الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département du Génie Mécanique

Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master en

Option : Energétique

THEME

Etude numérique de l'effet des accés sur l'ecoulment chaud verticale en milieu semi-confiné

.application à une station métropolitai

Proposé et dirigé par,

Dr :Mounir Zirari

Dr :Mohamed amine Yousfi

Préparé et présenté pa

Hassina Frendi

Kheira Mezbi

Remerciements

Nos remerciements vont à l'endroit de tous ceux qui ont contribué au succès de ce travail, en particulier: la famille de **hassina** et **khaira**, qui ont
toujours été là pour nous.
Nous tenons a exprimer notre gratitude a mon encadrant **zirari mounir**
Nous le remercions de nous avoir donné la supervision, l'orientation, le soutien et des conseils
Nous remercions tous nos **Amis**, Pour leur sincère amitié et confiance, et à qui nous devons reconnaissance et notre Attachement.
Mes remerciements vont enfin à toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

Aux deux personnes les plus proches de mes âmes et cœurs, mes chères parentes ***mouhamed*** *et* ***fatma*** *qui ont sacrifie toute leur vie pour nous soutenir et nous encourager à*
réaliser mes rêves et ambitions, qu'ils trouvent ici tout mon amour et gratitude.
A ma grande famille ***frendi*** *et* ***si bachir****, à mes chers frères et sœurs, à tous mes amis et proches, à tous ceux qui m'encouragé sur mon travail,*

à la personne qui ma trouvé et qui ma appris à ne pas le perdre c'est mon mari ***mr :bilal***
a tous les professeurs et les étudiants de la promotion 2018,

A ma binôme **kheira**,

à tous ceux qui ont participé de près ou de loin de ce projet, je les réaffirme tout mon respect et ma reconnaissance.

FRENDI HASSINA

Dédicace

A mon cher Père et ma chère Mère pour l'éducation et le

grand amour dont ils m'ont entouré depuis ma naissance.

A mes chères frère.

A mes chères sœurs.

A toute ma famille.

A tous mes profs qui nous a appris.

A mes chers amis hassina ,amel, hadda ,khawla ,hassina ,
ikram , zahra , nadia …..

Mon fils mohamed anis ,et mon marié djamel

A toutes la promo Master génie mécanique 2018.

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

MEZABI KHEIRA

Résumé :

En sécurité ferroviaire, l’événement redouté est l’incendie sur un train immobilisé en tunnel. La problématique est complexe car la géométrie confinée (station) offre de nombreuses ouvertures et sorties possibles aux fumées. De plus, les protocoles de désenfumage doivent être parfaitement anticipés afin d’assurer une ventilation optimale de l’ensemble de l’infrastructure et de permettre l’évacuation en toute sécurité de l’ensemble des personnes. ce travail comporte sur l’'étude numérique de l’effet des tunnels et leurs orientation, sur la longueur d’établissement du régime turbulent et la diffusion thermique, avec comme objectif l’amélioration des connaissances fondamentales des mouvements de fumées issues d’un feu se déclarant au sein d’une station de métropolitain. Ainsi, ce travail consiste à modéliser de tels mouvements à partir d’une maquette issue de la littérature, à échelle réduite, tout en reproduisant les organes principaux (station, tunnels, accès, foyer, ...), à définir des critères permettant de préserver les itinéraires d’évacuation (accès passagers), escaliers reliant les quais (souterrain) à l’extérieur, de la propagation des fumées.

Nomenclatures

Notation	Signification	Unit
$\vec{U}$	Vitesse d'une particule de fluide	
t	Temps	s
$\vec{v}$	Vecteur de vitesse	
Ω(t)	Vitesse angulaire de rotation de la terre	
E	L'énergie totale	J/kg1
c	La chaleur massique	
T	Température	K°
K	Energie cinétique turbulente	J/Kg
$\check{u}_j$, $\check{u}_i$	Tension de Reynolds	
U_i, U_j	Composante de la vitesse	m/s
c_p	Chaleur spécifique à pression constante	j /kg K

Symboles grecs

E	dissipation de l'énergie cinétique turbulente	m^2/s^2
λ	La conductivité thermique	J/s.m.k
μ	La viscosité dynamique	Kg/m.s
μ_t	La viscosité dynamique turbulente	Kg/m.s
ρ	Masse volumique	Kg /m3
τ	Contrainte de cisaillement	N /m^2
ϕ	Variables généralisée par unité de masse	

Espèces chimiques

SO2	Dioxyde de soufre
O2	Oxygène
CO2	Dioxyde de carbone
CO	Monoxyde de carbone ;
HC	Hydrocarbures ;
HO_2	Radicaux hydropéroxyles ;
HNO_3	Acide nitrique ;
NO	Monoxyde d'azote;
NO_2	Dioxyde d'azote;
NO_x	*NO+NO2;*
O_3	Ozone;

Listes des figures :

Figure I.1 : Déplacement des fumées en fonction du temps dans le volume de simulation numérique pour des section d'accès de 4x5 m2 et 6x5 m2 d'après CHEN et al. [5] …

Figure I.2 :Illustration du Jet In Cross FLow - issue de la publication de CAMBONIE et al. [24

Figure I.3 : Illustration des frontières du jet et des différents axes le caractérisant par BRIZZI [31]

Figure I.4 : Profils de vitesse et de température pour deux valeurs du facteur r différentes d'après KAMOTANI & GREBER [33]

Figure I.5 : Lignes caractéristiques issues de tests en eau avec une injection parabolique (pointillée) et carrée (trait plein) pour 4 valeurs du facteur r différents NEW et al.

Figure I.6 : Evolution spatiale du centre du jet défini par les vitesses - pour 4 valeurs du facteur J différents et pour 4 rapports H/D, d'après KAMOTANI & GREBER[46]

Figure I.7 : Structures tourbillonnaires types d'un JICF. Schéma d'après FRIC & ROSHKO [48

Figure Ⅳ.1 : représentation de maillage du tunnel

Figure Ⅳ.3: Profil de vitesse transversale dans le tunnl aval

FigureIV.4 :profilde co2 a port la dimension transvarsal de tunnel et dispersion de co2

Figure Ⅳ.5 : profil température par à port la dimension transversale du tunnel et le champ de température.

Figure Ⅳ.6 : profil de pression par à port dimension transversale et de champ de pression

Figure Ⅳ.7: profil de vitesse par à port dimension transversale et de champs de vitesse.

Figure Ⅳ.8 : profil de vitesse par à port la dimension transversale du tunnel et de champ de vitesse.

Figure Ⅳ.9 : profil de température par à port la dimension transversale du tunnel.

Figure IV.10 :profil de co2 par à port la dimension transversal du tunnel.

Figure IV.11 :profil de pression par à dimension transvarsale du tunnel et champ de pression

Figure IV.12 :profil de co2 pare à demension transvarsale du tunnel et dispersion de co2.

FigureⅣ.13 : profil la pression par à port la dimension transversale du tunnel et de champ de pression.

List du tableau :

Tableau I.1 : Composition moléculaire et caractéristiques des principaux polluants de l'air Source :(MACKENZI et al, 2000)……9

Tableau. I.2: Présentation non exhaustive des équations des positions centrales du jet dans la littérature……..15

Tableau III-1 : expression des coefficients d'échange et des termes sources pour les différentes variables.....31

Tableau Ⅳ.1: Maillages testés pour le calcul numérique dans le cas de référence ……36

Tableau Ⅳ.2: Représentation spatiale de la dispersion de co2 et la vitesse dans le temps…….39

Tableau Ⅳ.3: Représentation spatiale de la dispersion de co_2. et la vitesse dans le temps ……43

Tableau Ⅳ.4: Représentation spatiale de la dispersion de co_2 et la vitesse dans le temps……..45

Tableau Ⅳ.5: Tableau Ⅳ.5: Représentation spatiale de la dispersion de co_2 et la vitesse dans le temps…….....48

Chapitre l :

l.1.introduction ……..2

l.2 Problématique d'incendie en station ……..2

l.2.1 Le foyer ……..2

l.2.2 Le confinement ……..3

l.2.3 La ventilation …….3

l.2.4 L'effet thermosiphon …….4

l.3.Source de pollution et de différents polluants ……5

l.3.1. Les sources naturelles ……5

l.3.2. Les sources dues aux activités industrielles …….6

*** Les installations fixes de combustions ……6**

*** Les installations industrielles ……6**

*** Les sources automobiles …….6**

l.3.3. Les différentes échelles de la pollution atmosphérique …6

l.3.4. Les principaux polluants et leurs sources …….7

l.3.4.1. Le dioxyde de soufre (SO2) ……..7

l.3.4.2. Les oxydes d'azote (NO et NO2) ……..7

l.3.4.3. Les particules ……8

l.3.4.4. Les métaux lourds …….8

l.3.4.5.Les hydrocarbures et les composés organiques volatils (COV) …….....8

l.3.4.6. Le monoxyde de carbone ……8

l.3.4.7. L'ammoniac (NH3) …….8

l.3.4.8. L'ozone et les polluants photochimiques ……9

l.4. Les effets de la pollution de l'air ……10

l.4.1. Les Effets des polluants sur le cadre bâti ……10

l.4.2. Les Effets des polluants sur l'environnement ……10

l.5.Jet dans un écoulement traversier ……..11

l.5.1Généralités ……11

l.5.2. Aspects stationnaires ……13

l.6.Etat de l'art ……18

l.7Conclusion ……20

Chapitre II : la modélisation mathématique

II. Introduction ……22

II.1 Modélisation de la turbulence ……22

II.2 Equations mathématiques……22

II.2. 1 Equation de continuité……...22

II.2.2 Equation de diffusion ……23

ll.2.2.1.Histoire et développement ……23

II.2.3 Equation de conservation de quantité de mouvement ….24

II.2.4 Équation de bilan de l'énergie ……25

II.2.5 Equation de conservation de l'énergie ……25

II.2.6 Equation de conservation des espèces ……25

II.2.7 L'équation de Navier-Stocks ……26

ll.3.Conclusion ……26

Chapitre III : Modélisation numérique

III.1. Introduction ……28

III.2 Logiciel ANSYS(APDL) :……28

III.3.Les méthodes numérique ……..28

III.3.1.méthode des différences finies ……...28

III.3.2.méthode des éléments finis …….28

III.3.3.méthode des volumes finis……29

III.3.4. Présentation de la méthode…….29

III.4. Méthode de Résolution des équations par éléments finis…29

III.4.1 Introduction :……29

III.4.2. Misse en œuvre de la méthode des éléments finis…….30

III.4.2.1. Formation variation elle forte ……30

III.4.2.2formation vibrationnelle faible ……..……..30

III.4.3.forme générale des équations du système [10] ……..30

III.5.choix d'un maillage …….31

III.5.1.discrétisation …….31

III.5.1.1.Terme temporelle ……..32

III.5.1.2. Terme d'advection…….32

III.5.1.2.1. monotone streamline upwind approach (MSU)……...32

III.5.1.2.2.approche colloquée de galerkin (COLG)……...33

III.5.1.3.terme de diffusion……34

III.6.Conclusion……..34

chapitre lV :

Identification ……..36

Expérience 1 : configuration sans accès……..37

Experience 2 :configuration avec un accé ……...4

Expériences 3 : Configuration avec deux accès…….....43

Expériences 4 : deux accès identique utilisé comme issue des gaz…46

IV.2.Linterpritation …….49

IV.3.Conclusion…….50

CHAPITRE :I

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE ET POSITIONNEMENT DU PROBLÈME

l. Introduction :

Sécuriser les passagers voyageant au sein des stations de métropolitain est au cœur de l'approche . Sauvegarder les itinéraires d'évacuation passant les accès est donc primordial pour atteindre cet objectif. Pour assurer cette charge, il est alors important de connaître les éléments pouvant influer sur les écoulements de fumées et d'air chaud issus de la source (en cas d'incendie) au sein de la station, des tunnels et des accès. Pour cela, une étude bibliographique de ces problématiques a été menée.

l.2 Problématique d'incendie en station

La problématique d'un incendie en station fait depuis une dizaine d'année l'objet d'une attention toute particulière et ce par l'ensemble des partenaires intervenants (pouvoirs publics, industriels, exploitants, universitaires) et schématiquement les études sur le développement d'un incendie en station reposent sur les points suivants :

1. le foyer, c'est-à-dire la source de l'incendie,

2. le confinement, c'est-à-dire l'environnement physique et les conditions aux limites géométriques dans lesquels se développe l'incendie,

3. la ventilation, qui peut être soit naturelle ou le plus souvent forcée par un système mécanique,

4. l'effet thermosiphon, c'est-à-dire la potentialité qu'a l'écoulement à se développer dans les conduites (accès passagers).

Un état de l'art sur ces quatre points principaux est alors proposé

l.2.1 Le foyer

Il est possible d'observer à travers la littérature scientifique, abondante sur ce sujet, que pour modéliser un incendie, il existe de nombreux systèmes se déclinant en deux catégories majeures : ceux basés sur une approche avec combustion, représentatives de la réalité mais produisant de nombreuses suies et des températures très élevées et ceux issus d'une approche sans combustion, négligeant les aspects réactionnels et radiatifs d'une flamme mais permettant une approche simplifiée.

L'une des modélisations les plus utilisées dans le domaine de la combustion est la piscine de combustible liquide. De tels dispositifs sont souvent pris comme sources car la taille, le volume et surtout les caractéristiques du combustible sont assez bien connus.

La représentation d'un foyer a également été simulée en simplifiant le problème et en s'affranchissant des mécanismes de combustion. Par exemple, VAUQUELIN [1] a traité expérimentalement la problématique des incendies par le biais des différences de masse volumique entre le milieu chaud et léger (panaches issus du feu simulé par un jet d'hélium) et

le milieu ambiant froid et lourd (air). RUSCH et al. [2] ont eu recours à un jet d'air chaud afin de s'affranchir du « feu » et de produire des essais en milieu « propre ».

Dans ce cas, le foyer est représenté par une vitesse d'injection caractéristique et une température de fluide chaud. Si l'aspect « combustion » n'existe pas au sens propre, le jet chaud représente le développement du feu à travers deux paramètres : la vitesse initiale et la différence de densité entre l'air chaud et l'air ambiant. Enfin, les incendies peuvent être simulés aussi par un panache thermique, source chaude entraînant un écoulement de convection naturelle pure, comme le montre par exemple MAHMOUD et al. [3]. Dans ce cas, aucune réaction de combustion n'est considérée, mais cette méthode permet d'envisager une approche thermique permettant de caractériser la diffusion de la chaleur et d'identifier les mécanismes physiques mis en jeu lors des confrontations des écoulements chaud et froid.

l.2.2 Le confinement

Un second paramètre concernant la présente étude est le confinement de l'incendie. Un foyer est dit « confiné » si sa taille est suffisamment grande par rapport à celle du local le contenant ou si sa puissance rapportée au volume d'étude est importante. Si une ouverture ou plusieurs sont présentes dans le local, on parle alors de « semi-confinement ».

Dans un milieu confiné ou semi-confiné, l'absence d'écoulement secondaire (ventilation par exemple) augmente le risque de stratification et de dommages appliqués au milieu. Ces cas sont souvent étudiés dans le cadre de la « sécurité incendie », notamment en ce qui concerne les bâtiments, afin d'étudier la propagation des fumées dans les pièces attenantes à la pièce source, soit à travers les ouvertures, soit par les conduits de ventilation ou les conduits d'extraction... L'ensemble des études effectuées sur cette problématique souligne la très grande complexité du confinement piloté par la présence de stratification. Cette dernière est par ailleurs très sensible à tout mouvement d'air induit par les mélanges entre air chaud et air froid.

l.2.3 La ventilation

Les travaux portant sur un milieu semi-confiné et ventilé de manière forcée concernent majoritairement les cas typiques des tunnels. YUCEL et al. [4] utilisent une piscine d'alcool de 2,3 kW de puissance. Le feu se développe dans un local central possédant un tunnel de chaque côté. L'étude porte sur l'évolution de la température dans le local en fonction de la vitesse de l'écoulement lors d'essais de courte durée (de l'ordre de 4 minutes environ). Les résultats expérimentaux ont alors été comparés à des modèles théoriques.

Les travaux de recherche relatifs à l'étude de la ventilation s'efforcent de caractériser des vitesses critiques et des vitesses limites de ventilation afin d'éviter, d'une part, le développement des couches de retour et d'autre part, la création et le développement d'écoulements secondaires... Ces deux phénomènes sont typiquement identifiables dans le cas d'incendies en tunnel ou bien encore dans le cas d'un écoulement de jet chaud balayé par un écoulement traversier désigné par l'acronyme anglophone JICF pour « Jet In Cross Flow ».

Ainsi, au regard de ces études, des paramètres de sécurité ont pu être définis pour les incendies en tunnel comme la vitesse critique, la hauteur de stratification voire encore la longueur de la couche de retour...

l.2.4 L'effet thermosiphon

Le thermosiphon est un circuit aéraulique de transport convectif de chaleur dans lequel s'établit un écoulement naturel sous l'effet des forces d'Archimède dues aux variations de masse volumique du fluide. Le mouvement ascendant d'une particule d'air à masse volumique plus faible que l'air l'entourant est appelé flottabilité. Ces forces génératrices de mouvement sont, en général, localisées dans une partie du circuit aéraulique Qu'il soit vertical ou incliné, son fonctionnement reste encore mal connu dans ses principes mais les applications notamment dans le bâtiment, les énergies renouvelables ou encore les incendies, lui confèrent un certain regain d'intérêt. Bien que normalement appliqué uniquement pour des régimes de convection naturelle pure où seule la paroi du conduit est chauffée, cette terminologie est aussi utilisée sous l'appellation « tirage thermique » ou encore effet cheminée, lorsqu'une source chaude entraîne des mouvements d'air « chaud » dans des conduits verticaux, amenant possiblement un échauffement des parois et pouvant amplifier les écoulements. Cet effet est piloté par une différence de masse volumique de l'air, entraînant alors une différentielle de pression pouvant s'écrire sous la forme : $\Delta p = c^{ste}\, P_{\infty}\, H(\frac{1}{T_{froid}} - \frac{1}{T_{chaud}})$

En effet, la source de chaleur est représentée par une source fictive de 5 MW avec dégagement de particules dans un tunnel horizontal muni de deux conduits d'évacuation verticaux placés à chaque extrémité dont la section peut varier. L'observation du déplacement des particules dans l'enceinte en fonction de la position du foyer et des sections des canaux est étudiée (Fig. 1.1). Les fumées s'évacuent naturellement toujours par l'orifice (conduite verticale) le plus proche du foyer ce qui se traduit par une notion de distance minimale. Dans le cas d'une position centrale du foyer, les fumées s'évacuent par l'orifice (conduite verticale) le plus étroit ce qui sous entend que le fluide migre là où les pertes de charges sont minimales.

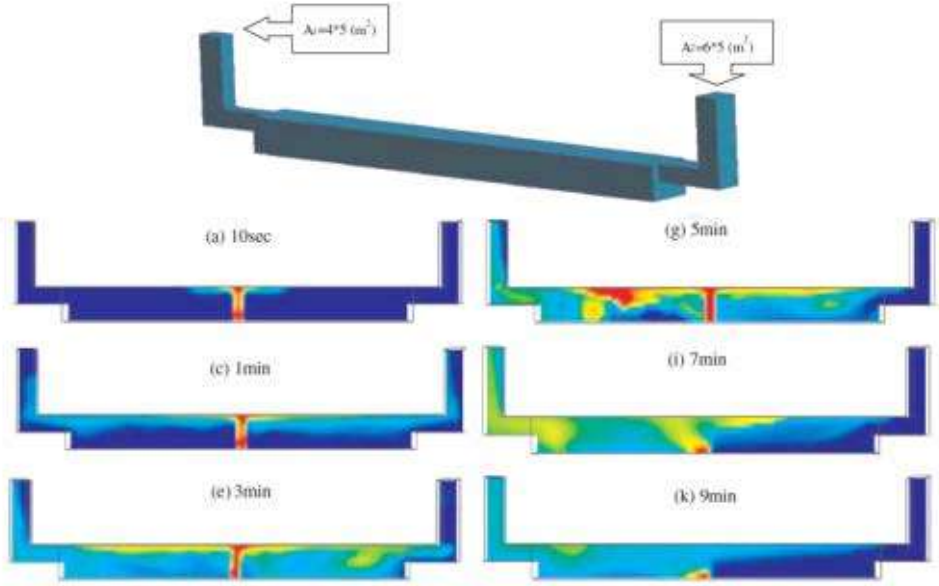


Fig. I.1: Déplacement des fumées en fonction du temps dans le volume de simulation numérique pour des section d'accès de 4x5 m2 et 6x5 m2 d'après CHEN et al. [5]

l.3.Source de pollution et de différents polluants

Les différentes sources émettent de très nombreux polluants dits « primaires » car ils sont émis directement dans l'atmosphère. Une fois les principaux polluants de l'air émis dans l'atmosphère, ils peuvent soit se redéposer ou soit se dégrader chimiquement, in situ dans l'atmosphère, les produits de ces réactions sont alors appelés polluants « secondaires ». Ces deux types de polluants jouent un rôle déterminant par les impacts qu'ils peuvent avoir sur le climat, la santé et les écosystèmes [6].

l.3.1. Les sources naturelles

L'atmosphère renferme à côté des éléments de base une quantité variable de substances naturelles provenant de sources très diverses qui dépassant un seuil crée une source de pollution :

- Les volcans émettent des gaz comme le dioxyde de soufre et de l'hydrogène sulfureux, et des particules des cendres en grande quantité, dont les nuages peuvent parcourir des distances considérables.
- Les feux des forêts, des cultures ou des prairies contribuent à des émissions importantes d'imbrûlés et de gaz.
- Les embruns marins sont constitués par des aérosols renfermant des cristaux de sel qui peuvent entraîner une pollution.
- Les végétaux sont à leur tour à l'origine d'une pollution par les pollens, les spores et les champignons.

