République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université YAHIA FARES de MEDEA

Faculté de Technologie



Département de Génie des Procédés et Environnement

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de master en génie des procédés de l'environnement

Option : Génie des procédés de l'environnement

Thème :

Mesure et modélisation de la pollution par les NO_2 émises par une source mobile dans une rue canyon

Présenté par :

-ABBAD HABIBA

-ALLOUCHE HAFIDHA

Encadré par :

-Dr KERCHICH YACINE

-Mr REBHI REDHA

2017/2018

REMERCIMENTS

Tout d'abord, nous remercions Dieu « Tout Puissant » de nous avoir accordé la force, le courage et les moyens à fin de pouvoir accomplir ce modeste travail.

Nous exprimons nos profonds remerciements à notre promoteur, ***Dr KERCHICH YACINE*** *pour l'aide compétente qu'il nous a apportée, pour sa patience, sa confiance, son encouragement, et Son œil critique qui nous a été très précieux pour structurer le travail , nous le remercions vivement.*

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

Nous remercions sincèrement les membres de jury qui nous font le grand honneur d'évaluer ce travail.

Nous n'oublions pas nos familles et nos amis, un grand merci du fond du cœur, grâce à leur patience et leur soutien moral.

Enfin, un grand merci, à toute personne qui a contribué de prés ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

A Mes chers parents

A Mon frère Khaled

A Mes sœurs (Siham et Hadya)

A les deux bourgeons (Oussama et Adel)

A ma famille ABBAD et KHADRAOUI

A Tous ceux qui m'ont aidé de prés ou de loin

HABIBA

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mon père qui a souhaité vivre pour longtemps juste pour nous voir

Qu'est-ce que nous allons devenir.

A celle qui m'a transmis la vie, l'amour, le courage, à toi chère maman

toutes mes joies, mon amour et ma reconnaissance.

A mes sœurs

Rihab. rahaf .bouchra et nada

A mes chers frères

Soheib. Anwar .eyad et mohamed

A mes belles sœurs zahira et khawla , je vous aime, avec vous j'ai partagé mes moments de

joie et de bonheur

Je dédie ce travail aussi à nana et mika

A mes chères amies : najiya amina et hassiba

A tous les membres de la famille Allouche et Belaifa et Abbad.

A ma chère amie, ma binôme, Habiba chez qui m'a supporter durant ces trois dernières années.et chez qui j'ai trouvé l'entente dont j'avais besoin.

hafidha

TABLE DES MATIERES

ملخص I

Résumé I

Abstract II

Liste des figures III

Liste des tableaux VII

Nomenclature VIII

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....1

CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉ SUR LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

1.1. Introduction……..3

1.2. Définitions……3

1.3. Sources D'émissions des polluants atmosphériques……....4

1.3.1. Générale……5

1.3.1.1. Les sources naturelles…….....5

1.3.1.2. Les sources anthropiques……5

1.3.2. Combustion…….....6

1.3.3. Sources fixes……..6

1.3.4. Sources mobiles……6

1.4. Les polluants de l'atmosphère……..7

1.4.1. Les polluants gazeux…….....7

1.4.2. Les polluants particulaires……8

1.5. Les effets de la pollution atmosphérique……8

1.5.1. Effets sur la santé……8

1.5.2. Effets sur l'environnement…….....10

1.6. Les solutions……....11

1.7. Conclusion……15

CHAPITRE 2 : MODÉLISATION DE LA DISPERSION ATMOSPHÉRIQUE EN MILIEU URBAIN

2.1. La couche de surface urbaine……16
2.1.1. Structure de la couche de surface urbaine……16
2.1.2. Dispersion des polluants dans l'atmosphère urbaine……...18
2.1.3. Ecoulements moyens et turbulents dans la couche de surface……18
2.1.3.1. Les équations fondamentales dans la couche de surface……19
2.1.3.2. Prise en compte de la turbulence……21
2.1.4. Influence de la structure urbaine……..23
2.1.4.1. Effets dynamiques……...24
2.1.4.2. Effets thermiques……....24
2.1.4.3. Effets sur la dispersion……...24
2.1.5. Conclusion……...25
2.2. Les outils de modélisation……25
2.2.1. Modélisation numérique ……25
2.2.1.1. La Simulation Numérique Directe (DNS)……...25
2.2.1.2. La Simulation des Grandes Echelles(LES)……....25
2.2.1.1. Reynolds-Average Navier-Stokes (RANS)…….....26
2.2.2. Les différentes modèles de la dispersion atmosphérique……27
2.2.2.1. Les modèles gaussiens……27
2.2.2.2. Les modèles lagrangiens……..28
2.2.2.3. Les modèles de la mécanique des fluides CFD……28
2. 3.Etude de l'écoulement et de la dispersion dans une rue canyon……28
2.3.1 Introduction……...29
2.3.2 Caractéristiques d'une rue canyon……29
2.4.2 Facteurs influençant l'écoulement et la dispersion dans un canyon……30

CHAPITRE 3: MÉTHODES DE MÉSURE DES POLLUANTS GAZEUX

3.1. Mesure des polluants atmosphériques……..32
3.1.2. Techniques de Mesure des polluants atmosphériques……...32
3.1.2.1. La chimiluminescence……32
3.1.2.2. L'électrochimie……...33

3.1.2.3. Analyse infra rouge……34
3.1.2.4. Le paramagnétisme…….34
3.1.3. L'appareil ECOM-J2KN……36
3.1.4. Conclusion……...37

CHAPITRE 4 : ÉTUDE NUMÉRIQUE

4.1. Introduction……...38
4.2. La mécanique des fluides numérique(MFN)…….38
4.2.1 Méthode de travail……...39
4.2.2. Applications de la CFD…….39
4.2.3. Méthodes de discrétisation……40
4.2.4. Principe de la méthode des volumes finis…….40
4.3. ANSYS, In…….40
4.3.1. Principaux produits……...40
4.3.2. Les Modules d'ANSYS……...41
4.4. ANSYS CFX…….41
4.5. Environnements logiciels……...41
4.6. Mettre en place une simulation à l'aide d'ANSYS CFX……...42

CHAPITRE 5 : RÉSULTATS ET DISCUSSION

5.1.Etude de la modélisation…….48
5.2. Analyse et évaluation des résultats……64

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES……71
Références Bibliographiques……....72

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة إنتشار غاز ملوث منبعث من السيارات تسير في طريق متواجد بين، قبل و بعد بنايات ذات أشكال هندسية مختلفة. لدراسة إنتشار الغاز،قمنا بتغيير هندسة البنايات، سرعة خروج الغاز من السيارة وموضع خروج الغاز بالنسبة لموضع البنايات. الغاز الذي تم دراسته هو ثاني أكسيد النيتروجين(NO_2) . تم دراسة إنتشار هذا الغاز تحت ظروف جوية عادية. في عملنا، تم إجراء عمليات محاكاة CFD باستخدام طريقة RANS قائمة على النموذج $k-\epsilon$ المقدمة بواسطة رمز ANSYS-CFX التجاري. وأظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أنه بغض النظر عن هندسة المباني وسرعات الخروج الغاز ومواضع خروج الغاز ، لا يزال التلوث عالقا في شارع كانيون الذي له تأثير سلبي على صحة السكان.

الكلمات المفتاحية: تلوث جوي ،إضطراب ، تشتت ، محاكاة عددية ، شارع كانيون.

Résumé

L'objectif principal de ce travail est l'étude de la dispersion d'un polluant gazeux émis par les gaz d'échappement d'un véhicule et circulant dans une rue canyon, avant ou après deux bâtiments formant la rue cayon. Pour l'étude de la dispersion, il a été procédé à la variation de la géométrie des bâtiments, vitesse de sortie des gaz et position de la source. Le polluant choisi était le dioxyde d'azote et les conditions atmosphériques considérées pour l'étude de la dispersion étaient supposées stables. Dans notre travail, des simulations CFD ont été réalisées en utilisant une méthode RANS basée sur le modèle $k-\epsilon$ fournit par le code commercial ANSYS-CFX. Les résultats obtenus ont montré que quelque soit la géométrie des bâtiments, vitesses de sortie des gaz et positions des sources, la pollution reste toujours emprisonnée dans la rue canyon, ce qui provoque un impact négatif sur la santé des habitants.

Mots-clés : pollution atmosphérique, turbulence, dispersion, simulation numérique, rue canyon.

Abstract

The main objective of this work is the study of the dispersion of a gaseous pollutant emitted by the exhaust of a vehicle and circulating in a canyon street, before or after two buildings forming the rue canyon. For the study of the dispersion, the geometry of the buildings, the exit velocity of the gases and the position of the source were varied. The pollutant chosen was nitrogen dioxide and the atmospheric conditions considered for the study of the dispersion were assumed to be stable. In our work, CFD simulations were performed using a model $k-\epsilon$ based RANS method - provided by the ANSYS-CFX trade code. The results obtained showed that whatever the geometry of the buildings, gas exit velocities and source positions, pollution is still trapped in the canyon street, which has a negative impact on the health of the inhabitants.

Keywords: atmospheric pollution, turbulence, dispersion, numerical simulation, canyon street.

Liste des figures

Figure2.1	Structure de la couche limite atmosphérique (Stull, 1988)	16
Figure 2.2	Structure de la Couche Limite Urbaine d'après (Roth, 2000)	17
Figure 2.3	Rue canyon	29
Figure 2.4	Représente caractéristiques d'une rue canyon	30
Figure 2.5	Représente l'écoulement turbulent en présence d'obstacle	31
Figure 3.1	analyseur NOx à chimiluminescence	33
Figure 3.2	L'appareil Ecom-j2kn	36
Figure 4.1	Les modules principaux du CFX	42
Figure 4.2	Interface graphique du module ICEM-CFX	43
Figure 4.3	Interface graphique du module CFX-pre	43
Figure 4.4	Interface graphique du module CFX-Solver	44
Figure 4.5	Organigramme de mise en œuvre d'un calcul (Source : documentation CFX)	46
Figure 4.6	Interface graphique du module CFX-post	47
Figure 5.1	Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en amont = 2 fois bâtiment en aval), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 3m/s	49
Figure 5.2	Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 7 m/s	49
Figure 5.3	Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en aval = 2 fois bâtiment en amont), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 3m/s	50
Figure 5.4	Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, Vsortie gaz = 5 m/s	50
Figure 5.5	Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), sources après, Vsortie gaz = 3 m/s	50
Figure 5.6	Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), Source au milieu, Vsortie gaz = 3 m/s	51
Figure 5.7	Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur	51

	du bâtiment en aval), Source avant, Vsortie gaz = 3 m/s	
Figure 5.8	Evolution de la température – hauteur du bâtiment en amont = 2 fois la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, Vsortie gaz = 3 m/s	54
Figure 5.9	Evolution de la vitesse de sortie – hauteur du bâtiment en amont = 2 fois la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu,Vsortie gaz = 3 m/s	54
Figure 5.10	Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en amont = 2 fois la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, Vsortie gaz = 3 m/s	54
Figure 5.11	Evolution des lignes de vitesses – hauteur du bâtiment en amont = 2 fois la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, Vsortie gaz = 3 m/s	55
Figure 5.12	Evolution de la température – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, Vsortie gaz = 7 m/s	55
Figure 5.13	Evolution de la vitesse de sortie des gaz – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 7 m/s	56
Figure 5.14	Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, Vsortie gaz = 7 m/s	56
Figure 5.15	Evolution des lignes de vitesses – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 7 m/s	56
Figure 5.16	Evolution de la température – hauteur du bâtiment en aval = 2 fois la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, Vsortie gaz = 3 m/s	57
Figure 5.17	Evolution de la vitesse de sortie des gaz température – hauteur du bâtiment en aval = 2 fois la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s	57
Figure 5.18	Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en aval = 2 fois la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, Vsortie gaz = 3 m/s	58
Figure 5.19	Evolution des lignes des vitesses – hauteur du bâtiment en aval = 2 fois la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu,Vsortie gaz = 3 m/s	58
Figure 5.20	Evolution de la température – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, Vsortie gaz = 5 m/s	58
Figure 5.21	Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du	59

	bâtiment en amont), source au milieu, Vsortie gaz = 5 m/s	
Figure 5.22	Evolution des lignes des vitesses – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, Vsortie gaz = 5 m/s	59
Figure 5.23	Evolution de la vitesse – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source après, Vsortie gaz = 3 m/s	60
Figure 5.24	Evolution de la température – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source après, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s	60
Figure 5.25	Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source après, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s	60
Figure 5.26	Evolution des lignes de vitesses – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source après, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s	61
Figure 5.27	Evolution de la température – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, Vsortie gaz = 3 m/s	61
Figure 5.28	Evolution de la vitesse – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, Vsortie gaz = 3 m/s	61
Figure 5.29	Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s	62
Figure 5.30	Evolution des lignes des vitesse – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s	62
Figure 5.31	Evolution de la température – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source avant, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s	62
Figure 5.32	Evolution de la vitesse – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source avant, Vsortie gaz = 3 m/s	63
Figure 5.33	Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source après, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s	63
Figure 5.34	Evolution des ligne de vitesses – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source avant, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s	64
Figure 5.35	Profils des concentrations entre les bâtiments (source au milieu)	65
Figure 5.36	Profils des concentrations après les bâtiments (source au milieu)	65
Figure 5.37	Profils des concentrations au milieu des bâtiments (source au milieu)	66
Figure 5.38	Profils des concentrations en aval des bâtiments (source au milieu)	66

Figure 5.39	Profils des températures au milieu de la rue canyon à différentes hauteurs (source au milieu)	67
Figure 5.40	Profils des températures en aval des bâtiments à différentes hauteurs (source au milieu)	67
Figure 5.41	Profils des températures au milieu de la rue canyon à différentes vitesses (source au milieu, hauteurs identiques)	68
Figure 5.42	Profils des températures en aval des bâtiments à différentes vitesses (source au milieu, hauteurs identiques)	68
Figure 5.43	Profils des fractions en amont, milieu et en aval des bâtiments (vitesse de la source constante 3 m/s, hauteurs identiques, Ligne 2)	69
Figure 5.44	Profils des fractions en amont, milieu et en aval des bâtiments (vitesse de la source constante 3 m/s, hauteurs identiques, Ligne 3)	69
Figure 5.45	Profils des températures en amont, milieu et en aval des bâtiments (vitesse de la source constante 3 m/s, hauteurs identiques, Ligne 2)	70
Figure 5.46	Profils des températures en amont, milieu et en aval des bâtiments (vitesse de la source constante 3 m/s, hauteurs identiques, Ligne 3)	70

Tableau 1.1	Effets et des polluants sur la santé humaine	9
Tableau 1.2	Effets des principaux polluants sur l'environnement	10
Tableau 1.3	Hiérarchie de modèles à des échelles différentes. Exemple de décomposition et caractéristiques de chaque échelle (dimension et résolution)	15
Tableau 2.1	Valeurs des constantes du modèle $k-\epsilon$	27
Tableau 3.1	Récapitulatif des méthodes d'analyses	35
Tableau 3.2	Les valeurs moyennes des concentrations	37

ρ	Masse volumique	kg/m^3
$u\ v\ \omega$	Composantes de la vitesse	m/s
τ_{ij}	Contrainte de cisaillement	N/m^2
μ	Viscosité dynamique	kg/m.s
δ_{ij}	Indice de Kronecker (=1 si : i = j ; 0 si i ≠ j)	–
θ	Température potentielle	k
v	Viscosité cinématique	m^2/s
v_t	Viscosité cinématique turbulente	m^2/s
v_s	Viscosité sous-maille	m^2/s
D_m	Coefficient de diffusion moléculaire	m^2/s
T	Température	k
T_v	Température virtuelle	s
R^*	Constante des gaz parfaits pour l'air sec	J/kg.k
g	Accélération de la pesanteur	m^2/s
c_i	Concentration du polluant i	g/m^3
c	Concentration moyenne	g/m^3
p	Pression de l'air	pa
p_s	Pression de référence au niveau de la mer	pa
q	humidité spécifique	–
K_t	Diffusivité turbulente	m^2/s
k	Énergie cinétique turbulente	m^2/s
pr_t	Nombre de Prandtl turbulent	–
Sc_t	Nombre de Schmidt turbulent	–
λ	Conductibilité thermique moléculaire	W/m.k
λ_t	Conductibilité thermique turbulente	W/m.k

C_p	Chaleurs massiques constant	J/kg.k
R_e	Nombre de Reynolds de l'écoulement	–
t	Temps	s
σ_ϵ	Nombre de Prandtl pour	–
σ_k	Nombre de Prandtl pour k	–
$C_\mu, C_{1\epsilon}$	Constantes du modèle k- ϵ	–
H	Hauteur moyenne des bâtiments	m
ϵ	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente	m^2/s^3
z^*	Hauteur de la sous-couche rugueuse	m
zi	Hauteur de la couche limite atmosphérique	m
W	largeur de la rue	m
L	La longueur des bâtiments	m

Indices

x,y,z	Coordonnées cartésiennes	–
i	Numéro de position	–
i,j,k	Direction de projection	–

Abréviations

CFD	Computational Fluid Dynamics
CLA	Couche Limite Atmosphérique
CLS	Couche Limite de Surface
CLU	Couche Limite Urbaine
CSU	Couche de Surface Urbaine
DNS	Direct Numerical Simulation
LES	Large Eddy Simulation
RANS	Reynolds Average Navier Stokes
HAM	Hydrocarbures aromatiques monocycliques
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
MEF	Méthode des éléments finis
COV	Composés Organiques Volatiles

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Pour mieux connaître et maîtriser la pollution de l'air, il est nécessaire de savoir quelles sont les sources de pollution, les identifier et les quantifier. Cette connaissance permet ensuite de prendre des mesures de réduction des émissions à la source. Les inventaires d'émissions sont également une donnée de base nécessaire pour réaliser des évaluations de qualité de l'air et estimer les impacts de cette pollution sur la santé et l'environnement.

La pollution d'origine automobile est devenue au cours du temps un facteur notable de la dégradation de l'environnement en générale et diminution de la qualité de l'air dans les villes. En effet, l'automobile et plus généralement les transports terrestres sont une des sources les plus importantes des émissions de NO_2 et plus généralement des gaz responsables de l'effet de serre **[1]**. Les émissions de NO_2 sont transportées et diffusées dans l'atmosphère sous l'action du vent et de la turbulence atmosphérique. On s'attache de nos jours à mieux comprendre les divers mécanismes et impacts de ces polluants à différentes échelles à fin de pouvoir prévenir et diminuer leurs effets sur la santé et l'environnement.

A l'échelle de la rue, les canyons urbains sont définis comme des rues étroites bordées par des immeubles alignées des deux côtés **[2].** Elles sont les plus touchées par la dégradation de la qualité de l'air et l'augmentation de la teneur en polluants. Ceci est due essentiellement au trafic des véhicules motorisés surtout quant le vent est faible et perpendiculaire à l'axe du canyon **[3]**.

L'accumulation des polluants dues aux obstacles formés par le bâti environnant, favorisant le développement de zones de recirculation, appelées « vortex » **[4]** dans lesquelles les polluants sont piégés. Ce phénomènes est d'autant plus accentué que la rue est plus étroite est bordée de bâtiments hauts.

Plusieurs études ont été menés ces dernières années à l'issue de comprendre le comportement de l'écoulement de l'air sous différentes configurations de rues canyons. Les travaux sont basés sur la simulation numérique.

La méthode CFD(Computational Fluid Dynamics) est largement utilisées ces dernières années pour les études à des échelles fines et tenant compte de la complexité de la géométrie et où plusieurs phénomènes sont modélisés écoulement moyen, turbulence, transfert de chaleur, réactions chimiques à l'instar des codes CFD FLUENT, ANSYS CFX. L'évaluation de la pollution atmosphérique peut être réalisée par des mesures sur terrain à l'aide de capteurs et instruments de mesures. Les données sont collectées et

analysées pour une période déterminée et sous différentes conditions atmosphériques pour la détermination des concentrations en polluants.

L'objectif de notre présent travail est la simulation CFD de l'écoulement et la dispersion d'un polluant à l'intérieure d'une rue canyon par l'application d'une approche RANS (Reynolds Average Naviers-Stocks) basée sur un modèle de turbulence K-epsilon implémenté dans le code CFD (Computational Fluid Dynamics) ANSYS CFX **[5]**.

Le mémoire est organisé de la façon suivante :

L'objet du **Chapitre 01** est essentiellement consacré à la définition de la pollution atmosphérique, les sources de la pollution, présentation des principaux polluants et aussi leurs effets sur la santé et l'environnement et proposition les solutions.

Le **Chapitre 02** est dédié à la description de la couche limite atmosphérique ainsi à sa modélisation. Des méthodes et approches de simulation des écoulements turbulents sont présentées.

Le **Chapitre 03** présente les différentes méthodes de mesure des polluants atmosphériques.

Dans **Chapitre 04**, présente alors en détail l'approche CFD que nous avons appliqué pour la simulation de l'écoulement et la dispersion dans une rue canyon en utilisant le code ANSYS CFX.

Au **Chapitre 05**,les résultats des simulations sont présentés en vu d'étudier la structure de l'écoulement et de la dispersion dans la rue canyon. Les profils de turbulence et de concentration en polluants simulés par le modèle $k-\epsilon$.

Enfin, une synthèse de l'étude est réalisée en conclusion et des perspectives futures de recherche sont dégagées à la fin de ce mémoire.

CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉ SUR LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

1.1. Introduction

L'atmosphère est un mélange de gaz contenant essentiellement de l'azote (78%) et de l'oxygène (21%), le dernier pourcentage étant un mélange d'une multitude de substances très diverses (gaz carbonique, gaz rares, composés organiques…). La présence et la concentration de ces derniers sont telles que la vie est possible, ce qui reste pour l'instant un cas unique dans l'ensemble des planètes connues**[6]**. Ce premier chapitre a pour objectif de synthétiser toutes les connaissances acquises sur la pollution atmosphérique qui ont été développées par plusieurs auteurs en expliquant d'une manière générale le phénomène de la pollution de l'air.

Ce chapitre se scinde en quatre parties avec:

- une étude de la pollution de l'air à travers les définitions
- une identification des différentes sources de cette pollution atmosphérique
- une investigation des différents polluants
- une explication des effets des polluants
- enfin proposition des solutions pour diminuer les effets des polluants

1.2. Définitions

-L'atmosphère

Selon le dictionnaire encyclopédique des pollutions: «l'atmosphère est une couche la plus extérieure de la planète, de nature gazeuse, constituant donc la partie la plus extérieure de l'écosphère, et dont la présence constitue l'agent moteur du cycle de l'eau, on appelle «atmosphère réduite» une atmosphère théorique dont la pression serait uniforme et égale a sa valeur normale au niveau du sol, dans une telle hypothèse, l'atmosphère toute entière aurait une épaisseur de 8 km, alors que l'épaisseur de l'atmosphère réelle excède 1000 km»**[7]**.

-La pollution

Selon le dictionnaire encyclopédique des pollutions; « fort utilisé de nos jours le terme de pollution recouvre bien des acceptions et qualifie une multitude d'actions qui dégradent l'environnement, ce vocable désigne sans aucune ambigüité les effets de l'ensemble des composés toxiques libérés par l'homme dans la biosphère. A l'opposé, son emploi paraît moins évident au profane lorsqu'il concerne des substances inoffensives pour les êtres vivants parfois même favorables à ces derniers mais qui peuvent exercer une action perturbatrice dans les écosystèmes pollués du fait de leur trop grande concentration, tel est par exemple le cas du gaz carbonique (CO_2) rejeté dans l'atmosphère par suite des

combustions ou encore des phosphates contenus dans les détersifs qui sont déversés avec les effluents urbains dans les eaux continentales».

