République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DE MEDEA

Faculté de la technologie
Département de Génie des Procédés et Environnement

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Génie des Procédés

Option : Pollution Chimique et Gestion Environnementale

Thème

Etude La Nature De L'écoulement Et Transfert Thermique D'un Polluant Gazeux Autour D'un Ou Des Blocs.

Réalisé par :

- **Mlle. DOUMI Hacina.**
- **Mlle. GASMI Hedda.**

Proposé et dirigé par :

- **Dr. HADIDI Noureddine**
- **Dr. REBHI Ridha**

La soutenance aura lieu le **24/05/2017.**

Promotion : 2016/2017

Remerciements

Nos grands remerciements s'adressent à ALLAH le tous puissant qui nous' a donné la Patience et le courage pour accomplir ce travail.

Nous remercions très vivement notre promoteur M^{r} HADIDI Noureddine pour avoir accepté de diriger ce travail malgré ses multiples responsabilités. Sa bonne volonté et ses conseils.

Nous exprimons également nos plus sincères remerciements et notre reconnaissance envers notre co-promoteur de thèse Mr REBHI Redha pour sa gentillesse, sa disponibilité et ces qualités humaines et scientifiques, et un réel soutien, par son implication maximale, sur tous les plans.

Nous adressons encore nos remerciements aux membres de jury d'avoir accepté de Juger ce travail.

Nous tenons à remercier tous les responsables de département Génie des procédé et Environnement, et en particulier tous les enseignants de Génie des procédé

Nous remercions, toutes les personnes qui nous ont encouragé et soutenu de prés ou de loin durant la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail

***A** mes chers parents,*

***A** mes chers sours : Soumia, Souad et Abir,*

***A** ma famille,*

***A**mes collègue : Meriem, Hacina, Sihem, Salma et Djamila,*

***A** tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin.*



Dédicaces

Je tiens à dédier du fond du cœur à ceux que j'aime :

A mes chers parents.

A mon fiançais **khallafi Massaoud** qui est l'espoir de ma vie et le secret de mon bonheur.

A mes très chères sœurs qui a toujours la source de mon honneur.

A le support de ma vie, A mes très chers frères **MOHAMED** et **AZZEDDINE.**

A mes collègues : Meriem, cihem , Hedda.

A tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin.



الملخص

يتمثل العمل المنجز في النمذجة العددية التي تستخدم بنطاق واسع في محاكاة العمليات الميكانيكية وعلى وجه الخصوص حسابية السوائل الديناميكية بتقنية RANS.وذلك بدراسة تدفق وانتشار الرياح والاضطرابات في البيئات الحضرية باستعمال نموذج الاضطراب القياسي K- ε المقدم من طرف البرمجيات التجارية الحساسة لشكل معين من ملامح مدخل الاضطراب والسرعة.

الهدف من هذه الدراسة تحسين أداء نموذج K- ε القياسي الذي يقوم بتعديل معلمات النموذج وفقا إلى الشكل المختار من ملامح مدخل السرعة والاضطراب. والقدرة على إعادة إنتاج حقول تدفق الرياح الحقيقية، و تقييم أنماط الاضطراب والتركيز من خلال مقارنة النتائج النموذجية ضد بيانات نفق الرياح.المعطيات المقترحة حديثا من الاضطراب K- ε يمكن تنفيذها بسهولة، وهي أداة موثوق العمل بها لدراسة تلوث الهواء في المناطق الحضرية والدراسات البيئية الأخرى.

Résumé

La modélisation numérique pour l'application à l'écoulement et à la dispersion du vent en milieu urbain Progressé au cours des dernières années, pour représenter actuellement un outil largement utilisé pour simuler des processus mécaniques de La pollution de l'air dans les géométries complexes. Les techniques de Computationnelle Fluide Dynamique à partir des modèles RANS (équations de Navier-Stokes de Reynolds-Averaged), sont largement utilisés pour Produisent des simulations détaillées du vent et de la turbulence dans le couvert urbain, Dans le présent Étude des simulations de l'écoulement du vent et de la dispersion dans un canyon idéalisé de la rue ont été réalisées En utilisant le modèle de turbulence k- ε standard fourni par le logiciel commercial FLUENT.

L'objectif de cette Étude a été d'améliorer la performance du modèle k-ε standard en modifiant les paramètres du modèle Selon la forme choisie des profils d'entrée pour la vitesse et la turbulence.

La Capacité du modèle à Les champs d'écoulement du vent réel, les turbulences et les modèles de concentration ont été évalués en comparant Résultats de modèles comparativement aux données publiées récemment sur les tunnels à vent.

Les Résultats pour la turbulent de l'énergie cinétique et la Concentration a montré que la redéfinition des paramètres dispersifs par défaut peut Améliorer les performances du modèle.
Les nouvelles paramétrisations proposées de la turbulence k- ε standard Peut être facilement implémenté dans les progiciels CFD commerciaux, offrant ainsi une Outil de modélisation pour application à la pollution atmosphérique urbaine et autres études environnementales.

Abstract

Numerical modelling for application to wind flow and dispersion in urban environments has noticeably progressed in recent years, to currently represent a widely used tool for simulating mechanical processes governing air pollution in complex geometries. In particular, Computational Fluid Dynamic (CFD) techniques based on RANS (Reynolds-Averaged Navier–Stokes equations) models, are extensively used to produce detailed simulations of the wind flow and turbulence in the urban canopy. However, several studies have indicated that RANS models, and in particular the widely used standard k– ε turbulence model, are sensitive to the particular form of inlet profiles for turbulence and velocity. In the present study, simulations of the wind flow and dispersion within an idealised street canyon were carried out using the standard k– ε turbulence model provided by the commercial software FLUENT. The aim of this study was to improve the standard k–3 model performance by modifying the model parameters according to the chosen form of inlet profiles for velocity and turbulence. Capability of the model to reproduce real wind flow fields, turbulence and concentration patterns was evaluated by comparing the model results against recently published wind tunnel data. Results for turbulent kinetic energy and concentration showed that the redefinition of the default dispersive parameters can significantly enhance the model performance. The newly proposed parameterisations of the standard k– ε turbulence model can be readily implemented within commercial CFD software packages, offering a reliable modelling tool for application to urban air pollution and other environmental studies.

Table des matières

Introduction générale…….……1

Chapitre I : Généralités sur l'atmosphère et la pollution atmosphérique

I.1. Introduction……..5

I.2. Les mouvements de l'air atmosphérique……..5

I.3. Echelles des mouvements atmosphériques ……..6

I.4. Structure de la couche de surface urbaine……...…….7

I.5. La dispersion des polluants dans l'atmosphère urbaine……9

I.5.1. Origines de la pollution urbaine…….9

I.5.1.1. Les sources mobiles……..10

I.5.1.2. Les sources fixes ……..10

I.6. Effets de la pollution atmosphérique……..11

I.6.1. Effets sur la santé……11

I.6.2. Effets sur les matériaux……12

I.6.3. Effets sur l'environnement……...12

I.7. Dispersion de la pollution……...13

I.8. Modèle de variation du vent sur un site homogène ……..….13

I.9. Modèle de variation du vent sur un site non homogène…….15

I.10. Influence d'un changement de topographie …….15

I.11. Influence d'un obstacle isolé……16

I.12. Revue bibliographique et état de l'art 1……18

Chapitre II : modélisation de la turbulence atmosphérique

II.1. Introduction……..…….37

II.2. Modélisation de la turbulence……...37

II.2.1. Modèles à une équation : modèle Spalart-Allmaras (AS)……..43

II.2.2. Modèles à deux équations……...45

II.2.2.1. Modèle k-ε standard ……45

II.2.2.2. Modèle k-ε réalisable……...46

II.2.2.3. Modèle RNGk-ε……...48

II.2.2.4. Modèle k-ω standard……48

II.2.2.5. Modèle SST k-ω (Shear Stress Transport)……..50

II.3. Traitement de la paroi……52

Chapitre III : dioxyde de carbone

III.1. Introduction……..57

III.2. Définition……57

III.3. Utilisations……...58

III.4. Les émissions de CO_2……..59

III.5. Caractéristiques physico chimie……...61

III.6. Réduction du CO_2 dans l'atmosphère……..61

III.7. Réactivité……62

III.8. Toxicité……62

III.9. Solubilité aqueuse……63

III.10. Le CO_2 dans l'atmosphère terrestre……63

III.11. Gaz à effet de serre et acidifiant……65

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. Description du modèle……68

IV.2 .Conditions limites à l'entrée……...70

IV.3. Maillage utilisée……72

IV.4. Résultats et discussions……...76

Conclusions générales……..88

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur l'atmosphère et la pollution atmosphérique

FIG.I.1. Schéma de la couche limite urbaine…….....8

FIG. I.2.Coupe verticale d'un écoulement autour d'un obstacle……17

Chapitre II : modélisation de la turbulence atmosphérique

FIG.II.1. la cascade d'énergie de turbulence……...37

FIG.II.2. Modélisation de la couche limite…….....53

FIG.II.3. Subdivisions de la région près de la paroi……53

Chapitre III : dioxyde de carbone

FIG.III.1. Diagramme de phase pression-température du dioxyde de carbone, montrant le point triple et le point critique……...67

Chapitre IV : Résultats et discussion

FIG.IV.1. La géométrie de la configuration de l'écoulement……..69

FIG.IV.2. Profils de vitesse, u, d'énergie cinétique, k, et taux de dissipation, ε, à l'entrée.....71

FIG. IV.3. Représentation 2D du maillage……72

FIG.IV.4. Distribution des maillages a) grossier, b) moyen et c) fine……....73

FIG.IV.5. Courbe de convergence pour le maillage raffiné avec modèle de turbulence k-ε..74

FIG.IV.6. Effet du maillage sur les profils, (a) de vitesse u/u_0 et (b) de l'énergie cinétique ku_0^2……75

FIG.IV.7.Distribution des maillages pour les différentes configurations géométriques……75-76

FIG.IV.8. Profils de vitesse obtenus pour les différentes configurations (toit Wind-Ward incliné, toit plat, 2H avant du bâtiment, 2H après du bâtiment et toit Wind-Ward et Lee-Ward incliné)……..77

FIG.IV.9. Profils de pression obtenus pour les différentes configurations (toit Wind-Ward incliné, toit plat, 2H avant l'obstacle, 2H après l'obstacle et toit Wind-Ward et Lee-Ward incliné)……..78

FIG.IV.10. Profils de température obtenus pour les différentes configurations (toit Wind-Ward incliné, toit plat, 2H avant l'obstacle, 2H après l'obstacle et toit Wind-Ward et Lee-Ward incliné)……79

FIG.IV.11. Profils de concentration obtenus pour les différentes configurations (toit Wind-Ward incliné, toit plat, 2H avant l'obstacle, 2H après l'obstacle et toit Wind-Ward et Lee-Ward incliné)……80

FIG.IV.12. Comparaison des contours dans le plan de symétrie $y/H = 0$: pression, vitesse, *u*, vitesse, *v*, température, densité et streamlines pour un toit plat……..82

FIG.IV.13. Comparaison des contours dans le plan de symétrie $y/H = 0$: pression, vitesse, *u*, vitesse, *v*, température, densité et streamlines pour un bâtiment de Hauteur 2H en amont……...83-84

FIG.IV.14. Comparaison des contours dans le plan de symétrie $y/H = 0$: a) pression, vitesse, *u*, vitesse, *v*, température, densité et streamlines pour un bâtiment de Hauteur 2H en aval……84

FIG.IV.15. Comparaison des contours dans le plan de symétrie $y/H = 0$: a) pression, vitesse, *u*, vitesse, *v*, température, densité et streamlines pour un toit Wind-Ward incliné……..…84-85

FIG.IV.16. Comparaison des contours dans le plan de symétrie $y/H = 0$: a) pression, vitesse, *u*, vitesse, *v*, température, densité et streamlines pour un toit Wind-Ward et Lee Ward incliné……..85

FIG.IV.17. Contours de concentration et de température des polluants dans les street Canyon $W/H = 0.5$, 1, 2 et 4…….**.....**87

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur l'atmosphère et la pollution atmosphérique

TAB. I.1. Echelles des mouvements atmosphériques d'après Atkinson……7

TAB.I.2. Classes de rugosité….....14

Chapitre II : modélisation de la turbulence atmosphérique

TAB.II.1. Les constantes de modèle Spalart-Allmaras SA……..45

TAB.II.2. Échelle de la vitesse et l'échelle de longueur pour les modèles $k-\varepsilon$ et $k-\omega$ 45

TAB.II.3. Les constantes du modèle $k-\varepsilon$ standard….....46

TAB.II.4. Les constantes du modèle $k-\varepsilon$ réalisable…….47

TAB.II.5. Valeurs des constantes du modèle *RNG* $k-\varepsilon$ ……...48

TAB.II.6. Valeurs des constantes du modèle $k-\omega$ …….49

TAB.II.7. Valeurs des constantes du modèle SST k-ω……50

Chapitre IV : Résultats et discussion

TAB.IV.1. Les différents paramètres des mesures de Solazzo et al. [108] : la rugosité des parois z_0 , vitesse de référence u_0, l'épaisseur de la couche limite, δ, la hauteur de référence, z_{ref} et la hauteur de cube H…….69

TAB.IV.2. les longueurs caractéristiques du champ d'écoulement pour les différentes configurations géométriques…….. .86

Liste des symboles

$U(z)$: Profil vertical de la vitesse moyenne.

K_1 : la constante de Von Karman (dans l'atmosphère k_1 =0,4).

u_* : La vitesse de frottement.

z_0 : La longueur de rugosité.

τ: La contrainte de cisaillement vertical.

ρ: La masse volumique de l'air.

z_d : hauteur de déplacement.

h_0 : la hauteur moyenne des éléments de rugosité.

Δt : Une échelle de temps.

ρ_0 : La masse volumique référence.

T_0 : La température de référence.

β_T : Le coefficient d'expansion volumique thermique de fluide.

Re : le nombre de Reynolds.

U : vitesse moyenne de fluide.

L : dimension longueur caractéristique de l'écoulement.

υ : La viscosité cinématique du fluide.

R_T : Le nombre de Rayleigh.

δ_{ij} : Le delta de Kronecker.

μ_t : La viscosité turbulente.

G_v : La production de la viscosité turbulente.

Y_v : La destruction de la viscosité turbulente.

υ : La viscosité cinématique moléculaire.

$\sigma_{\tilde{v}}$ et C_{b2} : sont des constante.

G_v : Terme de production.

Ω_{ij} : La grandeur de tenseur de taux de rotation.

Y_n : Le terme de destruction.

$CD_{k\omega}$: La portion positive du terme de diffusion croisée.

ν_t : viscosité cinématique turbulente.

S : La mesure invariante du taux de déformation.

τ_ω : étant le cisaillement pariétal.

Abréviation

CLA : couche limite atmosphérique.

CLU : couche limite urbaine.

CLS : couche limite de surface.

EARSM: Explicit Algebraic Stress Modelling.

RANS: Reynolds Averaged Navier Stockes.

SST: Shear Stress Transport.

Introduction générale

Introduction générale

Provoquée par le rejet intempestif de substances diverses dans l'atmosphère, la pollution atmosphérique constitue sans aucun doute la plus évidente des dégradations de l'environnement.

La pollution atmosphérique est un phénomène très complexe compte tenu de la diversité des polluants susceptibles d'être présents dans l'atmosphère. Les niveaux de pollution au sol dépendent de la nature et des conditions de rejets polluants ainsi que des conditions atmosphériques qui déterminent le transport, la diffusion et les retombées de ces mêmes polluants. Ces phénomènes ont lieu dans la troposphère (la plus basse couche de l'atmosphère).

Des quantités croissantes de gaz et de particules potentiellement nuisibles sont émises dans l'atmosphère et entraînent des dommages à la santé humaine et à l'environnement. Elles endommagent également, à long terme, les ressources nécessaires au développement durable de la planète.

Pour chacun des polluants, les niveaux atteints sont comparés aux références disponibles. Celles-ci peuvent être des valeurs limites qui doivent obligatoirement être respectées, et dont le dépassement implique l'élaboration de plans de réduction visant à diminuer la pollution. Il existe également des valeurs cibles, aussi appelées valeurs guides, qui sont indicatives, ainsi que des seuils d'alerte, seuils d'information, seuils de protection de la santé et seuils de protection de la végétation.

Par analogie avec la couche limite qui se développe dans une soufflerie, au voisinage de la paroi, on peut diviser l'atmosphère en deux régions. L'une, l'atmosphère libre, où les effets de frottement de l'air sur le sol sont négligeables ; l'autre représentant une couche où l'influence des effets de frottement de l'air sur la surface terrestre sont considérables dénommée couche limite atmosphérique ou CLA. D'un point de vue dynamique, la couche limite atmosphérique (CLA) est la zone de l'atmosphère au voisinage du sol dans laquelle se répercute directement par « viscosité », l'adhérence au sol de l'écoulement. Elle donne alors naissance à des couches cisaillées. D'un point de vue thermique, c'est la zone de l'atmosphère

au voisinage de la surface terrestre dans laquelle la variation diurne du rayonnement solaire est directement perceptible. La hauteur de la couche limite atmosphérique, qui varie en permanence dans le temps et dans l'espace, est comprise en moyenne entre 100 et 3000 mètres. La totalité de la troposphère est en fait influencée par la surface mais le temps de réponse de la CLA à des modifications des conditions à la surface est rapide**.** Dans la CLA, le transport des différentes quantités que nous rencontrons (température, polluants...) est principalement influencé horizontalement par le vent et verticalement par la turbulence.

On présente tout d'abord l'écoulement atmosphérique de façon globale. On s'intéresse par la suite à sa mise en équations, avec une explicitation des différentes hypothèses et approximations de travail. Finalement, on présente les différentes caractéristiques importantes de l'écoulement atmosphérique, tel que l'équilibre géostrophique, et la stabilité atmosphérique. Les écoulements atmosphériques sont étudiés sur des domaines d'une dizaine de kilomètres de côté, centrés sur le site étudié (centre de production, parc éolien, etc.).

Ces domaines sont maillés à une résolution allant du mètre à quelques dizaines de mètres, selon la nature du site, la topographie et le phénomène étudié. Les simulations sont pilotées par les conditions aux limites d'entrée, imposées sous la forme de profils verticaux pour chacune des variables résolues par le code (vent, turbulence, température, concentration, etc.). Une multitude de conditions d'entrée sont en général considérées pour étudier diverses situations météorologiques. Une condition limite particulière sur la pression est imposée en sortie de domaine. Cette condition de sortie a été développée pour des configurations classiques d'écoulements en tuyauterie et suppose que les faces de sortie sont contenues dans un plan orthogonal à la direction de l'écoulement. Cette condition de sortie semble cependant inadaptée à la modélisation d'écoulements atmosphériques qui ne vérifie pas les mêmes hypothèses. En particulier, elle n'assure pas systématiquement l'équilibre souhaité entre le gradient de pression, moteur de l'écoulement, et la contrainte de cisaillement.

Notre investigation porte essentiellement l'étude de l'écoulement d'un polluant et que le gaz dioxyde de Carbone produit à partir d'une source localisé entre deux blocs avec différentes distances entre les blocs ainsi avec une entrée de l'air pur à 25C° et avec une vitesse de profile parabolique ainsi de voir le l'évolution de température de fluide de (CO2) et de densité ainsi le comportement de l'écoulement de polluant dans les différentes positions en amont (avant les bloc), entre les deux bloc, en aval et loin des blocs.

Ce manuscrit est structuré comme suit :

Le premier chapitre est consacré à la présentation des parties de l'atmosphère dans laquelle se déroulent nos études et de rappeler les phénomènes physiques que nous devons prendre en compte. La modélisation de la turbulence est une branche de la dynamique des fluides consistant, pour la simulation numérique des écoulements turbulents, à représenter l'influence de la turbulence sur l'écoulement moyen (approches statistiques) ou des échelles non résolues sur les échelles résolues (approches filtrées). Une recherche bibliographique sur travaux dans ce domaine la dispersion d'un polluant dans l'atmosphère et la formulation mathématique du problème physique, ainsi que les équations qui gouverne le problème sont développées fait l'objet du deuxième chapitre. Dans le troisième chapitre nous présente des généralités le dioxyde de Carbone choisi comme un polluant dans notre étude. Le dernier chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats obtenus. On termine notre travail par une conclusion générale.

L'objectif de notre travail est de modéliser numériquement la turbulence atmosphérique afin d'étudier l'action aérodynamique du vent sur les ouvrages de génie civil. L'analyse développée est bidimensionnelle et doit permettre, en vue d'une étude vibratoire, d'identifier
Les principaux mécanismes qui interviennent lorsque le vent aborde transversalement une structure élancée, non profilée.

Les objectifs principaux de notre travail sont :

- L'étude de la structure générale de l'écoulement et de la dispersion des polluants dans une rue canyon.
- La prédiction des profils des différents paramètres de turbulence et de la dispersion à l'intérieur de la rue canyon.
- Evaluation des performances du modèle k-ε dans la reproduction des profils de vitesse, de pression, de température et de concentration à l'intérieur d'une rue canyon par modification des formes des toits des bâtiments et le rapport d'aspect entre les deux bâtiments.

L'objectif de notre présent travail est la simulation CFD de l'écoulement et la dispersion d'un polluant passif à l'intérieure d'une rue canyon par l'application d'une approche RANS

(Reynolds Average Naviers-Stocks) basée sur un modèle de turbulence k-ε implémenté dans le code CFD (Computational Fluid Dynamics) ANSYS cfx 15.0.

Chapitre I : Généralités sur l'atmosphère et la pollution atmosphérique

Chapitre I : Généralités sur l'atmosphère et la pollution atmosphérique

I.1. Introduction

La pollution atmosphérique est une altération de la qualité de l'air pouvant être caractérisée par des mesures de polluants chimiques, biologiques ou physiques-gazeux, particulaires, radiologiques et parfois liquides -présents dans l'air, ayant des conséquences préjudiciables à la santé humaine, aux êtres vivants, au climat, ou aux biens matériels. Les niveaux de pollution au sol dépendent de la nature et des conditions de rejets polluants ainsi que des conditions atmosphériques qui déterminent le transport, Ces phénomènes ont lieu dans la troposphère. Des quantités croissantes de gaz et de particules potentiellement nuisibles sont émises dans l'atmosphère et entraînent des dommages à la santé humaine et à l'environnement. Elles endommagent également, à long terme, les ressources nécessaires au développement durable de la planète. Nous dénombrons trois facteurs prédominants : le vent, le gradient vertical de température et la turbulence. Nous allons voir successivement leurs influences [66].

