyse de ces sels, engendrent dans l'atmosphère des acides chlorhydriques (HCl) et bromhydriques (HBr) qui ne restent pas en général sous forme gazeuse mais se retrouvent adsorbés par les poussières atmosphériques. Ces rejets se présentent alors dans la gamme granulométrique des PM-2,5.

b) Les particules diesel :

Les moteurs diesel émettent des particules toxiques capables d'atteindre les alvéoles pulmonaires. Ainsi, leur diamètre aérodynamique moyen est centré sur 0,1 µm en sortie d'échappement. Le diesel dégage une pollution spécifique visible, des fumées noires et des suies constituées de particules de carbone et imprégnées de diverses substances, en particulier d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

Ainsi, les particules diesel sont principalement constituées :

* De résidus solides sous forme de suies (carbone élémentaire et carbone organique)

*D'une partie soluble constituée d'hydrocarbures imbrûlés, principalement les HAP, issus de la combustion incomplète du carburant diesel

* D'une fraction insoluble (carbone non fonctionnalisé, etc.).

Ce sont en fait, des particules solides avec une structure fractale qui s'apparente à une éponge. Des mesures effectuées en site proche du trafic révèlent qu'environ 75% de la carbone suie se trouve dans la fraction granulométrique inférieure à 1 µm, le reste étant à associer à des particules plus grossières. Ce qui démontre bien l'importance et la spécificité de la pollution diesel.

c) Les métaux lourds :

Parmi ces composés c'est surtout le plomb qui, de loin est le plus incriminé dans la pollution par le trafic routier et le plus répandu en milieu urbain. Ajouté aux carburants comme antidétonant sous forme de tétra-éthyle de plomb à raison de 0.15g à 0.4g/l il est rejeté presque totalement dans l'atmosphère des villes **[14].**



Figure II.1 :épisode de pollution atmosphérique sur le climat

II-2-3-les différents types de polluants atmosphériques :

On compte aujourd'hui des dizaines de milliers de molécules différentes, polluants avérés ou suspectés qui, pour beaucoup, agissent en synergie entre eux et avec d'autres paramètres (ultraviolets solaire, hygrométrie, acides, etc.). Les effets de ces synergies sont

encore mal connus. Cette pollution atmosphérique (ou intérieure) est un enjeu de santé publique, au niveau mondial comme individuel[11].

Cette pollution peut revêtir de multiples formes et être :

- brève ou chronique ;
- visible (fumée) ou invisible (pesticides dans l'air, benzène de l'essence) ;
- émise massivement ou en faible dose ;
- émise en quantité dispersée (exemple : pollution émise par les centaines de millions de pots d'échappement) ;
- locale et émise par une source fixe (exemple : cheminée, usine), ou émise par des sources mobiles (épandeurs de pesticides, transport routier, maritime ou aérien) ;
- naturelle (exemple : gaz volcaniques) ou d'origine anthropique.

L'ensemble de ces sources contribuant à une pollution globale intérieure ou extérieure (exemple : augmentation de l'effet de serre due au CO_2 ou composés organiques volatils dans l'espace domestique)**[13].**

II-2-4-Les impacts sur la santé des polluants atmosphériques :

- L'air pollué peut pénétrer dans les poumons, entrer dans la circulation sanguine et provoquer des cardiopathies, des cancers du poumon, des cas d'asthme et des infections respiratoires. En raison de la multiplicité des sources d'émission, ces polluants s'accumulent très rapidement dans l'air ambiant des habitations jusqu'à atteindre parfois des niveaux de concentration suffisamment élevés pour provoquer des effets sur la santé : irritations des yeux, rhinites, maux de tête, asthmes et allergies … **[15].**

II-2-5-Peut-on se protéger ?

On ne peut pas se priver de respirer, mais on peut acquérir de bons réflexes :

- éviter de sortir en cas de pic de pollution

- fuir les zones à forte concentration de véhicules

- aérer son habitat en début ou en fin de journée, aux heures de moindre trafic.

- pour les personnes fragiles, éviter les séances de sport ou d'activité intense en période de pollution. Pour les autres, privilégier ces efforts le matin ou le soir **[15].**

II-2-6-La pollution atmosphérique, problème sanitaire de grande ampleur :

Chaque année dans le monde, plus de 2 millions de décès sont dus à la pollution atmosphérique : sur ces 2 millions, 1,3 million décèdent pour avoir trop respiré de pollutions urbaines. Les effets les plus graves de la pollution de l'air s'observent chez les personnes déjà malades, les enfants et les personnes âgées.

Les premières causes de la pollution de l'air sont les moyens de transport, l'industrie, l'utilisation de biomasse ou de charbon dans les cuisines et pour le chauffage, ainsi que les central électriques au charbon **[15].**

II-2-7-les solutions contre la pollution de l'air :

La meilleure solution contre la pollution de l'air consisterait à ne pas polluer, ce qui s'appelle la prévention.Il existe d'autre solutions comme :

- Un meilleur réglage des appareils.
- Un choix judicieux des combustibles afin qu'ils contiennent moins de gaz toxique.
- L'étude préalable des lieux de construction des usines.
- La sauvegarde des espaces verts (ex : le poumon de la planète est l'Amazonie) **[13]**

II-2-8-La qualité de l'air :

- La pollution se concentre majoritairement dans les villes, où vivent près de 70 % des Français.
- Les polluants peuvent aussi affecter des zones éloignées de plusieurs centaines de kilomètres des lieux d'émissions avec de graves conséquences pourl'environnement : pluies acides, eutrophisation, végétation fragilisée.
- La météo peut amplifier la pollution. Par exemple, quand il fait beau et qu'il n'y a pas de vent, les polluants stagnent au-dessus des villes. S'il y a du vent, la pollution est dispersée d'un endroit à l'autre, voire très loin.

- L'humidité, la chaleur et le rayonnement solaire peuvent favoriser la transformation chimique des polluants.
- Pour connaître les niveaux de pollution, on mesure tous les jours la qualité de l'air. Lorsque les niveaux dépassent les seuils autorisés, on parle de pics de pollution **[16].**

II-2-9-Les effets de pollution atmosphérique :

La pollution atmosphérique a des effets sur la santé et sur l'environnement et donc des répercussions économiques.

Selon l'OMS (Organisation mondiale de la santé) dans ses lignes directrices relatives à l'air (synthèse de l'évaluation des risques, mise à jour 2005) : « Le fait de respirer de l'air pur est considéré comme une condition essentielle de la santé et du bien-être de l'homme. Cependant la pollution de l'air continue de faire peser une menace importante sur le plan sanitaire partout dans le monde. Plus de 2 millions de décès prématurés peuvent chaque année être attribués aux effets de la pollution de l'air extérieur dans les villes et de l'air à l'intérieur des habitations à travers le monde ». Compte tenu de cette situation, l'OMS émet des recommandations visant à réduire les effets sanitaires de la pollution **[16].**

II-2-10-Les effets sur la santé :

Les polluants sont des gaz ou des particules irritants et agressifs qui pénètrent plus ou moins loin dans l'appareil respiratoire et qui peuvent induire des effets respiratoires ou cardiovasculaires tels que :

- Une augmentation des affections respiratoires : bronchiolites, rhino-pharyngites, etc...
- Une dégradation de la fonction vésicatoire : baisse de la capacité respiratoire, excès de toux ou de crises d'asthme.
- Une hypersécrétion bronchique.
- Une augmentation des irritations oculaires.
- Une augmentation de la morbidité cardio-vasculaire (particules fines).
- Une dégradation des défenses de l'organisme aux infections microbiennes.

- Une incidence sur la mortalité à court terme pour affections respiratoires ou cardio-vasculaires (dioxyde de soufre et particules fines).
- Une incidence sur la mortalité à long terme par effets mutagènes et cancérigènes (particules fines, benzène) **[16].**

II-2-11-Les effets sur l'environnement :

Les effets de la pollution atmosphérique sur l'environnement peuvent se ressentir à différentes échelles géographiques.

- **Sur les matériaux** :

La pollution atmosphérique induit de la corrosion due au dioxyde de soufre, des noircissements et encroûtements des bâtiments par les poussières issues en grande partie de la combustion des produits pétroliers, ainsi que des altérations diverses en association avec le gel, l'humidité et les micro-organismes.

- **Sur les végétaux** :

De fortes concentrations de certains polluants peuvent conduire à des nécroses visibles sur les plantes. La pollution de l'air peut également entrainer une réduction de la croissance des plantes, même sans dommages visibles (par exemple l'ozone peut provoquer une baisse de la production agricole de céréales comme le blé) ou une résistance amoindrie des plantes à certains agents infectieux **[16].**

II-2-12-Facteurs intervenant dans le transport et la diffusion de polluants :

II-2-12-1-Facteurs météorologiques :

Nous dénombrons trois facteurs prédominants : le vent, le gradient vertical de température et la turbulence. Nous allons voir successivement leurs influences**.**

II-2-12-1-1-Le vent:

Il résulte du déplacement des masses d'air et dilue continuellement la pollution libérée au point d'émission. Une absence de vent contribuera donc à l'accumulation des polluants près des sources. Sa vitesse augmente généralement avec l'altitude [**16].**

II-2-12-1-2-Le gradient vertical de température :

II-2-12-1-3-La turbulence :

Les mouvements des masses d'air sont dus aux différences de densité entre elles. Le gradient de température conditionne ainsi le mouvement ascendant ou descendant d'une couche ou l'absence de celui-ci .La température de l'air diminue généralement avec l'altitude de 1 °C tous les 100 m.

Le gradient vertical de température est également utilisé pour définir la stabilité de l'atmosphère. Si la température décroît trop rapidement, l'atmosphère est instable, ce qui Favorise la dispersion des polluants. Une inversion thermique conduira au contraire à de forts niveaux de pollution. Cette inversion peut se produire la nuit quand le sol refroidit rapidement ainsi que l'hiver par temps clair. L'absence de vent en général favorise l'apparition d'une inversion thermique [16].

La turbulence est l'irrégularité du mouvement du vent. Elle est caractérisée par le croisement des trajectoires des masses d'air et par la superposition d'une fluctuation irrégulière, aléatoire et non reproductible de l'écoulement moyen du vent. Ce facteur est très difficile à traiter mathématiquement. La diffusion tourbillonnaire est le processus de mélange le plus important dans les basses couches de la troposphère. Il provoque la dispersion des polluants dans l'air.

Nous pouvons distinguer deux types de turbulence : la turbulence mécanique (tourbillons créés par la différence de vitesse des masses d'air, ou par le mouvement de l'air qui entre en contact avec des objets), et la turbulence thermique (tourbillons créés par la différence de température des masses d'air)**.**

II-2-12-2-Facteurs physiques :

Il s’agit d’obstacles (relief, bâtiments …) qui modifient le régime des vents. La direction des vents sera déviée autour des obstacles. Le vent pourra suivre des trajectoires préférentielles (vallée…). La vitesse sera elle aussi modifiée au sommet des ondulations du terrain et plus faible au fond de celles-ci**[16]**

II-3-Tunnel

II-3-1-Introduction :

Un tunnel est une galerie souterraine livrant passage à une voie de communication (chemin de fer, canal, route, chemin piétonnier). Sont apparentés aux tunnels par leur mode de construction les grands ouvrages hydrauliques souterrains, tels que les aqueducs, collecteurs et émissaires destinés soit à l'amenée, soit à l'évacuation des eaux des grands centres et certaines conduites établies en liaison avec les barrages et usines hydro-électriques **[17].**

Entre le moment où la première pelletée enlevée modifie l'équilibre d'une masse de terrain en place et celui où le revêtement achevé offre toute sa résistance, il est nécessaire, tant pour la sécurité des équipes au travail que pour le maintien aux dimensions données de l'excavation, de s'opposer par un dispositif approprié aux poussées plus ou moins intenses qui tendent à la fermeture de la cavité créée. On y parvient ordinairement par des systèmes d'étais reposant sur le sol des galeries, soit par un système d'ancrage par boulonnage ou de cintres provisoires. Après achèvement, le soutènement d'un tunnel est constitué soit de ces ancrages associés ou non à du béton projeté, soit d'anneaux de béton ou métalliques qui constituent ainsi une coque **[17].**



Figure II. 2 : le passage en tunnel est souvent la meilleure solution pour diminuer la fragmentation des écosystèmes par les voies de transport.

II-3-2-Origine du mot :

Le terme « tunnel » est apparu tardivement[1] dans la langue française, emprunté à l'anglais « tunnel » qui dériverait lui-même du français « tonnelle » évoquant la forme du tonneau. Ce mot apparaît après la construction du tunnel sous la Tamise construit par Marc Isambart Brunel. Le mot anglais a été ensuite repris par Marc Seguin au moment de la construction de la ligne de chemin de fer Saint-Étienne-Lyon, de Le terme « tunnel » est

apparu tardivement dans la langue française, emprunté l'anglais « tunnel » qui dériverait lui-même du français « tonnelle » évoquant la forme du tonneau. Ce mot apparaît après la construction du tunnel sous la Tamise construit par Marc Isambart Brunel. Le mot anglais a été ensuite repris par Marc Seguin au moment de la construction de la ligne de chemin de fer Saint-Étienne-Lyon, de préférence au terme officiel de "souterrain" qui a été conservé par VNF pour les canaux [17].

II-3-3-Définition :

Un tunnel désigne toute route ou chaussée située sous un ouvrage de couverture qui, quel que soit son mode de construction, crée un espace confiné. Une section de route ou de chaussée située sous un ouvrage de couverture n'est pas un espace confiné dès lors que l'ouvrage de couverture comporte des ouvertures vers l'extérieur dont la surface est égale ou supérieure à 1 m^2 par voie de circulation et par mètre de chaussée **[17].**

II-3-4-Des types de tunnels très variés :

Si l'on se réfère à leur objet, on peut distinguer plusieurs types de tunnels :

- les tunnels de communication parmi lesquels :
    - les tunnels ferroviaires,
    - les tunnels routiers,
    - les tunnels de navigation ;
- les tunnels de transport :
    - adductions d'eau,
    - galeries hydrauliques,
    - égouts,
    - galeries de canalisations ;
- les tunnels et cavités de stockage :
    - garages et parkings,

- stockages liquides ou gazeux,
- dépôts.

Si l'on se réfère à leur mode d'exécution, on peut distinguer (figure. II.3) :

- les tunnels ou cavités construits à ciel ouvert ;
- les tunnels construits en souterrain à faible ou forte profondeur ;
- les tunnels construits par éléments immergés.

Si l'on se réfère à la forme des ouvrages, on peut distinguer (figure. II.3).

- les tunnels proprement dits et les puits qui sont des ouvrages à grand développement linéaire et dont la section est constante ou peu variable ;
- les cavités aux formes plus ramassées et souvent moins régulières dans lesquelles aucune des dimensions n'est prépondérante **[17].**



Figure II.3 : Le tunnel de Malpas sur le canal du Midi

II-3-5-Tunnel ou pont ? :

Pour traverser une rivière ou un bras de mer, un tunnel est généralement plus coûteux à construire qu'un pont. Il existe cependant beaucoup de raisons de choisir un tunnel plutôt qu'un pont :

- Des considérations de navigation peuvent intervenir dans ce choix. Il est possible d'éviter d'avoir recours à des ponts levants ou à des ponts suspendus, en créant des tunnels à certains endroits de la traversée, rendant ainsi le trafic fluvial ou maritime possible.

- Les ponts exigent habituellement sur chaque rivage une plus grande emprise que des tunnels ; dans les secteurs où l'immobilier est particulièrement cher (Manhattan, Hong Kong, etc.), c'est un facteur fort en faveur des tunnels.
- Dans le cas du projet Big Dig à Boston, un système de tunnels a été choisi afin d'augmenter la capacité du trafic.
- Un tunnel permet d'éviter des difficultés liées aux marées ou au mauvais temps pendant la construction (comme dans le tunnel sous la Manche de 50 km)
- Pour des raisons esthétiques (préservation de la vue, du paysage)
- Pour des raisons de résistance du sol au poids de l'ouvrage.
- Pour des raisons écologiques. Le tunnel à la différence de la route, d'une voie ferrée, ou de certains ponts n'a pas d'impact en termes de fragmentation écopaysagère ou de pollution lumineuse et le roadkill y est limité si l'entrée des animaux y est limitée par des aménagements adaptés aux ouvertures. Ainsi les mesures conservatoires faisant suite à une étude d'impact peuvent se traduire par la construction d'un tunnel. Le ferroutage est une solution permettant (comme dans le tunnel sous la manche) de limiter la pollution de l'air par les micro et nanoparticules.

Il existe de nombreux exemples pour lesquels on a choisi de traverser des rivières ou des bras de mer en construisant un tunnel plutôt qu'un pont : Holland Tunnel, Lincoln Tunnel entre le New Jersey et Manhattan, Westerscheldetunnel aux Pays Bas, tunnel sous la Manche**[16]**.



Figure II.4 : Tunnel dans une région montagneuse à Boumerdès, Algérie

II-3-6-Tunnels remarquables :

- Le plus long tunnel du monde, le tunnel de base du Saint-Gothard a été percé sous le massif du Saint-Gothard en Suisse entre Erstfeld et Bodio : long de 57 km, il comporte

deux tubes parallèles. Le percement du premier tube a été achevé le 15 octobre 2010, et le second au printemps 2011. Ce tunnel mis en service en juin 2016 relie Zurich à Milan en 2h40 pour les trains de passagers qui peuvent y circuler à 250 km/h; les trains de marchandises roulent à 160 km/h.