- L'homme et les animaux rejettent des quantités importantes de dioxyde de carbone et sont à l'origine d'une pollution microbienne.
- L'ozone est formé naturellement à haute altitude à partir de réaction photochimique impliquant l'oxygène de l'air, ainsi une fois transportée dans les zones rurales par le vent, l'ozone se forme en grande quantité lorsque l'insolation est très élevée [7].

l.3.2. Les sources dues aux activités industrielles

De nombreux types d'installations industrielles émettant cependant également des polluants dans l'atmosphère constituent généralement un problème local à l'échelle d'une zone ou d'un quartier et planétaire à grande échelle [8].

- **Les installations fixes de combustions**

Parmi ces installations, nous pouvons citer les centrales thermiques, les foyers de combustions de l'industrie et les usines d'incinérations des ordures ménagères.

- **Les installations industrielles**

Les installations industrielles sont très diverses, citons la sidérurgie comme la poussière métallique, la pétrochimie, le stockage des produits pétroliers, la métallurgie de l'aluminium, les industries des dérivés azotés et les cimenteries

- **Les sources automobiles**

Le trafic des véhicules roulants occupe sans conteste une place importante. Les prestations de circulation ont en effet subi une croissance très marquée au cours des dernières décennies. Les principaux polluants sont le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NOx) et les composés organiques volatiles (COV).

l.3.3. Les différentes échelles de la pollution atmosphérique

Nous pouvons classer la pollution atmosphérique en trois catégories :

- Pollution de proximité et à l'échelle locale :

Elle concerne les sources d'émission de gaz ou d'autres substances indésirables le plus souvent produites en milieu urbain (industries, chauffage, trafic...). Elle affecte en premier lieu la santé des populations par son action directe à court terme mais exerce aussi une toxicité à plus long terme pour certaines pathologies. Elle peut également procurer une gêne olfactive importante et participer à la dégradation du patrimoine bâti (corrosion, salissure). [9].

- Pollution à l'échelle régionale :

Elle concerne les zones situées à quelques dizaines de kilomètres (voire des centaines de kilomètres) des sources d'émission de pollution. Elle regroupe souvent sous ce terme à deux phénomènes de pollution :

Les phénomènes de retombées au sol de dépôts acides, secs et humides, qui touchent des zones étendues et éloignées des sources en raison des transformations physico-chimiques et des conditions climatiques (HCl, H2SO4 issus des émissions de SO2, HNO3 liées à celles des NOx).

La pollution photochimique qui désigne les mécanismes conduisant à la rupture naturelle de formation et de destruction de l'ozone troposphérique (à basse altitude) et à l'augmentation de sa concentration dans l'air. [10].

- Pollution planétaire :

Elle concerne les deux problèmes identifiés :

- La diminution (« trou ») de la couche d'ozone stratosphérique due essentiellement à l'action des composés halogénés (chlore, brome, iode) libérés par les activités humaines, et à la réduction du pouvoir filtrant a des conséquences néfastes sur la santé (cancers de la peau).
- L'augmentation de l'effet de serre qui constitue un processus naturel à la vie terrestre car sans ce phénomène, la température de l'air serait inférieure à - 30 °C à la valeur moyenne actuelle qui est de 15°C sur notre planète. Cependant, son augmentation liée à la production excessive de certains gaz (CO, CO2, COV) entraînera de grave changements climatiques (élévation de la température du globe) et des conséquences lourdes pour la vie terrestre [11].

l.3.4. Les principaux polluants et leurs sources

Les principaux polluants mesurés par les organismes de surveillance de la qualité de l'air sont les suivants :

l.3.4.1. Le dioxyde de soufre (SO2)

Ce gaz résulte des combustions (oxydation du soufre des combustibles fossiles) et il est associé à des nombreuses pathologies respiratoires souvent en combinaison avec les particules. Il peut entraîner des inflammations et une altération de la fonction respiratoire et les études épidémiologiques montrent également souvent des liens entre concentration en dioxyde de soufre et particules dans l'air et hospitalisations pour troubles respiratoires et cardiaques. Le dioxyde de soufre peut se transformer en particules de sulfates dans l'air ambiant et concourt également au phénomène des pluies acides néfastes pour les écosystèmes aquatiques et terrestres [12].

l.3.4.2. Les oxydes d'azote (NO et NO2)

Ils sont émis lors des combustions (chaudières, moteurs...) et le dioxyde d'azote est le plus nocif pour la santé humaine. C'est un gaz irritant pour l'appareil respiratoire et il favorise l'hyperréactivité bronchique. Les populations asthmatiques semblent plus sensibles également à ce polluant. Chez l'enfant il peut favoriser des infections pulmonaires. Les oxydes d'azote participent en outre à la formation de polluants photochimiques comme l'ozone néfastes pour la santé et concourent au phénomène des pluies acides [13].

l.3.4.3. Les particules

Elles sont émises notamment par les combustions. Elles se forment aussi dans l'air à partir de certains polluants gazeux.

Les particules d'un diamètre inférieur à 10 microns (PM10) sont dites «inhalables » car elles peuvent atteindre l'appareil pulmonaire. Les particules fines regroupent celles plus petites que 2,5 microns (PM2, 5). Les effets dépendent de la composition chimique des particules (présence de métaux toxiques comme le plomb, ou de composés cancérogènes tels que certain hydrocarbures aromatiques polycycliques). Les particules fines sont également impliquées dans la genèse de troubles respiratoires et cardiovasculaires [14].

l.3.4.4. Les métaux lourds

Ce sont des métaux de densité élevée comme le plomb (Pb), le Mercure (Hg), l'Arsenic (As), le Cadmium (Cd), le Nickel (Ni), le Mercure (Hg). Dans l'air, ils sont sous forme de particules à l'exception du mercure qui est principalement gazeux. Ils proviennent de la combustion dans certains procédés industriels et de l'incinération des déchets. Ils peuvent s'accumuler dans l'organisme et les effets sont variables selon les métaux ; atteintes du système nerveux, des fonctions rénales, hépatiques, etc. Leur dépôt sur les surfaces (sols, eaux, etc.) conduit également à une contamination de la chaîne alimentaire [15].

l.3.4.5. Les hydrocarbures et les composés organiques volatils (COV)

Ils sont émis par diverses sources (solvants, pétrochimie, automobiles...) et recouvrent de nombreux composés aux effets différents (odeurs, altération de la fonction respiratoire, troubles nerveux). Certains COV comme le formaldéhyde et le benzène sont cancérigènes. Les COV contribuent aussi à la mauvaise combustion du bois (dans des cheminées et foyers ouverts) et pour une plus faible part de la circulation automobile [16].

l.3.4.6. Le monoxyde de carbone

Ce gaz est issu des combustions dans les chaudières mal réglées, et de la circulation automobile. Il se fixe sur l'hémoglobine et peut entraîner des troubles respiratoires, des effets asphyxiants, des maux de tête et des troubles cardiaques [17].

l.3.4.7. L'ammoniac (NH3)

Ce gaz est notamment émis par les lisiers d'élevage. Il est malodorant et irritant à forte concentration. Dans l'air, l'ammoniac contribue à la formation de fines particules et de nitrate d'ammonium et contribue aux phénomènes d'acidification et d'eutrophisation des milieux naturels par dépôt de matière azotée [18].

l.3.4.8. L'ozone et les polluants photochimiques

L'ozone troposphérique résulte majoritairement de réactions chimiques sous l'effet du rayonnement solaire, entre les oxydes d'azote, les composés organiques volatils et le Monoxyde de carbone. Ces réactions forment aussi d'autres polluants (nitrate de peroxyacétyle, acide nitrique, aldéhydes, fines particules, etc.) regroupés sous le terme de « pollution photochimique ». L'ozone en est le principal constituant et il est néfaste pour la santé humaine et la végétation. L'ozone contribue également à l'effet de serre et constitue, avec les particules, l'une des priorités du programme CAFE (Clean Air For Europe) en matière de préservation de la qualité de l'air en Europe.

On peut classer quelques polluants et ses caractéristiques suivant le tableau audessus :

Pollution	composition	Caractéristique
Anhydride Sulfureux	SO2	Incolore, gaz lourd, soluble dans l'eau avec une odeur irritante.
Oxyde de Carbone	CO	Incolore, gaz inodore toxique, légèrement soluble dans l'eau.
Ozone	O3	Gaz bleu pâle, soluble dans l'eau, instable, odeur douceâtre.
Oxydes d'azotes	NOX	Gaz brun rougeâtre légèrement soluble dans l'eau.
Les composés Organiques Volatiles	COV	Ces composés parfois dotés d'un fort caractère odorant. Sont représentés par de nombreux composés : le butane, propane, acétylène, isoprène, benzène, le toluène, le méthanol, éthanol et les éthers.
Hydrogène Sulfureux	H2S	Gaz incolore avec une odeur repoussante « d'œufs pourris », légèrement soluble dans l'eau.
Oxyde nitrique	NO	Gaz incolore, légèrement soluble dans l'eau.

Plomb	Pb	Métallique, peut exister dans les composés chimiques variés avec différentes caractéristiques.
Mercure	Hg	Métallique, peut exister dans les composés chimiques variés (différentes caractéristiques).
Particule	Variable	Particules solides ou gouttelettes liquides incluant vapeurs, fumées, poussières et aérosols.
Hydrocarbures	Variable	Nombreux composés hydrogènent et de carbone.
Fluore	Variable	Irritants, incolore, gaz solubles dans l'eau.

Tableau I.1 : Composition moléculaire et caractéristiques des principaux polluants de l'air
Source :(MACKENZI et al, 2000)

l.4. Les effets de la pollution de l'air

L'air est indispensable à la vie, mais il peut avoir des effets nocifs si sa qualité est mauvaise. Sa pollution constitue un danger immédiat pour la santé, mais a également un effet qui s'amplifie au fil des années. Les personnes les plus sensibles, comme les enfants, les personnes âgées, les grands fumeurs, les malades du cœur ou des poumons, sont les plus concernées par la pollution atmosphérique. Pour celles- ci, la pollution peut favoriser des maladies, en aggraver certaines, et parfois même précipiter les décès.

Les effets de la pollution de l'air sur la santé augmentent en fonction des concentrations des substances polluantes dans l'air et de la durée d'exposition.

La réglementation définit, pour certains indicateurs de la pollution, des concentrations de références pour guider l'action des pouvoirs publics. Il s'agit des valeurs limites et des seuils d'alerte. [19]

l.4.1. Les Effets des polluants sur le cadre bâti

Les matériaux sont essentiellement affectés par la pollution acide qui entraîne une dégradation des édifices, monuments ou façades d'immeubles. La pollution atmosphérique met en danger notre patrimoine culturel et occasionne d'onéreux travaux de ravalement de façades ou de restauration des monuments. [19]

l.4.2. Les Effets des polluants sur l'environnement

D'après Kalaora « L'environnement s'inscrit d'abord dans une logique de rationalisation administrative et non dans une logique de participation et de communication écologique » (Kalaora, 1998, p.105).

L'effet de la pollution atmosphérique sur l'environnement est divers, par exemple les arbres vivent et dépérissent pour des causes naturelles très variées ne serait-ce que l'âge. Le dépérissement soudain constaté surtout depuis 1980 semble relever de causes tout à fait inhabituelles. Les responsables considèrent que la pollution atmosphérique est l'un des nombreux éléments participant aux dépérissements forestiers. En France, le programme DEFORPA (dépérissement des forêts attribué à la pollution atmosphérique) ainsi que des recherches en laboratoires, ont montré que les causes du dépérissement forestier sont très complexes telles que les sols de mauvaise qualité, sécheresse anormale, présence de polluants dans l'atmosphère principalement la pollution acide et l'ozone. [19]

l.5.Jet dans un écoulement traversier

l.5.1Généralités

La confrontation entre deux écoulements perpendiculaires, dénommée **J**et **I**n **C**ross **F**low (**JICF**), est une thématique largement étudiée depuis les années 1970, avec de nombreuses applications comme la dispersion des fumées à la sortie des cheminées industrielles (SAID *et al.* [20]), la décharge des eaux usées dans l'océan (MORTON & IBBETSON [21]), l'injection de fuel dans les moteurs (SCHLÜTER & SCHÖNFELD [22]) ou encore le principe du film-cooling pour le refroidissement (LALIZEL *et al.* [23]) et la protection des parois dans les réacteurs lors de la combustion. C'est donc la relation entre un jet et un écoulement traversier à deux masses volumiques différentes (ou non) qui est caractérisée, comme le montre la figure (I.2).

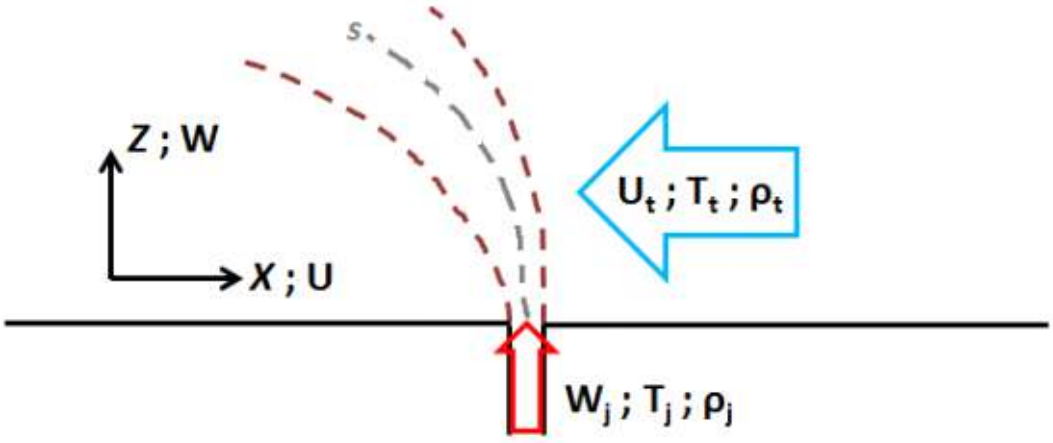


Fig. I.2: Illustration du Jet In Cross FLow - issue de la publication de

CAMBONIE et al. [24].

où, U_t et W_j représentent respectivement la vitesse horizontale de l'écoulement traversier et la vitesse verticale du jet ; T_t et T_j les températures des écoulements ; ρ_t et ρ_j leurs masses volumiques. L'axe suivant la ligne de description du jet, par rapport au centre du jet [0 ; 0], est classiquement notée « s » .

Que ce soit par approche numérique ou expérimentale, la littérature regorge de publications sur cette thématique. Beaucoup de ramifications ont été apportées au cas classique du jet

chaud vertical dans un écoulement froid horizontal, comme par exemple : le fait de confiner le jet par un « plafond », de changer l'angle d'injection (KOLLA et al. [25]), le nombre de MACH des écoulements (KAWAI & LELE [26]), le nombre d'injecteurs (HOLDEMAN et al. [27]), la nature des écoulements (CLERX et al. [38]), la présence d'obstacles (RUNDSTRÖM & MOSHFEGH [29])... Afin de traiter des configurations proches de celles attendues dans l'écoulement à étudier, seules les études concernant le JICF avec un jet vertical unique seront étudiées.

Afin de pouvoir comparer les différentes études réalisées sur ce sujet, l'utilisation de plusieurs nombres adimensionnels, mis en place au cours des décennies précédentes, a été privilégiée. Ces nombres sont principalement :

– le rapport des vitesses entre le jet et l'écoulement principal « α » également noté VR dans la littérature :

$$\alpha = \frac{W_j}{U_t} \qquad (1.1)$$

– le rapport des densités de flux de quantités de mouvement volumique « J » ou CR : $j = \frac{\rho_j}{\rho_t} \left[\frac{W_j}{U_t}\right]^2$ (1.2)

– plus récemment, c'est le facteur r qui est le plus utilisé :

$$r = \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_t} \left[\frac{W_j}{U_t}\right]^2} = \sqrt{J} \qquad (1.3)$$

A noter que si les écoulements traversier et d'injection sont à la même température, les trois grandeurs identifiées (α, J et r) sont identiques.

Il est facile de comprendre que pour des rapports ρ_j/ρ_t équivalent, c'est le rapport de vitesses W_j/U_t qui pilote le facteur. Il est alors naturel d'observer que plus le facteur r est grand ($W_j > U_t$ à densité équivalente), plus le jet pénètre loin dans l'écoulement traversier comme le souligne ANDREOPOULOS [30].

Il est donc nécessaire d'approfondir les études dédiées aux écoulements de jet soumis à un écoulement traversier et notamment en soulignant l'influence de certains paramètres afin de mieux approfondir l'organisation potentielle des écoulement résultants, comme :

1. les conditions aux limites des deux écoulements,

2. la hauteur sous plafond,

3. les structures tourbillonnaires.

Deux approches sont donc possibles et surtout complémentaires. Dans un premier temps, l'aspect stationnaire sera souligné. Il permet d'observer l'inclinaison du jet en fonction des différents paramètres caractéristiques. Dans un second temps, les aspects instationnaires

seront présentés notamment par le biais de la topologie des structures tourbillonnaires mises en jeu.

l.5.2. Aspects stationnaires

Les JICF sont généralement caractérisés dans une première approche par leurs trajectoires (cf. Fig. 1.5). Ces dernières, directement liées au facteur r les caractérisant, servent notamment :

– à décrire l'inclinaison du jet dans l'écoulement traversier,

– à définir l'expansion du jet par la description de ses frontières amont et aval (lignes OD et OE - Fig. I.3)

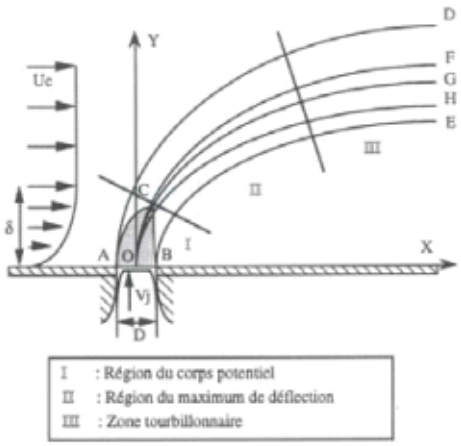


Fig. I.3: Illustration des frontières du jet et des différents axes le

caractérisant par BRIZZI [31].

L'axe du jet peut revêtir quatre définitions différentes : soit il correspond à la ligne passant par les vitesses maximales (ligne OF), soit par le traceur maximum (température ou concentration - ligne OH), soit par les maximales de vorticité (CVP) ou encore la ligne passant par le centre des lignes amont et aval (ligne OG). Il est généralement admis que les lignes décrites par les structures tourbillonnaires et celles suivant les maxima thermiques se confondent, comme le rappelle par ailleurs MARGASON [32] lors de sa revue bibliographique en 1993 dans le cas où la température du jet est différente de celle de l'écoulement principal. La ligne de vitesse maximale est généralement différente des autres déflexions. Elle s'en trouve décalée vers le haut par rapport aux autres définitions (cf. Fig. I.4). En fait, à partir de la compilation des résultats sur le positionnement de l'axe du jet, des approches analytiques ont été proposées pour le définir et les formes les plus souvent utilisées sont celles présentées par les équations 1.4 et 1.5 :

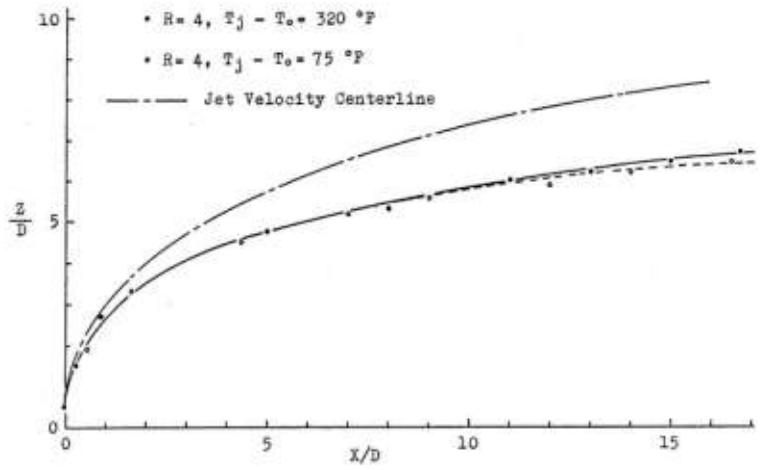


Fig. I.4: Profils de vitesse et de température pour deux valeurs du

facteur r différentes d'après KAMOTANI & GREBER [33]

par le rapport X/D

$$\frac{Z}{D} = \alpha r^{\beta} (\frac{X}{D})^{\gamma} \qquad (1.4)$$

par le rapport X/rD

$$\frac{Z}{rD} = A(\frac{X}{rD})^{\beta} \qquad (1.5)$$

Sous ces formes analytiques, chaque auteur a proposé son jeu de paramètres optimisés ;et une multitude de corrélations existent, MARGASON de 1993 [34] donnant notamment plus de détails.