- La définition la plus générale du terme de pollution a été donnée par le premier rapport du conseil sur la qualité de l'environnement de la maison blanche (1965) «la pollution» dit ce rapport «est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en totalité ou en partie comme un sous-produit de l'action humaine, au travers des effets directes ou indirects altérants les critères de répartition des flux de l'énergie des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes**[8]**. Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou au travers des ressources agricoles, en eau et en produits biologiques. Elles peuvent aussi l'affecter en altérant les objets physiques qu'il possède ou les possibilités récréatives du milieu»

Par conséquent, une définition plus restrictive de ce terme a été donnée: «constitue une pollution toute modification du flux de l'énergie, de l'intensité des rayonnements, de la concentration des constituants chimiques naturels ou encore l'introduction dans la biosphère de substances chimiques artificielles produites par l'homme»**[7]**.

-La pollution atmosphérique

De manière générale, la pollution atmosphérique se définit comme étant toute modification de l'atmosphère ambiante apparaissant sous trois formes, soit gazeuse par la présence de gaz nouveaux ou par l'augmentation de concentration de certains gaz, soit solide par la présence de poussières en suspension de taille plus ou moins grande, soit plus rarement liquide causée par les aérosols ou le brouillard **[9]**.

L'organisation de coopération et de développement économique(O.C.D.E) : définit la pollution atmosphérique comme (l'introduction par l'homme directe ou indirecte de substances ou d'énergie dans l'atmosphère qui entraîne des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux système écologiques, à porter atteinte aux agréments ou à gêner les autres utilisations légitimes de l'environnement**)[8]** .

1.3. Sources d'émissions des polluants atmosphériques

Les sources de la pollution atmosphérique sont de différents types. Il existe sources générales, sources de combustion, sources fixes, sources mobiles **[10]**.

1.3.1. Générale

Les sources générales de la pollution atmosphérique sont de deux types. Il existe une pollution naturelle et une pollution anthropique. Ces sources peuvent être naturelles ou liées à l'activité humaine, ce qui à une importance certaine sur leur répartition globale autour de la planète. Toutefois, comme l'atmosphère est un système dynamique extrêmement complexe, et malgré le grand nombre d'études menées sur le sujet, les estimations des émissions à l'échelle de la planète sont parfois divergentes, ce qui rend difficile l'estimation de la part naturelle et de la part anthropique de la pollution.

1.3.1.1. Les sources naturelles

La pollution d'air naturelle, c'est une pollution qui est toujours avec nous Tout d'abord, l'émission dans l'atmosphère de polluants gazeux ou particulaires peut être d'origine naturelle (volcans, érosion des roches, remise en suspension de poussières du sol, embruns marins, ..). Elle génère par exemple du soufre, du dioxyde d'azote, du dioxyde de carbone, …etc. Nous les classerions comme pollution d'air naturelle, qui est toujours été avec nous. Les sources naturelles de pollution de l'air sont définies comme sources ne causées pas par les gens dans leurs activités. Ces sources naturelles de pollution sont responsables, selon les estimations du "United Nations Environment Programme" de 1983 de l'émission de 80 à 288 millions de tonnes d'oxyde de soufre par an (contre 79 millions pour les sources anthropiques) et de 20 à 90 millions de tonnes d'oxydes d'azote par an (contre 22 millions pour les sources anthropiques **[11]**.

1.3.1.2. Les sources anthropiques

On peut dire que le quasi totalité des activités humaines est une source de pollution de l'air, qui apparaît essentiellement sous deux formes de substances polluantes : Gazeuse et solide

- Gazeuse : présence de gaz nouveaux ou augmentation de la proportion d'un gaz existant naturellement. On estime que les gaz représentent 90 % des masses globales de polluants rejetées dans l'air.

-Solide : mise en suspension de particules (poussière, fumées).On estime que les gaz représentent 90 % des masses globales de polluants rejetées dans l'air et les particules les 10%restants **[12]**.

La teneur en dioxyde de carbone, dont la valeur au cours des 400.000 dernières années avait oscillé entre 180 ppm et 280 ppm a brusquement dépassé 360 ppm **[13]**.D'après (United Nations Environment Programme), en 1992, les industries des 50 principaux pays émetteurs de CO_2 ont libéré plus de 20 milliards de tonnes de ce gaz dans l'atmosphère (Les Etats-Unis arrivent en tête avec 4,88 milliards de tonnes, la France est en 11ème position avec 362 millions

de tonnes) **[14]**. Mais les conséquences les plus immédiates de cette pollution anthropique se rencontrent au niveau local et affectent le bien-être d'une grande part de la population mondiale qui vit en milieu urbain.

1.3.2. Combustion

La combustion est la plus largement utilisée, et encore l'un des plus comprendre, mis les réactions chimiques à notre disposition. La combustion est définie comme l'union rapide d'une substance avec l'oxygène accompagnée par l'évolution de lumière et chaleur **[15]**. Nous utilisons premièrement la combustion pour la chaleur en changeant l'énergie chimique potentiel du combustible à l'énergie thermique. Nous faisons ceci dans une chaudière de maison, ou un moteur d'automobile.

Les problèmes avec les réactions de combustion se produisent parce que le processus aussi produit beaucoup d'autres produits secondaires, la plupart sont appelés des polluants de l'air.

Ces polluants sont le monoxyde de carbone, dioxyde de carbone, oxydes de soufre, oxydes d'azote, fumés, cendres, métaux, aldéhydes, acides, hydrocarbures non brûlés, et beaucoup autres. Seulement dans les décennies passées **[10]**.

1.3.3. Sources fixes

Les sources fixes correspondent aux installations de combustion individuelles, collectives ou industrielles (fournissant chauffage et énergie), les installations d'incinération des déchets (notamment ménagers) **[16]**.

Les principaux polluants des sources fixes dérivent de l'oxydation du carbone organique présent dans les combustibles, d'impuretés (soufre) et de l'azote de l'air **[17]**.Ce sont donc les oxydes de carbone (dioxyde-CO_2 et monoxyde-CO), le dioxyde de soufre (SO_2), les oxydes d'azote (NO_x) et les particules en suspension.

1.3.4. Sources mobiles

Les polluants des sources mobiles proviennent surtout des effluents d'échappement des moteurs, mais aussi de l'évaporation des essences. Les principaux polluants sont le CO et le CO_2, le NO et les hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM), les particules fines en suspension (PS), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et le SO_2 pour le moteur diesel, le plomb (Pb) pour les moteurs à essence plombée, les hydrocarbures et les COV (aldéhydes, acides organiques) notamment avec l'arrivée des biocarburants.

Les polluants émis par ces différentes sources sont très nombreux, imparfaitement connus et impossibles à analyser tous. Pour surveiller la pollution atmosphérique, il a donc été nécessaire de ne retenir que quelques «indicateurs » (ou traceurs) de pollution, sélectionnés en

fonction de divers critères: types de sources, facilité du mesurage, nocivité potentielle, évolution chimique.

1.4. Les polluants atmosphériques

Les polluants atmosphériques se produisent dehors ou dans les logements, et peuvent être naturels ou synthétiques. La pollution atmosphérique à l'extérieur, parfois appelée la pollution atmosphérique ambiante, se produit dans des zones urbaines et rurales, bien qu'un mélange différent des polluants atmosphériques puisse être trouvé dans la campagne comparé à celui trouvé dans une ville. Les polluants atmosphériques urbains typiques venant des activités de l'homme incluent les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone, le dioxyde de soufre et les hydrocarbures et les particules en suspension. Tous ces polluants s'appellent des polluants primaires parce qu'ils sont émis directement dans l'atmosphère. L'ozone est un polluant secondaire, formé dans le ciel en raison de réactions chimiques **[18]**.

1.4.1. Les polluants gazeux

Quatre gaz sont les principaux responsables de la pollution:

- L'ozone (O3)

le bon et le mauvais. La couche d'ozone, située à haute altitude dans la stratosphère à 30 km au dessus du sol, est vitale car elle filtre les rayons ultraviolets. C'est le bon ozone. Le mauvais ozone se trouve dans la basse atmosphère : la troposphère située entre le sol et 15 km d'altitude. C'est alors un polluant issu de transformations chimiques dans l'air entre les oxydes d'azote et les composés organiques volatils (solvants...).**[19]** Ces réactions sont fortement stimulées par le rayonnement solaire. L'ozone a des effets sur la santé, les végétaux, les matériaux et le climat (c'est un gaz à effet de serre).

-Les oxydes d'azote (NO_x)

Les (NO_x) regroupent deux espèces : le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO_2). La majorité des NO_x est émise sous forme de NO, lequel est transformé rapidement en NO_2 par des processus chimiques.**[20]** Le NO est formé par combinaison de l'azote (N_2) et de l'oxygène (O_2) lors de processus qui nécessitent de hautes températures (combustion, éclairs). Le temps de vie des NO_x est de l'ordre de la journée **[21]**.

-Le dioxyde de soufre (SO_2)

Composé d'un atome de soufre et de deux atomes d'oxygène, le SO_2 est un gaz incolore, d'odeur piquante très irritante, plus lourd que l'air. Il est hydrosoluble et donne par réaction avec la vapeur d'eau l'acide sulfurique.

Le dioxyde de soufre ou anhydride sulfureux est le plus abondant des composés soufrés. Il provient de la combustion des combustibles fossiles (charbons, fiouls) au cours de laquelle les impuretés soufrées sont oxydées par l'oxygène de l'air en SO_2.

Ce polluant est émis par des sources mobiles et des procédés industriels (fabrication de l'acide sulfurique et des plastiques, raffinage du pétrole, grillage et frittage de minerais sulfureux tels que blende, galène, pyrites, etc.). Globalement, on peut considérer que la production thermique est le principal responsable des émissions de dioxyde de soufre dans l'atmosphère. Ainsi, la combustion d'une tonne de fuel lourd de qualité moyenne est à l'origine d'une émission d'environ 50 kg de dioxyde de soufre **[22]**.

-Le monoxyde de carbone (CO)

C'est un gaz combustible, détonnant à faible concentration, particulièrement sournois, toxique et très dangereux par ses effets irréversibles (Il détruit les cellules nerveuses de façon irrémédiable pouvant être mortel suivant la concentration et l'activité soutenue durant le temps d'inhalation**[22]**.

1.4.2. Les polluants particulaires

Ce sont des polluants chimiques comme les métaux lourds et les composés organiques volatils (COV) qui comprennent des produits nocifs tels le benzène et les hydrocarbures aromatiques Polycycliques (HAP).

1.5. Effets de la pollution atmosphérique

1.5.1. Effets sur la santé

Les polluants agissent sur la santé peuvent avoir des effets selon diverses échelles, ces effets sur la santé peuvent se répartir en effets aigus (à court terme) et effets chroniques (à long terme). **[23]**.

Les polluants peuvent agir à différents niveaux du corps humain :(voir tableau 1.1) **[24]**.

Tableau 1.1: Effets et des polluants sur la santé humaine.

Origine	Effets sur la santé
Oxydes d'azotes (NO_x) Le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote(NO_2) sont principalement produits par les transports et les centrales thermiques.	Irritations de l'appareil respiratoire, crises d'asthme et bronchiolite
Dioxyde de soufre (SO_2) Provient de la combustion du fuel, charbon et diesel.	Très soluble, rapidement absorbé par les surfaces humides de la bouche, du nez. Irritant respiratoire, contribue à l'exacerbation des troubles bronchiques
Monoxyde de carbone (CO) Produit par les moteurs à essence et la circulation routière.	Atteinte du système nerveux central et des organes sensoriels.
Ozone (O_3) Produit dans la basse atmosphère par interaction entre les ultraviolets et les gaz tels que CO, SO_2 ,NO_x ,COV et hydrocarbures.	Atteint facilement les alvéoles pulmonaires, toux, altération pulmonaire surtout chez l'enfant et l'asthmatique. Effets aggravés par l'exercice physique.
Composés organiques volatils (COV) Proviennent des hydrocarbures (benzène, 1-3butadiène) émis dans les gaz d'échappement et des solvants.	Irritants pour les yeux, gorge, nez, poumons. Capacité respiratoire diminuée. Risques d'effets cancérogènes.
Particules en suspension (Ps) Produits de combustion industrielle, chauffage et incinération de déchets. Les particules les plus fines sont émises par les moteurs diesel.	Très dangereuses même à de faibles concentrations. Altération de la fonction respiratoire chez l'enfant. Propriétés cancérogènes pour les composés émis par les moteurs diesel.
Plomb (Pb) Provient des hydrocarbures plombés.	Modifie la composition du sang en gênant la fabrication de l'hémoglobine.

1.5.3. 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» **[25]**.Le tableau 1.2 résume les effets et les contributions des principaux polluants atmosphériques sur l'environnement **[26]**.

Tableau 1.2 : Effets des principaux polluants sur l'environnement

Origine	Effets sur l'environnement
Oxydes d'azotes (NO_x) Le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO_2)	Participation au phénomène des pluies acides Participation à la formation de l'ozone troposphérique (celui des basses couches) Atteinte de la couche d'ozone stratosphérique Participation à l'augmentation de l'effet de serre
Dioxyde de soufre (SO_2)	Participation au phénomène des pluies acides par transformation en acide sulfurique au contact de l'humidité de l'air. Dégradation de la pierre et des matériaux de nombreux bâtiments
Monoxyde de carbone (CO)	Participation à la formation de l'ozone troposphérique Dans l'atmosphère, il contribue à l'augmentation de l'effet de serre par transformation en dioxyde de carbone CO_2.
Ozone (O_3)	Diminution des rendements agricoles Dégradation des matériaux (caoutchouc par exemple) Participation à l'augmentation de l'effet de serre.
Composés organiques volatils (COV) dont benzène	Participation à la formation de l'ozone troposphérique (rôle majeur avec les oxydes d'azote) Participation indirecte à l'augmentation de l'effet de serre (par intervention dans des mécanismes conduisant à la formation des gaz à effet de serre).
Particules en suspension (PM10)	Effets de salissure des monuments et bâtiments.
Métaux (Pb..etc)	Contamination des sols et des aliments Accumulation dans les organismes vivants et perturbation des mécanismes et équilibres biologiques.

1.6. Les solutions

On a trop souvent tendance à oublier que la seule solution pour diminuer la pollution de l'air est de réduire les émissions de polluants. Malheureusement, pour des raisons socio-économiques, culturelles ou politiques, cette réduction est difficile à mettre en œuvre et elle nécessite du temps pour trouver des solutions alternatives. C'est pourquoi il est également indispensable de déterminer les conséquences de la pollution et de lutter contre ces conséquences en mettant en place des politiques adaptées. Nous allons donc aborder ces deux aspects de la lutte contre la pollution atmosphérique. En conclusion, nous exposerons la place de la modélisation au sein de ce système de solutions **[27]**.

1.6.1. La réduction des émissions

1.6.1.1. L'aspect technologique

La réduction des émissions de polluants d'origine anthropique passe généralement par la mise en œuvre de solutions technologiques alternatives. Les améliorations d'un procédé peuvent porter sur :

-les produits utilisés

On remplace un produit polluant par un produit moins polluant.

-la consommation d'énergie

Il est possible de diminuer la consommation d'énergie d'un procédé et par conséquent la pollution générée par la production de cette dernière, en optimisant le rendement d'un procédé.

-les traitements des effluents

Au jour d'aujourd'hui, il existe des techniques, utilisant des procédés de filtrage ou de dépoussiérage des fumées par exemple, qui permettent le retraitement de certains rejets que l'on ne peut pas complètement éliminer**[21]**.

1.6.1.2. L'aspect législatif

Pour inciter à la réduction des émissions, des mesures législatives de plus en plus sévères ont été adoptées, qui définissent les seuils à ne pas dépasser en matière de pollution, imposent un suivi et un contrôle des systèmes polluants et limitent ou interdisent l'utilisation de certaines substances toxiques. Les polluants étant transportés au gré des vents sur toute la planète, l'efficacité des mesures législatives passe nécessairement par une politique mondiale uniforme.

1.6.1.3. L'aspect économique

D'un point de vue économique, la réduction des émissions est difficile à mettre en œuvre.

En effet, les technologies existantes sont généralement le fruit d'une évolution visant à obtenir, à moindre coût, un rendement optimal à court terme. Les solutions alternatives sont donc souvent plus coûteuses et moins bien adaptées. De la même manière, l'organisation de notre société s'est mise en place sans prendre en compte la contrainte environnementale et un certain nombre d'équilibres socio-économiques se sont établis **[27]**.

1.6.2. La gestion de la pollution

Pour tenter de limiter les effets de la pollution atmosphérique, une gestion de la pollution a été mise en place, basée sur la prévention des risques pour les populations. Cette gestion comprend la surveillance, l'information du public et les mesures d'urgence **[27]** :

– La surveillance: La surveillance de la qualité de l'air est à la base de la gestion de la pollution. Des réseaux de mesure se sont développés dans toutes les grandes agglomérations de puis plus de vingt ans et la loi sur l'air prévoit leur extension pour obtenir une couverture nationale à l'horizon 2000.

– L'information: Pour répondre aux interrogations de la population concernant la qualité de l'air, les informations recueillies dans les réseaux de surveillance sont diffusées par les médias. Cela permet en particulier aux personnes à risques d'adapter leur activité au niveau de pollution.

– Les mesures d'urgence: Pour les cas de forte pollution, une série de seuils d'alerte permet de déclencher des mesures d'urgence proportionnées. Ces mesures portent sur la réduction des émissions (consignes aux industriels, circulation alternée, ...) et sur la protection des populations (suppression des cours de gymnastique, évacuation de la population, ...).

La gestion de la pollution a pour objectif d'éviter que les épisodes de forte pollution n'aient des conséquences trop dramatiques. Elle a également pour but d'identifier les zones les plus polluées, sur lesquelles un effort de réduction des émissions pourra être entrepris. Pour satisfaire ces objectifs, les réseaux de mesure peuvent s'appuyer sur les outils de modélisation.

1.6.3. La place de la modélisation

Le rôle de la modélisation de la dispersion atmosphérique peut paraître secondaire par rapport aux mesures législatives de réduction des émissions. Pourtant cette dernière est une composante importante de la gestion de la pollution pour les pouvoirs publics, mais aussi pour les exploitants de sites industriels. La modélisation permet de mieux comprendre les phénomènes physiques mis en jeu et constitue un outil indispensable pour concevoir les moyens de lutte contre la pollution**[5]**.

1.6.3.1. Les enjeux de la modélisation

La modélisation est un outil utile à plusieurs niveaux dans la gestion de la pollution atmosphérique.

Analyse et exploitation des mesures

La modélisation intervient tout d'abord dans la *qualification des réseaux de mesure*. Compte tenu de la variabilité spatiale de la pollution, il est nécessaire d'évaluer la représentativité des mesures effectuées par les capteurs fixes existants et de choisir l'emplacement optimal des futurs capteurs. En cas de dépassement d'un seuil par un capteur, il serait en effet intéressant de pouvoir fournir le pourcentage de la population effectivement atteinte par le niveau de pollution mesuré. Les outils de modélisation jouent ensuite un rôle essentiel dans *l'exploitation des données*. Ils permettent en particulier d'étudier des épisodes passés de forte pollution, d'interpoler et d'extrapoler les concentrations mesurées, de fournir une cartographie des zones polluées, d'évaluer l'exposition réelle de la population **[28]**, de déterminer la pollution à l'intérieur des bâtiments ou encore de constituer des bases de données pour les enquêtes épidémiologiques.

Aide à la décision -Étude de scénarios

L'un des principaux intérêts de la modélisation, en particulier la modélisation déterministe, est de pouvoir étudier les modifications engendrées par un changement des conditions d'un problème. Il est alors possible de simuler des scénarios divers et de prévoir les conséquences des politiques à long terme en matière de lutte contre la pollution (pastille verte, écotaxe), d'aménagement du territoire, d'urbanisme (pollution dans les villes de demain, effet de la végétation urbaine sur la dispersion des polluants) ou de transport (amélioration des carburants, évolution du parc automobile).Sur des aménagements particuliers (implantation d'une usine, réorganisation du trafic dans un quartier), des études d'impact sont fréquemment réalisées afin d'évaluer les conséquences attendues sur l'environnement et la qualité de l'air.

La modélisation constitue également un outil de diagnostic de la pollution actuelle. Cela concerne l'estimation du coût réel de la pollution, l'évaluation de la contribution relative des différentes sources de polluants, des différents carburants, l'évaluation de l'efficacité des différentes politiques mises en œuvre **[5]**.

Prévision

La prévision de la pollution atmosphérique est un enjeu à long terme. Quelques modèles de prévision sont progressivement mis en place au niveau des agglomérations. Ils fournissent des informations essentiellement qualitatives sur la présence ou non d'un pic de pollution dans les heures qui suivent.

1.6.3.2. Une hiérarchie de modèles

Les différentes approches

Il est possible de différencier deux types d'approches en matière de modélisation de la pollution atmosphérique. L'approche statistique, basée sur une analyse des corrélations entre différentes variables, permet dans certains cas de fournir des informations qualitatives sur l'évolution de la pollution. L'usage de cette méthode est toutefois restreint, compte tenu de la complexité du problème et du nombre de paramètres mis en jeu. De plus, les modèles statistiques ne peuvent être utilisés que dans la configuration pour laquelle ils ont été mis au point. La modélisation déterministe repose sur une formulation des mécanismes physiques et sur une résolution des équations qui régissent la pollution de l'air. Les possibilités offertes par cette approche sont donc très larges. Le développement de ces modèles nécessite cependant une compréhension détaillée des phénomènes et leur mise en œuvre est généralement plus lourde que pour les modèles statistiques. On peut alors noter l'intérêt des approches déterministes simplifiées, qui associent les possibilités offertes par les modèles déterministes à la rapidité d'utilisation des approches statistiques **[27]**.

La nécessité d'une hiérarchie

La pollution présente à un endroit donné provient des sources situées à proximité mais aussi de celles situées à des distances beaucoup plus importantes, pouvant atteindre plusieurs milliers de kilomètres (exemple de l'accident de Tchernobyl). Il est alors possible de décomposer la concentration mesurée dans une rue en une somme de contributions des sources correspondant à différentes échelles :

$$C = C_{continent} + C_{régional} + C_{agglomération} + C_{quartier} + C_{rue} \qquad (1.1)$$

La difficulté de modéliser la pollution atmosphérique réside dans le fait que de manière générale, aucun des termes de l'équation précédente n'est vraiment prépondérant devant les autres. En fait, la contribution relative de ces différents termes dépend de l'endroit considéré (situé à proximité ou non des grandes sources d'émissions), du type de polluant (l'ozone peut être transporté sur de très grandes distances alors qu'il a tendance à disparaître au cœur des agglomérations) et des conditions météorologiques. Aucune échelle ne peut donc être négligée et il est nécessaire de modéliser l'ensemble du spectre atmosphérique. Ces contraintes ont conduit au développement de hiérarchies de modèles, fonctionnant à des échelles différentes et échangeant des informations concernant leurs conditions aux limites. Pour chaque modèle, la dimension du domaine d'étude et sa résolution constituent respectivement la borne supérieure et la borne inférieure de la gamme d'échelles résolues. Un

modèle ne pourra donc calculer que le terme de l'équation 1.1 correspondant à l'échelle considérée.