- Le tunnel du Seikan, tunnel sous-marin de 53,850 km qui relie les îles de Honshū et de Hokkaidō au Japon, a été le plus long tunnel ferroviaire du monde jusqu'à la mise en service du tunnel de base du Saint-Gothard en juin 2016.
- Le tunnel sous la Manche entre la France et le Royaume-Uni fait 50,450 km.
- Le tunnel de base du Lötschberg en Suisse fait 34,6 km.
- Le tunnel de Guadarrama en Espagne fait 28,4 km.
- Le tunnel de Lærdal dans l'ouest de la Norvège, entre Lærdal et Aurland, est le plus long tunnel routier du monde (24,5 km).
- Le tunnel de Hsuehshan est le plus long tunnel routier d'Asie avec 12,90 km.
- En Finlande, l'aqueduc du Päijänne est le plus long tunnel creusé dans la roche au monde. Ses 120 kilomètres de long approvisionnent la capitale Helsinki en eau potable.
- À titre de curiosités, on peut citer les tunnels du CERN (Centre européen de recherche nucléaire), accueillant les accélérateurs de particules Super Proton Synchrotron (SPS) et Large Hadron Collider (L HC), tous deux situés au niveau de la frontière franco-suisse, à proximité de Genève. Ils présentent la particularité de former chacun un anneau (d'une circonférence de sept kilomètres pour le SPS et de 26,66 kilomètres pour le LHC), et de fait ils ne possèdent aucune extrémité et ne débouchent jamais à la surface. On y accède via des puits verticaux ou des galeries de service **[17].**

II-4-1-Définition de la ventilation:

La ventilation est l'action qui consiste à créer un renouvellement de l'air, par déplacement dans un lieu clos. Elle est mise en œuvre dans les lieux où l'oxygène risque de manquer, ou bien où des polluants et autres substances indésirables (humidité, par exemple) risqueraient de s'accumuler en son absence : logements, bureaux, magasins, salles de

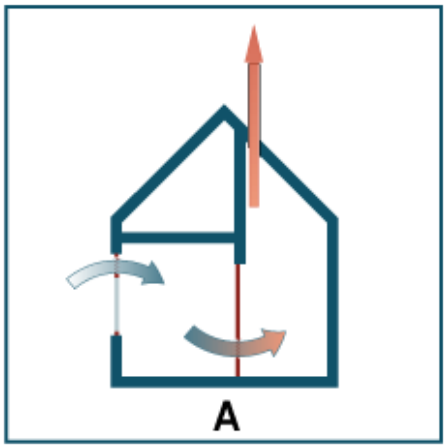
spectacles, d'enseignement, ouvrages souterrains, tunnel routier, atelier industriel, mine… **[18].**

II-4-2-Rôles de la ventilation dans un tunnel :

La ventilation en tunnel a pour objectif, en situation normale d'exploitation, de maintenir la qualité de l'air au niveau requis. En cas d'incendie, elle a pour rôle de mettre les usagers à l'abri des fumées pour qu'ils puissent évacuer le tunnel et, dans un second temps, de permettre l'intervention des services de secours et de lutte contre l'incendie. La ventilation d'un tunnel constitue un système complexe, car il est dépendant du comportement aéraulique de l'ouvrage. Un tunnel est un tout, et tous ses éléments peuvent avoir une incidence sur les choix en matière de ventilation. En particulier, la longueur, le type de trafic, la façon dont est assurée l'exploitation ont une influence déterminante **[19].**

II-4-3- Les différents systèmes de ventilation :

- **Système A : évacuation et apport d'air naturels**



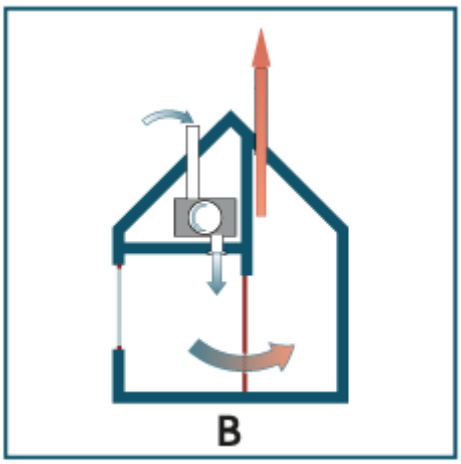
L'apport d'air frais se fait de manière naturelle via des grilles de ventilation intégrées dans les fenêtres.

Le débit d'air de ces grilles peut être réglé manuellement. L'air vicié est évacué via une gaine verticale dans la salle de bains ou la cuisine (pièces humides).

Avantages	Inconvénients
Bon marché Facile à installer Peu d'entretien	Le moins économe en énergie Réglage limité Tous les systèmes ne sont pas isolés du point de vue acoustique

Tableau II.1 Système A : évacuation et apport d'air naturels

- **Système B: évacuation d'air naturelle et apport d'air mécanique**



Un apport d'air naturel n'est pas toujours possible en raison d'un environnement trop bruyant, de pièces sans fenêtres ou parce que la pièce à aérer fait partie d'un immeuble à appartements. Dans ce cas, l'apport mécanique d'air frais peut être envisagé.

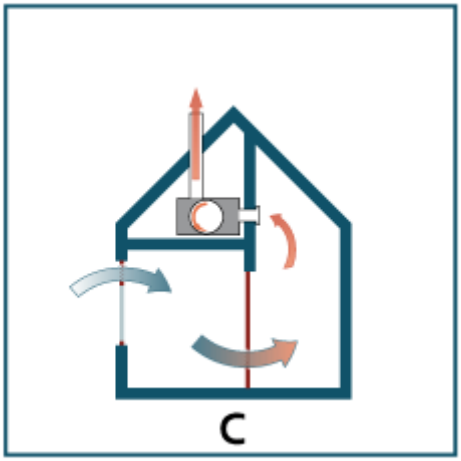
L'apport contrôlé d'air frais extérieur est distribué dans l'habitation au moyen d'un ventilateur. L'apport et la circulation de l'air ont lieu tout comme dans le système A.

Toutefois, ce système est peu utilisé en Belgique

Avantages	Inconvénients
Apport contrôlé d'air frais Solution intéressante dans un environnement bruyant Choix de l'emplacement de l'apport d'air	Consommation d'énergie des ventilateurs

Tableau II.2 Système B: évacuation d'air naturelle et apport d'air mécanique

- **Système C: apport d'air naturel et évacuation d'air mécanique**



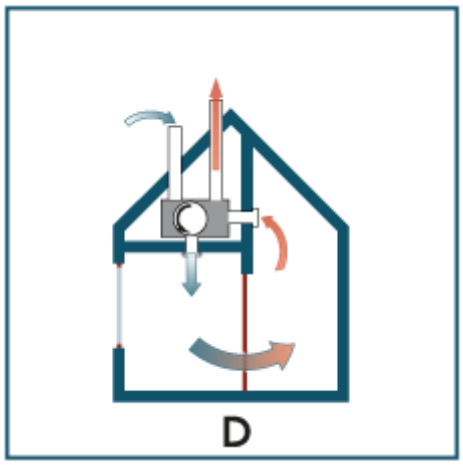
Si vous avez déjà rénové votre habitation de fond en comble, il n'est pas toujours possible d'installer une évacuation d'air naturelle. Dans ce cas, vous pouvez placer un système de ventilation avec évacuation mécanique de l'air. L'air humide et vicié est alors aspiré par des conduites dans les pièces humides telles que la cuisine et la salle de bains.

Dans le système C classique, l'aspiration de l'air se fait en continu. Le système C à autorégulation rafraîchit l'air sur la base de la teneur en humidité ou en CO_2.

Avantages	Inconvénients
Meilleure ventilation qu'avec le système A Choix de l'emplacement de l'évacuation d'air	Plus onéreux que le système A Consommation d'énergie du ventilateur

Tableau II.3 Système C: apport d'air naturel et évacuation d'air mécanique

- **Système D (ventilation double flux): évacuation et apport d'air mécaniques**



Ce système est, du début à la fin, totalement automatique, vu que l'apport et l'évacuation de l'air sont assurés par des ventilateurs. Un réseau de conduites à travers l'habitation distribue cet air par des grilles de ventilation dans chaque pièce, sans que les différents flux d'air ne se croisent.

Dans ce cas aussi, la ventilation peut avoir lieu à la demande au moyen de capteurs (humidité, CO_2) **[20].**

Avantages	Inconvénients
Possibilité de récupération de la chaleur de l'air évacué (au moyen d'un	Consommation d'énergie des ventilateurs

échangeur thermique) Les flux d'air sont équilibrés Des filtres purifient l'air (poussières, pollen) Choix de l'emplacement de l'apport et de l'évacuation d'air	Requiert davantage d'entretien que les autres systèmes Possibilité de nuisance sonore

Tableau II.4 Système D (ventilation double flux): évacuation et apport d'air mécaniques

II-4-4-Les différents types de ventilation :

- **Type A : ventilation naturelle**

La ventilation naturelle devrait être effectuée tous les jours afin de remplacer régulièrement l'air vicié par de l'air frais et sain. Ce système ne nécessite aucun appareil, car il suffit d'ouvrir les portes et fenêtres pour démarrer une circulation naturelle de l'air. La quantité d'air aspiré compte parmi les inconvénients, car vous ne la maîtrisez pas, d'autant plus qu'en hiver, faire entrer l'air froid n'est pas évident **[20].**

- **Type B : apport avec des ventilateurs**

Plus utilisé aujourd'hui, ce système prévoit un apport de ventilation à l'aide de ventilateurs. Cet air est ensuite pompé dans la maison et distribué via des orifices d'entrée placés dans les pièces sèches telles que les chambres, le séjour, le bureau, etc. Un effet d'aspiration comparable au tirage d'une cheminée est assuré par ce type d'apport d'air, car l'air vicié est éjecté à l'extérieur grâce à des conduites d'évacuation.

- **Type C : aspiration avec des ventilateurs**

Des grilles d'évacuation situées dans les pièces humides telles que les salles de bain, la buanderie, la cuisine, etc., évacuent l'air vicié. Des grilles d'aération situées au niveau des fenêtres aspirent l'air frais. Quant à la circulation de l'air à l'intérieur de la maison, elle est assurée par des grilles situées au niveau du bas des portes. Se commandant avec un interrupteur, ce système vous permet de choisir entre une position basse, moyenne ou haute.

- **Type D : avec récupérateur de chaleur ou ventilation équilibrée**

L'apport d'air frais extérieur ainsi que l'évacuation de l'air vicié intérieur se font mécaniquement. Les ventilateurs se situent sur le toit ou dans le mur et aspirent l'air frais extérieur. L'air vicié est également extrait par des ventilateurs et ce système est souvent équipé d'un récupérateur thermique **[20].**

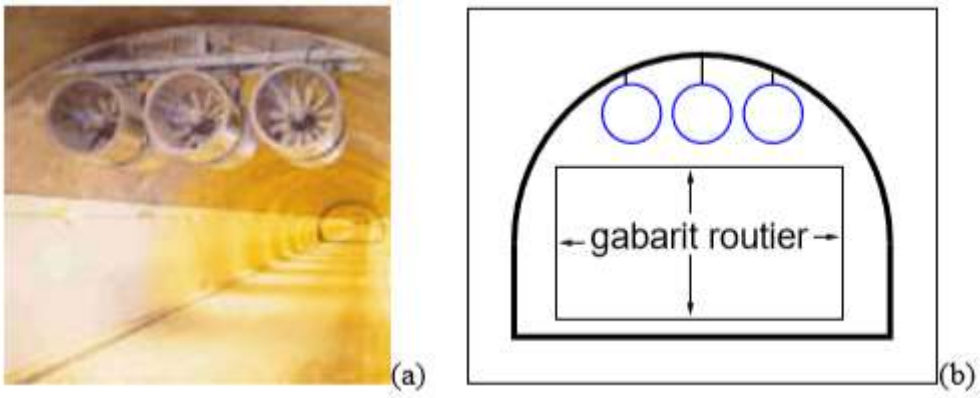
II-4-5-Importance de la ventilation dans la conception générale d'un tunnel :

Encombrement des équipements de ventilation

Selon le système de ventilation, mais aussi 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 **[19].**

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 ne nécessite généralement pas de sur-excavation (voir figure**II.5**). Dans le cas où une

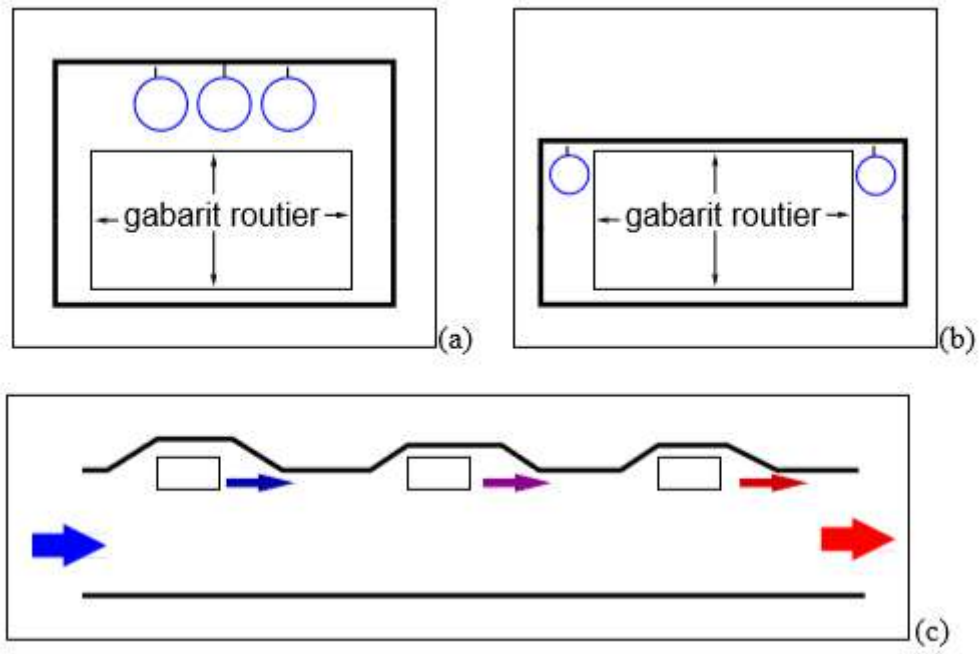


FIGII.5 : Implantation de ventilateurs en voûte de tunnel

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 **[19].**

A. 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 **II.6** (a)). Cela peut être fait sur toute la longueur de l'ouvrage ou localement au droit des ventilateurs, au moyen d'un bossage (figure**II.6** (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 **II.6** (b)).

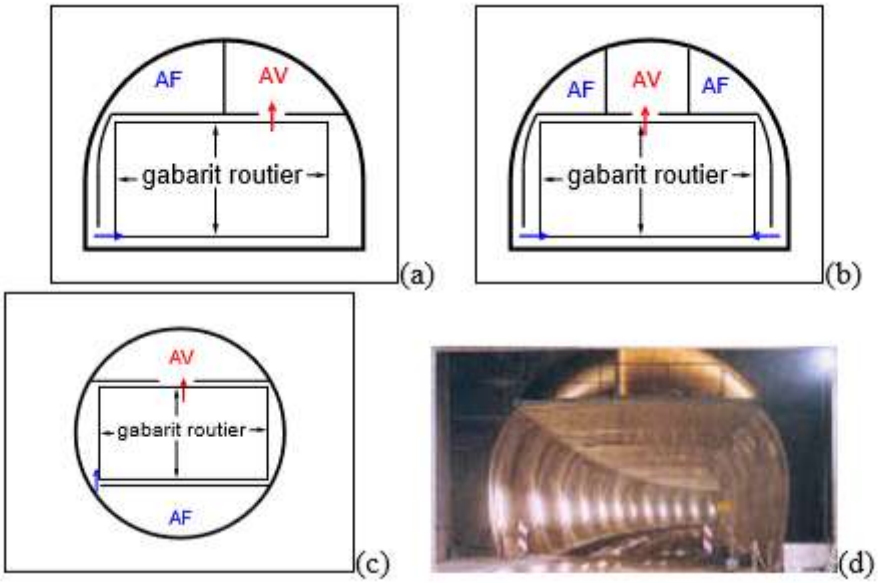


FIGII.6 : Exemples d'implantation de ventilateurs pour un tunnel à section rectangulaire ((a) et (b) : coupe en travers; (c) profil en long; la solution (b) n'est pas recommandée.

