REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

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

Simulation numérique de la dispersion d'un polluant dans un milieu urbain

---

Présenté par

ALLAOUA Sabah

BOUZIDI Mebarka

Proposé et Dirigé par

Dr. HADIDI Noureddine

Dr. REBHI Ridha

Promotion 2019

Remerciement

" رَبِي أَوزِعْنَا أن نَشكُرَ نِعمتكَ التِي أنْعمتهَا عَلينا وَ عَلى وَالِدِينَا، وَ أَن نَعملَ صالحاً تَرضَاهُ و أَدخِلنَا بِرحمَتِكَ فِي عِبادكَ الصَّالِحينَ"

الحمد لله رب العالمين, و الصّلاة و السلام على خاتم الأنبياء و أشرف المرسلين, محمد صل الله عليه وسلم وعلى صحبه أجمعين.

Nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur ***Dr. HADIDI Noureddine*** *pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail et pour les très précieux conseils et les encouragements qu'il n'a cesse de nous prodiguer tout au long de ce travail.*

Nous remercions particulièrement notre Co-encadreur ***Dr. REBHI Ridha*** *pour ses efforts, et le temps qu'il a passé pour nous nous a énormément aidés et ne nous a pas épargnés les informations et les conseils.*

Nos remerciements vont aussi à touts les enseignants et les personnes qui nous ont aidés de prés ou de loin à réaliser ce mémoire.

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude aux membres de jury pour nous avoir fait l'honneur et le plaisir d'accepter de juger notre travail.

En fin, nous tenons à exprimer nos reconnaissances à tous nos amis pour leur soutien moral.

Dédicace

J'ai l'honneur de dédie ce modeste travail tous d'abord à:

Mon dieu qui m'a donné la capacité et m'aidé dans ma carrière, et grâce à lui est arrivé ici.

*A mon pays bien-aimé « **Algérie** »*

A ma très chère mère, à ma couronne, grâce à sa prière et à mes sacrifices pour moi, je n'oublierai pas tout ce que je me suis présenté tout au long de ma vie, mon bien le plus précieux.

A l'homme dur qui m'a appris à rester debout chaque fois que je tombais, qui m'accompagnait sur le chemin de la réussite, j'apprécie tous vos efforts pour moi « mon père »

*A ma grande mère bien aimée **Messouda** que dieu ait pitié d'elle*

*A mes sœurs **Zohra, Fatiha, Ahlem***

*A mes frères **Ahmed** et **Benyoucef***

*A les petits enfants **Kawther, Malak, Basma** et **Iyad***

*A mon très cher mari **Mezaine***

Et spécial dédicace pour mes proches amies

Sabah, Soumaira, Zoulikha, Marwa, Roumaissa, Khalida**, **Fatima, Nawel Ibtissem, Assia, Selma, Thouria** et **Amira.

*A toute la famille **BOUZIDI, MENAD** et **RABAH SIDHOM***

*A tous mes enseignants surtout « **Dr. HADIDI** et **Dr. SI MOUSSA** »*

Et mes camarades de la promotion Génie des procédés et l'environnement

BOUZIDI Mebarka

Dédicace

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mon très cher ***père****, de qui je garde les meilleurs souvenirs que dieu le reçoit dans son vaste paradis.*

Ainsi qu'à la plus chère que j'ai au monde, À celle qui m'a transmis la vie, l'amour, le courage, À celle qui a sacrifiée pour le bien être et le bonheur de ses enfants :

À ***ma mère*** *que dieu la garde.*

À mes très chers frères, Les deux bougies qui allument ma vie : ***MOHAMMED*** *et* ***KHIREDDINE****…… Le bon dieu vos garde.*

À mes très chères grand parents ***MOSTEFFA*** *et* ***MAHDJOUBA*** *qui ont souhaité vivre longtemps juste pour me voire Qu'est-ce-que je vais devenir, grâce à leurs encouragements et leur plaidoyer que j'ai réussi ; je vous souhaite tous le bonheur, je vous aime.*

À mes tantes qui je les aime beaucoup ***ZOHRA*** *et* ***LALEJA*** *merci pour votre courage.*

Aussi ma jolie ***AICHA****,* ***FATMA ZOHRA****,* ***NAIMA****,* ***FATMA*** *et* ***NACIRA***

Ainsi mes oncles : ***MILOUDE*** *merci pour ton soutien, MOSTAFFA, AMAR et TAHER merci* pour m'avoir soutenu durant ces années.

À ma belle et mon amie ***WARDA****, à la fleur de nos maisons* ***MOHAMED ACHREF***

Je dédie ce travail aussi à toute mes cousines ***SOUMIA****,* ***WIAME****,* ***KHAWLA****,* ***MARWA****,* ***SAFA****,* ***DOAE****,* ***MALEK*** *et la petite-fille dans notre famille* ***KHADIDJA ARIDJE****.*

Et aussi à mes cousins : ***ISHAK****,* ***YOUCEF****,* ***NOUREDDINE****,* ***SIFOU*** *,* ***MOHAMED****,* ***ABDOU****,* ***ADEL*** *et* ***AMINE*** *je vous souhaite tous le réussit.*

Et ainsi à mes très chères et mes amours amies de mon classe ***ASSIA****,* ***IBTESSEM****,* ***AMIRA****,* ***SALMA****,* ***THORIA****,* ***ASMA*** *je souhaite la longue vie de notre amitié……tous la réussit pour vous*

A mes amies dans ma chambre ***ZOULIKHA****,* ***MARWA****,* ***FELLA****,* ***SOUHILA*** *et* ***FATMA ZOHRA*** *merci pour tous les jours plein de joie…… ils restent dans la mémoire.*

A ma proche ***SOURIA****, son mari* ***LHACHMI*** *et leur famille*

A mes belles ***RAFIKA*** *et* ***HAMIDA***

A tous les membres de la famille ***ALLAOUA****,* ***ZAMMOUR*** *et* ***BOUZIDI***

Et aussi à mon binôme ***MIKA*** *chez qui m'a supporté durant ces 8 années, et chez qui j'ai trouvé l'entente dont j'avais besoin……je t'aime.*

A tous ceux qui me sont chers, *A tous ceux qui m'ont aidé de prés ou de loin.*

SARAH

SOUMMAIRE

Remerciement ……..……I

Dédicaces ……...……...II

Résume ……IV

Liste des figures ……XI

Liste des tableaux ……...XIV

Nomenclature ……..XV

Abréviations ……XVII

Introduction générale ……... 01

Chapitre I : généralité de la pollution atmosphérique

I.1. Introduction **……..03**

I.2. La pollution atmosphérique **……03**

I.3. Sources d'émissions des polluants atmosphériques **…….03**

I.3.1. Les sources naturelles **…….04**

I.3.2. Les sources anthropiques **…….04**

I.4. Divers polluants atmosphériques **…….…05**

I.4.1. Les polluants gazeux **……05**

I.4.2. Les polluants particulaires **……..…….07**

I.5. Les effets de la pollution atmosphérique **……..07**

I.5.1. Sur la santé **……...07**

I.5.2. Sur l'environnement **……..……09**

I.6. Les solutions **…….10**

I.6.1. La réduction des émissions **…….....10**

I.6.1.1. L'aspect technologique **……...10**

I.6.1.2. L'aspect législatif **……....10**

I.6.1.3. L'aspect économique **……..…11**

I.6.2. La gestion de la pollution **……11**

I.6.3. La place de la modélisation **……11**

I.6.3.1. Surveillance de sites **……12**

I.6.3.2. Aide à la décision-Etude à la décision **……12**

I.7. Caractéristiques de l'écoulement **……..13**

I.8. Conclusion **……....13**

Chapitre II : Modélisation de la dispersion des polluants atmosphérique en milieu urbain

II.1. Introduction **……15**

II.2. L'atmosphère **……..15**

II.3. La couche limite atmosphérique **……..…16**

II.4. Structure de la couche de surface urbaine **……..16**

II.5. La dispersion des polluants dans l'atmosphère urbaine **…….18**

II.6. Ecoulement moyens et turbulences dans la couche de surface **…….……18**

II.6.1. Les équations fondamentales dans la couche de surface **…….18**

II.6.2. Prise en compte de la turbulence **……20**

II.7. Les influence de structure urbaine **……..……21**

II.7.1. Effets dynamiques **……..……22**

II.7.2. Effets thermiques **……..…….22**

II.7.3. Effets sur la dispersion **……..….22**

II.8. Outils de modélisation **……23**

II.8.1. Modélisation numérique **……...23**

II.8.1.1. La simulation numérique directe (DNS) **…….....23**

II.8.1.2. La simulation des Grandes Echelles (LES)**……....23**

II.8.1.3. La modélisation des équations de Navier-Stokes (RANS) **……..23**

II.8.1.3.1. Modèle (AS) **……24**

II.8.1.3.2. Modèle à deux équations **……25**

II.8.2. Les différentes modèles de la dispersion atmosphérique **……...31**

II.8.2.1. Les modèles gaussiens **……..31**

II.8.2.2. Les modèles lagrangiens **……...31**

II.8.2.3. Les modèles de la mécanique des fluides CFD **……32**

II.9. Conclusion **…….32**

Chapitre III : Etude numérique

III.1. Introduction **……33**

III.2. La mécanique des fluides numériques (MFN) **……..33**

III.2.1. Méthode de travail ……34

III.2.2. Application de la CFD ……..34

III.2.3. Méthodes de discrétisation ……...35

III.2.4. Principe de la méthode des volumes finis ……35

III.3. ANSYS, In ……35

III.4. ANSYS CFX ……35

III.5. Environnements logiciels ……..36

III.6. Mettre en place une simulation à l'aide d'ANSYS CFX se fait en quatre étapes ……36

III.6.1. ANSYS ICEM ……..37

III.6.2. CFX-Pre ……37

III.6.3. CFX-Solver ……..38

III.6.4. CFX-Post ……40

III.7. Conclusion ……40

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1. Introduction ……41

IV.2. L'étude de la modélisation ……41

IV.3. Domaine de simulation numérique ……42

IV.3.1. Interprétation de simulation numérique de la dispersion en 3D ……..43

IV.3.2. Interprétation de simulation numérique de la dispersion en 2D ……46

IV.4. Conclusion **……59**

Liste des figures

Figure I.1: Sources d'émission de polluants atmosphériques **…….03**

Figure I.2: Contribution par secteur aux émissions des NO_x (en équivalent NO_2) en France pour l'année 2012 **……06**

Figure II.1: Schéma structurel de l'atmosphère terrestre (d'après Viers, 1968) **……...16**

Figure II.2: Schéma de la structure de Couche Limite Urbaine CLU **……17**

Figure III.1: Les modules principaux du CFX **……..36**

Figure III.2: Domaine de calcul par ICEM-CFX (géométrie de notre étude) **……...37**

Figure III.3: Interface graphique du module CFX-Pre **……..37**

Figure III.4: Interface graphique du module CFX-Solver **……..38**

Figure III.5: Organigramme de mise en œuvre d'un calcul (source : documentation CFX) **……...39**

Figure III.6: Interface graphique du module CFX-Post en 3D **……40**

Figure IV.1: Représente le Domaine d'étude maillée. **……42**

Figure IV.2: représente l'évolution de température de CO_2 [**X**=25 m, **V**=7m/s, **T**=333 K]. **……...44**

Figure IV.3: montre l'évolution de fraction volumique CO_2 [**X**=25 m, **V**=7m/s, **T**=333 K]**……44**

Figure IV.4: illustre l'évolution de vitesse sur l'axe x [**X**=25 m, **V**=7m/s, **T**=333 K]**……44**

Figure IV.5: Montre l'évolution de température de CO_2 [**X**=50 m, **V**=7m/s, **T**=333 K]**……45**

Figure IV.6: Montre l'évolution de fraction volumique CO_2 [**X**=50 m, **V**=7m/s, **T**=333 K]. **……...45**

Figure IV.7: représente l'évolution de vitesse sur l'axe x [**X**=50m, **V**=7m/s, **T**=333 K]**.....45**

Figure IV.8: illustre l'évolution de température CO_2 [**X**=50 m, **V**=7m/s, **T**=393K] **……..46**

Figure IV.9: illustre l'évolution de fraction volumique CO_2 [**X**=50 m, **V**=7m/s, **T**=393K]**……46**

Figure IV.10: représente l'évolution de vitesse sur l'axe x [**X**=50 m, **V**=7m/s, **T**=393K]**……46**

Figure IV.11: représente la position des 3 plans dans le domaine en 3D**……..47**

Figure IV.12: illustre l'évolution de température CO_2 sur le plan 1 (YZ) **……..47**

Figure IV.13: représente l'évolution de fraction volumique CO_2 sur le plan 1 (YZ)**…….48**

Figure IV.14: illustre l'évolution de vitesse sur le plan 1 (YZ)**……...48**

Figure IV.15: montre l'évolution de Température CO_2 sur le plan 2 (XY) **……48**

Figure IV.16: représente l'évolution de Fraction Volumique CO_2 sur le plan 2 (XY) **……49**

Figure IV.17: illustre l'évolution de Vitesse sur le plan 2 (XY) **……...49**

Figure IV.18 : montre l'évolution de Température CO_2 sur le plan 3 (YZ). **……49**

Figure IV.19: représente l'évolution de Fraction volumique sur le plan 3 (YZ)…**……50**

Figure IV.20: illustre l'évolution de Vitesse sur le plan 3 (YZ).**……50**

Figure IV.21: illustre l'évolution de Température sur le plan 1 (YZ)**……50**

Figure IV.22: représente l'évolution de Fraction volumique sur le plan 1 (YZ)**……51**

Figure IV.23: illustre l'évolution de Vitesse sur le plan 1 (YZ). **……51**

Figure IV.24: montre l'évolution de Température CO_2 sur le plan 2 (XY)**……51**

Figure IV.25: illustre l'évolution de Fraction volumique CO_2 sur le plan 2 (XY) **……51**

Figure IV.26: représente l'évolution de Vitesse sur le plan 2 (XY)**……52**

Figure IV.27: représente l'évolution de Température sur le plan 3 (YZ)**……52**

Figure IV.28: montre l'évolution de Fraction volumique sur le plan 3 (YZ)**……52**

Figure IV.29: montre l'évolution de Vitesse sur le plan 3 (YZ).**……52**

Figure IV.30: illustre l'évolution de Température sur le plan 1 (YZ)**……53**

Figure IV.31: représente l'évolution de Fraction volumique sur le plan 1 (YZ).**……53**

Figure IV.32: montre la variation de Vitesse sur le plan 1 (YZ). **……53**

Figure IV.33: représente l'évolution de Température sur le plan 2 (XY)**……54**

Figure IV.34: illustre l'évolution de Fraction volumique sur le plan 2 (XY)**……54**

Figure IV.35: montre l'évolution de Vitesse sur le plan 2 (XY) **……54**

Figure IV.36: montre la variation de Température sur le plan 3 (YZ). **……..55**

Figure IV.37: représente l'évolution de Fraction volumique sur le plan 3 (YZ).**……55**

Figure IV.38: illustre l'évolution de Vitesse sur le plan 3 (YZ). **……55**

Figure IV.39: Montre la position des lignes 1 et 2 dans le domaine en 3D **……56**

Figure IV.40: représente les Profils de Température dans les lignes 1 et 2**……56**

Figure IV.41: montre les Profils de Fraction volumique dans les lignes 1 et 2**……57**

Figure IV.42: illustre les Profils de Vitesse dans les lignes 1 et 2**……..57**

Figure IV.43: montre les Profils de Température dans les lignes 1 et 2 **…….....57**

Figure IV.44: représente les Profils de Fraction volumique dans les lignes 1 et 2**……58**

Figure IV.45: illustre les Profils de Vitesse dans les lignes 1 et 2**……...58**

Figure IV.46: représente les Profils de Température dans les lignes 1 et 2**……58**

Figure IV.47: montre les Profils de Fraction volumique dans les lignes 1 et 2**……59**

Figure IV.48: illustre les Profils de Vitesse dans les lignes 1 et 2**……59**

Liste des tableaux

Tableau I.1: Effets des polluants sur la santé humaine **……..08**

Tableau I.2: Effets des principaux polluants sur l'environnement **…….09**

Tableau II.1: Les constantes de modèle Spalart-Allmars SA **…….25**

Tableau II.2: Echelle de la vitesse et l'échelle de longueur pour les modèles k-ε et k-ω **…..26**

Tableau II.3: Valeurs des constantes du modèle k-ε **……..27**

Tableau II.4: Les constantes du modèle k-ε réalisable **……...28**

Tableau II.5: Valeurs des constantes du modèle k-ω **……...29**

Tableau II.6: Valeurs des constantes du modèle SST k-ω **…….29**

Nomenclature

Notation	Signification	Unité
σ_k; σ_ε ; C_μ; $C_{1\varepsilon}$ et $C_{2\varepsilon}$	Valeurs des constantes du modèle k-ε	_
σ_k ; σ_ε; $C_{1\varepsilon}$; C_2 ; et A_0	constantes du modèle k-ε réalisable	_
α ; β ; β^* ; σ_{k1} et $\sigma_{\omega 1}$	Valeurs des constantes du modèle k-ω	_
α_1; β_1; β^*; $\sigma_{\omega 1}$; σ_{k1}; α_2; β_2; $\sigma_{\omega 2}$ et σ_{k2}	Valeurs des constantes du modèle SST k-ω	_
ε	taux de dissipation turbulente	($m^2.s^{-3}$)
λ_t	conductivité thermique turbulente	($W.m^{-1}.K^{-1}$)
λ	conductivité thermique moléculaire	($W.m^{-1}.K^{-1}$)
ρ	densité du fluide	
ρ	masse volumique	($Kg.m^{-3}$)
Ω_{ij}	grandeur de tenseur de taux de rotation	
θ	température potentielle	(K)
C	concentration d'un polluant.	(ppm)
C_p	capacité calorifique de l'air	($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
C_{b1}; C_{b2} ; σ_v ; C_{v1}; C_{w1} ; C_{w2} ; C_{w3} et k	constantes de modèle Spalart-Allmars SA	_
D_{mi}	coefficient de diffusion moléculaire massique	
F_2	deuxième fonction de transition	
G_v	production de la viscosité turbulente	

k	constante de Von Karman	_
k	l'énergie cinétique turbulente	($kg.m^{-2}.s^{-2}$)
K_t	diffusivité turbulente	($m^2.s^{-1}$)
ℓ	Echelle de longueur pour le modèle k-ω	_
P	pression de l'air	(atm)
P_s	pression de référence	(h.Pa)
q	humidité de l'air	(%)
R	terme source	
R	constante des gaz parfaits	($l.atm.mol^{-1}.K^{-1}$)
S	terme source additionnel	
S	mesure invariante du taux de déformation	
$\bar{S}$	la somme de S, en fonction de déformation et tenseur de rotation.	_
T	température de l'air	(°C)
T_v	température virtuelle	(K)
U	vitesse d'une particule de fluide	($m.s^{-1}$)
ν	viscosité cinématique moléculaire	($m^2.s^{-1}$)
v_t	viscosité turbulente cinématique	($m^2.s^{-1}$)
V	Vitesse	($m.s^{-1}$)
V	Echelle de la vitesse pour le modèle k-ε	_
X	Distance	(m)
y	distance normale à la surface	(m)
Y_v	destruction de la viscosité turbulente	
z ∗	hauteur	(m)

Abréviations

AS : Spalart-Allmaras.

CFD : Computational Fluid Dynamics.

CLA : couche limite atmosphérique.

CLS : couche limite de surface.

CLU : couche limite urbaine.

CO : Monoxyde de carbone.

COV : Composer organique volatile.

DEFORPA : Dépérissement des forets attribué à la pollution atmosphérique.

DNS : Direct Numerical Simulation.

FV : Fraction volumique

LES : Large Eddy Simulation**.**

MDF : Méthode de différences finis.

MEF : Méthode des éléments finis.

MFN : mécanique des fluides numériques.