Tableau 1.3 : Hiérarchie de modèles à des échelles différentes. Exemple de décomposition et caractéristiques de chaque échelle (dimension et résolution)**[27]**.

Échelle	Dimension du domaine	Résolution
Continentale	4000 km	40 km
Régionale (méso)	200 km	2 km
Intermédiaire (sub-méso)	10 km	100 m
Locale-quartier	500m	5 m
Locale-rue	25m	25 cm

Une grande partie des travaux de recherche sur la modélisation de la pollution atmosphérique a porté sur l'étude des échelles continentales et régionales. Les échelles intermédiaires et locales ont souvent suscité moins d'intérêt. Pourtant, pour de nombreuses applications pratiques (cartographie de la pollution, exposition des personnes), il est nécessaire de décrire la pollution avec une résolution suffisamment fine. De plus, la modélisation à l'échelle régionale utilise certaines données qui ne sont disponibles qu'à l'échelle locale (dimensions des bâtiments, trafic et émissions) ; la modélisation à petite échelle permet alors de "moyenner" ces données pour les intégrer dans les modèles à grande échelle. C'est pour ces différentes raisons qu'au cours de notre travail, nous nous sommes intéressés au développement d'outils de modélisation de la pollution à l'échelle locale d'une rue et d'un quartier **[27]**.

Conclusion

Les éléments présentés au cours de ce chapitre montrent que la pollution atmosphérique est un problème de société particulièrement complexe. Les polluants mis en jeu sont nombreux et sont émis par des mécanismes très divers. Les conséquences de la pollution sont variées et concernent l'environnement et la santé humaine. L'amélioration de la qualité de l'air nécessite la mise en œuvre d'un système de solutions associant la réduction des émissions à la gestion des conséquences de la pollution.

Cette introduction à la problématique de la pollution de l'air a également permis de resituer, dans un contexte général, le rôle et les enjeux de la modélisation. L'objectif de ce travail de recherche est de contribuer au développement de cette modélisation à l'échelle locale d'une rue.

CHAPITRE 2 : MODÉLISATION DE LA DISPERSION DES POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUE EN MILIEU URBAIN

2.1. La couche de surface urbaine

2.1.1. Introduction

La couche limite atmosphérique(CLA) ne représente qu'une petite partie de l'atmosphère (sa hauteur étant de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres), mais elle joue un rôle important dans de nombreux processus physiques de la haute atmosphère. C'est en effet dans la CLA que sont émis la plupart des polluants et la surface terrestre joue un rôle primordial dans le bilan énergétique de l'atmosphère. En outre, les flux turbulents, essentiellement produits par les forçages dynamiques et thermiques du sol, y déterminent les échanges entre la surface et l'atmosphère libre. La structure de la CLA est maintenant bien comprise et une description peut en être trouvée dans différents livres ou articles de référence **[29,30]**.

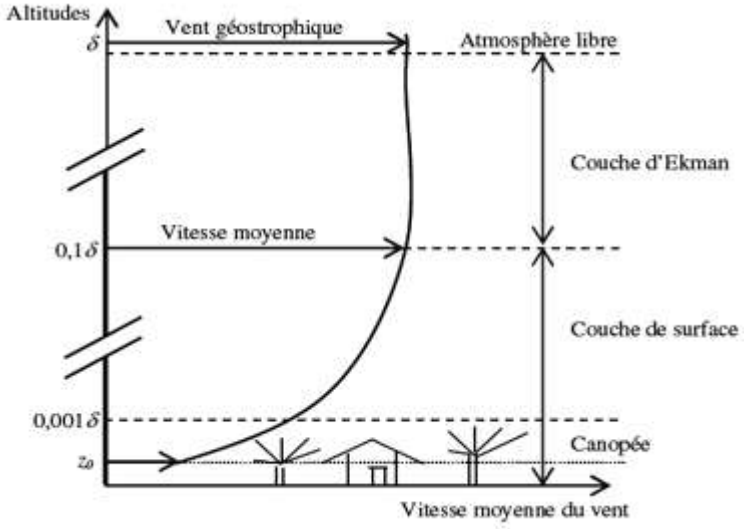


Figure 2.1: Structure de la couche limite atmosphérique **[29]**.

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

2.1.2. Structure de la couche de surface urbaine

La Figure (2.2) rappelle schématiquement la structure de la couche limite atmosphérique, appelée couche limite urbains(CLU) dans le cas particulier de l'atmosphère au- dessous des villes.la **couche limite de surface** (CLS), d'une hauteur de 10 à 100m (˜ 0.1*zi*, où *zi* est la hauteur de la couche limite atmosphérique), est la couche en contact avec le sol, où les forces de Coriolis peuvent être négligées.

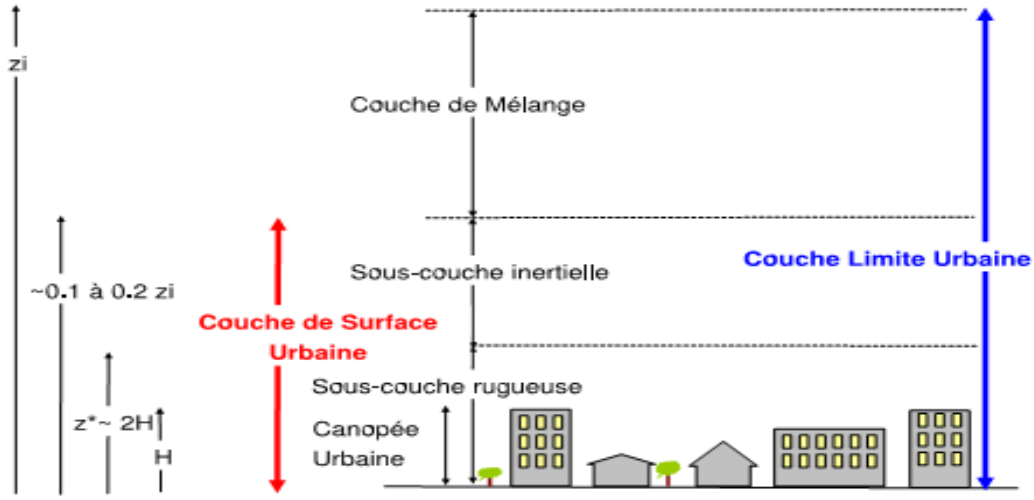


Figure 2.2: Structure de la Couche Limite Urbaine : la couche limite de surface représente ~0.1 à 0.2 zi de la couche limite **[34]**.

La couche de surface urbaine est divisée en plusieurs sous-couches caractéristiques des propriétés moyennes et turbulentes de l'écoulement (Figure 2.2) :

- **La sous-couche inertielle**

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

- **La sous-couche rugueuse**

S'étend du sol à une hauteur z_* et est caractérisée par une grande inhomogénéité de l'écoulement et des échanges thermiques **[31]**.C'est une couche de transition, directement influencée par des échelles liées aux éléments de rugosité de la surface et où les propriétés de l'écoulement turbulent sont souvent tridimensionnelles.

- **La canopée urbaine**

La canopée urbaine est la partie la plus basse de l'atmosphère qui se situe entre le sol et le niveau des toits des bâtiments. Si pour certains auteurs, elle doit être considérée comme une sous-couche à part entière **[32,33]**, nous la présentons ici comme une partie de la sous-couche rugueuse, selon Roth, 2000 **[34]** qui respecte ainsi le formalisme adopté pour les canopées végétales, proposé par Raupach et al,1980 **[31]**. La canopée urbaine est caractérisée par une surface accrue d'une grande inhomogénéité et de structure tridimensionnelle. Les éléments de rugosité y sont de forte densité, de hauteurs et espacements variables, à l'origine des propriétés dynamiques inhomogènes et d'importantes forces de frottement, de nature différentes (bâtiments composés de divers matériaux, végétation) modifiant aussi les échanges thermiques, d'humidité et de polluants.

2.1.3. Dispersion des polluants dans l'atmosphère urbaine

La dispersion des polluants dans la couche de surface urbaine est une conséquence directe de la turbulence atmosphérique : une caractéristique importante de la turbulence est en effet sa capacité à transporter et à mélanger beaucoup plus efficacement qu'un écoulement laminaire comparable **[35]**. La dispersion atmosphérique dépend alors fortement de la stabilité thermique. En atmosphère stable, les mouvements verticaux sont atténués et la dispersion est réduite. En atmosphère instable, la dispersion est favorisée par les mouvements convectifs. Elle dépend également de la turbulence mécanique et ainsi des caractéristiques de la surface. Il apparaît donc important dans les études de dispersion de décrire avec précision les écoulements turbulents.

2.1.4. Ecoulements moyens et turbulents dans la couche de surface

2.1.4.1 Les équations fondamentales dans la couche de surface

Les écoulements dans la couche de surface sont régis par les équations fondamentales de la dynamique des fluides **[29,30]** adaptées à l'échelle de la partie basse de l'atmosphère. Ces équations sont appliquées à petite échelle.

-Conservation de la masse

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

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \qquad (2.1)$$

-Conservation de la quantité de mouvement

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho}\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \qquad (2.2)$$

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

(A) : est le terme d'inertie

(B) : est le terme d'advection

(C) : est le terme gradient de pression

(D) : est le terme de gravité

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

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

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right] - \frac{2}{3}\mu\left[\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right]\delta_{ij}\right) \qquad (2.3)$$

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

-Equation d'état et conservation de l'énergie

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

$$P = \rho R^* T_\upsilon \qquad (2.4)$$

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

$$T_\upsilon = T(1+0.61q) \qquad (2.5)$$

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

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

$$\theta = T(\frac{p_s}{p})^{\frac{R^*}{C_p}} \qquad (2.6)$$

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

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

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_j \frac{\partial \theta}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x_j}\right) + S_\theta \qquad (2.7)$$

où λ est la conductibilité thermique moléculaire et S_θ un terme source ou puits qui peut inclure la chaleur latente lors des éventuels changements de phases ainsi que la divergence des flux radiatifs.

-Equation de transport d'un polluant

La dispersion d'un polluant i de concentration c_i est décrite par l'équation d'advection-diffusion :

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial c_i}{\partial x_j} = D_{mi} \frac{\partial^2 c_i}{\partial x_j \partial x_j} + R_i(c_1, c_2, \dots, c_N, T) + S_i \qquad (2.8)$$

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

2.1.4.2. Prise en compte de la turbulence

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

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

$$u_i = \overline{u_i} + u'_i \qquad (2.9.a)$$

$$\rho = \bar{\rho} + \rho' \qquad (2.9.b)$$

$$p = \bar{p} + p' \qquad (2.9.c)$$

$$\theta = \bar{\theta} + \theta' \qquad (2.9.d)$$

$$c_i = \overline{c_i} + c_i' \qquad (2.9.e)$$

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

$$\overline{\upsilon}' = 0 \qquad (2.10.a)$$

$$\overline{\upsilon\omega} = \bar{\upsilon}\bar{\omega} + \overline{\upsilon'\omega'} \qquad (2.10.b)$$

$$\overline{\upsilon + \omega} = \bar{\upsilon} + \bar{\omega} \qquad (2.10.\text{c})$$

$$\overline{a\upsilon} = a\,\bar{\upsilon} \qquad (2.10.\text{d})$$

$$\frac{\overline{\partial \upsilon}}{\partial x_i} = \frac{\partial \bar{\upsilon}}{\partial x_i} \qquad (2.10.\text{e})$$

La valeur moyenne d'une variable peut être définie de différentes manières **[36]**: la moyenne temporelle, spatiale et d'ensemble. La moyenne temporelle est la plus utilisée dans l'analyse d'observations à partir d'un point fixe : elle est la moyenne arithmétique d'une grandeur discrète observée un certain nombre de fois sur une période *T* ou l'intégrale d'une grandeur continue divisée par *T*. La moyenne spatiale est de même obtenue par la moyenne arithmétique d'un nombre fini d'observations sur un certain espace. Les moyennes temporelle et spatiale ainsi définies sont subjectives, dans la mesure où doivent être choisies une période *T* ou une échelle spatiale *L*.

-Conservation de la masse

En prenant en compte les fluctuations des différentes variables contenues dans les équations (2.9) et par application des propriétés (2.10) et l'approximation de

Boussinesq dans la couche limite ($\rho = \bar{\rho}$) les équations de conservation s'écrivent comme suit :

$$\frac{\partial \bar{\rho}\bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \qquad (2.11)$$

-La conservation de la quantité de mouvement

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

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j}\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\bar{\rho}}\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\bar{\rho}}\frac{\partial \overline{\tau_{ij}}}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_j u'_i}}{\partial x_j} \qquad (2.12)$$

-Conservation de l'énergie

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \overline{u_j}\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = \frac{1}{\overline{\rho}\ C_P}\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} - \overline{\rho} C_P \overline{u'_j \theta'}\right) + \overline{S_\theta} \qquad (2.13)$$

-Equation de transport d'un polluant

$$\frac{\partial \overline{c_i}}{\partial t} + \overline{u_j}\frac{\partial \overline{c_i}}{\partial x_j} = D_{mi}\frac{\partial^2 \overline{c_i}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_j c'_i}}{\partial x_j} + \overline{S_i} \qquad (2.14)$$

Fermetures turbulentes

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

$$\overline{u'_j u'_i} = -\nu_t\left[\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial \overline{u_k}}{\partial x_k}\right] \qquad (2.15.a)$$

$$\overline{u'_j \theta'} = -\frac{\lambda_t}{\bar{\rho} C_P}\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} \qquad (2.15.b)$$

$$\overline{u'_j c'_i} = -K_t\frac{\partial \overline{c_i}}{\partial x_k} \qquad (2.15.c)$$

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

-Pour la quantité de mouvement :

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

$$+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\nu + \nu_t)\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right)\right] \qquad (2.16)$$

-Pour l'énergie :

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \overline{u_j}\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = \frac{1}{\bar{\rho}C_P}\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\lambda + \lambda_t)\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j}\right] + \overline{S_\theta} \qquad (2.17)$$

-pour conservation d'un polluant

$$\frac{\partial \overline{c_i}}{\partial t} + \overline{u_j}\frac{\partial \overline{c_i}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(D_{mi} + \frac{\nu_t}{Sc_t}\right)\frac{\partial \overline{c_i}}{\partial x_j}\right] + \overline{S_i} \qquad (2.18)$$

ν , λ et D_i définissent des propriétés du fluide, ν_t , λ_t et K_t définissent des propriétés de l'écoulement turbulent et dépendent donc fortement des conditions de l'écoulement **[36]**.

2.1.5. Influence de la structure urbaine

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

2.1.5.1. Effets dynamiques

Les principaux effets dynamiques sont un ralentissement local de l'écoulement, dû à la résistance que les obstacles exercent sur le vent, et une augmentation de la turbulence, due à la forte rugosité caractéristique des surfaces urbaines. Les bâtiments peuvent aussi selon leur agencement, avoir pour effet de dévier verticalement et horizontalement l'écoulement qui les surplombe **[37]**.A l'intérieur de la canopée, les effets dynamiques peuvent être très complexes : dans le sillage des bâtiments, se développent des zones de recirculation qui dépendent de la dimension et de l'espacement des obstacles **[33]** sont propices au mélange, à la diffusion de quantité de mouvement et à la dissipation de l'énergie turbulente.

2.1.5.2. Effets thermiques

Le climat urbain diffère de celui des zones rurales environnantes. Au bilan énergétique, doit s'ajouter un flux anthropique caractérisant les effets du trafic, du chauffage domestique ou des productions industrielles **[33]**.

En outre, le rayonnement est modifié par la structure urbaine : le rayonnement solaire absorbé y est plus important, à cause de la surface accrue du milieu ainsi que des réflexions multiples sur les parois des bâtiments.

Les modifications des l'écoulement entraîne une modification des flux convectifs et ainsi des échanges de chaleur.

2.1.5.3. Effets sur la dispersion

La dispersion des polluants dépend fortement des conditions météorologiques locales : A l'échelle de la ville, l'augmentation de la turbulence et la diminution de la stabilité de la couche limite au-dessus des zones urbaines ont pour conséquence de modifier la dispersion.

A l'échelle de la rue, les effets sont plus complexes car ils sont fortement tributaires de l'agencement des obstacles. Si les zones de recirculation qui se forment dans le sillage des bâtiments ont tendance dans la plupart des larges rues à renouveler l'air en augmentant la ventilation, ce n'est pas le cas dans les rues étroites, où la formation d'un vortex stable a pour effet contraire de piéger les polluants. Dans les rues relativement longues et sans intersection, il a également été montré que les vents d'incidence perpendiculaire étaient plus efficaces pour diminuer les concentrations de polluants que les vents d'incidence parallèle **[38]**.

2.1.6. Conclusion

Cette partie décrit la couche de surface urbaine, qui est la sous partie de l'atmosphère dans laquelle se situe notre étude, en présentant les différents phénomènes physiques que nous allons prendre en compte par la suite. La structure particulière des villes y influence fortement les écoulements turbulents et la dispersion des polluants.

2.2. Outils de modélisation

2.2.1. Modélisation numérique

La modélisation numérique repose sur une résolution approchée des équations du problème par des méthodes d'analyse numérique. Cette approche est aujourd'hui largement répandue dans toutes les disciplines scientifiques et son développement est associé à l'évolution technologique de l'informatique. La simulation numérique de la mécanique des fluides, et en particulier de la turbulence, constitue un problème très complexe.

Depuis plusieurs décennies de nombreux modèles ont été développés de manière à résoudre ce problème des écoulements turbulents et on se propose dans cette introduction de présenter les différentes approches permettant la résolution des équations de Navier-Stokes **[21]**.

2.2.1.1. La Simulation Numérique Directe (Direct Numerical Simulation ou DNS) :

Cette méthode est certainement la plus proche d'une résolution exacte. Elle consiste à résoudre les équations de Navier-Stokes dans leur forme la plus générale, en considérant toutes les échelles de turbulence. Son utilisation est limitée à des nombres de Reynolds peu élevés (quelques milliers) et génère des temps de calcul excessivement longs, limitant son usage à des études fondamentales sur les mécanismes de la turbulence **[39,40]** .

2.2.1.2. La Simulation des Grandes Echelles (Large Eddy Simulation ou LES)

Cette approche est une méthode de simulation tridimensionnelle permettant d'obtenir une description instationnaire fine des écoulements turbulents par résolution numérique des équations de Navier-Stokes filtrées. L'approche LES se propose de ne simuler que les plus grandes échelles turbulentes de l'écoulement, couplée à une paramétrisation statistique de l'effet des petites structures. La résolution spatiale du maillage constitue un filtre qui permet de ne modéliser que les tourbillons dont le diamètre est supérieur

à la taille de la maille. La contribution des petites structures non résolues est prise en compte par un modèle de sous maille **[5]**.

2.2.1.3. La modélisation statistique des équations de Navier-Stokes (Reynolds-Average Navier-Stokes équations ou équations RANS) :

Cette approche de modélisation de la turbulence est grandement utilisé pour simuler des écoulements turbulents dans des configurations complexes. Elle est basée sur l'utilisation de la moyenne de Reynolds. Cette opération de moyenne permet de décomposer toute quantité en une valeur moyenne et une fluctuation. Si cette opération de moyenne est appliquée aux équations du mouvement d'un fluide **[5]**.

On obtient les équations de Navier-Stokes moyennées caractéristiques de l'approche RANS. Le problème étant non linéaire, des termes de corrélation des fluctuations de vitesse apparaissent dans ces équations. Il est alors nécessaire de paramétrer ces termes par un modèle de turbulence pour pouvoir résoudre le système RANS. Il existe une gamme très importante de modèles de turbulence, dont le modèle **k-ϵ** qui est certainement le plus répandu dans la littérature. Malgré son incapacité à détailler les caractéristiques de la turbulence, la modélisation statistique est un bon outil pour caractériser des champs moyens et notamment lorsque l'on s'intéresse aux écoulements autour de géométries complexes.

- ***Le modèle k- ϵ :***

Le modèle $k-\epsilon$ est largement utilisé dans la modélisation numérique des écoulements turbulents .En présence d'obstacles, il a été également observé l'apparition d'un point de stagnation à proximité des parois, où l'énergie cinétique turbulente et la viscosité turbulente sont surévaluées **[41,42]**.

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

$$\nu_t = C_\mu + \frac{k^2}{\epsilon} \qquad (2.2.1.1)$$

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

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial \mathrm{t}} + \overline{u_\imath}\frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon}\right)\frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\epsilon}\frac{\epsilon}{k}P_c - C_{2\epsilon}\frac{\epsilon^2}{k} \qquad (2.2.1.2)$$

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

$$P_c = \nu_t\left(\frac{\partial \overline{u_\imath}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right)\frac{\partial \overline{u_\imath}}{\partial x_j} + C_{3\epsilon}\frac{g_i}{\overline{\theta_v}}\frac{\nu_t}{Pr_t}\frac{\partial \overline{\theta_v}}{\partial x_i} \qquad (2.2.1.3)$$

et $\sigma_k, \sigma_\epsilon$, $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ et $C_{3\epsilon}$ sont des constantes. Afin de ne tenir compte que de la contribution positive des termes de flottabilité, $C_{3\epsilon}$ vaut 0 en atmosphère stable et 1en atmosphère instable **[43]**. Les autres constantes du modèle $k-\epsilon$ proposés par Launder et Spalding (1974) sont donnés dans le Tableau 2.1.

Tableau. 2.1: Valeurs des constantes du modèle $k-\epsilon$ **[44]**.

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

2.2.2. Différentes modèles de la dispersion atmosphérique

Tout comme pour la modélisation des écoulements, il existe différentes approches pour modéliser la dispersion en milieu urbaine. Il paraît cependant plus difficile de diviser les approches selon les échelles. En effet si les codes de type CFD sont surtout impliqués à l'échelle locale, les autres approches peuvent être appliquées à des échelles différentes. **[38]** font une revue très complète sur la modélisation de la qualité de l'air à l'échelle de la rue. Dans cette section, nous présentons trois modèles.

2.2.2.1. Les modèles gaussiens

Ces modèles permettent d'estimer la dispersion des gaz neutres ou passifs (de masse volumique très proche de celle de l'air).

Ils sont basés sur des solutions d'advection-diffusion c'est-à-dire l'équation d'évolution de la concentration couplées avec des paramétrisation semi empirique des principaux phénomènes physiques. Les modèles gaussiens fournissent une modélisation rapide adaptée aux études opérationnelles mais ne permettent pas de traiter directement des écoulements complexes. Cette limitation s'est vite avérée inacceptable pour bon nombre

d'études faisant intervenir des gaz dont la masse volumique était sensiblement plus importante que celle de l'air **[45]**.

2.2.2.2. Les modèles lagrangiens

Les modèles lagrangiens utilisent, pour modéliser le mouvement du fluide, une approche particulaire: la dispersion est évaluée par le calcul de plusieurs milliers de trajectoires de particules partant d'une même source. Les concentrations sont alors données par sommation du nombre de particules présentes dans un volume donné.