Auteurs	Jeu de paramètres	Grandeur	Année
KAMOTANI & GREBER [35]	α = 0,89 ; β = 0,94 ; γ = 0,36	Vitesse	1972
[35] PATRICK [36]	α = 0,89 ; β = 0,94 ; γ = 0,36	Vitesse	1972
	α = 1 ; β = 0,85 ; γ = 0,38	Concentration	1967
FEARN & WESTON [37]	α = 0,347 ; β = 1,127 ;γ = 0,429	CVP	1974

PRATTE & BAINES [38] MARGASON [34] HASSELBRINK & MUNGAL [39]	A = 2,05 ; B = 0,28 1,2<A<2,6 ; 0,28<B<0,34 A = (2/c*e j*)0;5 ; B = 0,5 (champ proche) A = (3/c*e j*)1=3 ; B = 1/3 (champ lointain) c*e j*, le coefficient d'entraînement = 0,32, d'après RICOU & SPALDING [40]	Concentration Centre	1967 1993 2001

Tab. I.2: Présentation non exhaustive des équations des positions centrales du jet dans la littérature

L'inclinaison du jet et la caractérisation des lignes caractéristiques dépendent en grande partie du rapport r entre le jet et l'écoulement traversier, mais également de divers paramètres propres à chaque expérience, comme la forme de l'injecteur, le profil de vitesse d'injection, la hauteur de la couche limite, ...

Le premier point, permettant de caractériser le jet et ayant une importance non négligeable sur son comportement dans l'écoulement dans la partie proche de la sortie, est la forme de l'injecteur. HAVEN & KUROSAKA [41] montrent notamment que le rapport d'aspect (taille de l'orifice dans le sens de l'écoulement sur l'autre dimension) joue un rôle important sur la distance entre les tourbillons contrarotatifs, indiquant ainsi que plus le rapport d'aspect est faible (orifice plus long que large dans le sens de l'écoulement), plus le jet pénètre l'écoulement traversier.

Le développement du jet dans la première région appelée « zone potentielle » dépend uniquement de l'injection. L'écoulement traversier n'a que peu d'influence car la vitesse du jet est très proche de celle de l'injection (w_j) et la température y est à son maximum. Cette zone a une taille variable dépendant bien évidemment du facteur r mais également du profil d'injection de l'air chaud. En effet, plusieurs études ont montré que le profil d'injection (parabolique ou carré) dans l'écoulement traversier a un impact direct sur l'évolution et la pénétration du jet dans l'écoulement principal. Lors de leurs travaux dans de l'eau, NEW et al. [42] ont mis en évidence que la pénétration du jet dans l'écoulement est plus importante lorsque le profil est de type parabolique que lorsqu'il est de type carré.

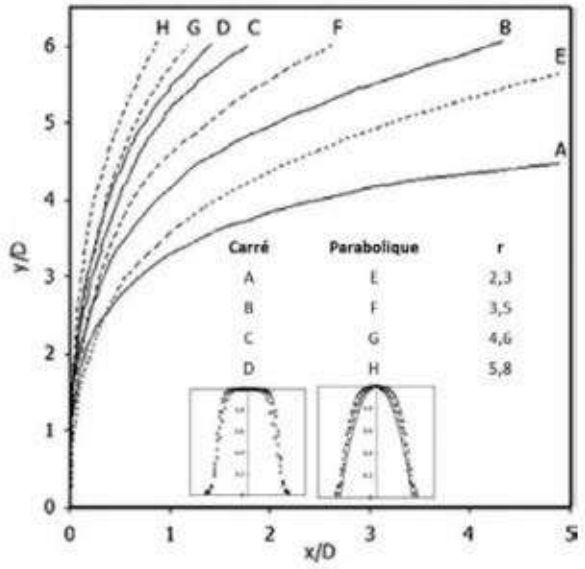


Fig. 1.5: Lignes caractéristiques issues de tests en eau avec une injection parabolique (pointillée) et carrée (trait plein) pour 4 valeurs du facteur r différents NEW et al. [42].

MUPPIDI et al. [43, 44] ont également travaillé sur ce sujet. La trajectoire de la ligne centrale (jet/traversier) est fortement dépendante de la forme du profil du jet et des conditions initiales de l'écoulement traversier. Effectivement, ils observent qu'un jet avec un profil parabolique pénètre plus facilement dans l'écoulement traversier (relevant la trajectoire) qu'un jet avec un profil plat (pour des facteurs r et des couches limites de l'écoulement traversier identiques). Parallèlement, pour des jets identiques à valeurs de r données, le jet évolue plus facilement lorsque la couche limite est grande que lorsque celle-ci est fine. En se basant sur les travaux de SU & MUNGAL [45] où le rapport de quantité de mouvement r est égal à 5,7 pour des nombres de Reynolds de jet d'environ 5000, MUPPIDI et al. [44] ont cherché à valider leur approche numérique. En plus d'avoir trouvé une bonne ressemblance entre l'expérience et la simulation numérique, ils ont pu mettre en évidence l'influence des paramètres de la turbulence [45] et l'énergie cinétique de turbulence qui subit une très forte variation aux abords du jet. En effet, l'énergie de turbulence augmente jusqu'à une hauteur équivalente à 4 fois le diamètre (4 D), diminue alors rapidement (vers 8 D) puis se stabilise en s'éloignant de la sortie.

Bien que la majorité des études a lieu dans un environnement semi-infini ou sans interaction avec éventuellement la présence d'un plafond, KAMOTANI & GREBER [35] ont montré que la présence d'un plafond, pour un facteur r donné, limite le développement du jet. Dès lors qu'il n'y a pas d'interaction possible entre le plafond et le jet, la hauteur H/D n'a aucune influence sur l'axe du jet. Par exemple, pour r = 2,83 (J = 8), quelle que soit la valeur prise par le rapport H/D ($\rightarrow \infty$, 16 ou 12) dans leur étude, le positionnement du jet est strictement identique. Pour des valeurs plus faibles, H/D = 8, une légère déviation est observée (cf. Fig. 1.8).

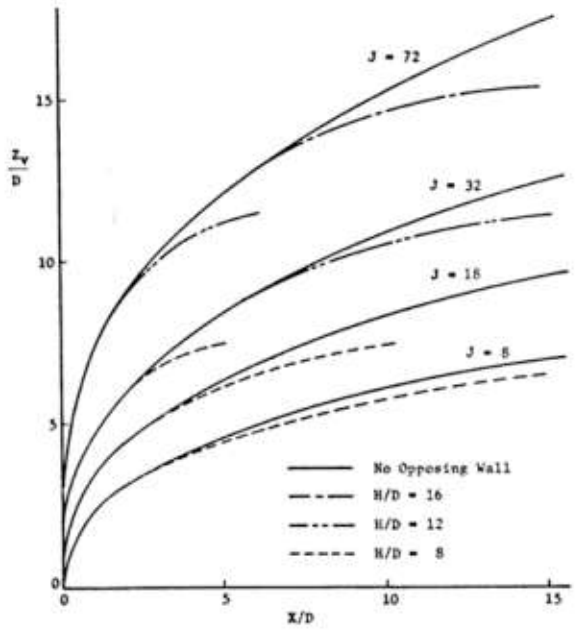


Fig. I.6: Evolution spatiale du centre du jet défini par les vitesses - pour 4 valeurs du facteur J différents et pour 4 rapports H/D, d'après KAMOTANI & GREBER[46].

D'ailleurs, peu d'études se sont intéressées au jet impactant une paroi en présence d'un écoulement traversier. Sans écoulement traversier, au contraire, un nombre conséquent d'études a été mené sur l'impact de jet dans un environnement ouvert et stable dont ROUX [47], notamment pour identifier l'amplification des échanges thermiques ayant lieu à la paroi et assurer par la même un meilleur refroidissement de cette dernière.

l.5.3 Aspects instationnaires

Le JICF est par nature un mécanisme de confrontation aéraulique extrêmement tridimensionnel. De cette complexité se dégage un comportement purement instationnaire au sein duquel 4 types de structures tourbillonnaires peuvent être identifiées :

– tourbillons en fer à cheval (I),

– tourbillons de couche de cisaillement (II),

– paire de tourbillons contra-rotatifs (III),

– tourbillons de sillage (IV).

Ces structures, schématiquement présentées Fig. I .7 (d'après FRIC & ROSHKO [48]), seront par la suite détaillées.

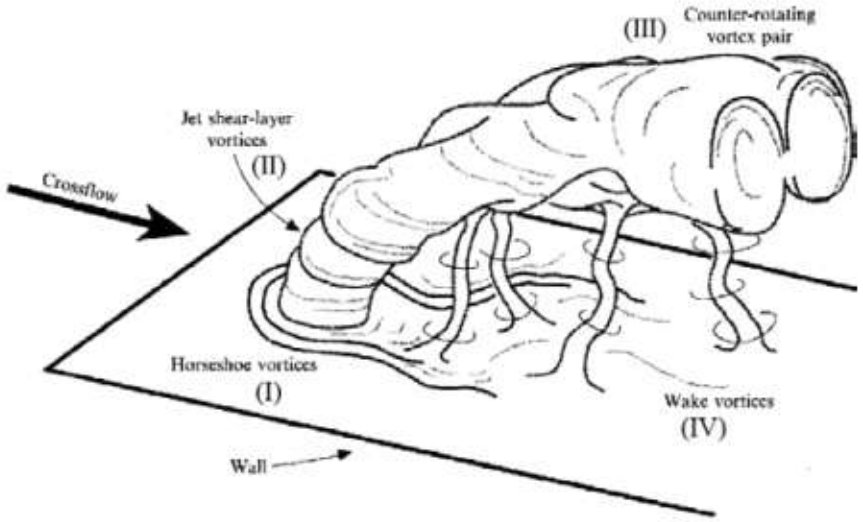


Fig. I.7: Structures tourbillonnaires types d'un JICF. Schéma d'après

FRIC & ROSHKO [48].

l.6.Etat de l'art :

Dans la littérature et pour le foyer , BLANCHARD et al. [11] mettent en évidence des échanges radiatifs entre le foyer et les parois en fonction de la vitesse critique, grâce à une piscine d'heptane représentant, suivant la similitude de Froude .INGASON& LI [50] utilisent le bois pour simuler un incendie de camions en tunnel (basé sur le nombre de Froude). Les avantages de ce combustible est qu'il est peu coûteux et facile à mettre en œuvre, mais la maîtrise d'un tel matériau est compliquée, notamment de part la teneur en humidité du bois qui peut influer sur la combustion. DEBERTEIX [12] met en fonctionnement un brûleur au butane d'une puissance de 1,4 kW dans un tunnel permettant d'observer dynamiquement et thermiquement la présence d'une couche de fumée en amont du foyer, dite « couche de retour » pour en extraire une vitesse critique nécessaire à contrer cet écoulement à la paroi.

La représentation d'un foyer a également été simulée en simplifiant le problème et en s'affranchissant des mécanismes de combustion. Par exemple, VAUQUELIN [13] a traité expérimentalement la problématique des incendies par le biais des différences de masse volumique entre le milieu chaud et léger (panaches issus du feu simulé par un jet d'hélium) et le milieu ambiant froid et lourd (air). RUSCH et al. [14] ont eu recours à un jet d'air chaud afin de s'affranchir du « feu » et de produire des essais en milieu « propre ».

Par une approche expérimentale, NAFFOUTI et al. [15] utilisent une source chaude maintenue à 300 ◦C entre deux parois verticales pour montrer que le confinement du panache tend à détruire les grosses structures tourbillonnaires pour en créer de plus petites. ICHIMIYA & ABE [16] ont fait recours à l'approche numérique pour mettre en avant l'évolution du flux impactant un plafond en fonction du rapport de taille hauteur/largeur de la veine lorsqu'une source chaude est maintenue dans une huile de silicone. LUCCHESI [17], lors de ses travaux de thèse, montre le déversement d'un panache thermique depuis la pièce source vers une pièce

adjacente, en mettant en évidence les épaisseurs de fumée et la longueur d'impact avec une bonne corrélation entre les cas « froid » (fluide à faible densité) et « chaud » (piscine de combustible). Enfin, l'étude expérimentale de NGONDIEP [18] repose sur le développement d'un jet chaud dans une pièce munie d'une ouverture basse et d'une ouverture haute, Il observe que le comportement de l'écoulement interne se développe selon 3 régimes différents, fonction du nombre de Froude modifié (Fr*) : a) pour Fr*<2, des déplacements d'air de bas en haut s'effectuent; b) pour Fr*=2, les entrées et sorties d'air interviennent par la partie basse de la pièce et c) enfin pour Fr*>2, un blocage des entrées-sorties et une recirculation interne du jet chaud sont identifiés.

D'autre part ,pour la ventilation, RECKER et al. [49] se servent d'un jet d'air à température ambiante dans un écoulement traversier de même température afin de rechercher la ligne centrale du jet et d'étudier le développement des tourbillons contrarotatifs 3D afin de valider un code de calcul, servant à l'optimisation de «Micromix » (combustion par hydrogène). BLAISE [50] a mis au point une approche expérimentale basée sur une source chaude de forme et de gradients de température divers, soumise à un écoulement vertical. Un changement d'axe ou d'inclinaison du panache en fonction de la source et du débit d'air vertical est observé, ces travaux permettant d'identifier notamment les vitesses et les températures maximales ainsi que le point source virtuel du foyer.

en ajoutant L'effet de thermosiphon, Par exemple, ZINOUBI et al. [51] ont développé une approche expérimentale basée sur une source chauffée à 300 ◦C entourée par un cylindre. Ils étudient alors les profils de vitesse et de température à la sortie du cylindre en fonction de la hauteur de celui-ci et de la distance le séparant de la source chaude. Les résultats montrent une grande sensibilité aux deux paramètres précédents et sont applicables à la dissipation des polluants à la sortie des cheminées industrielles.

CHOW [52], quant à lui, utilise une piscine de combustible dans une pièce source se déversant dans un canal en verre. L'approche expérimentale utilisée permet de rechercher l'écartement optimal entre une paroi de la pièce et la paroi externe d'un immeuble (« double peau » des immeubles modernes) afin d'avoir un gain d'espace et des températures minimales sur les faces en verre. L'application concerne la sécurité incendie en bâtiment tertiaire ou en immeuble collectif. Les travaux numériques de CHEN et al. [53] ont étudié numériquement les phénomènes des thermosiphons qui sont souvent associée à la sécurité incendie dans les bâtiments, ont présentent en effet une source chaude, un milieu semi-confiné et la présence de conduits d'évacuation verticaux. Cette étude montre la sensibilité de l'évacuation des fumées à la position du foyer dans le volume semi-confiné, à la distance foyer/conduits d'évacuation, à la taille de ces évacuations ou encore à l'effet de « tirage thermique » entre les conduits : lorsque la fumée est évacuée naturellement par l'un des deux conduits, il y a alors un tirage forçant l'air frais à pénétrer dans le second conduit.

En sécurité ferroviaire, l'événement redouté est l'incendie sur un train immobilisé en tunnel. La problématique est complexe car la géométrie confinée (station) offre de nombreuses ouvertures et sorties possibles aux fumées. De plus, les protocoles de désenfumage doivent

être parfaitement anticipés afin d'assurer une ventilation optimale de l'ensemble de l'infrastructure et de permettre l'évacuation en toute sécurité de l'ensemble des personnes. ce travail comporte sur l''étude numérique de l'effet des déflecteurs et leurs orientation, sur la longueur d'établissement du régime turbulent et la diffusion thermique, avec comme objectif l'amélioration des connaissances fondamentales des mouvements de fumées issues d'un feu se déclarant au sein d'une station de métropolitain. Ainsi, ce travail consiste à modéliser de tels mouvements à partir d'une maquette issue de la littérature, à échelle réduite, tout en reproduisant les organes principaux (station, tunnels, accès, foyer, ...) , à définir des critères permettant de préserver les itinéraires d'évacuation (accès passagers), escaliers reliant les quais (souterrain) à l'extérieur, de la propagation des fumées.

l.7.Conclusion :

Une première étape consiste à poser la problématique des incendies en milieu semi-confiné et ventilé en se focalisant notamment sur l'aspect de la propagation des fumées. Ceci conduit plus particulièrement à s'intéresser aux écoulements mixtes au sein desquels à la fois les forces gravitationnelles et convectives interviennent. L'aspect de modélisation à échelle réduite de ces mécanismes sera également souligné. Dans un second temps une présentation plus spécifique, centrée sur la confrontation d'un écoulement chaud vertical et d'un écoulement froid traversier sera effectuée.

CHAPITRE :ll

Les modélisations Mathématiques

II. Introduction

Dans ce chapitre on s'intéresse à la modélisation mathématique de transfert deChaleur et d'écoulement turbulent des fluidesmiscible incompressible en régime variable, ou lesModèles de fermeture sont abordés.

Tout d'abord, les lois fondamentales du transfert de la chaleur seront présentées, Aboutissent à l'équation de la chaleur régissant le comportement d'un système thermique.
Ensuite nous avons fait une présentation sur les équations de Navier-Stokes qui régissent leMouvement turbulence d'un fluide incompressible visqueux.
La mécanique des fluides est gouvernée par trois équations fondamentales. Celles-ciSont l'équation de continuité, l'équation de la quantité de mouvement et l'équation deL'énergie.

II.1 Modélisation de la turbulence

Utilisation courante a été rendue possible par les progrès réalisés dans le domaine de la résolution des équations de la mécanique des fluides et surtout par l'évolution des moyens de calcul. Aujourd'hui la modélisation est un véritable complément aux études expérimentales La modélisation des écoulements turbulents est un considérable outil pour la compréhension des mécanismes physiques pour la conception et le développement dans l'industrie. Son permettant de limiter le nombre d'essais en soufflerie, entraînant une réduction des coûts et des délais de conception, et constitue ainsi un enjeu économique majeur.
Actuellement les applications concernant les géométries complexes réelles dans le domaine de la prévision atmosphérique et la qualité de l'air dans la couche limite urbaine, mettent en jeu des phénomènes complexes : transition laminaire, turbulence, décollements, etc.

II.2 Equations mathématiques.

II.2. 1 Equation de continuité

Quel que soit le domaine de fluide que l'on suit dans son mouvement, le fluide reste continu. Il ne peut y avoir ni apport extérieur, ni prélèvement de matière.
L'équation de continuité exprime la variation de la masse de fluide par rapport au temps dans un volume élémentaire donné.

En mécanique des fluides, le principe de conservation de la masse peut être décrit par l'équation de continuité sous plusieurs formes différentes :

Locale conservative (dérivée en temps normale), locale non conservative (la dérivée en temps suit la particule dans son mouvement), ou intégrale. Suivant les problèmes posés, c'est l'une ou l'autre de ces équations qui pourra être retenue, toutes étant équivalentes.
On note ici :

$\rho = \rho(\vec{x}, t)$ (II.1)

- ρ : la masse volumique du fluide au point repéré par le vecteur $\vec{x}$ à l'instant t
  $\vec{U} = \vec{U}(\vec{x}, t)$ (II.2)
- $\vec{U}$: la vitesse d'une particule de fluide se trouvant au point repéré par le vecteur $\vec{x}$ à l'instant
- Forme locale
- Cette écriture est la plus générale et la plus répandue.

$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{U}) = 0$ (II.3)

- En faisant intervenir la notion de dérivée particulaire, on a l'écriture équivalent suivante : $\frac{D\rho}{Dt}+\rho div\,(\vec{U})=0$ (II.4)
- Forme intégrale
- Cette formulation permet l'étude d'un "bloc" de fluide$\Omega(t)$ pouvant éventuellement se déformer au cours du temps.
- Elle traduit le fait que la masse du fluide enfermé dans le volume $\Omega(t)$ est constant
  $\frac{d}{dt}\int_{\Omega(t)} \rho(\vec{x}, t)\, d\Omega(t) =0$ (II.5)
- Écoulement incompressible
- Dans le cas où la masse volumique est constante au cours du temps et uniforme dans l'espace (écoulement incompressible), l'équation de conservation se réduit à
  $div\,(\vec{U})=0$ (II.6)

- La forme locale de la conservation de la masse s'applique seulement sur un point M du volume V de fluide, ce qui explique l'utilisation de l'outil différentielle. On parle de forme intégrale faible.
- On rappelle la forme intégrale forte:
  $\int \frac{d\rho}{dt} \cdot dv + \int \rho \cdot \vec{v} \cdot \vec{n} \cdot dS = 0$ (II.8)
- Cette écriture est constituée d'une intégrale sur un volume et d'une intégrale sur une surface. Cela peut ne pas être pratique. Or, il existe un théorème permettant de transformer une intégrale double en intégrale triple et vice versa: le théorème de Green-Ostrogorski ou le théorème de flux-divergence:

$\int \rho \cdot \vec{v} \cdot \vec{n} \cdot dS = \int div(\rho\vec{v}) \cdot d$ (II.9)

La forme intégrale forte peut donc s'écrire simplement sous une intégrale triple:

$\int (\frac{d\rho}{dt} + div(\rho\vec{v}))dv = 0$ (II.10)

- On retrouve dans cette dernière expression le principe fondamental de la mécanique: la conservation de la vitesse pour tout volume V' sur V.
- On rappelle que si $Ax + By + Cx^2 = 0$ est vrai pour tout (x, y), alors $A = B = C = 0$.
- En appliquant cette règle à la forme intégrale forte, on obtient la forme intégrale faible ou forme locale:
  $\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla \cdot j = 0$ (II.11)

II.2.2 Equation de diffusion

Équation de diffusion est une équation différentielle partielle. En physique, il décrit un comportement du mouvement collectif des micro-particules dans un matériau, résultant du mouvement aléatoire de chaque micro particules. En mathématiques, il est applicable en commun à un sujet pertinent pour le processus de Markov dans divers domaines de la science, comme la science des matériaux, la science de l'information, sciences de la vie, des sciences sociales, et ainsi de suite. Ces sujets décrits par l'équation de diffusion sont généralement appelés problèmes Brown

DéclarationL'équation est généralement écrite comme:

$\frac{\partial\phi(r,t)}{\partial t} = \nabla \cdot [D(\phi, r)\nabla\phi(r,t)]$ (II.12)

Ù φ (r, t) est la densité du matériau diffusant à l'emplacement r et le temps t et D (φ, r) est le coefficient de diffusion collective pour φ densité à l'emplacement r; et ∇ représente l'opérateur différentiel de vecteur del. Si le coefficient de diffusion dépend de la densité de l'équation non linéaire est, sinon elle est linéaire.