B .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**II.7** (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

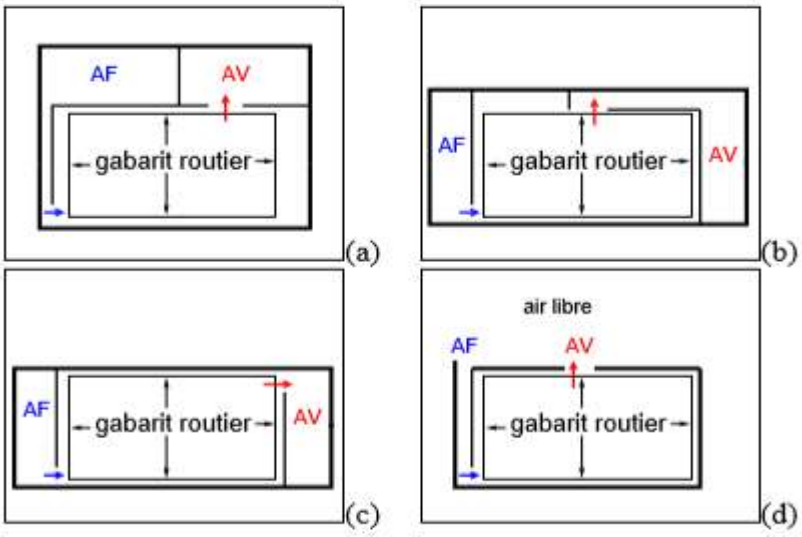
circulaire, on fait en général passer l'air frais sous la chaussée et l'air vicié ou les fumées en plafond (figure**II.7** (c)). Selon la largeur du tunnel, on peut être amené à insuffler de l'air frais des deux côtés de la chaussée. On cherche, dans la mesure du possible, à permettre une circulation piétonne dans les gaines pour faciliter l'exploitation de l'ouvrage. L'encombrement des stations de ventilation peut être du même ordre que les stations d'extraction massive en ventilation longitudinale. En fonction des contraintes d'implantation, on peut mettre en place ou bien de nombreuses petites stations (qui permettent des gaines de faible section) ou bien un nombre plus faible de grosses stations (qui nécessitent des gaines de section importante). Les stations de ventilation peuvent être souterraines ou construites à l'air libre **[19].**



FIGII.7 : 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.

C.Ventilation La turbulence 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 piédroit s'il est nécessaire en cas d'incendie. Quelques solutions possibles sont schématisées sur la figure **II.8 [19].**



FIGII.8: Exemples de configurations de gaines de ventilation en tranchée couverte; AV est mis pour la gaine d'air vicié et AF pour la gaine d'air frais; (c) est à éviter car peu efficace; (d) nécessite des ventilateurs insufflateurs et extracteurs répartis sur toute la longueur de l'ouvrage.

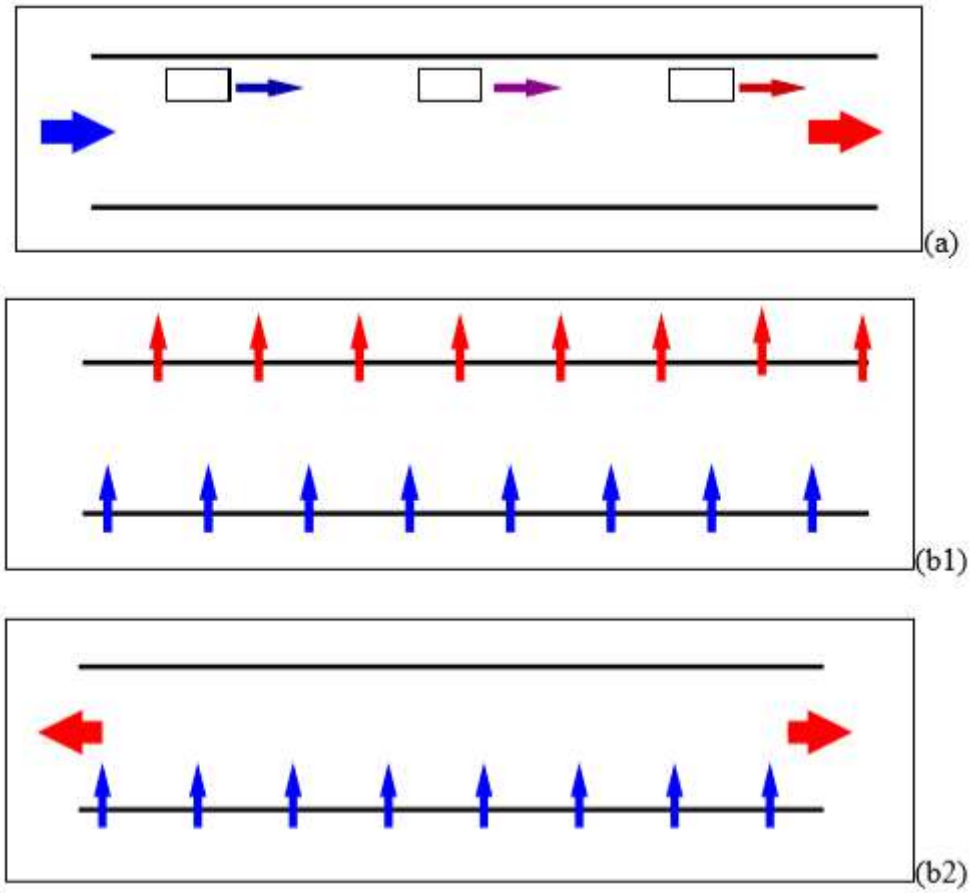
II-4-6-Les types de ventilation en tunnel :

Certains tunnels ne nécessitent pas de ventilation mécanique (on parle alors de ventilation naturelle). 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. La terminologie traditionnelle distingue deux systèmes de ventilation, basés sur l'usage de la ventilation en situation d'exploitation normale (dans les deux cas celle-ci procède par dilution) :

– le système longitudinal, pour lequel des ventilateurs (généralement appelés accélérateurs ou ventilateurs de jet) poussent la masse d'air du tunnel, sans apport d'air frais ni sortie d'air vicié autrement que par les têtes;

– le système transversal, pour lequel on injecte et/ou extrait de l'air à intervalles réguliers dans le tunnel au moyen de gaines de ventilation; selon les cas, on parlera de système transversal pur (le débit extrait est égal au débit insufflé), de système semi-transversal (il n'y a pas d'extraction d'air vicié) ou de système transversal partiel (le débit d'extraction est plus faible que le débit d'insufflation). Ces systèmes de ventilation sont schématisés sur la figure 1.6. En cas d'incendie, le but de la ventilation est dans un premier temps de protéger les usagers des fumées pour qu'ils puissent évacuer le tunnel, et dans un second temps de

permettre aux services de secours et de lutte contre l'incendie d'intervenir**.** Pour ce faire, la stratégie est :



FIGII.9 : Schéma des différents systèmes de ventilation en situation normale d'exploitation; les flèches représentent le mouvement de l'air (air frais en bleu, air vicié en rouge); (a) : système longitudinal; (b) système transversal : (b1) transversal pur ou partiel; (b2) : semi-transversal.

– de pousser les fumées vers une zone où il n'y a pas d'usagers, – ou de maintenir autant que faire se peut la stratification des fumées et d'extraire celles-ci en plafond; il est nécessaire dans ce cas que la vitesse longitudinale de l'air soit faible au droit de l'incendie (on parle de contrôle du courant d'air). Le système longitudinal se prête bien à la première stratégie. Dans un certain nombre de cas (cf. section 2.3.3), si une stratégie de désenfumage longitudinale est adoptée, il est nécessaire de prévoir des extractions massives de fumée. Par ailleurs, par le jeu des insufflations et extractions d'air, on peut piloter un tunnel ventilé transversalement de manière à appliquer la stratégie longitudinale. La seconde stratégie nécessite un système transversal. Pour assurer le contrôle du courant d'air dans la seconde stratégie, on joue en général sur les débits d'insufflation et d'extraction des différents cantons1. Dans certains cas,

il peut être nécessaire de mettre en place des ventilateurs septiques pour assurer le contrôle du courant d'air. Il est à noter que cette seconde stratégie n'est pas adaptée aux tunnels de gabarit inférieur à 2,70 m. Dans certains cas où le tunnel est équipé de ventilation longitudinale (et donc n'a pas de gaine d'extraction d'air vicié) mais où il y a un risque que la stratégie consistant à pousser les fumées dans une direction mette en danger des usagers (cas des tunnels bidirectionnels ou unidirectionnels congestionnés), on s'efforce dans un premier temps de limiter le courant d'air longitudinal afin de favoriser la stratification des fumées et de permettre aux usagers d'évacuer. Dans un second temps, pour l'intervention des services de secours et de lutte contre l'incendie, on applique la stratégie qui consiste à pousser les fumées dans une direction **[19].**

Dans le présent dossier pilote, On adopte la terminologie suivante 2 :

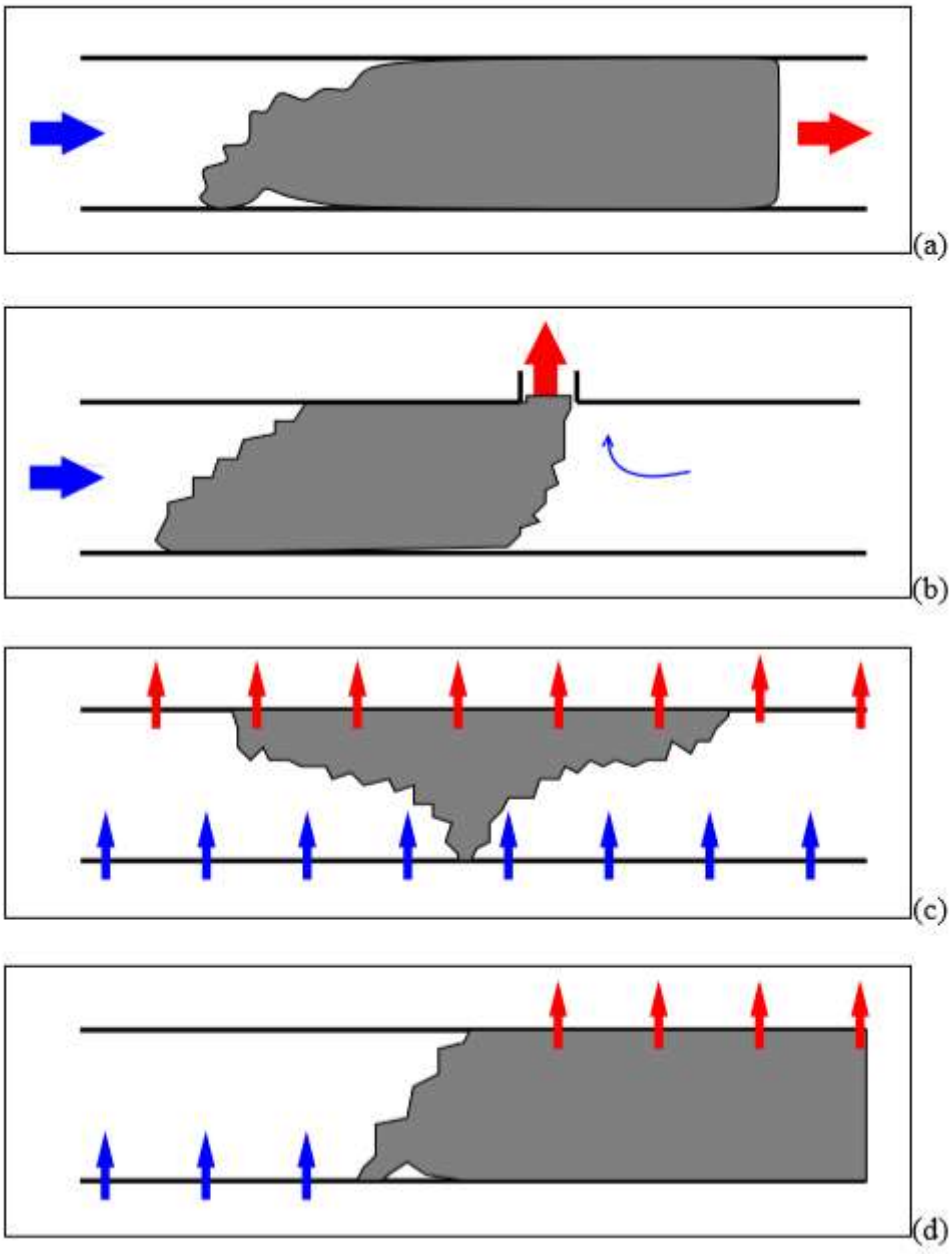
– système longitudinal : système de ventilation dans lequel on pousse l'air longitudinalement dans le tunnel;

– système semi-transversal : système de ventilation comportant un réseau de soufflage permettant de distribuer de l'air frais sur toute la longueur de l'ouvrage; ce système est en principe exclu car il n'offre aucune possibilité d'extraction;

– système semi-transversal réversible : système semi-transversal dans lequel le réseau de soufflage peut, en tout ou partie, être transformé en réseau d'extraction pour le désenfumage par inversion du sens d'écoulement de l'air dans les conduits de ventilation;

– système transversal : système de ventilation comportant à la fois un réseau d'insufflation d'air frais et un réseau d'extraction d'air vicié ou des fumées d'incendie, que ce réseau soit utilisé en exploitation normale ou pas.

Les contraintes qui déterminent le choix du système de ventilation sont les impératifs de sécurité incendie et les besoins d'air frais pour la dilution des polluants en tunnel. Dans certains cas, l'impact environnemental des rejets d'air à l'extérieur du tunnel et la vitesse maximale acceptable pour le courant d'air peuvent influer sur le choix. Pour la sécurité incendie, les longueurs maximales admissibles avec un système de ventilation donné sont fixées par l'instruction technique annexée à la circulaire 2000-6, mais plusieurs systèmes sont souvent possibles.



FIGII.10 : Emploi de la ventilation en cas d'incendie : (a) ventilation longitudinale; (b) ventilation longitudinale avec extraction massive; (c) ventilation transversale; (d) ventilation transversale employée en stratégie longitudinale.

La ventilation longitudinale, plus simple, est en général bien adaptée aux tunnels unidirectionnels sans congestion récurrente. La ventilation transversale est utilisée en général pour les tunnels bidirectionnels ou unidirectionnels avec congestion récurrente. Dans le cas d'un tunnel conçu avec la construction différée d'un second tube (phasage), cela peut conduire à des choix différents dans le premier et le second tube (voir par exemple l'annexe C) **[19].**

II-4-7-Incidence sur le projet de tunnel :

Comme on l'a vu, le système de ventilation peut prendre des formes assez différentes. Il peut conditionner la section transversale du tunnel, poser des problèmes d'implantation des stations (et de liaison de ces stations avec le tunnel ou avec l'air libre). Enfin, il faut considérer l'incidence du système de ventilation sur l'environnement des points de rejet (têtes comprises). Une étude de ventilation peut intervenir soit pour un projet de tunnel neuf, soit pour une mise à niveau de tunnel existant. Dans le cas de la réfection d'un tunnel existant, les contraintes géométriques sont fixées et il s'agit donc d'optimiser la ventilation pour cette géométrie, à moins de réaliser de très importants travaux de génie civil (création d'une galerie parallèle au tunnel par exemple). En revanche, pour les ouvrages neufs, il importe de se préoccuper des questions de ventilation le plus en amont possible dans l'étude, afin d'examiner l'incidence du parti général sur les solutions de ventilation. Par exemple, pour un projet de tranchée couverte, il peut être intéressant d'envisager la solution de tranchées courtes alternées avec des zones ouvertes (recouvertes ou non de damiers phoniques), simplifiant par là même considérablement la question du désenfumage en cas d'incendie et de la dilution des polluants4. Par ailleurs, le fait de mettre en place une ventilation mécanique impose une alimentation électrique de puissance sécurisée **[19].**

II-4-8-Qualité de l'air en tunnel en exploitation normale :

La réglementation des niveaux de pollution à l'intérieur des tunnels est basée sur la circulaire 99.329 du ministère de l'emploi et de la solidarité du 8 juin 1999 qui a transmis aux préfets un avis du conseil supérieur d'hygiène publique de France (CSHPF) comportant des recommandations pour les tunnels routiers. Par ailleurs, l'opacité, qui n'est pas un polluant réglementé, doit être contrôlée **[19].**

II-4-9- Qualité de l'air et bruit au voisinage des tunnels

Les questions de la dispersion de polluants et du bruit à l'extérieur des tunnels sont analysées par ailleurs, dans le Dossier pilote des tunnels : environnement.Le guide pour la prise en compte de la qualité de l'air au voisinage des tunnels routiers donne la démarche à suivre pour les études de qualité de l'air pendant les phases projets. La question de la qualité de l'air au voisinage des tunnels n'est pas abordée dans le présent document, même si elle peut avoir une incidence sur le système de ventilation ou son exploitation **[19].**

II-4-10-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 (dans ce cas, des véhicules peuvent être bloqués de part et d'autre du foyer, et le nuage de fumées déstratifiées atteindra nécessairement les uns ou les autres). En revanche, dans un tube 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 congestionnée4, 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 (voir section 2.3.4). Le tableau 2.5 résume les cas où l'instruction technique autorise la ventilation longitudinale 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 **[19].**

Type de tunnel	Ventilation longitudinale Autorisée	
	Sans extraction Massive	Avec extraction massive
• **urbain unidirectionnel** de longueur inférieure à 500 m de longueur comprise entre 500 et 800 m de longueur supérieure à 800 m	 oui oui (a) non	 — Oui Oui
• **urbain bidirectionnel**	Non	Non
• **non urbain unidirectionnel à**		

traficnon 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 (b)	__
de longueur supérieure à 1000 m	Non	Non
• **non urbain bidirectionnel à traficfaible**		
de longueur inférieure à 1500 m	Oui	__
de longueur supérieure à 1500 m	Non(c)	Non

TAB II.5. Cas pour lesquels la ventilation longitudinale est autorisée pour les tunnels de gabarit supérieur à 3,5 m; (a) : oui s'il est possible de contrôler le courant d'air longitudinal; (b) : sous réserve d'augmenter le nombre des issues de secours; (c) : sauf si toutes les autres solutions sont pires et que des aménagements compensatoires sont réalisés **[18].**

Dans le cas d'un tunnel

– bidirectionnel

– ou unidirectionnel urbain de plus de 500 m sans extractions massives

– ou 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. De plus, s'il s'agit d'un tunnel unidirectionnel, on s'efforce d'avoir ce courant d'air dans le sens de la circulation. Ce n'est que quand les usagers **[19].**

II-4-11-Stratégie en ventilation transversale :

Principes

En ventilation transversale, la stratégie est de préserver la stratification des fumées et de les aspirer au 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 :

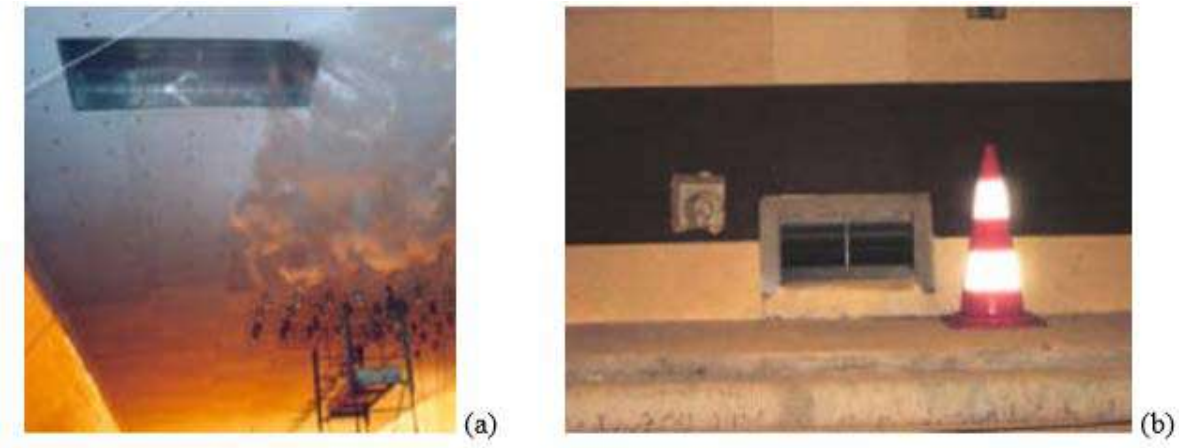
– les tunnels bidirectionnels, où il y a priori des véhicules bloqués de chaque côté de l'incendie,

– et 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. Comme on l'a vu à la section 2.2.2, pour assurer la stratification des fumées, la vitesse du courant d'air doit être inférieure à une valeur limite de déstratification Vd. 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. Pour garantir une vitesse faible de l'air à proximité de l'incendie, il est donc nécessaire de localiser l'incendie avec précision, puis d'agir sur le système de ventilation pour réduire la vitesse de l'air au droit de l'incendie.