Le vent est un phénomène atmosphérique complexe que l'on peut étudier de multiples façons, à différentes échelles. Ce chapitre vise également à définir les termes qui seront employés tout au long de ce travail. Cette étape est indispensable car les notions utilisées sont issues de disciplines différentes : nous laisserons rapidement de côté les aspects météorologiques et climatologiques pour ne considérer le vent que sous son aspect micro-météorologique et aérodynamique. Ainsi, après avoir brièvement décrit les forces qui s'exercent sur l'air atmosphérique et indiqué les différentes gammes d'échelles rencontrées dans l'atmosphère, nous reviendrons, plus en détail, sur la structure du vent dans la région de l'atmosphère située juste au dessus de la surface terrestre. Dans cette région, où le vent agit sur les constructions, nous identifierons les paramètres caractéristiques du vent et nous décrirons leur variation sur différents types de terrains [67].

I.2. Les mouvements de l'air atmosphérique

L'air qui constitue l'atmosphère terrestre est un mélange de gaz et de particules solides ou liquides, constitué à 99% par de l'oxygène et de l'azote. On le trouve concentré dans les basses couches de l'atmosphère, principalement dans la troposphère qui est une couche d'une dizaine de kilomètres [68], elle est contient 90% de la masse de l'atmosphère et environ 10%

de l'ozone atmosphérique. Celui-ci est au contact des espèces vivantes avec lesquelles il agit comme une espèce irritante et polluante. Il est alors qualifié de « mauvais ozone » en raison de ses effets néfastes sur la santé humaine et sur les végétaux [69]. Dans cette région, le déplacement de l'air vis à vis de la surface terrestre, appelé vent, résulte de l'équilibre entre les forces de pression, la force de Coriolis et les forces de frottement [68].

- Les forces de pression sont à l'origine du déplacement des masses d'air constituant le vent. Elles proviennent des inhomogénéités de pression dues à l'échauffement inégal de l'air suivant les altitudes, la nature des sols et la répartition des océans et des continents. Elles sont perpendiculaires aux surfaces isobares et dirigées des hautes pressions vers les basses pressions.
- la force déviatrice de Coriolis est perpendiculaire à la vitesse du vent, orientée vers sa droite dans l'hémisphère nord, et provient de la rotation de la terre autour de ses pôles. Elle intervient dans les déplacements atmosphériques en raison de la faiblesse des forces contribuant à mettre l'air en mouvement.
- les forces de frottement traduisent la friction turbulente de l'air sur le sol. Leur action se fait ressentir très prés du sol dans une zone appelée la couche limite atmosphérique (CLA).On divise ainsi schématiquement les basses couches de l'atmosphère en deux parties distinctes avec prés du sol la CLA et loin de l'influence du sol, à plusieurs centaines de mètres d'altitude, l'atmosphère libre.

– Dans la CLA, près de la surface terrestre, la présence du sol perturbe l'écoulement de l'air et donne naissance à une forte agitation, appelée turbulence.

– Dans l'atmosphère libre, sous l'action des forces de pression et de Coriolis, le vent (dit géostrophique) est uniforme, horizontal, très peu turbulent et sa vitesse (dite de gradient) est constante.

I.3. Echelles des mouvements atmosphériques

L'écoulement de l'air atmosphérique est constitué d'une large gamme d'écoulements interdépendants caractérisés par des tailles allant du millimètre au millier de kilomètres. Chaque phénomène atmosphérique est identifié par son extension horizontale et par sa durée de vie (ces deux paramètres sont fortement corrélés).

- Les mouvements à grandes échelles (échelles synoptiques ou planétaires) ont une taille supérieure à la centaine de kilomètres et ont une durée de vie de plusieurs jours, voire de

plusieurs semaines. Ils contribuent à la circulation à l'échelle planétaire et sont responsables des tendances météorologiques à long terme.

- Les mouvements à petites échelles ont une taille inférieure au kilomètre et ont une durée de vie de quelques minutes au maximum (micro-échelles). Ils sont liés à la turbulence et sont générés, dans la couche limite atmosphérique, par la présence d'obstacles ou par la rugosité des sols.
- Des mouvements de tailles intermédiaires (meso-échelles) assurent la transition entre les précédents. Notons qu'entre les petites et les meso-échelles, on distingue parfois des échelles dites sub-meso.

Le tableau (I.1) donne une correspondance approximative entre la taille moyenne des mouvements atmosphériques, les périodes qui leur sont associées et les échelles d'Orlanski. Ces dernières sont utilisées comme référence par les trois principales disciplines qui étudient les mouvements de l'air atmosphérique. Ces disciplines sont :

– la climatologie, qui s'intéresse aux particularités des grands mouvements atmosphériques en fonction des régions du globe et des saisons [68].

Taille (km)	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^{0}	10^{1}	10^{2}	10^{3}	10^{4}
période	1s	10s	1mn	10mn	2h	15h	7j	70j
Echelles	Micro-échelles			Meso-échelles		Grandes échelles		
Echelles d'Orlanski	Micro γ	Microβ	Microα	Meso γ	Meso β	Meso α	Macro $\alpha et \beta$	

TAB. I.1 : Echelles des mouvements atmosphériques d'après Atkinson [70].

-la météorologie, qui s'occupe du suivi et de l'évolution des masses d'air sur des régions Données [71].

- la micro météorologie, qui traite de la structure détaillée des phénomènes atmosphériques au voisinage du sol [72].

I.4. Structure de la couche de surface urbaine

La figure (I.1) rappelle schématiquement la structure de la couche limite atmosphérique. Appelée couche limite urbaine (CLU) dan le cas particulier de l'atmosphère au dessus des

villes. La couche limite de surface (CLS) en contact avec le sol. Où les forces de Coriolis peuvent être négligées.

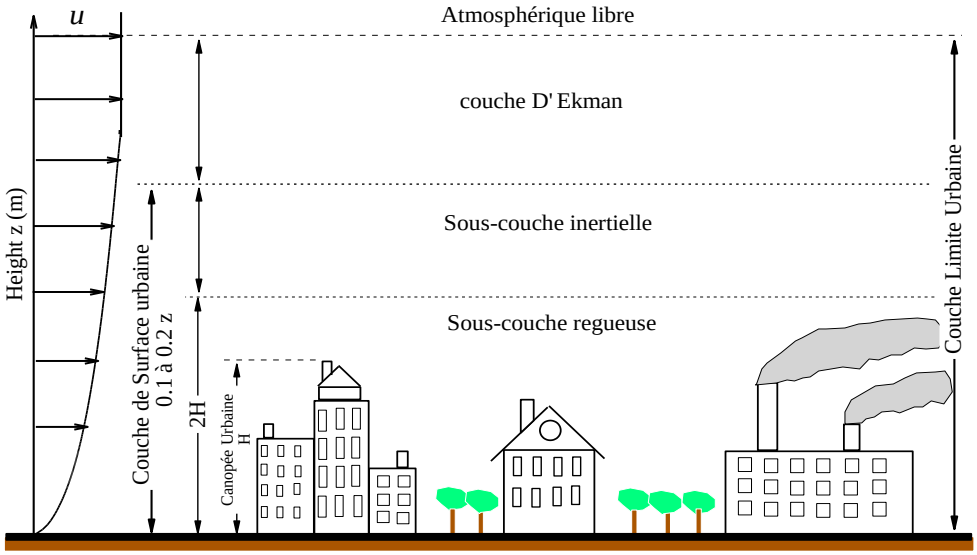


FIG.I.1 : Schéma de la couche limite urbaine.

Les études atmosphériques se sont longtemps limitées à l'étude de la structure de la CLS au-dessus de surfaces relativement homogènes et peu rugueuses. Depuis quelques dizaines d'années, des études sur les écoulements et les flux ont été menées sur des surfaces plus complexes comme les canopées végétales, en offrant une description assez complète des profils de vent moyens et de turbulence [73]. plus récemment, de manière similaire ,la description de la couche de surface urbaine (CSU)a dû être adaptée pour tenir compte de la grande complexité et du fort impact des surfaces urbaines.IL est à noter que sa description est récente et qu'elle diffère encore quelque peu selon les auteurs et nous adapterons ici celle proposée par Roth [74].la couche de surface urbaine est divisée en plusieurs sous-couches caractéristiques des propriétés moyennes et turbulentes de l'écoulement(figure I.1) :

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 considérées comme constantes.

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 [75].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 tridimensionnelle .IL arrive que

dans des conditions de forte instabilité ,la hauteur z_*de la sous-couche rugueuse dépasse celle de la sous-couche inertielle ,cette dernière n'existant alors pas.

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 [76],nous la présentons ici comme une partie la sous-couche rugueuse, Roth [74] qui respecte ainsi le formalisme adopté pour les canopées végétales proposé par Raupach [75].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 de propriétés dynamiques inhomogènes et d'importantes forces de frottement, de natures différentes (bâtiments composés de divers matériaux, végétation)modifiant aussi les échanges thermiques, d'humidité et de polluants.

Notre travail se place dans le cadre d'études détaillées de la dispersion et des échanges thermiques dans la canopée urbaine.

IL est à noter que la structure de la couche limite urbaine dépend également de la configuration des villes .les différences de densité entre les différents quartiers ne permettent pas un schéma aussi simple que celui proposé par la figure (I.1) ; se développent différentes sous-couches de rugosité et inertielles propres à chaque quartier, liées entre elle par des zones d'ajustement [77].

I.5. La dispersion des polluants dans l'atmosphère urbaine

La pollution de l'air peut être définie comme un état de l'atmosphère où les constituants, de concentrations trop élevées par rapport à un niveau naturel, sont néfastes pour les individus, les animaux ou l'environnement.les problèmes de pollution peuvent se décomposer selon un schéma simple: les sources (ou émissions), le transport dans l'atmosphère (mélange et transformations chimiques) et la perception des récepteurs [78]. Les études pour la régulation de la pollution de l'air ne doivent donc pas uniquement se limiter aux émissions mais doivent analyser et comprendre les trois composantes de ce schéma.

Les sources de polluants peuvent être divisées en trois catégories: les sources naturelle (éruptions volcaniques, poussières naturelles, émissions biogéniques, embruns marins…),et les sources anthropiques, comprenant les sources d'origines agricoles(pesticides, émissions des sols, poussières agricoles, feux)et les sources d'origine urbaines et industrielles.si les autres ne sont pas à négliger, ces dernières suscitent un intérêt particulier :ce sont en effet

dans les zones urbaines et les sites industriels que l'on trouve les plus fortes concentrations de polluant et que la population est le plus exposé aux risque.

I.5.1. Origines de la pollution urbaine

Les nuisances atmosphériques dues à l'activité humaine son relativement anciennes, les premières mentions remontant à l'Antiquité. Depuis environ deux siècles, avec le début de l'ère industrielle, caractérisée par une croissance continue de l'utilisation de combustibles et une augmentation de la population urbaine, que le problème prend son essor. Ce n'est cependant que depuis le 20éme siècle que la pollution atmosphérique est reconnue comme un problème important.

Dan les zones urbaines, les sources de pollution sont classées en deux catégories : les sources mobiles et les sources fixes [79].

I.5.1.1. Les sources mobiles

Les sources mobiles sont les sources liées aux transports. Qui constitue la principale source de pollution dan les zones urbaines et péri urbaines, d'autant plus que la densité du trafic augmente. Les principaux polluants rejetés par les véhicules sont le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO_2), les oxydes d'azote (NO_x) qui sont précurseurs de l'ozone troposphérique(O_3), le dioxyde de soufre(SO_2), les composés organiques volatiles (VOCs), les particules (appelés aussi aérosols).

I.5.1.2. Les sources fixes

Les émissions domestiques proviennent essentiellement du chauffage au fuel (CO, CO_2, SO_2), à l'origine de pollution extérieure aussi bien qu'intérieure, et du traitement des ordures ménagères (CO, CO_2, CH_4, H_2S, NH_3).

Les émissions industrielles incluent les émissions des industries chimiques, métallurgiques, pharmaceutiques, pétrolières qui rejettent de nombreux gaz et particules dans l'atmosphère. Elles incluent également les émissions des centrales électriques thermiques qui rejettent une grande quantité de particules, dont les suies, des métaux lourds, des gaz (CO, CO_2, NO_X, SO_2, VOCs). Les rejets de dioxyde de soufre SO_2et de particules, ajoutée du brouillard peut générer des gouttes d'acide sulfurique(H_2SO_4).

Ce type de pollution appelé smog (par la contraction de 'smoke'et 'fog') a été reconnu pour la première fois 1850 et fut à l'origine a Londres en 1952 de 4000 morts en quelques jours .ces épisodes de smog sont de nos jours plus rares. grâce en partie aux améliorations technologiques, au changement de mode de chauffage et aux normes industrielles qui ont permis ces dernières années une diminution de nombreux polluants.

Les industries et les centrales peuvent aussi être à l'origine de rejets accidentels, de substances souvent très toxiques, qui peuvent avoir des conséquences très graves et souvent mortelles(par exemple l'explosion d'une cuve de l'usine de produits chimiques de Bhopal en Inde en 1984,qui causa 20 000morts, dont au moins3000 les premiers jours et plus de 200 000 handicaps graves), d'autant plus quand il s'agit de rejets de substances radioactives (le tristement célèbre accident de Tchernobyl en 1986).

Depuis les attaques terroristes du 11 septembre 2001 aux Etats Unis, est apparu un nouveau type de risques, les risques de rejets d'origine terroriste, qui ont changé l'orientation de nombreuses études sur la dispersion en milieu urbain, en particulier aux Etats Unis [80].

Si l'impact des polluants dépend de leur toxicité, il dépend aussi du type de rejet (continu ou en bouffées, gazeux ou particulaires, réactif ou passif) mais aussi de l'exposition des individus ou de l'environnement (durée, concentration, fréquence.)

I.6. Effets de la pollution atmosphérique

La pollution atmosphérique est aussi et surtout évaluée par les effets néfastes qu'elle a sur les individus et l'environnement.

I.6.1. Effets sur la santé

Les effets sur la santé sont ceux qui attirent le plus l'attention des décideurs et qui sont souvent à l'origine de controverses.les effets à court terme sont peut-être les plus impressionnants.ils résultent de rejets accidentels ou d'épisodes de forte pollution :les concentrations des polluants ,souvent très toxiques, peuvent alors atteindre des niveaux excessivement élevés pendant quelques heures ou quelques jours, causant malaises, maladies, handicaps et pouvant même avoir des conséquences mortelles, les individus les plus touchés étant parmi les personnes les plus vulnérables, c'est-à-dire les personnes âgées ,les jeunes enfants, les personnes souffrant de maladies respiratoires…les normes industrielles et les contrôles de qualité de l'air limitent de nos jours les accidents et les épisodes de fortes pollutions dans la plupart des zones urbaines. Cependant dans certaines mégapoles, la plupart situées dans les pays dits émergents, (voir l'attention mondiale de ces dernières années pour les zones urbaines de l'Asie du Sud-est), les habitants peuvent encore être exposés à de tels risques.

Les effets à long terme sont plus difficiles à évaluer, car ils dépendent de l'état de santé initiale et du mode de vie des individus, ils sont tout aussi importants .Ces effets sont essentiellement respiratoires, mais la pénétration de certains gaz dans le sang peut être à l'origine de maladies cardio-vasculaires. La solubilité des gaz détermine leur proportion à

atteindre les alvéoles pulmonaires. Ainsi le SO_2 relativement soluble est absorbé très tôt dans les voix respiratoires ; ses effets sont néfastes même pour de faibles concentrations (0.25ppm) et se manifestent principalement par des bronchites chroniques. Le CO, NO_2 et O_3, peu solubles, atteignent les alvéoles pulmonaires. Si le NO_2 et l'O_3 inhibant les échanges gazeux sanguins sont à l'origine d'œdèmes pulmonaires, le CO est transporté dans le sang et peut entrainer, selon la concentration ingérée, des malaises, maux de tête, mais aussi des dérèglements neuronaux voire la mort. Les oxydes d'azote peuvent aussi avoir des effets irritants : pendant les jours ensoleillés où le trafic est important, ils réagissent avec les hydrocarbures pour former un gaz nocif (appelé 'smog photochimique'), à l'origine d'irritation des yeux et de la gorge et de problèmes respiratoires [81].

I.6.2. Effets sur les matériaux

Les effets les plus visibles sont les dépôts de matières particulaires sur les bâtiments ,qui entrainent des couts de nettoyage très importants pour les municipalités et les particuliers .S'ajoutent la détérioration de certains matériaux (marbre ,calcaires)par l'érosion chimique de certains polluants acides(le SO_2 et CO_2 formant en présence d'humidité respectivement de l'acide sulfurique et carbonique).La corrosion des métaux est aussi une conséquence importante ,produite principalement par l'oxydation par des oxydes de soufre .La corrosion altère les propriétés physiques, chimiques et électriques des métaux ,ce qui peut avoir des conséquences importantes pour les équipements électriques ou électroniques. L'ozone est aussi responsable de la détérioration du caoutchouc (une des conséquences du 'smog photochimique').

I.6.3. Effets sur l'environnement

Outre les effets planétaires comme l'effet de serre ou le changement climatique, la pollution a des effets locaux sur l'environnement. L'effet le plus constaté est sans doute la réduction de la visibilité. Elle est la conséquence de l'absorption et surtout la diffusion du rayonnement visible par les gaz (comme le NO_2) et les aérosols. La diffusion dépend de la taille, de la distribution et de la composition chimique des aérosols, ainsi conditions météorologique (température, vent, humidité).

Les constituants gazeux et particulaires d'une atmosphère urbaine fortement polluée sont aussi à l'origine de la modification du bilan radiatif. D'une part, le flux solaire incident qui atteint la surface peut être largement réduit par l'absorption et la diffusion par les aérosols et, d'autre part, l'absorption et l'émission du rayonnement infrarouge par l'atmosphère peuvent augmenter.

Les aérosols contribuent également à la formation du brouillard et aux précipétations.les particules servent en effet de noyaux de condensation pour la vapeur d'eau et les nuages. Les polluants gazeux tels que le NO_2et le SO_2 peuvent alors se transformer en acide à la surface des particules qui sont à l'origine des dépôts acides.

Certains polluants (tels que le SO_2, le chlore, le mercure) ont en outre des effets néfastes pour la végétation .La principale cause en est une destruction de la chlorophylle et ainsi un dérèglement de la photosynthèse, résultant en une perturbation de la croissance ou même la mort des plantes.

I.7. Dispersion de la pollution

Notre étude se situe dans le cadre particulier de la dispersion d'un scalaire passif (c'est-à-dire sans prise en compte des réactions chimiques), pour une source pontuelle et un rejet continu. Une application en est par exemple l'étude d'impact d'un rejet accidentel industriel ou terroriste.

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 atmosphérique dépend alors fortement de la stabilité thermique .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 apparait donc important dans les études de dispersion de décrire avec précision les écoulements turbulents.

I.8. Modèle de variation du vent sur un site homogène

- **Site homogène**

Pour Duchene-M et Sacré [82], "Un site homogène est une zone plate, ou faiblement ondulée, recouverte d'obstacles naturels ou artificiels répartis de façon homogène dans toutes les directions".

- **Variations de la vitesse moyenne :**

Au dessus d'un site homogène, en atmosphère neutre, le vent garde une direction constante et le profil vertical de la vitesse moyenne suit une loi de variation logarithmique [83] :

$$U(z) = \frac{u*}{k1}\ln\left(\frac{z}{z0}\right) pourz \gg z0 \qquad (I.1)$$

K_1 est la constante de Von Karman (dans l'atmosphère k_1=0,4), u∗et z_0 sont respectivement les échelles de vitesse et de longueur caractéristiques du site, obtenues expérimentalement en traçant les profils de vitesse en coordonnées semi-logarithmiques.

- U∗est la vitesse de frottement. Elle caractérise le frottement de l'air sur le sol et s'exprime en fonction de la contrainte de cisaillement vertical et de la masse volumique de l'air :

$$u* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho air}} \qquad \text{(I.2)}$$

U∗varie en fonction de la nature du terrain et de la vitesse du vent, mais ne varie pratiquement pas avec la hauteur ($\tau = \tau sol$).

- z_0 est la longueur de rugosité [84].définit ce paramètre comme étant "la hauteur au dessus du sol à laquelle il convient d'admettre que le vent s'annule pour tenir compte de la présence des aspérités" [85]. dentifient z_0 à la taille caractéristique des tourbillons au niveau du sol. Plus généralement, la longueur de rugosité caractérise l'influence globale de la sous-couche rugueuse sur le vent. Elle est fonction de la taille, de la forme et de la densité des obstacles qui recouvrent le sol. Les sites homogènes de grande extension horizontale sont classés en 5 catégories de rugosité, présentées dans le tableau (I.2). Wieringa [86] a effectué une étude bibliographique très complète sur le sujet et donne une classification beaucoup plus détaillée.

Sites caractéristiques	Classes de rugosité	Z_0(m)
Grandes étendues d'eau (mer, océan, lac)	I	de 0.001à0.01
Rases campagnes, aéroports	II	de 0.01à 0.10
Zones faiblement urbanisées, bocages	III	de 0.10à 0.50
Zones urbanisées, industrielles ou forestières	IV	de 0.50 à 1.50
Centre des villes	V	De 1.50 à 2.50

TAB. I.2 : Classes de rugosité La loi (I.1) est valable par atmosphère neutre, dans la couche de surface, hors de la sous couche rugueuse, pour environ $z>10z_0$. Lorsque la densité des

aspérités est élevée, le niveau apparent du sol vis à vis de l'écoulement est sur élevé, il faut alors introduire une hauteur de déplacement z_d telle que :

$$U(z) = \frac{u*}{k1} \ln\left(\frac{z-zd}{z0}\right) pourz > zd \quad \text{(I.3)}$$

On a $z_d=0.7h_0$ où h_0 est la hauteur moyenne des éléments de rugosité.

I.9. Modèle de variation du vent sur un site non homogène

- **Site non homogène**

Pour Duchene-M et Sacré [82], "un site est dit non homogène si il présente, dans certaines directions, des natures différentes de sol, des élévations de terrain, des obstacles isolés (haies, maisons...)". Dans cet exposé, nous étudierons trois exemples de site non homogène :

– un site présentant un changement de rugosité,

– un site avec une topographie marquée,

– un site avec un obstacle.