Par rapport aux modèles nécessitant un maillage, l'approche lagrangienne évite la diffusion artificielle initiale des sources ponctuelles dans la maille correspondante et les erreurs dues à la diffusion numérique. Elle permet de plus de n'effectuer les calculs que là où cela est nécessaire **[46]**.

2.2.2.3. Les modèles de la mécanique des fluides CFD

Ils reposent sur une approximation tridimensionnelle des Equations de la mécanique des fluides (Equation de Navier-Stokes) pour la partie dynamique et de l'équation de Conservation de la masse pour la dispersion des polluants. Mais ces relations sont établies par rapport à un référentiel fixe, à partir duquel a été défini un maillage tridimensionnel. Celui-ci peut se composer de parallélépipèdes de même taille ou de tailles différentes (maillage structuré), ou d'autres éléments disposés de façon non régulière tels que des tétraèdres (maillage non structuré). Les équations sont intégrées numériquement sur ce maillage, de façon à calculer une valeur de chaque variable (vitesse, température, turbulence, concentration) en chaque sommet ou centre de maille.

L'avantage principal de l'approche CFD est sa capacité à reproduire d'une façon qualitative les caractéristiques de l'écoulement et la dispersion des polluants dans une rue canyons dans n'importe quelle configuration. De nombreux modèles CFD (deux ou trois dimensions) utilisant les équations RANS à des modèles de turbulence ont été appliquées à l'issue d'étudier la structure de l'écoulement et la dispersion des polluants dans les rues canyons**[47]**.

2. 3.Etude de l'écoulement et de la dispersion dans une rue canyon.

2.3.1 Introduction

A l'échelle locale, la problématique de la pollution atmosphérique a un intérêt particulier pour la simulation du comportement de l'écoulement qui devient complexe sous l'effet de son interaction avec la morphologie urbaine définit comme étant la

répartition spatiale des bâtiments, leur élévation, la forme et l'orientation des rues qu'ils forment. Parmi cette structure urbaine citons le cas des rues canyons objet de notre travail et qui représentent un milieu favorable pour la dispersion et l'accumulation des polluants causées essentiellement par le trafic automobiles. On retiendra pour définition d'une rue canyon : un espace étroit bordé d'immeubles très proches les uns des autres, leurs hauteur moyenne est supérieur à la largeur de la rue (Figure 2.3)**[48]**. Les rues canyons sont le lieu d'écoulements complexes où se crée des vortex, vecteur de dispersion des polluants. Pour caractériser ces écoulements, des modèle CFD sont de plus en plus utilisés pour simuler à échelle plus fine le comportement des polluants dans différentes situations prenant en compte les caractéristiques géométriques, micro météorologiques et aérodynamiques.



Figure 2.3: Représente rue canyon

2.3.2. Caractéristiques d'une rue canyon

Une rue canyon est caractérisée par les éléments suivants (figure 2.4) :

- La longueur L des bâtiments bordant la rue,
- La hauteur H des bâtiments,
- La largeur W de la rue.

On définit un indice de construction dit de Landsberg défini comme étant le quotient de la hauteur du bâti par la largeur de la rue permettant de classer les rues en deux grands ensembles : les rues larges et les rues étroites, dites de type canyon susceptibles

d'engendrer des forts taux de pollution. Ces informations sur la morphologie de la ville sont à la base des simulations de la dispersion de polluants réalisées.

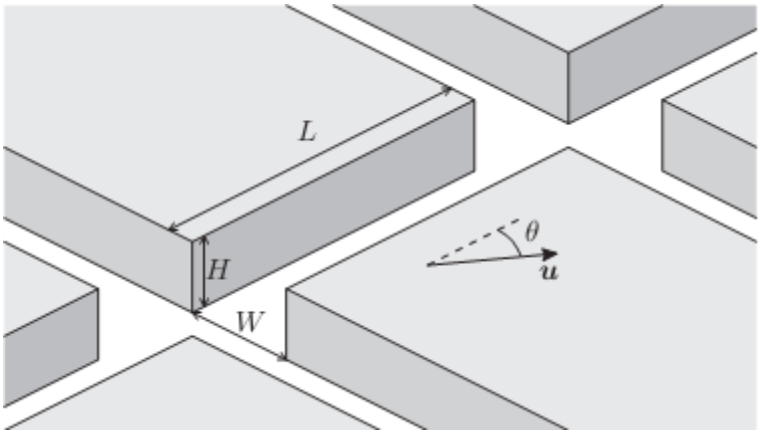


Figure 2.4 : Représente caractéristiques d'une rue canyon

2.4.2. Facteurs influençant l'écoulement et la dispersion dans un canyon

Afin de connaître la répartition des polluants atmosphériques au niveau d'une rue canyon et les phénomènes physiques associés, il faut s'intéresser de plus près aux écoulements atmosphériques qui sont les vecteurs de la propagation des polluants. L'écoulement atmosphérique et la dispersion des polluants sont influencées par certains facteurs. Ces facteurs d'influence sont d'ordres géométriques et météorologiques.

2.4.2.1. Facteurs géométriques

Lorsque l'ensemble des éléments formant la canopée urbaine (bâtiments, arbres,) interagissent avec l'atmosphère sus-jacente, l'écoulement devient turbulent et complexe. Il se crée des forts gradients de vent, zones de décollement, zones de recirculation (figure 2.5). Toutes ces caractéristiques dépendent de la géométrie et de la densité des obstacles formant la canopée urbaine.

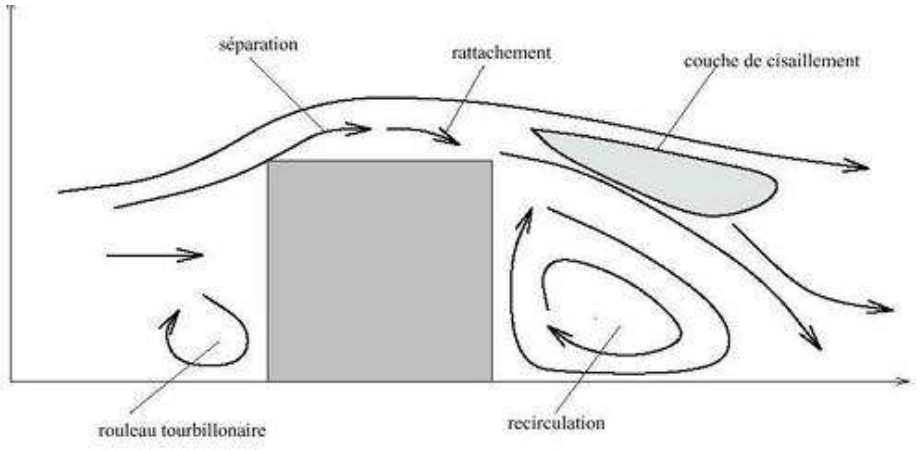


Figure 2.5: Représente l'écoulement turbulent en présence d'obstacle

2.4.2.2. Facteurs météorologiques [49,50]

Une fois émis dans l'atmosphère, l'évolution des polluants à l'intérieur d'un canyon (dispersion, accumulation) est étroitement liée aux conditions météorologiques locales du site notamment le vent (vitesse et direction), stabilité atmosphérique et le rayonnement solaire. En effet l'interaction des facteurs météorologiques avec les éléments de surface impose un régime d'écoulement propre favorisant ou non la turbulence et la stabilité de l'atmosphère sus-jacente. Parmi ces paramètres météorologiques :

-Le vent : est un vecteur essentiel expliquant la dispersion des émissions polluantes. Il intervient tant par sa direction pour orienté les panaches de pollution que par sa vitesse pour diluer et entrainer les émissions de polluants.une absence de vent contribuera à l'accumulation de polluants près des sources et inversement.

-**La turbulence atmosphérique :** est un phénomène ayant deux origines distinctes (thermique et mécanique) qui consiste en une irrégularité dans les mouvements du vent et provoque la dispersion des polluants dans l'air.

-La température de l'air : modifie les conditions de dispersion des polluants. Le froid diminue la volatilité de certains gaz et donc limite leur dispersion tandis que la chaleur estivale et le rayonnement solaire favorisent la formation de zone.

CHAPITRE 3 : LES MÉTHODES DE MESURE DES POLLUANTS GAZEUX

3.1. Mesure des polluants atmosphériques

3.1.1. Introduction

Certaines méthodes d'analyse ont déjà été développées depuis plusieurs dizaines d'années mais malgré leurs bonnes performances elles s'avèrent lourdes à mettre en œuvre. Actuellement l'industrie et la recherche s'orientent vers des méthodes plus légères et moins coûteuses pour satisfaire la forte demande émanant du secteur automobile entre autre. Aussi apparaissent sur le marché des microcapteurs, moins performants que les anciennes méthodes mais plus pratiques. Les recherches dans ces nouvelles méthodes s'avèrent prometteuses mais leur industrialisation n'est pas encore très développée.

Nous proposons ici un aperçu des différentes méthodes d'analyse des gaz et surtout leurprincipales caractéristiques (gaz détecté, domaine de détection, coût ...). Il faut noter que ces méthodes peuvent être complémentaires, une amélioration des performances du détecteur peut être obtenu par des associations de ces différentes méthodes.

3.1.2. Techniques de Mesure des polluants atmosphériques

De nombreuses études consacrées à la mesure et au contrôle des concentrations de polluants dans l'air des espaces clos portent sur la répartition de ces polluants, parfois en fonction de la présence de certaines sources.

Si, en l'occurrence, on mesure simultanément les concentrations de polluants dans l'air extérieur et les taux d'infiltration, on peut évaluer la puissance des sources contenues dans les espaces considérés. Lorsque ces mesures s'accompagnent d'observations, ces derniers servir à l'élaboration de modèles prédictifs des concentrations de polluants de l'air **[51]**.

Les techniques d'analyses des polluants dépendent de la concentration et du type de gaz recherché, on peut cités quelques techniques.

3.1.2.1. La chimiluminescence

C'est une méthode automatique fondée sur la réaction en phase gazeuse de l'ozone sur *NO* sous pression, soit réduite, soit voisine de la pression atmosphérique.

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2^* + O_2 \qquad (3.1.2.1.1)$$

$$NO_2^* \rightarrow NO_2 + h\nu \qquad (3.1.2.1.2)$$

La concentration du dioxyde d'azote est déterminée indirectement en mesurant par photométrie l'intensité de la lumière produite par la réaction de l'ozone sur *NO*. Le dioxyde est quantitativement réduit en monoxyde au moyen d'un convertisseur avant sa réaction avec l'ozone, ce qui donne une mesure de $NO + NO_2$. Il suffit ensuite de déduire de ce dernier résultat la teneur en *NO* pour obtenir teneur en NO_2. Les deux dosages de *NO* et de $NO + NO_2$ peuvent se faire en même temps avec un appareil double, ou successivement avec un appareil unique, pourvu que l'intervalle de temps entre les deux dosages ne dépasse pas deux minutes **[52]**.

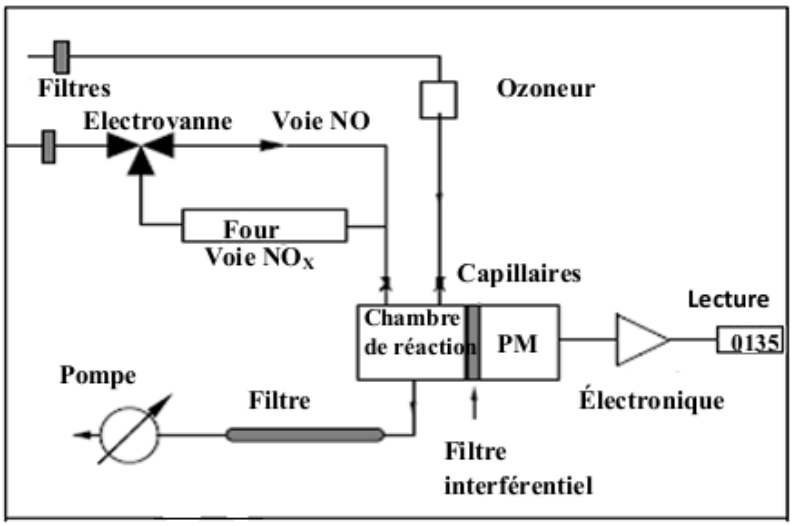


Figure 3.1: analyseur NO_x à chimiluminescence.

La détection des oxydes d'azote se base sur la réaction de chimiluminescence entre le monoxyde d'azote (*NO*) et l'ozone (O_3).

La précision des mesures dépend de la maintenance de l'appareil, de la qualité et de la fréquence d'étalonnage des appareils et des conditions d'utilisation **[53]**.

3.1.2.2. L'électrochimie

L'échantillon passe à travers une solution aqueuse, où la réaction chimique se produit entre le polluant et le réactant, libérant ainsi des électrons et créant un courant électrique mesurable, proportionnel à la concentration de gaz.

3.1.2.3. Analyse infra rouge

La spectrométrie infrarouge, elle, s'utilise davantage sur le gaz polluant lui-même, en mettant en évidence des spectres d'absorption correspondant aux mouvements de vibration et de rotation des molécules concernées **[54]**.

Le principe est basé sur l'absorption sélective de l'IR par le gaz à analysé (généralement utilisé pour le *CO*) Les analyseurs sont constitués d'un échantillon de référence avec une source à double rayon IR.

3.1.2.4. Le paramagnétisme

Parmi tous les gaz, seul l'oxygène a une forte sensibilité paramagnétique (NO, NO_2 et 2oxydes de chlore sont eux aussi paramagnétiques). Les autres ont une sensibilité diamagnétique.

L'effet physique est le suivant: sous l'effet du champ, il y a courant de circulation de l'oxygène (les molécules paramagnétiques sont attirées dans la région où le champ magnétique est maximum). La force de courant est fonction de la concentration en oxygène.

L'effet physique est lui-même sélectif, les molécules paramagnétiques étant entraînées à contre-courant des molécules diamagnétiques.

Le courant de gaz rencontre un fil chauffé électriquement, et refroidit ce fil. Le refroidissement est fonction de la force de courant. La variation de résistance électrique du fil est elle-même fonction de sa variation de température. Ainsi réalise-t-on-la transformation de l'effet physique en signal électrique.

Les caractéristiques de différentes techniques sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 3.1 : Récapitulatif des méthodes d'analyses **[55]**.

Technique utilisée	**Produits détectés**	**Avantages**	**Inconvénients**
Chimiluminescence	NO, NO_2	-très spécifique	-maintenance étalonnage délicat
Absorption infrarouge	CO, CO_2 , etc.	-Assez sélectif si domaine de faible. -Stable dans le temps.	-Peut être sensible à l'humidité, à l'empoussièrement , au dioxyde de carbone.
électrochimie	oxydants/réducteurs	-bonne sélectivité	-interférences possibles -faible répétabilité -vieillissement
paramagnétisme	O_2 principalement	-bonne linéarité de réponse.	-Certains appareils sont sensibles aux gaz diamagnétiques et/ou à la conductibilité thermique des gaz

3.1.3. L'appareil ECOM-J2KN

- **La description**

L'appareil utilisé pour la mesure des concentrations des polluants gazeux dans un milieu urbain.

ECOM-J2KN PRO Analyseur de gaz de combustion facile avec 6 capteurs de gaz pour O_2, CO_2, CO haut de gamme, NO, NO_2 et SO_2. Cette configuration ajoute le capteur de CO à haute portée mesurant jusqu'à 40 000 ppm et le capteur SO_2



Figure 3.2 : Ecom-j2kn

- **Visualiser – imprimer – gérer les données de l'ecom-j2kn [56].**

Visualiser :

-Affichage des mesures sur le boîtier de commande Imprimer

-Édition des mesures sur imprimante intégrée Gérer

-Communication vers PC via port USB et Bluetooth

-Enregistrement des données sur carte SD

Différentes concentrations des polluants gazeux mesurées par Ecom-j2kn à Températures de l'air et de gaz ($9.1C^{o}$et$41.2C^{o}$) (Tableau 3.1)

Tableau 3.2 : Les valeurs moyennes des concentrations

Gaz	**Moyenne**
O_2	17.8%
CO	812ppm
NO	60.1ppm
NO_2	53.4 ppm
NO_X	113.5ppm
NO_X	1527mg/m^3
SO_2	0ppm
SO_2	0 mg/m^3
CO_2	2.3%

3.1.4. Conclusion

Les méthodes existantes offrent un large éventail de choix. Un couplage de plusieurs méthodes offre en outre de nouvelle possibilités et ainsi d'augmenter la précision de l'analyseur.

Parallèlement l'amélioration des performances des nouvelles techniques vont peut être les rendre utile dans de nouveaux secteurs. Les perspectives futures de ces analyseurs sont des plus prometteuses.

CHAPITRE 4 : ÉTUDE NUMÉRIQUE

4.1. Introduction

Il existe différentes approches pour simuler la dispersion des polluants en milieu urbain. Il parait cependant difficile de diviser les approches selon les échelles. Parmi les approches utilisées et largement répandues nous citons l'approche CFD « **Computational Fluid Dynamics**» dont se base notre présente étude. C'est une méthode numérique basée sur les équations de la mécanique des fluides lesquelles sont impliquées dans l'étude des écoulements et la dispersion des polluants surtout à petite échelle notamment en géométrie complexe **[3]**. Les simulations numériques se rapprochent le plus de la réalité des phénomènes vu qu'elles résolvent les équations de continuité, de quantité de mouvement, de l'énergie et du transport d'une quantité scalaire (la concentration), tout en tenant compte du phénomène de turbulence. Parmi les codes **CFD** commerciaux les plus utilisés nous citons: **FLUENT** et **ANSYS CFX**.

La résolution de ces équations se fait par des méthodes numériques telles que la méthode des volumes finis, la méthode des différents finis et la méthode des éléments finis.

4.2. La mécanique des fluides numérique(MFN) :

Plus souvent désignée par le terme anglais Computational fluide Dynamics (CFD), consiste à étudier les mouvements d'un fluide, ou leurs effets, par la résolution numérique des équations régissant le fluide. En fonction des approximations choisies, qui sont en général le résultat d'un compromis en terme de besoins de représentation physique par rapport aux ressources de calcul ou de modélisation disponibles, les équations résolues peuvent être les équations d'Euler, les équations de Navier-stokes, etc.

La CFD permet de construire un prototype virtuel d'un produit ou d'un processus. A fin de simuler des conditions de fonctionnement réel, l'approche CFD est un complément aux techniques expérimentales et autres modélisations pour obtenir une description précise des problèmes d'écoulement de fluides. Ce procédé complexe, à l'origine excessivement coûteux, était réservé aux bureaux d'ingénierie des hautes technologies, comme l'industrie aéronautique.

Aujourd'hui, les coûts, les temps de calcul se sont considérablement réduits et la CFD est devenue un outil performant au service de toutes les industries qui manipulent des fluides ou rencontrent des mouvements de fluide dans leurs projets ou procès.

4.2.1 Méthode de travail :

Pour les écoulements simples tels que l'écoulement stationnaire dans un tube circulaire ou celui de la couche limite sur une plaque plane, les équations de Navier Stokes sont directement intégrées et résolues par méthode analytique. Il s'agit de méthodes locales.

Dans le cas général, une méthode de discrétisation est appliquée pour l'approximation des équations différentielles. Ces dernières sont remplacées par des équations algébriques qui son résolues par méthode numérique. Un maillage est généré dans un domaine d'étude qui entoure l'obstacle considéré (aile, avion, voiture, hélice…) ou un domaine délimité par le contenant du fluide. Les équations algébriques sont résolues pour chaque nœud du maillage. Le plus souvent, une méthode itérative est appliquée. Les calculs sont exécutés à l'aide d'un code CFD.

En pratique, les simulations CFD s'effectuent en trois étapes :

-Pré-processing;

-Solver;

-Post processing.

Au cours de la première étape, **Pré-processing**, on construit la géométrie et on définit le domaine d'étude. Le maillage est ensuite généré à l'intérieur de ce domaine. Ensuite, on spécifie les propriétés physiques du fluide et on choisi les modèles à appliquer l'algorithme de calcul, les méthodes d'interpolation et autres schémas.

La deuxième étape, **Solver**, c'est la phase de calcul, ou de résolution des équations algébriques.

La troisième et dernière étape, **Post processing**, c'est la phase de traitement et d'interprétation des résultats.

Avec la CFD, on peut faire plus de simulations avec la possibilité de faire varier à moindre coût plus de paramètres et simuler différentes configurations. Mais des résultats expérimentaux sont nécessaires pour valider les calculs CFD.

4.2.2. Applications de la CFD :

Elles sont très nombreuses. On peut citer celles de :

- l'aérodynamique.
- de la médecine : circulation du sang.
- l'hydrodynamique.

- des turbomachines
- du génie électrique pour le refroidissement des machines et autres micro-circuits électroniques.
- du bâtiment : chauffage/ventilation ou action du vent sur les structures.

4.2.3. Méthodes de discrétisation :

4.2.3.1. Méthodes de différences finies :

La méthode des différences finies a une importance historique et est simple à programmer. Elle n'est actuellement utilisée que dans quelques codes spécialisés.

4.2.3.2. Méthode des volumes finis :

La méthode des volumes finis est une approche commune utilisée dans les codes MFN. Les équations qui régissent le fluide sont résolues sur des volumes de contrôle discret.

4.2.3.3. Méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis(MEF) est utilisée dans l'analyse structurale des solides, mais est également applicable aux fluides.

4.2.4. Principe de la méthode des volumes finis :

La méthode des volumes finis intégré, sur des volumes élémentaires de forme simple, les équations écrites sous forme de loi de conservation. Elle fournit ainsi de manière naturelle des approximations discrètes conservatives et est donc particulièrement bien adaptée aux équations de la mécanique des fluides : l'équation de conservation de la masse, l'équation de conservation de la quantité de mouvement, l'équation de la conservation de l'énergie et de la masse.

Sa mise en œuvre est simple si les volumes élémentaires sont des rectangles (ou des parallélépipèdes rectangle en 3 dimensions). Cependant la méthode des volumes finis permet d'utiliser des volumes élémentaires de forme quelconque, donc de traiter des géométries complexes, ce qui est un avantage sur les différences finis.

4.3. ANSYS, In :

ANSYS, In c'est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique. L'entreprise a son siège à Canonsburg en Pennsylvanie aux États-Unis. La société possède de nombreuses filiales à travers le monde, notamment en Europe et en Asie.

4.3.1. Principaux produits :

ANSYS Structural : Ce produit permet d'effectuer des simulations mécaniques en calcul de structures. Ses principales capacités sont :

- L'analyse statique

- L'analyse modale
- L'analyse harmonique (réponse forcée)
- L'analyse temporelle
- La gestion de différentes situations non-linéaires (contact, plasticité matériaux, grands déplacements ou grandes déformations).

4.3.2. Les Modules d'ANSYS :

- ANSYS Mechanical
- ANSYS CFX et Fluent
- ANSYS AUTODYN et ANSYS LS-DYNA
- ANSYS Electromagnetics et Ansolf
- ANSYS Multiphysics

Dans le présent travail, on a utilisé le code ANSYS CFX, qui utilise comme plate forme la méthode des volumes finis.

4.4. ANSYS CFX :

ANSYS CFX est un outil de dynamique des fluides (CFD) très performant qui fournit rapidement des résultats fiables et précis pour un large éventail d'applications CFD et multi-physiques. ANSYS CFX est reconnu pour sa précision, sa robustesse et sa rapidité exceptionnelle pour les machines tournantes (pompes, ventilateurs, compresseurs, turbines à gaz et hydrauliques).