Aspiration des fumées

Pour un débit d'extraction donné, l'extraction est d'autant plus efficace qu'elle sera concentrée au droit de l'incendie, car cela assure de n'aspirer qu'à l'endroit où des fumées sont effectivement présentes et d'éviter leur propagation. Pour des raisons pratiques, on préfère ne pas concentrer l'extraction sur une seule trappe, et on retient une extraction concentrée sur une longueur de 400 m (tunnels urbains de gabarit supérieur à 3,50 m), 600 m (tunnels non urbains de gabarit supérieur à 3,50 m) ou 200 m (tunnel de gabarit compris entre 2,70 m et 3,5 m). Pour assurer l'extraction, la disposition recommandée est de mettre en place des trappes d'extraction à ouverture télécommandée. Dans certains cas, on peut avoir recours à des bouches ouvertes en permanence, mais tributaires de cantons de courte longueur (pour un tunnel de gabarit supérieur à 3,50 m, 400 m en urbain et 600 m en non urbain; pour un tunnel de gabarit compris entre 2,70 m et 3,5 m, 200 m) commandés indépendamment; on parle encore dans ce cas d'extraction concentrée. En général, les trappes d'extraction télécommandées ont une section de l'ordre de 1 à quelques mètres carrés (cf. fig.1.8a) et sont espacées de 50 m (tunnels urbains) ou 100 m (tunnels non urbains). Pour pouvoir faire fonctionner une extraction concentrée, il est nécessaire de disposer en permanence de moyens

humains permettant une commande rapide et précise du système retenu. Si ce n'est pas le cas, il faut en général renoncer à concentrer l'extraction au droit de l'incendie. Toutes les bouches d'extraction doivent alors être ouvertes en permanence. Les bouches ouvertes en permanence peuvent ou bien avoir les mêmes tailles et répartition que les trappes télécommandées, ou bien être nettement plus petites (de l'ordre de 0,2 m2) mais beaucoup plus nombreuses. Dans le cas des tranchées couvertes, on peut remplacer les trappes télécommandées par des ouvertures en plafond équipées individuellement de ventilateurs. Dans tous les cas, il faut limiter la vitesse moyenne de l'air aspiré par les bouches ou les trappes à moins de 15 m/s pour éviter une perte d'efficacité de l'extraction de fumées (par le poinçonnement de la couche de fumées chaudes) **[19].**



FIGII.11 :(a) Photo d'une trappe de désenfumage télécommandée; (b) photo d'une bouche d'insufflation d'air frais.

Conclusion :

La ventilation des tunnels comprend l'ensemble des équipements nécessaires pour maintenir une qualité d'air suffisante à l'intérieur des tunnels, aussi bien en exploitation normale qu'en situations exceptionnelles telles que perturbations du trafic ou accidents.

La pollution de l'air provoque chez les humains qui la subissent des troubles ou des maladies. Par exemple, la pollution atmosphérique des villes est une cause de maladies pulmonaires. La pollution porte atteinte à la qualité de la vie.

Chapitre III: Modélisation physique et formulation mathématiques

III-1-La couche de surface urbaine :

III-1-1-Introduction :

La couche limite atmosphérique(CLA) ne représente qu'une petite partie de l'atmosphère (sa hauteur étant de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres), mais elle joue un rôle important dans de nombreux processus physiques de la haute atmosphère. C'est en effet dans la CLA que sont émis la plupart des polluants et la surface terrestre joue un rôle primordial dans le bilan énergétique de l'atmosphère. En outre, les flux turbulents, essentiellement produits par les forçages dynamiques et thermiques du sol, y déterminent les échanges entre la surface et l'atmosphère libre. La structure de la CLA est maintenant bien comprise et une description peut en être trouvée dans différents livres ou articles de référence **[21].**

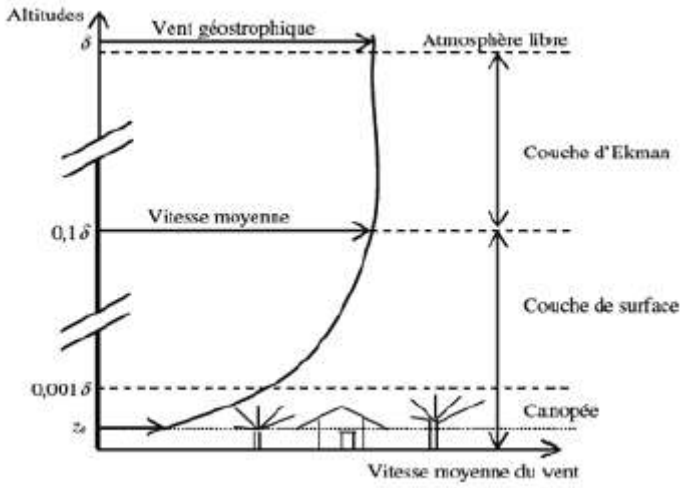


Figure III.1: Structure de la couche limite atmosphérique **[21].**

Dans le cadre de ce travail, nous intéressons à la partie la plus basse de la couche limite atmosphérique, la couche limite de surface et plus particulièrement à la couche de surface au-dessous des villes, appelée couche de surface urbaine.

III-1-2-Structure de la couche de surface urbaine :

La Figure (**III.2**) rappelle schématiquement la structure de la couche limite atmosphérique, appelée couche limite urbains(CLU) dans le cas particulier de l'atmosphère au- dessous des villes.la couche limite de surface (CLS), d'une hauteur de 10 à 100m (~ 0.1zi,

où Zi est la hauteur de la couche limite atmosphérique), est la couche en contact avec le sol, où les forces de Coriolis peuvent être négligées

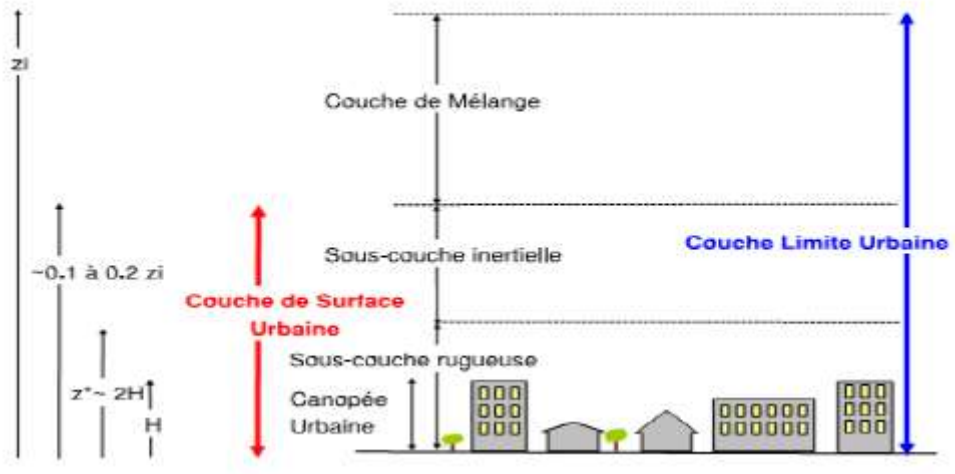


Figure III.2: Structure de la Couche Limite Urbaine : la couche limite de surface représente ~0.1 à 0.2 Zi de la couche limite **[21].**

La couche de surface urbaine est divisée en plusieurs sous-couches caractéristiques des propriétés moyennes et turbulentes de l'écoulement (Figure**III.2**) :

- **La sous-couche inertielle** :

Est la partie supérieure de la couche de surface urbaine définie comme une couche homogène dans laquelle les flux verticaux varient de moins de 10%.L'écoulement et la température potentielle y sont homogènes horizontalement et les flux verticaux de quantité de mouvement, chaleur et humidité sont considérés comme constants.

- **La sous-couche rugueuse :**

S'étend du sol à une hauteur z^*et est caractérisée par une grande inhomogénéité de l'écoulement et des échanges thermiques.C'est une couche de transition, directement influencée par des échelles liées aux éléments de rugosité de la surface et où les propriétés de l'écoulement turbulent sont souvent tridimensionnelles.

- **La canopée urbaine** :

La canopée urbaine est la partie la plus basse de l'atmosphère qui se situe entre le sol et le niveau des toits des bâtiments. Si pour certains auteurs, elle doit être considérée comme une sous-couche à part entière , nous la présentons ici comme une partie de la souscouche rugueuse, selon Roth, 2000 qui respecte ainsi le formalisme adopté pour les canopées végétales, proposé par Raupach et al, 1980. La canopée urbaine est caractérisée par une surface accrue d'une grande inhomogénéité et de structure tridimensionnelle. Les éléments de rugosité y sont de forte densité, de hauteurs et espacements variables, à l'origine des propriétés dynamiques inhomogènes et d'importantes forces de frottement, de nature différentes (bâtiments composés de divers matériaux, végétation) modifiant aussi les échanges thermiques, d'humidité et de polluants**[21].**

III-1-3-Dispersion des polluants dans l'atmosphère urbaine :

La dispersion des polluants dans la couche de surface urbaine est une conséquence directe de la turbulence atmosphérique : une caractéristique importante de la turbulence est en effet sa capacité à transporter et à mélanger beaucoup plus efficacement qu'un écoulement laminaire comparable. La dispersion atmosphérique dépend alors fortement de la stabilité thermique. En atmosphère stable, les mouvements verticaux sont atténués et la dispersion est réduite. En atmosphère instable, la dispersion est favorisée par les mouvements convectifs. Elle dépend également de la turbulence mécanique et ainsi des caractéristiques de la surface. Il apparaît donc important dans les études de dispersion de décrire avec précision les écoulements turbulents **[21].**

III-1-4-Ecoulements moyens et turbulents dans la couche de surface :

III-1-4-1-Les équations fondamentales dans la couche de surface :

Les écoulements dans la couche de surface sont régis par les équations fondamentales de la dynamique des fluides adaptées à l'échelle de la partie basse de l'atmosphère. Ces équations sont appliquées à petite échelle.

- Conservation de la masse :

L'équation de conservation de la masse (équation de continuité) s'écrit pour un fluide compressible :

$$\frac{d\rho}{\mathrm{dt}} + \rho \frac{\partial u_\mathrm{i}}{\partial \mathrm{x_i}} = 0 \qquad \textbf{(3.1)}$$

- Conservation de la quantité de mouvement

La conservation de la quantité de mouvement est décrite par les équations de Navier-Stockes adaptées à la CSU :

$$\frac{\partial u_\mathrm{i}}{\partial \mathrm{t}} + u_\mathrm{j} \frac{\partial u_\mathrm{i}}{\partial \mathrm{x_i}} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial \mathrm{x_i}} + g_i + \frac{1}{\rho}\frac{\partial \tau_\mathrm{ij}}{\partial \mathrm{x_j}} \qquad \textbf{(3.2)}$$

(A) (B) (C) (D) (E)

(A) : est le terme d'inertie

(B) : est le terme d'advection

(C) : est le terme gradient de pression

(D) : est le terme de gravité

(E) : est le terme de viscosité de l'air

On peut considérer l'air atmosphérique comme un fluide newtonien, c'est-à-dire que le tenseur des contraintes est proportionnel au tenseur des taux de déformation. Le terme (E) s'écrit alors :

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial \tau_\mathrm{ij}}{\partial \mathrm{x_j}} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial \mathrm{x_j}}\left(\mu \left[\frac{\partial \mathrm{u_i}}{\partial \mathrm{x_j}} + \frac{\partial \mathrm{u_j}}{\partial \mathrm{x_i}}\right] - \frac{2}{3}\mu \left[\frac{\partial \mathrm{u_k}}{\partial \mathrm{x_k}}\right] \delta_{ij}\right) \qquad \textbf{(3.3)}$$

où μ est la viscosité dynamique (kg.$m^{-1}s^{-1}$).En considérant que la viscosité dynamique est homogène spatialement, on fait apparaître la viscosité cinématique :$v = \frac{\mu}{\rho}\ (m^2.s^{-1})$

- Equation d'état et conservation de l'énergie

Pour tenir compte de la teneur en vapeur d'eau d'une parcelle d'air, l'équation d'état d'un gaz parfait s'écrit pour une parcelle d'air humide

$$P = \rho R^* T_v \quad \textbf{(3.4)}$$

OùP est la pression de l'air,ρ la masse volumique, R^* la constante des gaz parfaits pour l'air sec et T_v la température virtuelle définie par :q

$$T_v = T(1 + 0.61q) \quad \textbf{(3.5)}$$

Où$q$est l'humidité spécifique de l'air, T la température de l'air

La variable thermique usuellement utilisée dans l'atmosphère est la température potentielle θ, définie comme la température d'une parcelle d'air amenée adiabatiquement de sa position initiale à la pression de référence 1000mbar.

$$\theta = T(\frac{p_s}{p})^{\frac{R^*}{C_p}} \quad \textbf{(3.6)}$$

p_s est la pression de référence au niveau de la mer prise à 1000mbar, C_p : la capacité calorifique de l'air.

-L'équation de l'énergie (bilan de l'enthalpie) inclut les contributions du transport de la chaleur sensible mais aussi de la chaleur latente :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_j \frac{\partial \theta}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x_j}\right) + S_\theta \quad \textbf{(3.7)}$$

oùλest la conductibilité thermique moléculaire et S_θ un terme source ou puits qui peut inclurela chaleur latente lors des éventuels changements de phases ainsi que la divergence des fluxradiatifs.

- Equation de transport d'un polluant

Ladispersion d'un polluant ide concentration C_i est décrite par l'équation d'advection-diffusion:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial C_i}{\partial \mathrm{x_j}} = D_{mi} \frac{\partial^2 C_i}{\partial \mathrm{x}_j \, \partial \mathrm{x}_j} + R_i\,(C_1, C_2, \ldots, C_N\,, T\,) + S_i \quad \textbf{(3.8)}$$

où C'est la concentration d'un polluant, Dm est le coefficient de diffusion moléculaire massique du polluant, R est un terme source ou puits par réaction chimique avec d'autres constituants et qui dépend de la température T, S est un terme source additionnel comme l'injection de polluant dans le milieu**[21].**

III-1-4-2-Prise en compte de la turbulence

Dans la couche de surface urbaine, les écoulements sont fortement turbulents. Les variables varient en temps et en espace, de manière irrégulière, autour d'une valeur moyenne.