MVF : Méthode des volumes finis.

NO_x : Les oxydes d'azote.

O_3 : L'ozone.

OCDE : L'organisation de coopération et de développement économique.

RANS : Reynolds Averaged Navier-Stockes.

SST : Shear Stress Transport.

SO_2 : Le dioxyde de soufre.

T : Température.

V : Vitesse

ملخص:

يتضمن هذا العمل دراسة عددية لإنتشار غاز ملوث ناتج عن مدخنة مصنع الموضوعة في مجال مضطرب, و تأثيره حول حواجز متماثلة في المنطقة الحضرية. النتائج المحصل عليها على شكل ثنائية وثلاثية البعد تسمح باستخراج مدى تأثير تغيرات عدة عوامل على المجرى, على سبيل المثال درجة حرارة الغاز الخارجة من المدخنة و وضعية هذه الأخيرة بالنسبة لوضعية البنايات. الغاز الذي تمت دراسته هو ثنائي أكسيد الكربونCO_2. في هذا العمل, تم إجراء عمليات محاكاة CFD باستخدام طريقة RANS قائمة على النموذج k-ε المقدمة بواسطة برنامج ANSYS-CFX.بينت النتائج التي تم الحصول عليها انه كلما كانت البنايات بعيدة عن مدخنة المصنع كلما كان تركيز الغاز الملوث على مستوى البنايات و الأرض منخفض. كذلك تأثير العوامل المدروسة على انتشار الغاز في المنطقة و خاصة حول حواجز البنايات كانت جد ملحوظة.

الكلمات المفتاحية : محاكاة عددية, المنطقة الحضرية, المدخنة, ملوث غازي, ثلاثي البعد 3D.

Résumé :

Dans ce travail, on a présenté une étude numérique, en régime turbulent, de la dispersion d'un polluant issu d'une cheminée autour des obstacles identiques dans un milieu urbain. Les résultats obtenus en configuration bidimensionnelle et tridimensionnelle permettent de déterminer l'effet de la variation de certains paramètres sur l'écoulement telle que la température de sortie de la cheminée et l'emplacement de cette dernière par rapport à la position des bâtiments. Le polluant choisis était le dioxyde de carbone (CO2). Dans ce travail, des simulations CFD ont été réalisées en utilisant une méthode RANS basée sur le modèle k-ε fournit par le code ANSYS-CFX. Les résultats obtenus ont montré que plus les bâtiments sont éloignés de la cheminée plus la concentration au niveau des bâtiments et sur le sol est faible. Ainsi, l'influence des paramètres étudiés sur la dispersion de polluant dans le domaine et particulièrement sur les obstacles été observée.

Mots clés: Simulation numérique, milieu urbain, Cheminée, polluant gazeux, 3D.

Abstract

In this work, We study a numerical study, in turbulent regime, of pollutant dispersion resulting from a chimney around identical obstacles in urban .The results obtained in 2-dimensional and 3-dimensional configuration make it possible to determine the effect of the variation of several parameters on the flow, such as the temperature of contaminate ejection and the emplacement of chimney with regard of the position of the obstacles. The pollutant chosen was the carbon dioxide (CO_2). In this work, CFD simulations were performed using a

model k-ε based RANS method provided by the ANSYS-CFX code. From the found results, we noted that more the buildings are far away from the chimney, less the concentration on the buildings level and on the ground is. Also, the effect of parameters studies of the pollutant dispersion in the domain and especially around obstacles was observed.
Keywords : Numerical simulation, urban, chimney, gaz Pollutant, 3D.

Introduction général

Nous respirons chaque jour plus de 6000 litres d'air [1], ce qui en fait le premier élément nécessaire à la vie. La composition moyenne de l'air sec est de 78% de di-azote (N_2), 21% de dioxygène et 1% d'autres gaz rares, dont majoritairement l'Argon (Ar) puis le dioxyde de carbone (CO_2). De nombreux autres constituants sont présents à des concentrations très inférieures [2]. Parmi ces constituants, un polluant atmosphérique peut être défini comme une substance présente à une concentration suffisamment supérieure à son niveau normal pour produire un effet néfaste sur la dégradation de l'environnement en générale et diminution de la qualité de l'air dans des villes [3].

Aujourd'hui dans les villes, la pollution d'origine industrielle a cédé la place à une pollution plus diffuse et plus proche de population, liée aux transports [2]. Ainsi, l'utilisation des combustibles fossiles comme source d'énergie conduit à une formation importante de gaz nuisibles à l'environnement tels que : les oxydes d'azote (NO_x), les oxydes de soufre (SO_2 et SO_3) et le dioxyde de carbone (CO_2) [4]. En plus, l'industrie et plus généralement les usines et les cheminées sont une des sources les plus importantes des émissions de gaz, qui sont à l'origine de phénomènes environnementaux inquiétants tels que les pluies acides, la formation de brouillard oxydants, la diminution de la couche supérieure d'ozone, et plus généralement des gaz responsables de l'effet de serre [5].

Le transport et la diffusion de ces polluants gazeux, d'origine anthropique, dans l'atmosphère sous l'action du vent et de la turbulence atmosphérique, ses concentrations trop importantes dans les couches basses de notre atmosphère, et leurs accumulations autour des bâtiments constituent un des principaux problèmes de la vie en milieu urbain car il est associé à une augmentation de la mortalité et de la morbidité reliées notamment aux systèmes respiratoire et cardiovasculaire [2].

Dans le cadre de cette étude, notre attention s'est portée sur la couche limite atmosphérique urbaine (CLA), c'est la partie inférieure de l'atmosphère qui est sous l'influence directe des processus terrestres (elle est le siège de transferts d''energie, d'humidité et de matière entre la surface et l'atmosphère libre) [6]. Il faut bien comprendre les phénomènes qui conduisent à cet accumulation excessive afin d'essayer d'en contrôler les effets. Cette compréhension ne pourra se faire que par une étude précise de la CLA urbaine.

Au cours des trente dernières années de gros efforts ont été entrepris pour résoudre le problème posé par ses polluants et de nombreuses techniques pour limiter leurs formations ont été développées. Ces travaux sont généralement basés sur la simulation numérique.

L'augmentation continue des performances de calcul dans le domaine de la dynamique des fluides (CFD : Computational Fluids Dynamics), permet aujourd'hui de mettre en œuvre les simulations très complexes pour une grande variété d'écoulement appliquée à l'étude de l'environnement. Cependant, la majorité des études CFD concernant la dispersion des polluants sur des sites industriels et urbains, est encore réalisée à l'aide des modèles Reynolds Averaged Navier-Stoks (RANS), et plus particulièrement avec le modèle k-ε. Les analyses des performances des modèles RANS sont très souvent basées sur les capacités à prévoir les champs des vitesses moyennes et de l'énergie cinétique turbulente.

Il existe différentes approches pour modéliser la dispersion en milieu urbaine mais l'objectif de notre présent travail est la simulation CFD de l'écoulement et la dispersion des polluants et plus particulièrement les CO_2 autour des bâtiments dans un domaine tridimensionnel par l'application d'une approche RANS basée sur un modèle de turbulence k-ε implémenté dans le code CFD ANSYS CFX.

La présentation de ce travail s'articule autour de trois chapitres principaux :

Chapitre 01 : ce chapitre est consacré pour la définition de la pollution atmosphérique ; les sources de la pollution ; présentation des principaux polluants et aussi leurs influences sur l'environnement et la santé et les différentes solutions pour leurs éliminations.

Chapitre 02 : est dédié au l'élaboration des méthodes de modélisation et les formulations mathématiques

Alors que **Le Chapitre 03 :** présente en détail l'approche CFD que nous avons appliqué pour la simulation de l'écoulement en utilisant le code ANSYS CFX.

Chapitre 04 : est réservé pour la présentation des résultats et discussion.

Enfin, on termine par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralité sur la pollution atmosphérique

I.1.Introduction

L'accroissement de la pollution atmosphérique, suite à des rejets des substances diverses dans l'atmosphère constitue un danger permanant pour la santé humaine. Les rejets atmosphériques dans les agglomérations urbaines sont dus essentiellement au trafic automobile et aux rejets industriels qui proviennent des unités de production implantées dans le tissu urbain [2]. La pollution atmosphérique n'est pas nécessairement un phénomène local, l'air étant en perpétuel mouvement diffuse en même temps des particules polluantes touchant ainsi des étendus géographiques importantes. Ce phénomène qui a un impact direct sur la santé humaine risque de se poursuivre si aucune mesure n'est prise pour l'atténuer.

I.2. La pollution atmosphérique

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 entraine des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux système écologique, à porter atteinte aux agréments ou à gêner les autres utilisations légitimes de l'environnement » [7].

I.3. Sources d'émissions des polluants atmosphériques

Les différentes sources émettent de très nombreux polluants dits « primaires » car ils sont émis directement dans l'atmosphère. Une fois les principaux polluants de l'air émis dans l'atmosphère, ils peuvent soit se redéposer ou soit dégrader chimiquement dans l'atmosphère, les produits de ces réactions sont alors appelés polluants « secondaires ». Ces deux types de polluants jouent un rôle déterminant par les impacts qu'ils peuvent avoir sur le climat, la santé et les écosystèmes [8].

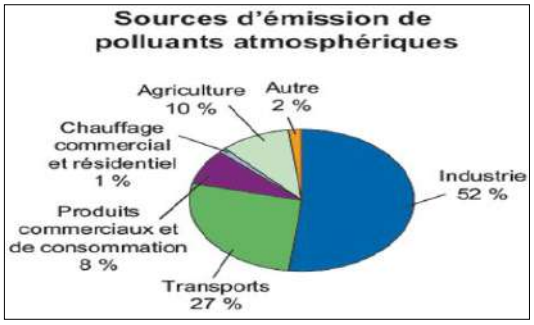


Figure I.1 : Sources d'émission de polluants atmosphériques.

Les sources générales de la pollution atmosphérique sont deux types :

I.3.1. Les sources naturelles :

Il s'agit des sources induisant des rejets de substances polluantes mais qui ne sont pas liées à l'activité humaine.

L'atmosphère renferme, à coté des éléments de base, une quantité variable de substances naturelles provenant de sources très diverses qui, dépassant un seuil, crée une source de pollution : [9]

- ✓ Les volcans émettent des gaz comme le dioxyde de soufre et de l'hydrogène sulfureux, et des particules des cendres en grande quantité, dont les nuages peuvent parcourir des distances considérables.
- ✓ Les végétaux sont à leur tour à l'origine d'une pollution par les pollens, les spores et les champignons.
- ✓ L'homme et les animaux rejettent des quantités importantes de dioxyde de carbone et sont à l'origine d'une pollution microbienne.
- ✓ L'ozone est formé naturellement à haute altitude à partir des réactions photochimique impliquant l'oxygène de l'air, ainsi une fois transporté dans les zones rurales par le vent, l'ozone se forme en grande quantité lorsque l'insolation est très élevée.

I.3.2. Les sources anthropiques :

Ces sources sont le fait d'origine à l'activité humaine. Les principales substances polluant l'atmosphère peuvent se répartir en deux groupes principaux :

- **Les gaz :** qui représentent 90% des masses globales des polluants rejetés dans l'air
- **Les particules :** (poussières en suspension de taille plus ou moins grand, fumées) représentent les 10% restants [10]. Cette pollution peut être :

- ✓ Brève ou chronique.
- ✓ Visible (fumées) ou invisible (pesticides dans l'air)
- ✓ Emise massivement ou en faible dose.
- ✓ Locale et émise par une source fixe (ex : cheminée, usine…), ou émise par des sources mobiles (voitures, transport maritime ou aérien, ect…).

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

I.4. Divers polluants atmosphériques

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

I.4.1. Les polluants gazeux :

- **Le dioxyde de soufre (SO_2) :**

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 d'acide sulfurique

Le dioxyde de soufre a pour origine principale la combustion des énergies fossiles (fuels, charbon) au cours de laquelle les impuretés soufrées contenus dans les combustibles sont oxydées par l'oxygène de l'air O_2 en dioxyde de soufre SO_2 [11].

- **Les oxydes d'azote $NO_x = NO + NO_2$:**

Il existe de nombreux oxydes d'azote, cependant seulement deux sont fortement impliqués dans le mécanisme de pollution atmosphérique, Le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO_2). Les NO_x apparaissent lors des réactions de combustion, et leur production augmente avec la pression et la température [11].

Le NO provient essentiellement de la combinaison du diazote (N_2) et du dioxygène (O_2) de l'air sous l'effet des combustions à haute température selon l'équation suivante :

$$N_2 + O_2 + \text{Chaleur} \rightleftharpoons 2\,NO$$

Le monoxyde d'azote (NO) est oxydé par les différents oxydants de l'air (O_2, O_3 …) en dioxyde d'azote qui est à 90% polluant secondaire [12]. La réaction a lieu à des températures inférieures à 600°C. La conversion de NO en NO_2 dépend de la quantité d'oxygène disponible et du temps de séjour des gaz résiduels [13]. Le temps de vie des NO_X est de l'ordre de la journée [14]. Le processus chimique est le suivant :

$$NO + \tfrac{1}{2}\,O_2 \rightleftharpoons NO_2$$



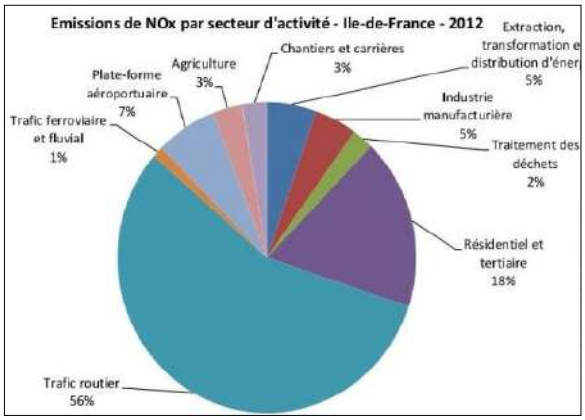


Figure I.2 : Contribution par secteur aux émissions des NO_x(en équivalent NO_2) en France pour l'année 2012.

❖ **L'ozone O_3 :**

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 COV [15].

L'ozone n'est pas un polluant primaire mais à la fois un composant normal de l'atmosphère et un polluant secondaire quand sa concentration dépasse la norme. L'ozone produit dans l'atmosphère sous l'effet du rayonnement solaire par des réactions complexe entre certains polluants primaires (NO_X, CO et COV) et principale indicateur de l'intensité de la pollution photochimique [16].

❖ **Monoxyde de carbone CO :**

Le CO provient de la combustion de carbone en présence d'une quantité d'oxygène insuffisante pour que la combustion soit complète. C'est un gaz incolore, inodore et sans saveur donc difficilement décelable. Il a une densité de 0.97 et forme avec l'air un mélange explosif et très toxique [17].

Le CO a un effet toxique à partir d'une concentration en volume inferieure à 0.1% en exposition prolongée [18]. Il se fixe sur l'hémoglobine à la place de l'oxygène et formé une molécule stable, la carboxyhémoglobine, donc il résulte une diminution de l'oxygénation cellulaire, nocive en particulier pour le système nerveux [19].

I.4.2. Les polluants particulaires :

- **Les composés organiques volatiles (COV) :**

L'Agence Américaine de Protection de l'Environnement (Environment Protection Agency EPA) défini les COV comme étant des composés qui présentent une tension de vapeur supérieure à 13 Pa (à 0 °C) et dont la réactivité est suffisante pour participer à des réactions photochimiques.

- **Les métaux lourds : (plomb, cadmium, mercure …..)**

Les métaux lourds désignent en général les métaux dont le poids atomique est supérieur à celui du fer. Ces métaux sont parfois également désignés par le terme de métaux traces ou d'éléments traces métalliques. On considère en général les métaux lourds suivants : Arsenic (As), Cadmium (Cd), Chrome (Cr), Cuivre (Cu), Mercure (Hg), Nickel (Ni), Plomb (Pb), Sélénium (Se), Zinc (Zn).

Chaque métal possède des caractéristiques et un impact propre.

I.5. Les effets de la pollution atmosphérique

L'air est indispensable à la vie, mais il peut avoir des effets nocifs si sa qualité est mauvaise. Ces effets peuvent touchés plusieurs cotés :

I.5.1. Sur la santé :

Les effets de la pollution de l'air sur la santé augmentent en fonction des concentrations des substances polluantes dans l'air et de durée d'exposition [20].

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

Les polluants peuvent agir à différents niveaux du corps humain : [21]

- Au niveau de la peau : c'est le cas notamment des vapeurs irritantes et des phénomènes d'allergies.
- Au niveau des muqueuses : le sang peut s'accumuler dans les organes.
- Au niveau des alvéoles pulmonaires : les polluants se dissolvent et passent dans le sang ou dans les liquides superficiels et au niveau des organes.

Tableau I.1 : Effets des polluants sur la santé humaine [2].

Polluants	**Origines**	**Effets sur la santé**
Oxydes d'azotes NO_X	Le monoxyde d'azote (NO) et dioxyde d'azote (NO_2) sont principalement produits par les transports et les centrales thermiques	Irritation de l'appareil respiratoire, diminution du pouvoir oxygénateur du sang, 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	Se fixe sur l'hémoglobine du sang. Atteinte du système nerveux central et des organismes 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 organique 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 suspensions P_S	Produit de combustion industrielle, chauffage et incinération de déchets. Les particules les plus fines sont émises par les moteurs diesel	Très dangereuses même à des 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 gênent la fabrication de l'hémoglobine

I.5.2. 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 » [15].

Les responsables considèrent que la pollution atmosphérique est l'un des nombreux éléments participant aux dépérissements forestiers. En France, le programme DEFORPA (dépérissement des forets attribué à la pollution atmosphérique) ainsi que des recherches en laboratoires, ont montré que les causes de dépérissement forestier sont très complexes telles que les sols de mauvaise qualité, sécheresse anormal, présence de polluants dans l'atmosphère principalement la pollution acide et l'ozone [22].Le tableau 3 résume les effets et les contributions des principaux polluants atmosphérique sur l'environnement.

Tableau I.2 : Effets des principaux polluants sur l'environnement [23].

Polluants	Effets sur l'environnement
Oxydes d'azotes NO_x ($NO + NO_2$)	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 de 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 Organique Volatiles (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	Effets de salissure des monuments et bâtiments

I.6. Les solutions

I.6.1. La réduction des émissions :

La protection de l'environnement présente de difficultés majeures car elle est à la fois locale et globale. Les effets que peut engendrer la pollution sont diffus et peuvent être à court et à long terme. 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 socioéconomiques, 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 en mettant en place des politiques adaptées [24].

I.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 traitement de centaines rejets que l'on ne peut pas complètement éliminer [14].

I.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 [3].

I.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 cout, un rendement optimal à court terme. Les solutions alternatives sont donc souvent plus couteuses 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 [24].

I.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 [24].

-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 da 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 risque 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 population 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.

I.6.3. La place de la modélisation :

Le rôle de la modélisation de la dispersion atmosphérique peut paraitre 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 [25].

Ainsi la place de la modélisation dans la problématique de la pollution industrielle se situe à plusieurs niveaux :

I.6.3.1. Surveillance de sites :

La modélisation intervient tout d'abord dans la surveillance de sites industriels. Elle peut venir compléter et préciser des mesures réalisées par les capteurs fixes de pollution disséminés sur le site. Les outils de modélisation permettent alors d'exploiter des données issues de ces captures en traçant des cartographies de concentration et visualiser ainsi les zones à fortes concentrations de polluant tout en évaluant l'exposition réelle de la population aux alentours des sites industriels, mais aussi celle des employés au voisinage des installations. De part sa capacité à étudier des épisodes passés de forte pollution, elle permet aux exploitants d'améliorer leur réactivité devant des scénarii similaires mais aussi de choisir de manière optimale l'emplacement de futurs capteurs qui permettons une surveillance de plus en plus précise. La surveillance des sites passe aussi par un contrôle en temps réel et prévisionnel de la pollution. La modélisation permet alors la création d'outils assurant le suivi en temps réel des concentrations aux abords des sites mais aussi, en fonction des prévisions météorologiques et des activités du site, ces outils prévisionnels peuvent assurer le pilotage de la production en limitant cette dernière en cas de risque de pollution sur les villes limitrophes. Pour finir, le recours à la modélisation peut s'avérer indispensable pour localiser une source.