I.10. Influence d'un changement de topographie

Les accidents topographiques (vallées, falaises, collines, buttes ...) guident la trajectoire du vent et modifient les caractéristiques moyennes et turbulentes de l'écoulement de l'air. Ces modifications sont, naturellement, fonctions de la taille et de la forme des obstacles topographiques rencontrés par le vent [87].consacrent un chapitre entier à l'étude des écoulements autour de collines. Cette synthèse, basée sur de nombreuses études expérimentales, fait l'inventaire des multiples formules empiriques répertoriées dans la littérature. Sans entrer dans le détail, notons simplement qu'un écoulement qui aborde transversalement une colline subit une ascendance le long du versant au vent puis une descente le long du versant sous le vent. Au niveau du sommet, se forme une zone de dépression et de survitesse, tandis qu'au pied du versant au vent, l'air est ralenti. Le rapport entre la vitesse moyenne incidente et la perturbation de vitesse au sommet est appel´e "rapport fractionnaire de survitesse". Ce paramètre est proportionnel à la pente de l'obstacle H/L. Quand la pente est faible, on distingue une couche interne, dans laquelle les perturbations sont principalement liées aux transferts turbulents, une couche externe, dans laquelle ils sont négligeables, et une zone de sillage, située en aval de la topographie, dans laquelle la

turbulence est importante. Si la pente ou la rugosité augmente fortement, une zone de recirculation se forme au pied du versant au vent et modifie les valeurs des vitesses. Pour certaines valeurs critiques du rapport H/L, l'écoulement décolle immédiatement après le sommet puis se recolle en aval. La structure de l'écoulement dans la poche de découlement est très complexe et influence l'ensemble des caractéristiques du vent. Enfin, notons qu'il est possible de faire une analogie entre l'influence d'un obstacle topographique sur la structure locale du vent et celle, à plus grande échelle, d'un relief sur la structure des grosses masses d'air.

I.11. Influence d'un obstacle isolé

Dans la couche limite atmosphérique, la vitesse et la trajectoire du vent sont localement perturbées par la présence d'obstacles isolés (constructions, haies, etc...) qui obligent le vent à les contourner. D'après l'analyse d'écoulements autour d'obstacles placés en soufflerie, il apparaît que les modifications apportées à la structure du vent dépendent :

– de la géométrie et des dimensions de l'obstacle,
– de son état de surface,
– des caractéristiques du vent incident,
– de l'environnement proche.
Nous verrons, dans le prochain paragraphe, que ces paramètres déterminent également les efforts aérodynamiques exercés sur l'obstacle.

- Si le corps est profilé (ce qui est rarement le cas), le comportement de l'écoulement, au voisinage de l'obstacle, est lié au développement d'une couche limite visqueuse sur ses parois. Cette zone, à ne pas confondre avec la couche limite atmosphérique, est une mince couche de fluide dans laquelle existe un fort gradient de vitesse, un cisaillement élevé, et qui permet à la vitesse de s'annuler sur les parois de l'obstacle. Sous certaines conditions, liées à l'intensité de la turbulence et aux caractéristiques des parois, la couche limite peut se décoller et éventuellement se recoller en aval. Dans ce cas, le décollement reste confiné dans une poche plus ou moins grande de fluide. Si elle reste décollée, elle donne naissance à un sillage, délimité par des couches de cisaillement, dans lequel la vitesse moyenne diminue et la turbulence augmente (turbulence de sillage ou d'obstacle).
- Si le corps n'est pas profilé (bluff-body), l'écoulement décolle artificiellement au niveau des arêtes vives. Comme précédemment, lorsqu'il n'y pas de rattachement, on observe

un sillage ouvert et des zones de cisaillement dans lesquelles le sillage se mêle à l'écoulement incident non perturbé.

Pour illustrer la complexité des écoulements autour d'obstacles isolés, nous avons schématisé,

Sur la figure (I.2), un écoulement autour d'un bâtiment de forme cubique. Cet écoulement tridimensionnel a été étudié numériquement par [88].

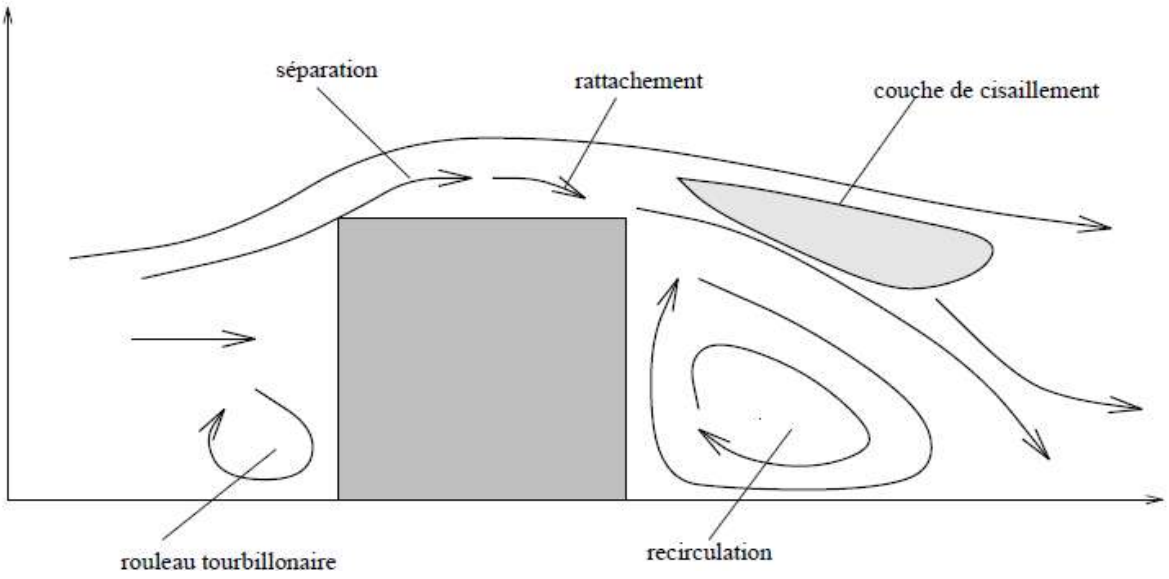


FIG. I.2 : Coupe verticale d'un écoulement autour d'un obstacle

I.12. Revue Bibliographique et Etat de l'art 1

Ana Pilar et al. (2002) En menant d'étude expérimentale et numérique sur la dispersion de polluant dans une rue canyon 2D. L'étude expérimentale on été effectuée dans une soufflerie et l'étude numérique ont été réalisée à l'aide du logiciel CFD Fluent avec un modèle k-ε. La simulation numérique est effectuée selon les paramètres de nombre de Reynolds R=5100, la hauteur de bâtiment H, la vitesse de l'écoulement libre et le taux d'expansion de 1/20. Les résultats obtenus indiquent que l'écart entre les deux solutions ne pas dépasser 1%. Les résultats numérique et expérimentale montrent un comportement non-uniforme et instable dans la distribution des pollutions.

Bouterra et al. (2003) ont présenté une étude numérique bidimensionnelle de la dispersion d'un polluant autour d'un obstacle soumis à un écoulement turbulent. Cette étude à été effectuée par la technique de simulation de grosses structures LES. Ce travail contient deux études : le premier cas étudie la dispersion du polluant ayant la même densité que l'air ambiant et le deuxième cas étudie l'effet de la stratification thermique sur les mécanismes de dispersion du polluant. Les évolutions spatio-temporelles des champs de vitesse, de température et de concentration sont régies par l'équation de Navier Stokes (RANS). Les équations de conservation de l'énergie et de diffusion ont été résolues pour un écoulement turbulent instationnaire et incompressible. La résolution des équations est réalisée par la méthode de prédiction-projection pour découpler le calcul de vitesse et de pression. Les résultats montrent dans le cas isotherme, le champ moyen caractérisé par la présence des zones de recirculation et par la turbulence générée par le cisaillement et la présence de l'obstacle est les principaux facteurs qui influent sur le transport et la dispersion du polluant. La couche de polluant émis joue un rôle de couvercle thermique. L'épaisseur de la couche faible, le volume d'air dans lequel les polluants sont dispersés l'est aussi.

Chang et Meroney (2003) étude numérique et expérimentale de l'effet de milieu urbain avec différentes distances de séparation sur des pressions de la surface sur les bâtiments de faible hauteur. A utilise une soufflerie pour l'étude expérimentale et un code commercial Fluent pour l'étude numérique.Cet étude a été appliquée sur plusieurs rangée de rue canyon les différents rapports d'aspect *(B*/*H*=0.5, 1, 2). Les résultats montrent pour le rapport d'aspect petits (*B*/*H*=0.5) une diminution de concentration et augmentation la ventilation, pour le rapport d'aspect (B/H=1) la concentration (*C*) augmente avec le nombre de rangée des bâtiments (*N*) et pour le rapport d'aspect (*B*/*H*=2) la diminution de nombre de rangée des bâtiments (*N*) augmente la concentration (*C*).

Kim et Baik (2004) testent le modèle RNG *k-ε* dans une rue canyon tridimensionnelle. Le modèle RNG *k-ε* a été utilisé pour étudier les effets de la direction du vent sur l'écoulement et la dispersion de polluant autour d'un groupe de bâtiments. Ce modèle a été appliqué sur trois types de configuration : rue canyon infinie, rue canyon longue mais de longueur finie et l'intersection entre les deux rues. Les résultats obtenus indiquent que selon la direction de vent ambiant, on trouve trois modèles de l'écoulement prouvent être classées selon les caractéristiques de la circulation du débit moyen du vent généré derrière le bâtiment.Dans le premier modèle d'écoulement: généré un vortex derrière le mur de bâtiment, le vent est symétrique autour du centre de la rue canyon, pour le deuxième modèle : lorsque l'angle de vent 45° le débit est symétrique diagonale derrière le mur de bâtiment contre le vent et pour le troisième modèle : génère un vortex est sont située derrière le mur est et nord du bâtiment.

Hang Yang et al (2007) Font une étude numérique sur l'air et la dispersion de polluant dans un milieu urbain (les bâtiments de milieu urbain sont des toits inclinées). Cette étude est basée sur la technique de CFD. La simulation des champs de vent et de concentration montrent que (*W*/*H*, *W*/*h* et *h*/*H* : avec *W* la largeur de rue et *H*, *h* sont les hauteurs des bâtiments respectivement). Ces paramètres sont des factures essentielles pour déterminer la structure de vortex et la répartition des polluants dans rue canyon. Les résultats obtenus selon les différents rapports d'aspects, pour le rapport d'aspect (*W*/*H*=0.5) on trouve deux tourbillons (un tourbillon dans le sens horaire entre la partir supérieur de toit inclinée et un tourbillon de sens antihoraire dans la partir inferieur), et les polluants s'accumulent sur le cote au vent de la rue. Tandis que le rapport d'aspect (*W*/*H*=2), trouvée une seul tourbillon dans le sens horaire et des pollutions sur le cote sous le vent, pour le rapport d'aspect *W*/*h*=1 (*h*/*H*=0.1 a 0.667) le niveau de pollution a proximité de la construction inferieur et supérieur à proximité du la plus haut construction et pour le rapport d'aspect *W*/*h*=0.1 (*h*/*H*=0.667) les propriétés de ventilation très pauvres par conséquent polluants varie fortement avec *h*/*H*.

Solazzo et al (2009) Utilisent le modèle de turbulence standard k-ε fournie par logiciel commercial Fluent pour la simulation de l'écoulement de vent et de la dispersion de polluant dans un rue canyon idéalisée. Pour améliorer la norme de performance de modèle de fermeture *k-ε* on modifier les paramètres du modèle en fonction de forme choisie desprofiles de vitesse d'entrée *u*(z), énergie cinétique de turbulente *k*(z) et le taux de dissipation de l'énergie *ε*(z). Les résultats obtenus (champs de vitesse, turbulences, et de concentration) sont comparées par des résultats donnés par de soufflerie. Les résultats on montre que la modification des profile d'entrée pour la vitesse, l'énergie cinétique, dissipation et la

concentration peut produire sensiblement améliorée dans la rue canyon. On trouve aussi certaines divergences entre les résultats de CFD et les résultats expérimentaux.

Tominaga et Stathopoulas (2012) En comparant des mesures en soufflerie avec des simulations numériques par un code CFD (ComputationalFluid Dynamics) sur la dispersion des polluants autour des bâtiments avec une source ponctuelle sont située entre des bâtiments centraux. On utilise pour cette étude deux approches de modélisation, une approche RANS avec un modèle de fermeture RNG k-ε et la deuxième approche un modèle de LES pour étudier l'influence des champs de vitesse (u) et de concentration (C).

Salim et al (2011) comparaison dans la prédiction du flux d'air et la d dispersion des polluant dans milieu urbain par trois différents techniques numériques RANS, URANS et LES. Le code CFD sont évalues par rapport aux donnée expérimentales en soufflerie. Les résultats obtenus dans le cas de modèle de turbulence LES plus précis et fiables, car il résout le processus de mélange turbulent dans le champ d'écoulement. Mais le modèle de turbulence URANS bien que la résolution de solution transitoire, ne parvient pas expliques les fluctuations instable et n'est pas un remplacement approprié pour LES.

Yongfeng et al. (2012) Etude numérique des effets thermiques des bâtiments 3D sur l'écoulement atmosphérique locale couplée avec un modèle dynamique radiative. Les résultats on été discuté de l'impact du flux de chaleur sur les températures des surfaces des bâtiments et on compare les champs de vent et de température avec des résultats de milieu urbainMock (MUST) données par expériences. Dans ce travail on trouve une autre étude démontré la capacité de notre modèle radiatif pour simuler l'effet thermique des bâtiments sur l'écoulement atmosphérique local dans des conditions de vitesse de vent faible. Les différentes simulations numériques dans la construction (MUST) sont présentes pour une vitesse de vent faible et la densité plus élevée. Les résultats ont montré que la stratification thermique a une influence significative sur le champ de vent, et outre, avec le modèle 3D radiatif, la température et le mouvement vertical montrent une sensibilité importante dans les variations des paramètres physiques des surfaces du mur tel que l'albédo extérieur.

Pillai et al. (2012) Etude numérique et expérimentale de l'effet de coefficient de transfert de chaleur par convection (CHTC) à partir des différentes configurations de la canopée urbain. La simulation numérique validée par des expériences en soufflerie. Les résultats de calculs CFD pour les profiles de vitesse et de température a partir d'une canopée urbain a montre un bon accord avec les résultats expérimentaux. Le flux de chaleur par

convection sur les surfaces des canopées diminue avec l'augmentation (BCR). Le coefficient de transfert de chaleur par convection (CHTC) varie de façon significative pour les surfaces des constructions différentes.

Xie et al. (2005) Ont étudié l'impact du rayonnement solaire sur la dispersion des polluants dans différentes configurations des rues urbains par la technique dynamique des fluides computationnelles CFD. L'influence relative du rayonnement thermique peut être estimée par le paramètre (Gr/Re^2). La géométrie de la rue canyon indiquée a une forte influence sur le champ de vent et les modèles de dispersion des polluants. Une concentration plus élève apparait du coté du vent, et les niveaux de pollution dans le secteur de gorge augmentent. En outre, on a constaté que le chauffage des surfaces mène à une forteforcede flottabilité prés des surfaces qui reçoivent le rayonnement solaire direct. Le flux de flottabilité vers le haut divise la structure de l'écoulement en deux cellules contre-rotation a une configuration symétrique ou un petit tourbillon dans le coin inferieur du bâtiment. Cet effet provoque une augmentation de concentration des polluants dans la rue canyon. Si le soleil brille sur le coté sou le vent du bâtiment, le tourbillon supérieur est élongée et les concentrations des rues canyons augmentées. Cet écoulement thermiquement induit est combiné avec l'écoulement mécaniquement induit, et affecte le champ et la dissipation de l'écoulement des polluants.

Kim et Baik. (2001) Ont présente une étude numérique et expérimentale dans une rue canyon 2D avec la paroi bas chaude. Pour l'étude numérique on utilise le modèle de fermeture de turbulence $k-\varepsilon$. Le rapport d'aspect de la rue (*H*, *D* sont la hauteur du bâtiment et la largeur entre deux bâtiments) et la différence de température initiale entre la paroi bas de la rue canyon et l'air $(\Delta\theta)$ varie entre (0 a 16 *K*). Cette étude a été appliquée sur cinq régimes d'écoulement : régime (I) avec deux flux contre-tourbillons en rotation, régime (II) avec un écoulement tortionnaire thermique renforcée et un vortex induit thermiquement faible, régime (IV) avec un écoulement vertical, régime (V) écoulement avec deux tourbillons tournant en sens inverse dans la couche inferieur et un vortex mécanique induit supérieur. Les résultats ont indiqué que le chauffage thermique joue un roule important dans la détermination des champs d'écoulement dans les canyons urbains. Le mouvement vers le haut induite par la force de flottabilité peut soit renforcer ou d'affaiblie le vortex et modifier la structure tourbillonnaire.

Xie et al. (2006) Ont étudie les effets du rayonnement solaire (sous la forme de chauffage au niveau du sol) sur le taux d'échange d'air (ARE) dans une rue canyon 2D

idéalisée a l'aide de la technique de calcul dynamique des fluides computationnelles CFD. L'étude numérique basée sur les trois modèles de turbulence $(RNG)k-\varepsilon$, $k-\varepsilon$ réalisable et le modèle $k-\varepsilon$ standard. Le test basé sur le rapport d'aspect à montre que l'existence d'une force de flottabilité sensiblement effectué sur le flux d'air (ARE), en particulier dans des conditions de vent calme. Les résultats numériques montrent que les différents modèles de turbulence a donnée des résultats comparables de mouvements de l'air et de la structure de flux d'air. Et on montre que CFD une force dynamique à été générée à proximité du sol par le rayonnement solaire. Le taux d'échange d'air (ARE) a augmente avec l'intensité de chauffage augmente, mais diminue avec le nombre de Reynolds augmente.

Cai et al. (2008) Cette étude applique une simulation numérique sur le modèle de la turbulence de grande échelle LES dans un canyon urbain pour déterminer le champ de vent, la turbulence, concentration et la fluctuation de concentration. Le vent a un angle droit par rapport a l'axe du canyon et l'émission est spécifié sous la forme d'une source en ligne avec un taux d'émission constant sur la rue/ou la surface du bâtiment. Les résultats numérique on été compares avec des expériences en soufflerie. Les simulations numérique ont été réalisé pour différents rapports d'aspect de la rue canyon (H/W =1/3, 1/2, 2/3, 1/1, 3/2) ou H est la hauteur du bâtiment et W est la longueur de la rue. Le modèle LES donnée des résultats assez bien avec celles des données de soufflerie. Les résultats de modèle LES montrent que $(\overline{C}_D)$ est insensible a l'emplacement de l'émission (l'émission en milieu a gauche ver la droit) mais $(\overline{C}_U)$ est très sensible, en particulier dans les petites hauteurs.

Defreay et al. (2010) Analyse par CFD le transfert de chaleur par convection forcée sur les surfaces d'un cube immergé dans couche limite turbulente. Deux configurations spécifiques sont analyses. Tout d'abord, un cube placé dans le canal d'écoulement turbulent a un nombre de Reynolds de (Re=4.6×10^3). Les résultats numériques sont comparés avec des mesures en soufflerie. Les résultats sont obtenus pour deux modèles de turbulence $k-\varepsilon$ standard et $SST\,k-\omega$ avec la modalisation à faible nombre de Reynolds (LRNM) montrent un accord satisfaisant avec les données expérimentales. D'autre part un cube exposé a haut nombre de Reynolds (ABL). Le paramètre sans dimension (y^*), qui prend en compte la turbulence, est trouvé pour être plus appropriée, pour l'évolution du transfert de chaleur de l'écoulement utilisée de valeur (y^+). La fonction standard murale qui est fréquemment utilisée pour l'écoulement a nombre de Reynolds élavée. La distribution de la corrélation (CHTC-U_{10}) sur la surface au vent est reportée pour des nombre de Reynolds de 3.5×10^4 ou

3.5×10^6basé sur la hauteur de cube, (U_{10}) et la vitesse dans l'écoulement non perturbé à une hauteur de 10m.

Baratian et Kaye (2013). Ont étudié expérimentalement l'effet de rapport d'aspect sur la dispersion des polluants à partir d'un canyon urbain par un débordement turbulent. Les études expérimentales a effectue sur quatre séries d'expériences selon les différents rapports d'aspects (η=0.45, 0.75, 1, 2) pour une gamme de nombre de Richardson *Ri*. Les résultats montrent que l'augmentation du nombre de Richardson *Ri* et la diminution du rapport d'aspect donnée lieu a une stratification de plus en plus forte au sein de canyon urbain et piégeage fois plus de temps pour les polluants (stratifications plus stables). Ceci indique que la profondeur de la déformation initiale augmente avec l'augmentation de η. Pour un large canyon limite la taille et la force de vortex. Pour tous les rapports d'aspect, la concentration est plus élevée prés du mur, en raison de la turbulence dans le sens antihoraire situé sur la côte en aval du canyon.

Mohamed F. Yassin (2011). Ontétudie l'impact de la hauteur et la forme de construction de toit sur la qualité de l'air dans un rue de canyon urbain par la technique de dynamique des fluides computationnels CFD. La dispersion des polluants gazeux ont été analysée par le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ standard qui à été résolu numériquement sur la base de Reynolds moyenne Navier-Stocks (RANS). Le champ de diffusion dans les canyons urbains ont été examinée avec trois hauteurs (Z_H/H =0.17, 0.33, 0.5) et cinq formes des toits : (1) en forme de toit plat, (2) forme de toit inclinée, (3) vent en forme de coin de toit, (4) contre le vent en forme de coin de toit, (5) forme de toit trapézoïdale. Le modèle numérique à été validé et assez bon accord avec les résultats en soufflerie. Les résultats obtenus indiquent que la concentration des polluants augmente lorsque la hauteur du toit diminue. Elle a également diminue avec les toits en pente et en forme de trapézoïdale, mais augmente avec le toit en forme plat. Les distributions de concentration de polluant simulée dans le présent travail, a indique que la variabilité des formes des toits et des hauteurs des bâtiments sont des facteurs importants pour estimer la qualité de l'air dans les canyons urbains. La concentration des polluants pour le vent en forme de coin du toit pour (Z_H/H=0.17) au mur sous le vent dans le canyon urbain est plus élevée que celui du vent. La plus forte concentration des polluants pour le vent en forme de coin du toit observée pour (Z_H/H=0.33). Les concentrations des polluants pour le toit en forme de trapézoïdale sous trouvent être plus élèves que celui sous le vent des hauteurs de toit différentes. La plus faible concentration des polluants pour le toit en

forme de trapézoïdale pour (Z_H/H=0.5) alors que la plus forte concentration de polluants pour (Z_H/H=0.17).

Jeong et Andrews (2002). Application du modèle de turbulence $k-\varepsilon$ dans le champ de nombre de Reynolds a haut débit dans une rue urbain. Le champ d'écoulement est rapporté qui comprend la structure du champ d'écoulement moyenne. Les grands valeurs de l'énergie cinétique sous trouve dans la partie sous le vent. Ce modèle est à peu prés semblable dans les trois cas, mais que le rapport d'aspect diminue.

Yakhot et al. (2006) Simulations numériques directs DNS ont été effectuées sur l'écoulement autour d'un cube mural dans un canal d'écoulement pleinement développée pour un nombre de Reynolds *Re*=5610 basée sur la vitesse apparente et de la hauteur du canal. Les résultats confirment l'instabilité de l'écoulement causée par l'interaction d'un vortex en face du cube et sur ses deux faces avec un vortex derrière le cube. Pour le modèle de turbulence DNS, les zones de recirculation et les caractéristiques de vortex ont été jugée en bon accord avec les résultats expérimentaux.