Il existe plusieurs approches pour prendre en compte la turbulence et nous reviendrons sur certaines de ces approches dans le cadre de la revue des différentes méthodes de modélisation. Une description de tels écoulements, qui est celle que nous adoptons dans notre modèle et qui est largement utilisée pour la description des écoulements atmosphériques, suit le formalisme de Reynolds (qui date de 1894) qui décompose chaque variable en la somme d'une valeur moyenne et d'une valeur turbulente :

$$u_i = \overline{u_l} + u'_i \quad \textbf{(3.9.a)}$$

$$\rho = \bar{\rho} + \rho' \quad \textbf{(3.9.b)}$$

$$p = \bar{p} + p' \quad \textbf{(3.9.c)}$$

$$\theta = \bar{\theta} + \theta' \quad \textbf{(3.9.d)}$$

$$C_i = \overline{C_i} + C'_i \quad \textbf{(3.9.e)}$$

Avec les propriétés suivantes pour toute variable v, w et toute constante a :

$$\overline{v'} = 0 \quad \textbf{(3.10.a)}$$

$$\overline{vw} = \bar{v}\bar{w} + \overline{v'w'} \quad \textbf{(3.10.b)}$$

$$\overline{v + w} = \bar{v} + \bar{w} \quad \textbf{(3.10.c)}$$

$$\overline{a\bar{v}} = a\bar{v} \quad \textbf{(3.10.d)}$$

$$\frac{\overline{\partial v}}{\partial x_i} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial x_i} \quad \textbf{(3.10.e)}$$

La valeur moyenne d'une variable peut être définie de différentes manières : la moyenne temporelle, spatiale et d'ensemble. La moyenne temporelle est la plus utilisée dans l'analyse d'observations à partir d'un point fixe : elle est la moyenne arithmétique d'une grandeur discrète observée un certain nombre de fois sur une période T ou l'intégrale d'une grandeur continue divisée par T. La moyenne spatiale est de même obtenue par la moyenne arithmétique d'un nombre fini d'observations sur un certain espace. Les moyennes temporelle et spatiale ainsi définies sont subjectives, dans la mesure où doivent être choisies une période T ou une échelle spatiale L.

-Conservation de la masse :

En prenant en compte les fluctuations des différentes variables contenues dans les équations (3.9) et par application des propriétés (3.10) et l'approximation de Boussinessq dans la couche limite ($\rho = \bar{\rho}$) les équations de conservation s'écrivent comme suit :

$$\frac{\partial\, \overline{\rho}\,\overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \qquad \textbf{(3.11)}$$

-La conservation de la quantité de mouvement :

L'équation moyenne de conservation de la quantité de mouvement s'écrit :

$$\frac{\partial\, \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j}\,\frac{\partial\, \overline{u_i}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\bar{\rho}}\frac{\partial\, \bar{\rho}}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\bar{\rho}}\frac{\partial\, \overline{\tau_{ij}}}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_j\, u'_i}}{\partial x_j} \qquad \textbf{(3.12)}$$

-Conservation de l'énergie :

$$\frac{\partial\, \bar{\theta}}{\partial t} + \overline{u_j}\,\frac{\partial\, \bar{\theta}}{\partial x_j} = \frac{1}{\bar{\rho}\, C_p}\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda\, \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} - \bar{\rho} C_p \overline{u'_j\, \theta'}\right) + \overline{S_\theta} \qquad \textbf{(3.13)}$$

-Equation de transport d'un polluant

$$\frac{\partial\, \bar{C}_i}{\partial t} + \overline{u_j}\,\frac{\partial\, \bar{C}_i}{\partial x_j} = D_{mi}\,\frac{\partial^2 \bar{C}_i}{\partial \mathrm{x}_j\, \partial \mathrm{x}_j} - \frac{\partial\, \overline{u'_j\, C'_i}}{\partial x_j} + \overline{S_i} \qquad \textbf{(3.14)}$$

Les fermetures de la turbulence :

Afin d'estimer les flux turbulents $\overline{u'_j\, u'_i}$, $\overline{u'_j\, \theta'}$, $\overline{u'_j\, c'_i}$, un schéma de fermeture du premierordre est utilisé les flux turbulents sont exprimés en fonction des gradients moyens

$$\overline{u'_j u'_i} = -V_t \left[\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} - \frac{3}{2}\delta_{ij}\frac{\partial \overline{u_k}}{\partial x_k}\right] \quad \textbf{(3.15.a)}$$

$$\overline{u'_j \theta'} = -\frac{\lambda_t}{\bar{\rho} C_p}\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} \quad \textbf{(3.15.b)}$$

$$\overline{u'_j\, c'_i} = -K_t \frac{\partial \bar{C}_i}{\partial x_k} \quad \textbf{(3.15.c)}$$

Avec V_t la viscosité turbulente cinématique et λ_t la conductibilité thermique turbulente, avec $\lambda_t/(\bar{\rho}C_p) = V_t/Pr_t, Pr_t$ étant le nombre de Prandtl turbulent, K_t la diffusivité turbulente,avec$K_t = V_t/Sc_t$, Sc_tétant le nombre de Schmidt turbulent.

-Pour la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j}\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\bar{\rho}}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i - \frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial x_i}\left[(v + v_t)\frac{\partial \overline{u_k}}{\partial \mathrm{x_k}}\right]$$

$$+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(v + v_t)\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right)\right] \quad \textbf{(3.16)}$$

-Pour l'énergie :

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \overline{u_j}\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = \frac{1}{\bar{\rho} C_p}\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\lambda + \lambda_t)\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j}\right] + \overline{S_\theta} \quad \textbf{(3.17)}$$

-Pour conservation d'un polluant

$$\frac{\partial \bar{C}_i}{\partial t} + \overline{u_j}\frac{\partial \bar{C}_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(D_{mi} + \frac{v_t}{\mathrm{Sc_t}})\frac{\partial \bar{C}_i}{\partial x_j}\right] + \overline{S_i} \quad \textbf{(3.18)}$$

v, λ et D_i définissent des propriétés du fluide, v_t , λ_t et K_t définissent des propriétés de l'écoulement turbulent et dépendent donc fortement des conditions de l'écoulement **[21].**

III-1-5-Influence de la structure urbaine :

A cause de son hétérogénéité, de la hauteur des obstacles et des différents matériaux qui la composent, la surface urbaine a une influence importante sur l'atmosphère sus-jacente et la couche limite urbaine est un cas très particulier de couche limite atmosphérique. Nous présentons dans cette section les principaux effets de la structure urbaine.

III-1-5-1-Effets dynamiques :

Les principaux effets dynamiques sont un ralentissement local de l'écoulement, dû à la résistance que les obstacles exercent sur le vent, et une augmentation de la turbulence, due à la forte rugosité caractéristique des surfaces urbaines. Les bâtiments peuvent aussi selon leur agencement, avoir pour effet de dévier verticalement et horizontalement l'écoulement qui les surplombe .A l'intérieur de la canopée, les effets dynamiques peuvent être très complexes: dans le sillage des bâtiments, se développent des zones de recirculation qui dépendent de la dimension et de l'espacement des obstacles sont propices au mélange, à la diffusion de quantité de mouvement et à la dissipation de l'énergie turbulente **[21].**

III-1-5-2-Effets thermiques :

Le climat urbain diffère de celui des zones rurales environnantes. Au bilan énergétique, doit s'ajouter un flux anthropique caractérisant les effets du trafic, du chauffage domestique ou des productions industrielles. En outre, le rayonnement est modifié par la structure urbaine : le rayonnement solaire absorbé y est plus important, à cause de la surface accrue du milieu ainsi que des réflexions multiples sur les parois des bâtiments. Les modifications de l'écoulement entraînent une modification des flux convectifs et ainsi des échanges de chaleur **[21].**

III-1-5-3-Effets sur la dispersion :

La dispersion des polluants dépend fortement des conditions météorologiques locales : A l'échelle de la ville, l'augmentation de la turbulence et la diminution de la stabilité de la couche limite au-dessus des zones urbaines ont pour conséquence de modifier la dispersion. A l'échelle du tunnel, les effets sont plus complexes car ils sont fortement tributaires de l'agencement des obstacles. Si les zones de recirculation qui se forment dans le sillage des bâtiments ont tendance dans la plupart des larges rues à renouveler l'air en augmentant la ventilation, ce n'est pas le cas dans les tunnelsétroits, où la formation d'un vortex stable a pour effet contraire de piéger les polluants. Dans les tunnels relativement longs et sans intersection, il a également été montré que les vents d'incidence perpendiculaire étaientplus efficaces pour diminuer les concentrations de polluants que les vents d'incidence parallèle **[21].**

III-2-Outils de modélisation

III-2-1-Modélisation numérique

La modélisation numérique repose sur une résolution approchée des équations du problème par des méthodes d'analyse numérique. Cette approche est aujourd'hui largement répandue dans toutes les disciplines scientifiques et son développement est associé à l'évolution technologique de l'informatique. La simulation numérique de la mécanique des fluides, et en particulier de la turbulence, constitue un problème très complexe. Depuis plusieurs décennies de nombreux modèles ont été développés de manière à résoudre ce problème des écoulements turbulents et on se propose dans cette introduction de présenter les différentes approches permettant la résolution des équations de Navier-Stokes **[21].**

III-2-1-1-La Simulation Numérique Directe (Direct Numerical Simulation ou DNS) :

Cette méthode est certainement la plus proche d'une résolution exacte. Elle consiste à résoudre les équations de Navier-Stokes dans leur forme la plus générale, en considérant toutes les échelles de turbulence. Son utilisation est limitée à des nombres de Reynolds peu élevés (quelques milliers) et génère des temps de calcul excessivement longs, limitant son usage à des études fondamentales sur les mécanismes de la turbulence **[21].**

III-2-1-2-La Simulation des Grandes Echelles (Large Eddy Simulation ou LES) :

Cette approche est une méthode de simulation tridimensionnelle permettant d'obtenir une description instationnaire fine des écoulements turbulents par résolution numérique des équations de Navier-Stokes filtrées. L'approche LES se propose de ne

simuler que les plus grandes échelles turbulentes de l'écoulement, couplée à une paramétrisation statistique de l'effet des petites structures. La résolution spatiale du maillage constitue un filtre qui permet de ne modéliser que les tourbillons dont le diamètre est supérieurà la taille de la maille. La contribution des petites structures non résolues est prise en compte par un modèle de sous maille **[21].**

III-2-1-3-La modélisation statistique des équations de Navier-Stokes (Reynolds Average Navier-Stokes équations ou équations RANS) :

Cette approche de modélisation de la turbulence est grandement utilisé pour simuler des écoulements turbulents dans des configurations complexes. Elle est basée sur l'utilisation de la moyenne de Reynolds. Cette opération de moyenne permet de décomposer toute quantité en une valeur moyenne et une fluctuation. Si cette opération de moyenne est appliquée aux équations du mouvement d'un fluide. On obtient les équations de Navier-Stokes moyennées caractéristiques de l'approche RANS. Le problème étant non linéaire, des termes de corrélation des fluctuations de vitesse apparaissent dans ces équations. Il est alors nécessaire de paramétrer ces termes par un modèle de turbulence pour pouvoir résoudre le système RANS. Il existe une gamme très importante de modèles de turbulence, dont le modèle K-ε qui est certainement le plus répandu dans la littérature. Malgré son incapacité à détailler les caractéristiques de la turbulence, la modélisation statistique est un bon outil pour caractériser des champs moyens et notamment lorsque l'on s'intéresse aux écoulements autour de géométries complexes.

- **Le modèle K-ε :**

Le modèle K-ε, est largement utilisé dans la modélisation numérique des écoulements turbulents .En présence d'obstacles, il a été également observé l'apparition d'un point de stagnation à proximité des parois, où l'énergie cinétique turbulente et la viscosité turbulente sont surévaluées **[21].**

Dans Le modèle K-ε, Deux grandeurs sont introduites : k est l'énergie cinétique turbulente et ε le taux de dissipation turbulente. La viscosité turbulente est alors égale à :

$$v_t = C_\mu + \frac{k^2}{\varepsilon} \qquad \textbf{(3.2.1.1)}$$

OùC_μ est une constante. Reste alors à établir l'équation pour le taux de dissipation. Cette dernière s'écrit :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \overline{u_j}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon})\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\epsilon}\frac{\varepsilon}{k}P_c - C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k} \quad \textbf{(3.2.1.2)}$$

Où P_c est le terme de production par le cisaillement moyen et les forces de flottabilité donné par :

$$P_c = v_t\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right)\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + C_{3\varepsilon}\frac{g_i}{\overline{\theta_v}}\frac{v_t}{Pr_t}\frac{\partial \overline{\theta_v}}{\partial x_i} \quad \textbf{(3.2.1.3)}$$

et$\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$et $C_{3\varepsilon}$sont des constantes. Afin de ne tenir compte que de la contribution positive des termes de flottabilité, $C_{3\varepsilon}$vaut 0 en atmosphère stable et 1en atmosphère instable. Les autres constantes du modèle K-ε proposés par Launder et Spalding (1974) sont données dans le Tableau 1.

Tableau. III. 1 : Valeurs des constantes du modèleK-ε.

σ_k	σ_ε	C_μ	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$
1	1.3	0.09	1.44	1.92

III-2-2-Différentes modèles de la dispersion atmosphérique

Tout comme pour la modélisation des écoulements, il existe différentes approches pour modéliser la dispersion en milieu urbaine. Il paraît cependant plus difficile de diviser les approches selon les échelles. En effet si les codes de type CFD sont surtout impliqués à l'échelle locale, les autres approches peuvent être appliquées à des échelles différentes.Font une revue très complète sur la modélisation de la qualité de l'air à l'échelle du tunnel. Dans cette section, nous présentons trois modèles.

III-2-2-1-Les modèles gaussiens

Ces modèles permettent d'estimer la dispersion des gaz neutres ou passifs (de masse volumique très proche de celle de l'air). Ils sont basés sur des solutions d'advection-diffusion c'est-à-dire l'équation d'évolution de la concentration couplées avec des paramétrisation semi empirique des principaux phénomènes physiques. Les modèles gaussiens fournissent

une modélisation rapide adaptée aux études opérationnelles mais ne permettent pas de traiter directement des écoulements complexes. Cette limitation s'est vite avérée inacceptable pour bon nombre d'études faisant intervenir des gaz dont la masse volumique était sensiblement plus importante que celle de l'air **[21].**

III-2-2-2-Les modèles lagrangiens :

Les modèles lagrangiens utilisent, pour modéliser le mouvement du fluide, une approche particulaire: la dispersion est évaluée par le calcul de plusieurs milliers de trajectoires de particules partant d'une même source. Les concentrations sont alors données par sommation du nombre de particules présentes dans un volume donné. Par rapport aux modèles nécessitant un maillage, l'approche lagrangienne évite la diffusion artificielle initiale des sources ponctuelles dans la maille correspondante et les erreurs dues à la diffusion numérique. Elle permet de plus de n'effectuer les calculs que là où cela est nécessaire **[21].**

III-2-2-3- Les modèles de la mécanique des fluides CFD :

Ils reposent sur une approximation tridimensionnelle des Equations de la mécanique des fluides (Equation de Navier-Stokes) pour la partie dynamique et de l'équation de Conservation de la masse pour la dispersion des polluants. Mais ces relations sont établies par rapport à un référentiel fixe, à partir duquel a été défini un maillage tridimensionnel. Celui-ci peut se composer de parallélépipèdes de même taille ou de tailles différentes (maillage structuré), ou d'autres éléments disposés de façon non régulière tels que des tétraèdres (maillage non structuré). Les équations sont intégrées numériquement sur ce maillage, de façon à calculer une valeur de chaque variable (vitesse, température, turbulence, concentration) en chaque sommet ou centre de maille. L'avantage principal de l'approche CFD est sa capacité à reproduire d'une façon qualitative les caractéristiques de l'écoulement et la dispersion des polluants dans une rue canyons dans n'importe quelle configuration. De nombreux modèles CFD (deux ou trois dimensions) utilisant les équations RANS à des modèles de turbulence ont été appliquées à l'issue d'étudier la structure de l'écoulement et la dispersion des polluants dans les tunnels**[21].**

Chapitre VI:
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

IV-1- Introduction :

La simulation numérique est l'un des outils qui permettent de simuler des phénomènes réels, appelée aussi simulation informatique, elle désigne un procédé selon lequel on exécute un programme informatique sur un ordinateur en vue de simuler par exemple un phénomène physique complexe. Les simulations numériques scientifiques reposent sur la mise en œuvre des modèles théoriques utilisant souvent la technique dite des éléments finis. Elles sont donc une adaptation aux moyens numériques de la modélisation mathématique, et servent à étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à son évolution. On parle également de calcul numérique.

IV-2-Calcul numérique :

Les méthodes de discrétisation les plus connues sont :

- Méthodes des différences finis (MDF).
- Méthodes des éléments finis (MEF).
- Méthodes des spectrales (MS).
- Méthodes des volumes finis (MVF).

Comme tout calcul, le calcul numérique a des avantages comme il a des inconvénients, parmi ces avantages on peut citer la rapidité d'exécution, la possibilité de simuler des conditions réelles exceptionnelles et il peut nous donnera une solution numérique pour nombreux problèmes pratiques ayant un modèle mathématique.

L'inconvénient de ce calcul est sa difficulté pour sélectionner la bonne solution en cas de plusieurs solutions au problème mathématique [17].

IV-3- La simulation par le logiciel :

L'utilisation des logiciels pour la résolution de problèmes physiques est très fréquente. En effet, dans la plus partde ces problèmes, surtout la résolution de phénomènes (transfert de chaleur, rayonnement, changement de phase…) couplés à la mécanique des fluides n'est possible que sous certaines hypothèses simplificatrices qui ne permettent pas de faire une étude plus réelle des phénomènes physiques observés expérimentalement.

IV-4-Présentation Du Code De Calcul :

Pour réaliser nos simulations, nous avons choisi d'utiliser le code de calcul ANSYS que nous présentons dans cette partie.

ANSYS CFX-15.0 est un logiciel général de simulation numérique d'écoulements en mécanique des fluides, transfert thermique et massique. Ce logiciel permet de mettre en œuvre

une simulation numérique complète de la modélisation, de la création géométrique, et la visualisation des résultats, en passant par la création du maillage et le calcul. Le logiciel CFX, est divisé en quatre modules : **ICEM**, **CFX-Pre**, **CFX-solve**et**CFX-post**.