ANSYS CFX est un logiciel de CFD généraliste extrêmement performant, utilisé pour résoudre une large variété de problèmes d'écoulement de fluide depuis plus de 20ans. Grâce à son solveur avancé, moderne et parallélisé, les utilisateurs obtiennent rapidement des solutions fiables et robustes. Le vaste choix de modèles physiques proposé permet de représenter la quasi-totalité des phénomènes d'écoulement de fluide. Le solveur tout comme les modèles physiques, sont accessibles via un environnement utilisateur graphique moderne, intuitif, flexible, personnalisable et automatisable (fichiers de session, scripts, générateur d'expression…).

4.5. Environnements logiciels :

Deux environnements logiciels permettent de mettre en œuvre le code ANSYS :

- **ANSYS Classic** : Chronologiquement, c'est la première solution logicielle développée par le constructeur. Elle est destinée à la construction de modèles éléments finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques. À partir de cet environnement, l'utilisateur construit directement un modèle éléments finis en

utilisant le langage de script APDL (*ANSYS Parametric Design Language*). ANSYS classic est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.

- **ANSYS Workbench** : Cette plateforme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en réutilisant le logiciel ANSYS initial. Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièces) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul. Dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même. La plateforme est donc chargée de convertir les requêtes entrées par l'utilisateur en logiciel ANSYS avant de lancer la résolution.

4.6. Mettre en place une simulation à l'aide d'ANSYS CFX se fait en 4 étapes :

ICEM, CFX-pre, CFX-solve et CFX-post

Chaque module a une utilisation bien spécifique (figure4.1)

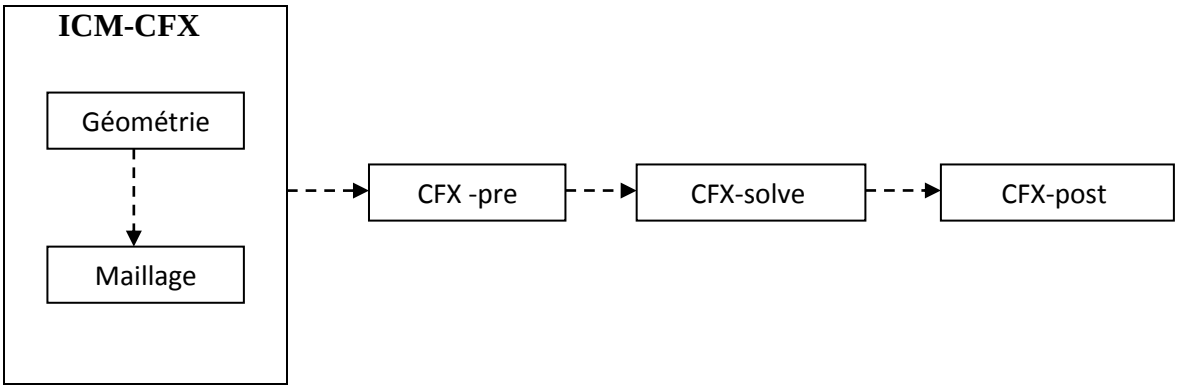


Figure 4.1 : Les modules principaux du CFX

4.6.1 ANSYS ICEM :

Le module ICEM permet d'établir la géométrie du système étudié. Il est utilisé comme un logiciel de CAO traditionnel : la géométrie est construite à partir de points, de courbes, de surface et de volume (figure 4.2). C'est également ce module qui permet de générer un maillage s'appuyant sur la géométrie.

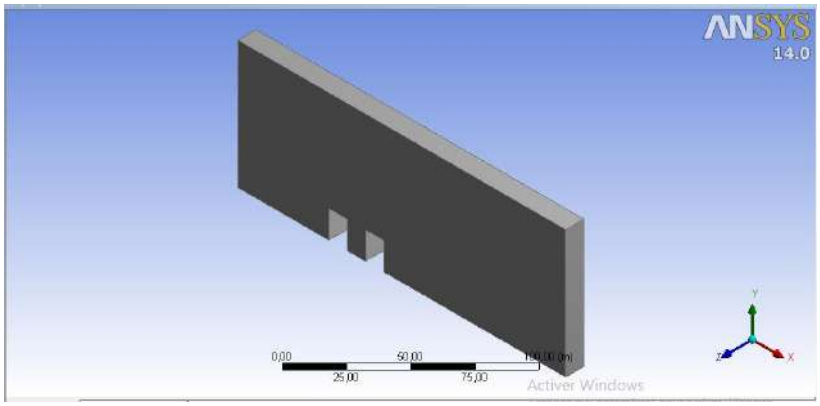


Figure 4.2 : Domaine de calcul par ICEM-CFX

4.6.2. CFX-pre :

Le module CFX-pre, Figure (4.3) permet quant à lui de définir les conditions aux limites et initiales du système, ainsi que les équations à résoudre, le type de résolution (régime permanent ou transitoire), les paramètres du solver, parmi lesquels : le pas de temps, le nombre d'itération, le critère de convergence ainsi que la nature des fluides (ou solides) en présence.

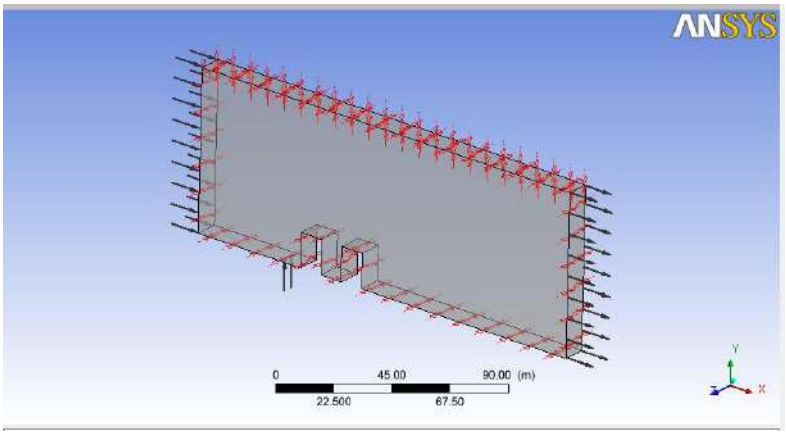


Figure 4.3 : Interface graphique du module CFX-pre

Les conditions aux limites sont de 5 types :

- **INLET;**
- **OUTLET;**
- **OPENING;**
- **WALL;**
- **SYMMETRY.**

Les conditions de type **INLET** sont utilisées dans le cas d'un écoulement entrant à l'intérieur du domaine.

Les conditions de type **OUTLET** sont quant à elles utilisées dans le cas d'un écoulement sortant à l'extérieur du domaine.

La condition **OPENING** est utilisée dans le cas d'une méconnaissance de la nature entrante ou sortante de l'écoulement.

La condition aux limites de type **WALL** est attribuée aux parois imperméables à l'écoulement.

Enfin, si l'écoulement présente un plan de symétrie, il est possible d'attribuer la condition **SYMMETRY** à ce plan.

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

4.6.3. CFX-solve :

Le module CFX-solve, figure (4.4) est le module qui effectue les calculs. Il est basé sur l'intégration des équations de Navier Stockes dans chaque maille et dispo de modèles additionnels pour prendre en compte la turbulence, le rayonnement thermique.

L'organigramme de mise en œuvre d'un calcul est présenté dans la (figure4.4).



Figure 4.4 : Interface graphique du module CFX-Solver.

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

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

- Un fichier **«.out»** lisible par un éditeur de texte. Ce fichier résume le déroulement du calcul. Il contient, entre autres, les informations du.def, ainsi que le bilan masse du système.
- Un fichier **«.res»** qui contient l'ensemble des résultats. Ce fichier est directement exploitable par CFX-post.

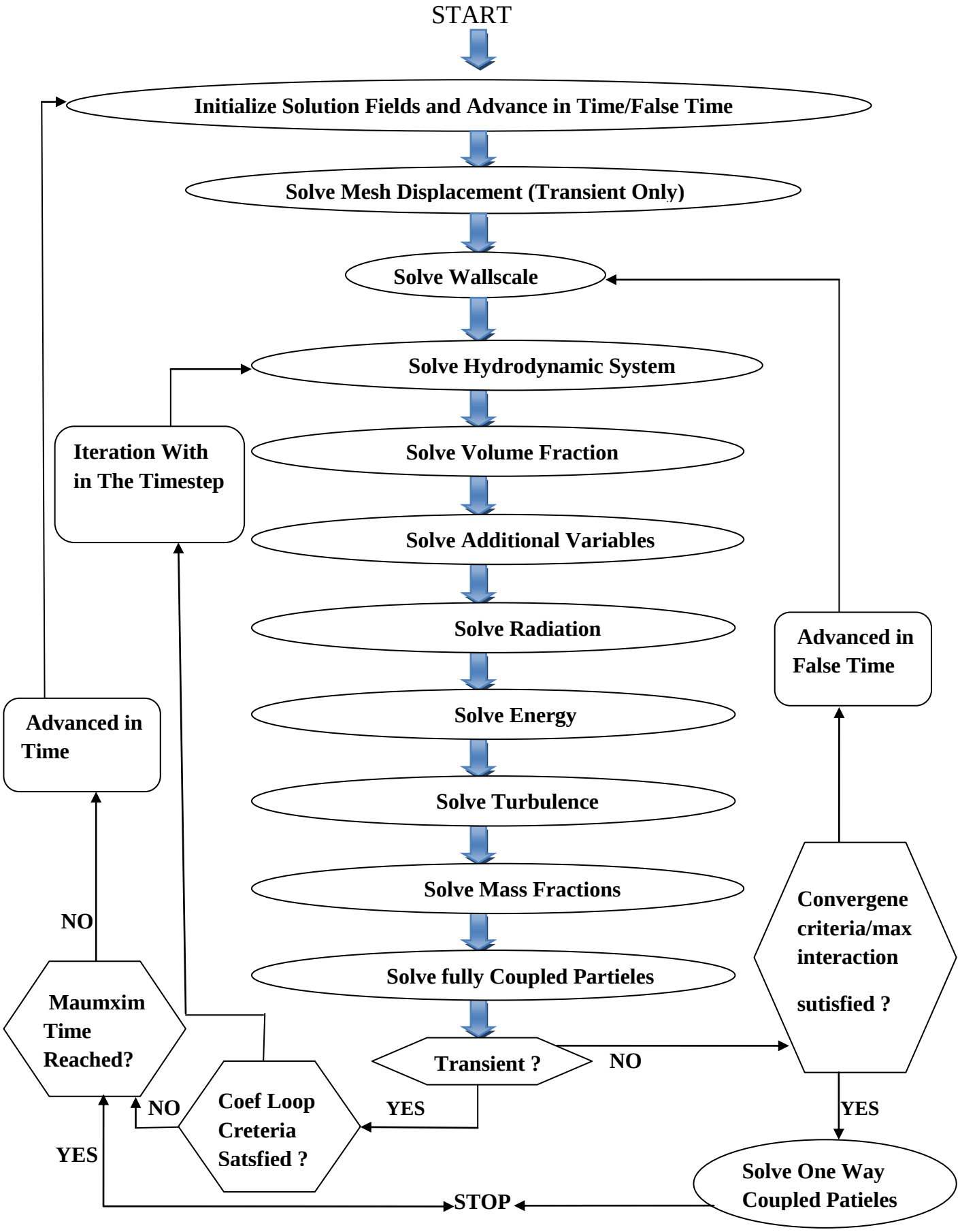

START
Initialize Solution Fields and Advance in Time/False Time
Solve Mesh Displacement (Transient Only)
Solve Wallscale
Solve Hydrodynamic System
Solve Volume Fraction
Solve Additional Variables
Solve Radiation
Solve Energy
Solve Turbulence
Solve Mass Fractions
Solve fully Coupled Partieles
Transient ?
NO
YES
Convergene criteria/max interaction sutisfied ?
NO
YES
Advanced in False Time
Iteration With in The Timestep
Coef Loop Creteria Satsfied ?
NO
YES
Maumxim Time Reached?
NO
YES
Advanced in Time
Solve One Way Coupled Patieles
STOP

Figure 4.5: Organigramme de mise en œuvre d'un calcul (Source : documentation CFX).

4.6.4. CFX-post :

Le module CFX-post, figure 4.6, est un outil graphique permettant le traitement et la visualisation des résultats. Il permet d'appliquer des textures sur la géométrie, de visualiser des contours, des iso-surfaces, des lignes de courant, des champs de vitesse. Il permet également l'exportation des résultats sous forme numérique, comme par exemple la valeur des différentes variables sur chaque nœud, sous forme photographique et même sous forme d'animation.

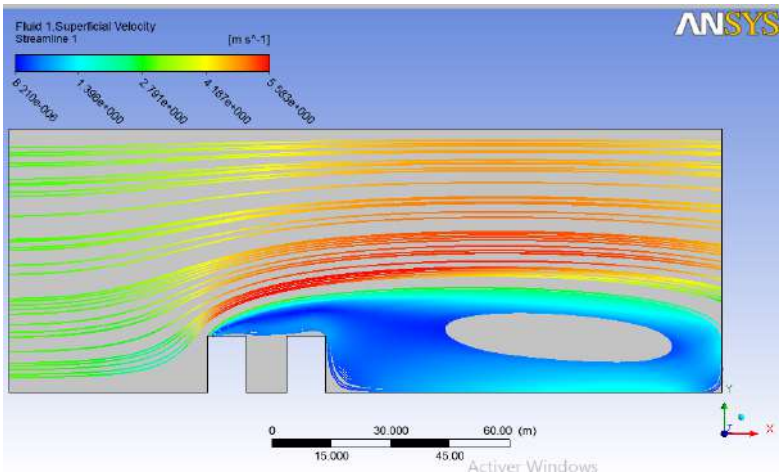


Figure 4.6 : Interface graphique du module CFX-post.

CHAPITRE 5 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

5.1.Etude de la modélisation

Pour l'étude de la dispersion de la pollution par le dioxyde d'azote émis à partir d'un tuyau d'échappement d'un véhicule en position d'arrêt au niveau d'une rue canyon, nous avons procédé à la réalisation de differentes architectures de bâtiments avec changement de position de la source d'émission par rapport à ces derniers et ce afin de suivre le phénomène de dispersion de ce polluant en fonction des variations des hauteurs des bâtiments et vitesses de sortie des gaz d'échappements. Autres paramètres, tels que la pression et la température ont été étudiées aussi pour mieux interpréter les résultats de modélisation.

Les géométries des bâtiments étudiées sont réalisées suivant l'architecture réelle existante dans les villes Algériennes et en particulier à Médéa. Les hauteurs maximale et minimale des bâtiments réalisées étaient de 15 et 7.5 m. Il a été considéré qu'entre ces deux bâtiments il y a des trottoires et une route à deux voies d'une distance de six mètres avec une distance totale entre les deux bâtiments de 10 m. Autres voies routières des deux cotés des deux bâtiments ont été aussi supposées avec des distances similaires. Le sens de dispersion des polluants été pris selon la direction du vent dominant (Gauche à droite). Pour la modélisation de la pollution du gaz polluant, trois cas ont été supposés. Dans le premier cas on a considéré que la route se trouve entre deux bâtiments de même hauteur, dans le deuxième cas le bâtiment de plus élevé se trouve en amont de la route et le troisième cas le bâtiment le plus élevé est situé en aval de la route. La circulation des véhicules dans les differentes voies étudiées a été supposée très encombrées. Une source émitrice seulement a été étudiée. Le diamètre de sortie des gaz de combustion à travers cette source était de 50 mm et les vitesse de sortie de ces derniers en fonction du régime du moteur étaient de 3, 5 et 7 m/s. La modélisation de la dispersion du dioxyde d'azote a été étudiée dans les conditions atmosphériques stables (jour ensoleillé, vitesse des vent de 3 m/s, ….) avec absence de réactions photochimiques conduisant à son élimination ou à la formation de d'autres polluants secondaires.

Les résultats de la modélisation de la dispersion, de la pollution générée par la source d'émission située au milieu des deux bâtiments et la rue canyon ont montré que les variations de la pression dans les limites du domaine étudié (Figures 5.5 à 5.7), sont très similaires pour l'ensemble des géométries considérées. Nous constatons que les fortes pressions sont plus élevées a coté de l'arête de la première façade du bâtiment situé en amont de la rue canyon suite à l'effet obstacle engendré par le premier bâtiment. Une faible dépression est formée au niveau de l'arête supérieure du bâtiment qui va être plus accentuée et généralisée sur le reste

du domaine en provoquant tourbillon en aval des deux bâtiments. Il a été aussi remarqué qu'une dépression remarquable a été enregistrée au niveau du centre de la rue canyon et des deux bâtiments.

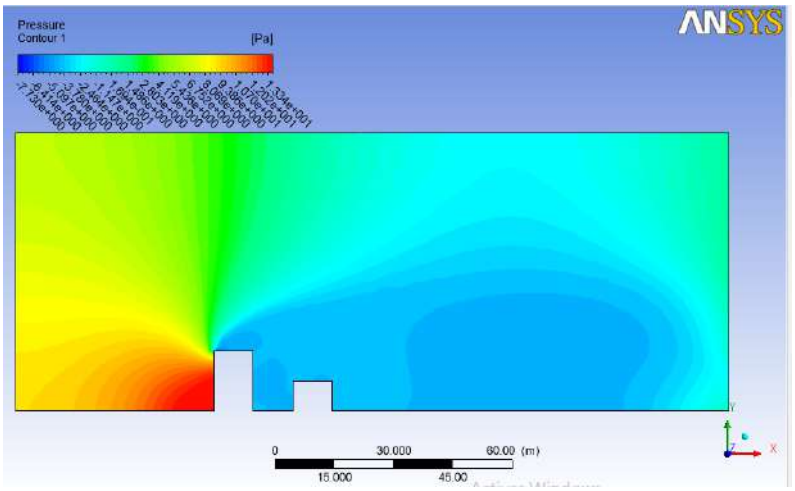


Figure 5.1- Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en amont = 2 fois bâtiment en aval), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 3m/s

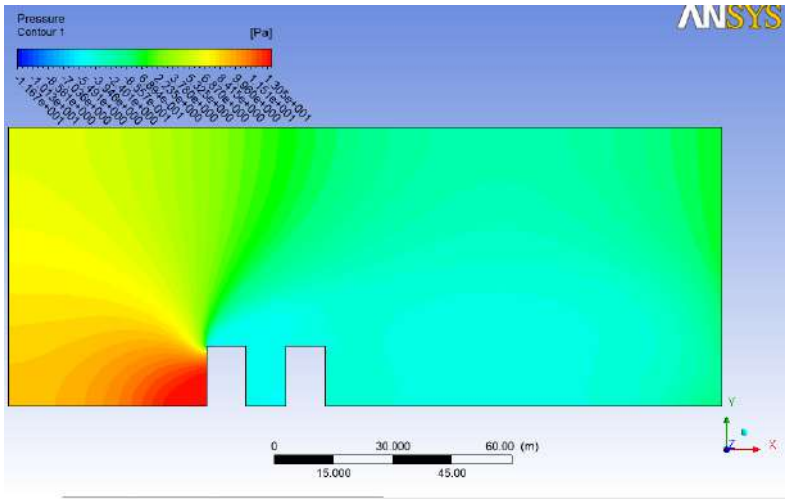


Figure 5. 2- Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 7 m/s

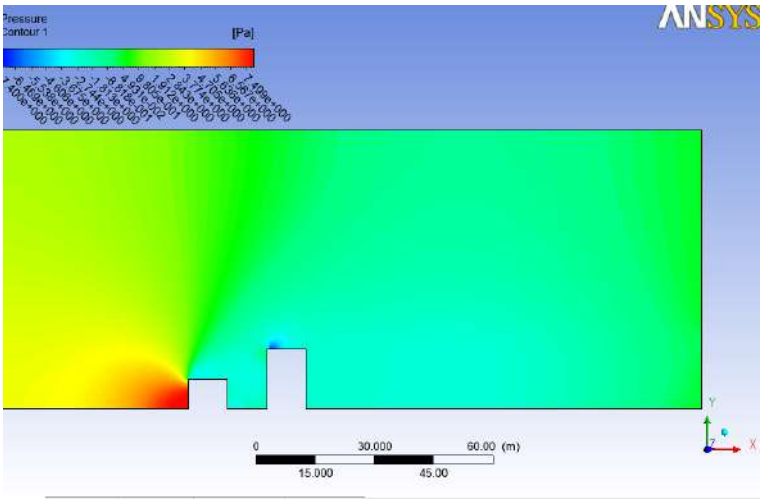


Figure 5.3 - Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en aval = 2 fois bâtiment en amont), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 3m/s

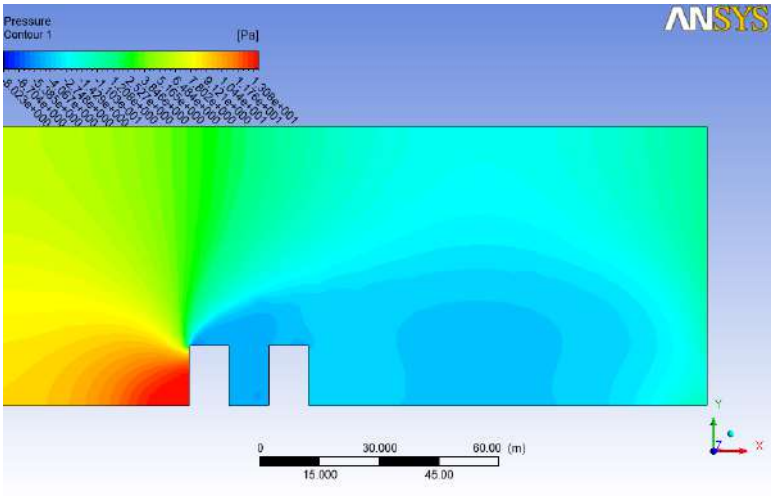


Figure 5.4- Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 5 m/s

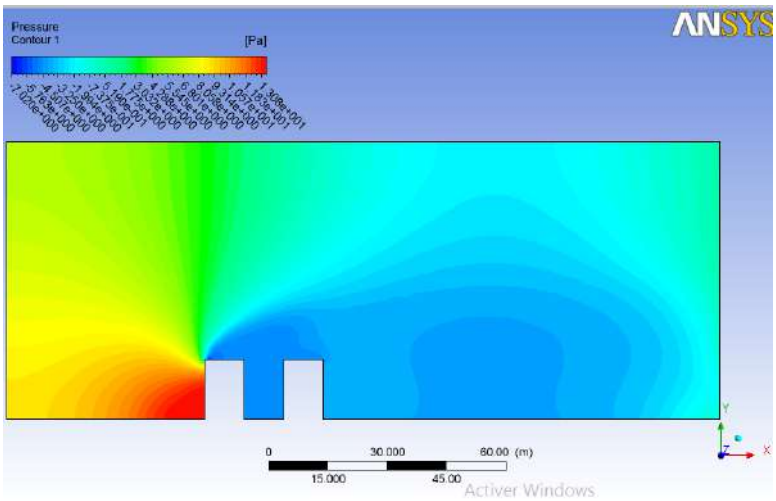


Figure 5.5 - Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), sources après, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s