Lorsqu'un le seuil d'un capteur est dépassé, on parle alors de modélisation inverse. Au bilan, la modélisation de la dispersion atmosphérique permet de scénarii, une aide quant à la prise de décision [25].

I.6.3.2. Aide à la décision-Etude de scénarios :

L'un des principaux intérêts de la modélisation, en particulier la modélisation déterministe, est le pouvoir étudier les modifications engendrées par un changement des conditions d'un problème. Ainsi il est possible avec les outils actuels de prédire l'impact de l'ajout d'une géométrie ou d'un terme source sur les sites industriels [13]. 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 cout 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 [25] . Finalement, l'apport de la modélisation atmosphérique au niveau de l'aide à la décision est très important et permet de faciliter la coexistence entre la rentabilité et la production du monde industriel et la sécurité des populations environnantes [13].

I.7. Caractéristiques de l'écoulement

L'écoulement de l'air au-dessus et autour d'une zone urbaine connait une déviation, la zone urbaine est donc assimilée à des obstacles. Cette déviation est due d'une part à la présence d'obstacles relativement grands (bâtiments) qui induisent une force de trainée importante, et d'autre part, à l'influence des flux de chaleur dus aux activités humaines. En effet, les injections de chaleur et d'humidité dans l'atmosphère et la forte capacité thermique des matériaux (béton…) influencent le bilan énergétique. On parle du phénomène « d'ilot de chaleur urbaine ». Ceci produit la convergence du vent horizontale et des mouvements verticaux des vents chauds au-dessus de la ville, ce qui augmente la longueur de mélange.

Cette turbulence au-dessus des domaines urbains augmente à cause de cet « bloc de chaleur », ce qui augmente le phénomène de dispersion des polluants [26].

I.8. Conclusion

Les éléments présentés à travers ce chapitre montrent que la pollution atmosphérique est devenue pour les décideurs un sujet de préoccupation certain. L'augmentation des densités de population dans les grandes métropoles et la proximité des installations industrielles ont contribué à faire de la pollution de l'air un problème sanitaire majeur. Les polluants mise en jeu sont nombreux et sont émis par des mécanismes très divers. 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. Ainsi en ce but, de nombreuses normes sont en places et constituent de forts moyens d'action pour limiter les rejets polluants, qu'ils soient d'origine automobile, tertiaire ou industrielle.

Avec l'amélioration des moyens informatiques et des connaissances, la modélisation s'est petit à petit développée afin de venir s'installer, en appui des limitations de rejets, dans un système de solution visant à réduire les émissions et à gérer les conséquences de la

pollution. Ainsi, cette introduction à la problématique de la pollution de l'air a permis de présenter le contexte général dans lequel s'instaure l'utilisation de la modélisation et plus particulièrement son utilisation dans le secteur de l'industrie.

Chapitre II

Modélisation de la dispersion des polluants atmosphériques en milieu urbain

II.1. Introduction

La modélisation de la dispersion atmosphérique est une simulation de la dispersion de panaches de pollution dans une disposition et une temporalité donnée faite à l'aide d'outils mathématiques et des logiciels informatiques. Donc on se propose dans ce chapitre de poser les bases théoriques et les diverses notions de dispersion nécessaires à ce travail. Après avoir présenté les caractéristiques très générales de l'atmosphère, nous zoomerons petit à petit sur la couche limite de surface, partie dans laquelle notre travail prend place et en présentant les différents profils caractéristiques. Finalement, on montrera pour terminer ce chapitre comment la dispersion d'un polluant peut se réaliser au sein de l'atmosphère.

II.2. L'atmosphère

L'atmosphère terrestre est l'enveloppe gazeuse de la Terre. Elle est décomposée en plusieurs sous-couches, chacune ayant des particularités qui lui sont propres. La détermination des différentes couches a été effectuée en fonction de l'évolution du profil de température vertical, à savoir : [27]

- **La troposphère :** Cette couche correspond à la couche la plus basse. A l'intérieur de celle-ci se produisent les phénomènes météorologiques ainsi que les mouvements atmosphériques horizontaux et verticaux. Elle englobe la partie allant du sol à 8 à 15 km de hauteur. Son profil de température vertical montre une évolution décroissante en fonction de l'altitude.
- **La stratosphère :** Il s'agit de la couche juste au dessus, de 15 à 50 km d'altitude. La température suit un profil inverse au précédent, dû à la captation du rayonnement UV par la couche d'ozone.
- **La mésosphère :** Le profil de température décroit de nouveau avec l'altitude jusqu'à 50 à 80 km.
- **La thermosphère :** Le profil s'inverse de nouveau de 80 à 350-800 km d'altitude.
- **L'exosphère :** Il s'agit de la couche la plus haute de l'atmosphère. Elle couvre la zone où les particules sont encore attirées gravitationnellement à la Terre. Elle s'étend jusqu'à 50 000 km d'altitude.

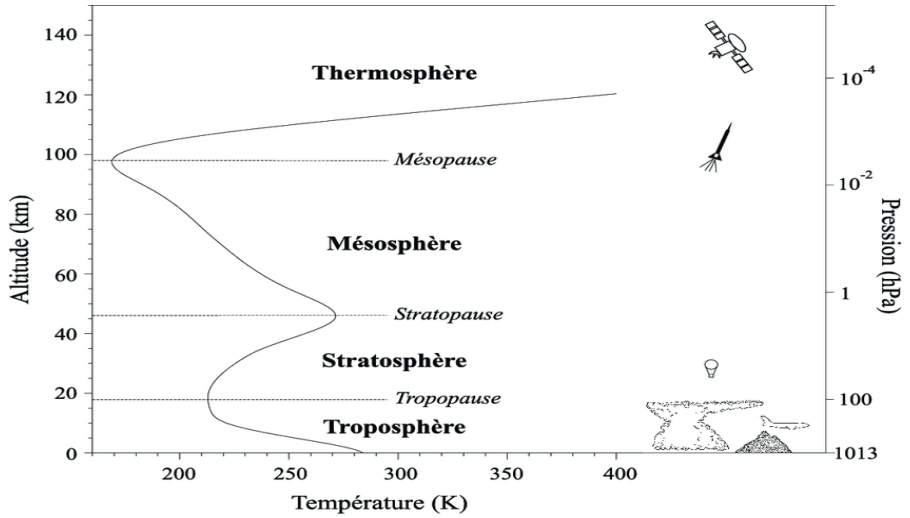


Figure II.1 : Schéma structurel de l'atmosphère terrestre [28].

II.3. La couche limite atmosphérique

La CLA constitue l'interface entre la surface et l'atmosphère libre. C'est la partie inférieure de l'atmosphère qui est sous l'influence directe des processus terrestres. Son extension verticale va de la surface à quelques centaines de mètres d'altitude et dépend directement de tous les paramètres météorologiques (vent, température, humidité, insolation), mais aussi de la topographie et du type d'environnement (océan, continental rural ou urbain). L'amplitude de cette extension va guider la dispersion des aérosols, notamment en milieu urbain dans le cas des polluants atmosphériques. La CLA ne représente qu'une petite partie de l'atmosphère, mais elle joue un rôle important dans des 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 [29, 30].

II.4. Structure de la couche de surface urbaine

La Figure (II.2) rappelle schématiquement la structure de la couche limite atmosphérique, appelée couche limite urbaine (CLU) dans le cas particulier de l'atmosphère au-dessus des villes. La couche limite de surface (CLS), d'une hauteur de 10 à 100m (~0.1 z_i où z_i est la hauteur de la couche limite atmosphérique), est la couche en contact avec le sol, où les forces de Coriolis peuvent être négligées [18].

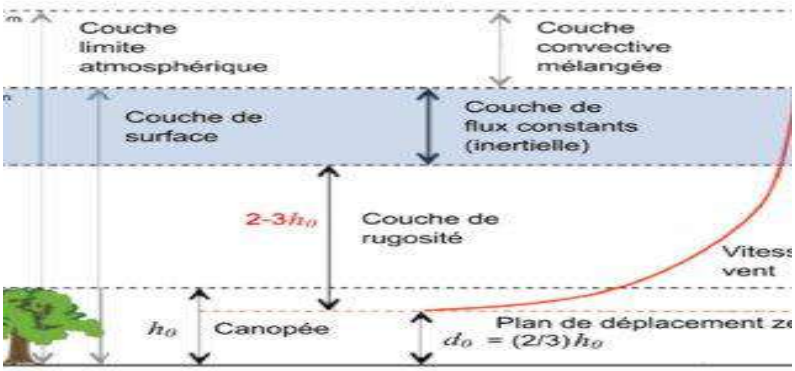


Figure II.2 : Schéma de la structure de Couche Limite Urbaine CLU.

La couche de surface urbaine est divisée en plusieurs sous-couches caractéristiques des propriétés moyennes et turbulentes de l'écoulement (Figure II.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 [23]. 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 :**

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 [31,32], nous la présentons ici comme une partie de la sous-couche rugueuse, selon Roth, 2000 [24] qui respecte ainsi le formalisme adopté pour les canopées végétales, proposé par Raupach et al (1980) [23]. 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.

II.5. La 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 [26]. 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 [33].

II.6. Ecoulement moyens et turbulences dans la couche de surface

II.6.1. Les équations fondamentales dans la couche de surface :

Afin de décrire la CLA, il convient de détailler les équations caractérisant sa dynamique. Les écoulements atmosphériques sont décrits par les équations de mécaniques des fluides de Navier-Stokes, traduisant la conservation des quantités physiques suivantes: la masse ; la quantité de mouvement ; et l'énergie.

- **Conservation de la masse : (équation de continuité)**

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

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

- ρ : la masse volumique du fluide au point repéré par le vecteur x à l'instant t.

$$\vec{U} = \vec{U}(\vec{x}\,, t) \tag{II.2}$$

- U : la vitesse d'une particule de fluide se trouvant au point repéré par le vecteur x à l'instant.
- Cette écriture la plus générale et la plus répandue :

$$\frac{\partial \rho}{\partial \mathrm{t}} + \rho\, \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{II.3}$$

A l'échelle de la couche de surface les variations temporelles $\partial\rho/\partial t$ sont souvent négligées. C'est l'hypothèse anélastique qui permet de filtrer les ondes acoustiques tout en maintenant l'hypothèse de compressibilité. L'équation de continuité s'écrit alors:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \qquad \text{(II.4)}$$

❖ **Conservation da la quantité de mouvement :**

La conservation de la quantité de mouvement désigne, dans un référentiel inertiel, l'absence de variation de la quantité de mouvement du centre d'inertie d'un système dans certaines situations physique. Mathématiquement, la quantité de mouvement est conservée lorsque sa variation instantanée est nulle. La conservation de la quantité de mouvement est décrire par les équations de Navier-Stockes adaptées à la CSU :

$$\underbrace{\frac{\partial u_i}{\partial t}}_{I} + \underbrace{u_j \frac{\partial u_i i}{\partial x_j}}_{II} = \underbrace{-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial x_i}}_{III} + \underbrace{gi}_{IV} + \underbrace{\frac{1}{\rho}\frac{\partial x_{ij}}{\partial x_j}}_{V} \qquad \text{(II.5)}$$

[I] : le terme d'inerte

[II] : le terme d'advection

[III] : le terme gradient de pression

[IV] : le terme de gravité

[V] : le terme de viscosité

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 (V) s'écrit alors:

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right] - \frac{2}{3}\mu\left[\frac{\partial uk}{\partial xk}\right]\delta ij\right) \qquad \text{(II.6)}$$

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:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}\,(m^2.s^{-1}). \qquad \text{(II.7)}$$

❖ **conservation de l'énergie :**

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

$$P = \rho R T_v \qquad \text{(II.8)}$$

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

$$Tv = T\,(1+0.6q) \qquad \text{(II.9)}$$

Où q est l'humidité de l'air

T est 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 adiabatique-ment de sa position initiale à la pression de référence 1000 h Pa.

$$\theta = T\left(\frac{pS}{p}\right)^{\frac{R}{Cp}} \quad \text{(II.10)}$$

P_s est la pression de référence au niveau de la mer prise à 1000 mb, C_p : la capacité calorifique de l'air. 8L'équation de l'énergie (bilan de l'enthalpie) inclut les contributions du transport de la chaleur sensible mais aussi de la chaleur latent :

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} + u_j\frac{\partial\theta}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho Cp}\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda\frac{\partial\theta}{\partial x_j}\right) + S_\theta \quad \text{(II.11)}$$

Où λ est la conductibilité thermique moléculaire.

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 ci est décrite par l'équation d'advection-diffusion:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + uj\frac{\partial C_i}{\partial x_j} = D_{mi}\frac{\partial C_i}{\partial x_j \partial x_j} + R_i(C1, C2, \ldots\ldots Cn, T) + S_i \quad \text{(II.12)}$$

C : la concentration d'un polluant.

D_{mi} : est le coefficient de diffusion moléculaire massique pour l'espèce i.

R : est un terme source ou puits par réaction chimique avec d'autre constituants et qui dépend de la température T.

S : est un terme source additionnel comme l'injection de polluant dans le milieu.

II.6.2. 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 de1894) qui décompose chaque variable en la somme d'une valeur moyenne et d'une valeur turbulente:

❖ **conservation de la masse :**

L'équation moyenne de conservation de la masse s'écrit :

$$\frac{\partial \bar{\rho}\bar{u}}{\partial x_i} = 0 \qquad \text{(II.13)}$$

❖ **conservation de la quantité de mouvement :**

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

$$\frac{\partial \overline{u_\iota}}{\partial t} + \overline{u_J}\frac{\partial \overline{u_J}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\bar{\rho}}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_j + \frac{1}{\bar{\rho}}\frac{\partial \overline{\tau_{\iota J}}}{\partial xj} - \frac{\partial \overline{u'ju'\iota}}{\partial xj} \qquad \text{(II.14)}$$

❖ **conservation de l'énergie :**

L'équation de l'énergie pour la valeur moyenne s'écrit :

$$\overline{u'_J\theta'} = -\frac{\lambda_t}{C_p\bar{\rho}}\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} \qquad \text{(II.15)}$$

$$\overline{u'_J c'_\iota} = -K_t\frac{\partial \bar{c_\iota}}{\partial x_k} \qquad \text{(II.16)}$$

v_t est la viscosité turbulente cinématique, $\lambda_t$la conductivité thermique turbulente avec $\lambda_t/\left(\bar{\rho}C_p\right) = v_t/Pr_t$, Pr_tétant le nombre de Prandtl turbulent, et $K_t$la diffusivité turbulente avec$K_t = v_t/Sc_t$, Sc_t étant le nombre de Schmidt turbulent.

-pour la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial \overline{u_\iota}}{\partial t} + \overline{u_J}\frac{\partial \overline{u_\iota}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\bar{\rho}}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i - \frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial x_i}\left[(v+v_t)\frac{\partial \overline{u_k}}{\partial x_k}\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(v+v_t)\left(\frac{\partial \overline{u_J}}{\partial x_i}\right)\right] \qquad \text{(II.17)}$$

-pour l'énergie

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \overline{u_J}\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = \frac{1}{C_p\bar{\rho}}\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\lambda+\lambda_t)\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j}\right] + \overline{S_\theta} \qquad \text{(II.18)}$$

-pour conservation d'un polluant :

$$\frac{\partial \bar{c_\iota}}{\partial t} + \overline{u_J}\frac{\partial \bar{c_\iota}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(D_{mi} + \frac{v_t}{Sc_t}\right)\frac{\partial \bar{c_\iota}}{\partial x_j}\right] + \overline{S_\iota} \qquad \text{(II.19)}$$

v, λ et D_i Définissent des propriétés du fluide, v_t, λ_tet K_t définissent des propriétés de l'écoulement turbulent et dépendent donc fortement des conditions de l'écoulement [34]

II.7. Les influences 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.

II.7.1. 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 moyen qui les surplombe [35]. Les écoulements au sommet de la canopée urbaine sont caractérisés par une forte zone de cisaillement où l'énergie cinétique de l'écoulement moyen est transformée en énergie cinétique turbulente: au niveau des toits, le profile de turbulence à l'intérieur de la canopée urbaine est caractérisé par une intensité accrue près du niveau des toits .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 [32] sont propices au mélange, à la diffusion de quantité de mouvement et à la dissipation de l'énergie turbulente.

II.7.2. 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 [36]. 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. La modification de l'écoulement entraîne une modification des flux convectifs et ainsi des échanges de chaleur.

II.7.3. 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 urbaine sont 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 [37].

II.8. Outils de modélisation

II.8.1. Modélisation numérique :

On a présenté précédemment les équations régissant les écoulements turbulents dans l'atmosphère. Ce système d'équation, fortement non-linéaire, ne présente pas en pratique de solutions analytiques. A cet effet, de puis plusieurs décennies de nombreux modèles ont été développés de manière à résoudre ce problème des écoulements turbulents et on de propose de présente les différentes approches permettant la résolution des équations de Navier-Stokes [14].

II.8.1.1. La simulation numérique directe – Direct Numerical Simulation (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 (quelque millier) et génère des temps de calcul excessivement longs, limitant son usage à des études fondamentales sur les mécanismes de la turbulence [38, 39].

II.8.1.2. La simulation des Grandes Echelles (Large Eddy Simulation ou LES) :

Cette approche est une méthode de simulation tridimensionnelle permettant d'obtenir une description in-stationnaire fine des écoulements turbulents par résolution numérique des équations de Navier-Stokes filtrées. L'approche se LES propose de ne simuler que les plus grandes échelles turbulentes de l'écoulement, couplée à une para-métrisation 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. Ces modèles ont été initialement développés pour l'étude de la turbulence atmosphérique, mais ils restent cependant encore difficiles à appliquer à des configurations réelles complexes et leur utilisation nécessite des temps de calculs encore trop importants pour des applications pratiques [40].

II.8.1.3. 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 utilisée 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 décomposé toute quantité en une valeur moyenne et une fluctuation. Si cette opération de moyenne est appliquée aux

équations du mouvement d'un fluide [25] 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 paramètre ces termes par un modèle de turbulence pour pouvoir résoudre le système RANS. Il existe une gamme très important de modèle de turbulence, dont le modèle k-ε qui est certainement lu plus répandu dans la littérature. Malgré son incapacité à détailler les caractéristiques de la turbulence, la modélisation statistique est un bon outil pour caractériser les champs moyens et notamment lorsque l'on s'intéresse aux écoulements autour de géométries complexes [41].

II.8.1.3.1. Modèle à une équation : modèle Spalart-Allmaras (AS) :

Le modèle de turbulence Spalart-Allmaras [42] est une modèle de l'équation de transport les arguments de l'analyse dimensionnelle, invariance Galilean et la dépendance sélectionnées sur la viscosité moléculaire. Ce modèle ne nécessite pas de résolution de la grille plus fine pour capteur les gradients de champ de vitesse avec des modèles algébriques. Dans le modèle SA une autre équation de transport (II.20) pour une viscosité turbulent modifié $\bar{\nu}$ est utilisé pour fermer le système d'équation RANS.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\bar{v}u_i) = G_v + \frac{1}{\sigma_{\bar{v}}}\left[\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{(\mu + \rho\bar{v})\frac{\partial\bar{v}}{\partial x_j}\right\} + C_{b2}\rho\left(\frac{\partial\bar{v}}{\partial x_j}\right)^2\right] - Y_v \qquad \text{(II.20)}$$

G_v : est la production de la viscosité turbulent.

Y_v : est la destruction de la viscosité turbulent qui se produit dans la région proche de la paroi en raison de blocage de la paroi et l'amortissement visqueux.