Le module **ICEM** permet d'établir la géométrie du système étudié. Il est utilisé comme un logiciel de **CAO** traditionnel : la géométrie est construite à partir de points, de courbes, de surfaces et de volume. C'est également ce module qui permet de générer un maillage s'appuyant sur la géométrie. L'utilisateur fixe alors les paramètres de maille qu'il souhaite obtenir sur les courbes, les surfaces et dans les volumes. Le module permet de générer des mailles tétraédriques, hexaédriques et prismatiques. Une fois le maillage effectué, **ICEM** créé un fichier portant l'extension «.geo», qui regroupe les informations relatives au maillage, exploitable par **CFX-pre**.

Le module **CFX-pre** permet quant à lui de définir les conditions aux limites et initiales du système, ainsi que les équations à résoudre, le type de résolution (régime permanent ou transitoire), les paramètres du solveur, parmi lesquels: le pas de temps, le nombre d'itération, le critère de convergence ainsi que la nature des fluides (ou solides) en présence.

Les conditions aux limites sont de 5 types : Inlet, Outlet, Opening, Static pressure, Wall et Symmetry.

- Les conditions de type Inlet sont utilisées dans le cas d'un écoulement entrant à l'intérieur du domaine.
- Les conditions de type Outlet sont quant à elles utilisées dans le cas d'un écoulement sortant à l'extérieur du domaine.
- La condition Opening est utilisée dans le cas d'une méconnaissance de la nature entrante ou sortante de l'écoulement.
- La condition aux limites de type Wall est attribuée aux parois imperméables à l'écoulement.
- Enfin, si l'écoulement présente un plan de symétrie, il est possible d'attribuer la condition Symétrie à ce plan.

Une fois tous les paramètres définis, **CFX-pre** génère un fichier «.def» qui contient toutes les informations relatives au maillage, aux conditions aux limites et initiales, ainsi que tous les autres paramètres introduit dans **CFX-pre**. C'est ce fichier qui va être à la base de travail du solver.

Le module **CFX-solve** est le module qui effectue les calculs. Il est basé sur l'intégration des équations de Navier Stockes dans chaque maille et dispose de modèles additionnels pour prendre en compte la turbulence, le rayonnement thermique.

Dans le cas d'une résolution en régime permanent, le calcul se poursuit jusqu'à ce que, soit le nombre maximal d'itération demandé par l'utilisateur est atteint, soit la solution satisfait au critère de convergence. Dans le cas d'une résolution en régime transitoire, le calcul prend fin lorsque la durée de résolution du phénomène étudiée est atteinte.

A la fin de son calcul, **CFX-solve** génère deux types de fichiers :

- Un fichier «.out » lisible par un éditeur de texte. Ce fichier résume le déroulement du calcul. Il contient, entre autres, les informations du «.def », ainsi que le bilan masse du système.
- un fichier «.res» qui contient l'ensemble des résultats. Ce fichier est directement exploitable par **CFX-post**.
- Le module **CFX-post** est un outil graphique permettant le traitement et la visualisation des résultats. Il permet d'appliquer des textures sur la géométrie, de visualiser des contours, des iso-surfaces, des lignes de courant, des champs de vitesses. Il permet également l'exportation des résultats sous forme numérique, comme par exemple la valeur des différentes variables sur chaque nœud, sous forme photographique et même sous forme d'animation.

❖ **Description du modèle**

Pour l'étude la dispersion de la pollution par CO2 émis à partir d'une source de gaz d'échappement dans un tunnel, nous avons procédé à la réalisation des différents cas où on a varié le nombre des entrés et des sorties en haut du tunnel et la hauteur de ce dernier est à la fois 30m et 50m, et on fixe la position de source au milieu du tunnel avec une vitesse d'éjection de gaz est de 10 m/s et sa température est de 120°C. Pour cela, 4 cas ont été supposés en régime stationnaire avec une vitesse de l'air constante (5m/s).

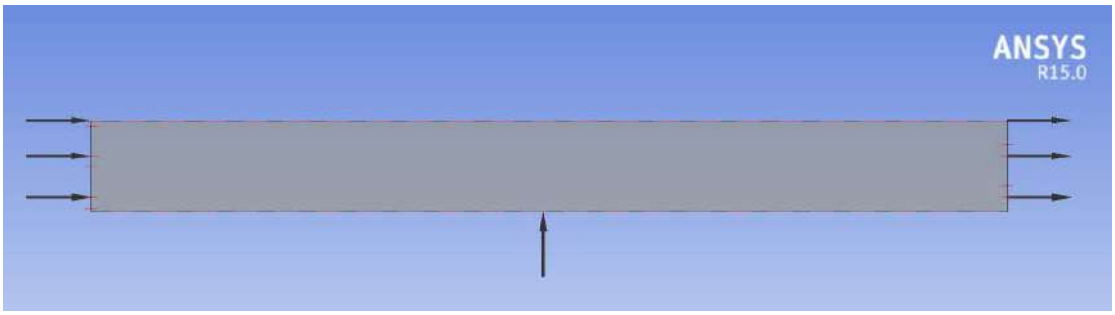
Pour faire ces expériences nous avons utilisé une approche RANS avec un modèle k-ε comme modèle de fermeture. Les équations discrétisées sont résolues à l'aide du code CFX par une méthode aux volumes finis.

Nous avons quatre (04) cas :

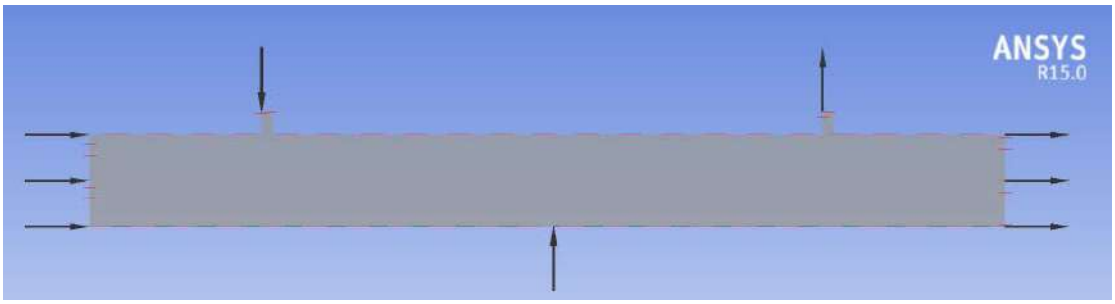
- **Cas 1** : Source polluante au milieu du Tunnel sans d'enfumage en haut (ni entrée d'air ni sortie d'air sur la partie haute)
- **Cas 2** : Source polluante au milieu du Tunnel avec d'enfumage en haut (une entrée d'air et une sortie d'air sur la partie haute)
- **Cas 3**:Source polluante au milieu du Tunnel avec d'enfumage en haut (deux entrée d'air et une sortie d'air sur la partie haute)
- **Cas 4**: Source polluante au milieu du Tunnel avec d'enfumage en haut (une entrée d'air et deux sortie d'air sur la partie haute).

On a :La vitesse de l'air (sans e parce que avec e (surface)) dans le tunnel est une vitesse constante 5m/s) et Température ambiante 25C° , vitesse du gaz polluant (CO2) est 10m/s (la source) avec une température 120C° , La vitesse d'entrée de l'air par l'ouverture en haut est de 10m/s à 25C° aussi mais la sortie c'est condition outlet pression et le régime d'écoulement de l'air dans le tunnel est stationnaire .

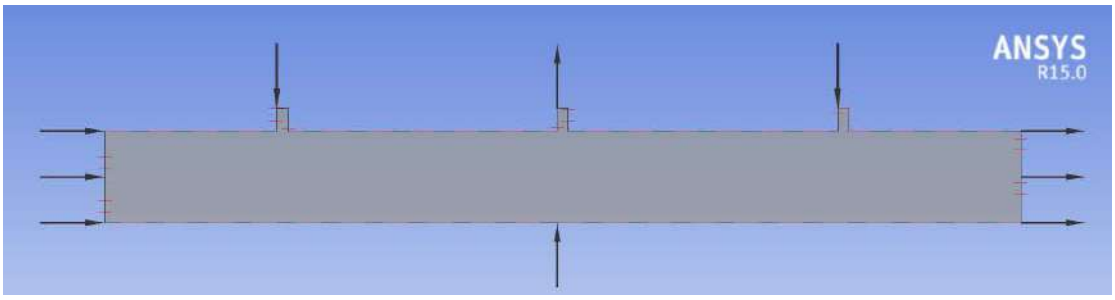
Le but de cette étude : Les gaz brulés des échappements sont des polluants qui présentent un environnement très pollué notamment dans les espaces clos ou bien semi ouvert comme un tunnel, qui représente un risque majeur parce qu'il y a un risque d'asphyxie. Pour cette raison le procédé d'évacuation de ces polluants est primordial.



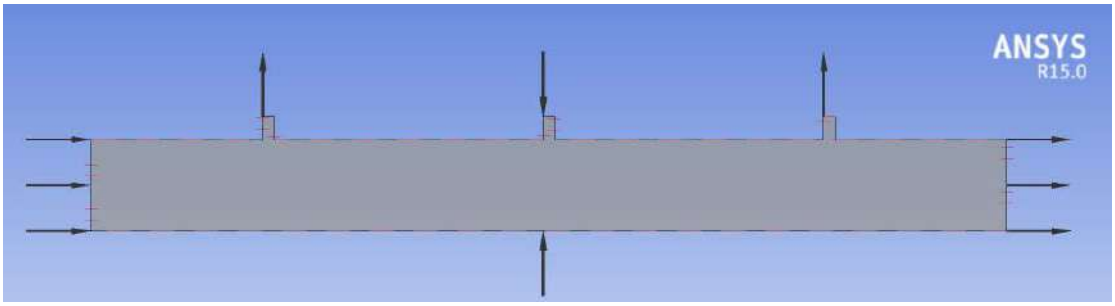
Cas 1 : Source polluante au milieu du Tunnel sans d'enfumage en haut (ni entrée d'air ni sortie d'air sur la partie haute)



Cas 2 : Source polluante au milieu du Tunnel avec d'enfumage en haut (une entrée d'air et une sortie d'air sur la partie haute)



Cas 3:Source polluante au milieu du Tunnel avec d'enfumage en haut (deux entrée d'air et une sortie d'air sur la partie haute)



Cas 4: Source polluante au milieu du Tunnel avec d'enfumage en haut (une entrée d'air et deux sortie d'air sur la partie haute)

FigureVI. 1 : Problème physique pour les différents cas.

- **Cas1 : Source polluante au milieu du Tunnel sans d'enfumage en haut (ni entrée d'air ni sortie d'air sur la partie haute.**

Les figures 2, 6, 10 et 14 illustrent l'évolution de fraction volumique à l'intérieur du tunnel pour les cas 1, 2, 3 et 4 respectivement. Les profils de ce paramètre montrent que la dispersion maximale est simulée à la source, c'est-à-dire une accumulation assez importante en entourage de la source, puis décroit exponentiellement avec la distance. Il peut remarquer que cette diminution en fonction de distance n'est pas uniforme : elle est maximale au début de la dispersion et décroit par la suite, ainsi cette diminution est plus remarquable dans le quatrième cas à l'effet des deux sorties en haut de tunnel ce qui montre le rôle des exutoires sur l'évacuation de polluant vers l'extérieur hors la zone dangereuse et qui permet le soufflage d'air neuf et l'extraction d'air polluée vers l'extérieur et diminuer le risque. La diminution de la dispersion de polluant a une relation important avec la diminution de température.

Les figures 3, 7 et 11montrent la diffusion de température dans notre domaine pour le 1ér, 2éme et le 3ème cas respectivement avec les différentes situations. D'après les résultats

obtenus, nous remarquons qu'il ya un transfert et une diminution de ce paramètre par rapport à sa valeur initial à la sortie de la source qui été élevé (398K) mais cette diminution n'est la même et se diffère selon les conditions de chaque cas à cause de l'effet de la sortie d'air en haut du tunnel qui permet d'extraire l'air donc refroidi l'intérieur du milieu. Par contre dans le figure 15 (cas 4) où on a deux sorties d'air en haut et en extrémités du tunnel, on a un transfert thermique axialement et plus rapide et remarquable que les autres cas ainsi cette diffusion se forme des contours elle est près de sol lorsqu'on la compare avec les autres résultats et la température tend vers ses valeurs admissible dans le reste du milieu. Donc à partir de cette comparaison avec les 4 cas, on peut remarquer que le nombre et la position de sorties d'air influe de façon importante sur le transfert thermique dans le milieu qui permet l'extraction d'air à haute température et soufflage l'air frais donc refroidir l'intérieur le milieu.

Les figures 4, 8, 12 et 16 représentent l'évolution du composant vitesse dans le tunnel pour les 4 cas. D'après les résultats obtenus, on remarque que la vitesse varier et subir un ralentissement (décélération) et une uniformité de vent dans le domaine en générale à l'exception de la zone entourant la source ainsi avec création des zones de recirculations surtout au niveau des entrés d'air comme signifié le signe négative.

Les figures 5 ,9, 13 et 17 illustrent les lignes courants dans le tunnel dans les cas 1 2 3 et 4 respectivement les profils de cette paramètre montres que l'écoulement est uniforme dans le domaine sauf au voisinage de la source et les entrés où il y a une recirculation.

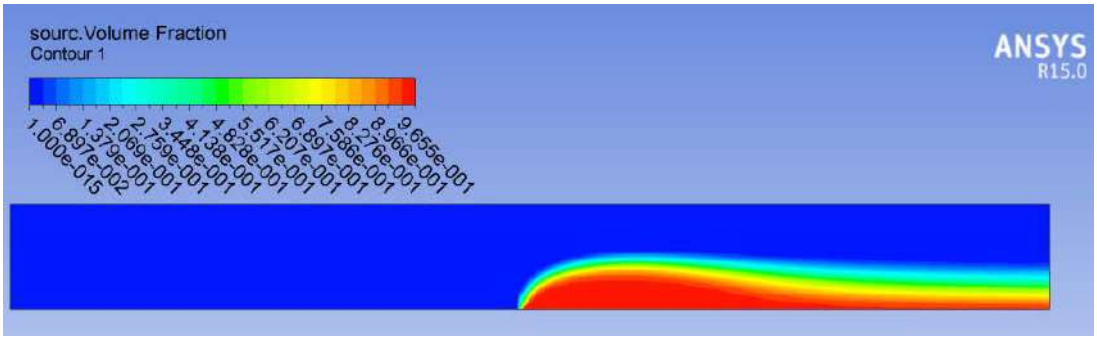


Figure IV.2 : l'évolution de la fraction volumique dans le tunnel pour le cas 1

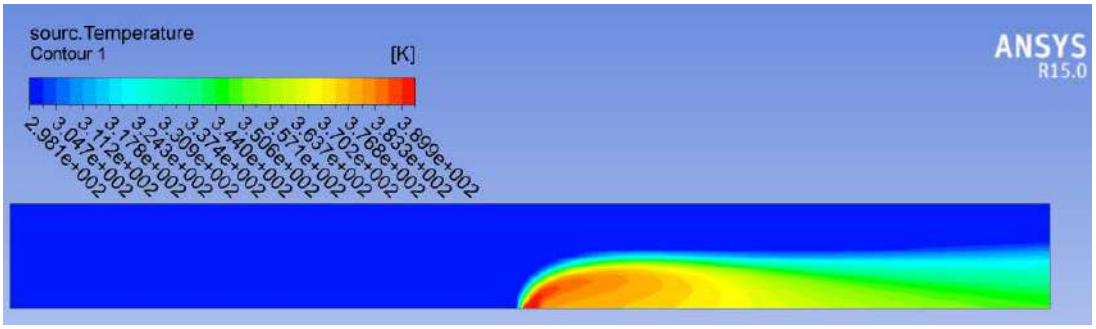


Figure.IV.3 : l'évolution de la température dans le tunnel pour le cas 1

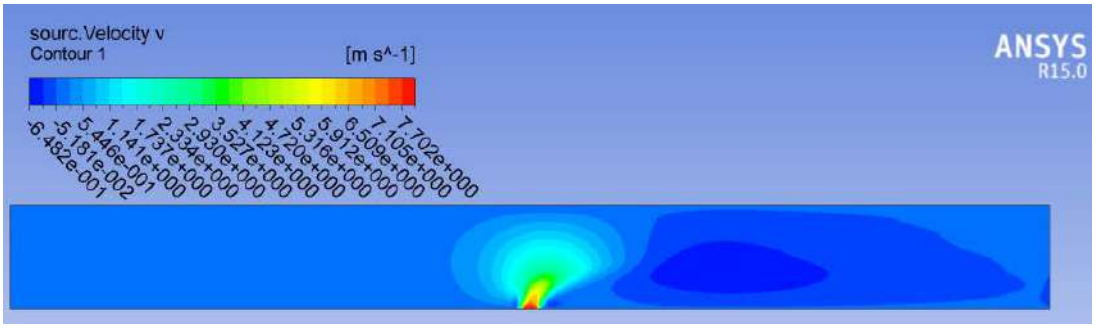


Figure. IV. .4 : l'évolution de la vitesse dans le tunnel pour le cas 1

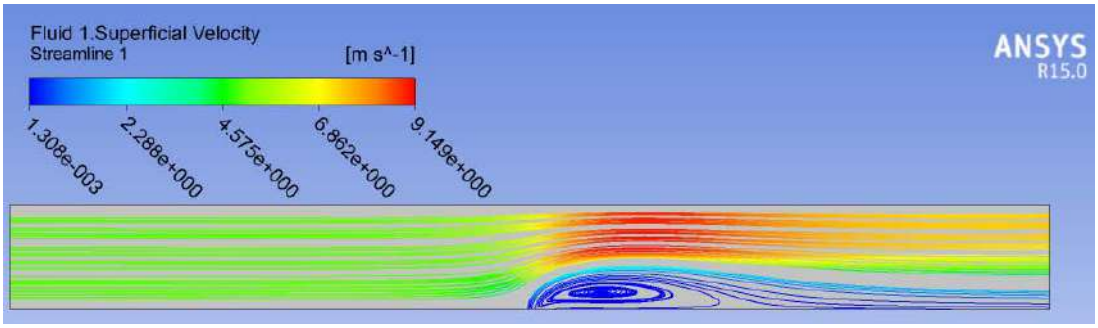


Figure.IV. 5 : les lignes de courant dans le tunnel pour le cas 1

- **Cas 2 : Source polluante au milieu du Tunnel avec d'enfumage en haut (une entrée d'air et une sortie d'air sur la partie haute.**