Xie et al. (2007) Ont étudie l'impact des façades du bâtiment et le chauffage au sol sur l'écoulement du vent et la dispersion des polluants dans la rue canyon à l'aide de la technique de dynamique des fluides computationnelles CFD pour des différents rapport d'aspect (H/W =1, 2, 0.5 , 0.1). Le chauffage de différentes surfaces du bâtiment, et la surface du sol et de construction des façades pose des effets considérablement sur la circulation du vent dans la rue canyon et le transport des polluants par apport à ceux dans la condition isotherme. Deux tourbillons tournant en sens inverse on été calculées dans la rue canyon pour un rapport d'aspect (H/W=1) dans la quel la zone de concentration des polluants ultérieur dans des conditions isotherme. Dans le rapport d'aspect (H/W=2) la configuration de vent de recirculation à été perturbée par un chauffage de surface qui conduit l'élaboration de vortex primaire ou trois tourbillons étroitement couples. Deux tourbillons seul ont été développées a l'intérieur du rue canyon pour (H/W=0.5) et pour (H/W=0.1), un vortex isolé dans le sens horaire a été développée à coté du bâtiment sous le vent.

Xiang et al. (2005). Développement le modèle de la turbulence $k-\varepsilon$ pour la détermination du taux de change de l'air pour un canyon urbain. Le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ à été appliquée pour des différents rapports d'aspects (H/W=0.5, 1, 2) ce modèle a été validé par rapport à la modélisation des (simulations des grands échelles LES et (RNG) $k-\varepsilon$) et les résultats en soufflerie. Les vitesses moyennes et l'intensité de la turbulence calculée par

le modèle $k-\varepsilon$ sont en bon accord avec les résultats en soufflerie disponible dans la littérature (**Lieu et al., 2004**. **Jeong** and **Andrews, 2002.Baik et al., 2000**). Les résultats indiquent que le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ est sont efficace et plus rapide que celle de modèle LES.

Chan et al. (2002). Validation d'un modèle 2D la dispersion des polluants dans un rue canyon isolé. Le modèle numérique base sur le nombre de Reynolds moyennée de Navier-stocks couplée à une série de renormalisation groupe (RNG) et de modèle de turbulence *k*-*ε*. Le développement de la dispersion des polluants dans une rue de canyon isolé en utilisant le code FLUENT. La validation du modèle numérique à été évaluée à l'aide de données expérimentales obtenues a partir de la soufflerie. Les calcules et les mesurées des concentrations de polluant ont sans dimension à été montrée pour être moins dépondant de la variation de la vitesse du vent et la force de source pour un rapport d'aspect (*B*/*H*=1). Les résultats montre que la configuration de rue canyon a une influence significative sur la dispersion des polluants. La rue canyon plus large et plus faible hauteur du bâtiment sont favorables à la dilution des polluants dans le canyon urbain.

Uehara et al. (2000). Ont étudié l'effet de la stratification thermique sur l'écoulement du vent dans la rue canyon a l'aide de soufflerie pour des différents gradients de température. Ils ont constaté que les tourbillons provoqués dans la cavité du canyon urbain tend être faible quand la stratification de la température est stable et fort quand instable. Des conditions atmosphérique conduit a un effet de rétroaction positive dans la quelle la vitesse du vent vers le bas dans du rue canyon affaibli en raison de la flottabilité, ce qui facilité la formation d'une stratification plus grand stabilité.

Sini et al. (1996). Utilisé un modèle de turbulence *k*-*ε* standard pour étudier la dispersion des polluants et des effets thermiques dans un rue canyon (2D). Il a été constaté que le chauffage au sol ou façade du bâtiment sous le vent augmente la recirculation d'écoulement dans la rue canyon.

Bouterra et al. (2008).Ontétudie numériquement la dispersion d'une polluant autour d'un obstacle soumis à un écoulement turbulent perturbé. Dans ce travail, on détermine en premier lieu, la structure dynamique de la dispersion de polluant. La dispersion de polluant est exclusivement tributaire des mouvements turbulents présents, le mécanisme dominant de la dispersion étant la convection. Dans la deuxième partie on étudie, l'effet d'une perturbation périodique sur la structure dynamique de la dispersion de polluant et ses différents paramètres. Les résultats obtenus, révèlent l'existence d'une valeur de fréquence optimale en termes de réduction de la longueur de rattachement et de la fréquence de

d'détachement tourbillonnaire. Ces résultats montrent également, le développement d'une importance activité tourbillonnaire par rapport au cas non perturbé est son influence sur la dispersion de polluant.

Cheng et al. (2011). La simulation des grandes échelles (LES) est utilisée pour étudier l'effet de la stratification thermique sur l'écoulement et la dispersion des polluants dans un canyon urbain (2D). Le modèle de turbulence (LES) a été appliquée avec une stratification thermique pour des différents valeurs de nombre de Richardson (*Rb*=-0.11, -0.06, 0, 0.18 et 0.35). Les stratifications thermiques ils sont simulés à l'aide de chauffage au niveau du sol dans la condition stable et instable. Les sources des polluants sont des concentrations constantes sur les surfaces de la rue canyon. Les résultats montrant dans le cas des conditions instables, une suppression de forte turbulence au niveau du sol et observé une turbulence légèrement renforcée au niveau des régions de bas et supérieur par rapport à celle dans la condition neutre. Une accumulation grave des polluants au niveau du sol de la rue canyon et illustré dans les conditions stables en raison de la réduction locale de débit moyen et des turbulences. Dans les conditions instables et neutres, le polluant est bien mélangé dans la rue canyon, dont la concentration assez uniforme. Avec accroitre la stabilité, le temps τ de rétention des polluants augmente significativement avec l'augmentation de nombre de Richardson *Rb*.

Yang et al. (2008). Ontétudie par une dynamique des fluides computationnelles (CFD) le champ de l'écoulement et les caractéristiques de dispersion des polluants dans un canyon urbain 2D et 3D, ainsi que d'un véritable canyon (centrale de Hong Kong). La simulation des modèles 2D et 3D sont utilisées pour soutenir le développement d'un système de paramétrage pour le transfert scalaire. Le flux calculés par le modèle CFD pour le cas 2D se trouve en bon accord avec les estimations de la méthode de paramétrisation et des données de soufflerie. Le comportement de l'écoulement et de répartition de la pollution dans le canyon 3D sont beaucoup plus complexes. Le modèle d'écoulement au centre de Hong Kong est extrêmement complexe en raison de répartition irrégulière des bâtiments. En général, le vent dans le canal des régimes est forte ce qui porte des polluants en aval des zones urbaines et le vent est faible dans les régimes d'écoulements, où les polluant s'accumulent. La moyenne horizontalement dans l'espace, les profiles sont bien comportés, la vitesse d'écoulement augmente avec la hauteur et la concentration diminue.

Olivera et al. (2006). Une dynamique des fluides computationnelle (CFD) utilisant le modèle de turbulence *k-ε*à été appliquée pour simules les dispersions de l'hydrogène et du méthane autour d'un bâtiment cubique. Les spectres de dispersions calculées montrent un

potentiel plus grand risque d'hydrogène par rapport au méthane lorsque est libéré dans le voisinage d'un bâtiment. Les résultats montrent aussi les interactions complexes des modèles de dispersion d'hydrogène en raison de forte force de flottabilité.

Lakehal. D. (1998). L'application du modèle de turbulence *k*-*ε* a s'écouler sur un immeuble situé en sous-couches de rugosité différents avec une composante de vitesse de courant principal à des angles différents. Les distributions de pression sont compares à des mesures en soufflerie. L'effet des caractéristiques de l'écoulement turbulent en sens inverse sur la répartition de pression est indiqué il a été décrit par la simulation de sous-couches des différentes rugosités. Les différents résultats suggèrent que seule la répartition de pression de base est sérieusement effectuée par l'intensité de la turbulence et de la rugosité de la surface. Ces deux paramètres sont jugés d'une importance majeure dans la production exacte d'une couche limite naturelle. En outre, les calculs ont montré que le champ d'écoulement est très sensible à la spécification des conditions d'entrée pour le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente. Enfin et compte tenu des résultats différents, il apparait que la procédure adopté dans notre cas, peut être utilisé pour simuler de réaliste les effets induit par la pression d'un écoulement turbulent sur un modèle du bâtiment comparable, placé dans une couche limite naturelle.

Louriero et al. (2008). Leprésent travail procède a une comparaison détaillée entre les calculs numériques avec six modèles de turbulence (*k*-ε, RNG *k*-ε, *k*-ω, SST *k*-ω) et deux modèles instants (SSG-RSM-ε, BSL-RSM-ω) et les données de laboratoire pour l'écoulement autour d'une colline a deux dimensions 2D. Les expériences ont été effectuée dans canal a d'eau et ont été spécialement prévus de tell sorte que la zone d'écoulement à grand séparation qui est formée sur le couté sous le vent de la colline pourrait être bien examinées. Le modèle de base ω-équation ont été observés beaucoup plus performants que le modèle de base ε-équation. Les propriétés de la turbulence dans la zone d'écoulement inversé étaient les meilleurs simulés par le modèle BSL-RSM.

Cheng et al. (2008). Propose le modèle de turbulence *k*-*ε* par la modification de la fonction d'amortissement de viscosité turbulente qui intègre l'effet de proximité dans le mur prés de la zone de paroi et l'effet non-équilibre du mur ainsi que les fonctions des modèles simple ε-équation. Le modèle de turbulence proposée et validée avec les données expérimentales disponibles de longueur de rattachement, la distribution de vitesse longitudinale, le profile d'intensité de turbulence et le coefficient de pression statique. Les

résultats calcules montrent que la longueur de rattachement (zone de recirculation) et la pression statique sont réduits avec une vitesse d'entrée augmente.

Lateb et al. (2013). Ontétudie la dispersion des polluants dans une configuration a deux bâtiments en utilisant différents modèles de turbulence RANS (*k-ε* standard, *k-ε* réalisable et RNG *k-ε*) à fin de déterminer le meilleur modèle de turbulence à reproduire la dispersion de panache polluant, lorsque les résultats numérique ont été comparés au vent expérience tunnel, il a été constaté que le modèle du turbulence *k-ε* réalisable donnée le meilleur accord avec les résultats en soufflerie pour le plus faible hauteur de la empiler, tandis que pour la hauteur maximale de empiler le modèle de turbulence RNG *k-ε* fournie un grand concordance avec les résultats expérimentaux. Le modèle de turbulence *k-ε* réalisable était le seul modèle capable de fournier la bonne tendance pour la distribution de la concentration dans la région inferieure entre les deux bâtiments, mais aucun modèle de turbulence observée dans la région supérieur. La modèle de turbulence *k-ε*à été généralement jugée insuffisant pour la reproduction de distribution de la concentration verticale.

Gousseau et al. (2012). Dans la présente étude, ont été utilise le modèle de turbulence de grand échelle LES pour étudier le mécanisme de transport de masse turbulent dans le cas de dispersion de gaz autour dans une bâtiment cubique isolé. La simulation numérique donnée un très bonne accord avec les mesures en soufflerie. Les grandes structures tourbillonnaires développements autour du bâtiment sont présentes à jouer un roule essentiel dans le transport de masse turbulent.

Santos al. (2009). Ont étudié l'écoulement atmosphérique et la dispersion des polluants dans les environs du bâtiment isolée dans des conditions de stabilité différents. Le modèle mathématique utilisé est basé sur la solution des équations de conservation de masse, quantité de mouvement et l'équation de l'énergie cinétique avec l'utilisation d'un modèle de turbulence non-standard *k-ε*. Les modifications proposées dans le modèle de turbulence *k-ε* sont inclusions de la correction de Kato et Launder dans la production de l'énergie cinétique turbulente et l'utilisation d'une fonction de paroi modifiée. Les résultats sont présentés sur les simulations numériques des dispersions autour dans un obstacle cubique dans les conditions atmosphériques stables ou instables. Les donnée expérimentales de soufflerie est sont utilisés pour valider les résultats numériques. Les résultats des simulations numériques montrent un niveau raisonnable d'accord avec les données de terrain et le vent de concentration du tunnel.

Kim et al. (2001). Etude numérique un modèle bidimensionnel 2D avec un fermenteur de turbulence *k-ε* et un système de maillage non-uniforme pour examiner l'effet d'une seul colline et/ou deux bâtiments sur l'écoulement et la dispersion des polluants. Dans une configuration à une seule colline, la pente de la colline est un facteur important pour déterminer l'existence d'une zone de recirculation derrière la colline. Lorsque la pente de la colline augmente, la zone de recirculation devient large. Lorsqu'il existe a la fois une colline unique et deux bâtiments, la vitesse verticale a la hauteur du sommet du canyon devient négligeable.

Tominage et al. (2009). Précision de la prédiction de l'écoulement et la dispersion de polluant autour d'un bâtiment cubique à l'aide des différents modèles de turbulence *k-ε*, et les résultats numériques ont été comparés avec les données de soufflerie. Cette étude a été comparée par quatre types de modèle de turbulence, *k-ε* standard, RNG *k-ε*, *k-ε* réalisable et *k-ε* modifié par Kato et Launder. Les résultats montrent que le modèle *k-ε* fournie des résultats insuffisants pour le champ de concentration, parce qu'ils ne prouvent pas reproduire la structure de l'écoulement de base, tel que l'écoulement inverse sur le toit. L'effet d'un angle de vent oblique et l'emplacement de ventilation sur la précision de la prédiction à été étudiée. Il à été confirme que la précision de la prédiction du champ de vitesse fortement influence celle du champ de concentration. Le modèle RNG *k-ε* a montré un accord avec l'expérience et à été meilleur des modèles de turbulence testés. Les concentrations prédites par le modèle CFD étaient moins diffusif que ceux l'expérience.

Murakami et al. (1990). Les modèles de turbulence *k-ε* est de grandes échelles LES sont utilises pour produire le champ d'écoulement autour dans un cube 3D. La comparaison des résultats de modèle de turbulence *k-ε* avec ceux d'un essai en soufflerie révèle plusieurs différents implorantes et les résultats de modèle LES concordent assez bien avec les donnés expérimentales. L'imprécision principale du modèle *k-ε* est sa surestimation de la valeur de l'énergie cinétique *k* et de son sous-estimation de la valeur de la composante latérale de la contrainte normale $u_2^{'}u_2^{'}$ dans la zone de recirculation derrière le modèle.

Zhang. (1994). Le modèle de turbulence *k-ε* et utilisé pour simuler les écoulements turbulents autour d'un obstacle. Les termes d'advections sont discrétisées par la méthode de la différence pondérées prés, le problème de pression statique est résolue par la méthode de compressibilité artificielle. Les résultats montrent que le modèle de turbulence *k-ε* peut être donner une bonne prédiction des vitesses moyennes et le champ de pression statique.

Paterson. (1990). Considère l'écoulement autour d'une cube placée dans une couche limite turbulent. L'écoulement est considéré comme incompressible et perpendiculairement a la direction d'écoulement d'approche. Cet écoulement est simulé par la solution de l'équation de Reynolds et l'équation de continuité à l'aide de modèle de turbulence *k*-*ε*. Les résultats des simulations numériques sont comparés à des mesures expérimentales. Les résultats montrent un très bon niveau de concordance est obtenue pour des pressions moyennes et des vitesses dans le voisinage du cube. Et d'un accord adéquat est obtenue pour des fluctuations des vitesses. La zone de recirculation a l'arrière du cube est caractérisé par un tourbillon vers la haut autour d'un axe qui est à peu prés parallèle à la face arrière du cube et inclinée a 25° avec l'axe verticale. La zone de recirculation latérale est grande dans la partie inferieur du cube et la plus petit dans la partie supérieur, et on observe une légère turbulence vers l'extérieur.

Evola et al. (2006).L'équation de Reynolds moyenne-Navier Stockes (RANS) est appliquée sur la ventilation naturelle entrainée dans un bâtiment cubique. La vitesse de vent, la distribution de la pression à l'intérieur et le débit de ventilation sont déterminées pour les trois configurations différentes : ventilation transversale, ventilation simple avec une ouverture sur la paroi exposée au vent et une ventilation simple avec une ouverture sur la paroi sous le vent. Les résultats numériques sont compares avec les données expérimentales. Les résultats montrant un bon accord pour le modèle de turbulence RNG. La différence dans la détermination de la vitesse de ventilation est raisonnable et la distribution de l'écoulement à l'intérieur du bâtiment est bien d'écrit lorsque le modèle de turbulence RNG est utilisé. Le modèle de turbulence *k*-*ε* ne parvient pas à déterminer les composantes de vitesse correcte a proximité des surfaces horizontales. Selon ces résultats le modèle de turbulence RNG peut être considère comme un utile pour l'étude de la ventilation naturelle entrainée par le vent, en particulier pour l'évaluation du taux de ventilation da l'air dans un bâtiment.

Ratnam et al. (2008). Ontétudie la performance des modèles de turbulence pour prédire l'écoulement et de transfert de chaleur sur un mur de cube. Le nombre de Reynolds est considère *Re*=1870. Les calculs sont effectuesa l'aide de cinq modèles des turbulences:*k*-*ε* standard, *k*-*ε* à faible nombre de Reynolds, *k*-*ε* non-linéaire, *k*-ω standard et l'amélioration de modèle *k*-ω pour résoudre le problème de fermeture. Les résultats montré que le modèle amélioré *k*-ω il donne un meilleur accord avec l'étude expérimentale. Le modèle *k*-ε non-linéaire il donne une meilleure prédiction par rapport le modèle de turbulence *k*-*ε*à faible nombre de Reynolds et *k*-*ε* standard. La structure complexe de vortex autour du cube entraine

une grande variation dans le coefficient de transfert de chaleur locale. La valeur maximale du coefficient de transfert de chaleur est survenue dans la proximité des points de rattachement et la valeur minimum dans la zone de recirculation.

Sedighi et al. (2006). Etudenumérique de l'écoulement turbulent autour d'un cube placée sur un canal par la simulation des grandes échelles LES. Les études ont été réalises pour les écoulements avec le nombre de Reynolds varie entre 1000 à 40000. Pour évaluer les résultats du calcul.les données ont été comparées avec les données des mesures à *Re*=40000, et montrant un accord raisonnable. Dans cette étude, l'effet de nombre de Reynolds sur les caractéristiques de l'écoulement, tourbillon instantanée et l'intensité de turbulent ont été étudies. Les résultats des calculs montrent que l'augmentation de nombre de Reynolds et l'intensité de turbulente le centre de tourbillon augmente.

Murakami et al. (1988). Dans cette étude, une simulation numérique tridimensionnelle (3D) de l'écoulement d'air autour d'un cube avec le modèle de turbulence *k*-*ε*. La simulation numérique de l'écoulement d'air autour d'une modèle cubique ont été étudie en vue d'estimer l'influence d'un système de division de maille et des conditions aux limites sur les résultats simules. Les résultats numériques sont compares avec des expériences en soufflerie. Les résultats confirment que la simulation numérique à l'aide du modèle de turbulence *k*-*ε* reproduit fidèlement les champs de vitesse et de pression avec une résolution à maille fine autour d'un obstacle.

Vardoulaskis et al. (2011). Etude de comparaison à été effectuée a fin d'évaluer la capacité des quatre modèles RAMS CFD (CHENSI, MIMO, VADIS et Fluent) pour simuler l'écoulement du vent et de la turbulence autour d'un seul bloc isolée avec l'utilisation de système de fermeture de turbulence *k*-*ε*. En particulier, les quatre modèles surestimaient l'énergie cinétique turbulente générée dans la zone d'impact prés du mur au vent de cube. Les résultats montrant que le modèle de CHENSI, MIMO et Fluent surestimé la longueur de la zone de recirculation sur le coté sous le vent de cube, tandis que VADIS sous prédit légèrement cette longueur. Ces résultats indiquent un comportement généralement conformes des modèles, malgré certain écart observée entre les modèles sont dues a différentes implémentations des fonctions de mur pour le traitement prés de la paroi.

Shmidit et al. (2002). Etude numérique sur l'application des modèles de turbulence DNS, LES et RANS pour un écoulement instable autour d'un obstacle carré tridimensionnel (3D). Le principale objectif de cette étude était d'évaluer la performance de modèles de

turbulence DNS par rapport les modèles LES et RANS sur un maillage grossier. Le cas considéré est l'écoulement turbulent a un nombre de Reynolds Re=1.3×10^4. Les résultats démontrent que le modèle de turbulence DNS est capable de capturer les modèles d'écoulement les plus dominants, tandis que les modèle de turbulence LES et RANS ne donne qu'une seul faible représentation des phénomènes d'écoulement transitoires.

Shao et al. (2012). Une analyse systématique a été effectuée pour évaluer les performances des différents modelés des turbulences k-ε non linéaires pour prédire l'écoulement du vent autour d'un bâtiment dans une couche limite turbulente. Dans cette étude les trois modèles non linéaires pouvant reproduire un vortex derrière le bâtiment pendant les calculs instables. Le modèle non linéaire Craft k-ε surestimé légèrement la longueur de rattachement sur le toit du bâtiment. Les deux autres modèles surestimer considérablement la longueur de rattachement derrière le bâtiment d'environ trois fois la valeur déterminée a partir de l'expérience. Les fluctuations périodiques des vitesses latérales sont clairement observées pour tous les modèles des turbulences non linéaires. Les amplitudes des fluctuations de vitesses latérales prévues par les trois modèles k-ε non linéaires sont inferieures a celle prédites par le calcul de modèle LES.

Köse et al. (2010). Une étude numérique de l'écoulement autour d'un bâtiment cubique dans une couche limite atmosphérique, le nombre de Reynolds de l'écoulement Re=4×10^6. Les différentes types des modèles de turbulence sont utilisées : RANS (l'état d'équilibre), RANS hybride/LES et LES. Les résultats de simulation sont comparés aux données de mesure sur le terraine de la distribution de pression moyenne. L'objectif est de construire une approche pour effectuer des simulations sur des maillages grossiers à faible cout de calcul. Les résultats montrant que la méthode implicite LES est la plus précise pour des simulations de maillage grossier. Les résultats montrant aussi que le nombre Reynolds Re inferieur, l'approche LES conduit à des résultats assez bons.

Sohankar. A. (2006). Simulation des grandes (LES) est effectuée pour étudier le flux d'approche uniforme sur un cylindre a section carrée avec des différents nombre de Reynolds, allant de 10^3 à 5×10^6. Deux modèles sont employés : le modèle Smagorinsky (LES) et un modèle d'une équation dynamique. Le nombre de Strouhal moyenne, RMS de portance et la traînée sont calculés pour les différents nombres de Reynolds, et ils sont comparés avec les résultats expérimentaux disponibles. Les résultats globaux montrent un bon accord avec l'expérience pour le nombre de Reynolds supérieur à 2×10^4, et le rapport entre les coefficients de la traînée moyenne et la pression d'aspiration de base est

sensiblement constante pour les différents nombres de Reynolds. Les résultats de cette étude montrant également que les points de séparation restent dans les coins en amont en tout les temps pour les différents nombres de Reynolds. En fin, alors que les structures de l'écoulement instantané à grand échelle deviennent approximativement similaire pour les différents nombres de Reynolds, mais il ya une certaine dissemblance dans la taille et la force des petites structure à des nombres de Reynolds élavées.