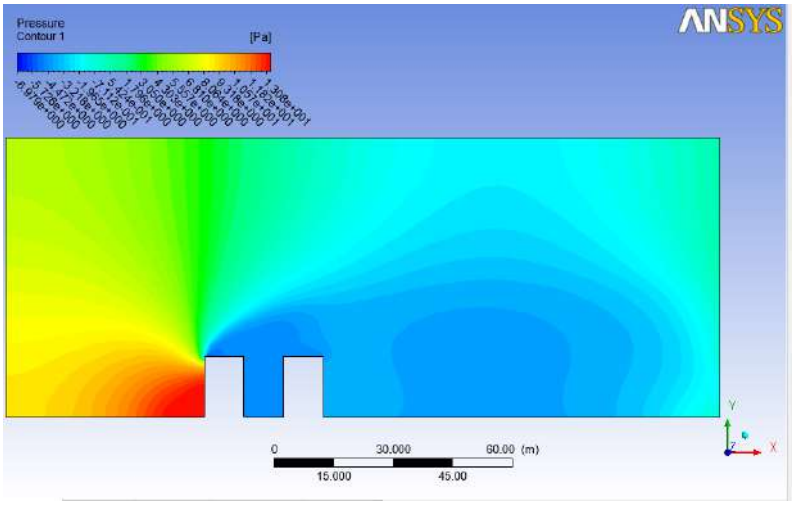


Figure 5.6- Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), Source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s

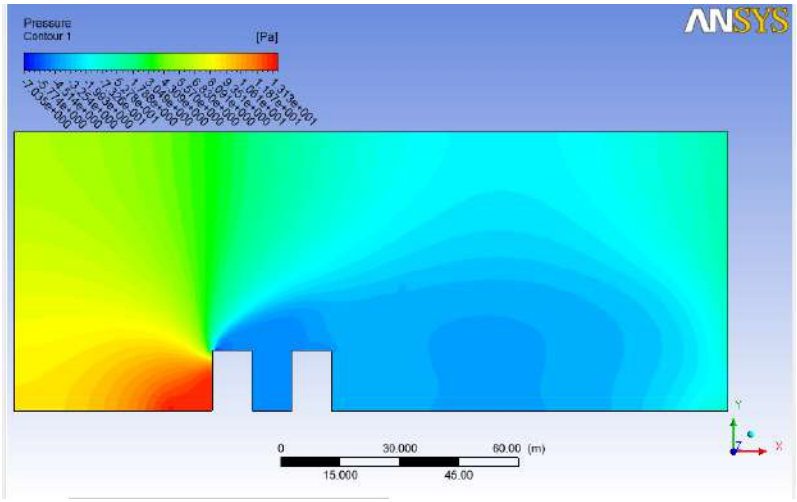


Figure 5.7- Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), Source avant, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s

Plusieurs études ont montrée l'éffet des obstacles sur l'écoulement d'un fluide et sa relation avec les variations de pression. Par exemple dans le cas d'un écoulement qui aborde transversalement une colline, il se produit au sommet une zone de dépression et de survitesse, tandis qu'au pied du versant au vent, l'air est ralenti **[57]**. La dépression constatée au centre de la rue canyon est due à la surélévation de la température de la zone par les émissions des

gaz d'échappement (Figure 5.8, 5.12, 5.16, 5.20, 5.24,5.27 et 5.31) Les gaz donc auront un mouvement ascendant, ce qui provoque une dépréssion dans les couches inférieures en attirant ensuite l'air froid vers le bas. Ce volume d'air sera ensuite emprisonné au centre des deux bâtiments par l'éffet bouchon provoqué par le passage de l'air en dessus des bâtiments. Ce phénomène a été constaté pour l'ensemble des cas étudiés, géométrie et variations de vitesses de sortie de gaz.

En effet, la complexité des écoulements autour d'obstacles isolés a été bien étudiée par plusieurs chercheurs **[57]** qui ont montré que:

-au niveau différents parois de l'obstacle étudié, se forment des couches limites qui se détachent puis se rattachent, créant des zones de tourbillonnement ou recirculation ;

-au niveau de la rencontre de l'écoulement décollé et du sillage, se forme une couche fortement cisaillée ;

-au niveau de la façade qui se trouve face au vent, se crée une circulation de fluide descendante qui, au contacte avec le sol, se forme un mouvement sous forme d'un rouleau tourbillonnaire. Ce dernier se déplace en aval en contournant latéralement l'obstacle, formant des tourbillons dit en "fer à cheval". Dans notre cas est appelé bouchon.

En ce qui concerne la dispersion du polluant étudié (figure 5.10, 5.14, 5.18, 5.21, 5.28, 5.29 et 5.33), on peut constater que là où il y avait une dépression, il y a eu un transfert de pollution.

Par exemple dans le cas de la source située avant le premier bâtiment qui se trouve en amont de la rue canyon1), il y a un accroissement de la concentration et stagnation de la pollution sur le bas du bâtiment ce qui va provoquer une l'augmentation du temps d'exposition pour les familles qui habitent au premier et deuxième étage avec bien sûr création des zones de recirculation. Pour le côté opposé du bâtiment (rue canyon), on observe des concentrations plus faibles à ceux émise par la source avec une homogénéité verticale de la concentration et stagnation des polluants ce qui va engendrer dans ce cas une augmentation du temps d'exposition sur toute la hauteur des deux bâtiments donc impact sur les familles habitants sur les façades qui donnent vers la rue canyon. La même constatation est observée quand la source est située en aval du deuxième bâtiment.

Ce phénomène est très répété dans les grandes villes où les bâtiments et les activités au sein des agglomérations (transport, chauffage…) changent avec les différents rejets les caractéristiques thermiques de l'air. Dans ce cas, l'agglomération constitue une source de chaleur pendant la journée, par contre les zones environnantes se refroidissent. Donc, l'air chaud s'élève au-dessus de l'agglomération, provoquant ainsi une dépression qui fait transférer l'air plus frais des zones situées aux alentours. Les polluants émis à la périphérie de

l'agglomération sont dispersés vers le centre de l'agglomération où il s'installe une atmosphère fortement polluée.

Il a été démontré aussi dans plusieurs recherches que pour un observateur éloigné, les turbulences induites par un bâtiment proche de la source engendrent une dilution initiale du rejet à peu près homogène dans le sillage de l'obstacle.

Le rejet peut alors être considéré comme ayant des dimensions initiales non nulles, de l'ordre de celle de l'obstacle.

En termes de conséquences, si le gaz rejeté avait été toxique, en amont de l'obstacle, les concentrations sont plus importantes et le temps d'exposition plus grand, la situation se serait bien évidemment aggravée. En aval de l'obstacle, la concentration est moins importante mais il faut souligner que l'augmentation du temps d'exposition ne permet pas de conclure à des effets de dose plus faibles dans tous les cas.

Par ailleurs, si le nuage déborde sur les côtés de l'obstacle, il faut parfois redouter la formation de filets de nuage à forte toxicité (la concentration en amont étant plus importante) de chaque côté de la zone du sillage de l'obstacle.

La vitesse du vent et la densité du gaz rejeté jouent des rôles particulièrement importants.

Ainsi, plus le vent est fort et le gaz léger, moins la présence de l'obstacle se fait sentir.

Les mécanismes de dispersion peuvent être considérés comme dégagés de l'influence de tout obstacle au sol à des distances supérieures à 10 fois la dimension caractéristique de cet obstacle dans la direction du vent, ou à 2,5 fois perpendiculairement à cette direction à la fois dans le plan horizontal et dans le plan vertical **[58]**.

Une étude aussi sur la dispersion des vitesses et les streamlines a été réalisée (figures5.11, 5.15, 5.19, 5.22, 5.26, 5.30 et 5.34). Pour ce là il été constaté dans le cas où les deux bâtiments ont la même hauteur, qu'au niveau du sommet, une zone de dépression et de survitesse se forme, tandis qu'au pied du versant au vent, l'air est ralenti. Pour le cas où le premier bâtiment amont est le moins élevé, la vitesse des vents est influencée par une double survitesse provoquée par les deux arêtes de bâtiments.

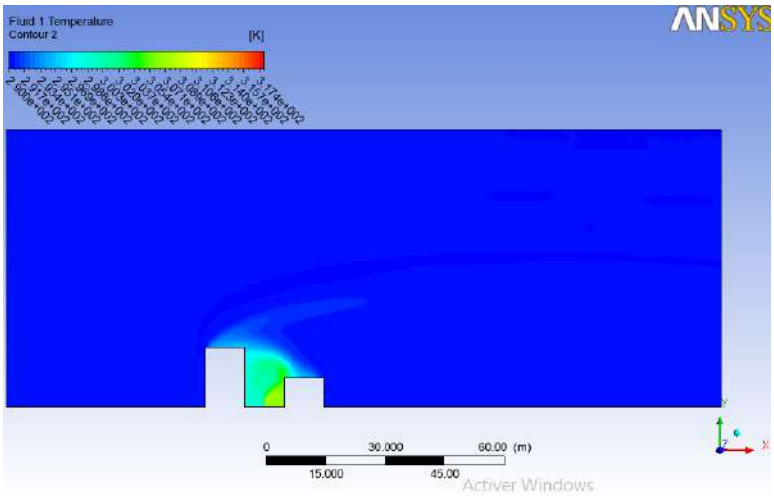


Figure 5.8- Evolution de la température – hauteur du bâtiment en amont = 2 fois la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s

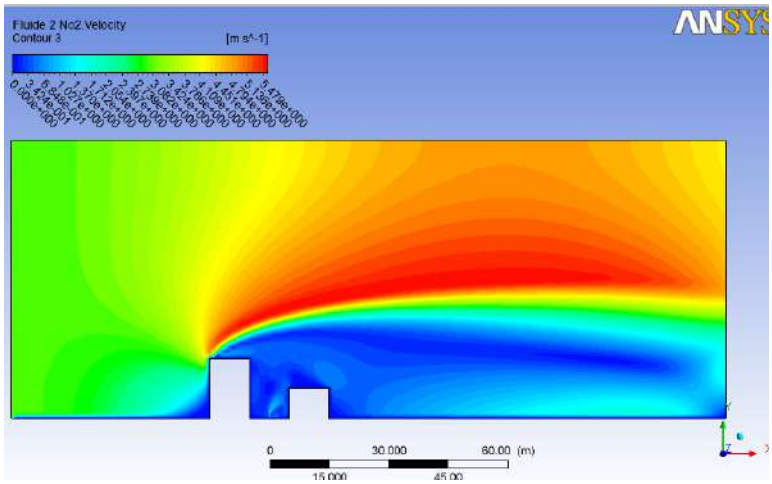


Figure 5.9- Evolution de la vitesse de sortie – hauteur du bâtiment en amont = 2 fois la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s

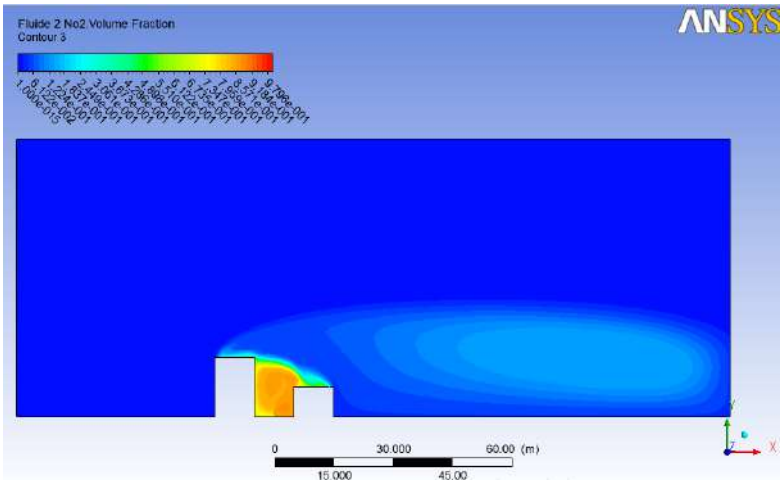


Figure 5.10- Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en amont = 2 fois la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s

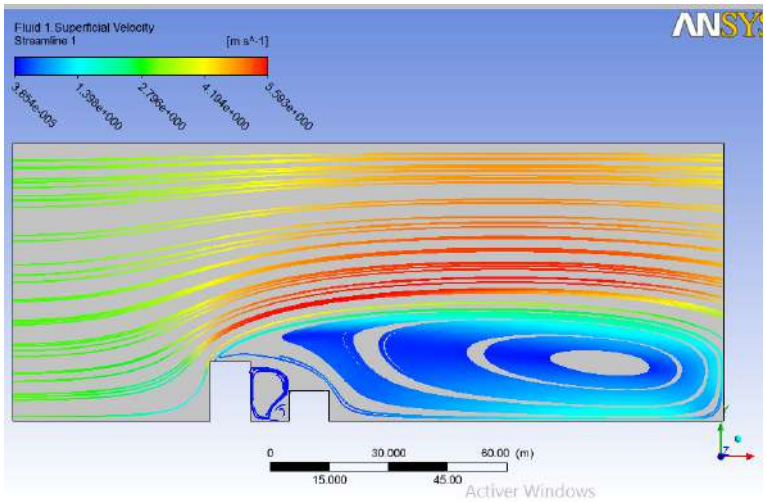


Figure 5.11- Evolution des lignes de vitesses – hauteur du bâtiment en amont = 2 fois la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s

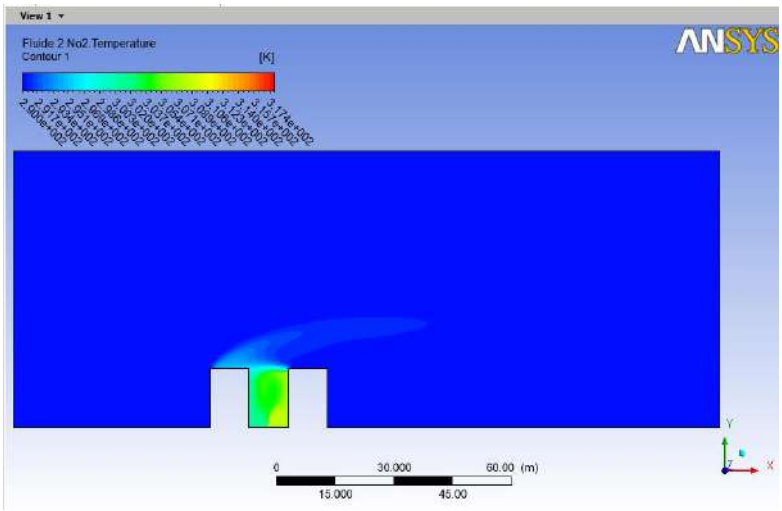


Figure 5.12- Evolution de la température – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 7 m/s

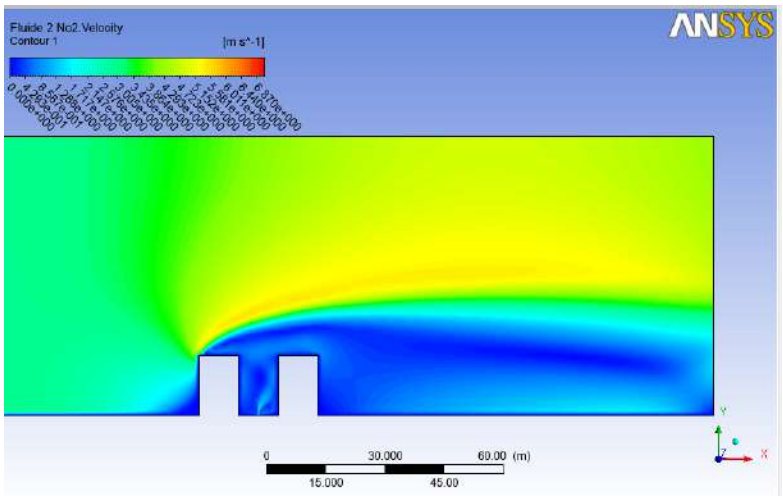


Figure 5.13- Evolution de la vitesse de sortie des gaz – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 7 m/s

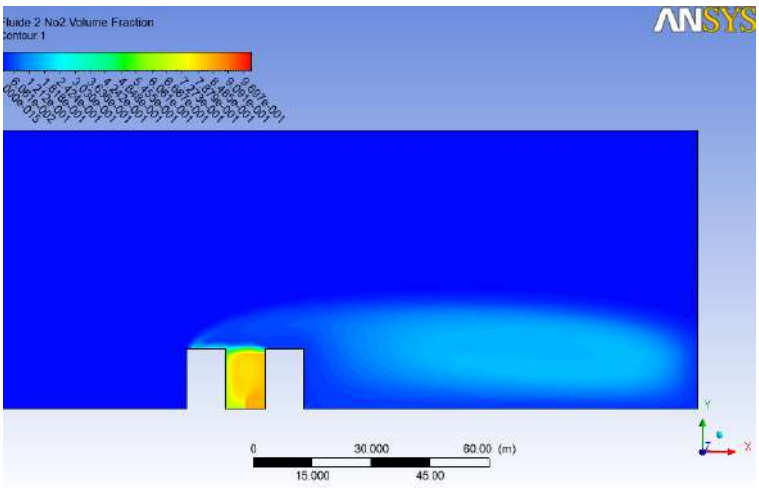


Figure 5.14- Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 7 m/s

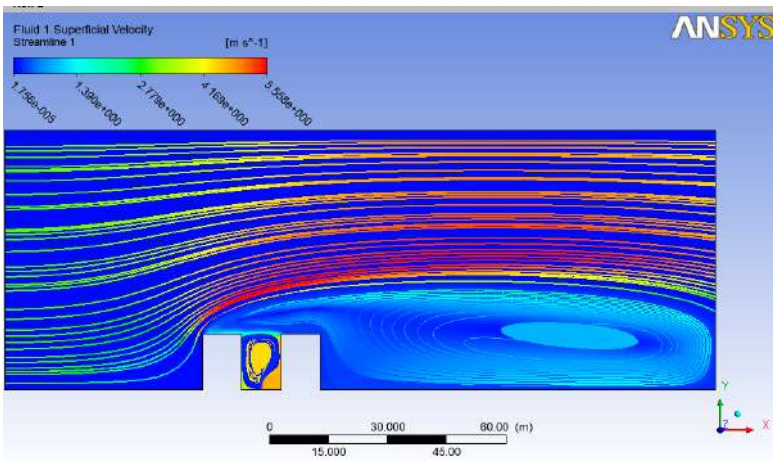


Figure 5.15 - Evolution des lignes de vitesses – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 7 m/s

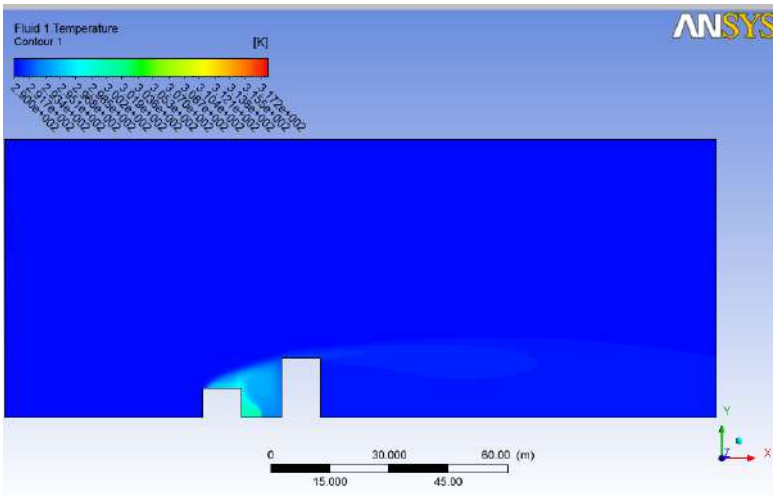


Figure 5.16- Evolution de la température – hauteur du bâtiment en aval = 2 fois la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s

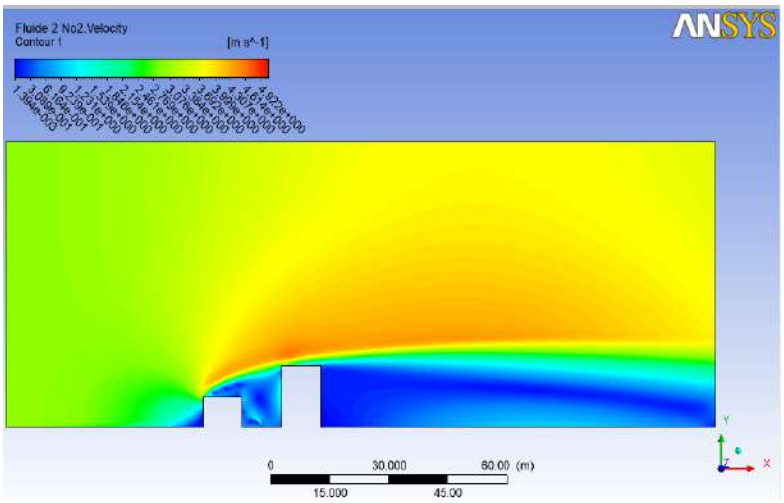


Figure 5.17- Evolution de la vitesse de sortie des gaz température – hauteur du bâtiment en aval = 2 fois la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s

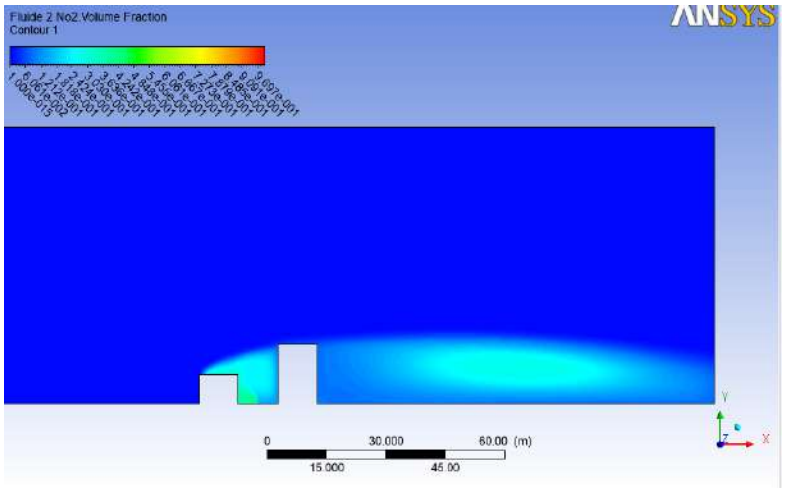


Figure 5.18- Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en aval = 2 fois la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s

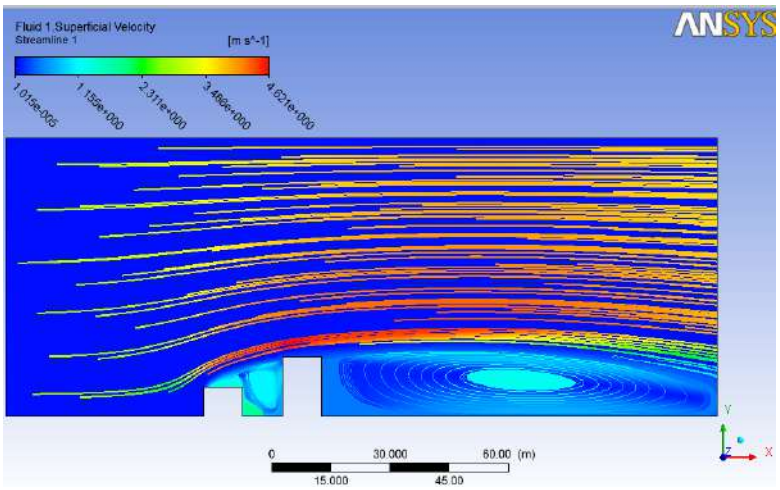


Figure 5.19- Evolution des lignes des vitesses – hauteur du bâtiment en aval = 2 fois la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s