$\sigma_{\bar{v}}$ et C_{b2} : sont des constantes.

ν : est la viscosité cinématique moléculaire.

La viscosité turbulente calculé par :

$$\mu_i = \rho\bar{v}f_{v1} \qquad \text{(II.21)}$$

$$f_{v1} = \frac{x^3}{x^3} + C_{v1}^3 \text{et } x \equiv \bar{v}/v.$$

Le terme de production $G_v\ est$ modélisé par :

$$G_v = C_{b1}\rho\bar{S}\bar{v} \qquad \text{(II.22)}$$

Avec : $\overline{S} = S + \frac{\bar{v}}{k^2d^2}f_{v2}$

C_{b1} : est une constante du modèle.

ρ : La densité du fluide.

$\bar{S}$: donné par l'équation précédente, définie comme la somme de S, en fonction de déformation et tenseur de rotation.

k : est la constante de Von Karman (0.41 dans ANSYS CFX).

f_{v2} : est une fonction évaluée par :

$$f_{v2} = 1 - \frac{x}{1+xf_{v1}} \tag{II.23}$$

Dans la forme original du modèle SA, le scalaire S est calculé par la grandeur de tenseur de taux de rotation Ω_{ij}.

$$S = \sqrt{2\left(\Omega_{ij}\Omega_{ij}\right)} \tag{II.24}$$

Avec :

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_j}\right) \tag{II.25}$$

Le terme de destruction Y_n est modélisé par :

$$\left.\begin{aligned} Y_v = C_w \rho f_w \left(\frac{\bar{\nu}}{d}\right)^2, \qquad & \mathrm{g} = r + C_{w2}(r^6 - r) \\ f_w = \mathrm{g}\left(\frac{1+\mathrm{C}_{\mathrm{w3}}^6}{\mathrm{g}^6+\mathrm{C}_{\mathrm{w3}}^6}\right), \qquad & \mathrm{r} \equiv \frac{\bar{\nu}}{\bar{S}k^2d^2} \end{aligned}\right\} \tag{II.26}$$

g: Agit comme un limiteur qui empêche les grandes valeurs de f_w.

Les constantes de modèle sont présentées dans le tableau II.1.

Tableau II.1 : les constantes de modèle Spalart-Allmars SA [42].

C_{b1}	C_{b1}	σ_v	C_{v1}	C_{w1}	C_{w2}	C_{w3}	k
0.1355	0.622	2/3	7.1	$\frac{C_{b1}}{k^2} + \frac{(1+\boldsymbol{C}_{b2})}{\sigma_{\bar{\nu}}}$	0.3	2.0	0.41

II.8.1.3.2. Modèle à deux équations :

Dans les modèles de fermeture à deux équations, la première équation est généralement l'équation de l'énergie cinétique de la turbulence k qui fournit l'échelle de vitesse caractéristique du champ turbulent. Par contre, la deuxième équation est une équation de transport pour une échelle de turbulence ℓ ou bien pour une variable ε a partir de laquelle on peut tirer une échelle de longueur $\varepsilon = \mathrm{k}^{\mathrm{m}}\ell^{\mathrm{m}}$, et il existe une grande variété des formulations dans la littérature scientifique. Le modèle à deux équations le plus connu est le modèle *k-ε* mais on rencontre dans la pratique des nombreux modèles utilisant des équations à une autre variable que ε pour calculer l'échelle de longueur. Ces modèles ont un caractère souvent plus empirique et l'équation de ε est alors souvent construite sur des bases purement intuitives. Les raisons de ce choix peuvent provenir de la recherche d'une meilleure robustesse

numérique ou la facilité d'introduction des conditions aux limites [14]. La vitesse et l'échelle de longueur pour les modèles k-ε et k-ω sont indiquées dans le tableau II.2.

Tableau II.2 : Echelle de la vitesse et l'échelle de longueur pour les modèles k-ε et k-ω [14].

V	ℓ
k-ε $k^{1/2}$	$k^{3/2}/\varepsilon$
k-ω $k^{1/2}$	$k^{1/2}/\omega$

❖ **Modèle de turbulence (k-ε) standard :**

Ce modèle est basé sur l'hypothèse de «viscosité turbulente» introduite par Boussinesq, où les contraintes turbulentes sont exprimées en fonction du tenseur des taux de déformation à l'aide de la viscosité turbulente.

Dans le modèle k-ε, deux grandeurs sont introduites :

K : est l'énergie cinétique turbulente.

ε : Le taux de dissipation turbulente.

La viscosité turbulente est alors égale à :

$$\mu_t = \rho C_\mu + \frac{k}{\varepsilon} \tag{II.27}$$

C_μ: Est une constante.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + (\rho k u_i)\frac{\partial}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \tag{II.28}$$

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + (\rho\varepsilon u_i)\frac{\partial}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \tag{II.29}$$

$C_{1\varepsilon}$ et $C_{3\varepsilon}$ sont des constantes.

Le modèle de turbulence k-ε est largement répandu en industrie ce qui en fait probablement le modèle le mieux connu à ce jour. Il a été validé de nombreuses fois et donne d'excellents résultats pour plusieurs écoulements communs dans les applications industrielles, ce qui suffit souvent à justifier son utilisation. Par contre, comme tout modèle reposant sur l'hypothèse de Boussinesq, ce modèle est aussi connu pour être physiquement incorrect sur certaines conditions. Afin de ne tenir compte que de la contribution positive des termes de flottabilité, $C_{3\varepsilon}$ vaut 0 en atmosphère stable et 1 en atmosphère instable [38]. Les autres constantes de modèle k-ε proposés par Launder et Spalding (1974) sont données dans le tableau II.3.

Tableau II.3: valeurs des constantes du modèle k-ε [43].

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

❖ **Modèle k-ε réalisable :**

Le modèle de turbulence réalisable par Shih [44] diffère de modèle k-ε standard en deux moyens importants. Premièrement il contient une nouvelle formulation de la viscosité turbulente, et deuxièmement, une nouvelle équation de transport pour, ε, est dérivé à partir d'une équation exacte pour le transport de la fonction quadratique moyenne de verticité. Dans le modèle de turbulence k-ε réalisable, l'équation de transport de l'énergie cinétique k est identique à celle du modèle k-ε standard l'équation II.28, et l'équation de transport pour ε étant donné comme :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + (\rho\varepsilon u_i)\frac{\partial}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{\nu\varepsilon}} + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3c}G_b + S_\varepsilon \qquad \text{(II.30)}$$

Dans l'équation II.30, C_2 est une constante, tandis que C_1 est définie par :

$$C_1 = \max\left[0.43, \frac{\eta}{\eta+5}\right]$$

$$\eta = S\frac{k}{\varepsilon}$$

De même que pour le modèle de turbulence de type k-ε, la viscosité turbulente est calculée en utilisant l'équation II.27, cependant, C_μn'est pas une constante.

C_μ est calculée en utilisant l'équation suivante :

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S\frac{KU^*}{\varepsilon}} \qquad \text{(II.31)}$$

Où

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \overline{\Omega_{ij}\Omega_{ij}}}\,, \qquad \overline{\Omega_{ij}} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right)$$

Dans l'équation II.31, A_0 est une constante qui définit par :

$$A_0 = \sqrt{6}\cos\emptyset$$

Où

$$\emptyset = \frac{1}{3}cos^{-1}\left(\sqrt{6}W\right), \qquad W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\bar{S}^3}, \quad \bar{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}$$

Les constantes appliquées dans le modèle de turbulence k-ε réalisable sont données dans le tableau II.4

Tableau II.4 : Les constantes du modèle k-ε réalisable [44].

$C_{1\varepsilon}$	C_2	σ_k	σ_ε	A_0
1.44	1.9	1.0	1.2	4.04

❖ **Modèle k-ω standard :**

Wilcox [45] propose plutôt d'utiliser la fréquence turbulence ω (qu'il appelle specific dissipation rate) pour construire la deuxième équation de transport. On relie les variables ω et ε grâce à l'équation suivante :

$$\varepsilon = \beta^* \omega k \tag{II.32}$$

Le choix de la fréquence turbulente comme variable est intéressant puisque l'inverse de ω définit l'échelle de temps à laquelle la dissipation de la turbulence survient. Aussi, ω est directement associé aux processus dissipatifs puisque le taux de dissipation survenant aux petites échelles est également le taux de transfert d'énergie des grandes structures vers les petites échelles. La fréquence est alors reliée aux propriétés macroscopiques par :

$$\omega k^{1/2}/l \tag{II.33}$$

L'un des avantages de la formulation k-ω est le traitement proche du mur pour des simulations à faible nombre de Reynolds. Les modèles k-ω font l'hypothèse que la viscosité de turbulence est liée à l'énergie cinétique de turbulence et à la fréquence turbulente par la relation :

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \tag{II.34}$$

L'énergie cinétique de turbulence k, et le taux spécifique de dissipation ω, sont obtenus respectivement à partir des deux équations de transport suivant :

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + (\rho U_J) \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k1}}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \tag{II.35}$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + (\rho U_J) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 1}}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] \tag{II.36}$$

La performance de ce modèle en présence d'un gradient de pression adverse ou d'une surface courbe est connue pour être meilleur que celle du k-ε. Comme autre avantage du modèle k-ω, Mentrer [46] mentionne sa simplicité qui le rend numériquement plus stable que les autres modèles. Par contre, ce modèle est aussi renommé pour être très sensible à la valeur de ω_f, (la

fréquence turbulente dans l'écoulement libre). Cette sensibilité a freiné l'utilisation du modèle dans plusieurs applications, notamment en aérodynamique.

Finalement, les constantes du modèle adopté par ANSYS CFX sont les suivantes :

Tableau II.5 : Valeurs des constantes du modèle k-ω [46].

α	β	β^*	σ_{k1}	$\sigma_{\omega 1}$
0.5	0.075	0.09	2.0	2.0

❖ **Modèle SST k-ω : (Shear Stress Transport)**

Afin de profiter des avantages respectifs des modèles k-ε et k-ω, Menter [47] a développé une version hybride de ceux-ci. Le modèle SST (shear Stress Transport) utilise les équations du modèle k-ω près des parois et se transforme graduellement à un modèle k-ε modifié au centre de l'écoulement. On peut imager le modèles SST comme suit :

$$SST = F1(k-\omega) + (1-F1)(k-\varepsilon) \quad \text{(II.37)}$$

Où F_1= 0 au centre de l'écoulement et F_1=1 à la paroi. L'idée soutenant ce modèle est d'utiliser le bon comportement du k-ω en présence d'un gradient de pression adverse sans avoir le désavantage d'un modèle sensible aux valeurs de k-ε sont réécrites en fonction de la fréquence turbulente ω et la définition de la viscosité turbulente est ensuite modifiée pour prendre en compte le transport de contraintes de cisaillement. L'équation de transport d'énergie cinétique turbulente est redonnée ici mais elle est équivalente à celle du modèle k-ω. Toute fois, l'équation de transport de la fréquence turbulente est modifiée :

$$\rho\frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j\frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij}\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^*\rho k\omega + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \quad \text{(II.38)}$$

$$\rho\frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho U_j\frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\alpha_3}{v_t}\tau_{ij}\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta_3\rho\omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] + 2\rho(1-F_1)\frac{1}{\sigma_{\omega 2}}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad \text{(II.39)}$$

les constantes utilisées par le modèle SST sont elles aussi une transition entre les constants respectives de chacun des modèles, c'est-à-dire : $\gamma_3 = F_1\gamma_1 + (1-F_1)\gamma_2$. On a donc deux groupes des constantes. Les constantes dans ANSYS CFX sont données dans le tableau II.6.

Tableau II.6 : Valeurs des constantes du modèle SST k-ω [47].

Groupe 1(k-ω)					Groupe 1(k-ε)				
α_1	β_1	β^*	$\sigma_{\omega 1}$	σ_{k1}	α_2	β_2	β^*	$\sigma_{\omega 2}$	σ_{k2}
0.5	0.075	0.09	2.0	2.0	0.44	0.02828	0.09	1/0.856	1.0

La première fonction de transition du modèle SST, F_1, définit le modèle k-ε ou k-ω. Elle s'écrit comme suit :

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4) \tag{II.40}$$

Avec :

$$\Phi_1 = \min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}; \frac{500\nu}{y^2\omega}\right); \frac{4\rho k}{CD_{k\omega}\sigma_{\omega 2} y^2}\right] \tag{II.41}$$

y : est la distance normale à la surface.

Le modèle SST doit donc résoudre une équation supplémentaire pour calculer la distance de chaque nœud au mur le plus prés. Le terme $CD_{k\omega}$ est la portion positive du terme de diffusion croisée de l'équation II.41.

$$CD_{K\omega} = \max\left(2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}; 10^{-10}\right) \tag{II.42}$$

Cette transition entre les modèles k-ε et k-ω n'est pas le seul caractéristique du SST. Remarquons que la viscosité cinématique turbulente ν_t apparait dans l'équation II.39 sous la forme $\upsilon_t = \mu_1/\rho$. La définition de celle-ci est différente de ce qui est utilisé par les autres modèles puisqu'elle limite la valeur maximale de la viscosité pour éviter sa surévaluation :

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1\omega; SF_2)} \tag{II.43}$$

$a_1 = 0.31$ est une constants

S : est la mesure invariante du taux de déformation donnée par :

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \tag{II.44}$$

Avec : $S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial U_i}\right)$

et F_2 est la deuxième fonction de transition qui pour rôle de restreindre la limitation de ν_t à la couche limite seulement.

$$F_2 = \tanh(\Phi^2) \tag{II.45}$$

$$\Phi = \max\left(2\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}; \frac{500\nu}{y^2\omega}\right) \tag{II.46}$$

Le modèle SST implémenté dans ANSYS CFX inclut donc par défaut un limiteur agissant sur la viscosité turbulente ν_t comme le montre l'équation II.43. En plus de cela, le terme de production d'énergie cinétique turbulente est aussi limiter pour prévenir l'accumulation de turbulence dans les régions de stagnation :

$$P_k = \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right) \xrightarrow{\text{devient}} \tilde{P}_k = \min(P_k; C_{\lim}\varepsilon\rho) \tag{II.47}$$

Dans le CFX, les modèles basés sur ω utilisent par défaut un facteur limitant $C_{\lim} = 10$ alors que l'utilisation d'une limite sur le terme de production est optionnelle pour les autres modèles de turbulence.

II.8.2. Les différentes modèles de la dispersion atmosphérique :

Parmi les différentes approches possibles, nous avons choisi de détailler celles qui, à l'heure actuelle, sont les plus utilisées, notamment en situations opérationnelles, et qui permettent de couvrir les différentes échelles citées précédemment,

II.8.2.1. Les modèles gaussiens :

On distingue les modèles de panache gaussien et les modèles à bouffées gaussiennes. Dans ce type de modèles, la plupart des processus de dispersion et des processus physico-chimiques sont pris en compte à l'aide de para métrisations spécifiques, sans résolution des équations. Ces modèles sont bien adaptés à des études opérationnelles (calcul en temps réel, étude d'impact) car ils nécessitent des temps de calculs limités et permettent ainsi l'étude d'un grand nombre de cas. Les temps de calcul sont de l'ordre de quelques secondes par scénario pour des échelles kilométriques permettant ainsi de modéliser la dispersion sur un site industriel et ses alentours. L'ensemble des géométries complexes ne sont pas prise en compte, ne permettant pas la représentation des effets des bâtiments sur la dispersion. En effet, du fait de la prise en compte empirique de l'écoulement, ces modèles sont difficilement utilisables dans des situations d'écoulement très compliqué, lorsque l'on prend en considération par exemple le relief ou des obstacles multiples[48].

II.8.2.2. Les modèles lagrangiens :

Ils sont basés sur le calcul des trajectoires turbulentes d'un grand nombre de particules représentant le polluant. Ils sont généralement couplés à un modèle eulérien qui calcule le champ de vent et de turbulence dans lequel s'effectue la dispersion. Ce calcul de l'écoulement peut être simplifié autour des bâtiments pour garder des temps de calculs acceptables. Ils permettent essentiellement de prendre en compte la dispersion et s'adaptent plus difficilement à la description de processus physico-chimiques. Ils peuvent être utilisés pour des études d'impact mais les calculs d'écoulement par l'approche eulérienne ne leur permettent pas d'assurer des simulations en temps réel. Les résultats obtenus avec cette approche sont généralement bien adaptés au champ proche des sources, mais la description simplifiée des bâtiments ne permet pas de prendre totalement en compte toute la complexité géométrique d'un site industriel. De plus, ils ne sont pas adaptés pour traiter un grand nombre de sources (temps de calcul très important) [48].

II.8.2.3. Les modèles de la mécanique des fluides CFD :

Les modèles de mécanique des fluides (CFD) se situent dans le cadre de la modélisation eulérienne. À l'échelle urbaine, l'influence des différents processus est différente. Afin de prendre en compte pleinement l'influence des obstacles dans la dispersion de polluant, il est nécessaire de considérer des modèles capables de calculer les écoulements complexes induits par la géométrie. La CFD permet de calculer, en résolvant les équations de Navier-Stokes sur un maillage fin et en prenant en compte la présence des obstacles, des écoulements complexes avec une bonne précision [49].

II.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné quelques notions (des rappels) sur les éléments de théorie de la dispersion dans la Couche Limite Atmosphérique (CLA). Nous nous sommes intéressés particulièrement à la présentation des équations de la physique de l'atmosphère (système d'équations de Navier-Stokes). Nous avons ainsi présentés les différents modèles de dispersion.

Chapitre III

Etude numérique

III.1. Introduction

La simulation numérique des écoulements et du transfert de chaleur et de masse est devenue un outil indispensable et privilégié dans plusieurs disciplines. Il existe différents 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. 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 de transport d'un polluant**,** 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 numérique telles que la méthode des volumes finis (MVF) ; la méthode des différents finis (MDF) ; et la méthode des éléments finis (MEF).

III.2. La mécanique des fluides numériques (MFN)

Plus souvent désignée par le terme anglais Computational Fluide Dynamics (CFD), consiste à étudier les mouvementes 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 compris 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 ;….ect.

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 technique 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 procédés.

II.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 sont 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 modèles 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 les résultats expérimentaux sont nécessaires pour valider les calculs CFD.

II.2.2. Application de la CFD :

Elles sont nombreuses, on peut citer celles de :

- De la médecine (circulation du sang).
- L'hydrodynamique.
- L'aérodynamique.
- Des turbomachines.
- Du génie électrique pour le refroidissement des machines et autres microcircuits électronique.

- Du bâtiment (chauffage/ventilation ou action du vent sur les structures).

II.2.3. Méthodes de discrétisation :

- **Méthode de différences finis (MDF) :**

  Cette méthode a une importance historique et est simple à programmer. Elle n'est actuellement utilisée que dans quelque code spécialisé.

- **Méthode des éléments finis (MEF) :**

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

- **Méthode des volumes finis (MVF) :**

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

II.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 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 3D 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.

III.3. ANSYS, In

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

III.4. ANSYS CFX

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

ANSYS CFX est un logiciel de CFD généraliste extrêmement performant, utilisé pour résoudre une large variété de problème d'écoulement de fluide depuis plus de 20 ans. Grâce à son solveur avancé, moderne et parallélisé, les utilisateurs obtiennent rapidement des solutions faibles 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…..).

III.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 des modèles éléments finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques. A 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 simulation numérique.
- **ANSYS Workbench** : Cette plateforme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en réutilisant le logiciel ANSYS initail. 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.