Fragos et al. (2012). L'écoulement turbulent bidimensionnel autour d'un obstacle rectangulaire à été étudie avec la solution directe transitoire de Navier-Stocks et de la continuité. Les résultats de la simulation et les caractéristiques de l'écoulement sont présentés pour six nombres de Reynolds ($1304 \leq Re \leq 2500$). Les résultats numériques sont comparés aux les données expérimentales est numériques disponibles d'autres chercheurs. Les contours de l'intensité de turbulence et de cisaillement ont montres des différentes valeurs maximales à tous les six nombres de Reynolds. Les valeurs maximales de la dissipation de l'énergie cinétique pour des nombres de Reynolds utilisées sont observées dans les régions de recirculation prés de l'obstacle et principalement sur le dessus de celui-ci. Les contours de la production de la turbulence ont révélé des régions avec la production de la turbulence négative, a proximité de la face avant de l'obstacle. Les résultats montrant aussi que le nombre de Reynolds augment, la valeur négative de production turbulente de ces régions augmente. La comparaison qualitative de cette étude avec les données expérimentales et numériques disponibles d'autres chercheurs ont confirmés l'exactitude de l'analyse dynamique et statistique de la turbulence.

Murizi. A. (2000). Simulation numérique de l'écoulement turbulent sur les vallées 2D pour comparer le comportement des trois versions de modèle de fermeture k-ε mis en œuvre dans le logiciel PHONICS. Les résultats numériques sont compares avec les données mesurées à partir de l'expérience en soufflerie RUSVAL. Les résultats numériques montrent un très bon accord avec les mesures expérimentales. Le modèle de turbulence RNG est généralement mieux que les autres, donnant une justification partielle des bons résultats pour l'écoulement moyen.

Jia-Song et al. (2007). Ont étudié la simulation numérique par la méthode des différences finies un écoulement visqueux incompressible basé sur la méthode Pseudo-compressibilité par un couplage de l'équation de Reynolds moyenne de Navier Stockes (RANS), l'équation de continuité, pression relative et différents modèles de turbulence k-ε. La simulation numérique de l'écoulement autour d'un obstacle carré monté au sol a été

validée à l'aide des données expérimentales de soufflerie. Les résultats montrant que les modèles de turbulence RNG et Chen-Kim*k-ε* sont beaucoup mieux de prédire les caractéristiques de la structure du tourbillon et la séparation de l'écoulement par rapport au modèle de turbulence *k-ε* Standard.

Yeung et al. (1985). Les équations modélisées de l'écoulement turbulent sont résolues numériquement pour des différentes configurations géométriques (un bloc rectangulaire, triangulaire et semi-circulaire) avec un modèle de turbulence *k-ε*. Les conditions en amont ont été délabrement choisis pour simuler une couche limite atmosphérique neutre stable. A faible nombre de Reynolds le modèle de turbulence *k-ε* a été utiliséà fin d'accommoder les effets visqueux proche de la paroi et un certain effort à été consacrée aux choix des constantes empiriques basé sur une comparaison avec des données empiriques. Les résultats montrant que les longueurs de rattachement prévus sont probablement plus courtes que dans la réalité physique.

Tian et al. (2013). Ontétudie un écoulement autour d'une cylindre rectangulairebidimensionnel (2D) pour des différents rapports d'aspect (*R*=*B*/*H*, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.1 et 0.5) avec un modèle de turbulence SST k-ω et un nombre de Reynolds *Re*=21400. L'objectif de cette étude est évaluer la validité des simulations numériques 2D URANS avec le modèle de turbulence SST k-ω pour l'écoulement autour d'un cylindre rectangulaire. Les caractéristiques hydrauliques ont été calculées et compères avec les résultats expérimentaux. Les résultats montrant pour des rapports d'aspects 0.8 et 0.6 la force de trainée C_D prédit est en bon accord avec les données expérimentales et numériques publiées, mais la force de trainée sont plus prévus pour des rapports d'aspect faible (*R*=0.4, 0.2, 0.1 et 0.5).

Iaccarnio et al. (2003). Ontétudie la simulation numérique de l'écoulement instable autour d'un cylindre carrée avec l'équation de Reynolds moyennes de Navier Stocks (RANS). Les résultats ont montre un bon accord avec les données expérimentales.

Lien et al. (2004). Les résultats ont montres que le modèle de turbulence non-linéaire k-ε, contrairement de modèle de turbulence k-ε standard, peut reproduire avec l'accord qualitative et quantitative les caractéristiques d'écoulement dans le champ d'écoulement perturbé à traverse du bâtiment. Ils estiment que l'échec de modèle de turbulence k-ε standard est un résultat de l'excès de production de l'énergie de turbulence à cause de la déformation normale.

Shmidit et al. (2002). Simulation numérique des modèles de turbulence (DNS, LES et RANS) sur l'écoulement instable autour d'un cylindre carrée. L'objectif principale de cette étude est évaluer la performance de modèle de turbulence DNS par rapport aux modèles (LES et RANS). Les résultats montrent que le modèle de turbulence DNS est capable de capture les modèles d'écoulement les plus dominantes par rapport les modèles (LES et RANS).

Garcia Sagrado et al. (2002). Ont effectué des études numériques et expérimentales de la dispersion des polluants dans un rue canyon 2D. Les résultats expérimentaux, il a été vérifié que l'augmentation de la hauteur du bâtiment en aval diminue la concentration des polluantsdans la rue. En outre, ils ont constaté que le modèle de turbulence k-ε réalisable à été trouvée le plus prédit avec précision la longueur de rattachement. Le traitement proche de la paroi et la condition de profile a l'entrée affectées sur la prédiction de l'écoulement et de la dispersion autour d'un bâtiment isolée par **Ai et Mak (2013).**Ils ont observée que l'utilisation de modèle à deux couches pour résoudre la sous-couche visqueuse prés de la paroi permet d'améliorer nettement la prédiction de l'écoulement et la disperssion.

Meroney et al. (1999).ont comparé le modèle de Reynolds Stress (RSM), k-ε Standard et RNG k-ε avec les résultats des tests en soufflerie, et a constaté que le modèle de turbulence (RSM) à produit des résultats plus réalistes que les deux autres modèles k-ε.

Aliane et al. (2006). ont étudié l'écoulement bidimensionnel autour d'un obstacle en fonction du nombre de Reynolds Re_h et du rapport sans dimension h/H (hauteur de l'obstacle/Hauteur du canal), pour deux modèles, un obstacle rectangulaire et un obstacle rectangulaire à bout arrondi. Deux régions importantes en aval de l'obstacle àété étudier : la première c'est la zone de recirculation générée en aval de l'obstacle où on étudie les dimensions des longueurs de rattachement X_R/h. La deuxième région est la deuxième zone de recirculation. Les résultats obtenus montrent que l'obstacle rectangulaire arrondi possède des longueurs de rattachement plus faibles en comparant avec celles de l'obstacle rectangulaire et cela quelque soit le rapport *h/H*, et que ces longueurs de rattachement (pour ce modèle d'obstacle) décroissent considérablement au fur et à mesure que le rapport *h/H* devient important. Si l'obstacle rectangulaire crée un changement brusque de pression en aval de l'obstacle, l'obstacle rectangulaire à bout arrondi crée une variation progressive en aval de ce modèle, ce qui permet de diminuer considérablement les dimensions des longueurs de rattachement.

Castro. (1986). s'intéresse à l'influence de la longueur de rattachement sur lacouche limite laminaire, il montre que pour $0.34 < \delta/h < 0.80$ la longueur de rattachement diminue en même temps que δ/h, δ étant l'épaisseur de la couche limite laminaire.

Iaccarino et Durbin. (2000).s'intéressent à XR/h et à la deuxième zone de recirculation dans le cas du régime non permanent et le régime permanent. Ils comparent plusieurs résultats s'appuyant sur l'expérimentation et d'autres s'appuyant sur des modèles de turbulence tels que L.E.S et R.A.N.S.

Martinuzzi et Tropea. (1993). s'intéressent à XR/h dans le cas d'un écoulement tridimensionnel autour d'obstacles, ils prennent en considération deux paramètres adimensionnels : en plus de h/H ils étudient l'influence de W/h (largeur sur hauteur de l'obstacle).

Chapitre II : Modélisation de La turbulence atmosphérique

Chapitre II : Modélisation de La turbulence atmosphérique

II.1. Introduction

La couche limite atmosphérique ne représente qu'une petite partie de l'atmosphère où la présence du sol perturbe le champ de vitesse du vent. La structure de la couche limite atmosphérique est maintenant bien comprise et une description peut en être trouvée dans différents publication [90-91].En résumé, son épaisseur, notée δ, sa hauteur étant de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres en fonction de la vitesse du vent, de la rugosité des sols, de l'ensoleillement variables suivant les lieux et l'heure de la journée, mais elle joue un rôle important dans de nombreux processus physique de la haute atmosphérique.

II.2. Modélisation de la turbulence

Dans la couche de surface urbaine, les écoulements sont fortement turbulents. La turbulence provoque la formation des nombreux tourbillons des différentes échelles de longueur [92].Plus grandes tourbillons contiennent la plupart de l'énergie cinétique qu'ils tirent de l'écoulement principal. Le transfert de l'énergie cinétique des gros tourbillons vers les plus petits tourbillons dans ce qui est connus comme la cascade de l'énergie. Le processus continue la création des structures plus petites produisant une hiérarchie des tourbillons. Finalement, les structures deviennent suffisamment petites pour que la diffusion moléculaire devienne importante et les plus petits tourbillons aux échelles de longueur[93].convertissent leur énergie cinétique en énergie thermique par dissipation visqueuse. La cascade d'énergie est illustrée à la figure (II.1)

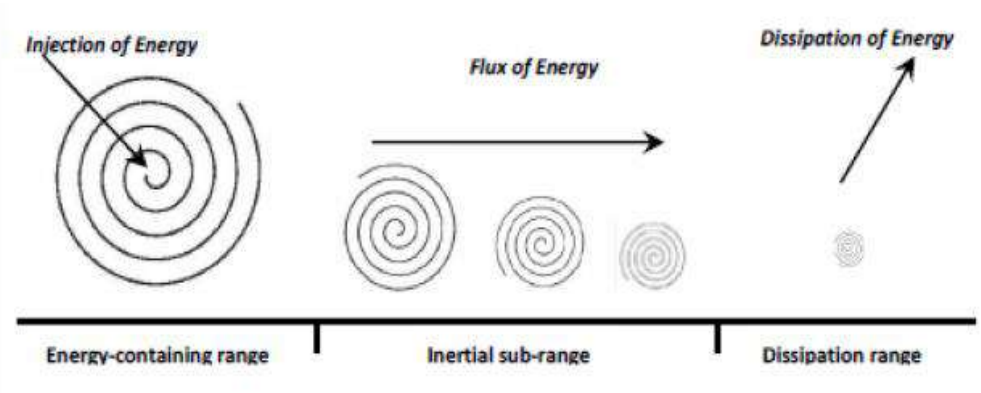


FIG.II.1 : la cascade d'énergie de turbulence

Les équations gouvernant la mécanique des écoulements incompressibles sont rappelées et on présente comment les équations RANS sont obtenues à partir de celles-ci. Le problème

de fermeture est ensuite brièvement abordé, ce qui mène à la description de cinq modèles de turbulences : k-ε standard, k-ε réalisable, RNG k-ε, k-ω et SST k-ω (Shear Stress Transport). La modélisation RANS (Reynolds Averaged Navier Stockes) utilise la décomposition des variables décrivant le mouvement (vitesse et pression dans le cas d'un écoulement incompressible) en leur moyenne statistique et la fluctuation autour de cette moyenne. Dans une première approche, le mouvement moyen est considéré stationnaire et la totalité du mouvement fluctuant est considéré aléatoire. Le moyen-âge des équations de Navier-Stockes qui régissent l'écoulement associé à cette décomposition conduit à un système d'équations pour le mouvement moyen dans lequel apparaît des termes inconnus, les corrélations doubles des vitesses fluctuantes qui sont les composantes du tenseur des contraintes turbulentes ou tenseur de Reynolds. La résolution de ce système nécessite des lois de fermeture modélisant ces termes. Parmi les modèles les plus répandus, on distingue les modèles au premier ordre qui relient algébriquement le tenseur de Reynolds au mouvement moyen, et les modèles au second ordre qui utilisent les équations de transport de ces contraintes dans lesquelles les termes inconnus sont modélisés. Les corrélations doubles des vitesses fluctuantes jouant le rôle des contraintes, les modèles au premier ordre les plus répandus sont les modèles linéaires qui utilisent une hypothèse de fermeture Newtonienne basée sur une analogie avec la loi de comportement de fluide Newtonien. Le tenseur des contraintes turbulentes est dans ce cas relié linéairement au tenseur de taux de déformation moyenne, via une viscosité turbulente qui est déterminée à partir d'une échelle de vitesse et d'une échelle de longueur turbulentes. Une classe intermédiaire des modèles de turbulence consiste à adopter des lois constitutives non-linéaires reliant le tenseur de Reynolds au tenseur de déformation et de rotation du mouvement moyen. Ces lois constitutives peuvent découles de concepts rhéologique par analogie a des fluides viscoélastique, [94] ou bien de dégénérescence des équations de transport des tensions de Reynolds vers des équations de transport algébriques, approche Explicit Algebraic Stress Modelling, EARSM, [95]. Cette classe intermédiaire vise à restituer le caractère anisotrope du tenseur turbulent notamment dans les régions proches paroi, alors que les modèles linéaires de la loi Boussinesq rendent le comportement des tensions normales isotrope. En regardent à une échelle de temps plus large que celles des fluctuations de la turbulence, le flux turbulent peut être vu comme présentant des caractéristiques moyennes avec une composante fluctuante additionnelle variant dans le temps. Les modèles de turbulence basés sur les équations RANS sont connus comme des modèles de turbulence statistique à cause de la procédure de moyenne statistique utilisée pour obtenir les équations.

La simulation des équations RANS réduit grandement le besoin de calcul par les autres modèles et est généralement utilisée pour les calculs d'ingénierie pratique. Cependant, la procédure de moyenner introduit des inconnues supplémentaires contenant les produits des quantités fluctuantes, qui agissent comme des contraintes additionnelles dans le fluide. Ces termes appelés contraintes (turbulente) ou (de Reynolds), sont difficiles à déterminer directement. Les contraintes de Reynolds ont besoin d'être modélisées par des équations supplémentaires à partir de la quantité connus afin de clore le système. Les équations utilisées afin clore le système définisse le type de modèle de turbulence. Comme décrit au dessus, les modèles de turbulence cherchent à résoudre un système modifiés des équations de transport en introduisant des composantes moyennées et fluctuantes. Par exemple, une vitesse U peut être divisée en une composante moyennée $\overline{U}$, et une composante variant en fonction du temps t.

$$U = \overline{U} + u \tag{II.1}$$

Le composante moyenne est donnée par :

$$\overline{U} = \frac{1}{\Delta t}\int_{t}^{t+\Delta t} U dt \tag{II.2}$$

Où Δt est une échelle de temps suffisamment large par rapport aux fluctuations turbulentes, mais assez petite par rapport à l'échelle de temps à laquelle les équations sont résolues.

Les équations déterministes de la mécanique des fluides : équations de la conservation de la masse (II.3), équation de Navier Stockes (II.4) et de l'énergie (II.6). Nous l'hypothèse d'écoulement incompressible et réduisons les forces extérieures au seul champ de pesanteur (la force Coriolis est négligeable car le nombre de Rossby est inférieur à 1). Les équations s'écrivent alors :

L'équation de continuité

$$\nabla u = 0 \tag{II.3}$$

L'équation de mouvement

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u.\nabla)u\right) = \nabla.\Sigma + \rho g \tag{II.4}$$

Où Σ est le tenseur des contraintes et défini pour un fluide Newtonien par la relation suivante :

$$\Sigma = -pI + \mu\left(\nabla u + {}^{t}\nabla u\right) \tag{II.5}$$

Avec : $-pI$ et $\mu\left(\nabla u + {}^{t}\nabla u\right)$ sont la pression et les contraintes visqueuses.

L'équation de l'énergie

$$\rho C_p\left(\frac{\partial T}{\partial t} + u.\nabla T\right) = \nabla.\left(\lambda \nabla T\right) - \nabla.\varphi \tag{II.6}$$

Où $\left(\partial T / \partial t\right), \left(u.\nabla T\right)$ et $\left(\lambda \nabla T\right)$ sont la variation locale, advection, flux de conduction et le flux radiatif. La masse volumique est ici variable en fonction de la température. Le système composé des équations (II.3) à (II.6), est complété par la loi suivante :

$$\rho = \rho_0\left[1 - \beta_T\left(T - T_0\right)\right] \tag{II.7}$$

Où ρ_0 et T_0 sont la masse volumique et la température de référence, et β_T le coefficient d'expansion volumique thermique de fluide, défini par :

$$\beta_T = -\frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_P \approx \frac{1}{T_0} \tag{II.8}$$

L'étude d'écoulements atmosphériques est un domaine passionnant de la mécanique des fluides de part les enjeux rencontrés (climatologie, prévisions, métrologiques, protection de l'environnement…). Deux nombres sans dimension caractérisent en général le régime turbulent. Le premier est le nombre de Reynolds qui est le rapport entre forces d'inertie et forces de viscosité, est donnée par :

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\upsilon} \tag{II.9}$$

Où U, L et υ sont la vitesse moyenne de fluide, dimension longueur caractéristique de l'écoulement et la viscosité cinématique du fluide.

La turbulence peut être aussi provenir de mouvements convectifs provoqués par des variations de température qui induisent par le jeu des forces d'Archimède des mouvements ascendants. La viscosité s'oppose à ces mouvements et l'on peut définir un autre nombre sans dimension comme le rapport des forces convectives liée à un gradient de température aux forces des

viscosités. C'est le nombre de Rayleigh R_T qui s'écrit, pour l'écoulement entre deux plaques horizontales séparées d'une distance *L*, la plaque supérieur à la température T_0, l'autre à la température $T_0+\Delta T$, par la relation suivante :

$$R_T = \frac{gK\beta_T \Delta TL}{\alpha\upsilon} \qquad \text{(II.10)}$$

Lorsque l'écoulement est turbulent, il est possible de décomposer toute quantité vectorielle ou scalaire en une partie moyenne et une partie fluctuante. C'est la décomposition de Reynolds, présentée par l'équation (II.11).

On note généralement la partie moyenne avec une lettre majuscule et le terme fluctuant par une minuscule à laquelle on ajoute un « prime » en exposant. Il est noter que différents types de moyennage peuvent être fait selon la situation. Lorsqu'une solution stationnaire est recherchée une moyenne temporelle peut être utilisée. Le passage des équations déterministes aux équations statiques repos sur la décomposition de Reynolds où tout champ $\Gamma\left(\Gamma = u, T \text{ ou } p\right)$ se décompose en un champ moyen $\overline{\Gamma}$ et un champ fluctuant de moyenne nulle :

$$\Gamma(x,t) = \overline{\Gamma}(x,t) + \Gamma'(x,t) \qquad \text{(II.11)}$$

La moyenne est à l'origine une moyenne d'ensemble (moyenne stochastique), c'est-à-dire qu'elle est prise sur un ensemble d'expériences effectuées dans des conditions identiques. L'hypothèse [96], il est équivalent de considérer une expérience répétée une infinité de fois ou une seule expérience menée à l'infini dans le temps, permet le passage à des moyennes temporelle, et par conséquent un traitement statistique des équations. Les équations ne sont alors a priori valables que pour des écoulements stationnaires mais dans la pratique elles sont largement utilisées pour les cas instationnaires.

En remplaçant dans les équations fondamentales les expressions instantanées des champs par leur expression sous la forme de la relation (II.11), et en moyennant les équations obtenues, on obtient le système suivant :

$$\nabla\overline{u} = 0 \qquad \text{(II.12)}$$

$$\rho\left(\frac{\partial\bar{u}}{\partial t}+\left(\bar{u}\nabla\right)\bar{u}\right)+\nabla\left(\rho\overline{u'\otimes u'}\right)=\nabla\bar{\Sigma}+\rho g \tag{II.13}$$

$$\rho C_p\left(\frac{\partial\bar{T}}{\partial t}+\left(\bar{u}\nabla\right)\bar{T}\right)+\nabla\left(\rho C_p\overline{u'T'}\right)=\nabla\left(\lambda\nabla\bar{T}\right) \tag{II.14}$$

$$\rho=\rho_0\left(1-\beta_T\left(\bar{T}-T_0\right)\right) \tag{II.15}$$

De part la non-linéarité des équations de Navier-Stockes et de l'énergie, des inconnues supplémentaires apparaissent. Ces corrélation doubles (termes de Reynolds $\rho\overline{u'\otimes u'}$ et $\rho C_P\overline{u'T'}$) rendent le système ouvert, il comporte plus d'inconnues que l'équation. Différentes méthodes de fermeture ont été proposées. En considérant que l'interaction entre le champ moyenné et le champ fluctuant se réduit à un terme de dissipation et en suivant une approche analogue à celle développée pour exprimer le terme de contraintes visqueuses dans le cas de fluide Newtonien, les contraintes de Reynolds peuvent être modélisées par la relation de Boussinesq suivant :

$$\tau_{ij}-\overline{\rho u'\otimes u'}=\mu_t\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\rho k\,\delta_{ij} \tag{II.16}$$

Où δ_{ij} est le delta de Kronecker, μ_t est la viscosité turbulente.

Le dernier terme à droit de l'équation (II.16) est nécessaire pour que les termes diagonaux du tenseur de Reynolds ainsi que l'énergie cinétique turbulente soient bien modélisés effet en prenant la trace du tenseur de Reynolds $\tau_{ii}=\tau_{xx}+\tau_{yy}+\tau_{zz}$, on obtient

$$-\rho\left(\overline{u'^2}+\overline{v'^2}+\overline{\omega'^2}\right)=2\mu_t\left(\frac{\partial U}{\partial x}+\frac{\partial V}{\partial y}+\frac{\partial W}{\partial z}\right)-3\left(\frac{2}{3}\rho k\right) \tag{II.17}$$

Par l'équation de continuité, on remarque que le terme entre crochets est nul. Le dernier membre à droite est donc nécessaire à ce que la définition de l'énergie cinétique turbulente k soit respectée :

$$k=\frac{1}{2}\overline{u_i u_i}=\frac{1}{2}\left(\overline{u'^2}+\overline{v'^2}+\overline{\omega'^2}\right) \tag{II.18}$$

Dans l'équation (II.16), on remarque la présence de deux variables servant à modéliser les tensions de Reynolds, μ_t et k . Il faut effectivement deux informations pour fermer le système d'équation RANS. Différentes variables peuvent être utilisées mais elles doivent nécessairement permettre de déduire deux informations parmi la vitesse, la longueur et le temps caractéristique des fluctuations. Les modèles de turbulences à deux équations sont alors dits « complets » parce qu'ils ne nécessitent pas d'information extérieure au système d'équations pour approximer τ_{ij} . Notons que certains modèles à une équation

Peuvent aussi être complets mais ils s'appuient sur une version différente l'équation (II.16). C'est le cas du modèle Spalart-Allumaras.