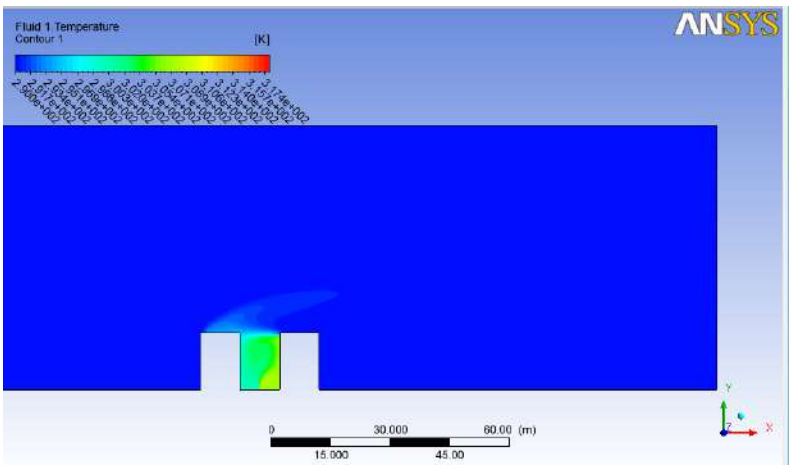


Figure 5.20- Evolution de la température – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 5 m/s

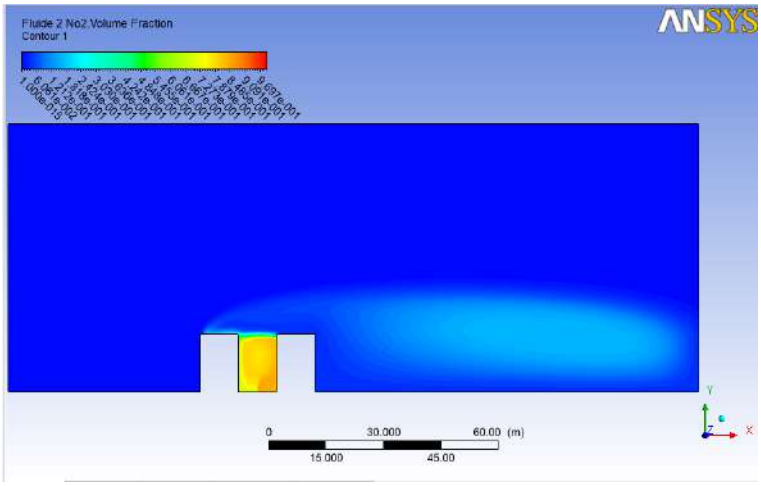


Figure 5.21- Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 5 m/s

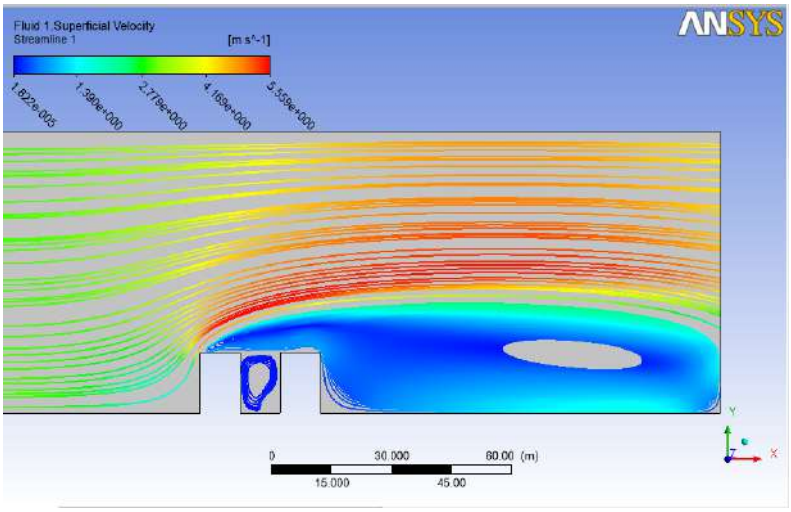


Figure 5.22- Evolution des lignes des vitesses – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 5 m/s

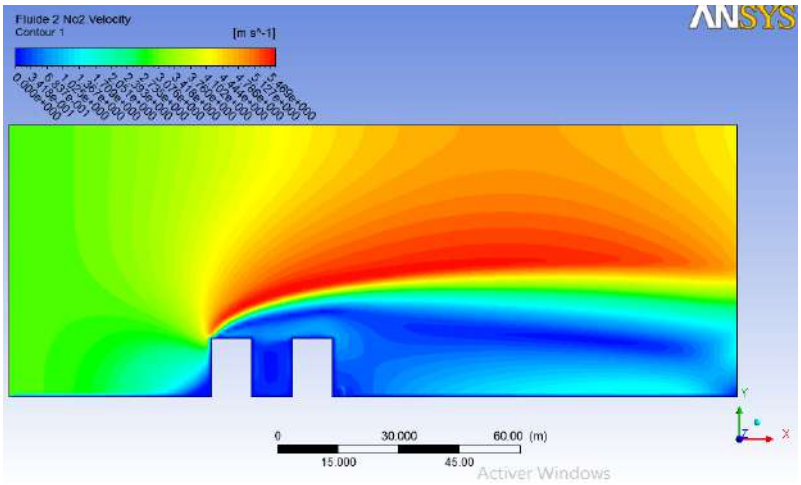


Figure 5.23- Evolution de la vitesse – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source après, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s

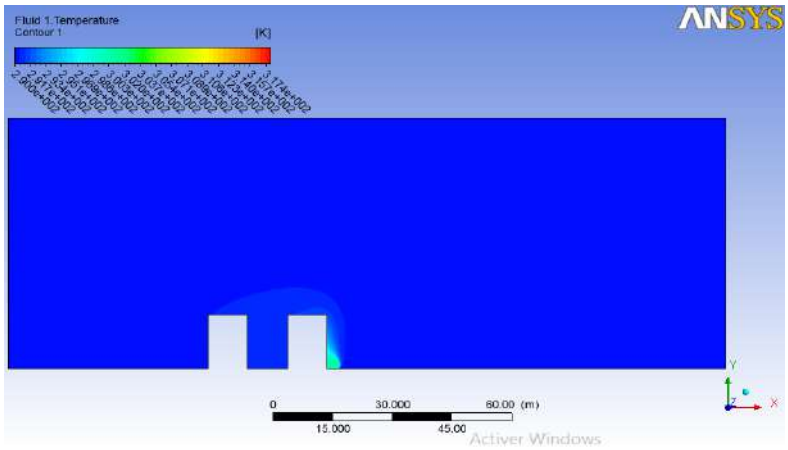


Figure 5.24- Evolution de la température – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source après, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s

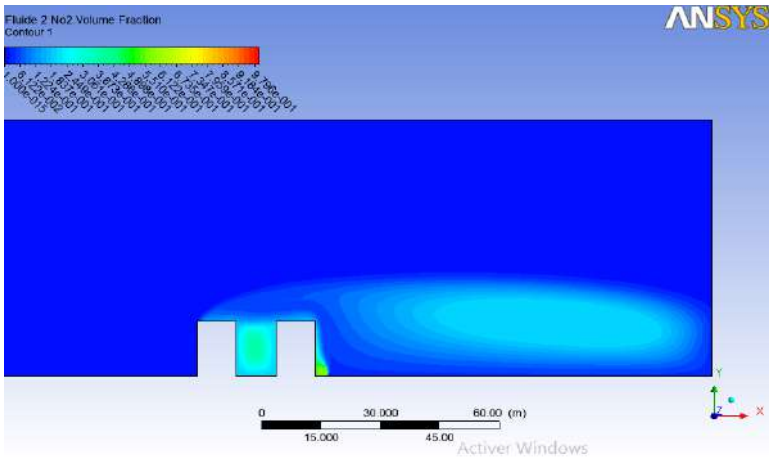


Figure 5. 25- Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source après, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s

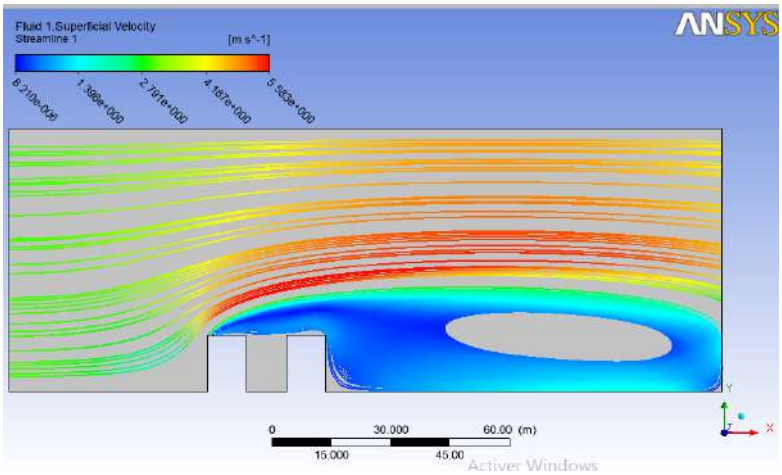


Figure 5.26- Evolution des lignes de vitesses – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source après, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s

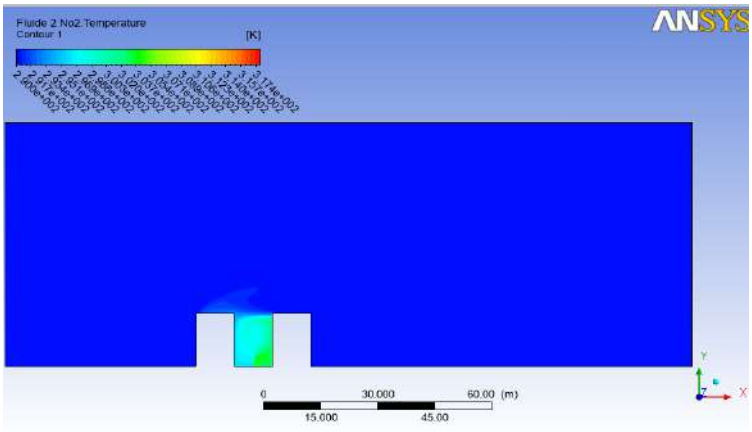


Figure 5.27- Evolution de la température – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s

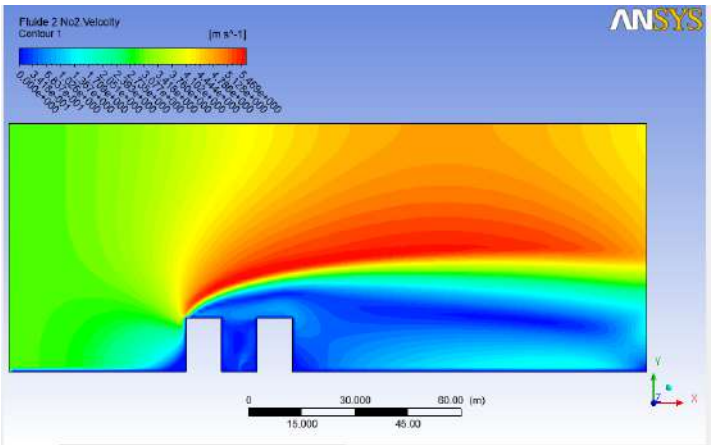


Figure 5.28- Evolution de la vitesse – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s

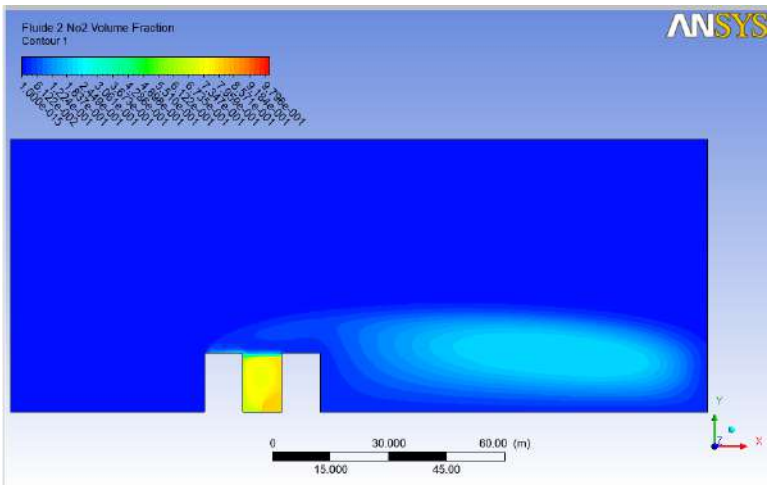


Figure 5.29- Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s

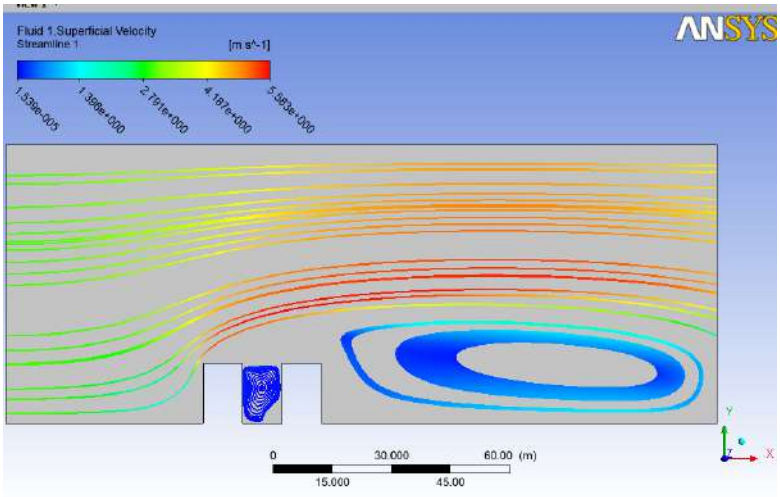


Figure 5. 30- Evolution des lignes des vitesse – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s

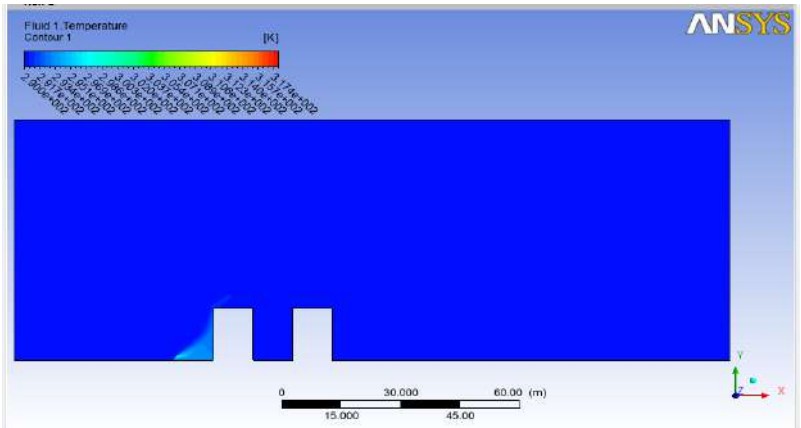


Figure 5.31- Evolution de la température – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source avant, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s

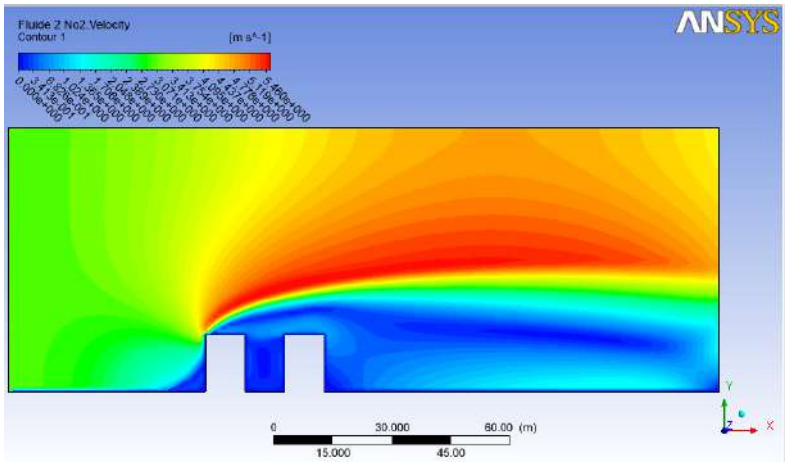


Figure 5.32- Evolution de la vitesse – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source avant, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s

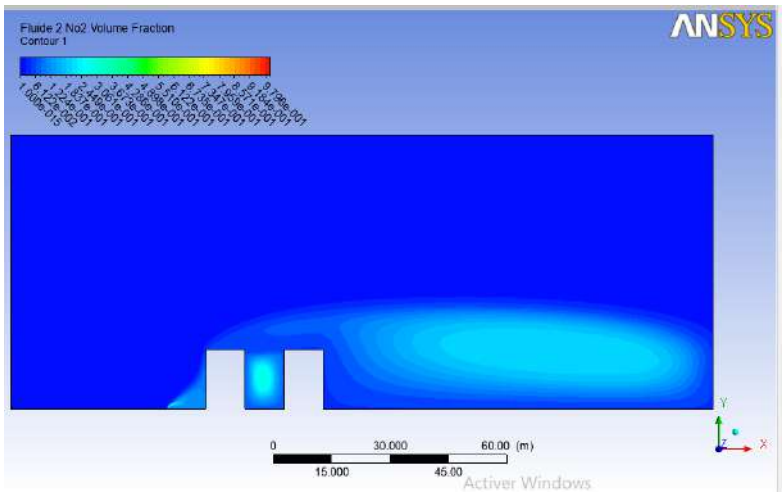


Figure 5.33- Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source avant, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s

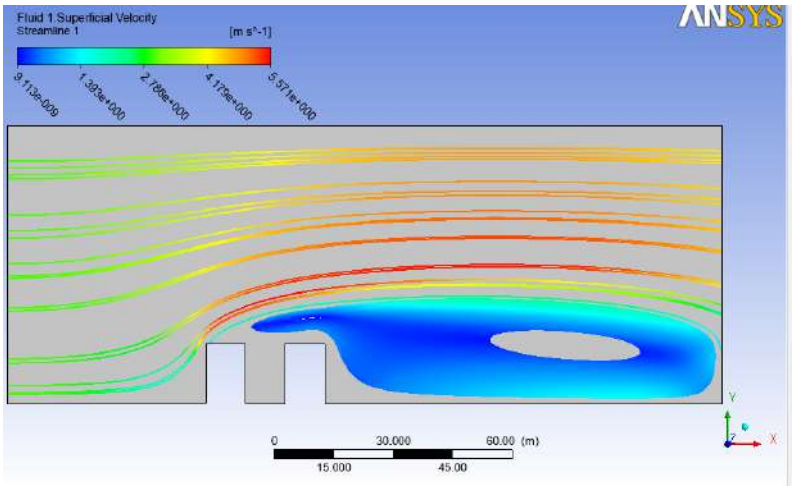


Figure 5.34- Evolution des ligne de vitesses – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source avant, $V_{sortie\ gaz}$ = 3 m/s

5.2. Analyse et évaluation des résultats

Ce chapitre présente les différents profils relatifs à la fraction, température et vitesse en fonction de la hauteur du domaine étudier (20 m). Ces profils ont été étudiés en variant les hauteurs des batiments par rapport à la source, les positions des sources émetrices du dioxyde d'azote par rapport aux bâtiments et la vitesse de sortie des gaz au niveau de la source étudiée. Les résultats obtenus ont montré que dans le cas où la source d'émission est située au niveau de la rue canyon, les profils de la concentration du dioxyde d'azote sont symetriques (Figure 5.35). Dans la première hypothèse quand le premier bâtiment de hauteur deux fois supérieur (2H avant) au deuxième bâtiment, les concentrations dans l'atmosphère emprisoné augmente légèrement puis le polluant est stagné jusqu' à une certaine hauteur ensuite il est commence à ce disperser au-delà de la hauteur du bâtiment. Dans la deuxième hypothèse le profil est inversé car la pollution est stagnée au niveau du deuxième bâtiment de haueur deux fois superieur au premier bâtiment (2H après) puis elle est dispresée au-delà de la hauteur de 15 m. En ce qui concerne les profils des concentrations en aval des deux bâtiment pour les deux hypothèses étudiées (2H avant et 2H après), la dispersion est similaire et aucune influence sur les varaiations des concentrations n'est constatée lors de la variation des haueteurs des bâtiments (figure 5.36).

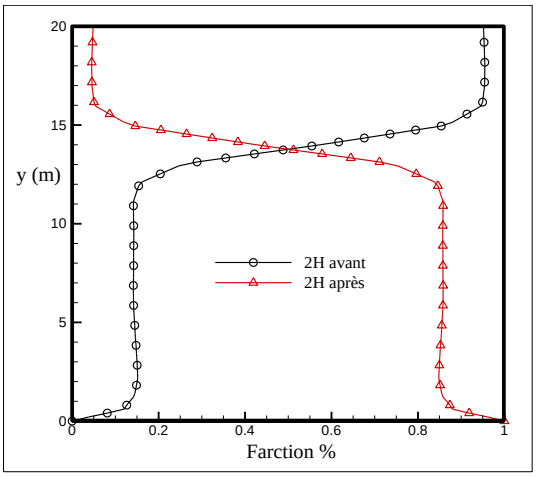


Figure 5.35- Profils des concentrations entre les bâtiments (source au milieu)

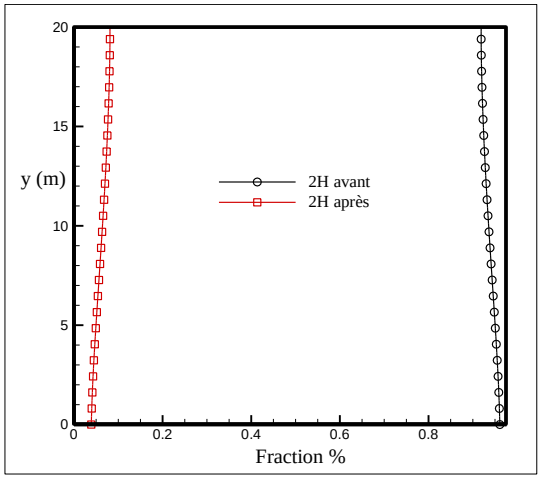


Figure 5.36 - Profils des concentrations après les bâtiments (source au milieu)

L'étude de la variation des vitesses de sortie des gaz de combustion dans le cas d'une source située au milieu de la rue canyon entre deux bâtiments de même hauteur (2H) ont montrée que les profils des concentrations sont presque identiques au niveau de la rue canyon (figure5.37) avec une diminution très marqué au sommet des bâtiment, par contre les profils des concentrations après les deux bâtiments (figure 5.38), sont identiques aussi mais les plus élevées correspondent à la vitesse de sortie de 7 m/s avec dues à la quantité des gaz générée lors de la combustion.