Plus généralement, lorsque D est une matrice symétrique définie positive, l'équation décrit la diffusion anisotrope, qui est écrite (pour les trois dimensions de diffusion) comme sui $\frac{\partial\phi(r,t)}{\partial t} = \sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3}\frac{\partial}{\partial x_i}[D_{ij}(\phi, r)\frac{\partial\phi(r,t)}{\partial x_i}]$ (II.13)

Si D est constante, l'équation se réduit à l'équation différentielle linéaire suivante

$\frac{\partial\phi(r,t)}{\partial t} = D\nabla^2\phi(r,t)$ (II .14)

Si D est constante, l'équation se réduit à l'équation différentielle linéaire suivante:

$\frac{\partial\phi(r,t)}{\partial t} = D\nabla^2\phi(r,t)$ (II.15)

Également appelé l'équation de la chaleur.

II.2.2.1.Histoire et développement

Dérivation

L'équation de diffusion peut être banalement dérivée de l'équation de continuité, ce qui indique qu'un changement de densité dans une partie quelconque du système est due à entrées et sorties de la matière dans et hors de cette partie du système. En effet, aucun matériau est créé ou détruit:

L'équation de diffusion de particules a été obtenue par suivront :

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} + \nabla \cdot j = 0 \quad \text{(II. 16)}$$

Où je suis le flux du matériau diffusant. L'équation de diffusion peut être facilement obtenue à partir de ce lorsqu'il est combiné avec la première loi de la phénoménologique Fick, qui stipule que le flux du matériau diffusant dans une partie quelconque du système est proportionnelle au gradient de densité locale:

$j = -D(\phi, r)\nabla\phi(r,t)$ (II.17)

Si la dérive doit être prise en compte, l'équation de Smoluchowski fournit une généralisation appropriée

II.2.3 Equation de conservation de quantité de mouvement

La conservation de la quantité de mouvement désigne, dans un référentiel inertiel, l'absence de variation de la quantité de mouvement du centre d'inertie d'un système dans certaines situations physiques : on parle alors d'un système isolé. Exemple : dans un référentiel inertiel, et en l'absence de frottement, un système de corps soumis à aucune force extérieure mais entrant en collision les uns avec les autres.

Mathématiquement, la quantité de mouvement est conservée lorsque sa variation instantanée est nulle :

Ce principe est équivalent au principe d'inertie, mais fait intervenir la masse des corps (par définition), ce qui permet d'introduire la notion de force (par définition) dans le cas où le mouvement n'est pas rectiligne uniforme

La formule **:**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{u}_i) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\tau}_{ij} - \overline{\rho u_1'' u_1''}) + (\bar{\rho}_\infty - \bar{\rho})g\delta_{ij} \quad \text{(II.18)}$$

II.2.4 Équation de bilan de l'énergie

$$\frac{\partial(\rho\overrightarrow{e})}{\partial t} + \vec{\nabla}\cdot[(\rho e + p)\vec{v}] = \vec{\nabla}\cdot(\bar{\bar{\tau}}\cdot\vec{v}) + \rho\vec{f}\cdot\vec{v} - \vec{\nabla}\cdot(\vec{q}) + r \quad \text{(II.19)}$$

Dans ces équations :

- t: représente le temps (unité SI : s) ;
- ρ : désigne la masse volumique du fluide (unité SI : $kg\cdot m^{-3}$) ;
- $\vec{v} = (v_1, v_2, v_3)$désigne la vitesse eulérienne d'une particule fluide (unité SI : $m\cdot s^{-1}$) ;
- p: désigne la pression (unité SI : Pa) ;
- $\bar{\bar{\tau}} = (\tau_{ij})_{ij}$est le tenseur des contraintes visqueuses (unité SI : Pa) ;
- $\vec{f}$: désigne la résultante des forces massiques s'exerçant dans le fluide (unité SI : $N\cdot kg^{1}$) ;
- e : est l'énergie totale par unité de masse (unité SI : $J\cdot kg^{-1}$) ;
- $\vec{q}$: est le flux de chaleur perdu par conduction thermique (unité SI : $J\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$) ;

Représente la perte de chaleur volumique due au rayonnement (unité SI : $J\cdot m^{-3}\cdot s^{-1}$)

II.2.5 Equation de conservation de l'énergie

Un système n'échange avec l'extérieur ni énergie par l'intermédiaire de forces, Il est dit isolé . Notamment, le système isolé n'échange pas de photons avec un autre système, ni n'en reçoit d'autre système

La formule :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{T} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{T}) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\frac{\lambda}{c_p}\frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} - \overline{\rho u_j''}) \quad \text{(II.20)}$$

II.2.6 Equation de conservation des espèces

Exprime dans cette formule

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{C}^m) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{C}^m) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}D^m\frac{\partial \tilde{C}^m}{\partial x_j} - \overline{\rho U_j'' C:} \quad \text{(II.21)}$$

La fermeture du système d'équations nécessite de définir les deux équations de énergie cinétique turbulente et du taux de dissipation de cette énergie turbulente

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k})\frac{\partial k}{\partial x_j}] + G_k + G_b - \rho\epsilon - Y_M + S_k \quad \text{(II.22)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k})\frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k+\sqrt{\vartheta\epsilon}} + C_{1\epsilon}\frac{\epsilon}{k}C_{3\epsilon}G_b + S_\epsilon \quad \text{(II.23)}$$

II.2.7 L'équation de Navier-Stocks :

En mécanique des fluides, les équations de Navier-Stokes sont des équations aux Dérivées partielles non linéaires qui décrivent le mouvement des fluides dans l'approximation des milieux continus. Elles gouvernent par exemple les mouvements de l'air de l'atmosphère, les courants océaniques, l'écoulement de l'eau dans un tuyau, le mouvement d'air dans les locaux et de nombreux autres phénomènes d'écoulement de fluides. Elles sont nommées d'après deux physiciens du XIXe siècle, Claude Navier et stokes Il existe bien des formes des équations de Navier-Stokes. Nous n'en présenterons que certaines Ces formes dépendent aussi des notations utilisées.

Cette équation est la conséquence directe du théorème de quantité de mouvement

$$\overbrace{\underbrace{\frac{\partial U_i}{\partial t}}_{(3)} + U_j \underbrace{\frac{\partial U_i}{\partial x_j}}_{(4)}}^{(1)} = \overbrace{-\underbrace{\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i}}_{(5)} + \nu \underbrace{\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j}}_{(6)}}^{(2)} \qquad \text{(II.24)}$$

(1): terme force d'inertie.
(2): terme force appliqué.
(3): terme in stationnaire.
(4): terme convectif.
(5): terme pression.
(6): terme visqueux.

II.3.Conclusion

Parmi les méthodes utilise dans le domaine de dispersion des polluants, on retrouve les méthodes statiques ou probabiliste qui consistent à décompose les champs de vitesse et de concentration a une composante moyenne et une fluctuation de turbulent de moyenne nulle.

Nous avons présenté dans ce chapitre les prédictions numériques pour le but de résoudre l'ensemble des équations aux dérivées partielles applicables à l'écoulement de tout fluide, y compris à l'écoulement du vent dans l'atmosphère. Ces équations reposent sur les lois fondamentales de la conservation de la masse, de quantité de mouvement (équations de Navier-Stokes) dans le domaine de calcul.

CHAPITRE IV :

Résultats et discussion

Chapitre Ⅳ :

IV.1.Identification :

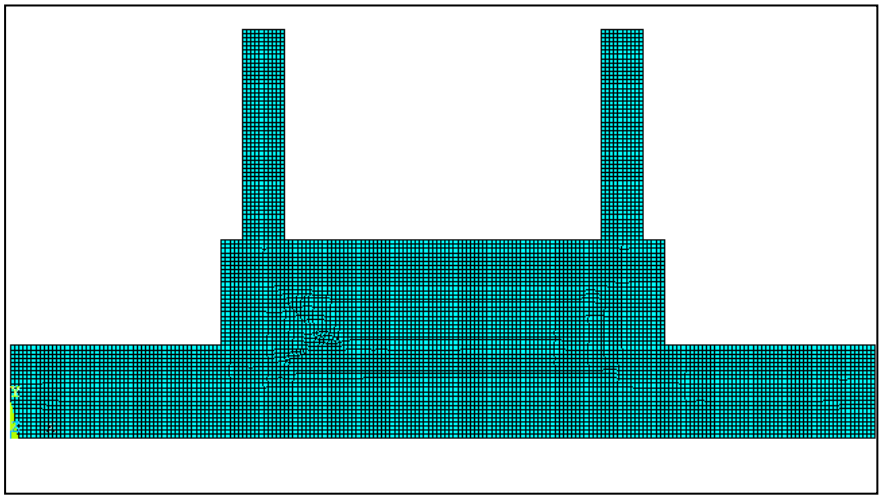


Figure Ⅳ.1 : représentation de maillage du tunnel.

maillage	NXxNY	ΔXxΔY
M0	512x64	4x3.90
M1	1024x128	2x1.95
M2	1024x128	2x1.95

Tableau Ⅳ.1: Maillages testés pour le calcul numérique dans le cas de référence.

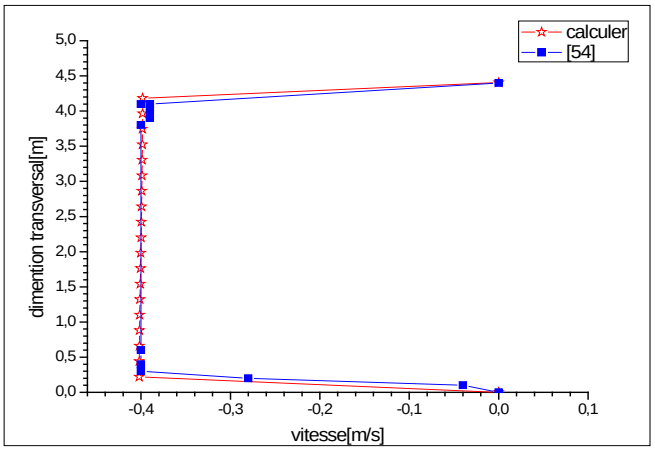




Figure Ⅳ 2: Profil de vitesse transversale dans le tunnel amont.

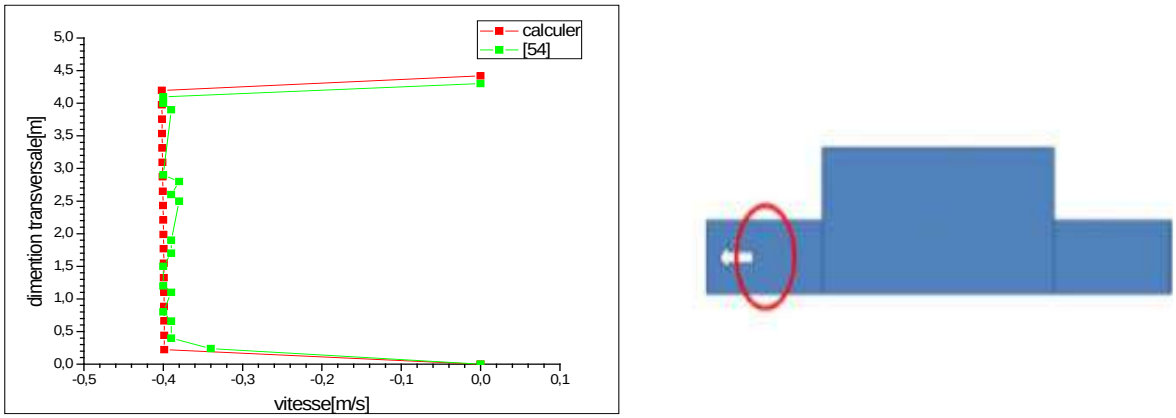


Figure Ⅳ 3: Profil de vitesse transversale dans le tunnel aval

Les figures **Ⅳ.2** et **Ⅳ.3** montre les profils de vitesse transversales obtenus dans les 2 plans du tunnel amont (sortie du convergent)et aval. Il convient de rappeler ici que travaillant en extraction, l'écoulement a un mouvement de l'extérieur vers l'intérieur de la veine et par conséquent vers le ventilateur. Il sera convenu ici et pour le reste de mémoire que lors de ce mode de fonctionnement, les vitesses seront exprimées négativement, allant dans le sens opposé à l'axe X.

Les vitesses présentées sur les figure **Ⅳ.2** et **Ⅳ.3,** sont très stables en dehors des couches limites (qui sont de l'ordre de 15 mm). En effet, dans la partie centrale ($0{,}6 \leq Z* \leq 3{,}8$), les variations de vitesse moyenne U sont inférieures à 3 %. Ce comportement d'écoulement est typique d'un écoulement à la sortie d'un convergent où les couches limites sont écrasées, présentant ainsi un plateau de vitesse sur la majore partie de la hauteur de la veine. Le bon fonctionnement de la section convergente assure alors une réduction de l'influence des conditions amont à l'écoulement, sur son comportement dans la veine. Par contre, avec des vitesses d'air très faibles de l'ordre de 0,4 m/s, l'écoulement reste fortement sensible aux oscillations extérieures (ouverture de porte, déplacement rapide devant la veine, ...) et des précautions sont donc à prendre lors des essais.

Finalement, Les résultats du calcul comparé aux résultats expérimentales de bastien giachetti [54]sont presque identiques avec, ce qui justifie l'utilisation de notre modèle.

Expérience 1 : configuration sans accès :

Dans la première expérience on considère un tunnel sans accès avec la vitesse de jet 2.92m/s et sa température T=137.5 (°c)

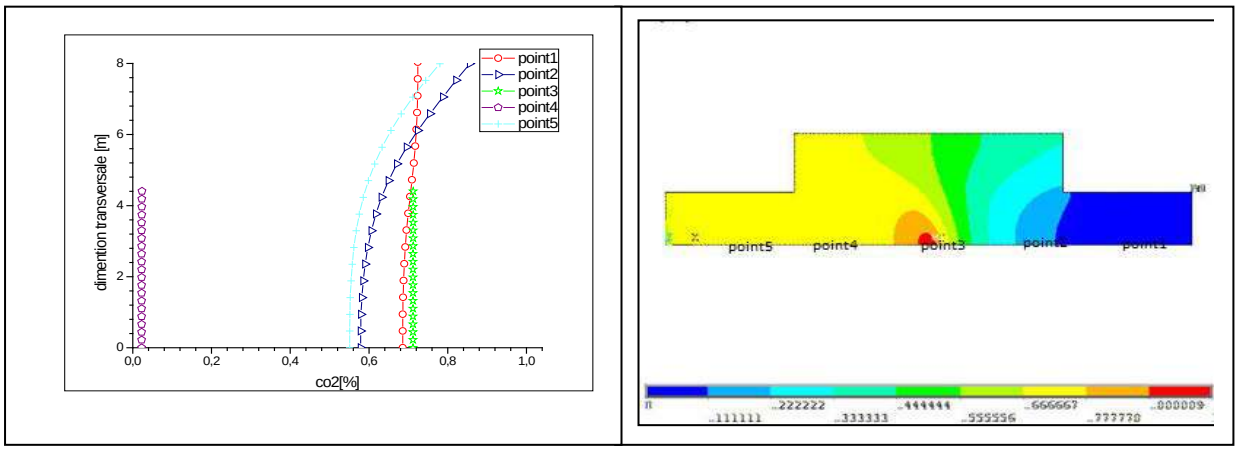


Figure Ⅳ.4 : profil de co_2 par à port la dimension transversale du tunnel et de dispersion de co_2.

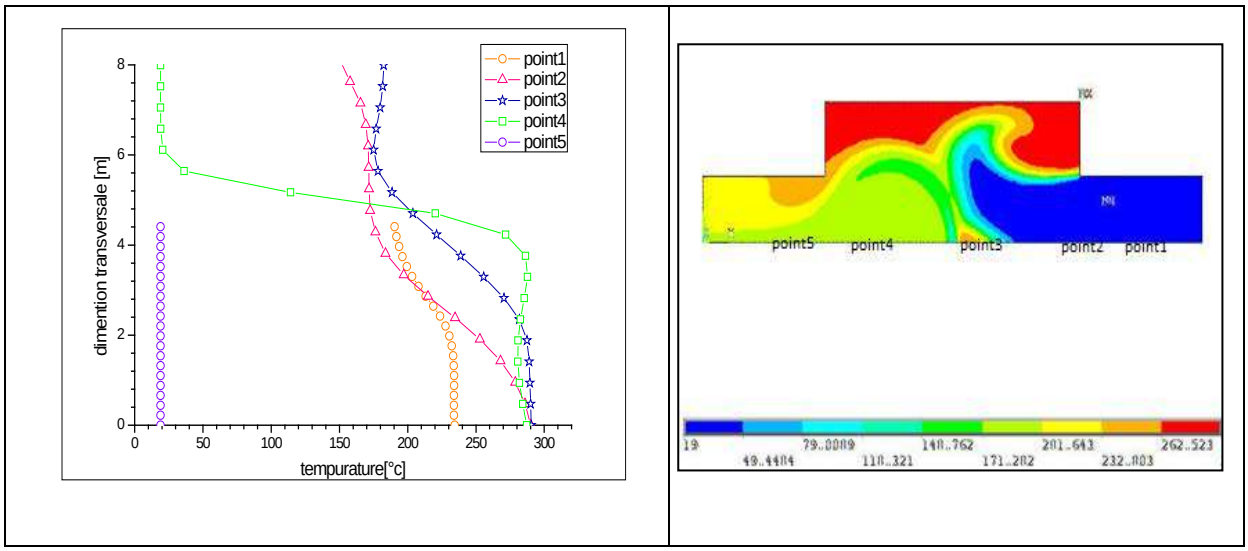


Figure Ⅳ.5 : profil température par à port la dimension transversale du tunnel et le champ de température.

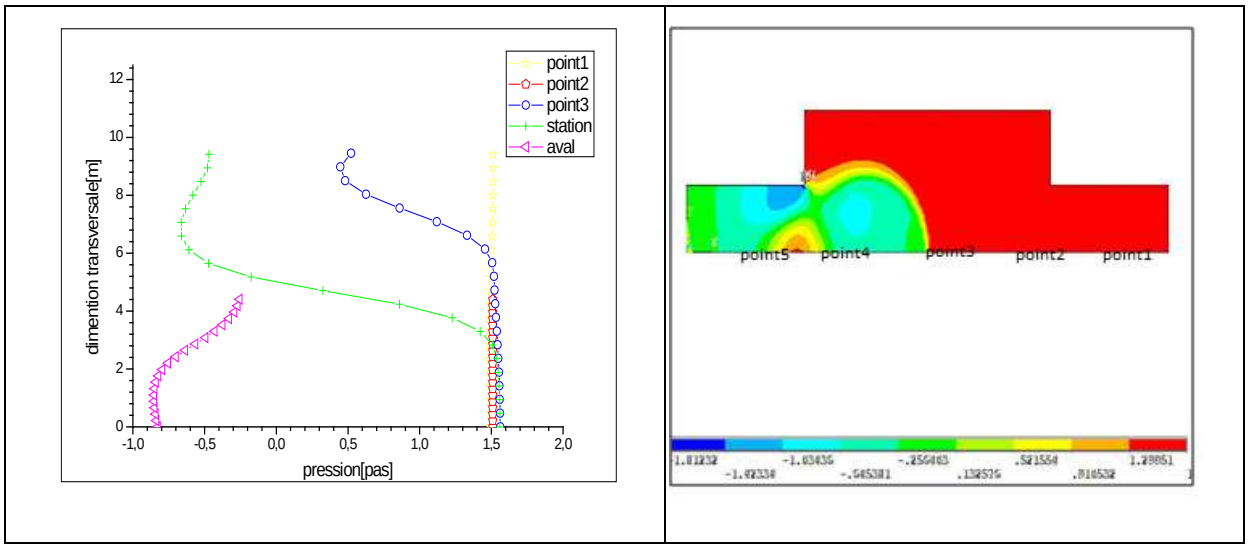


Figure Ⅳ.6 : profil de pression par à port dimension transversale et de champ de pression.