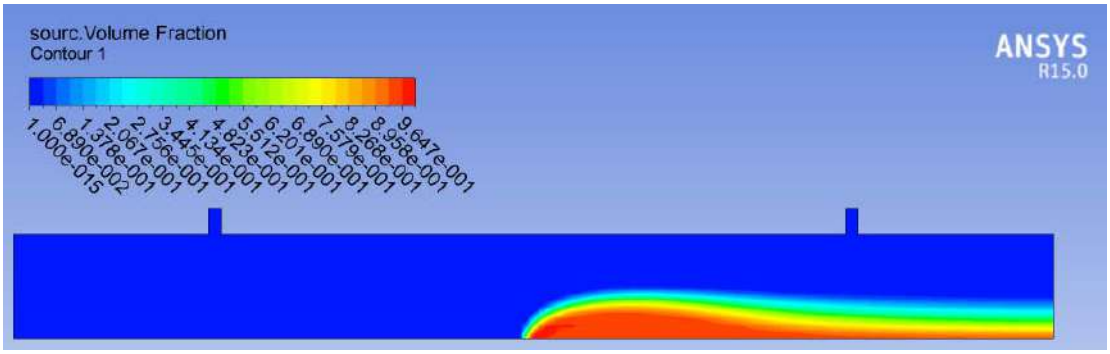


Figure. IV.6 : l'évolution de la fraction volumique dans le tunnel pour le cas 2

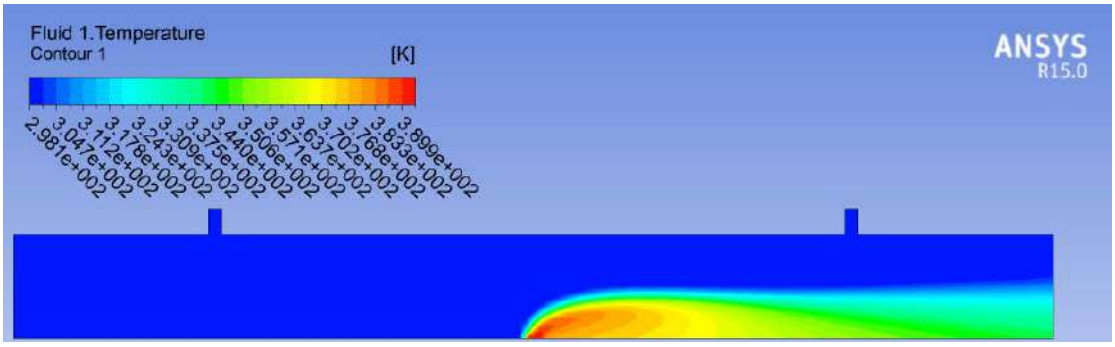


Figure .IV. 7 : l'évolution de la température dans le tunnel pour le cas 2

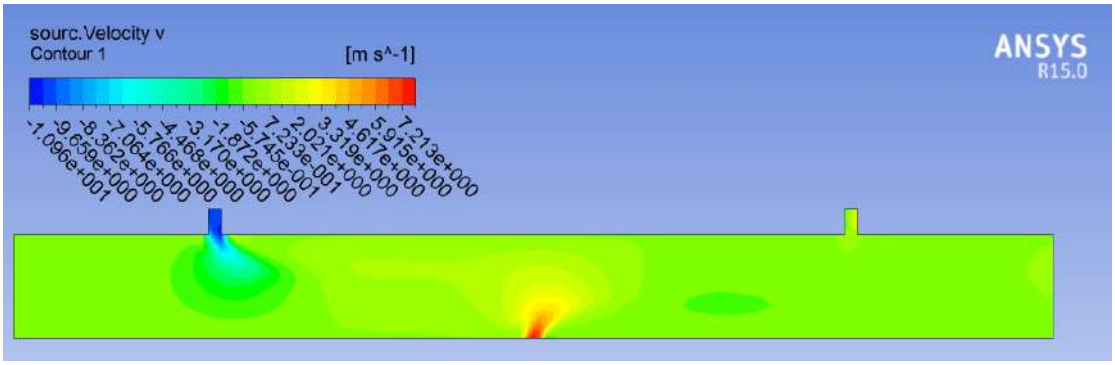


Figure .IV. 8 : l'évolution de la vitesse dans le tunnel pour le cas 2

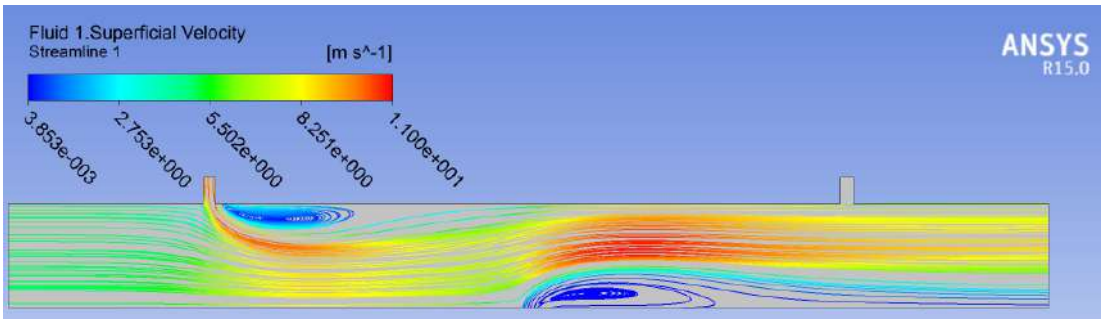


Figure .IV. 9 : les lignes de courant dans le tunnel pour le cas 2

- **Cas 3 : Source polluante au milieu du Tunnel avec d'enfumage en haut (deux entrée d'air et une sortie d'air sur la partie haute.**

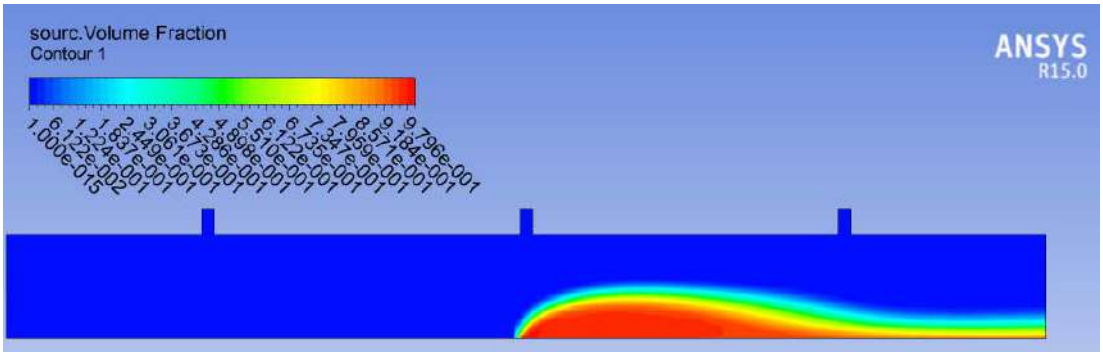


Figure .IV. 10 : l'évolution de la fraction volumique dans le tunnel pour le cas 3

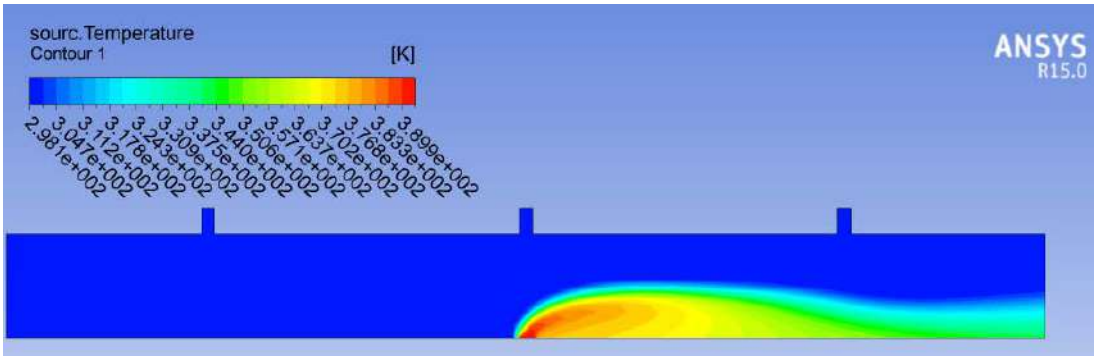


Figure .IV. 11 : l'évolution de la température dans le tunnel pour le cas 3

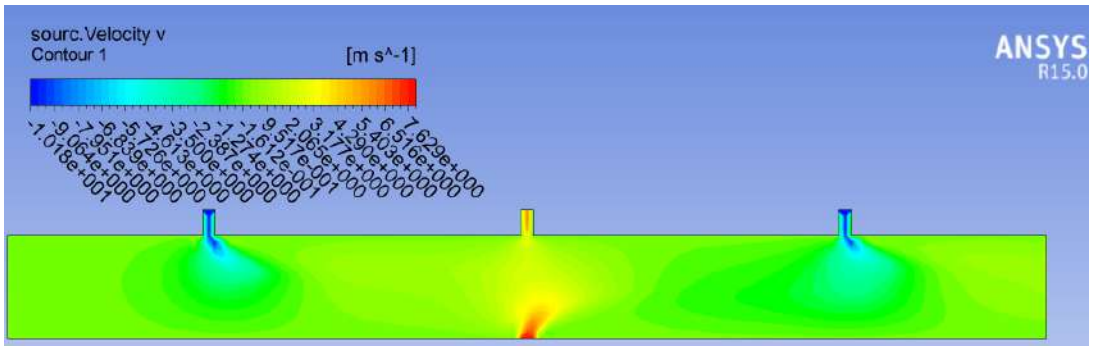


Figure .IV .12 : l'évolution de la vitesse dans le tunnel pour le cas 3

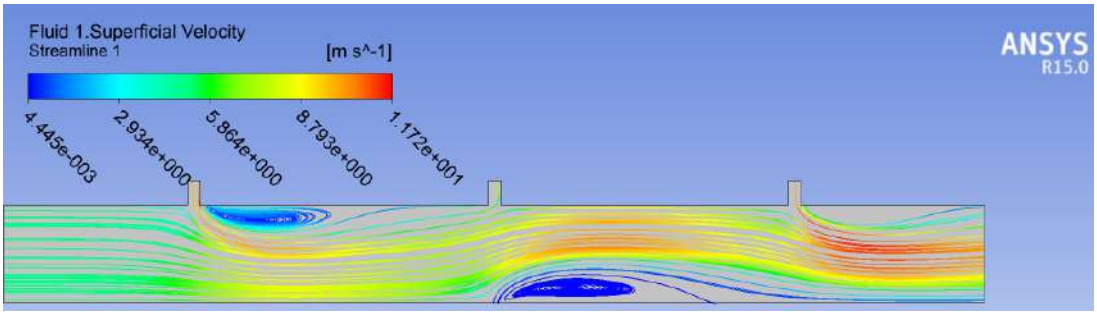


Figure.IV .13: les lignes de courant dans le tunnel pour le cas 3

- **Cas 4 : Source polluante au milieu du Tunnel avec d'enfumage en haut (une entrée d'air et deux sortie d'air sur la partie haute)**

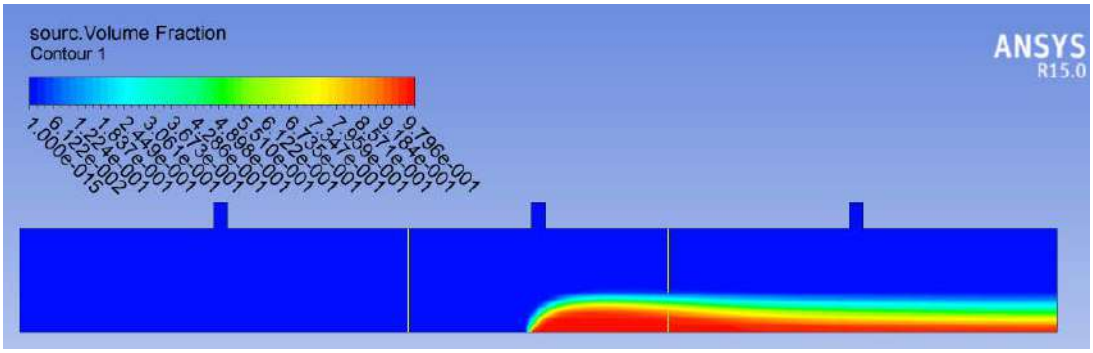


Figure .IV. 14 : l'évolution de la fraction volumique dans le tunnel pour le cas 4

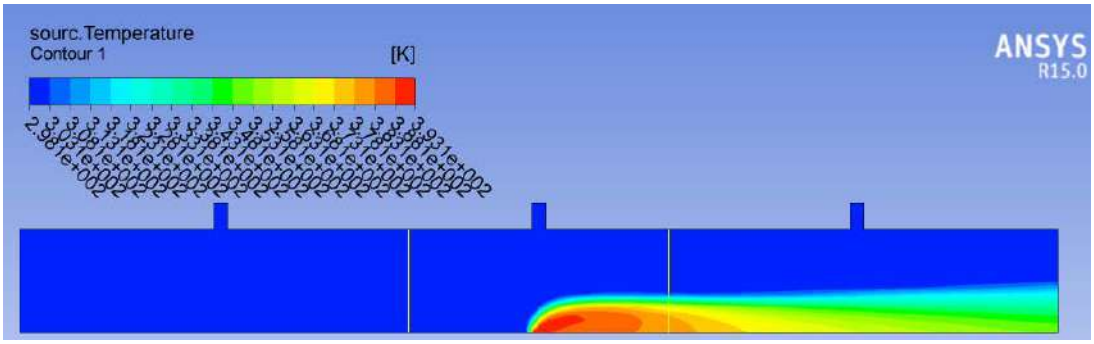


Figure.IV .15 : l'évolution de la température dans le tunnel pour le cas 4

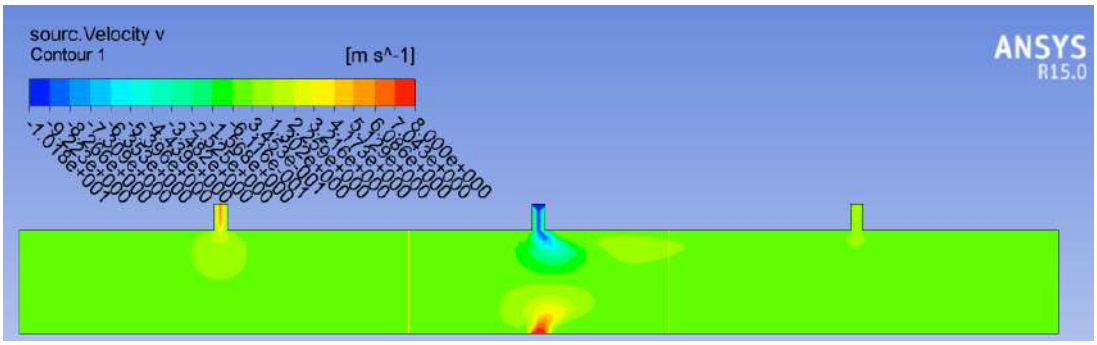


Figure. IV. 16 : l'évolution de la vitesse dans le tunnel pour le cas 4

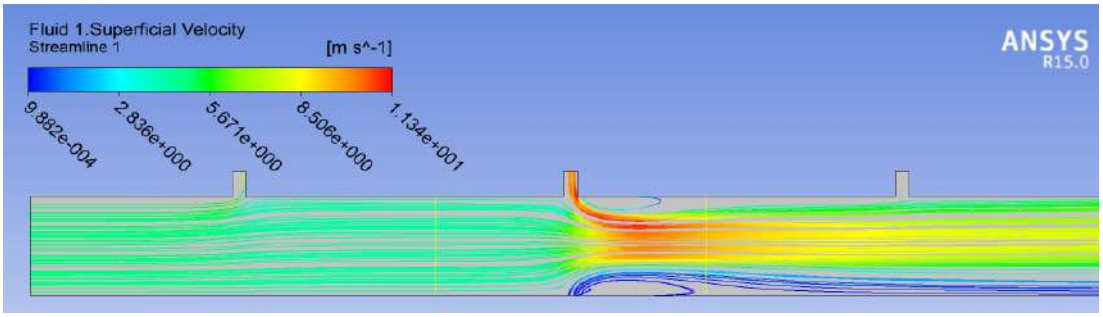


Figure. IV. 17 :les lignes de courant dans le tunnel pour le cas 4

IV.5. Analyse et évaluation des résultats :