Les modèles de turbulence d'ANSYS CFX peuvent être répertoires en deux catégories, les modèles basés sur la viscosité tourbillonnaire et ceux basés sur la contrainte de Reynolds (Reynolds Stress Turbulence modèles). Les modèles de turbulence utilisant pour ce travail est le modèle $k-\varepsilon$ standard, $k-\varepsilon$ réalisable, $RNG\ K-\varepsilon, k-\omega$ standard et $SST\ k-\omega$ et appartiennent à la première catégorie de modèles.

II.2.1. Modèles à une équation : modèle Spalart-Allmaras (AS)

Le modèle de turbulence Spalart-Allmaras [97] est un modèle de l'équation de transport pour la viscosité turbulente. L'équation différentielle est calculée en « utilisant l'empirisme et les arguments de l'analyse dimensionnelle, invariance Galilean et la dépendance sélectionnée sur la viscosité moléculaire ». Ce modèle ne nécessite pas de résolution de la grille plus fine pour capturer les gradients de champ de vitesse avec des modèles algébriques. Dans le modèle SA une autre équation de transport (II.19) pour une viscosité turbulent modifié $\tilde{\upsilon}$ est utilisé pour fermer le système d'équation RANS.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\tilde{\nu}\right)+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho\tilde{\nu}u_i\right)=G_\nu+\frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}}\left[\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\left(\mu+\rho\tilde{\nu}\right)\frac{\partial\tilde{\nu}}{\partial x_j}\right\}+C_{b2}\rho\left(\frac{\partial\tilde{\nu}}{\partial x_j}\right)^2\right]-Y_\nu \qquad \text{(II.19)}$$

Où G_ν est la production de la viscosité turbulent et Y_ν est la destruction de la viscosité turbulente qui se produit dans la région proche de la paroi en raison de blocage de la paroi et de l'amortissement visqueux. $\sigma_{\tilde{\nu}}$ et C_{b2} sont des constante et υ est la viscosité cinématique moléculaire.

La viscosité turbulente est calculée par :

$$\mu_t = \rho \tilde{\nu} f_{v1} \tag{II.20}$$

Avec : $f_{v1} = x^3 / x^3 + C_{v1}^3$ et $x \equiv \tilde{\nu} / \nu$

Le terme de production G_v est modélisé par :

$$G_v = C_{b1} \rho \tilde{S} \tilde{\nu} \tag{II.21}$$

$$\text{Avec : } \tilde{S} \equiv S + \frac{\tilde{\nu}}{\kappa^2 d^2} f_{v2}$$

Où C_{b1} est une constante du modèle, ρ la densité du fluide et $\tilde{S}$ donné par l'équation précédente, définie comme la somme de S, en fonction de la déformation et tenseur de rotation, κ est la constante de Von Karman (0.41 dans ANSYS CFX) et la fonction f_{v2} est évaluée par,

$$f_{v2} = 1 - \frac{x}{1 + x f_{v1}} \tag{II.22}$$

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

$$S = \sqrt{2\left(\Omega_{ij}\Omega_{ij}\right)} \tag{II.23}$$

$$\text{Avec : } \Omega_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_J}{\partial X_i}\right) \tag{II.24}$$

Le terme de destruction Y_n est modélisé par

$$\left.\begin{aligned} Y_v &= C_w \rho f_w \left(\frac{\tilde{\nu}}{d}\right)^2 \\ f_w &= g\left(\frac{1 + C_{w3}^6}{g^6 + C_{w3}^6}\right)^{1/6} \\ g &= r + C_{w2}\left(r^6 - r\right) \\ r &\equiv \frac{\tilde{\nu}}{\tilde{S}\kappa^2 d^2} \end{aligned}\right\} \tag{II.25}$$

Où g agit comme un limiteur qui empêche les grandes valeurs de f_w. Les constantes du modèle sont présentées dans le tableau(II.1).

C_{b1}	C_{b2}	σ_v	C_{v1}	C_{w1}	C_{w2}	C_{w3}	κ
0.1355	0.622	2/3	7.1	$\frac{C_{b1}}{\kappa^2}+\frac{(1+C_{b2})}{\sigma_{\tilde{v}}}$	0.3	2.0	0.41

TAB.II.1. Les constantes de modèle Spalart-Allmaras SA.

II.2.2. Modèles 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 à partir de laquelle on peut tirer une échelle de longueur $\varepsilon = k^m \ell^m$, et il existe une grande variété des formulations dans la littérature scientifique. Le modèle à deux équations le plus connu est le modèle $k-\varepsilon$ 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. La vitesse et l'échelle de longueur pour les modèles $k-\varepsilon$ et $k-\omega$ sont indiqués dans le tableau (II.2)

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

TAB.II.2. Échelle de la vitesse et l'échelle de longueur pour les modèles $k-\varepsilon$ et $k-\omega$.

II.2.2.1. Modèle k-ε standard

Ce modèle est initialement proposé par Harlow et Nakayama [98]et en suite complété par Jones et Launder [99], Launder [100], puis launder et Spalding [101]. En plus de l'équation de continuité et des trois équations RANS, le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ ajoute deux équations de transport supplémentaires au système.

La première est l'équation de transport de l'énergie cinétique turbulente k alors que la seconde fait intervenir ε, son taux de dissipation. Avec ces deux variables, la viscosité turbulente μ_t peut être calculée et l'équation (II.26) est entièrement définie. Les différentes équations de ce modèle sont les suivantes :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k}{\varepsilon} \tag{II.26}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \tag{II.27}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \tag{II.28}$$

Le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ 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.

Les constantes, déterminées empiriquement par les auteurs modèles, sont données dans le tableau (II.3).

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε	σ_t	$C_{\varepsilon 1}C_{\varepsilon 3}$
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3	1.0	0.7

TAB.II.3 : Les constantes du modèle $k-\varepsilon$ standard.

II.2.2.2. Modèle k-ε réalisable

Le modèle de turbulence réalisable par Shih [102] diffère de modèle $k-\varepsilon$ 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 $k-\varepsilon$ Réalisable, l'équation de transport de l'énergie cinétique k est identique à celle du modèle $k-\varepsilon$ standard Eq (II.27), et l'équation de transport pour ε étant donné comme :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+\rho C_1 S\,\varepsilon-C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{\upsilon\varepsilon}}+ C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3C}G_b+S_\varepsilon \qquad \text{(II.29)}$$

Dans l'équation (II.29), 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 $k-\varepsilon$, la viscosité turbulente est calculée en utilisant l'équation (II.26), cependant, C_μ n'est plus une constante. C_μ est calculée en utilisant l'équation suivante :

$$C_\mu=\frac{1}{A_0+A_s\dfrac{kU^*}{\varepsilon}} \qquad \text{(II.30)}$$

Où $\quad U^*=\sqrt{S_{ij}S_{ij}+\tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}}, \qquad \tilde{\Omega}_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j}-\frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i}\right)$

Dans l'équation (II.30), A_0 est une constante qui définie par :

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

$$\text{Où}\ \phi=\frac{1}{3}\cos^{-1}\left(\sqrt{6}W\right), \qquad W=\frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3}, \qquad \tilde{S}=\sqrt{S_{ij}S_{ij}}$$

Les constantes appliquées dans le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ Réalisable sont données dans le tableau (II.4).

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

TAB. II.4 : Les constantes du modèle $k-\varepsilon$ réalisable.

II.2.2.3. Modèle RNGk-ε

Le modèle RNG, développé par le groupe de renormalisation, consiste en une estimation au cours du calcul de la constant $C_{1\varepsilon}$, remplacée dans l'équation de dissipation par $C_{1\varepsilon}^{'}$ donnée par l'expression (II.31). Cette expression ajoute un terme en fonction du taux de déformation η à l'équation du taux de dissipation.

$$C_{1\varepsilon}^{'} = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta\left(1-\frac{\eta}{\eta_0}\right)}{1+\beta\eta^3} \qquad \text{(II.31)}$$

Avec :

$$\eta = \frac{k}{\varepsilon}\sqrt{\frac{P}{\eta_t}} \qquad \text{(II.32)}$$

La différence principale entre la version $k-\varepsilon$ standard et $RNG\ k-\varepsilon$ est dans l'équation du taux de la dissipation turbulente. Dans les écoulements à taux de contraintes élevés, le modèle RNG prévoit une faible viscosité turbulente (c'est-à-dire un taux de dissipation ε élevé et une production de l'énergie turbulence k faible) que le modèle standard. Bien que le modèle $RNG\ k-\varepsilon$ a été découvert pour faire mieux que le modèle standard pour les écoulements avec une grande courbure des lignes de courant. Les deux modèles de la turbulence $k-\varepsilon$ standard et $RNG\ k-\varepsilon$ sont valides pour les écoulements turbulents loin des parois. Les constantes appliquées dans le modèle de turbulence $RNG\ k-\varepsilon$ sont données dans le tableau(II.5).

C_μ	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	σ_ε	η_0	β
0.085	1.42	1.62	0.7179	4.38	0.015

TAB.II.5 : Valeurs des constantes du modèle $RNG\ k-\varepsilon$.

II.2.2.4. Modèle k-ω standard

Wilcox [103] propose plutôt d'utiliser la fréquence turbulente 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 :

$$\varepsilon = \beta^* \omega k \qquad \text{(II.33)}$$

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 :

$$\omega = K^{\frac{1}{2}}/l \tag{II.34}$$

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

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \tag{II.35}$$

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

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k1}}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \tag{II.36}$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 1}}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] \tag{II.37}$$

La performance de ce modèle en présence d'un gradient de pression adverse ou d'une surface courbe est connue pour être meilleure que celle du $k-\varepsilon$. Comme autre avantage du modèle $k-\omega$, Mentrer [104] 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 :

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

TAB.II.6 : Valeurs des constantes du modèle $k-\omega$.

II.2.2.5. Modèle SST k-ω (Shear Stress Transport)

Afin de profiter des avantages respectifs des modèles $k-\varepsilon$ et $k-\omega$, Menter [105] a développée une version hybride de ceux-ci. Le modèle SST (Shear Stress Transport) utilise les équations du modèle $k-\omega$ prés des parois et se transforme graduellement à un modèle $k-\varepsilon$ modifié au centre de l'écoulement. On peut imager le modèle SST comme suit :

$$SST = F1(k-\omega)+(1-F1)(k-\varepsilon) \tag{II.38}$$

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 $k-\omega$ en présence d'un gradient de pression adverse sans avoir le désavantage d'un modèle sensible aux valeurs de ω de l'écoulement libre. Pour formuler correctement ce problème, les équations du modèle $k-\varepsilon$ 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 $k-\omega$. Toutefois, l'équation de transport de la fréquence turbulente est modifiée :

$$\rho\frac{\partial k}{\partial t}+\rho U_j\frac{\partial k}{\partial x_j}=\tau_{ij}\frac{\partial U_i}{\partial x_j}-\beta^*\rho k\,\omega+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_{k3}}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \tag{II.39}$$

$$\rho\frac{\partial \omega}{\partial t}+\rho U_j\frac{\partial \omega}{\partial x_j}=\frac{\alpha_3}{\upsilon_t}\tau_{ij}\frac{\partial U_i}{\partial x_j}-\beta_3\rho\omega^2+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right]+2\rho(1-F_1)\frac{1}{\sigma_{\omega 2}}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j} \tag{II.40}$$

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.7).

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

TAB.II.7 : Valeurs des constantes du modèle SST k-ω.

La première fonction de transition du modèle SST, F_1, définit le modèle $k-\varepsilon$ ou $k-\omega$ Elle s'écrit comme suit :

$$F_1 = \tanh\left(\Phi_1^4\right) \tag{II.41}$$

Avec :

$$\Phi_1 = \min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y};\frac{500\upsilon}{y^2\omega}\right);\frac{4\rho k}{CD_{k\omega}\sigma_{\omega 2}y^2}\right] \tag{II.42}$$

Où y est la distance normale à la surface. Le modèle SST doit donc résoudre une équation supplémentaire pour calculer la distance de chaque nœuds au mur le plus prés. Le terme $CD_{k\omega}$ est la portion positive du terme de diffusion croisée de l'équation (II.40):

$$CD_{k\omega} = \max\left(2\rho\frac{1}{\sigma_{\omega 2}}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j};10^{-10}\right) \tag{II.43}$$

Cette transition entre les modèles $k-\varepsilon$ et $k-\omega$ n'est pas la seule caractéristique du SST. Remarquons que la viscosité cinématique turbulente ν_t .

Apparait dans l'équation (II.40) sous la forme $\nu_t = \mu_t / \rho$. 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 :

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max\left(a_1\omega; SF_2\right)} \tag{II.44}$$

Où $a_1 = 0.31$ est une constants, S est la mesure invariante du taux de déformation donnée par

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \text{ avec } S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)$$

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

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

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

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.44). En plus de cela, le terme de production d'énergie cinétique turbulente est aussi limité pour prévenir l'accumulation de turbulence dans les régions de stagnation :

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

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.3. Traitement de la paroi

Les développements de champ d'écoulement dans rue de canyon urbain sont complexes à cause de séparation de l'écoulement, le rattachement et la recirculation résultants du bâtiment obstruant le vent. Pour obtenir des résultats significatifs et numériques précises, il est important prendre en compte les forts gradients des variables de champ d'écoulement. Le traitement de la zone de paroi est très important pour la simulation numérique d'un écoulement turbulent.

La présence d'une condition de non glissement provoque la formation d'un cisaillement dont les propriétés sont déterminantes pour la justesse de la prédiction. En effet, les forces de frottement pariétal sont fonctions des gradients de vitesse dans la couche limites et la prédiction de la séparation passe par la simulation de cette région critique. Deux méthodes sont couramment utilisées pour prendre en compte cette région critique de l'écoulement. La première approche consiste à résoudre les équations de Navier-Stockes jusqu'à la paroi solide sur laquelle la condition limites est appliquée. L'autre alternative pouvant être envisagée est d'arrêter le calcul à une certaine distance de la frontière et d'utiliser une loi de paroi pour faire le lien entre la région calculée et le mur. Dans ce cas, la loi de paroi ne sert pas à résoudre l'écoulement mais plutôt à calculer les conditions limites appropriées devant s'appliquer au premier nœud. On exprime la distance à la paroi par la variable adimensionnelle y^+.

L'approche y^+ fournit des conseils dans le choix d'une configuration appropriée de la grille et le modèle de turbulence dans des investigations de CFD sur des écoulements turbulents liés par mur.

ANSYS CFX propose deux approches de modélisation des régions proches de la paroi. Dans la première approche consiste à ne pas résoudre l'écoulement dans les régions de la sous-couche visqueuse et couche tampon et d'appliquer des fonctions empiriques dites fonction de paroi. Cependant, l'utilisation de ces fonctions exige la modification et l'adaptation des modèles de turbulence pour tenir compte de la présence des parois dans l'écoulement. Dans la deuxième approche, les modèles de turbulence sont adaptés afin de résoudre toutes les sous-couches y compris la sous-couche visqueuse, cette approche appelée modélisation proche de la paroi nécessite un maillage très raffiné prés des parois. Ces deux

approches sont illustrées schématiquement sur la figure (II.2)..

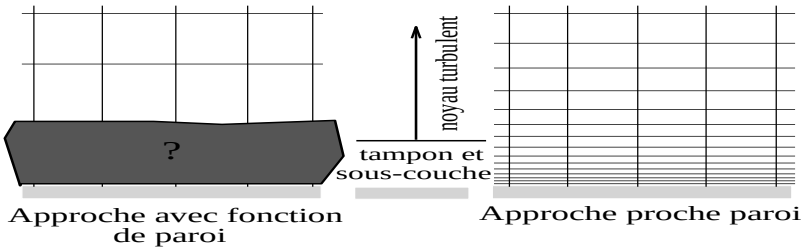


FIG. II.2. Modélisation de la couche limite.

La valeur de y^+ est une distance non-dimensionnelle semblable à un nombre de Reynolds local. Dans le cadre de CFD, il est utilisé pour décrire comment grossière ou raffiné un maillage. Il détermine si les influences dans les cellules de la paroi adjacent sont laminaire, transitoire ou turbulent, donc indiquer la partie de la couche limite turbulente qui est résolu par ANSYS CFX. Il est décrit comme :

$$u^+ = \frac{u}{u_*}, \qquad y^+ = \frac{u_* y}{\nu} \tag{II.38}$$

Où $u_* = \sqrt{|\tau_\omega| / \rho}$ est la vitesse de frottement, τ_ω étant le cisaillement pariétal. Le profile de vitesse typiquement retrouvé prés de la paroi est illustré à la figure (II.3).comme on peut le voir à la Figure (II.3), il existe différentes zone qui sont représentées par différentes fonctions ou lois de paroi.

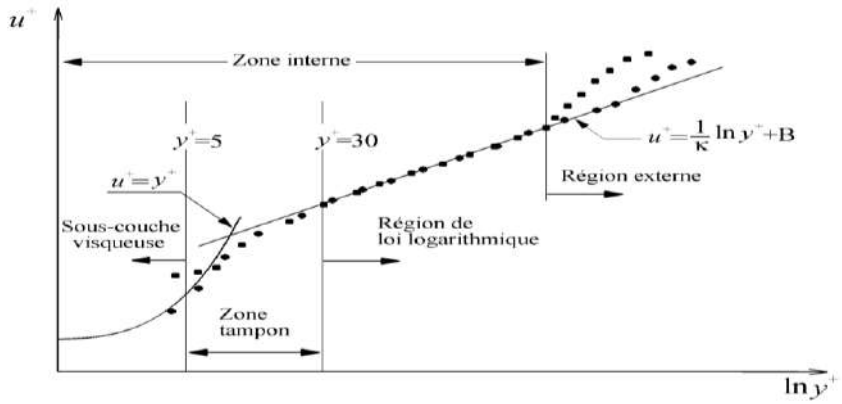


FIG.II.3 : Subdivisions de la région près de la paroi.

Dans la sous-couche visqueuse $0 \le y^+ < 5$, l'écoulement est laminaire et la viscosité moléculaire joue un rôle important. Il supposé que la contrainte de cisaillement est constantes et environ égale à la contrainte τ_w , soit :

$$\tau(y) = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \cong \tau_w \tag{II.39}$$

On déduire donc que dans cette zone

$$u^+ = y^+ \tag{II.40}$$

La zone intermédiaire $\left(5 \le y^+ < 30\right)$, dans cette couche dite zone tampon, les effets de la viscosité moléculaire et de la turbulence sont d'égale importance. On définit une fonction qui assure la continuité entre les lois de la sous couche visqueuse et la région à la loi logarithmique qui s'écrit :

$$u^+ = \frac{U_t}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ - B_1 \tag{II.41}$$

La couche pleinement turbulente $\left(y^+ > 30\right)$, c'est la zone éloignée de la paroi dans laquelle l'écoulement est conditionné par la vitesse maximale et il est peu influencé par les effets de la viscosité moléculaire. L'écoulement suit une loi logarithmique de la forme :

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B_2 \tag{II.42}$$

Avec κ est la constante de Von Karman, B_1 et B_2 sont des constantes d'intégration, selon Graf et Altinakar [106] $\kappa = 0.41, B_1 = 3,05$ et $B_2 = 5.5$.

Le modèle SST $k-\omega$ se comporte quant à lui beaucoup mieux en paroi et il est habituel de l'utiliser pour résoudre en détail l'écoulement à traverse la sous couche visqueuse, jusqu'au mur. Le premier nœud de maillage est situé à $y^+ < 2$ pour que la couche limite soit bien prise en compte. Le graphique (II.3) montre que la sous-couche visqueuse se rend jusqu'à $y^+ = 5$ mais l'utilisation d'une valeur plus petite a comme avantage d'aider à ce qu'un nombre suffisant de nœud se retrouvent à l'intérieur de la couche limite.

Dans ANSYS CFX, il est possible de travailler avec ou sans loi de paroi. Plusieurs fonctionnalités ont été intégrées au code de façon à faciliter son utilisation. Ainsi dans certain cas le solveur peut outrepasser ce qui avait été initialement prescrit par l'utilisateur. D'un autre coté, d'autres fonctionnalités permettent d'utiliser des lois de paroi seulement dans certaines parties d'un même calcul, ce qui peut s'avérer très utile.

La fonctionnalité « *scalablewall fonction* », utilisée avec le modèle $k-\varepsilon$ permet d'utiliser pratiquement n'import quelle distribution d'éléments prés de la paroi. Comme cela été vu à la figure(II.3), la loi logarithmique est valide au déla de $y^+ = 30$

Dans le cas du modèle SST $k-\omega$, l'option « *automatic wall treatement* » permet de coupler la résolution jusqu'à la paroi avec l'utilisation d'une loi de paroi au sein d'un même calcul. De cette façon, l'utilisateur peut décider de traiter les parois critiques en utilisant un maillage très fin $y^+ \approx 1$ et les autres parois avec un maillage plus grossier $y^+ \approx 30$ .Qui plus est, la formulation permet de faire la transition pour une même paroi selon la résolution locale du maillage.

Les principaux résultats et conclusion basées sur l'approche de y^+ dans la détermination de la configuration du maillage et le modèle de turbulence le plus approprié sont discutés et présentés dans la section prochaine. Cela comprend la discussion sur le traitement proche de la paroi pour toute étude générique de gestion des écoulements turbulent sur des surfaces rugueuses. L'approche y^+ n'est pas connue a priori et nécessite d'abord de construits quelques maillages suivie par des simulations à l'aide de modèle de turbulence. Une fois que la solution a converge, la valeur de y^+ est calculée et la résolution de la grille est accessible pour voir s'il est approprié en fonction du nombre de Reynolds de l'écoulement principal. Le choix du modèle de turbulence et de traitement proche de la paroi à appliquer et alors décider.