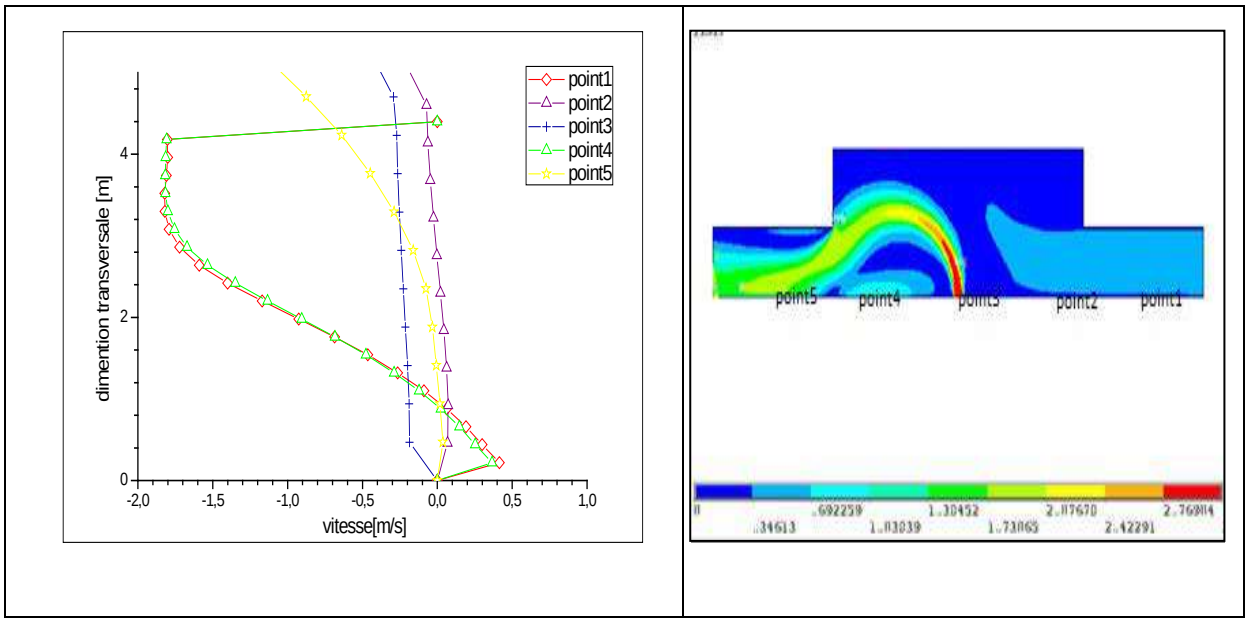
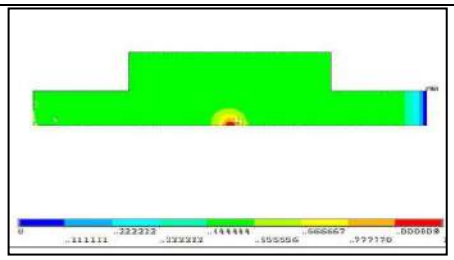
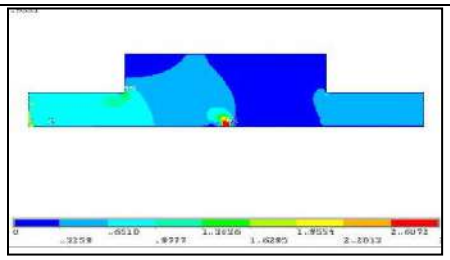
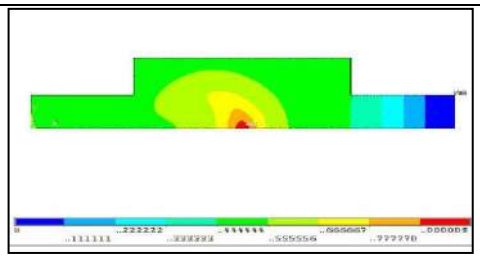
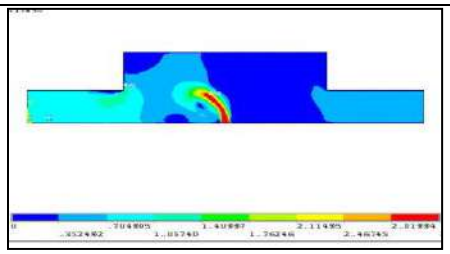
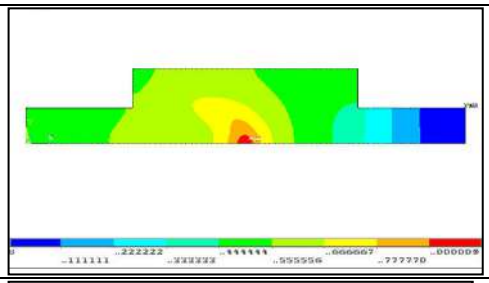
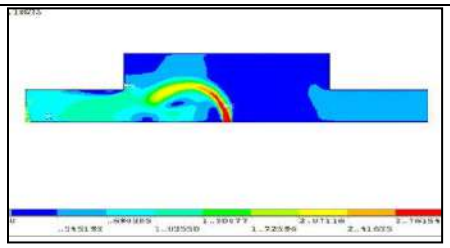
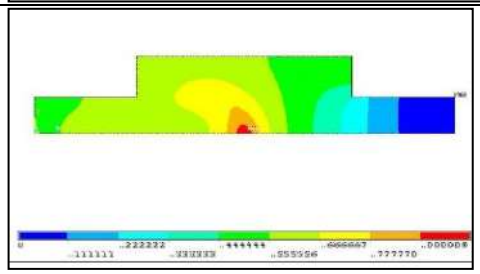
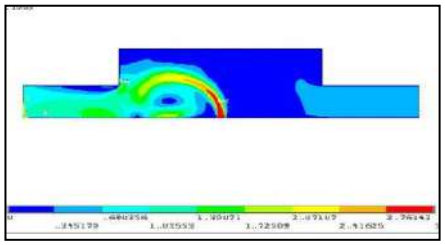
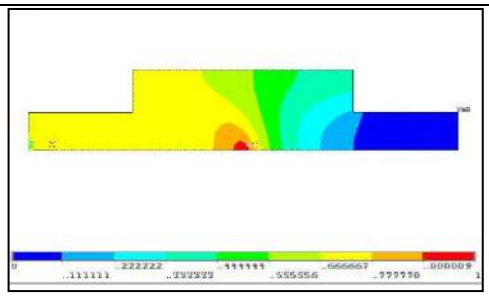
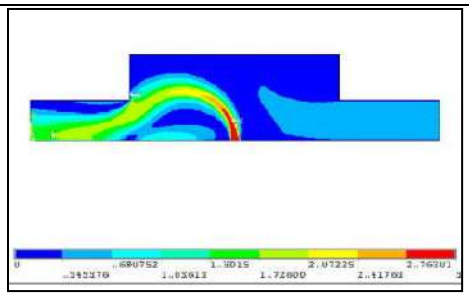


Figure Ⅳ.7: profil de vitesse par à port dimension transversale et de champs de vitesse.

Tableau Ⅳ.2: Représentation spatiale de la dispersion de co2 et la vitesse dans le temps

temps	Co2	Vitesse

T=0.01		
T=0.05		
0.1		
T=0.15		
T=0.6		

Experience 2 :configuration avec un accé :

On considere un tunnel avec un seul acces et une vitesse de jet v=2.92m/s et temperature T=137.5(°c) .

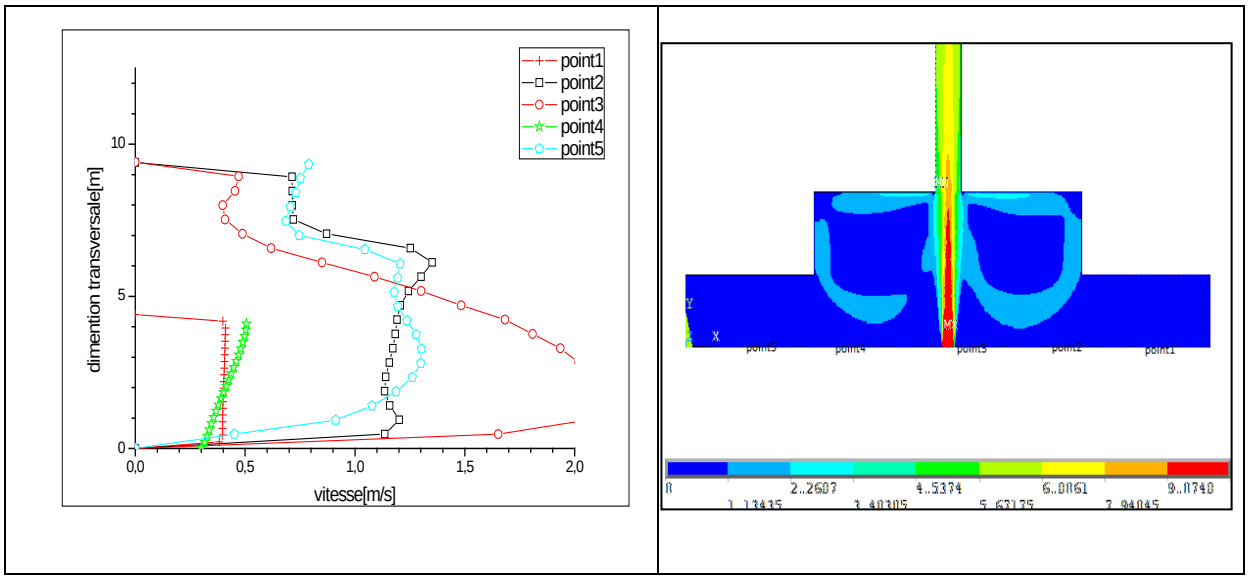


Figure Ⅳ.8 : profil de vitesse par à port la dimension transversale du tunnel et de champ de vitesse.

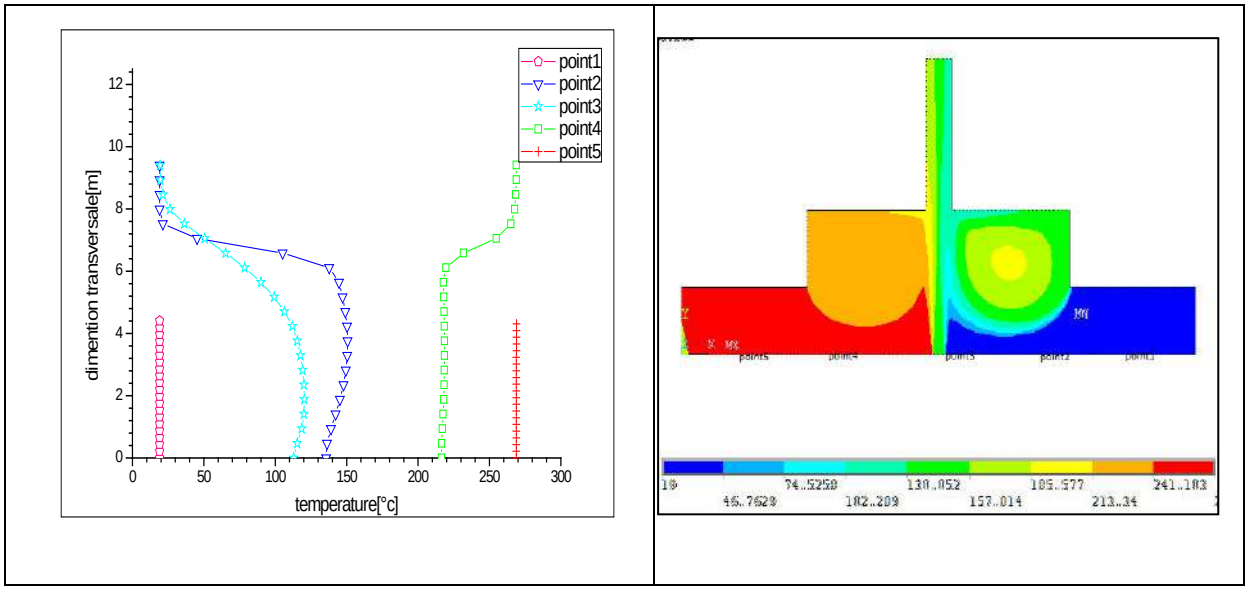
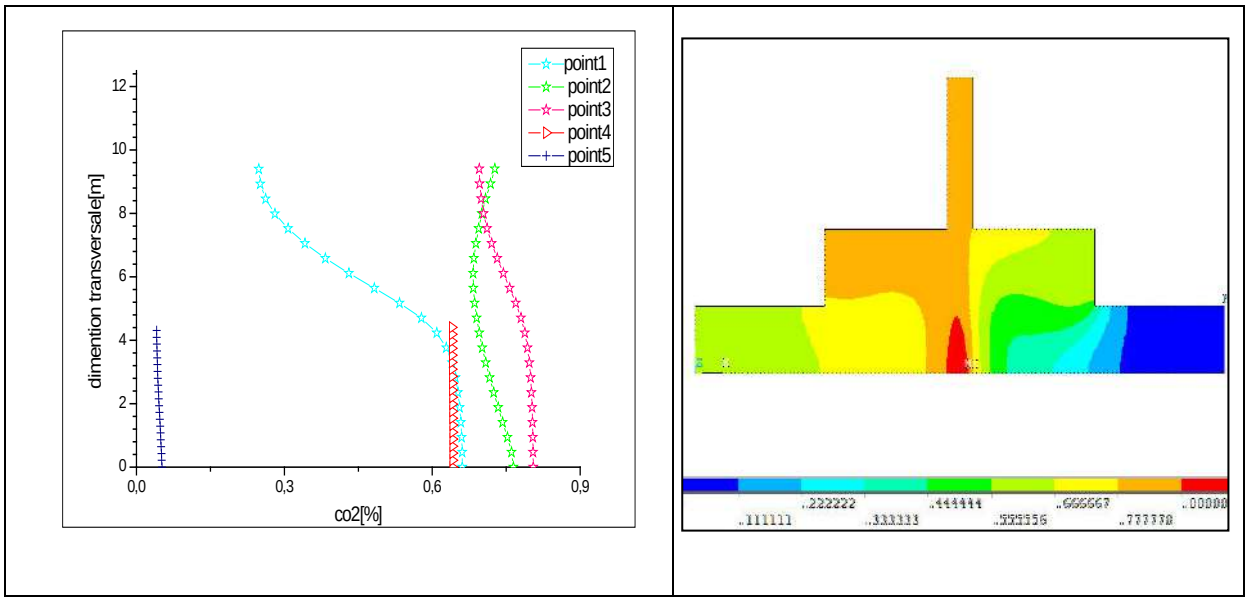
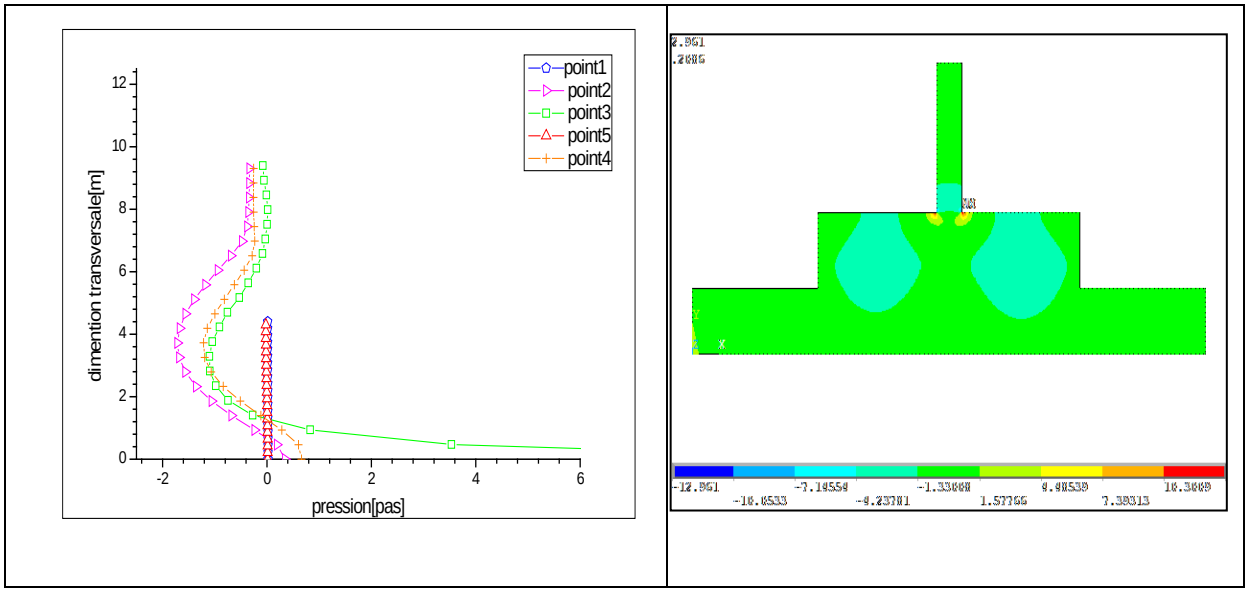


Figure Ⅳ.9 : profil de température par à port la dimension transversale du tunnel et de champ de températeure

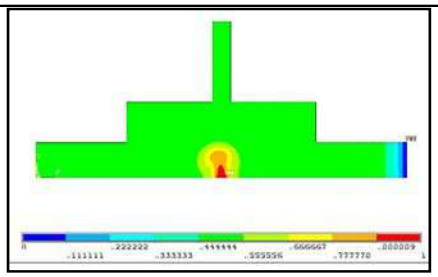
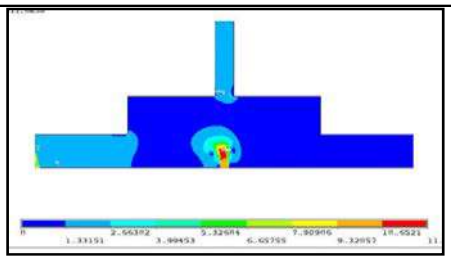
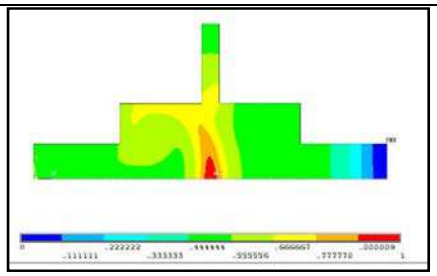
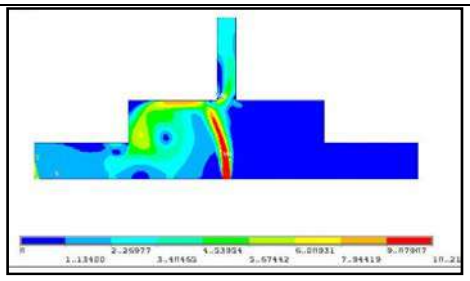
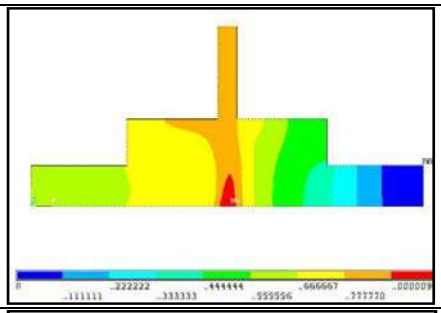
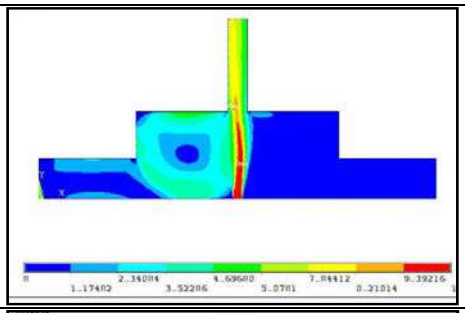
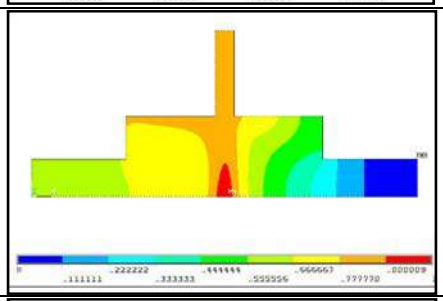
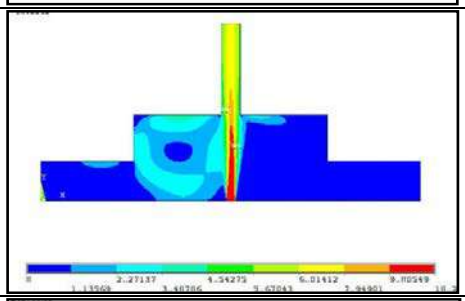
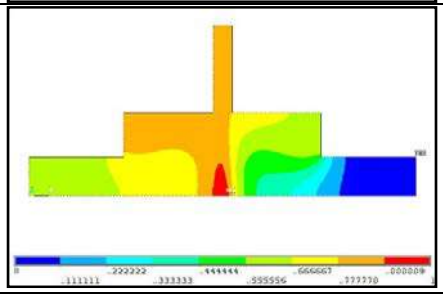
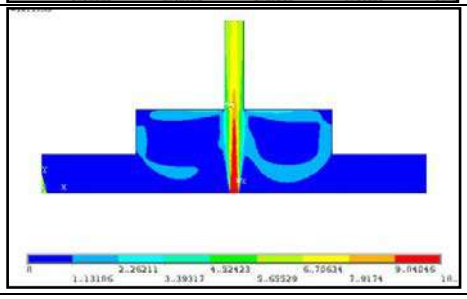


FigureⅣ.10: profil de co_2 par à port la dimension transversale du tunnel et dispersion de co_2.