On observe qu'il y a une diminution de ce paramètre le long de la hauteur "H" du tunnel, ainsi on remarque dès que la distance augmente la dispersion du polluant diminue on peut remarquer pour cette situation (cas 4) où on a deux sorties en haut de tunnel ce qui montre le rôle des exutoires sur l'évacuation de polluant vers l'extérieur hors la zone à dangereuse et qui permet le soufflage d'air neuf et l'extraction d'air polluée vers l'extérieur et diminuer le risque

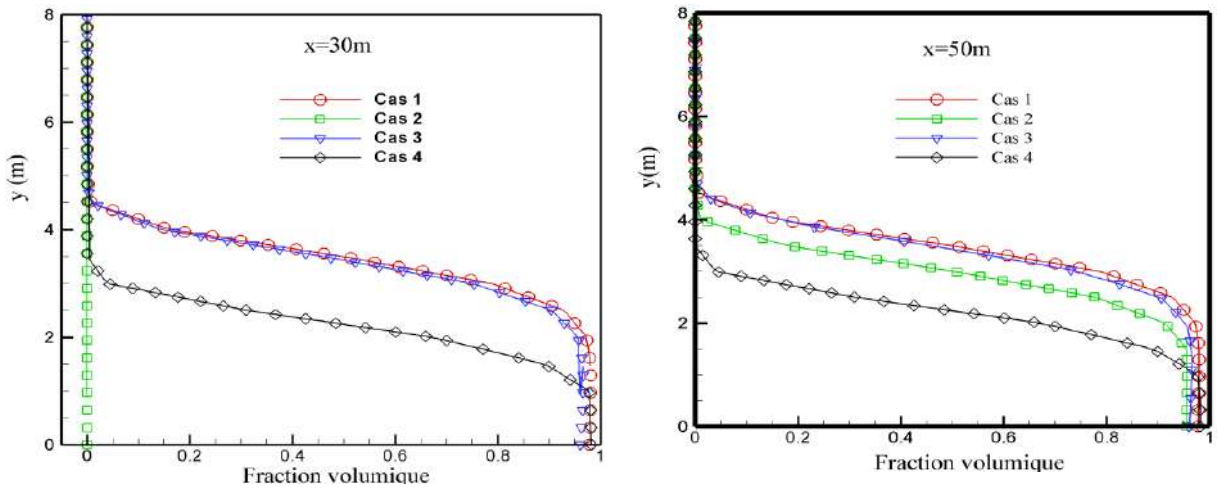


Figure. IV. 18 : la variation de la fraction volumique en fonction de la hauteur de tunnel pour les différents cas

On observe pour x=30 m il y a un équilibre juste à la sortie et pour x=50m on remarque les mêmes profils de températures avec un petit changement on peut remarquer pour cette situation (cas 4)où on a deux sorties en haut de tunnel ce qui montre le rôle des exutoires sur l'évacuation de polluant vers l'extérieur hors la zone à dangereuse et qui permet le soufflage d'air neuf et l'extraction d'air polluée vers l'extérieur et diminuer le risque donc on voit que la hauteur de ce tunnel affecter sur la dispersion de la température

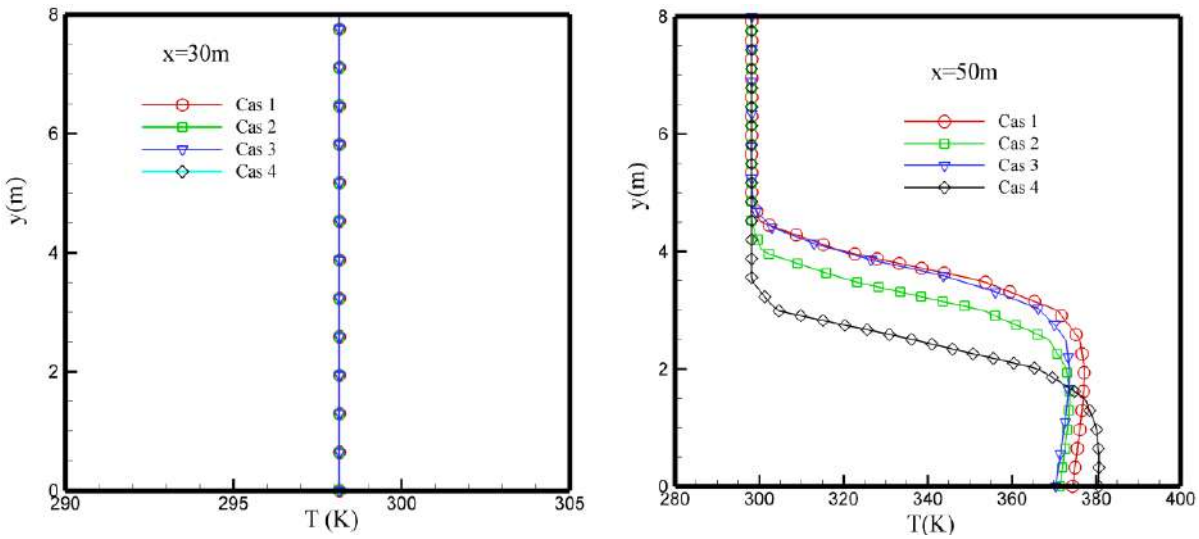


Figure. IV .19 : la variation de la température en fonction de la hauteur de tunnel pour les différents cas

On remarque que pour x= 30 m on remarque une augmentation des 4 cas respectivement puis on a les ca 1 et 4 stagnent a 4 m/s et 5 m/s respectivement puis continent à diminuer ; pour les cas 2 et 3 nous enregistrons une augmentation jusqu'à vitesse 8 m/s puis ils stagnent après continuent a diminuent facilement et rapidement, on justifie le rôle des sorties dans le tunnel. Pour x=50 m on remarque les mêmes profils de vitesse d'augmentation avec un petit changement puis elle commence à diminuer on peut remarquer pour cette situation cas 4 ou an a deux sortis eh haut de tunnel ce qui montre le rôle de ces derniers.

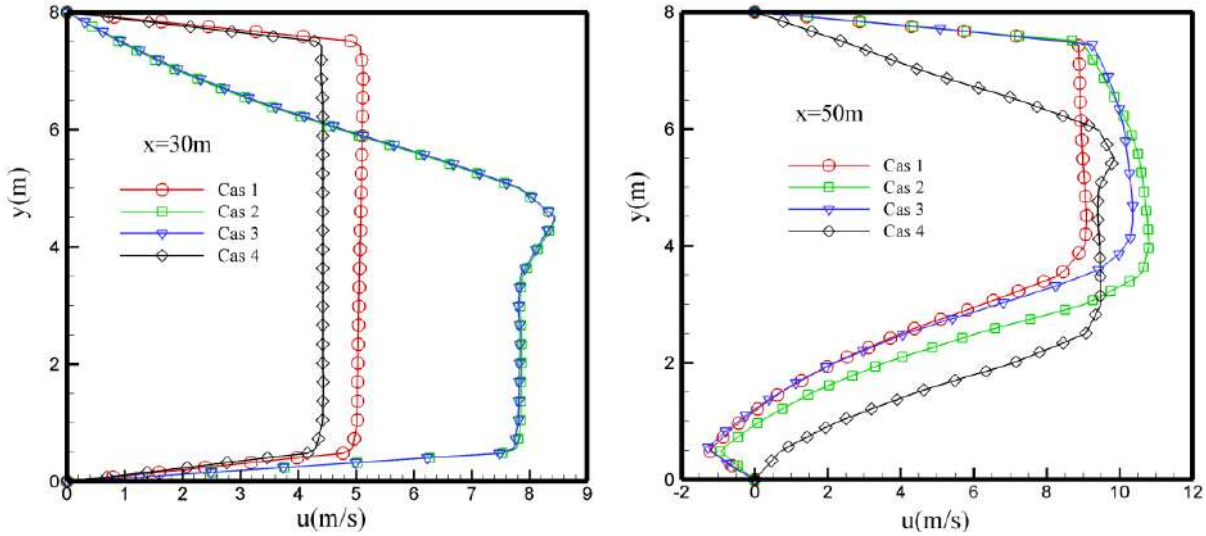


Figure. IV. 20 : la variation de la vitesse u en fonction de la hauteur de tunnel pour les différents cas.

On remarque que pour x= 30 m on remarque que les cas 1 et 4 il y a un équilibre ; les cas 2 et 3 la vitesse augmente jusqu'a le sommet puis elle diminue. Pour x=50 on voit que on a des mêmes valeurs de vitesses (5m/s) ;les cas 4 le plus rapide ce qui montre le rôle des sorties.

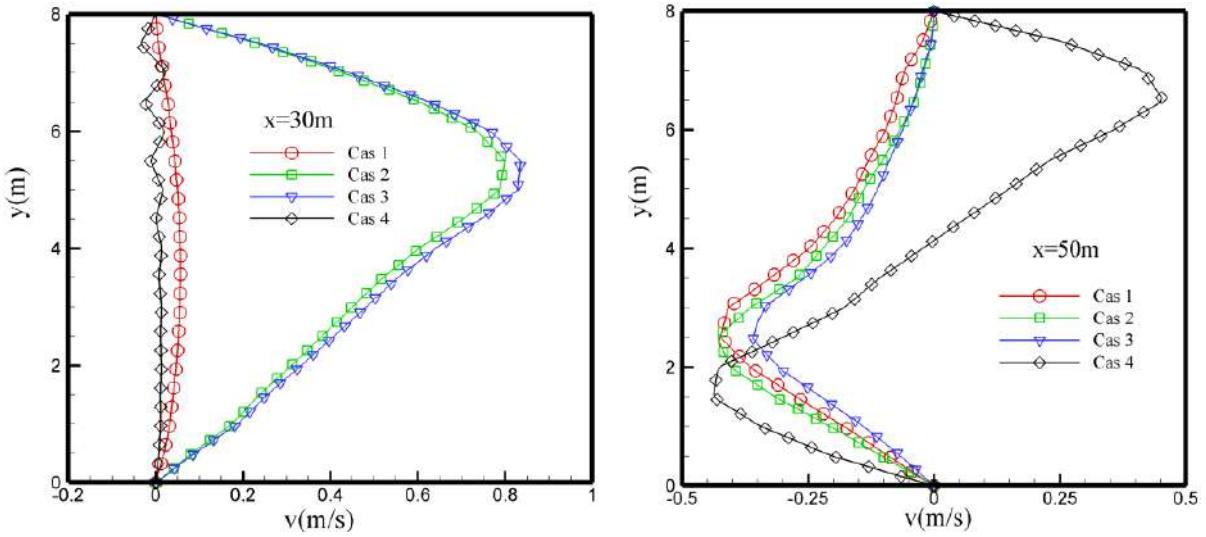


Figure. IV. 21: la variation de la vitesse v en fonction de la hauteur de tunnel pour les différents cas

IV.6.Conclusion

Les gaz brulés des échappements sont des polluants qui présentent un environnement très pollué notamment dans les espaces clos ou bien semi ouvert comme un tunnel, qui représente un risque majeur. Pour cette raison le procédé d'évacuation de ces polluants est primordial. Les résultats obtenues montrent que le procédés d'évacuation sont très affectés par plusieurs paramètres tel que ; la position de la source, vitesse de l'air frais entrant, nombre des exutoires …..

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Cette étude s'est articulée autour d'une analyse dimensionnel grâce à la simulation numérique par le model (CFD).

Ce travail consiste à réaliser, sous conditions atmosphériques stables, la dispersion d'un polluant gazeux émis par un véhicule circulant dans un tunnel, a. Le gaz étudié est le dioxyde de carbone (CO2).

Les résultats obtenus ont montrés qu'au niveau du tunnel, les émissions de gaz émis restent toujours emprisonnés dans le tunnel quelque soit la position et la vitesse de la source.

Se phénomène est dû à l'effet de la dépression, de tourbillonnement ou recirculation crée par les tunnels , température des gaz, etc.

Il a été constaté d'en général que la qualité de la dispersion influe directement sur la qualité de l'air. Si la dispersion est bonne, les concentrations peuvent rester faibles malgré des émissions importantes. Par contre, si la dispersion se fait mal, des rejets relativement limités peuvent suffire à dégrader la qualité de l'air.

Aussi, à travers les résultats obtenus, on a prélevé les paramètres influant sur la dispersion des polluants tels que les hauteurs des bâtiments et vitesses de sortie des gaz d'échappements. Autres paramètres, tels que la pression et la température.

Ce travail ouvre des perspectives intéressantes. Il s'agira par exemple, de compléter les résultats par l'étude de la dispersion avec l'introduction des réaction photochimique des gaz, changement de la direction des vents, géométrie des toitures et autres sources d'émissions.

Référence

Référence

[1] J. J ; Baik , & J. J , Kim. Une étude numérique et expérimentale de la dispersion des polluants dans un tunnel de circulation Surveillance et évaluation environnementales volume 130, pages289-299 (2007).

[2] B-M.Larsson,M.Sehlstedt, J .Grunewald, C. M. Sköld ,A.Lundin ,A.Blomberg, T.Sandström ,A.Eklund ,M.S. Vartengren, La pollution de l'air dans les tunnels routiers induit une inflammation broncho-alvéolaire, EuropeanRespiratory Journal 2007 29: 699-705; DOI: 10.1183 / 09031936.00035706.

[3] D.K. Heista,Une étude en soufflerie de l'effet des configurations de chaussées sur la dispersion de la pollution liée au trafic, , volume 43 ,issue 32 ; 2009, Pages 5101-5111.

[4] DietmarOettl ,Peter Johan Sturm ,Michael Bacher et les termodinamiques *;* Un modèle simple pour la dispersion des polluants à partir d'un portail de tunnel routier *,Institut des* moteurs à combustion interne et de la thermodynamique, Université de technologie de Graz, Inffeldgasse 25, 8010 Graz, Autriche

[5] K. Funasakaa, T. Miyazakia., T. Kawarayaa, K. Tsuruhoa, T. Mizunob, Caractéristiques des particules et des polluants gazeux dans un tunnel routier; Pollution environnementale ; 1998. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(98)00101-8)

[6] Axel Bring et Carle Axel Boman ; Simulation et mesure de la ventilation des tunnels routiers ; 1998

[7] Quiand Lui ,Wen nie ,Yun Hua et Huitian Preng , Recherche sur les systèmes de ventilation des tunnels: diffusion de la poussière et comportement de pollution par les rideaux d'air basés sur la technologie CFD et la mesure sur le terrain, Bâtiment et environnement Volume 147, 2019, Pages 444-460 ; https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.061

[8] Mohamed Hossein Estafahani,Mahdi Bitarafan et Safaraz Hashemkhani Solfani en Développement d'une nouvelle méthode hybride MCDM pour la sélection de l'alternative optimale de ventilation longitudinale mécanique des polluants des tunnels lors d'accidents automobiles. Shahid lale arefi page :89-96 2013 .https://doi.org/10.3846/16484142.2013.782567

Référence

[9] M. Almeida , Pollution de l'air dans un tunnel de circulation urbaine à Lisbonne, au Portugal - une étude de l'INAA, Rayonnement appliqué et isotopes

Volume 69, numéro 11, 2011, pages 1586-1591. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.01.014).

[10] S. Salam, Émissions des véhicules et évaluation de la qualité de l'air dans les tunnels routiers: le tunnel Les liens des auteurs ouvrent le panneau de superposition,

Recherche sur les transports, partie D: transports et environnement

Volume 5, numéro 5, 2000, pages 355-372. https://doi.org/10.1016/S1361-9209(00)00004-3).

[11]Ling Yan **,**Caractérisation chimique des particules fines des véhicules routiers dans le tunnel, Chemosphere Volume 62, numéro 10, pages 1565-1573, 2005 . https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.06.051).

[12] Gunnar Barrefors , Polluants atmosphériques dans les tunnels routiers,

Science de l'environnement total Volumes 189-190, 1996, pages 431-435, 1999 https://doi.org/10.1016/0048-9697(96)05242-4) .

[13] http://www.memoireonline.com/07/08/1275/m_etude-sources-polluants atmospheriques-region-de-bejaia1.html, Journal Officielle, 1983.

[14] http://www.notre-planete.info/environnement/pollution_air/polluauto_2.php.

[15]Y. Rahmani, Contribution à l'étude de la pollution atmosphérique par les métaux lourds dans les PM10; mémoire de master, Université de MEDEA; 2012-2013.

[16]http://environnement.doctissimo.fr/un-air-plus-pur/pollution-et-sante/Quels-effets-sur la-sante-.html 2001 .

[17] :https://fr.wikipedia.org/wiki/Tunnel::text=Un tunnel est une galerie,route chemin piA9tonnier).avril 2017.

[18] : Louis Figuier, les Merveilles de la science ou description populaire des inventions modernes, t. 4, Paris, Furne, Jouvet et Cie, 1870 , LA VENTILATION , p. 349-414

[19] François Mitterrand - 69674 Bron cedex – France, la ventilation, université ; novembre 2003 .

Référence

[20] https://www.energuide.be/fr/questions-reponses/quels-sont-les-systemes-de-ventilation-existants/746/

[21] H. Abbad et H. Hafidha; Mesure et modélisation de la pollution par les NO2 émises par une source mobile dans une rue canyon ; Université de MEDEA ; 2017-2018.

[22]M. Hadjersi; Contribution à la modélisation et la simulation d'un écoulement diphasique gaz liquide, mémoire de master, Université de MEDEA; 2016-2017.