Chapitre III : Dioxyde de carbone

Chapitre III : Dioxyde de carbone

III.1. Introduction

Le gaz carbonique, plus souvent appelé dioxyde de carbone (CO2), est un gaz invisible, dépourvu de coloration et d'odeur, produit par de nombreuses combustions (usines, véhicules). Rejeté dans l'atmosphère, ce gaz fait partie des principaux acteurs de l'effet de serre, entrainant un réchauffement trop important de notre planète. Il est également fabriqué en petites quantités au sein de l'organisme. Le dioxyde de carbone est en réalité un gaz d'échange entre les poumons et le sang. Le sang se charge en oxygène au niveau des alvéoles pulmonaires, puis les artères apportent l'oxygène aux cellules qui en ont besoin, et le produit des réactions d'utilisation de l'oxygène au niveau des muscles est le dioxyde de carbone. Celui-ci est alors rapporté par les veines au poumon, et rejeté dans l'air après un nouvel échange gazeux au niveau des alvéoles.

III.2. Définition

Le dioxyde de carbone, aussi appelé gaz carbonique ou anhydride carbonique, est un composé inorganique dont la formule chimique est CO_2, la molécule ayant une structure linéaire de la forme O=C=O. Il se présente, sous les conditions normales de température et de pression, comme un gaz incolore, inodore, à la saveur piquante.

Le CO_2 est utilisé par l'anabolisme des végétaux pour produire de la biomasse à travers la photosynthèse, processus qui consiste à réduire le dioxyde de carbone par l'eau, grâce à l'énergie lumineuse reçue du soleil et captée par la chlorophylle, en libérant de l'oxygène pour produire des oses, et en premier lieu du glucose par le cycle de Calvin. Le CO_2 est libéré, à travers le cycle de Krebs, par le catabolisme des plantes, des animaux, des fungi (mycètes, ou champignons) et des micro-organismes. Ce catabolisme consiste notamment à oxyder les lipides et les glucides en eau et en dioxyde de carbone grâce à l'oxygène de l'air pour produire de l'énergie et du pouvoir réducteur, sous forme respectivement d'ATP et de NADH + H^+. Le CO_2 est par conséquent un élément fondamental du cycle du carbone sur notre planète. Il est également produit par la combustion des énergies fossiles telles que le charbon, le gaz naturel et le pétrole, ainsi que par celle de toutes les matières organiques en général. Des quantités significatives de CO_2 sont par ailleurs rejetées par les volcans et autres phénomènes géothermiques tels que les geysers.

III.3. Utilisations

- **Sous forme gazeuse :** Le CO_2 a de nombreuses utilisations, dont :
- L'extinction des feux : beaucoup de centres de données (salles de serveurs d'ordinateurs) ou de salles d'archives sont équipés d'un système qui, en cas d'incendie, remplit la salle de CO_2 ce qui a pour effet d'éteindre le feu ;
- composant pétillant dans les boissons gazeuses ;
- En aquariophilie et culture sous serre pour une meilleure croissance des plantes ;
- En emballages à atmosphère contrôlée comme élément neutralisant ;
- En distribution d'eau potable, associé au carbonate, pour relever la dureté de l'eau (TH) des eaux trop agressives ;
- Solubilisation du calcaire dans les eaux dures (TH >25 °F) ;
- Les pompes à bière : en étant en contact avec la surface de la bière, il évite son oxydation et prolonge sa conservation, contrairement à un compresseur utilisant de l'air (ambiant) ;
- On se sert aussi parfois du CO_2 dans les grands abattoirs de porcs afin de les insensibiliser avant de les saigner ; il a été utilisé pour la conservation de la viande ;
- Composant nécessaire au phénomène de photosynthèse qui permet aux végétaux de croître en transformant les matières inorganiques en matières organiques constituant ainsi leur bois ;
- Fluide caloporteur dans certains types de réacteurs nucléaires tels que ceux de la filière UNGG en France.
- **Sous forme liquide :**

Sous forme liquide, il est utilisé comme :

- Réfrigérant pour congeler certains aliments ;
- Réfrigérant dans l'industrie électronique ;
- Agent d'extinction dans les extincteurs dits « au dioxyde de carbone », on parle parfois de neige carbonique parce qu'une partie du CO_2 liquide se solidifie immédiatement à la sortie de l'extincteur en produisant une poudre blanche en mélange avec du dioxyde de carbone gazeux ;
- Agent propulseur (et parfois également carbonatant) pour les boissons servies à la pression.

❖ **Sous forme solide :**

Le dioxyde de carbone sous forme solide a de nombreuses appellations : « glace carbonique », « neige carbonique », « glace sèche ». Il est issu de la solidification du CO_2 liquide. On obtient de la neige carbonique qui est ensuite comprimée pour obtenir de la glace carbonique.

Dans sa phase solide, cette glace carbonique se sublime en ne laissant aucun résidu, avec une enthalpie de sublimation de 573 kJ·kg (soit 25,2 $kJ \cdot mol^{-1}$), à −78,5 °C et à 1 atm. On lui a donc rapidement trouvé de multiples utilisations en tant que réfrigérant.

Il est commercialisé sous différentes présentations selon son usage :

- En granules (de la taille d'un grain de riz de 3 mm de diamètre) : essentiellement pour le nettoyage et le décapage cryogénique ;
- En bâtonnets (d'une longueur d'environ 16 mm) :
  -Pour la conservation, le transport des produits sous température dirigée (produits pharmaceutiques, transport de surgelés, transport d'échantillons, etc.) ;
  -Dans l'évènementiel : la glace carbonique dans l'eau forme un brouillard très dense qui glisse le long des parois du contenant ;
- Pour la recherche fondamentale ou appliquée, par ex. :
  -En chimie, comme réfrigérant en mélange avec un solvant organique (le plus souvent l'acétone) afin de mieux conduire la chaleur, plus rarement comme réactif. Dans ce domaine, on utilise le terme de « Carboglace™ » en France, ou juste "carbo" dans le langage parlé, et jamais le terme « glace sèche » qui est par contre privilégié au Québec.
- Pour la vinification : il ralentit la fermentation et évite l'oxydation ;
- En plaquette ou en blocs :
  - Pour le ravitaillement aérien (catering), les traiteurs, les pompes funèbres, etc.
- En pains :
  -Pour faire du brouillard épais (effets spéciaux, cinéma, vidéo).

III.4. Les émissions de CO_2

❖ **Les émissions anthropiques**

Ce sont celles liées aux activités humaines : les chauffages, les véhicules, les centrales électriques à combustibles fossiles, les unités d'incinération et divers types de combustion ou

de fermentation. Les moteurs et unités de combustion normaux émettent des effluents gazeux (cheminées, pots d'échappement, réacteurs d'avions...) contenant en moyenne 20 % de CO_2, qui, sans capture, se diluent rapidement dans l'air.

- **Les émissions naturelles :**

Elles peuvent être d'origine volcanique ou liées aux incendies de forêts, et plus largement sont dues à la respiration animale et végétale et à celle des organismes du sol (bactéries, protozoaires, etc.). Ce CO_2 ne pose normalement pas de problème majeur de toxicité, hormis dans quelques cas très particuliers : accumulation de poche de CO_2 dans des creux, par exemple lors d'émissions brutales de CO_2 d'origine géologique, issus d'un dégazage brutal de gaz piégé sous les sédiments de fonds de lacs africains ; dans ce cas des centaines de milliers d'animaux et des centaines d'humains peuvent mourir asphyxiés dans les vallées périphériques.

- **Les émissions liées aux transports :**

Selon un rapport de la SNCF présenté en septembre 2007, les émissions de CO_2 en France qui proviennent des transports, sont dues à 52 % aux automobiles, à 25,2 % aux poids lourds, à 2,7 % aux avions et à 0,5 % aux trains. Sa présidente, Anne-Marie Idrac, propose de faire financer les réseaux ferrés par de nouvelles taxes sur les autoroutes non-payantes et les voies rapides (10 cts d'euros au kilomètre), une augmentation de 25 % des péages des autoroutes pour le franchissement des Pyrénées et des Alpes, et par l'instauration d'une taxe européenne sur le kérosène utilisé par les avions.

Le CO_2 est un gaz à effet de serre bien connu, transparent en lumière visible mais absorbant dans le domaine infrarouge, de sorte qu'il tend à bloquer la réémission vers l'espace de l'énergie thermique reçue au sol sous l'effet du rayonnement solaire; il serait responsable de 26 % de l'effet de serre à l'œuvre dans notre atmosphère (la vapeur d'eau en assurant 60 %), où l'augmentation de sa concentration serait en partie responsable du réchauffement climatique constaté à l'échelle de notre planète depuis les dernières décennies du XX^e siècle. Par ailleurs, l'acidification des océans résultant de la dissolution du dioxyde de carbone atmosphérique pourrait compromettre la survie de nombreux organismes marins avant la fin du XXI^e siècle, notamment tous ceux à exosquelette calcifié tels que les coraux et les coquillages, mais aussi de certains poissons.

III.5. Caractéristiques physico chimie

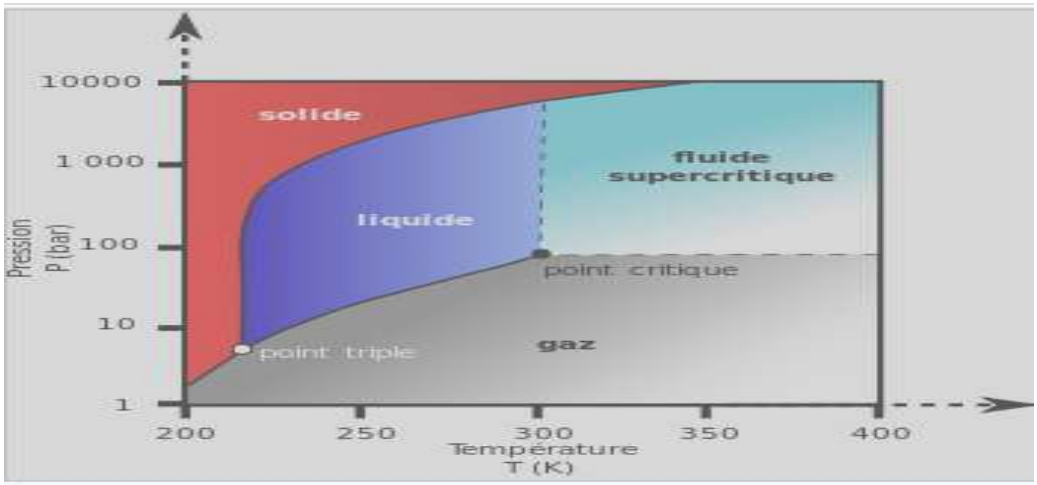


FIG.III.1: Diagramme de phase pression-température du dioxyde de carbone, montrant le point triple et le point critique.

À pression atmosphérique, il se sublime à −78,5 °C (passage de l'état solide à l'état gazeux), mais ne fond pas (passage de l'état solide à l'état liquide).

La phase liquide ne peut exister qu'à une pression minimale de 519 kPa (soit 5,12 atm), et dans un intervalle de température allant de −56,6 °C (point triple) à 31,1 °C au maximum à 7,38 MPa (soit 72,8 atm) (point critique).

III.6. Réduction du CO_2 dans l'atmosphère

Plusieurs voies sont explorées ou déjà mises en œuvre pour limiter l'accumulation du CO_2 dans l'atmosphère. Elles peuvent faire appel à des processus naturels comme la photosynthèse ou à des procédés industriels. Il faut également distinguer la capture à la source de la capture dans l'atmosphère.

La start-up indienne Carbon Clean Solutions (CCSL) a démarré avec succès sa première installation, qui capte et réutilise à 100 % les émissions de CO_2 (60 000 tonnes par an) d'une petite centrale à charbon en Inde, à Chennai (Madras) ; ce CO_2 est purifié, puis revendu à un industriel local, qui l'utilise pour fabriquer de la soude. La technologie de CCSL ramène le coût de revient du CO_2 vendu à 30 dollars la tonne en Inde et à 40 dollars en Europe ou aux États-Unis, très en-dessous du prix du marché : 70 à 150 dollars la tonne. Veolia a signé avec CCSL un contrat pour commercialiser ce procédé à l'international.

III.7. Réactivité

Le dioxyde de carbone est une molécule très stable, avec une enthalpie standard de formation de -393,52 $kJ \cdot mol^{-1}$. Le carbone présente une charge partielle positive, ce qui rend la molécule faiblement électrophile. Par exemple, un carbanion va pouvoir réaliser une addition nucléophile sur le CO_2 et former un acide carboxylique après hydrolyse. Par ailleurs, le CO_2 peut être utilisé pour former des carbonates organiques, par addition sur des époxydes.

III.8. Toxicité

À partir d'une certaine concentration dans l'air, ce gaz s'avère dangereux voire mortel à cause du risque d'asphyxie ou d'acidose, bien que le CO_2 ne soit pas chimiquement toxique. La valeur limite d'exposition est de 3 % sur une durée de quinze minutes. Cette valeur ne doit jamais être dépassée. Au-delà, les effets sur la santé sont d'autant plus graves que la teneur en CO_2 augmente. Ainsi, à 2 % de CO_2 dans l'air, l'amplitude respiratoire augmente. À 4 %, la fréquence respiratoire s'accélère. À 10 %, peuvent apparaître des troubles visuels, des tremblements et des sueurs. À 15 %, c'est la perte de connaissance brutale. À 25 %, un arrêt respiratoire entraîne le décès.

L'inhalation de dioxyde de carbone concentré entraîne un blocage de la ventilation, parfois décrit comme une violente sensation d'étranglement, un souffle coupé, une détresse respiratoire ou encore une oppression thoracique, pouvant rapidement mener au décès si l'exposition est prolongée.

Des études signalent selon l'ANSES « des concentrations associées à des effets sanitaires intrinsèques du CO_2 (seuil à environ 10 000 ppm correspondant à l'apparition d'une acidose respiratoire (baisse du pH sanguin), premier effet critique du CO_2) ». Une acidose respiratoire peut survenir dès 1 % (10 000 ppm) de CO_2 dans l'air, s'il est respiré durant 30 minutes ou plus par un adulte en bonne santé avec une charge physique modérée, et probablement plus tôt chez des individus vulnérables ou sensibles. Ces taux "sont supérieures aux valeurs limites réglementaire et/ou normative de qualité du renouvellement d'air en France et au niveau international, qui varient usuellement entre 1 000 et 1 500 ppm de CO_2". Une petite étude expérimentale (ayant concerné 22 adultes a conclu à un effet du CO_2 sur la psychomotricité et la fonction intellectuelle (prise de décision, résolution de problèmes) dès de 1 000 ppm, mais cette étude doit être confirmé par des travaux ayant une puissance statistique plus élevée. L'Anses note qu'il y a finalement peu d'études épidémiologiques sur ce

polluant commun, dont sur d'éventuels effets CMR (cancérigènes, mutagènes et reprotoxiques).

III.9. Solubilité aqueuse

Le CO_2 se dissout dans l'eau et y forme de l'acide carbonique H_2CO_3 : $CO_{2\,(aq)} + H_2O_{(l)}$ $H_2CO_{3\,(aq)}$, avec $K_h = [H_2CO_3] / [CO_2] \approx 1{,}70\times10^{-3}$ à 25 °C.

L'acide carbonique n'est que modérément stable et il se décompose facilement en H_2O et CO_2. En revanche, lorsque le dioxyde de carbone se dissout dans une solution aqueuse basique (soude, potasse…), la base déportons l'acide carbonique pour former un ion hydrogénocarbonate HCO^-_3, aussi appelé ion bicarbonate, puis union carbonateCO_3^{-2}. De cette façon, la solubilité du CO_2 est considérablement augmentée.
C'est ainsi que le calcaire se dissout dans l'eau, dans la plage de pH dans laquelle l'hydrogénocarbonate acide est stable, en produisant une solution d'hydrogénocarbonate(s) (de calcium et de magnésium…). Il est donc susceptible de précipiter lorsque le CO_2 dissous est dégazé, comme dans la formation des stalagmites et des stalactites. Le calcaire a ainsi, en présence de CO_2, une solubilité qui diminue quand la température augmente, à l'instar des gaz et au contraire de la plupart des solides (dont la solubilité augmente généralement avec la température).

Dans certaines conditions (haute pression + basse température) le CO_2 peut être piégé dans des cages d'eau dites clathrates. C'est un des moyens possibles de séparation industrielle du CO_2 contenu dans un gaz en pré- ou post-combustion.

III.10. Le CO_2 dans l'atmosphère terrestre

Le dioxyde de carbone n'est normalement présent dans l'atmosphère terrestre qu'à l'état de traces. Il est mesuré via un indice, nommé "Annual Greenhouse Gas Index" (AGGI) depuis 1979 par un réseau d'une centaine de stations sur terre et en mer, disposées de l'Arctique au pôle Sud.

Depuis la révolution industrielle, en raison de la combustion constante de très grandes quantité de carbone fossile, alors que la régression des incendies, des forêts et des superficies végétalisées se poursuit, le taux de CO_2 dans l'air augmente régulièrement (actuellement : 405 parties par million (ppm) en volume. Ceci correspond à une masse totale de CO_2 atmosphérique d'environ $3{,}16\times10^{15}$ kg (environ 3 000 gigatonnes). L'année 1990 (qui correspond à un surplus d'environ 2,1 watts/m² par rapport à 1980) est l'année de référence

retenue pour le protocole de Kyoto (elle a donc un « indice AGGI » de 1). Un groupe de recherche spécifique sur le cycle du carbone et les gaz a effet de serre a été mis en place

À un instant « t », la teneur en CO_2 diffère dans chaque hémisphère, avec dans chaque hémisphère des variations saisonnière régulières motif « en dents de scie » sur le graphique de droite, montrant une baisse du CO_2 en saison de végétation et une augmentation en hiver). Il existe aussi des variations régionales en particulier au niveau de la couche limite atmosphérique, c'est-à-dire dans les couches proches du sol.

Les taux de CO_2 sont généralement plus élevés dans les zones urbaines et dans les habitations (jusqu'à 10 fois le niveau de fond).

Peu après la formation de la terre (bien avant l'apparition de la vie), alors que le soleil était presque deux fois moins « chaud », la pression initiale de CO_2 était environ 100 000 fois plus élevée qu'aujourd'hui (30 à 60 atmosphères de CO_2 (soit 3 000 000 à 6 000 000 pascals), soit 100 000 fois la quantité actuelle de CO_2 il y a environ 4,5 milliards d'années).

Puis la vie et la photosynthèse sont apparues, prélevant le CO_2 de l'atmosphère et de l'eau pour le transformer en roches carbonatées et en charbon, pétrole et gaz naturel, en grande partie enfouis dans les profondeurs de la terre. Le taux de CO_2 a néanmoins encore connu quelques pics de bien moindre importance (20 fois plus élevée qu'aujourd'hui il y a environ un demi-milliard d'années, mais le soleil était alors moins chaud qu'aujourd'hui (le rayonnement solaire croît avec le temps ; il a augmenté d'environ 40 % dans les 4 derniers milliards d'années). Le volcanisme émet aussi du CO_2 (jusqu'à 40 % des gaz émis par certains volcans lors des éruptions subaériennes sont du dioxyde de carbone) et certaines sources chaudes en émettent aussi (par exemple sur le site italien de Bossoleto près de Rapolano Terme où dans une dépression en forme de cuvette d'environ 100 m de diamètre, par nuit calme, le taux de CO_2 peut grimper de 75 % en quelques heures, assez pour tuer les insectes et petits animaux. Mais la masse de gaz se réchauffe rapidement quand le site est ensoleillé et est alors dispersée par les courants de convection de l'air durant la journée. Localement des concentrations élevées de CO_2, produites par la perturbation de l'eau d'un lac profond saturé en CO_2 peuvent aussi tuer (exemple : 37 morts lors d'une éruption de CO_2 à partir du lac Monoun au Cameroun en 1984 et 1700 victimes autour du lac Nyos en 1986.

Les émissions de CO_2 par les activités humaines sont actuellement plus de 130 fois supérieures à la quantité émise par les volcans, d'un montant de près de 27 milliards de tonnes

par an en 2007. En 2012, la Chine est le premier émetteur mondial de dioxyde de carbone avec 27 % du total, et les États-Unis, en deuxième position, produit 14 % du total mondial.

III.11. Gaz à effet de serre et acidifiant

Le CO_2 serait le deuxième gaz à effet de serre le plus important dans l'atmosphère après la vapeur d'eau, contribuant respectivement à hauteur de 26 % et 60 % à ce phénomène. La réalité du réchauffement climatique observé à l'échelle planétaire depuis le siècle dernier n'est aujourd'hui plus guère contestée d'un point de vue scientifique, mais la part exacte de responsabilité du dioxyde de carbone dans ce processus (par rapport au méthane notamment) doit encore être précisée, grâce aux enregistrements fossiles des paléoclimats notamment.

Chapitre IV : Résultats et discussion

Chapitre IV : Résultats et discussion

La modélisation de la dispersion des polluants atmosphériques est d'un grand intérêt pour la définition de la meilleure stratégie de ventilation dans canyons de rue. Une approche originale est celle de la modélisation, qui conduit à la réalisation d'un modèle de qualité de l'air permettant de déterminer les niveaux de pollution à différentes échelles d'une ville. Un modèle de qualité de l'air peut être un outil d'aide à la décision pour les collectivités locales. Il permet en effet de mesurer la répercussion sur les niveaux de pollution de toute modification apportée au système de ventilation des canyons de rue. La modification initialement prévue pourra, selon les résultats du modèle, être effectuée ou au contraire revue pour une amélioration. Des simulations de scénarios type de pollution sont aussi réalisables, affin d'arriver à une meilleure compréhension des phénomènes physiques rencontrés. Les simulations numériques, ont été prolongées par une étude sur l'influence des bâtiments supplémentaires ou près, sur le modèle de concentration dans canyons de rue. Différentes combinaisons de formes de toits des bâtiments à la fois côté sous le vent et au vent d'un stress-canyon de rue 2D isolé, idéalisée ont été étudiés. L'approche numérique de modélisation dans des canyons de rue est d'un grand intérêt pour étudier l'influence de l'architecteur de la rue sur l'écoulement de l'air et la dispersion des polluants, afin de réaliser des outils intéressantes de prévisions numériques à ce niveau pour attirer l'attention des planificateurs urbaine, la ventilation dans des canyons de rue et le confort de la structure. A fin de comprendre les constructions urbaines les plus répandues telle que les bâtiments, on a réalisé d'une part des simulations numériques bidimensionnelles des canyons de rues avec des variations du rapport d'aspect, et d'autre part avec des modifications au niveau des toits des bâtiments. Ce travail est inspiré par les expériences de la soufflerie qui ont été rapportés par Solazzo et al. [107] dans le but de comparer avec nos résultats numériques.

ANSYS CFX-15.0 est un logiciel général de simulation numérique d'écoulements en mécanique des fluides, transfert thermique et massique. Ce logiciel permet de mettre en œuvre une simulation numérique complète de la modélisation, de la création géométrique, et la visualisation des résultats, en passant par la création du maillage et le calcul. Le logiciel CFX, est divisé en quatre modules : **ICEM**, **CFX-Pre**, **CFX-solve** et **CFX-post**.