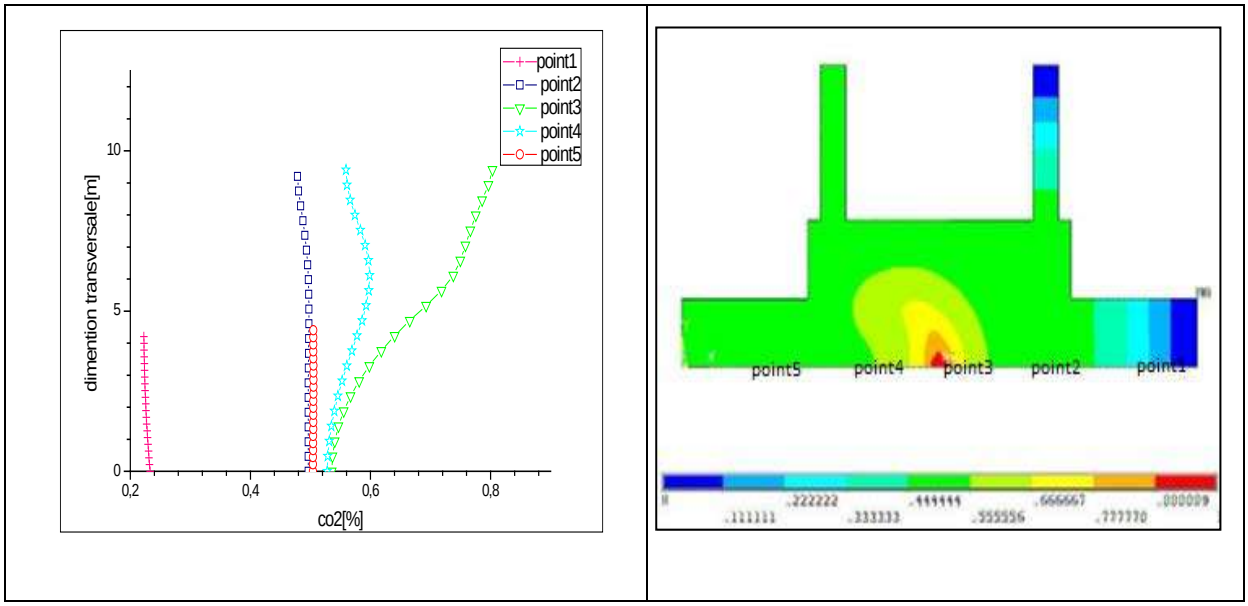
FigureⅣ.11 : profil de pression par à port la dimension transversale du tunnel et champ de pression

Tableau Ⅳ.3: Représentation spatiale de la dispersion de co_2. et la vitesse dans le temps

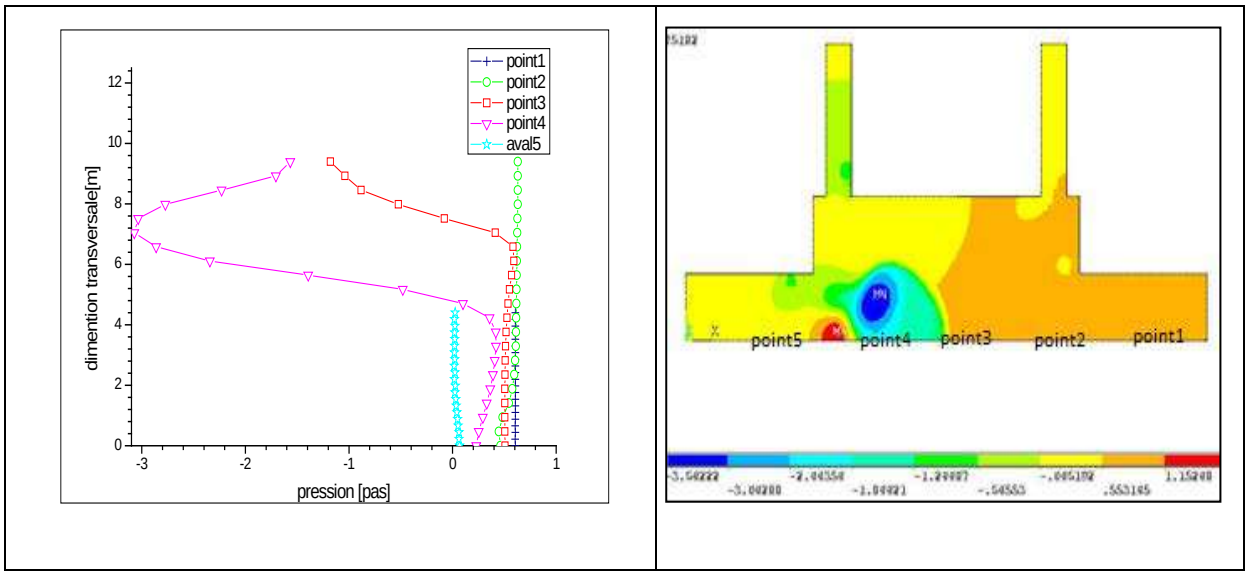
temps	Co2	vitesse
Temp=0.01		
Temp=0.05		
Temp=0.15		
Temp=0.2		
Temp=0.8		

Expériences 3 : Configuration avec deux accès

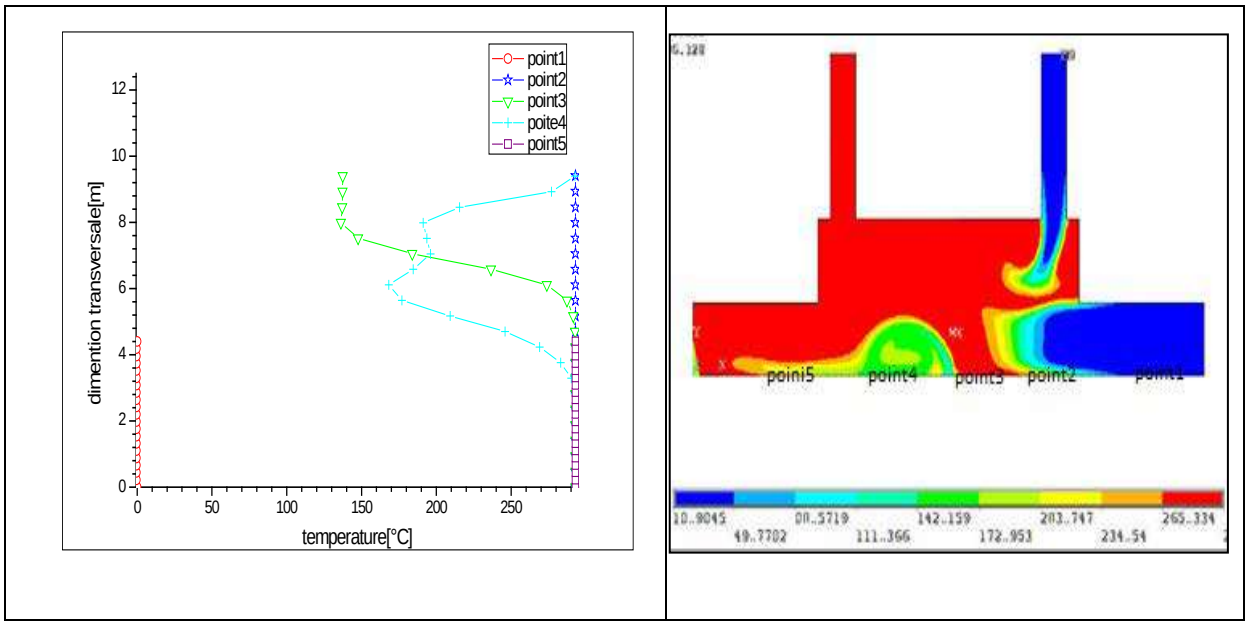
On considère un tunnel avec deux accès la première alimente le tunnel par l'air et le deuxième est utilisé pour le vidange avec vitesse v=0.4m/s et T=137.5(°c)



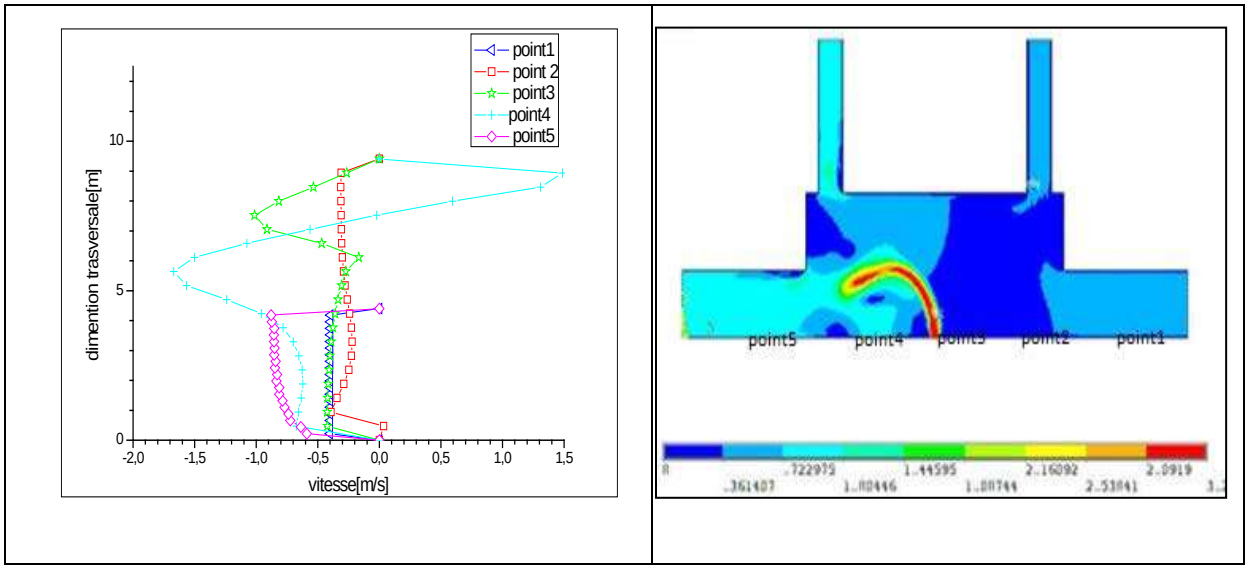
figureⅣ.12 : profil de co_2 par à port la dimension transversal du tunnel et de dispersion de co_2.



Figure**Ⅳ.13** : profil la pression par à port la dimension transversale du tunnel et de champ de pression.

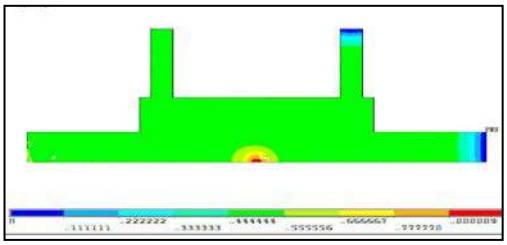
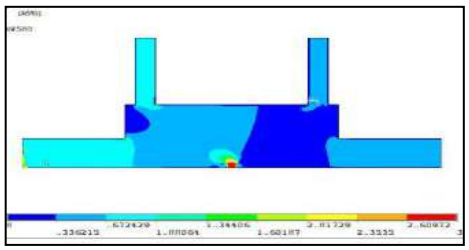
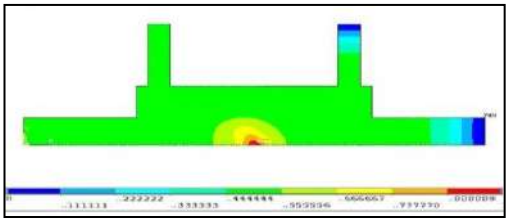
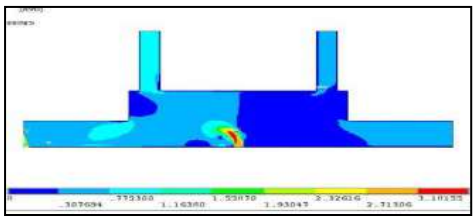
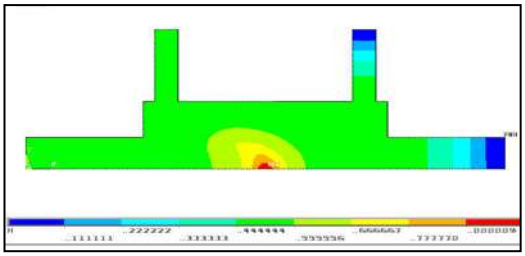
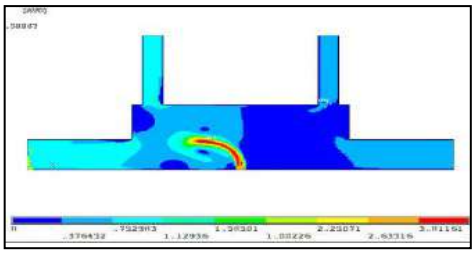
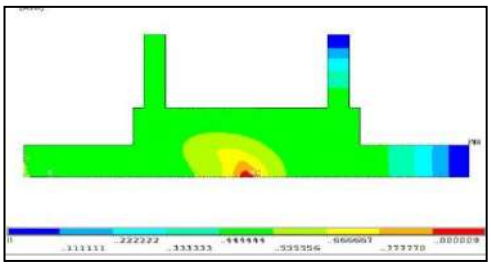
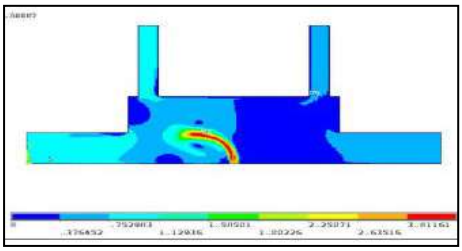
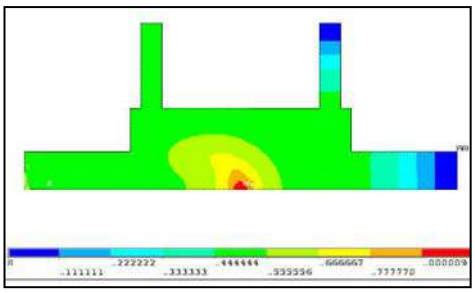
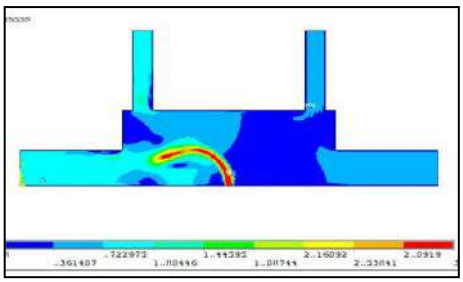


Figure**Ⅳ.14** : profil de la température par à port la dimension transversal du tunnel et de champ de température.



Figure**Ⅳ.15** : profil de la vitesse par à port la dimension transversal du tunnel et de champ de vitesse.

Tableau Ⅳ.4: Représentation spatiale de la dispersion de co_2 et la vitesse dans le temps

temps	co_2	Vitesse
T=0.1		
T=0.3		
T=0.6		
T=0.7		
T=0.8		

Expériences 4 : deux accès identique utilisé comme issue des gaz

On considère un tunnel avec deux accès avec la vitesse de jet v=2.92 et température T=137.5 (°c).

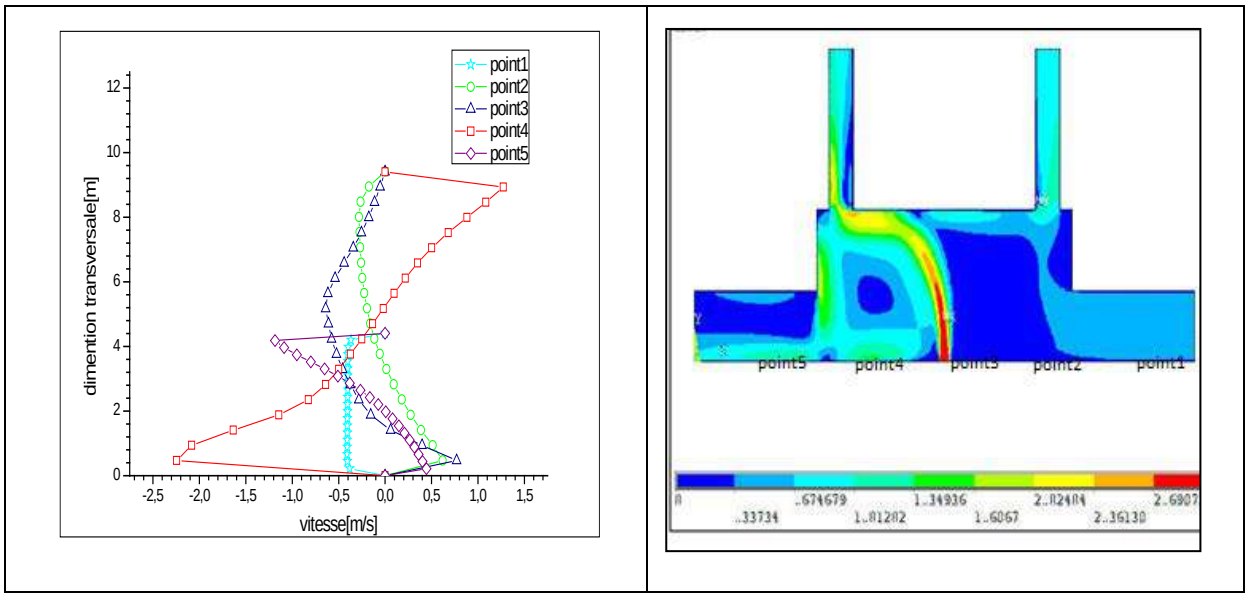


Figure Ⅳ.16 : profil de vitesse par à port la dimension transversale du tunnel et de champ de vitesse.

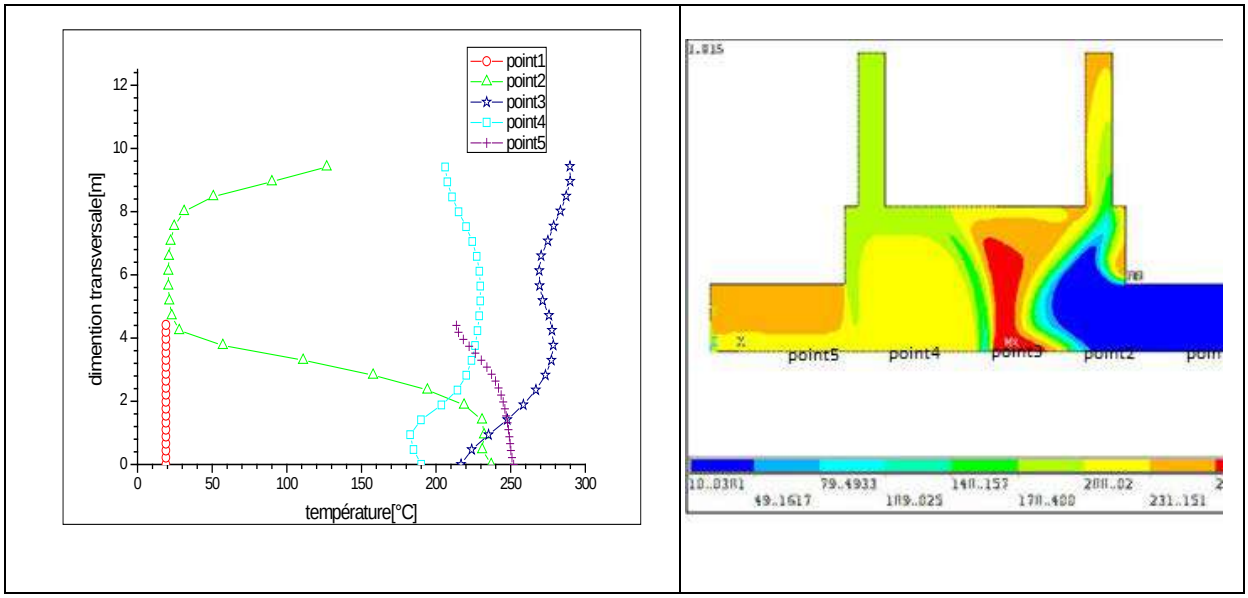


Figure Ⅳ.17 : profil de température par à port la dimension transversale du tunnel et de champ de température.