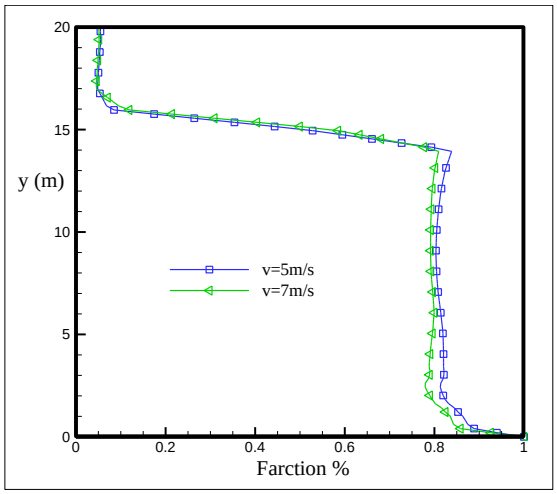


Figure 5.37- Profils des concentrations au milieu des bâtiments (source au milieu)

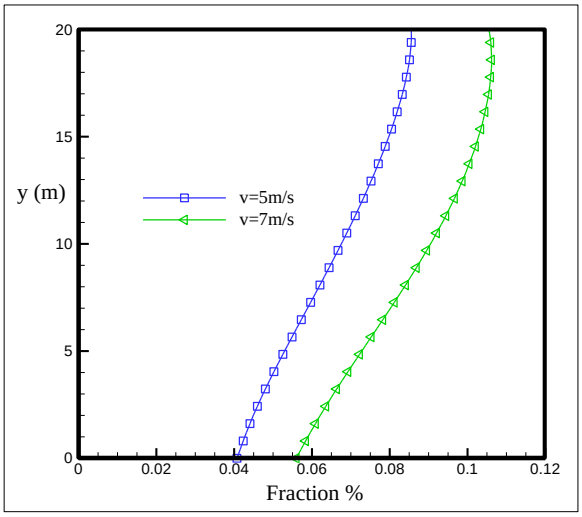


Figure 5.38- Profils des concentrations en aval des bâtiments (source au milieu)

Les profils des températures obtenus pour les différentes hauteurs des bâtiments (2H avant et après) et vitesses (5 et 7 m/s) à montrées que les variations sont identiques tout au long de la hauteur des bâtiments pour les deux plans, c'est-à-dire au milieu de la rue canyon et en aval des bâtiments. On remarque qu'au milieu de la rue canyon la température de sortie des gaz a une influence sur l'atmosphère (température élevée jusqu'à 10 m de hauteur). Cette influence a un grand effet sur le phénomène de déplacement des masses d'air froides et chaudes, ce qui provoque la dispersion des polluants (figure 5.39, 5.40, 5.41 et 5.42).

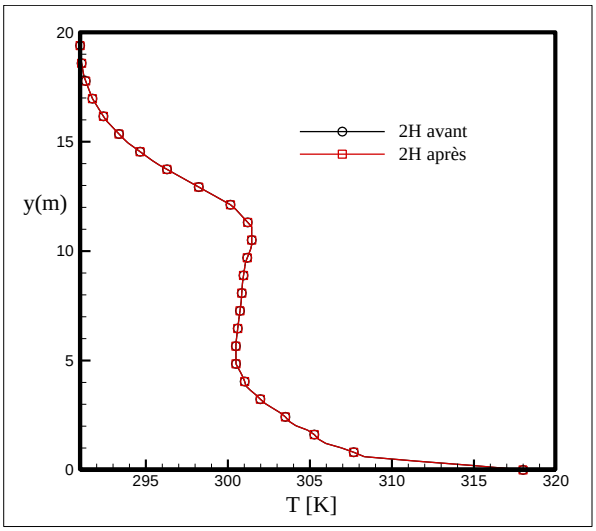


Figure 5.39- Profils des températures au milieu de la rue canyon à différentes hauteurs (source au milieu)

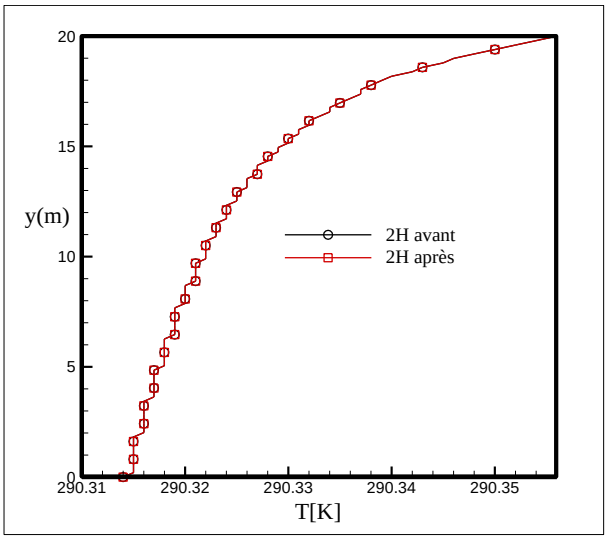


Figure 5.40- Profils des températures en aval des bâtiments à différentes hauteurs (source au milieu)

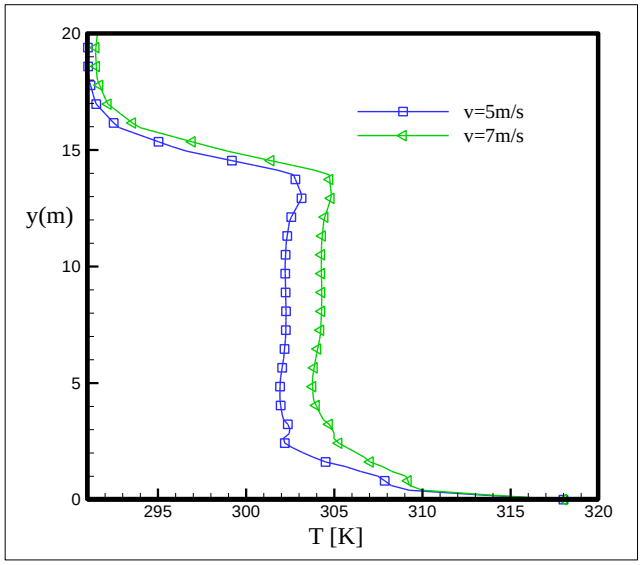


Figure 5.41- Profils des températures au milieu de la rue canyon à différentes vitesses (source au milieu, hauteurs identiques)

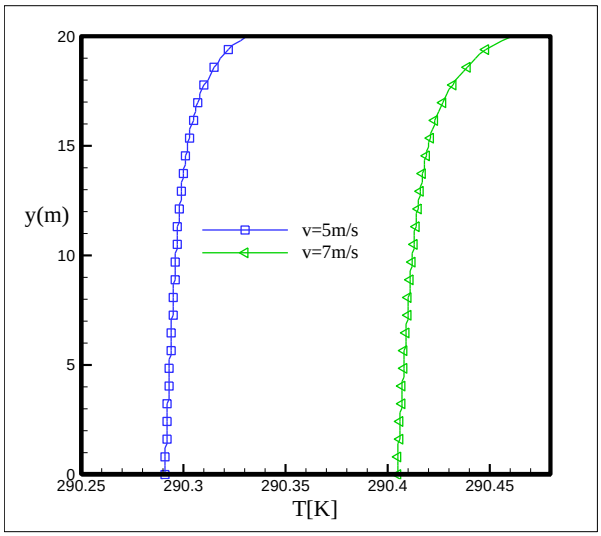


Figure 5.42- Profils des températures en aval des bâtiments à différentes vitesses (source au milieu, hauteurs identiques)

Pour mieux étudier la dispersion de la pollution par le dioxyde d'azote, nous avons procédé au changement de la position de la source par rapport à une géométrie des bâtiments et une vitesse de sortie des gaz fixes. Les positions choisies des sources étaient avant, au milieu et après les bâtiments. La modélisation par rapport au plan transversal (Ligne 2) situé au milieu des bâtiments à montré que la concentration émise de la source d'émission au niveau de la rue canyon a un profil différent par rapport aux concentrations émises avant et après les bâtiments

(figure5. 43). Ce la explique bien que la pollution décroit avec la hauteur du côté sous le vent du bâtiment et croit avec la hauteur du côté au vent du bâtiment formant le canyon. La modélisation par rapport au plan transversal situé après les bâtiments (Ligne 3) les profils de la fraction sont identiques suite à une bonne dispersion des polluants dans l'atmosphère (figure 5.44). Mêmes constations ont été enregistrés pour le paramètre de température (figures 5.45 et 5.46)

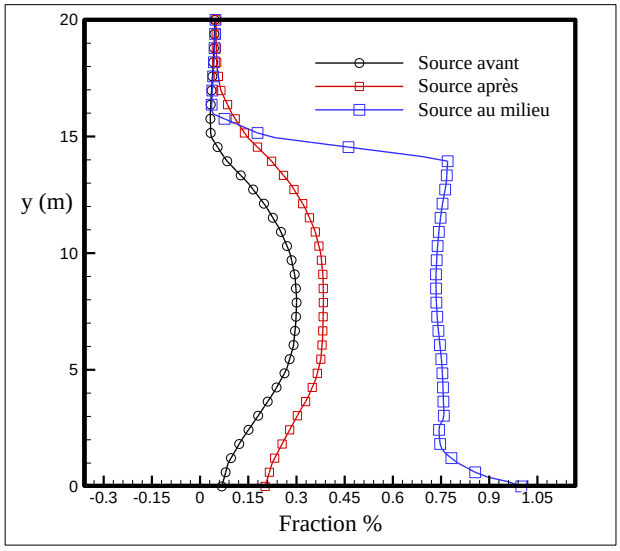


Figure 5.43- Profils des fractions en amont, milieu et en aval des bâtiments (vitesse de la source constante 3 m/s, hauteurs identiques, Ligne 2)

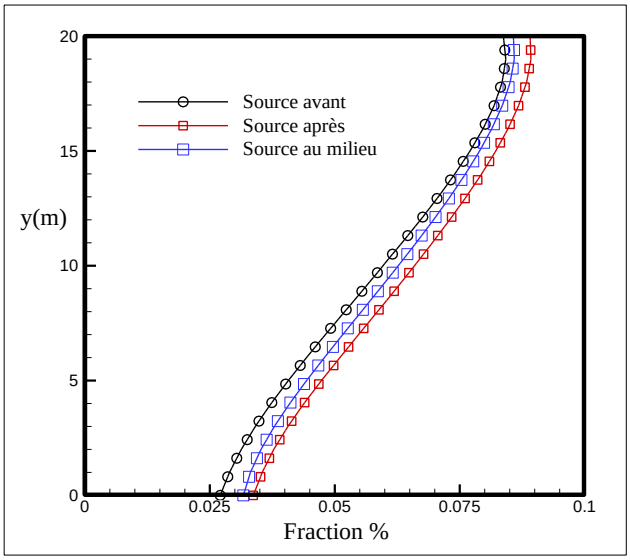


Figure 5.44- Profils des fractions en amont, milieu et en aval des bâtiments (vitesse de la source constante 3 m/s, hauteurs identiques, Ligne 3)

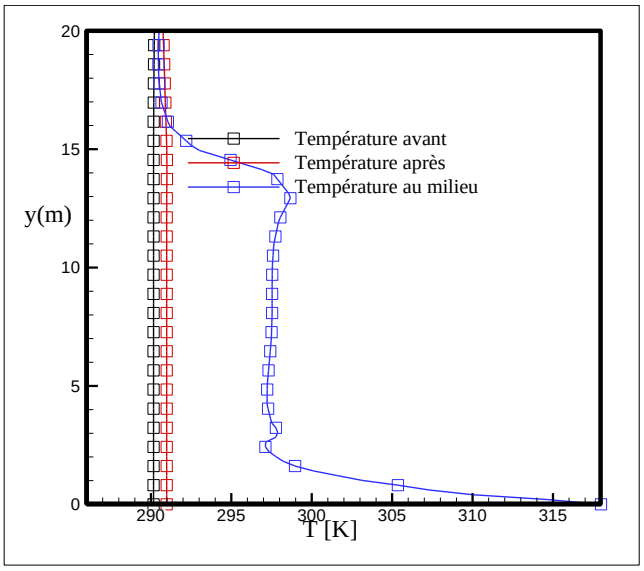


Figure 5.45- Profils des températures en amont, milieu et en aval des bâtiments (vitesse de la source constante 3 m/s, hauteurs identiques, Ligne 2)

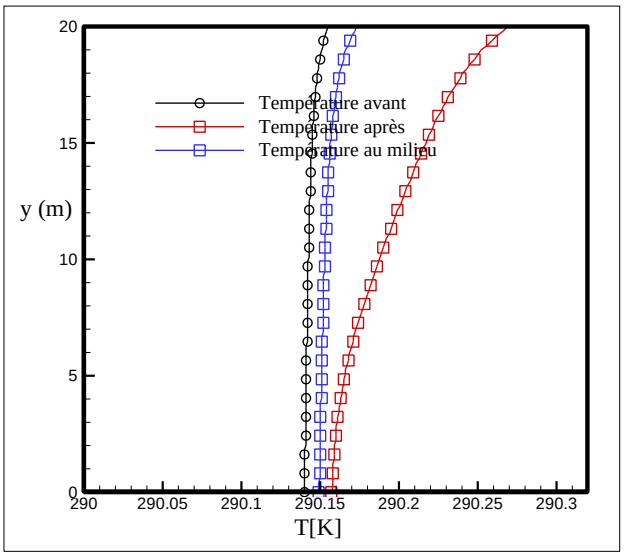


Figure 5.46- Profils des températures en amont, milieu et en aval des bâtiments (vitesse de la source constante 3 m/s, hauteurs identiques, Ligne 3)

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

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

Ce travail consiste à réaliser, sous conditions atmosphériques stables, la dispersion d'un polluant gazeux émis par un véhicule circulant dans une rue canyon, avant ou après les deux bâtiments formant la rue canyon. Le gaz étudié est le dioxyde d'azote (NO_2).

Les résultats obtenus ont montrés qu'au niveau de la rue canyon, les émissions de gaz émis restent toujours emprisonnés dans la rue canyon quelque soit la position et la vitesse de la source. Se phénomène est dû à l'effet de la dépression, de tourbillonnement ou recirculation crée par les bâtiments, température des gaz, etc.

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

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

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

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Brahim belhaouari Ratiba , Influence des modèles de turbulence sur la dispersion des gaz Polluants. Université hassiba benbouali-chlef, mémoire de magister ; 2013.

[2] Nicholson, S.E., A pollution model for street-level air. Atmospheric Environment 9, 19–31; 1975.

[3] Vardoulakis, S., Fisher, B.E.A ., Pericleous, K., Gonzalez-Flesca, N., Modelling air quality in street canyons: a review. Atmospheric Environment 37, 155–182 ; 2003.

[4] Baik, J.-J.et Kim, J.-J., A Numerical Study of Flow and Pollutant Dispersion Characteristics in Urban Street Canyon, J. Appl. Meteorol., 38, 1576-1589 ; 1999.

[5] Mehdi Menaouer, Modélisation numérique de l'évolution de la dispersion des polluants émis par une cheminée ; 2013.

[6] Rahal farid, modélisation et simulation de pollution atmosphérique. Le cas de la région d'Alger .université science et de technologie d'Oran Mohamed boudiaf, thèse de doctorat ;2015.

[7] Ramade F, «les polluants de l'environnement et de l'homme» dictionnaire encyclopédique des pollutions, Ediscience international, Paris, pages (13, 33, 424, 428)., 2000.

[8] Gafsi I. Contribution à l'étude d'impact des polluants atmosphériques d'origines industrielles par le réseau Sama Safia sur les asmathiques, cas station d'El Bouni. Mémoire de fin d'étude.2007-2008.

[9] Anthony UNG, Cartographie de la pollution atmosphérique en milieu urbain a l'aide de données multisources, 2003.

[10] W.Richard,D. Boubel, D Turner.Fundamentals of air Pollution, Third edition, academic press, Sydney,1994.

[11] (http://environnement.wallonie.be/rapports/dppgss/air1999/m_princ.htm)

[12] Encyclopédie Universalis, Paris. Sources de la pollution atmosphérique ;(1998).

[13] R. Atkinson,D. L. Baulch, R.A. Costa, R.F. Hampson, J.A Kerr & J. Troe, Journal of physical and chemical reference data, vol.26, pp.521,1997.

[14] E.C. Zabetta,P. Kilpinen, M. Hupa. Kinetic Modeling Study on the potential of Staged Combustion in Gas turbines for the reduction of nitrogen oxyde emissions from Biomass IGCC plants, journal of Energy and Fuels, vol.14, pp.751-761, 2000.

[15]Popovich, M., and Hering, C. Fuels and Lubricants. Oregon State University Press, Corvallis, 1978.

[16]US EPA, Evaluation of air pollutant emissions from subsonic commercial jet aircraft. EPA 420-R99-013, 1999.

[17]P. Quénel,W Dab, B Festy, C Viau. Qualité de l'air : environnement et santé publique-fondements et pratiques, pp. 219-315,2003.

[18]Schumann U, Schlager. H, Arnold F, Baumann R, Haschberger P, and Klemm O, Dilution of aircraft exhaust plumes at cruise altitudes Atmospheric Environment32 3097-3103, 1998.

[19]IPCC. Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of the working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, 2001.

[20]Jacob, D., Introduction to atmospheric chemistry, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1999.

[21]Florian Vendel, Modélisation de la dispersion atmosphérique en présence d'obstacles complexes : application à l'étude de sites industriels. Thèse de doctorat, Université de Lyon ;2011.

[22]Cellule interrégionale d'épidémiologie de Haute-Normandie (Cire), Effets de la pollution atmosphérique sur la santé, 2005.

[23]Coparly, l'air et les polluants, 2004.

[24]Direction générale de l'aviation civile. Pollution atmosphérique et aviation, 2003.

[25] Kalaora, ,p.105, 1998

[26]Souf. Généralités sur la pollution atmosphérique et ses effets, 1999.

[27]Lionel Soulhak, Modélisation de la dispersion atmosphérique à l'intérieur de la canopée Urbaine, Thèse de doctorat, Université de Lyon ;2000.

[28]Ryan, P. B., Spengler, J. D., et Letz, R. 1986. Estimating personal exposures to NO_2. Env.Int., 12, 395–400.

[29]Stull, R. B. : 1988, An Introduction to Boundary Layer Meteorology, Kluwer Academic publishers, Dordrecht, The Netherlands, 670pp.

[30]Garratt, J. R. : 1992, The Atmospheric Boundary Layer , Cambridge Atmospheric and Space Science Series - Cambridge University Press, 316pp.

[31]Raupach, M. R., Thorn A. S. et Edwards, I. : 1980, A wind tunnel study of turbulen flow close to regularly arrayed rough surfaces, Boundary-Layer Meteorol. , 18, 373-397.

[32] Grimmond, C. S. B. et Oke, T. R. : 2002, Turbulent heat fluxes in urban areas : Observations and a Local-Scale Urban Meteorological Parameterization Scheme (LUMPS),J. Appl. Meteorol. , 41, 792-810.

[33]Oke, T. R. : 1987, , Boundary layer climates, seconde édition, Routledge, London-NewYork.

[34] Roth, M. : 2000, Review of atmospheric turbulence over cities, Q. J. R. Meteorol.Soc.,126 , 941-990.

[35]Pope,S.B. : 2000, Turbulent flows, Cambridge University Press.

[36]Arya, S.P. : 1999, Air Pollution Meteorology and Dispersion, Oxford University Press.

[37]Bornstein, R.: 1987, Urban barrier effects on mesoscale and synoptic systems, Preprint Volume 9, Conference on Mesoscale Processes, Amer. Met Sot., 21-26, August.

[38]Vardoulakis, S, Fisher, B.E.A, Pericleous, K.et Gonzalez-Flesca, N. : 2003, Modelling Air quality in street canyon : a review. Atmos .Environ . **37**. 155-182.

[39]Moser et al., 1999 ; Direct numerical simulation of turbulent chanel flow up to Re = 590, Physics of Fluid, 11, 4, 943-945.

[40]Rodi et Mansour, 1993 A two-parameter model of turbulence, and its application to free jets. Turbulence transport modelling, 14.

[41]Kato, M. et Launder, B.E. : 1993, The modeling of turbulent flow around stationary and vibrating square cylinders, Proceedings,9th Symposium on Turbulent Shear Flows, Kyoto.

[42]Lien, F.-S. et Yee, E. : 2004, Numerical modelling of the turbulent flow developing within and over a 3-D building array, Part I : a high-resolution Reynolds-averaged Navier-Stokes approach, *Boundary-Layer Meteorol* ., **112**,427-466.

[43] Viollet, P., 1988. On the numerical modeling of stratified flows. J. Dronkers and W. Leussen Eds, Springer-Verlag, 257-277. 37.

[44]Launder, B., Spalding, D., The numerical computation of turbulent flow, 1974.

[45] Pierre Lauret , Modélisation de la dispersion atmosphérique sur un site industriel par combinaison d'automates cellulaires et de réseaux de neurones, 2014.

[46] J.C Couillet, Dispersion atmosphérique (Mécanismes et outils de calcul), 2002.

[47] Fekih Abdellali , Étude et modélisation de l'écoulement et de la dispersion des polluants atmosphériques dans une rue canyon idéalisée. mémoire de magister, université Mohammed BOUDIAF-Oran ; 2012.

[48] Abdeldjouad Meriem, Impact de la morphologie du bâtiment sur la dispersion des polluants atmosphériques Cas d'étude : ville d'Annaba. Mémoire de magister, Université Mohamed Khider – Biskra ;2014.

[49]Mestayer,P.G , Transport et dispersion des polluants atmosphériques, Équipe dynamique de l'atmosphère habitée laboratoire de mécanique des fluides UMR 6598 CNRS École Centre de Nate , Version 2,2016.

[50]Dif,N., Bouchaour,M .,Merad,L., et Benyoucef, B., Paramètres influençant la dispersion des polluants gazeux. Énergie renouvelables, Ren :ICPWE 139-142. 2003.

[51]Organisation mondiale de la sante, Les expositions aux polluants de l'air des espaces clos et leurs effets sur la santé, Nordlingen, 8-11 juin 1982.

[52] Organisation mondiale de la sante, Choix de méthodes pour la mesure des polluants de l'air, WHO Offset Publication N^{o} 24, 1976.

[53] Ecole des Mines de Saint-Etienne, Méthodes spectrométriques d'analyse et de caractérisation : analyse des gaz

[54] Dr. Martyna Kuske, Dr jacques Nicolas, Les pollutions dans l'air à l'intérieur des bâtiments, Diagnostic Incidences sur la santé

[55] I. ZDANEVITCH Veille, technologique capteurs de gaz, INERIS DRC - 00-23446-AIRE - rap567-3.doc-IZd, Décembre 2000.

[56] (www.ecom.fr/ecom-j2kn-pro-industrie-2)

[57]Turbelin G. (2000), « Modélisation de la turbulence atmosphérique en vue de l'étude du chargement aérodynamique des structures soumises aux effets du vent ».Thèse soutenue le 14 janvier 2000 à l'Université d'Evry – Centre d'Etudes de Mécanique d'Ile-de-France

[58]Hug M. (1975) « Mécanique des fluides appliquée aux problèmes d'aménagement et d'énergétique » Edition Eyrolles.