III.6. Mettre en place une simulation à l'aide d'ANSYS CFX se fait en quatre étapes

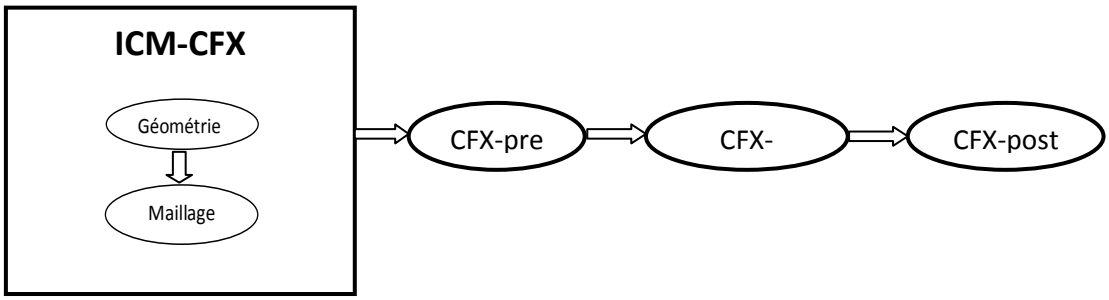
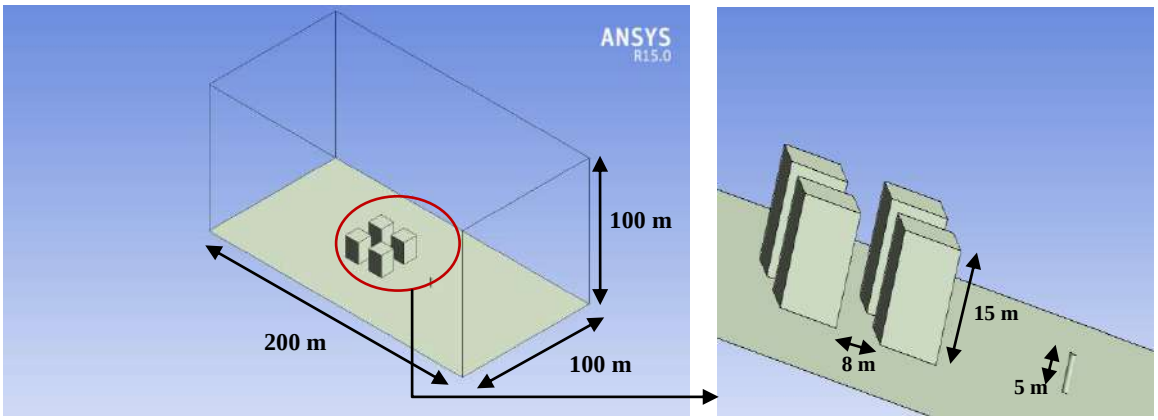


Figure III.1 : Les modules principaux du CFX.

III.6.1. ANSYS ICEM :

Le module ICEM permet d'établir la géométrie du système étudié, la géométrie est construite à partir de points, de courbes, de surfaces et de volume (Figure III.2). C'est également ce module qui permet de générer un maillage s'appuyant sur la géométrie.

(a)



(b)

Figure III.2 : Domaine de calcul par ICEM-CFX [géométrie de notre étude (a et b)].

III.6.2. CFX-Pre :

Ce module (Figure III.3) permet 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 solide) en présence.

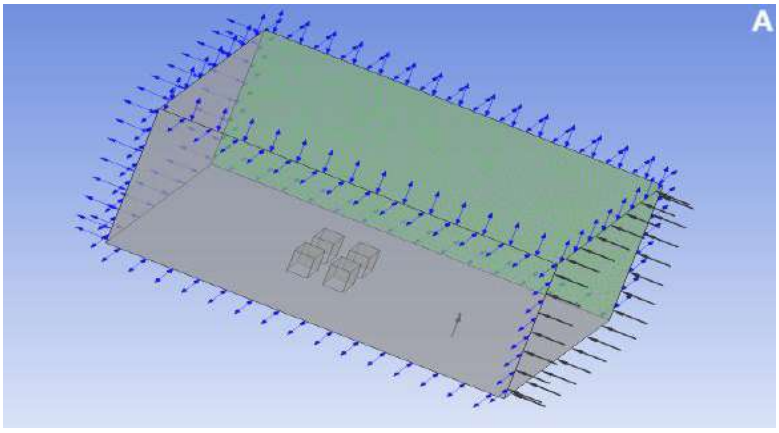


Figure III.3 : Interface graphique du module CFX-Pre.

Les conditions aux limites sont de 5 types :

- Les conditions de types **INLET** et **OUTLET** sont utilisées dans le cas d'un écoulement entrant à l'intérieur ou sortant à l'extérieur du domaine respectivement.

- La condition **OPENING** est utilisée dans le cas d'une méconnaissance de la nature entrant ou sortant de l'écoulement.
- La condition de type **WALL** est attribuée aux parois imperméables à l'écoulement.
- Si l'écoulement présente un plan de symétrie, il est possible d'attribuer la condition **SYMMETRY** à ce plan.

Une fois que 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 la base de travail du solver.

III.6.3. CFX-Solver :

C'est le module qui effectue les calculs (Figure III.4). 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.

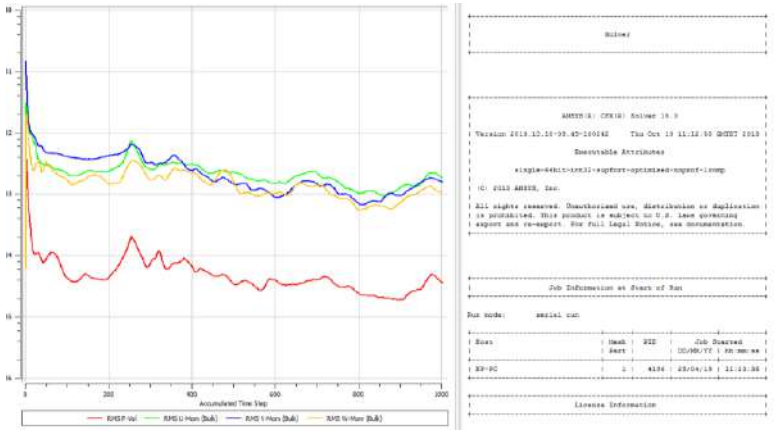


Figure III.4 : Interface graphique du module CFX-Solver.

Dans le cas d'une résolution en régime permanent, le calcul se poursuit jusqu'à ce que le nombre maximal d'itération demandé par l'utilisateur soient atteint ou bien que 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-Solver** génère deux types de fichiers :

- Un fichier «**.out** » lisible par un éditeur de texte. Ce fichier résume le déroulement di calcul. Il contient 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-Pos.

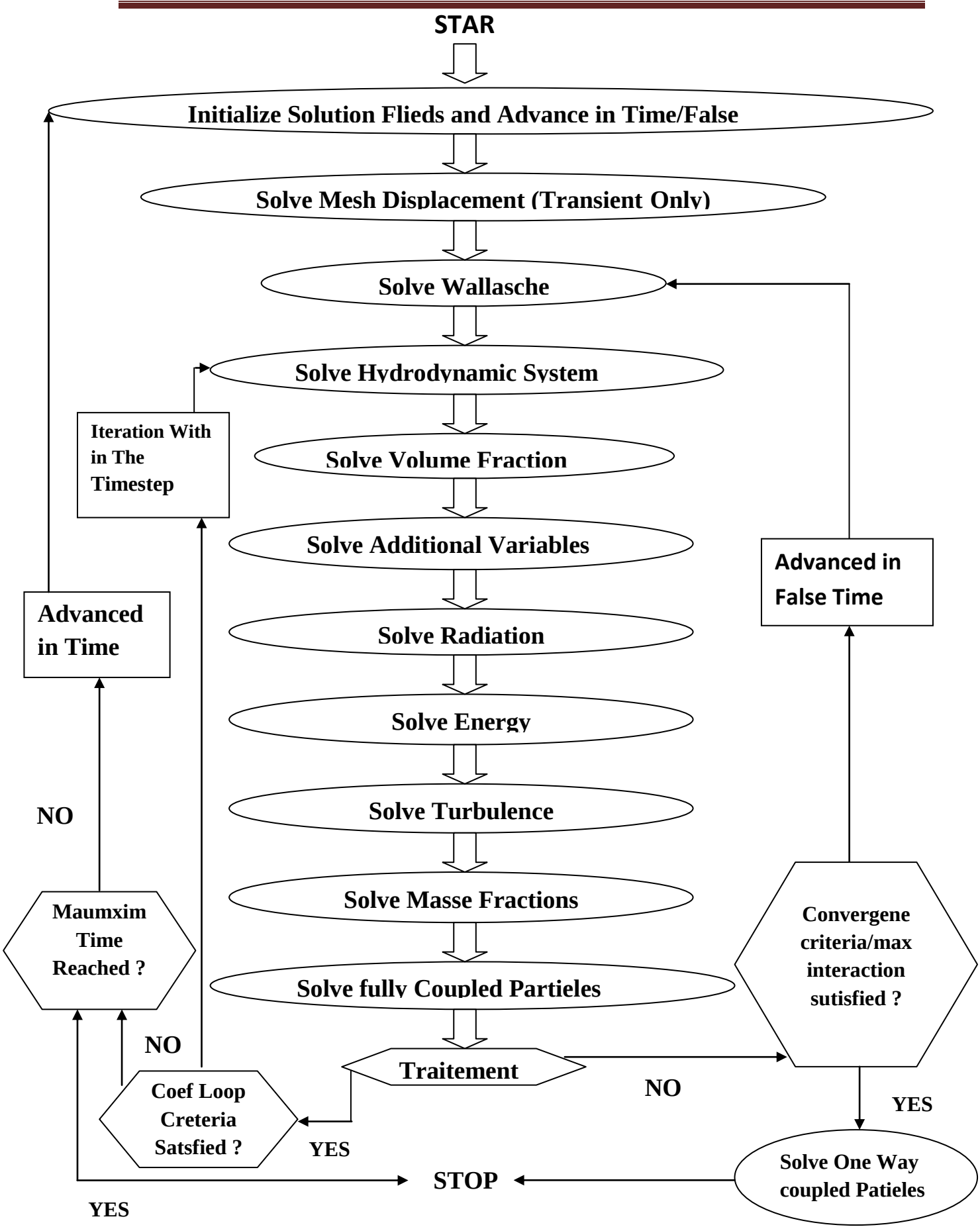


Figure III.5 : Organigramme de mise en œuvre d'un calcul (source : documentation CFX).

III.6.4. CFX-Post :

C'est un outil graphique permettant le traitement et la visualisation des résultats (Figure III.6). Il permet d'appliquer des textures sur la géométrie, de visualiser des contours, des iso-surfaces, des lignes de courant, des champs de vitesse en 2D ainsi que en 3D. Il permet également l'exploitation 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.

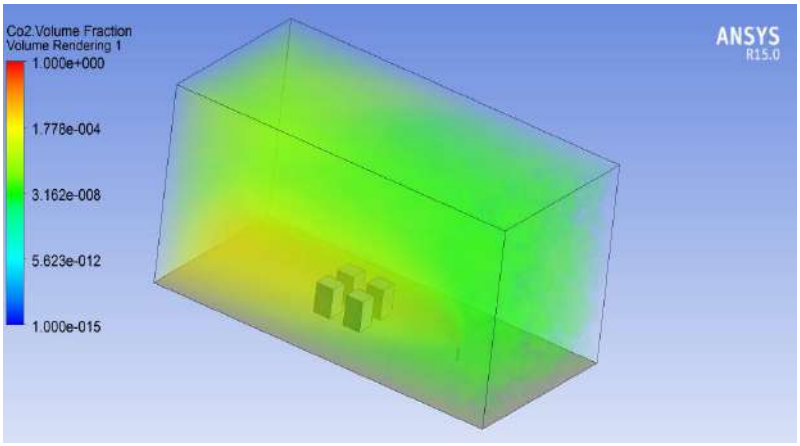


Figure III.6 : Interface graphique du module CFX-Post en 3D.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la procédure numérique choisie pour la modélisation de dispersion d'un polluant gazeux tel que le dioxyde de carbone. Le logiciel ANSYS CFX est adopté pour la modélisation de cette dispersion dans un milieu urbain de notre problème considéré. Après cet exposé de la méthode numérique de simulation, nous allons passer au chapitre suivant où nous présentons les résultats obtenus avec leur description et leur discussion.

Chapitre IV

Résultats et Discussion

IV.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats obtenus lors de l'exploitation de logiciel ANSYS CFX, concernant l'écoulement d'un polluant gazeux en mode permanent et transitoire à travers un milieu urbain, en géométrie tridimensionnelle.

Le travail a été mené pour trois cas de situations possibles. Il s'agit tout d'abord de la position de cheminé par rapport aux blocs pour les deux premiers. Le dernier cas, on a pris en compte la température de polluant.

Le but est donc d'analyser et caractériser les profiles des températures, des vitesses, la fraction volumique.

IV.2. Etude de la modélisation

Pour l'étude la dispersion de la pollution par le dioxyde de carbone (CO_2) émis à partir d'une cheminée dans le milieu urbain, nous avons procédé à la réalisation des différents cas où on a varié la position de la source d'émission par rapport aux bâtiments ainsi que sa température. Pour cela, 3 cas ont été supposés en régime stationnaire. Le sens de dispersion des polluants été pris selon la direction du vent dominant avec une vitesse du vent constante 5m/s. dans notre modèle le mélange de gaz éjecté de la cheminée a une concentration de 80% de l'air et de 20% dioxyde de carbone. Physiquement un CLS a seulement une limite (frontière), le sol, mais dans les calculs on doit délimiter dans toutes les directions, utilisons alors des limites non physique. Cette présentation générale nous permet alors d'identifier l'ensemble des points à prendre en considération. On peut ainsi mettre en avant les conditions aux limites:

- les conditions d'entrée dans le domaine ;
- les conditions de sortie du domaine ;
- les conditions au sol ;
- les conditions au sommet et de cotés gauche-droit du domaine.

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

IV.3. Domain de simulation numérique

Pour définir un domaine de calcul il faut prendre en compte les deux caractéristiques suivantes :

- Les dimensions caractéristiques de ce domaine
- Etablit un maillage qui permettra de résoudre les équations de RANS

Les dimensions de domaine que nous avons choisi sont 200m et 100m de longueur et largeur respectivement avec une hauteur de 100 m (Figure III.2). Les géométries des bâtiments étudiés sont réalisées suivant l'architecture réelle existante dans les villes Algériennes et en particulier à Médéa. Les hauteurs maximales des quatre bâtiments sous forme de parallélépipède sont de 15 m, La distance totale entre ces quatre bâtiments est de 8 m. Le diamètre de cheminée est 1 m et la position de cette dernière par rapport aux bâtiments est à la fois de 50 m et 25 m avec une hauteur de dégagement de gaz a lieu est à 5 m.

Les 3 cas que nous avons supposés sont les suivants : les 3 cas sont en régime stationnaire

Cas 1 : la distance de source d'émission par rapport des bâtiments est de X=25 m ainsi que sa température est 333 K (60°C) avec une vitesse de sortie de gaz de 7m/s.

Cas 2 : la distance sera doublée C'est-à-dire X=50 m, la température et la vitesse restent constantes.

Cas 3 : même les données du deuxième cas mais on change la température de sortie de polluant qui va être doublée T= 393 K (120°C).

Nous avons adopté un maillage par défaut fortement resserré près de la cheminée. Un maillage plus fin permettrait d'assurer une meilleure précision sur le calcul. Une illustration du maillage final est présentée à la Figure IV.1

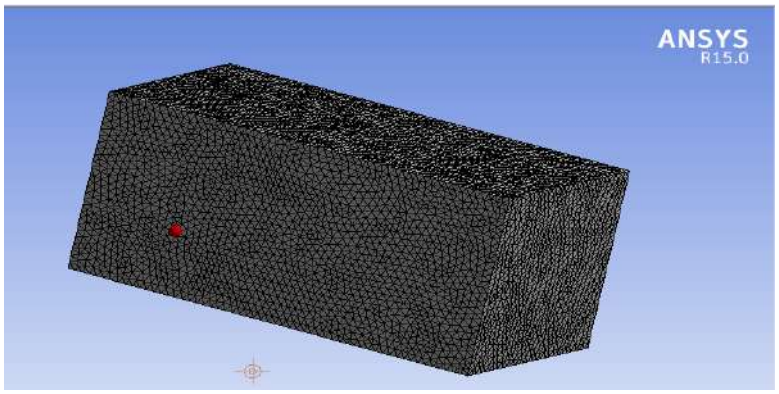


Figure IV.1 : Représente le Domaine d'étude maillée.

IV.3.1. Interprétation de simulation numérique de la dispersion en 3D :

Les figures IV.2 (cas 1) et IV.5 (cas 2) montrent la diffusion (le transfert) de température dans notre domaine pour les deux positions de la source par rapport aux blocs (**X**=25 m et **X**=50 m avec une vitesse d'éjection de gaz CO_2 de **V**=7m/s). D'après les résultats obtenu nous remarquons qu'il ya une diminution rapide de la température par rapport à sa valeur initiale à la sortie de la source qui été pris égale à 333 K ce qui signifie une forte diffusion dans le cas de 3D pour (**X**=50 m), la figure IV.2 alors que cette diffusion diminue dans le cas où la distance de cheminée est près aux blocs la figure IV.5 (**X**=25 m) ce qu'indique que le transfert reste limité, par contre lorsque la valeur de température initiale de gaz de CO_2 à la source augmente est égale à 398K (figure IV.8) (cas 3) la diffusion de la température est maximale elle dépasse les blocs c'est-à-dire la figure IV.8 montre qu'il y a un transfert thermique axialement qui dépasse les blocs où la température tend vers ses valeurs admissibles (température ambiante de l'air).

L'évolution de la fraction volumique pour les différents cas étudiés sont illustré dans les figures (IV.3, IV.6 et IV.9), d'après les résultats obtenus on constate que la dispersion du polluant entre les Blocs augmente avec l'augmentation de la température de polluant et avec sa vitesse c'est-à-dire le transfert de masse entre l'air et le polluant (CO_2) augmente. Ce phénomène indique que l'accumulation de polluant au niveau des Blocs est élevé qui provoque une situation dangereuse nécessite des travaux supplémentaire de confinement au niveau des blocs notamment lorsque on a un gaz très toxique.

L'évolution de la composante de vitesse selon l'axe X pour les cas suivants (**X**=25 m et **X**=50m avec **T**=333 K ainsi pour **X**=50 m avec **T**=393K) est illustrées sur Les figures IV.4, IV.7 et IV.10, les résultats obtenus montrent bien que la vitesse de la dispersion selon l'axe X augmente lorsque la source est plus proche des Blocs, figure IV.4 comme on peut remarquer aussi que la vitesse de recirculation de polluant selon le même axe augmente avec l'augmentation de température figures IV.7 et IV.10 ainsi on peut observer que la variation de cette composante n'été pas uniforme pour les trois cas étudies.

- **Cas 1 :**

La distance de source d'émission par rapport des bâtiments est de X=25 m ainsi que sa température est 333 K (60°C) avec une vitesse de sortie de gaz de 7m/s.

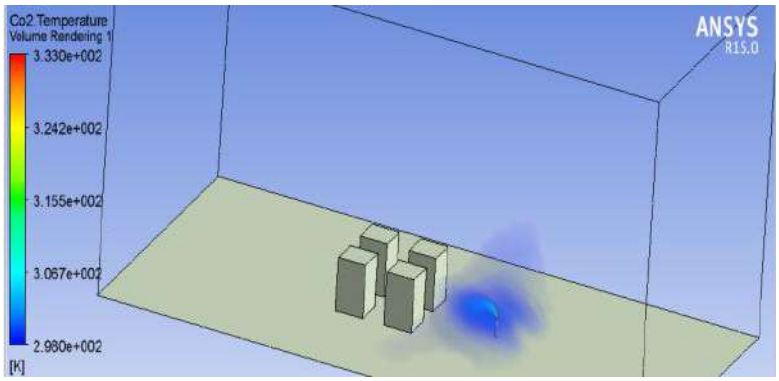


Figure IV.2 : représente l'évolution de température de CO_2 [**X**=25 m, **V**=7m/s, **T**=333 K].