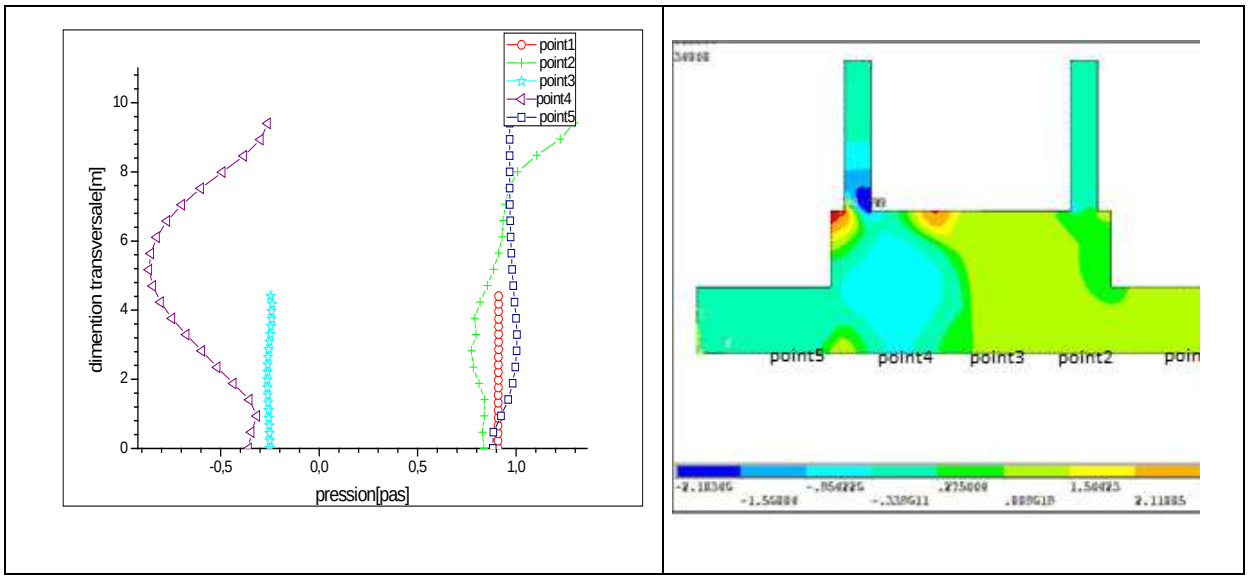


Figure Ⅳ.17 : profil de pression par à port la dimension transversale du tunnel et de champ de pression.

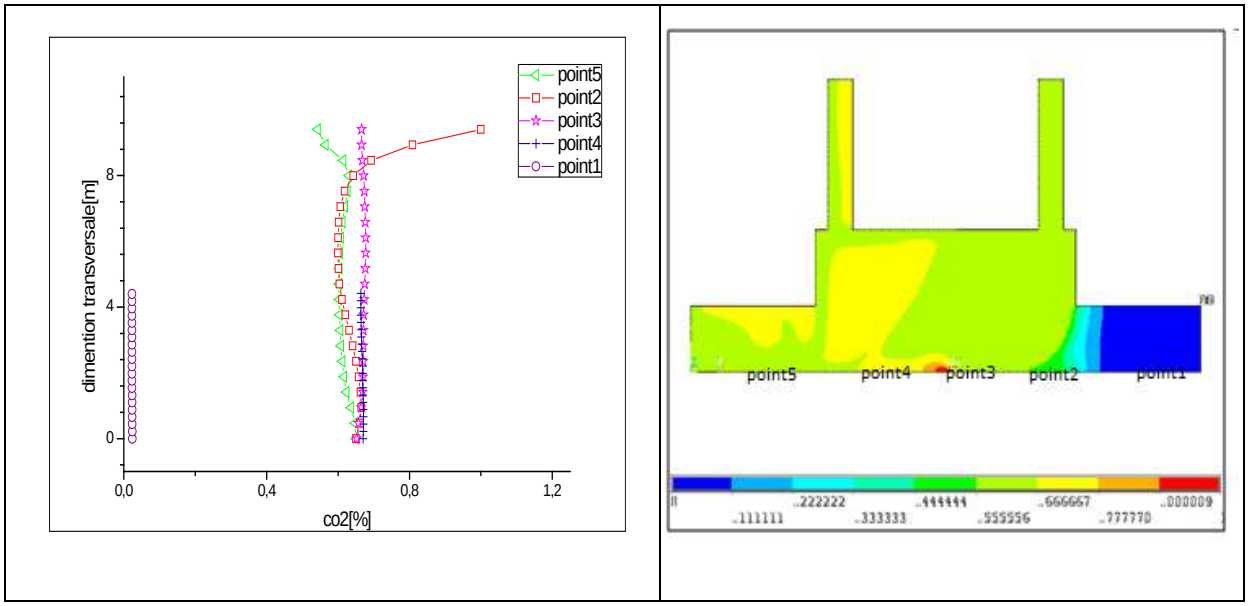
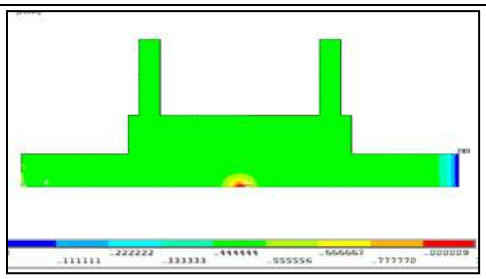
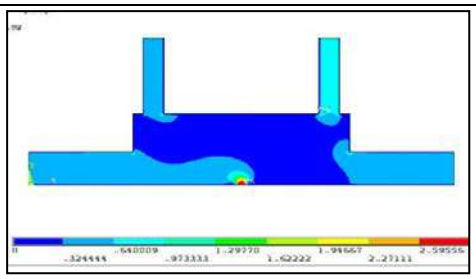
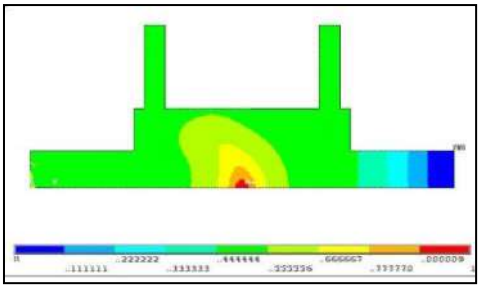
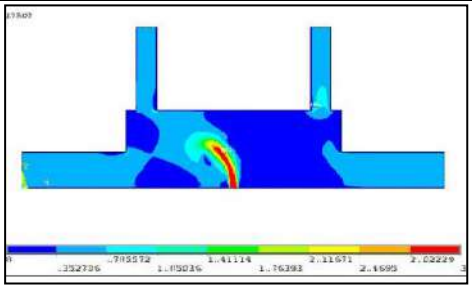
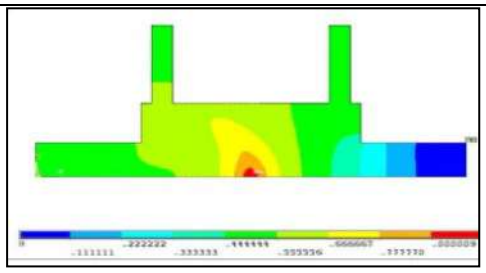
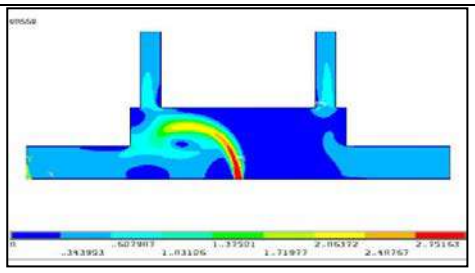
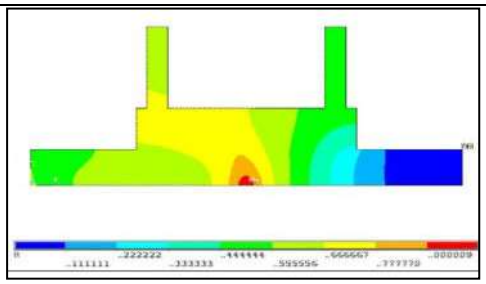
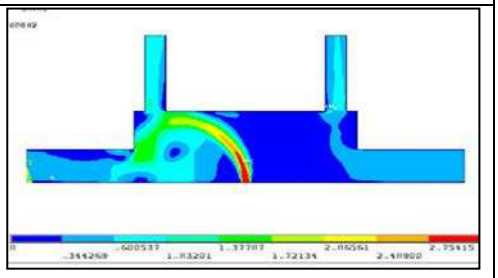
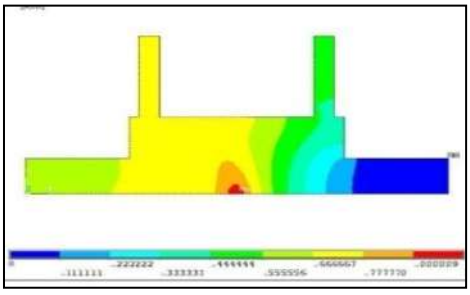
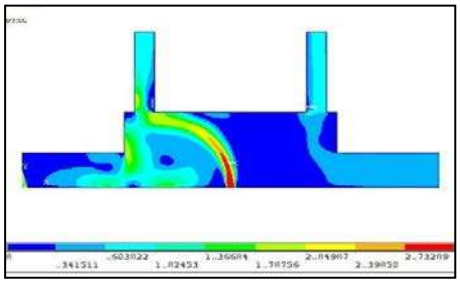


Figure Ⅳ.18 : profil de co_2 par à port dimension transversale du tunnel et de dispersion de co_2.

Tableau Ⅳ.5: Représentation spatiale de la dispersion de co_2 et la vitesse dans le temps

temps	co_2	vitesse

T=0.01		
T=0.1		
T=0.2		
T=0.3		
t=0.8		

IV.2.Linterpritation :

L'optimisation de la position et le nombre d'accès est cruciale. Elle permet d'identifier les limites d'émissions autorisées par la législation selon la nature. Notre étude sur la dispersion des polluants était basée sur la présence et les nombre des accès sur le tunnel ; on fixant les idées sur les deux paramètres clés du problème qui sont l'évacuation des gaz

polluants(CO2),et l'augmentation de la température dans le tunnel et au regard des résultats obtenus pour la simulation, on a constaté :

- En absence d'accès (première expérience) la dispersion de co2 est très lente .
- Quand on ajoute un accès en milieu de station (deuxième expérience) la circulation de co2 n'est pas amélioré, donc sans influence considérable.
- Quand on ajoute deux accès (troisième expérience) l'accès amont aspiré l'air et l'accès aval pour l'évacuation des gaz co_2la circulation est presque sans amélioration.
- Quand on ajoute deux accès(quatrième expérience) les deux accès pour l'évacuation de co2 la dispersionco_2 est devenus très rapide
- . De manière numérique cette fois, le rôle des pertes de charges dans le tunnel amont a été analysé. En effet ,l'augmentation des pertes de charges dans ce tunnel permet d'augmenter, pour un même débit d'extraction, la quantité d'air frais entrant par les accès et donc de déduire qu'il est plus facile de contrer d'éventuels effets les accès mis en place Le rôle du nombre et du positionnement des accès au plafond de la station a ainsi été mis en avant dans le cadre d'une confrontation entre un jet chaud et écoulement traversier
- Finalement la configuration de deux accès à décharge est très favorable.

IV.3.Conclusion :

Au cours de ce chapitre, les étapes initiales à la modélisation de la qualité de l'air ont été présentées. Les champs météorologiques servent au calcul de la dispersion des polluants et les émissions alimentent le mécanisme chimique pour déterminer les transformations chimiques ayant lieu dans l'espace d'atmosphère modélisé. Les modèles chimiques, associés aux mécanismes réactionnels, calculent la dispersion et la transformation des polluants. Les études réalisées ont utilisé l'écoulement bidimensionnel, compressible, turbulent et stationnaire.

La simulation numérique permet de modéliser, dans un premier temps, les propriétés caractéristiques des espèces (vitesse, pression, température…), puis dans un second temps de modéliser leur dispersion atmosphérique relâchées au cours du temps.

Les données d'entrée du solver ANSYS se répartissent en différents fichiers : un fichier contenant le champ météorologique (la géométrie du domaine), un fichier définissant les conditions aux limites.

Le modèle permet de représenter l'évolution des champs de concentrations de CO2 sous l'influence de leur propriété chimique qui jouent un rôle décisif dans la détermination de la nature de la diffusion du polluant.

CHAPITRE III :

Méthode numérique

III.1. Introduction :

La simulation numérique des écoulements et du transfert de chaleur et de masse est devenue un outil indispensable et privilégié dans plusieurs disciplines telles que l'aéronautique, les turbomachines et l'industrie automobile

L'étude scientifique d'un phénomène physique passe par la formulation d'une ou plusieurs lois sous forme d'équation mathématique aux dérivées partielles. La résolution de ces équations se fait par des méthodes numériques telle que la méthode des éléments finis, la méthode des différences finis et la méthode des volumes finis qui est la plus utilisée actuellement dans les codes CFD.

III.2 Logiciel ANSYS(APDL) :

ANSYS est un logiciel d'analyse d'éléments finis largement utilisé dans l'industrie poursimuler la réponse d'un système physique à la charge structurale, et les effets thermiques et électromagnétiques. ANSYS utilise la méthode des éléments finis pour résoudre les équations qui régissent sous-jacentes et les conditions aux limites spécifiques de problèmes associés

III.3.Les méthodes numérique

Il y’a trois méthodes numériques qui sont utilisées généralement pour la résolution des Systèmes d’équations aux drivées partielles régissant les écoulements. Ces méthodes sont :

- la méthode des différences finies.
- la méthode des éléments finis.
- la méthode des volumes finis.

III.3.1.méthode des différences finies

La méthode des différences finies consiste à remplacer les dérivées apparaissant dans Le problème continu par des différences divisées ou combinaisons de valeurs ponctuelles de la Fonction en un nombre fini de points discrets ou nœuds du maillage.

Avantages : grande simplicité d’écriture et faible coût de calcul.

Inconvénients : limitation de la géométrie des domaines de calculs, difficultés de prise en Compte des conditions aux limites portant sur les dérivées ou les gradients de l’inconnue.

III.3.2.méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis consiste à rapprocher les équations différentielles régissant pour un système avec un ensemble d'équations algébriques concernant un nombre limité de variables. Ces méthodes sont populaires parce qu'ils peuvent facilement être programmés. Les techniques des éléments finis ont été initialement développées pour des problèmes structurels, mais ils ont été étendus à de nombreux problèmes du terrain. Le solide est décomposé en éléments de forme géométrique simple ayant des côtés communs et dont les **s**ommets ou nœuds sont les points d’articulation de plusieurs éléments entre eux.

Ces nœuds seront les points d’application des forces intérieures ou extérieures. L’opération de décomposition est le maillage. Un bon maillage doit faciliter les opérations Prévues par un programme d’ordinateur. Il faut donc adopter une méthode systématique de numérotation des éléments et des nœuds.

Avantages : traitement possible de géométries complexes, détermination plus naturelle

Des conditions aux limites, possibilité de démonstrations mathématiques de convergence.
Inconvénients : complexité de mise en œuvre et coût en temps de calcul et en mémoire.

III.3.3.méthode des volumes finis

Cette méthode est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles comme la méthode des différences finies et la méthode des éléments finis mais, contrairement à la méthode de différence finies qui utilise des approximations de dérivées, la méthode de volume fini utilise comme la méthode d'éléments finis, des approximations d'intégrales. Dans la méthode des volumes finis les lois de conservations (de la masse, de quantité de mouvement et de l'énergie) sont exprimées localement sons une forme intégrale.
La clé de cette méthode réside dans l'application du théorème de la divergence ou théorème d'Ostrogradski, qui permet de changer une intégrale de volume en intégrale de surface. L'un des principaux avantages de la méthode des volumes finis est d'assurer une conservation
Intégrale exacte des grandeurs quelle que soit la taille du maillage et c'est pour raison qu'elle est très largement utilisée pour la résolution des phénomènes gouvernés par des équations à dérivées partielles.

III.3.4. Présentation de la méthode

Comme nous l'avons précédemment évoquée, La méthode des éléments finis a pour but de remplacer un problème mathématique défini dans un milieu continu et sous la forme d'équations différentielles ou d'intégrales, par un problème discret sous forme matricielle qu'il est possible de résoudre numériquement.
En résumé, cette méthode nécessite la discrétisation d'un continuum en un modèle composé d'un assemblage d'éléments finis qui possèdent des formes et des tailles variées.
De plus, le calcul de la solution nécessite la prise en compte d'un certain nombre de paramètres, tels que :

- La géométrie discrétisée en éléments finis,
- Les contraintes imposées sur le dispositif,
- Les excitations présentes dans le dispositif,
- Les propriétés des matériaux compo Sant le dispositif.

III.4. Méthode de Résolution des équations par éléments finis

III.4.1 Introduction :

La méthode des éléments finis est fondée sur deux idées principales : une méthode
D'interpolation et une méthode vibrationnelle.
Etant donnés un domaine continu et une fonction u solutions de L(u) = 0,
a) la méthode d'interpolation fournira une fonction proche de u construite `a partir d'un nombre finis de réels
b) la méthode vibrationnelle remplacera L(u) = 0 par un nombre fini d'équations.
Si l'on suppose la fonction approchée connue en un certain nombre de points de l'élément, elle est évaluée en n'importe quel point de l'élément par interpolation.
La restriction de la fonction approchée à un élément K (quadratique) du maillage, notée $\emptyset_n^k$, estde la forme : $\emptyset_n^k(x, y) = \sum_{i=0}^{NK} = \emptyset_i N_i(x,y)$ (III-1)
Ou $\emptyset_i$ désigne la valeur de la fonction approchée $\emptyset_i$ au point xi de coordonnées (xi, yi) ,Ni la fonction d' interpolation associée à xi ,Nk le nombre de fonction utilisées pour l'élément k,

Les coefficients Øi de cette combinaison linéaire sont les inconnues ou degré de liberté du problème discret ,les fonctions d'interpolation sont les fonctions de base d'un espace vectoriel de dimension finie Nk dans lequel on cherche à priori la solutions discrète Ø .
Afin de déterminer les inconnus du problème discret, une méthode de résidus pondérés est Utilisée :on minimise l'erreur commise est minisée en remplacent dans les équations aux dérives partielles la fonctions exacte par la fonction approchée, pour cela ,on projette l'erre sur un espace de fonction Øh à préciser.La méthode de galerkin est un cas particulier de la méthode des résidus pondérés ,l'espace Projection est le même que l'espace d'approximation de la solution du problème , autrement dit Øh = Nh.

III.4.2. Misse en œuvre de la méthode des éléments finis

III.4.2.1. Formation variation elle forte

La formation forte d'un problème aux conditions aux limites s'écrit alors comme suit :
Trouver u(x) u(x)ϵespace des solutions Us tel que .

$$\mathcal{L}(u) - F = 0 \; \forall x \in \Omega \; B(u) = u_0 \; \forall x \in \Gamma_{u_0} \qquad \text{(III-2)}$$

On note que l »espace Us dans lequel nous recherchons la fonction u, doit être défini Judicieusement.

III. 4.2.2 formation vibrationnelle faible

La formation vibrationnelle faible peut être obtenue par l'étable suivante :
1. Approcher la solution u. partout dans le domaineΩ, par u tel que

$$\bar{u} = \sum_{i=1}^{n} Ni\, \overline{Ui} \qquad \text{(III-3)}$$

On Ni =Ni (x, y) désignent les fonctions $\bar{U}$ et des valeurs nodales interminées
2- introduire (III-3) dans (III-2) il en résulte une erreur ou un résidu ε tel que

$$\varepsilon = \zeta(\bar{U}) - F \neq 0 \qquad \text{(III-4)}$$

3- obstiner une valeur nulle de ε en introduisant une fonction de point arbitraire w tel que

$$\int w\,(\zeta(\bar{U}) - F)\, d\Omega = 0,\ k = 1, 2, 3\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots N \qquad \text{(III-5)}$$

On N nombre d'inconnues indépendants du système (III-2)
En formulation de galerkine les fonctions tests sont assimilées aux fonctions de forme.
On pose:

$$W_k = N_k \Rightarrow \int Nk\, \zeta(\sum_{i=1}^{n} Ni\overline{ui})\, d\Omega = 0 \qquad \text{(III-6)}$$

On-dit que u ε $H^1{}_0$ (Ω) est une solution faible de (III-5) si :

$$\forall\, v\, \epsilon H_0^1(\Omega)\ a(\bar{U}, V) \qquad \text{(III-7)}$$

a ($\bar{U}$, V) est la forme bilinéaire associée à (ζ) soit Ωun ouvert borné R^d et dΩ est réqulier.on considére alors le probléme :

$$Lu = f \text{ sur } \Omega \text{ et } u = 0 \text{ sur } d\Omega = 0 \qquad \text{(III-8)}$$

III.4.3.forme générale des équations du système [10]

Les équations du système sont écrites sous la forme généralisée suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c\phi + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x C\phi\phi)\ \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_y C\phi\phi) = \frac{\partial}{\partial x}(T\phi\ \frac{\partial \phi}{\partial y}) + S\ \phi \qquad \text{(III-9)}$$

Ou :
ϕ : Variable généralisée
$_C\phi$: coefficient d'advection transitoire
Tϕ : ceofficient de diffusion
Sϕ : termes source

Le tableau (III-9) regroupe les expressions des différents termes dans les différentes équations du système

Variable $\emptyset$	Coefficient d'advection $C_\emptyset$	Diffusivité $\Gamma_\emptyset$	Termes source $S_\emptyset$
V_x	1	μ	$-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right)-\delta\nabla\left\|\frac{\nabla_c}{\|\nabla_c\|}\right\|\frac{\nabla_c}{\|\nabla_c\|}$
V_y	1	μ	$-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right)-\delta\nabla\left\|\frac{\nabla_c}{\|\nabla_c\|}\right\|\frac{\nabla_c}{\|\nabla_c\|}$
T	1	$\frac{K}{\rho c^e}$	$\frac{\varphi}{pc^e}$
P	1	0	0

Tableau III-1 : expression des coefficients d'échange et des termes sources pour les différentes variables

III.5.choix d'un maillage

La méthode des éléments finis repose sur découpage de l espace selon un maillage d'habitude l'on choisit un maillage carré ou triangulaire mais rien n'in territ de choisir des maillage plus complexe, il n'est pas non plus nécessaire que le maillage soit régulier et l'on a tendance à resserrer le maillage prés des endroits d'in tétères (par exemple aux endroits ou l'on pense que la solution va beaucoup varier) ,cependant il faut veiller à avoir des «éléments faiblement Distordus (se rapprocher d'un polygone régulier),plus ce maillage est resserré plus la solution que l'on obtient par la méthode des éléments finis sera précise et proche de la « vraie » solution de l »équation aux dériva ès partiels. même si une géométriquement complexe peut être maillée avec des éléments tétraédriques, elles mais exigent de nombreux éléments et que mai conduire à lécha parce que la simulation des ressources informatiques même un volume de forme régulière mai exigent de nombreux éléments tétraédriques si elle a un ratio très grand aspect .