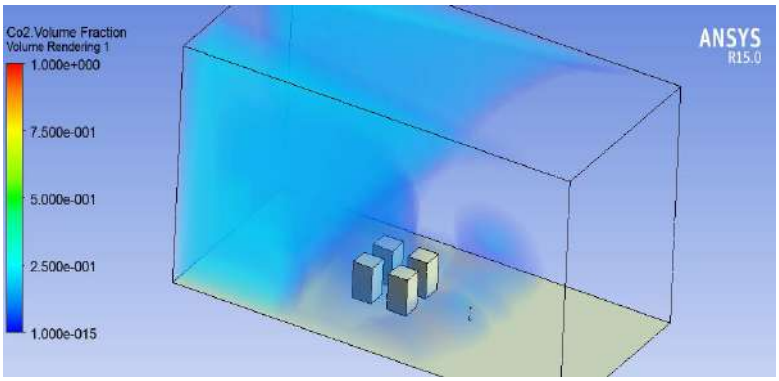


Figure IV.3 : montre l'évolution de fraction volumique CO_2 [**X**=25 m, **V**=7m/s, **T**=333 K].

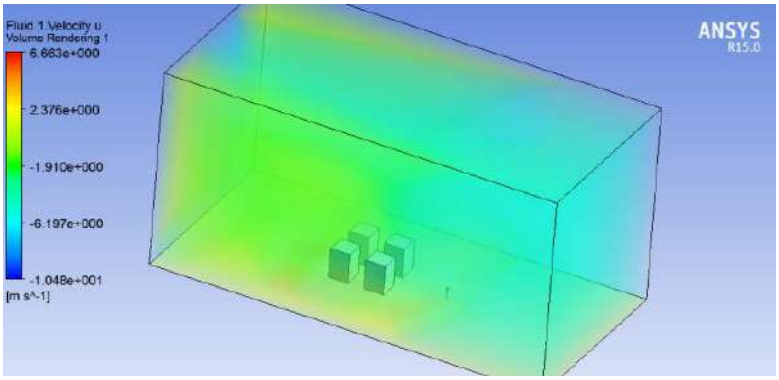


Figure IV.4: illustre l'évolution de vitesse sur l'axe x [**X**=25 m, **V**=7m/s, **T**=333 K].

- **Cas 2 :**

La distance sera doublée C'est-à-dire X=50 m, la température et la vitesse restent constantes (T=333K, v=7m/s).

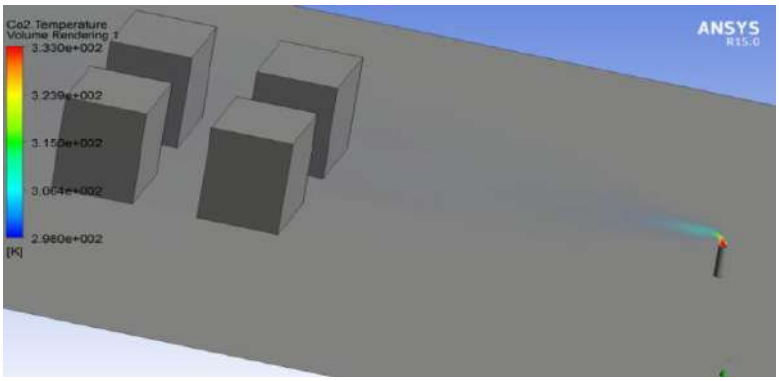


Figure IV.5 : Montre l'évolution de température de CO_2 [**X**=50 m, **V**=7m/s, **T**=333 K].

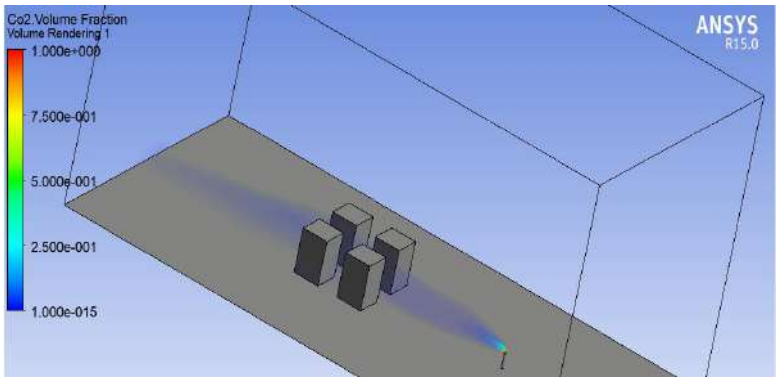


Figure IV.6: Montre l'évolution de fraction volumique CO_2 [**X**=50 m, **V**=7m/s, **T**=333 K].

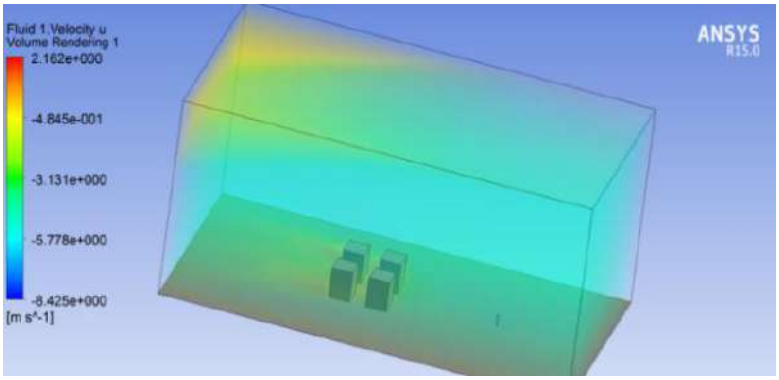


Figure IV.7: représente l'évolution de vitesse sur l'axe x [**X**=50m, **V**=7m/s, **T**=333 K].

- **Cas 3 :**

  Même les données du deuxième cas mais on change la température de sortie de polluant qui va être doublée T= 393 K (120°C).

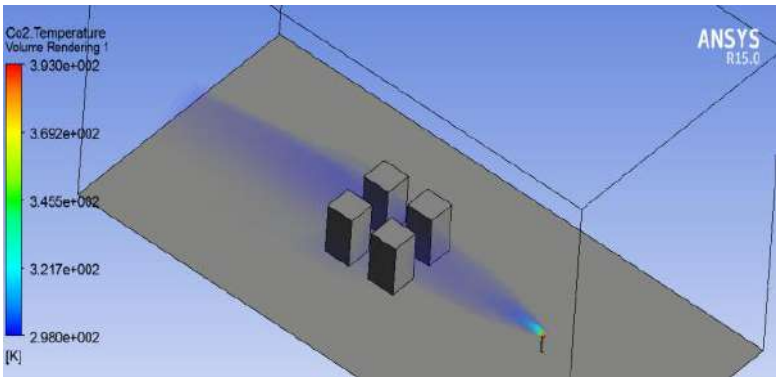


Figure IV.8 : illustre l'évolution de température CO_2 [**X**=50 m, **V**=7m/s, **T**=393K].

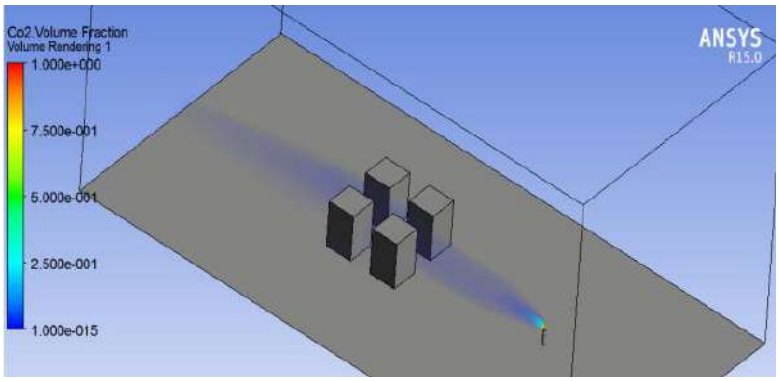


Figure IV.9 : illustre l'évolution de fraction volumique CO_2 [**X**=50 m, **V**=7m/s, **T**=393K].

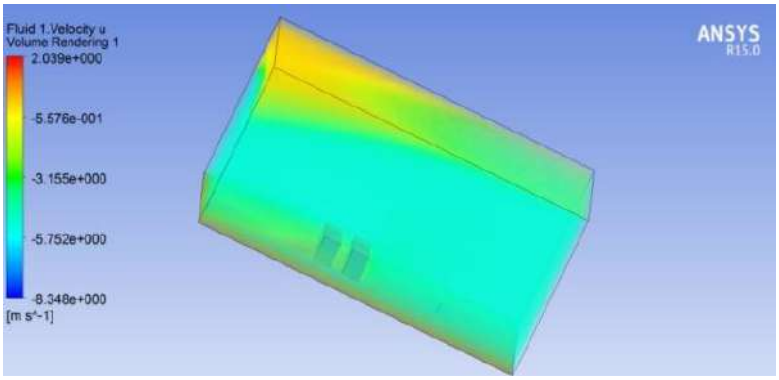


Figure IV.10 : représente l'évolution de vitesse sur l'axe x [**X**=50 m, **V**=7m/s, **T**=393K].

IV.3.2. Interprétation de simulation numérique de la dispersion en 2D :

Dans le but de voir le comportement des paramètres étudies tels que (la température, la fraction volumique et la composante de vitesse sur les différents plans (XY, YZ à deux position différentes), la position des différents plans dans le domaine du notre problème d'étude est présenté sur figure IV.11.

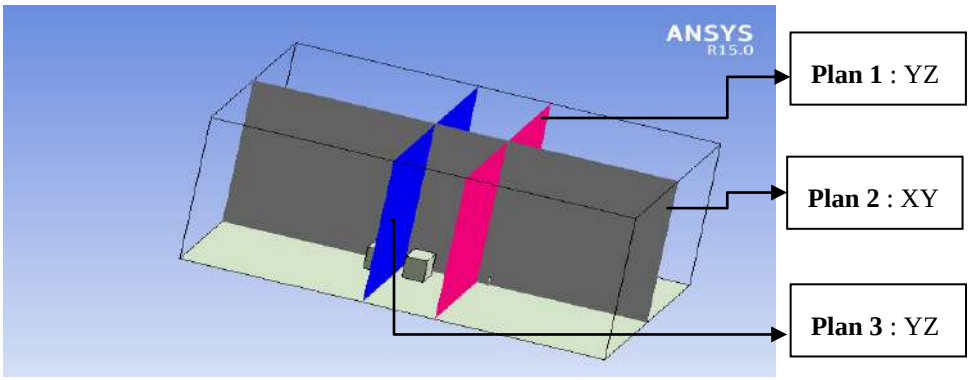


Figure IV.11 : représente la position des 3 plans dans le domaine en 3D.

La présentation de l'évolution des trois paramètres que nous avons étudié sur chaque plan sont illustrés sur figures de IV.12 à IV.38.

L'évolution de température est mieux présentée sur le plan YZ pour la position entre les Blocs. Les contours de la fraction volumique de dioxyde de carbone, montrent la variation de la dispersion de polluant dans le domaine d'étude, il été claire que sur le plan YZ (la Figure IV.19, IV.28 et IV.37), il y a une accumulation de polluant entre les blocs créant une zone de recirculation ce qui va provoquer un danger. Ainsi une analyse de l'évolution de la vitesse de la dispersion a été mieux présentée sur les figures IV.17, IV.20, IV.26, IV.29 et IV.35.

- **Cas 1 :**
  - **Plan 1**

Ce plan YZ est prés de cheminée avec une distance D=120 m par rapport à l'origine

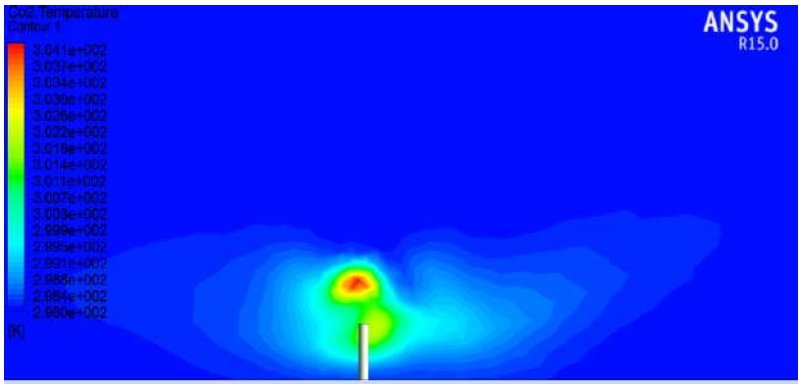


Figure IV.12 : illustre l'évolution de température CO_2 sur le plan 1 (YZ).

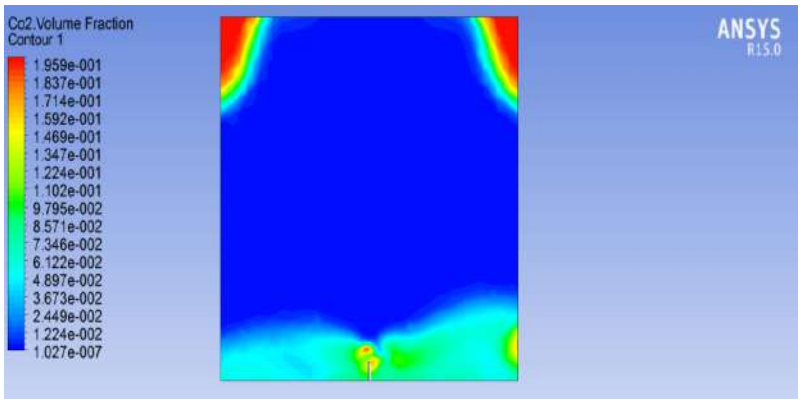


Figure IV.13 : représente l'évolution de fraction volumique CO_2 sur le plan 1 (YZ).

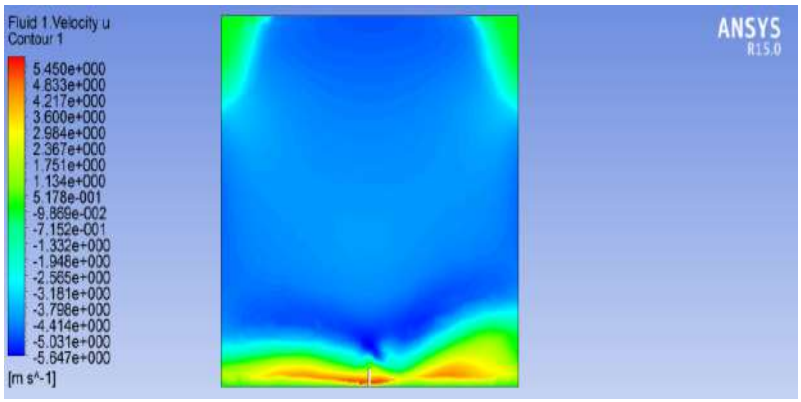


Figure IV.14 : illustre l'évolution de vitesse sur le plan 1 (YZ).

- **Plan 2**

Ce plan XY est au milieu des 4 bâtiments avec une distance D=50 m

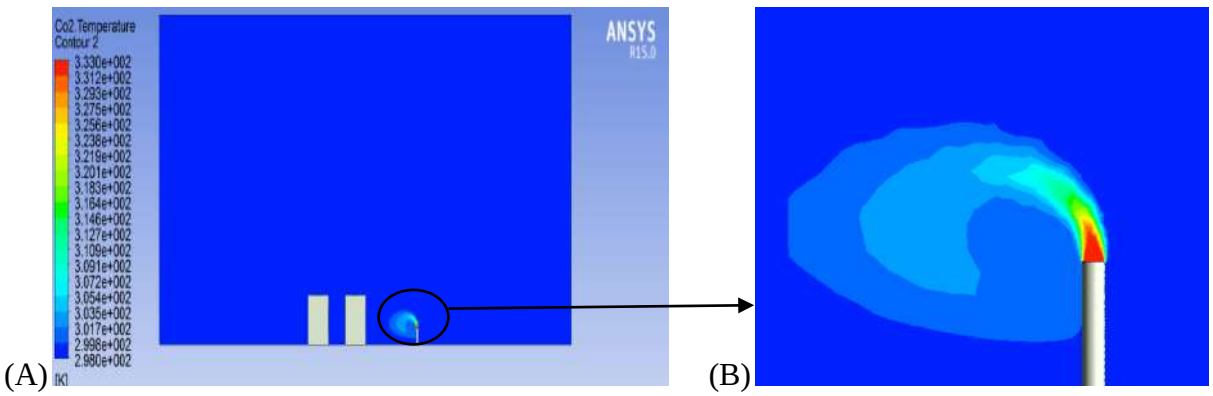


Figure IV.15 : montre l'évolution de Température CO_2 sur le plan 2 (XY).

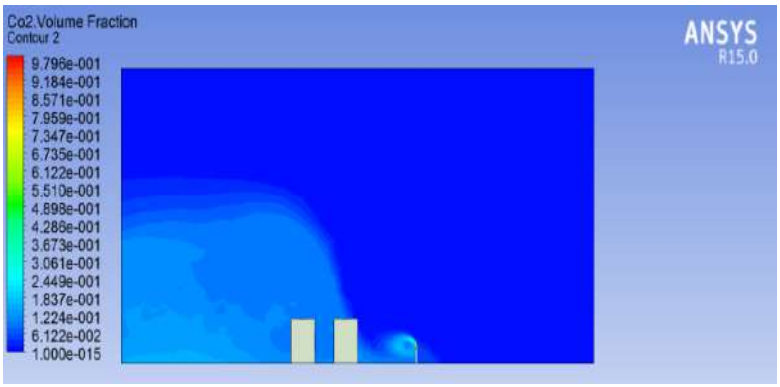


Figure IV.16 : représente l'évolution de Fraction Volumique CO_2 sur le plan 2 (XY).

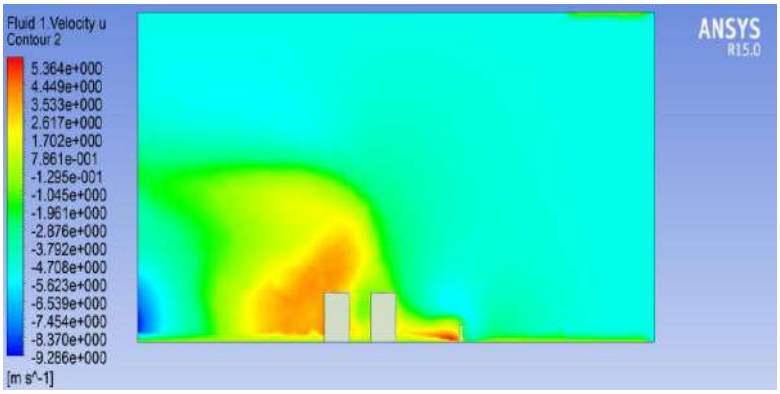


Figure IV.17 : illustre l'évolution de Vitesse sur le plan 2 (XY).

- **Plan 3**

Ce plan YZ a une distance de D=86 m par rapport à l'origine

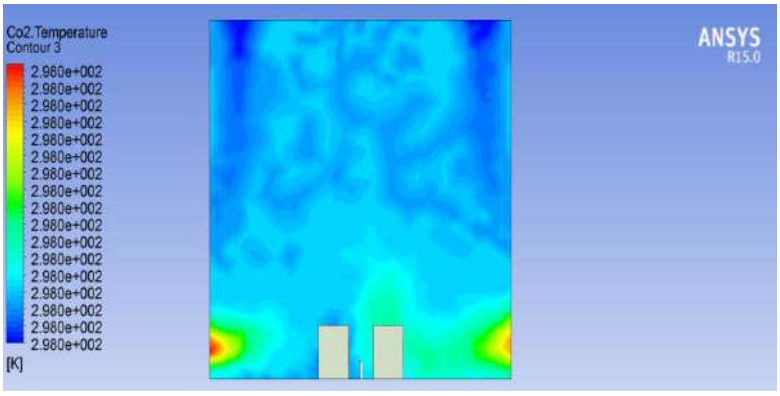


Figure IV.18 : montre l'évolution de Température CO_2 sur le plan 3 (YZ).

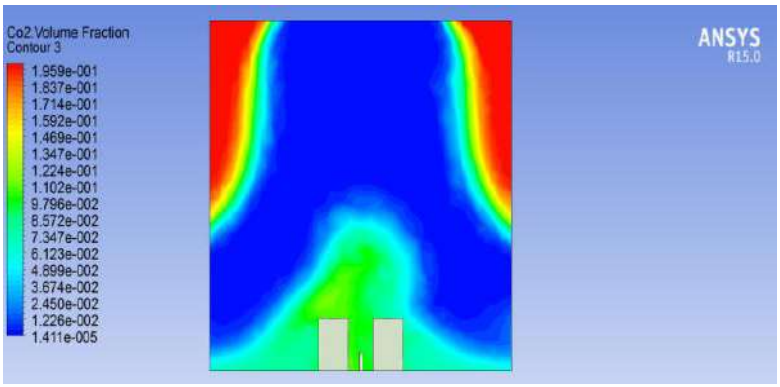


Figure IV.19 : représente l'évolution de Fraction volumique sur le plan 3 (YZ).

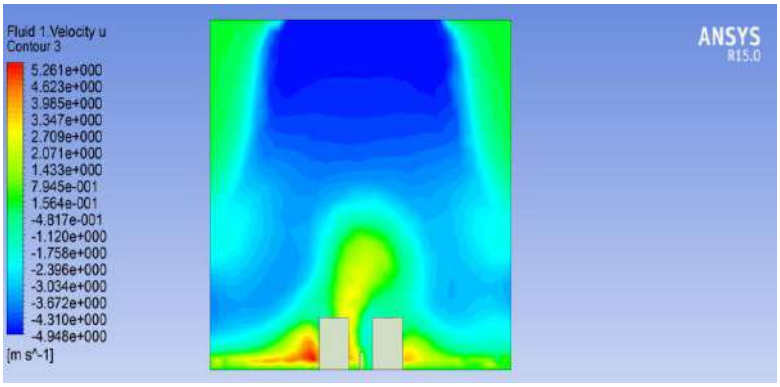


Figure IV.20 : illustre l'évolution de Vitesse sur le plan 3 (YZ).

- **Cas 2 :**
  - **Plan 1**

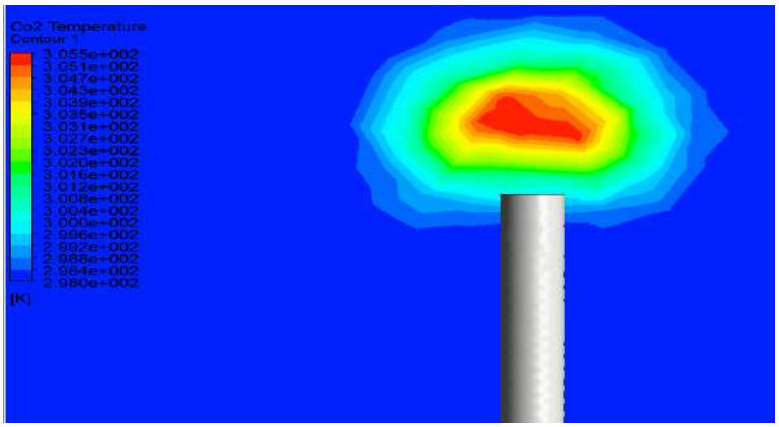


Figure IV.21 : illustre l'évolution de Température sur le plan 1 (YZ).

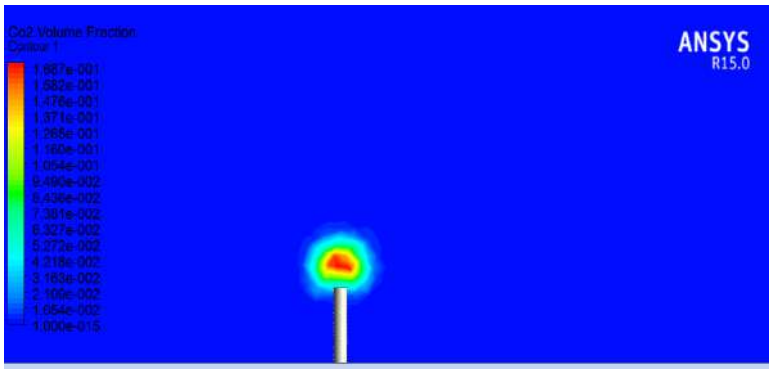


Figure IV.22 : représente l'évolution de Fraction volumique sur le plan 1 (YZ).

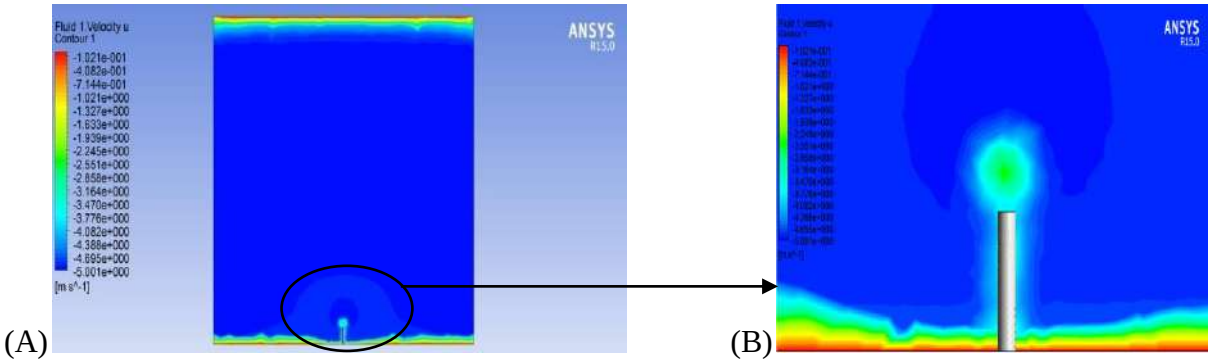


Figure IV.23 : illustre l'évolution de Vitesse sur le plan 1 (YZ).

- **Plan 2**

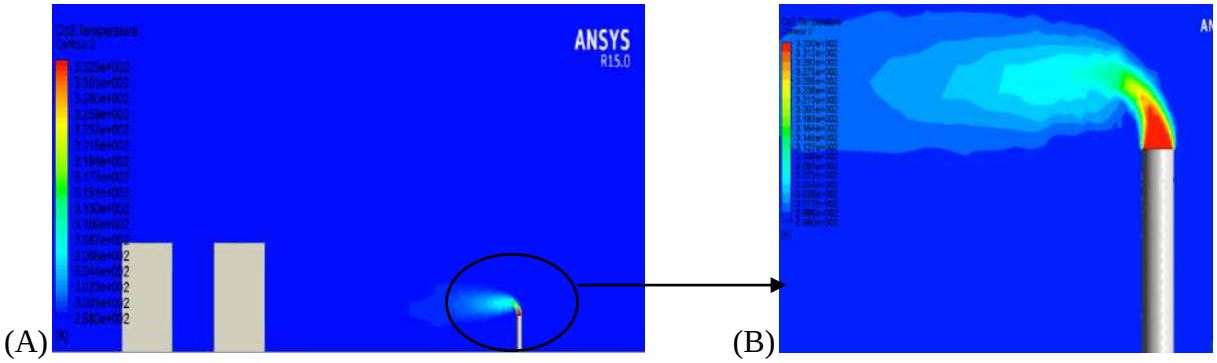


Figure IV.24 : montre l'évolution de Température CO_2 sur le plan 2 (XY).

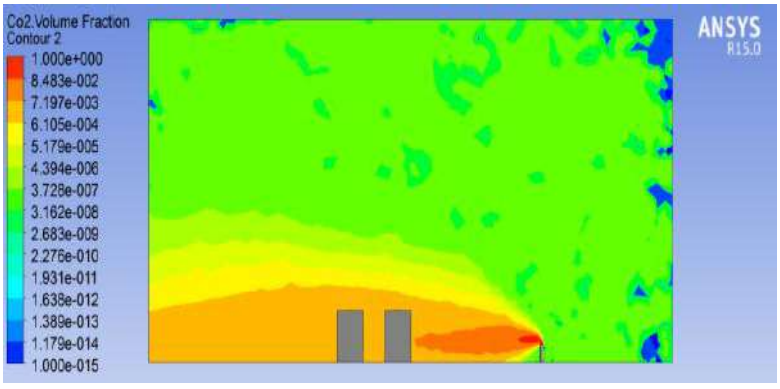


Figure IV.25 : illustre l'évolution de Fraction volumique CO_2 sur le plan 2 (XY).

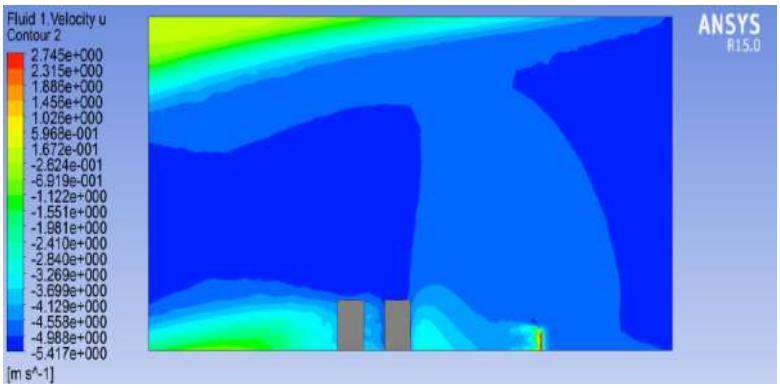


Figure IV.26 : représente l'évolution de Vitesse sur le plan 2 (XY).

- **Plan 3**

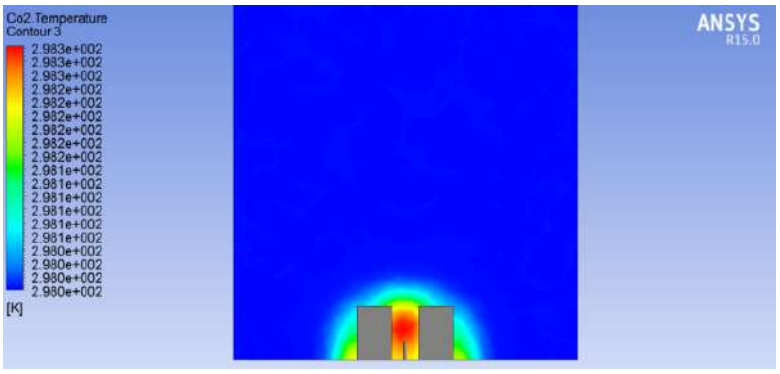


Figure IV.27 : représente l'évolution de Température sur le plan 3 (YZ).

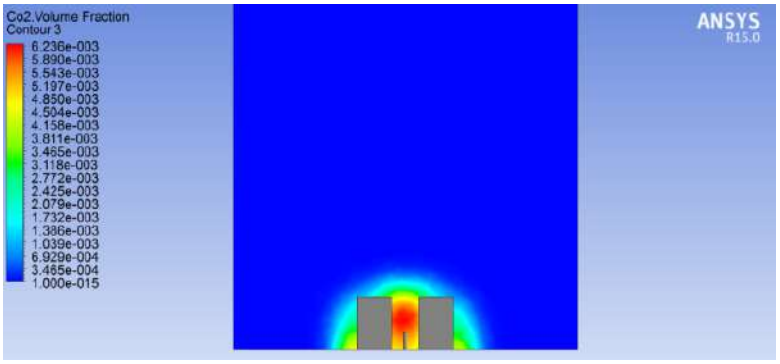


Figure IV.28 : montre l'évolution de Fraction volumique sur le plan 3 (YZ).

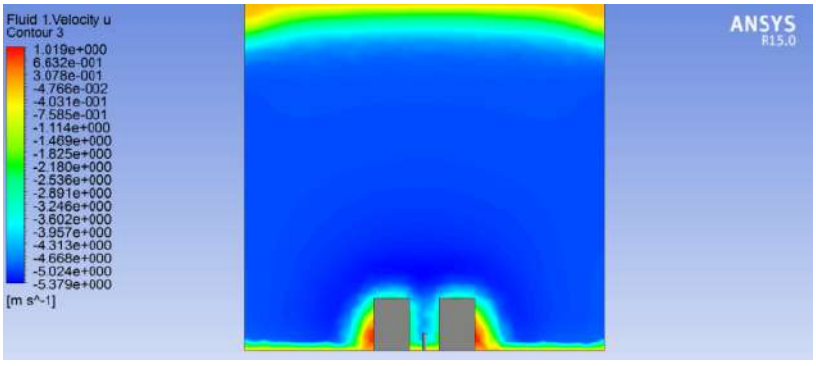


Figure IV.29 : montre l'évolution de Vitesse sur le plan 3 (YZ).

- **Cas 3 :**
  - **Plan 1**

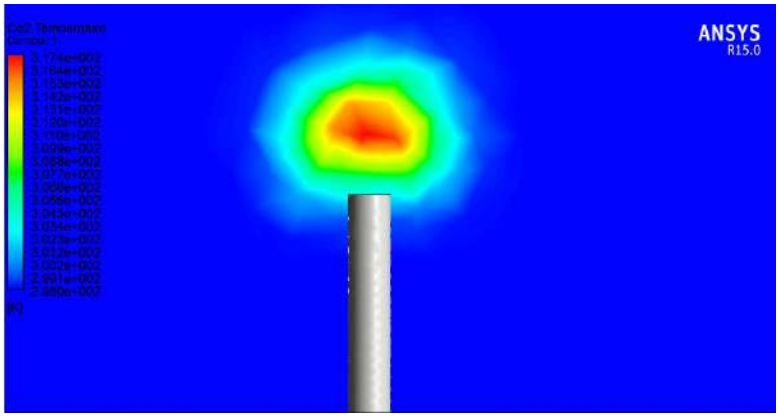


Figure IV.30 : illustre l'évolution de Température sur le plan 1 (YZ).

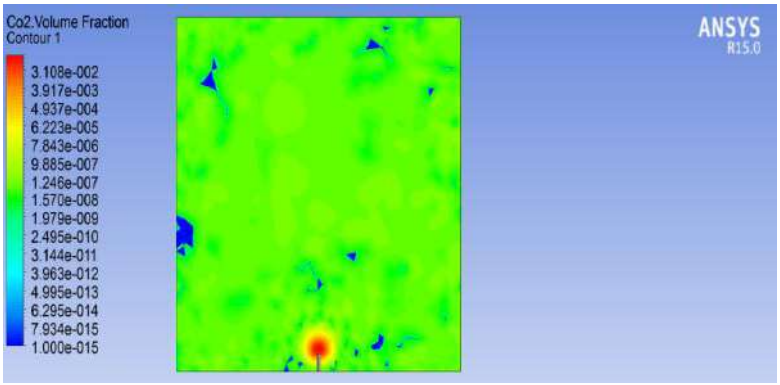


Figure IV.31 : représente l'évolution de Fraction volumique sur le plan 1 (YZ).

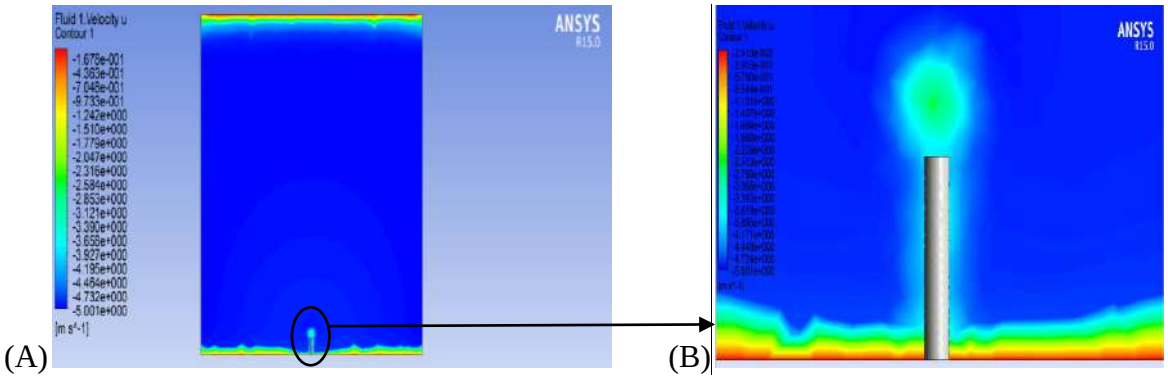


Figure IV.32 : montre la variation de Vitesse sur le plan 1 (YZ).

- **Plan 2 :**

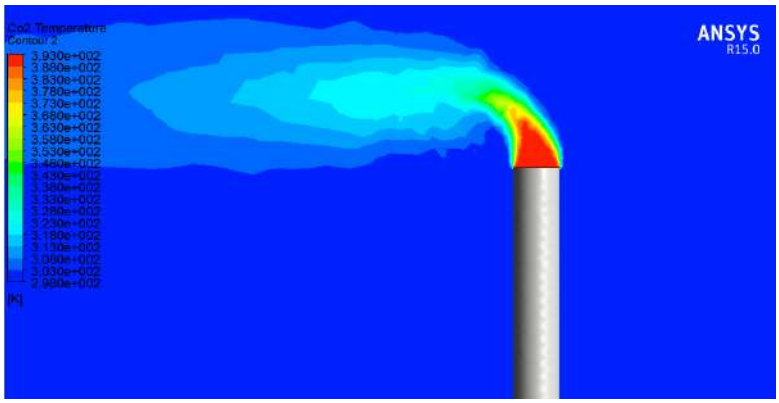


Figure IV.33 : représente l'évolution de Température sur le plan 2 (XY).

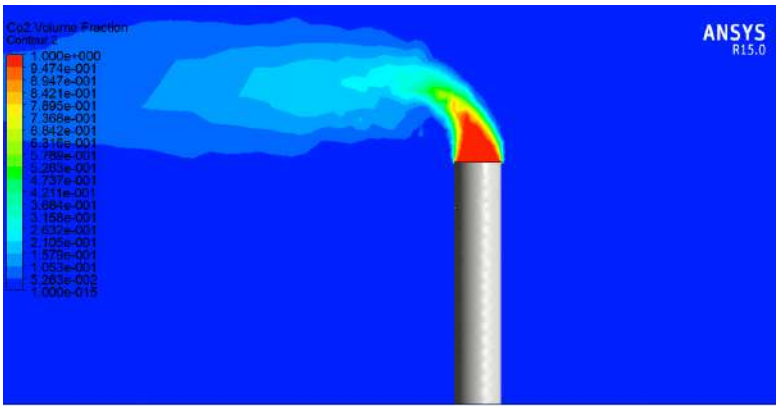


Figure IV.34: illustre l'évolution de Fraction volumique sur le plan 2 (XY).

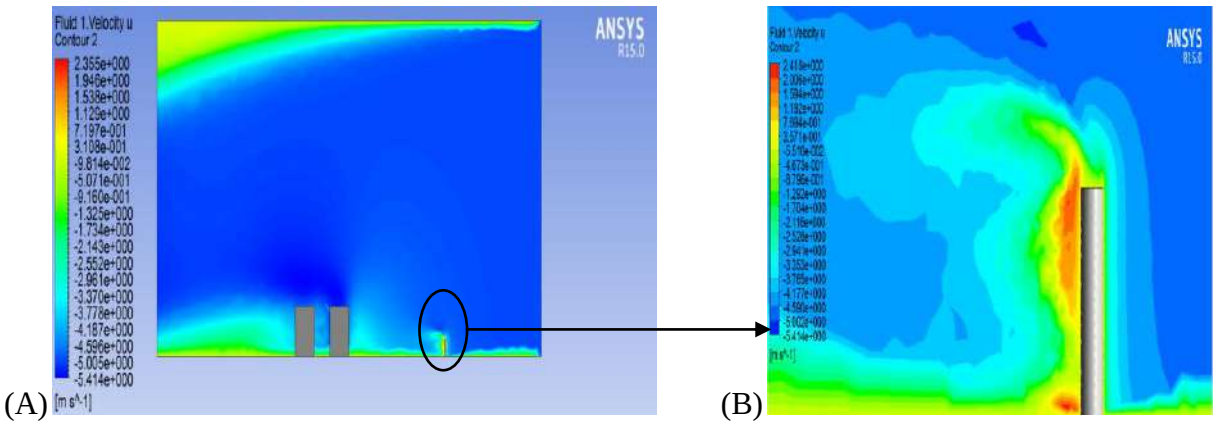


Figure IV.35: montre l'évolution de Vitesse sur le plan 2 (XY).