III.5.1.discrétisation

La discrétisation de ces équations permet de convertir les équations aux dérivées partielles en équations algébriques qui sont alors résolues par les méthodes numériques
Traditionnelles, le procédé de discrétisation par élément fini consiste à écrire, après intégration, l'équation généralisée, sous forme matricielle élémentaire .

$([A_B{}^{transient}] + [A_e{}^{adverction}] + [A_e{}^{didffusion}])(\phi e) = (S_e^{\phi})$ (III-10)

Pour les intégrales élémentaire, la méthode galérien des résiduels pesés est employé.

III.5.1.1.Terme temporelle

Le premier des contributions de l'élémentaire est le terme de transition, sa forme générale est simplement :

Générale est simplement :

$$[A_e^{transien}] = \int w_e \frac{\partial \rho c \phi}{\partial t} \, d\,(vol) \qquad \text{(III-11)}$$

Avec :

W_e= la fonction pesante pour l'élément, qui est également la fonction de forme pour le nœud :

$$\int w_e \frac{(\partial \rho C \phi \phi)^2}{\partial t} d\,(vol) = \int w_i{}^e \rho c \phi w_j{}^e d(vol) \frac{\partial \phi_i^e}{\partial t} + \int w_i^e \frac{\partial \rho c \phi}{\partial t} w_j^e \, d\,(vol)\, \phi_j^e \qquad \text{(III-12)}$$

Les indices inférieurs I et j indiquent le nombre de nœud, si la deuxième partie de l'équation (III-11) est négligée, la matrice de masse peut être exprimée comme :

$$Mij = \int w_i^e \, \rho \, c\phi w_j^e \, d\,(vol) \qquad \text{(III-13)}$$

Si l'approximation localisée de masse est employée

$$Mij = \delta ij \int w_i^e \, \rho c \emptyset \, d\,(vol) \qquad \text{(III-14)}$$

Ou: δij = delta de kronecker (o si i≠j, 1si i=j) il ya deux méthode d'intégration temporelles : Newmarket et (Packard différence) différence en arrière.

La methode d'interaction de temps de newmank ou ,la formulation implicite de base node ,exprime l'étape de temps courant comme la niéme étape de frois et l'éxpression comporte les résultats précédents d'une étape dee temps.

$$(\rho\emptyset)n=(\rho\emptyset)_{n-1}+ \nabla t[\delta(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t}) + (1-\delta)\,(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t})_{n-1} \qquad \text{(III-15)}$$

Ou :

δ= coefficient d'intégration de temps pour la méthode newmark l'équation (III-14) est écrite comme suite :

$$(\frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t})_n = \frac{1}{\nabla t \delta}(\rho\emptyset)_n - \frac{1}{\nabla t \delta}(\rho\emptyset)_{n-1} + (1 - \frac{1}{\delta}) \qquad \text{(III-16)}$$

III.5.1.2. Terme d'advection

Il ya trois approches pour la siscrétation du terme d'advection, l'approche dit ligne de courant monotone upwind (MSU), la ligne profilée upwind/petro –Galerkin (SUPG), et le approches colloquées de galerkin(COLG).

III.5.1.2.1. monotone streamline upwind approach (MSU)

Le terme d'advection est manipulé par une approche de ligne de courant monotone basée sur l'idée que le transport pur d'advection est le long des caractéristiques, il est utile de penser à la formulation de transport d'advection en termes de quantité étant transportée dans domaine connu de vitesse.

Le champ de vitesse lui-meme peut etre envisagé partout comme ensemble de tangente de lignes profilées aux vecteurs de vitesse. Les limites d'advection peuvent donc etre exprimées en termes de vitesse aérodynamiques.

Dans le transport pur d'advection. On suppose qu'aucun transfert ne se produit à travers les lignes caractéristiques. C-à-d tout le transfert se produit le long des lignes profilées. Par conséquent on peut d'advection , s'écrit :

$$\frac{\partial(\rho V x C\emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V y C\emptyset\emptyset)}{\partial y} = \frac{\partial(\rho V s C\emptyset)}{\partial s} \qquad \text{(III-17)}$$

Une foi exprimé le long d'une ligne profilée,et donc constant dans tout l'élément ,on peut écrire :

$$[A_e^{advection}] = \frac{d(\rho VsC\emptyset\emptyset}{dy} \int w^e \text{ d(vol)} \qquad \text{(III-18)}$$

Cette formulation est faite pour chaque élément , dont chacun aura seulement un nœud qui obtient des contributions de l'intérieur de l'élément . le dérivé est calculé en utilisant une différence simple :

$$\frac{d(\rho VsC\emptyset)}{ds} = \frac{(\rho VsC\emptyset)u}{Ds} \qquad \text{(III-19)}$$

Ou :

D : l'indice de la valeur on niveau du nœud aval.

U : l'indice de la valeur prise à l'endroit ou la rationalisation dans e nœud sous le vent pénètre dans l'élément.

Δs: la distance du point situé en amont à l'avat nœud.

La valeur à l'endroit ascendant ast inconnue mais peut etre exirmée en termes de valeurs nodales inconnues qu'il est entre l'amont et l'avat .

Le processuse consiste à cycle par tous pour l'élement et identifier les nœuds arriére ,le calcul effectué est base sur les vitesse ,pour vois d'où elle est venue la ligne profilée dans le nœud.

Des facteurs pesants sont calculés ,basé sur la proximite de l'éndroit d'upwind aux noeuds Voisins.

$$[A_e^{advection}] = \int w^e \left\{ \frac{\partial(\rho VxC\emptyset\emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho VyC\emptyset\emptyset)}{\partial y} \right\} \text{ d(vol)} + C_2\tau \int \frac{zh}{2\text{umag}} \left\{ Vx\frac{\partial w^e}{\partial x} + Vy\frac{\partial w^e}{\partial x} \right\} \left\{ Vx \frac{\partial(\rho C\emptyset\emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho VyC\emptyset\emptyset)}{\partial y} \right\} \text{d (vol)} \qquad \text{(III-20)}$$

Ou :

$C_2\tau$: coefficient global réglé à 1.0.

h : longueur d'élément le long de la direction d'advection.

$$U_{mag} = \sqrt{Vx^2 + Vy^2} \begin{cases} 1 & si \quad 0 \le p \le 3 \\ \frac{pe}{3} & si \quad pe \ge 0 \end{cases}$$

$Pe = \frac{\rho CpUmag}{2T}$ nombre de peclet

Il est clair que pour l'approche de SUPG la maille est raffinée, les termes de perturbation tend à l'exactitude du second degré, et donc le terme de perturbation fournit la stabilité nécessaire qui est absente la discrétisation pure de Galerkin.

III.5.1.2.2.approche colloquée de galerkin (COLG)

L'approche de GOLG emploie le même arrangement de discrétisation avec l'approche de SUPG avec un concept colloqué, dans cet arrangement, un deuxième ensemble de vitesse, (la vitesse nodales élément – élément –based) qui sont faites pour satisfaire les équations de quantité de mouvement

.

$$[A_e^{advection}] = \int w^2 \left\{ \frac{\partial(\rho VxC\emptyset\emptyset)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho VyC\emptyset\emptyset)}{\partial y} \right\} \text{ d (vol)} + C_2\tau \int \frac{zh}{2U_{mag}^e} \left\{ \frac{V_x^e \partial w^e}{\partial v} + \frac{V_y^e \partial w^e}{\partial v} \right\} \left\{ \frac{V_x^e \partial(\rho C\emptyset\emptyset)}{\partial x} + \frac{V_y^e \partial(\rho C\emptyset\emptyset)}{\partial y} \right\} \text{ d (vol)} \qquad \text{(III-21)}$$

Dans cette approche, l'équation de pression est dérivée à partir des vitesses nodales (élément –élément –basé), et elle est généralement asymétrique la conservation exacte soit préservée même sur les mailles brutes.

III.5.1.3.terme de diffusion

L'expression pour les termes de diffusion vient d'une intégration au –dessus du domaine
De problème après la multiplication par la fonction pesante [10].

Diffusion contribution $= \int w^e \frac{\partial}{\partial x}(T\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial x})$ d (vol) + $\int w^e \frac{\partial}{\partial y}(T\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial y})$ d(vol)) (III-22)

III.6.Conclusion

Les modèles physiques mis en place dans le chapitre précédent permettent de prendre en compte tout les comptages entre les principaux phénomènes physiques entrant en jeux, et le passage du domaine contenu au domaine discontinu pour la résolution du problème.

Dans ce chapitre on a présenté les trois grandes méthodes numériques qui sont utilisées généralement pour la résolution des systèmes d'équations aux drivées partielles, et choisie la méthode des éléments finis pour discrétise la forme générale des équations du système et l'équation de chaleur.

Conclusion générale :

Pendant des décennies, les installations industrielles occupent une place importante parmi les causes de la pollution de l'air à ce qui est produit à partir de déchets industriels (polluants gazeux).
Dans notre étude nous avons basé sur la modélisation numérique CFD en utilisant le solveur ANSYS APDL par la méthode des éléments finis pour analyser la dispersion des fumées Dans un tunnel.

Notre travail effectué dans ce domaine a concerné la détermination les accès et la présence d'obstacle qui situ à certaine distance sur les concentrations des fumées.A travers cette mémoires , nous avons tenté de comprendre le rôle de certains paramètres sur les écoulements internes à une station de métropolitain de manière numérique. D'étudier finement la confrontation entre un jet chaud et un écoulement traversier. représentant une station de métropolitain soumise à une situation d'incendie réel (flamme de pré-mélange).

Enfin,Aux vues de ces analyses, il en résulte que tous ces paramètres sont couplés. Ilstendent alors à augmenter la difficulté de compréhension du développement des écoulements dans la station et notamment pour la constitution d'un critère de désenfumage unique. En effet, des accès (nombre, position), des pertes de chargeL'étude d' accée de ces paramètres sur le développement des écoulements dans d'une station de métropolitain,

Cela a permis de souligner une bonne corrélation avec les observations réalisées précédemment. En effet, nous avons mis en relief les différents régimes d'écoulements dans les accès suivant le débit d'extraction, ainsi des pertes de charges réseaux (dans les tunnels) sur les écoulements présents au sein des accès. Ceci permet donc d'étendre les tendances relevées vers une station de métropolitain et vers la praticabilité des itinéraires d'évacuation.

[1] O. VAUQUELIN. Experimental simulations of fire-induced smoke control in tunnels usingan "air-helium reduced scale model" : Principle and limitations and results and future. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 23 :pp. 171–178, 2007.

[2] D. RUSCH, L. BLUM, A. MOSER, T. ROESGEN. *Turbulence model for fire simulation by CFD and experimental investigation of a hot jet in crossflow*. Fire Safety Journal, Vol. 43 :pp. 429–441, 2008.

[3] A. O. M. MAHMOUD, J. BOUSLIMI, R. B. MAAD. *Experimental study of the effects of thermal plume entrainment mode on the flow structure : Application to fire*. Fire Safety Journal, Vol. 44 :pp. 475–486, 2009.

[4] N. YUCEL, M. I. BERBEROGLU, S. KARAASLAN, N. DINLER. *Experimental and numerical simulation of fire in a scaled underground station*. World Academie of Science and Engineering and Technology, Vol. 40 :pp. 309–314, 2008.

[5] F. CHEN, S. GUO, H. CHUAY, S. CHIEN. *Smoke control of fires in subway stations.* Theoretical and Computational Fluid Dynamics, Vol. 16 :pp. 349 – 368, 2003.

[6] Jean-Philippe Bolduc et Mohamed Lateb « dispersion des polluants atmosphériques» France 2008.

[7] Angélique GUILLOTEAU 2007 « Etude multiphasique de polluants organiques aromatiques : répartition des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques dans les suies et formation d'aérosols dans l'ozonolyse du catéchol ». Thèse de doctorat en Chimie de la Pollution Atmosphérique et Physique de l'Environnement à l'université d'Orléans de France.

[8] Sabri Hamouda, Abidi Walid, Maamri Hassan« étude d'impact environnementale sur la pollution atmosphérique unité de nitrate d'ammonium d'El Hadjar, Annaba » PFE à l'université d'Annaba.

[9] Stéphanie Lacour, 2004 «pollution atmosphérique » Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Centre d'Enseignement et de Recherche sur l'Environnement Atmosphérique. 6-8 Avenue Blaise Pascal, Cité Descartes, 77455 Champs sur Marne.

[10] Amandine Chevalier, 2007 « développement de service d'observations de PAES : pollution atmosphérique à l'échelle synoptique bilan de l'ozone dans la troposphère libre »thèse de doctorat à l'université Paul Sabatier - Toulouse III --HAL - CCSD-- 2007-12-04 France.

[11]Bruno Sportisse, 2007 « Modélisation et simulation de la pollution atmosphérique »Habilitation à Diriger les Recherches à l'université de Pierre et Marie Curie.
[12] Emmanuel Demaël, 2007 « Modélisation de la dispersion atmosphérique en milieu complexe et incertitudes associées» PhD Thesis, 273 pp.
[13] MATHIEU 2006 GAGNÉ 2006 «étude de sensibilité du climat de la baie d'Hudson à l'effet indirect de la rétroaction déshydratation -effet de serre durant la période hivernale » mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en science de l'atmosphère à l'université du Québec à Montréal, France
[14] Ung, Anthony, 2005 « une cartographie de la pollution atmosphérique en milieu urbain a l'aide de données multi sources »thèse de doctorale: ED 129 l'université d'ÎLE de France.
[15] Edouard Debry, 2005 « Modélisation et simulation numérique de la dynamique des aérosols atmosphériques » thèse de doctorat, Paristech ENPC.
[16] KADEM Dhaou-El-Djabine 2005 « évaluation et comportement des métaux lourds (cd –cr – cu – ni – pb – zn et mn) dans les sols à vocation agricole et à végétation naturelle soumis à une pollution atmosphérique (El-Hadjar – Annaba – est algérien).influence de la végétation sur la dynamique de ces métaux.» Thèse de doctorat en écologie – Pédologue de 'Université de Constantine.
[17] J Sampic 2005 « Evolution de la qualité de l'air en France » Lyon, CERTU, 2005.- 50 p. France.
[18] Hassane Graïne, 2009 « Prédiction de la concentration d'un polluant dans l'air à proximité d'une route » Colloque international Environnement et transports dans des contextes différents Ghardaïa. Actes, ENP ed. Alger, p. 163-167
[19] KEBSA KHADIDJA. Utilisation du polluant du palmier dattier comme bioindicateur de la pollution atmosphérique dans la région de Ouargla/2009.univ. de Ouargla

[**20**] N. M. SAID, S. HABLI, H. MHIRI, H. B. ET AL. *Flow field measurement in a crossflowing elevated jet*. J. Fluid Eng., Vol. 129 and Num. 5 :pp. 551–562, 2006.
[**21**] B. R. MORTON, A. IBBETSON. *Jets deflected in a crossflow*. Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 12 :112–133, 1996.
[**22**] J. U. SHLÜTER, T. SCHÖNFELD. *LES of jets in crossflow and its application to a gas turbine burner*. Flow and Turbulence and Combustion, Vol. 65 :177–203, 2000.
[**23**] G. LALIZEL, Q. SULTAN, M. FENOT, E. DORIGNAC. *Experimental convective heat transfer characterization of pulsating jet in cross flow : influence of Strouhal number*

excitation on film cooling effectiveness. Journal of Physics : Conference Series, Vol. 395 and Num. 012043 :6th European Thermal Sciences Conference, 2012.

[**24**]T. CAMBONIE, N. GAUTIER, J. L. AIDER. **Experimental** *study of counter-rotating vortex*
pair trajectories induced by a round jet in cross-flow at law velocity ratios. Experiments in fluids, Vol. 56 :pp. 41275, 2013.

[**25**] H. KOLLA, R. W. GROUT, A. G. ET J. H. CHEN. *Mechanisms of flame stabilization and* **blowout** *in a reacting turbulent hydrogen jet in cross-flow*. Combustion and Flame, Vol. 159 :2755–2766, 2012.

[**26**] S. KAWAI, S. K. LELE. *Mechanisms of jet mixing in a supersonic crossflow : a study using large-eddy simulation*. Center of turbulent Reserch, Annual Research Briefs, 2007.

[27] J. D. HOLDEMAN. *Mixing of multiple jets with a contfne subsonic crossflow*. Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 19 :pp. 31–70, 1993.

[28] N. CLERX, C. W. M. V. DER GELD, J. G. M. KUERTEN. *Turbulent stresses in a* direct *contact condensation jet in cross-flow in a duct with implications for particle break-up*. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 66 :684–694, 2013.

[**29**] RUNDSTRÖM, MOSHFEGH. *Large-eddy simulation of an impinging jet in a cross-flow on a heated wall-mounted cube*. International Journal of heat and mass transfer, Vol. 52 :pp. 921–931, 2009.

[**30**] J. ANDREOPOULOS, W. RODI. *Experimental investigations of jets in a crossflow*. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 138 :pp. 93–127, 1984.

[**34**] L. E. BRIZZI. *Contribution à l'étude de l'instabilité générée par un jet cylindrique débouchant perpendiculairement à un écoulement transversal*. Thèse de doctorat, Université de Poitiers, Décembre 1994.

[**35**] R. J. MARGASON. *Fifty years of the jet in cross flow research*. AGARD Conference Proceedings, Vol. 534, 1993.

[**36**] Y. KAMATONI, I. GREBER. *Experiments on a turbulent jet in a cross flow*. Nasa Contractor Report, NASA CR-72893, 1971.

[**37**] M. A. PATRICK. *Experimental investigation of the mixing and penetration of a round turbulent jet injected perpendicularly into a transverse stream*. Trans. Institute of Chemical Engineers, Vol. 45, 1967.

[**38**] R. FERAN, R. P. WESTON. *Vorticity associated with a jet in a cross flow*. AIAA Journal, Vol. 12 :1666–1671, 1974.

[**39**] B. D. PRATTE, W. D. BAINES. *Profiles of the round turbulent jet in a cross flow*. Journal of the Hydraulcs Division Proceedings of the ASCE, Vol. 92 :pp. 53–64, 1967.

[**40**] F. P. RICOU, D. B. SPALDING. *Measurements of entrainment by axisymmetrical turbulent jets*. J. Fluid Mech., Vol. 11 :pp. 21–32, 1961.

[**41**] B. A. HAVEN, M. KUROSAKA. *Kidney and anti-kidney vortices in crossflow jets.* J. Fluid Mech., Vol. 352 :pp. 27–64, 1997.

[**42**] T. H. NEW, T. T. LIM, S. C. LUO. *Effects of jet velocity profiles on a round jet in crossflow*. Experimpents in Fluids, Vol. 40 :pp. 859–875, 2006.

[**43**] S. MUPPIDI. *Study of trajectories of jets in crossflow using direct numerical simulations*. J. Fluid Mechanics, Vol. 50 :pp. 88–100, 2005.

[**44**] S. MUPPIDI, K. MAHESH. *Direct numerical simulation of round turbulent jets in crossflow*. J. Fluid Mech., Vol. 574 :pp. 59–84, 2007.

[**45**] L. K. SU, M. G. MUNGAL. *Simultaneous measurements of scalar and velocity field evolution in turbulent crossflowing jets*. J. Fluid Mech., Vol. 513 :pp. 1–45, 2004.

[**46**] Y. KAMATONI, I. GREBER. *Experiments on confined turbulent jets in a cross flow*. Nasa Contractor Report, NASA CR-2392, 1974.

[**47**] S. ROUX. *Contribution expérimentale à l'aérothermique d'un jet en impact forcé acoustiquement*. Thèse de doctorat, Université de Poitiers, août 2011.

[**48]** T. F. FRIC, A. ROSHKO. *Vortical structure in the wake of a transverse jet*. J. Fluid Mech., Vol. 279 :pp. 1–47, 1994.

[**49**] E. RECKER, W. BOSSCHAERTS, R. WAGEMAKERS, P. H. ET AL. *Experimental study of a round jet in cross-flow at low momentum ratio*. 15th Int. Symp on Applications of laser techniques to fluid Mechanics, 2010.

[**50**] J. BLAISE. *Influence de la géométrie d'une source thermique sur le développement du panache*. Thèse de doctorat, Université de Nancy, 2008.

[**51**] J. ZINOUBI, R. B. MAAD, A. BELGHITH. *Experimental study of the resulting flow of plume-thermosiphon interaction : appliacation to cheminey problems*. Applied Thermal Engineering, Vol. 25 :pp. 533–544, 2005.

[**52**] W. K. CHOW. *Experimental studies on fire engineering systems for non-industrial workplaces*. 2006.

[**53**] F. CHEN, S. GUO, H. CHUAY, S. CHIEN. *Smoke control of fires in subway stations.* Theoretical and Computational Fluid Dynamics, Vol. 16 :pp. 349 – 368, 2003.