- **Plan 3**

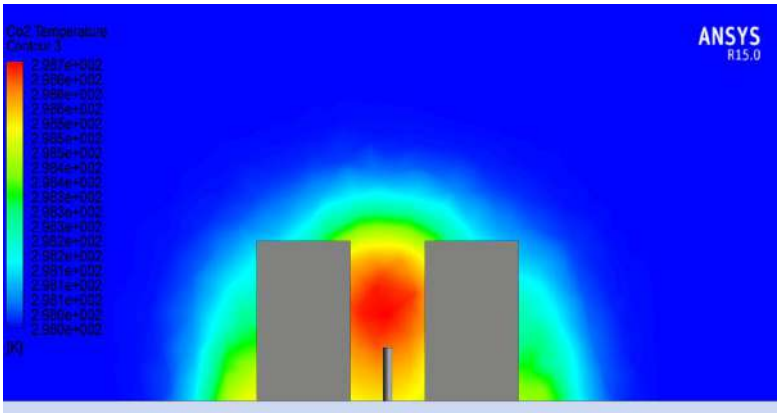


Figure IV.36: montre la variation de Température sur le plan 3 (YZ).

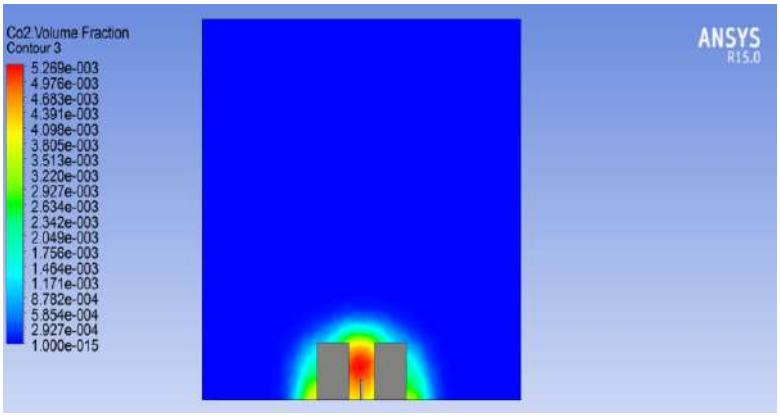


Figure IV.37: représente l'évolution de Fraction volumique sur le plan 3 (YZ).

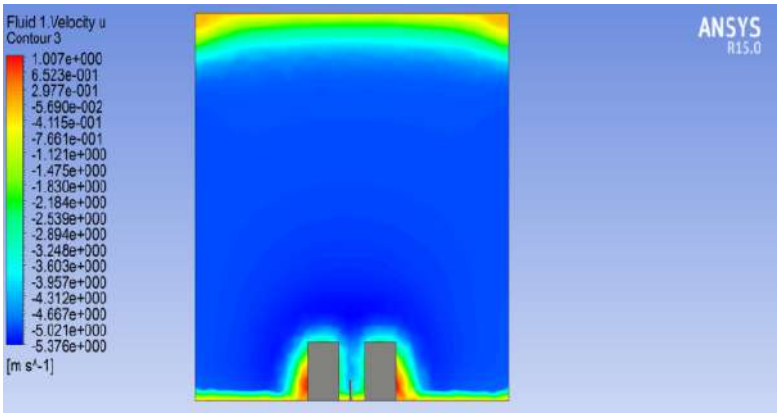


Figure IV.38: illustre l'évolution de Vitesse sur le plan 3 (YZ).

A fin de compléter la présentation des résultats nous avons traité dans cette section l'évolution des profiles des trois paramètres (températures, fraction volumique et la composante de vitesse) a cet effet nous avons choisi deux stations pour deux positions différentes comme illustre sur la figure IV.39.

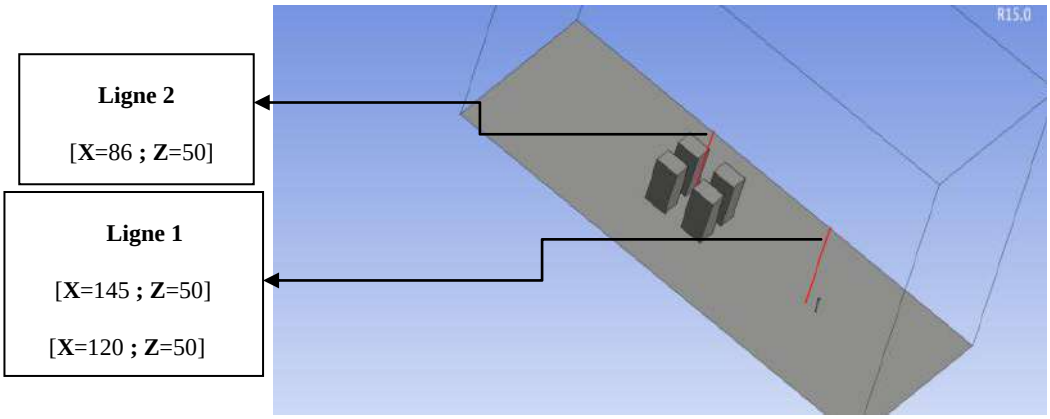


Figure IV.39 : Montre la position des lignes 1 et 2 dans le domaine en 3D.

A partir des résultats obtenus, les figures IV.40 ; IV.43 et IV.46 représentent l'évolution de température longitudinale en fonction de *y* dans les deux lignes que nous avons choisi, on constate que la température est maximale lorsque on rapproche de plus de la source. Pour la fraction volumique on observe que l'accumulation de polluant est élevée lorsque on rapproche d'avantage de la source, voir les figures IV.41 ; IV.44 et IV.47. Concernant la présentation de la variation des profiles des vitesses sont illustré, les figures IV.42, IV.45 et IV.48, on constate qu'il ya une grande perturbation de la vitesse dans le cas où on rapproche de plus sur les blocs.

- **Cas 1 :**

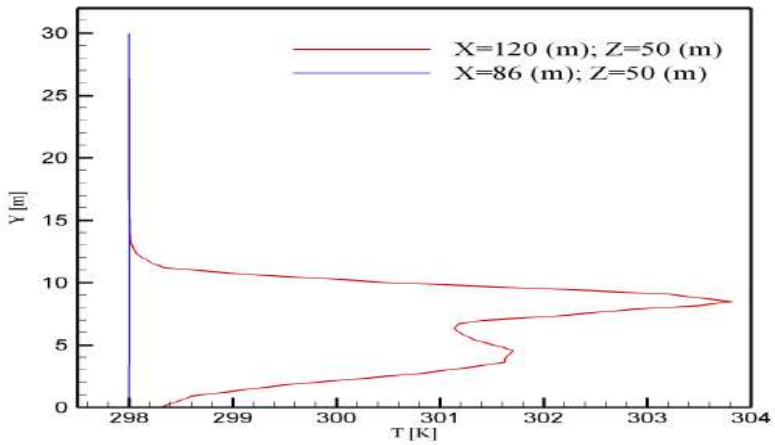


Figure IV.40 : représente les Profils de Température dans les lignes 1 et 2.

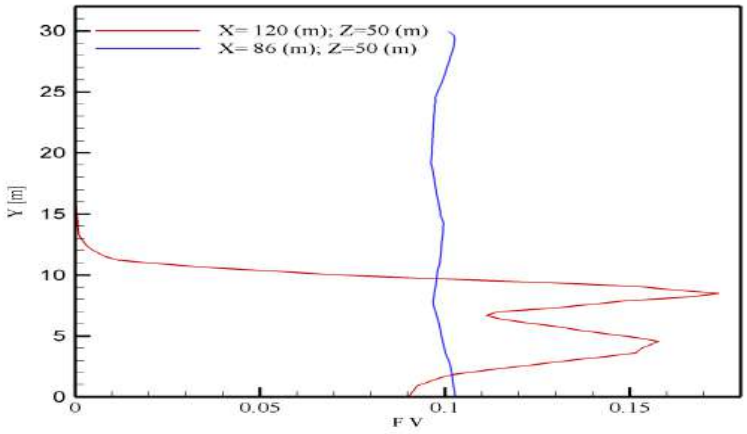


Figure IV.41 : montre les Profils de Fraction volumique dans les lignes 1 et 2.

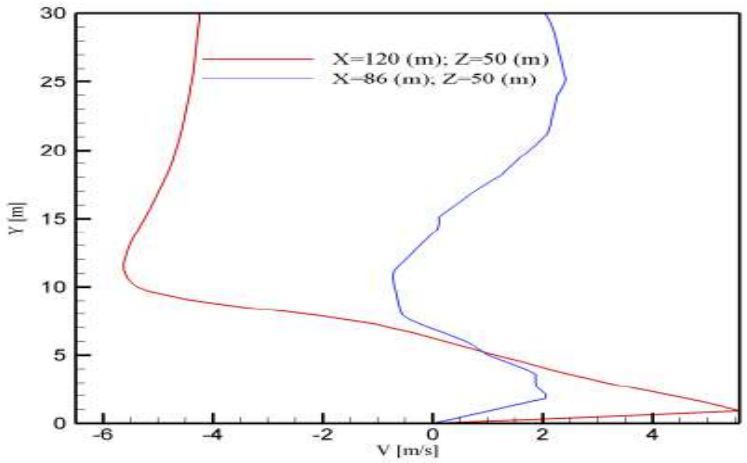


Figure IV.42 : illustre les Profils de Vitesse dans les lignes 1 et 2.

- **Cas 2 :**

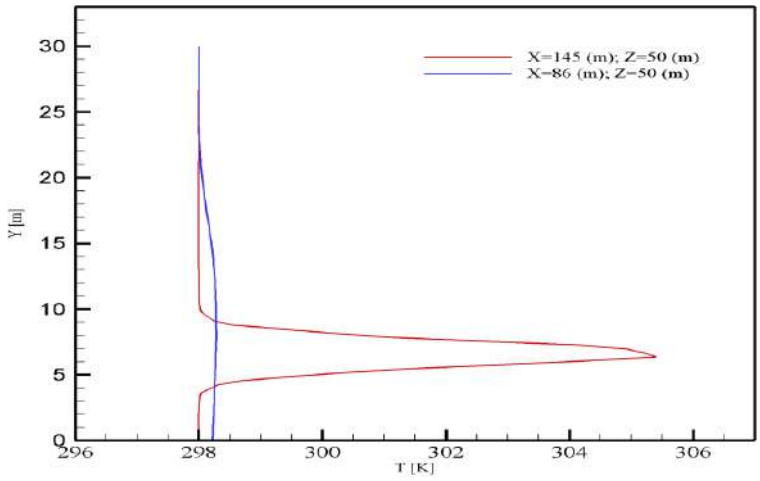


Figure IV.43 : montre les Profils de Température dans les lignes 1 et 2.

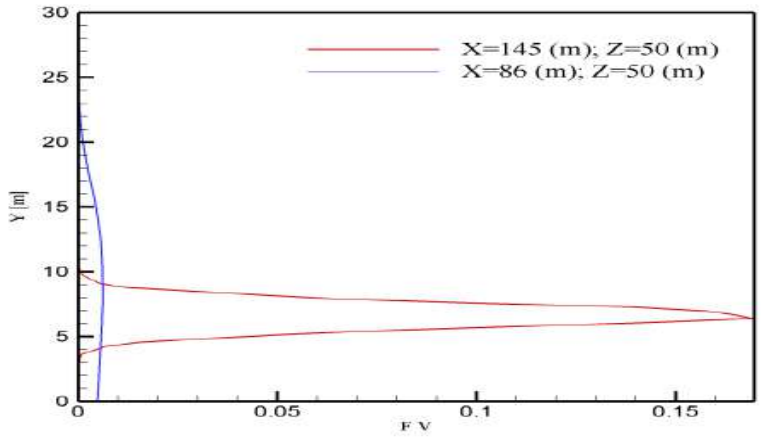


Figure IV.44 : représente les Profils de Fraction volumique dans les lignes 1 et 2.

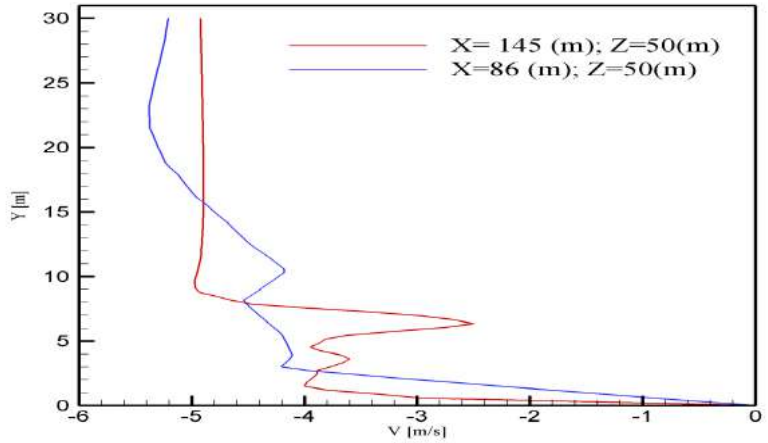


Figure IV.45 : illustre les Profils de Vitesse dans les lignes 1 et 2.

- **Cas 3 :**

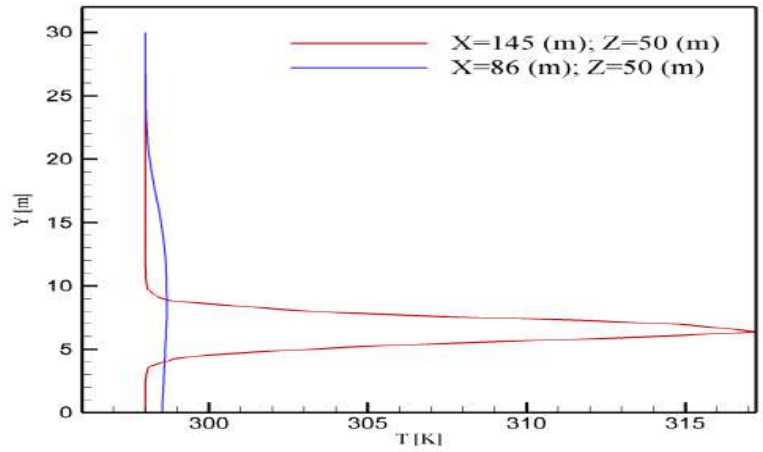


Figure IV.46 : représente les Profils de Température dans les lignes 1 et 2.

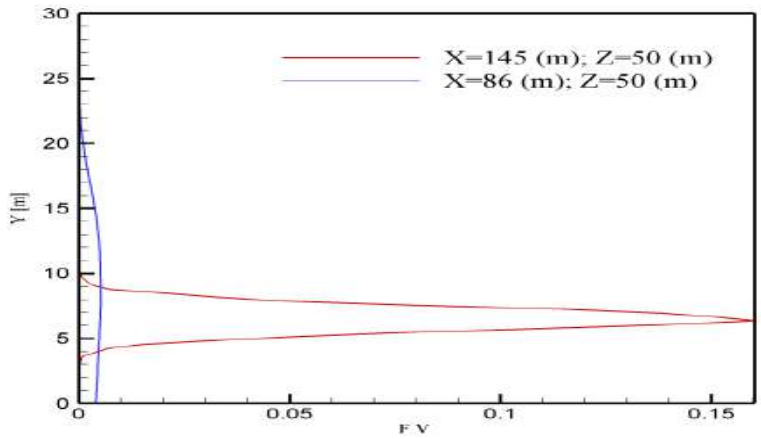


Figure IV.47 : montre les Profils de Fraction volumique dans les lignes 1 et 2.

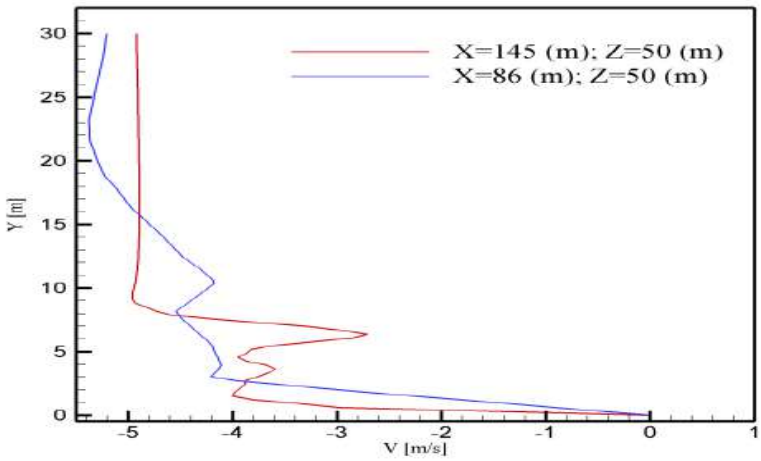


Figure IV.48 : illustre les Profils de Vitesse dans les lignes 1 et 2.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'essentielle des résultats obtenus numériquement pour l'étude de la dispersion d'un polluant gazeux dans un milieu urbain. Les résultats sont présentés pour trois cas de situations telles que :

- la position de cheminé par rapport aux blocs pour les deux premiers cas,
- La température de polluant comme deuxième cas.

Dans ces différents cas étudiés, nous avons montré que la dispersion d'un polluant gazeux dépend fortement des paramètres de contrôles, tels que la vitesse d'entrée de l'air dans le milieu urbain, la température de polluant et la position de cheminée par rapport aux blocs.

Conclusion et Perspectives

Dans le présent travail, une simulation numérique (CFD) en 3D sur l'évolution du polluant gazeux issu d'une cheminée en régime turbulent et en présence des blocs identiques a été présentée. Le polluant étudié est le dioxyde de carbone (CO_2). L'approche RANS basée sur un modèle de turbulence k-ε implémenté dans le code ANSYS CFX a été utilisée. Le système d'équations gouvernant le problème est résolu numériquement par un code de calcul basé sur la méthode des volumes finis. Ce travail consiste à réaliser des différents cas où on a prélevé les paramètres influant sur la dispersion; tels que la température de sortie de cheminée et la position de la source par rapport aux blocs.

Cette étude permettra de mieux comprendre les mécanismes physiques influençant sur la dispersion. Elle permet de proposer des solutions pour prendre en charge le risque de ces effluents gazeux toxiques sur la population environnante et de déterminer les zones à risques, par conséquent, le choix de l'emplacement d'une usine (objet des études d'impact et de danger). Ce travail a permis d'apporter un certain nombre de résultats correspondant à une gamme de paramètres très variée. Ces résultats aideront sans doute à mieux comprendre les phénomènes des écoulements dus à la présence des blocs.

Les résultats trouvés montrent essentiellement que les facteurs (position de la source et la température de polluant) interviennent dans la modification de la concentration et de la direction des courants de polluants dans l'atmosphère. Ainsi, il a été constaté en général que l'effet de la dispersion influe directement sur la qualité de l'air qui provoque un impact sur la faune et la flore.

Ce travail ouvre des perspectives intéressantes. Il s'agira par exemple, de compléter les résultats par l'étude de la dispersion avec introduction des réactions photochimique des gaz, ainsi nous analyserons des cas avec d'autres conditions aux limites et nous traiterons des problèmes de dispersion avec d'autres polluants.