Le module **ICEM** permet d'établir la géométrie du système étudié. Il est utilisé comme un logiciel de **CAO** traditionnel : la géométrie est construite à partir de points, de courbes, de surfaces et de volume. C'est également ce module qui permet de générer un maillage s'appuyant sur la géométrie. L'utilisateur fixe alors les paramètres de maille qu'il souhaite obtenir sur les courbes, les surfaces et dans les volumes. Le module permet de générer des

mailles tétraédriques, hexaédriques et prismatiques. Une fois le maillage effectué, **ICEM** créé un fichier portant l'extension «.geo», qui regroupe les informations relatives au maillage, exploitable par **CFX-pre**.

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

Les conditions aux limites sont de 5 types : Entrée, Sortie, Ouverture, Pression statique, Mur et Symétrie.

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

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

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

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

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

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

IV.1. Description du modèle

Le domaine de calcul est montré sur la Figure (IV.1) Un écoulement entièrement turbulent à un nombre de Reynolds de $Re = 7.27 \times 10^4$ a été considéré. L'axe x aligné le long de l'écoulement d'entrée et l'axe z perpendiculaire à l'axe de cube. Les dimensions du domaine du calcul sont 25H et 10H pour la longueur et la hauteur respectivement. Les conditions aux limites d'entrée et de sortir ils sont placés à des endroits comme le montre sur la Figure (IV.1) De telles distances sont choisies de sorte que la longueur d'entrée n'a pas d'effet sur les résultats de la zone de recirculation est à l'intérieur du domaine de calcul et la sortir n'a aucun effet sur les variables physiques étudiées. Le domaine de calcul est délimité par le planché de la soufflerie, l'obstacle ''Mur'' pour laquelle une condition de non-glissement est appliquée u=v=w=0. Dans la partie supérieure du domaine un plan de symétrie au a la mi-hauteur de la veine d'essaye ''Symétrie''. A l'entrée ''Entrée '' en amont des profils de vitesse, de l'énergie cinétique et de dissipation ont été appliqués et imposés par Eqs (IV.2), (IV.3) et (IV.5). Et le sorite ''Sortie'' en aval a une pression relative nulle a été appliquée. On a placé sur le sol du canyon de rue une source de pollution linéaire dont la largeur $b = 2\text{mm}$ et hauteur $h = 1\text{mm}$ et avec une distance équivalente entre les deux immeubles. La source de pollution volumétrique, considérée comme entrée des émissions gazeuses (CO2) à une température$T_{\text{CO2}} = 40°C$. La vitesse d'entrée est de $v = 1m/s$. On a effectué l'emplacement de cette source de pollution, pour les simulations des canyons de rue avec des différents valeurs du rapport d'aspect ainsi pour les canyons de rue avec des toits différents. De plus, comme le logiciel ANSYS CFX ne calcule pas directement en 2D, les maillages sont construits en 3D avec une seule cellule d'épaisseur. Le maillage est donc pseudo-bidimensionnel et une condition de symétrie est imposée sur les deux cotés du

domaine. Les paramètres expérimentaux de soufflerie utilisée par Solazzo sont donnés dans le tableau (IV.1).

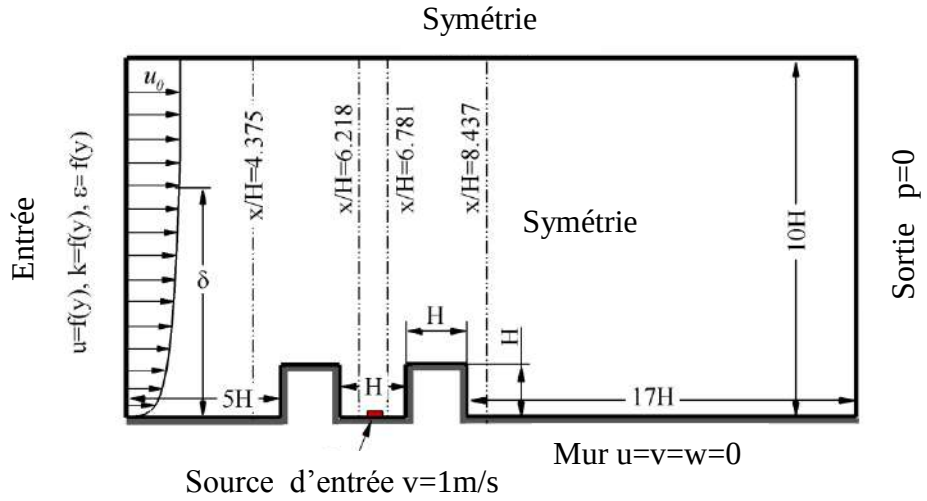


FIG.IV.1. La géométrie de la configuration de l'écoulement.

Tableau (IV.1) : Les différents paramètres des mesures de Solazzo: la rugosité des parois z_0 , vitesse de référenceu_0, l'épaisseur de la couche limite, δ, la hauteur de référence, z_{ref} et la hauteur de cube *H*. [107]

	z_0(m)	u_0(m/s)	δ(m)	z_{ref} (m)	*H* (m)
Solazzo et al[107].	7×10^{-4}	7.0	0.48	1.6	0.16

À la section 2, il a été démontré que deux informations indépendantes sont nécessaires pour caractériser la turbulence lors d'un **RANS** avec les modèles à deux équations. Aux frontières du domaine, il faut donc fournir au solveur de l'information sur l'énergie cinétique turbulent k, et sur son taux de dissipation, ε. Il y a évidement différentes façon de fournir ces informations au logiciel. La plus évidente d'entre celles offertes par **CFX** consiste à entrer directement les valeurs de *k* et ε lorsque ces données sont disponibles parce qu'elles ont été préalablement obtenues en faisant des mesures expérimentales poussées ou importées d'un calcul numérique précédent. Toutefois, en pratique, l'information sur la turbulence est généralement inconnue. En l'absence de telles données, il est possible de poser certaines approximations. La méthode la plus simple proposée par **CFX** utilisé seulement l'intensité de turbulente qui est définit comme étant le rapport entre la fluctuation de vitesse et la moyenne,

$$I = \sqrt{\overline{u'^2}/U^2} \qquad \text{(IV.1)}$$

Où U et u' sont ici respectivement les modèles de la vitesse et de sa fluctuation. Comme cette information n'est pas suffisante pour définir le caractère turbulent de l'écoulement, **ANSYS CFX** utilise une approximation implicite pour déterminer la viscosité turbulente μ_t.

Dans ce cas, ces deux informations sont utilisées pour calculer d'abord l'énergie cinétique k à l'aide de l'épaisseur de la couche limite δ,

$$k = \left(u_*^2/\sqrt{C_\mu}\right)(1 - z/\delta) \quad \text{(IV.2)}$$

et ensuite le taux de dissipation, ε, d'après le ratio de viscosité déterminé implicitement :

$$\varepsilon = (u_*^3/k(z + z_0)(1 - z/\delta) \quad \text{(IV.3)}$$

Alternativement, une autre option donnant plus de contrôle à l'utilisateur est d'utilise I mais de préciser une échelle de longueur caractéristique des fluctuations turbulentes, l Cette longueur est ensuite utilisée à la place de μ_t pour déterminer le taux de dissipation une fois k évalué par l'expression (IV.2) :

$$\varepsilon = k^{3/2}/l \quad \text{(IV.4)}$$

IV.2 Conditions limites à l'entrée

A l'entrée de domaine, située à $x/H = 5$, le profile de vitesse pleinement développé est imposé. Celui-ci est extrait directement du calcul préalable d'une conduite de hauteur 10H et de 25H de longueur, ce qui est suffisamment long pour permettre au profil de vitesse de se développer, d'autant plus qu'une approximation d'un profile de vitesse turbulent était imposée en entrée. L'utilisation d'un calcul préalable pour obtenir les conditions d'entrée permet d'éviter d'avoir à utiliser pour chaque simulation un domaine long en amont de la géométrie et réduit ainsi la puissance et le temps de calcul requis à l'obtention d'une solution.

A l'aval, la condition spécifiée est une sortir de pression statique dont la valeur moyenne relative est de $\overline{P}_{stat} = 0$ Pa. Cette condition limite ne permet pas au fluide de pénétrer dans le domaine en cas de recirculation dans le plan de sortie et, conséquemment, aucune spéciation ne doit être faite relativement aux quantités turbulentes dans ce plan puisqu'elles sont alors calculées par le solveur. Ce type de condition limite est tout à fait indiqué puisque le plan de sortie est situé loin à l'aval de la géométrie et qu'aucune recirculation n'est attendue à cette position.

Pour émettre les conditions de l'écoulement a l'entrée de l'expérience Solazzo et al [107], les profils de l'énergie cinétique$k$, Eq (IV.2), taux de dissipation ε, Eq (IV.3), et le profil mesuré de la vitesse Eq (IV.5) sont considérés comme des conditions à l'entrée. Le profile de vitesse mesure est donne sur la Figure (IV.2) une bonne représentation est donne par l'expression suivante:

$$U(z) = (u_*/k)ln(z + z_0/z_0) \quad \text{(IV.5)}$$

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

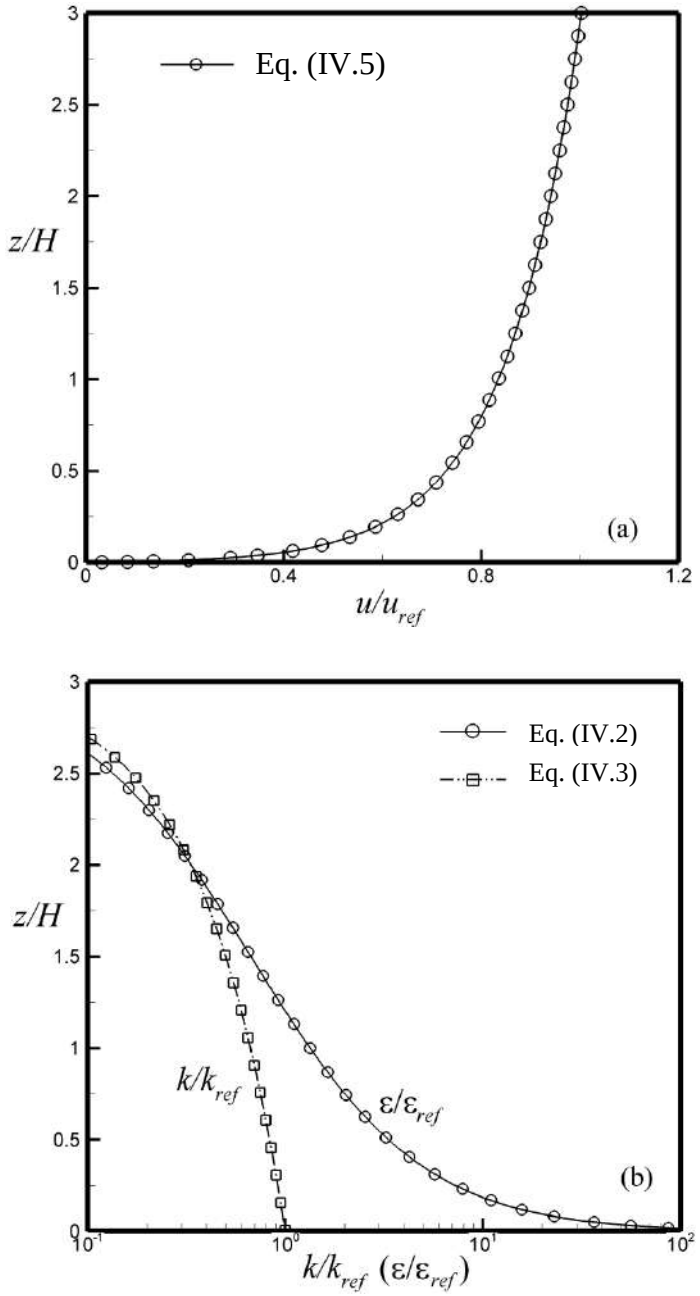


FIG.IV.2. Profils de vitesse,u, d'énergie cinétique, k, et taux de dissipation, ε, à l'entrée. À moins d'indication contraire, le modèle de turbulence privilégié pour tous les tests de cette étude est k-ε en raison de sa présumée aptitude à calculer les zones de recirculation.

IV.3. Maillage utilisée

La presque totalité des maillages crées pour cette étude sont fait d'éléments structurés uniformes puisqu'il est alors plus facile de contrôler la position des nœuds ainsi que les relations d'expansion entre les éléments voisins.

Lors du calcul de la résolution, le logiciel **ANSYS CFX** effectue la résolution des équations du problème par la méthode des volumes finis. Préalablement au calcul, le domaine physique continu doit être subdivisé en volume de contrôle discret par la création d'un

maillage. Le principe de base de la méthode des volumes finis implique l'intégration des équations sur chacun des éléments discrets définies par ce maillage. Dans **CFX**, les nœuds de celui-ci définissent les points de calcul est c'est la que l'information sur la solution stockée. Les volumes finis essentielles à la méthode sont quant à eux construits autours des nœuds comme le présent la Figure(IV.3).

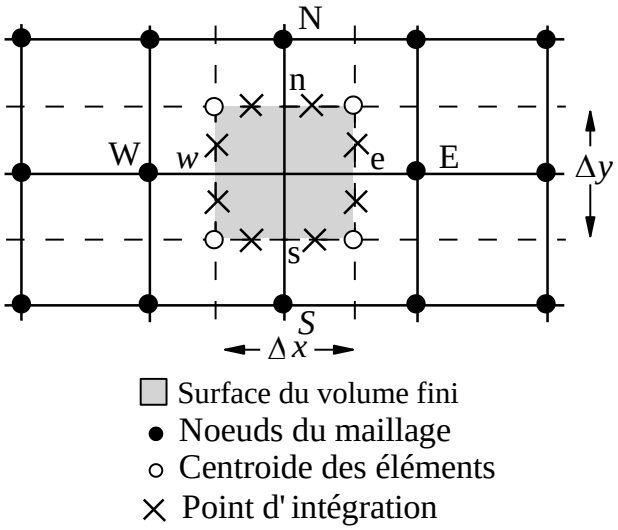


FIG. IV.3. Représentation 2D du maillage.

Le pre-precesseur **ICEM** associé a **ANSYS** est utilisé pour la construction du domaine de calcul et de génération de maillage. Une attention particuliére a été accordée à la protection, en particulier le traitement à pres de la paroi. Parce que l'adaptation de la grille, il est une étape importante dans la validation du modèle pour la future analyse. Dans tous les cas le choix de la configuration du maillage, en ce qui concerne le modèle de turbulence choisi, est fondée la valeur de la distance non dimensionnelle à partir de la paroi y^+ calculé en utilisant Eq (II.38).

Un raffinement du maillage au voisinage des parois solides a été considéré pour une simulation précise des effets de paroi. Pour démontrer la sensitivité de la solution a la taille du maillage, trois maillages on été considérés; à savoir un maillage grossier de 6×10^4 nœuds, maillage moyen de 1.275×10^5 nœuds et un maillage fin de 2.4×10^5.

La grille a été ajustée à plusieurs fois basée sur la valeur de y^+ des cellules proche de la paroi jusqu'à ce que les valeurs de y^+ étaient dans la gamme de limitation. Après le premier nœud prés de la paroi, le maillage est raffiné pour capturer le gradient élevé de vitesse, la concentration, la température, la pression et la quantité de turbulence dans le voisinage de la paroi. Pour le modèle de turbulence k-ε, une étude de l'indépendance de la grille a été réalisée pour cherchée la maille qui permet un compromis entre la précision souhaitée et le

cout de la solution dans le temps et la mémoire. Les trois maillages testées sont illustrés dans la Figure(IV.4).

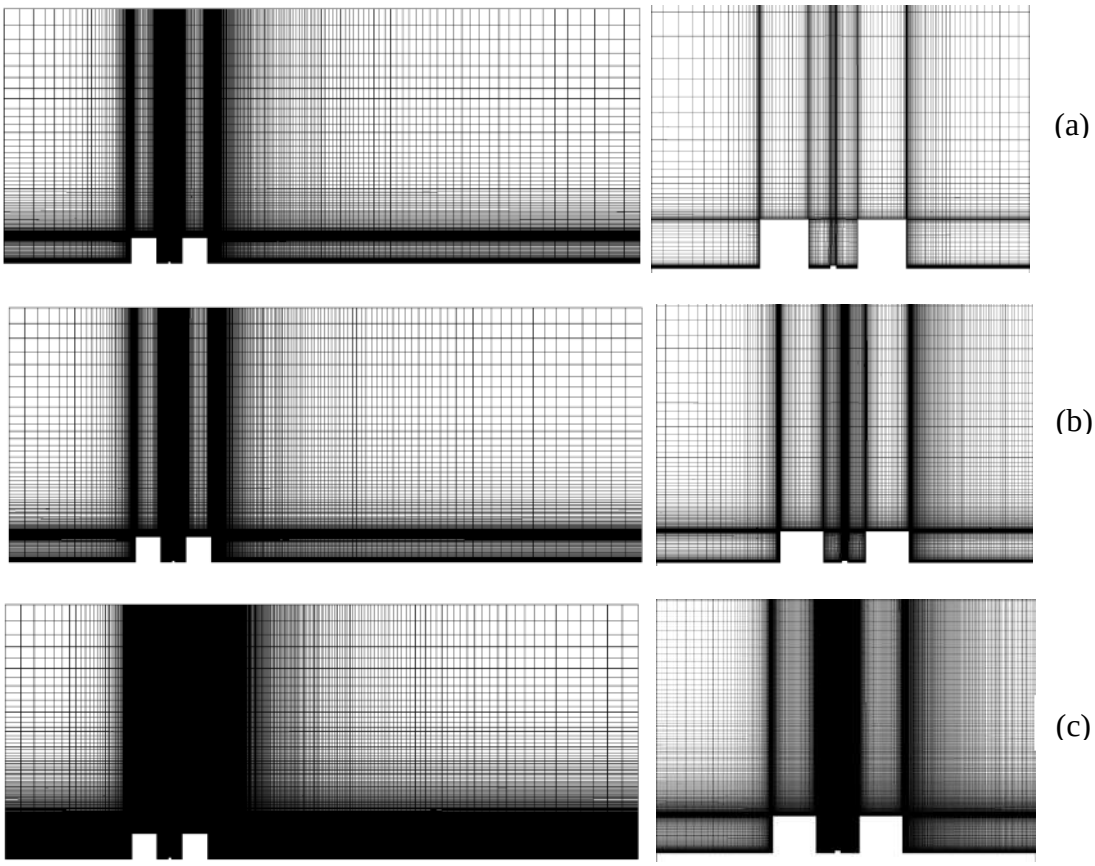


FIG.IV.4. Distribution des maillages a) grossier, b) moyen et c) fine.

Pour le modèle de turbulence qu'est utilisé des fonctions de la paroi (k-ε), la première cellule est placée dans le turbulent (région de loi log) juste après de la couche tampon qui satisfont à la condition de. Ainsi, Les trois maillages ont été générés avec la même distance du premier élément de la paroi (la hauteur de la cellule prés de la paroi) de 0.04H pour la famille de k-ε et dans chaque cas, le maillage a été obtenu en multipliant le nombre des points par un facteur de 1.2, dans les deux directions x et z. Ceci parce que, pour le premier cas, l'écoulement dans la sous-couche visqueuse et la couche tampon n'est pas besoin d'être résolu et les fonctions de paroi sont utilisés au lieu de calculer toutes les quantités. Toutefois, pour le second cas, l'écoulement dans la sous-couche visqueuse sera résolu et aucune fonction de paroi supplémentaire n'est introduite.

L'analyse des tests de convergence portant le maillage devait permettre d'identifier quelques situations peuvent nuire à la convergence des calculs d'écoulement autour d'un obstacle. Néanmoins, malgré les discrétisations désavantageuses, toutes les simulations on peut être amenées de façon très régulière à des résidus RMS de 1×10^{-8} pour toutes les différentes équations. Une courbe de convergence typique est montrée à la Figure (IV.5) pour

que le lecteur puisse juger lui-même de la régularité de la convergence. Tous calculs sont effectués dans les conditions de régime permanent (régime permanent).

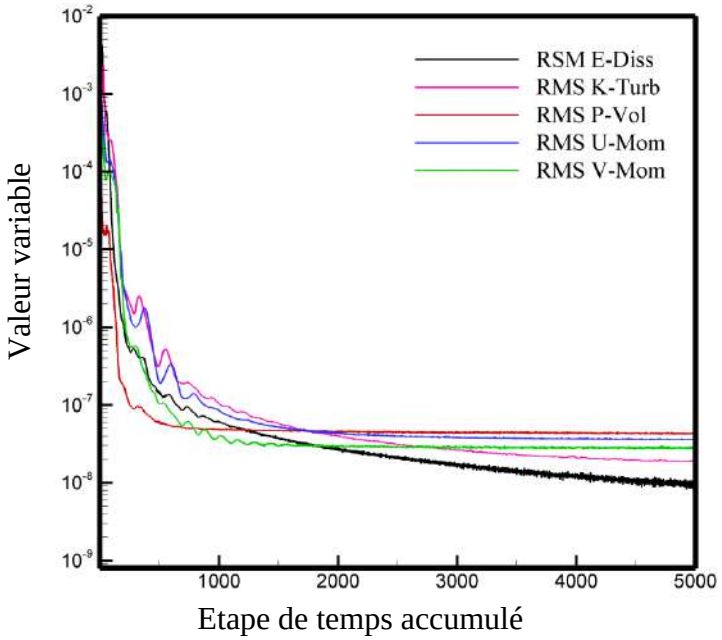


FIG. IV.5. Courbe de convergence pour le maillage raffiné avec modèle de turbulence k-ε.

La simulation numérique a été validée en se référant aux différentes études numériques disponibles dans la littérature. La figure (IV.6) comparé nos résultats avec ceux de Solazzo. Cette étude a été réalisée sur la dispersion des polluants autour des bâtiments avec une source ponctuelle sont située entre des bâtiments centraux. La comparaison entre les résultats obtenus avec un maillage grossier, moyen et fine, en utilisant le modèle de turbulence k-ε, est indiquée aux Figures (IV.6) (a) et (b). On peut montrer que, en termes de profils moyens de vitesse et de l'énergie cinétique de l'écoulement, la convergence de la solution a été atteinte et les figures montrent la dépendance des profils de vitesse et de l'énergie cinétique sur la taille du maillage. On peut constater que le maillage moyen donne des résultats plus proche a l'expérimentale et plus rapide dans la simulation. Pour être plus préludent et plus précis, on a choisi le maillage moyen pour les simulations numériques des autres configurations comme illustré dans les autres configurations comme illustré dans les Figures (IV.7). En outre raffinement de maillage ont été testés et ne se présente pas par souci de conclusion.

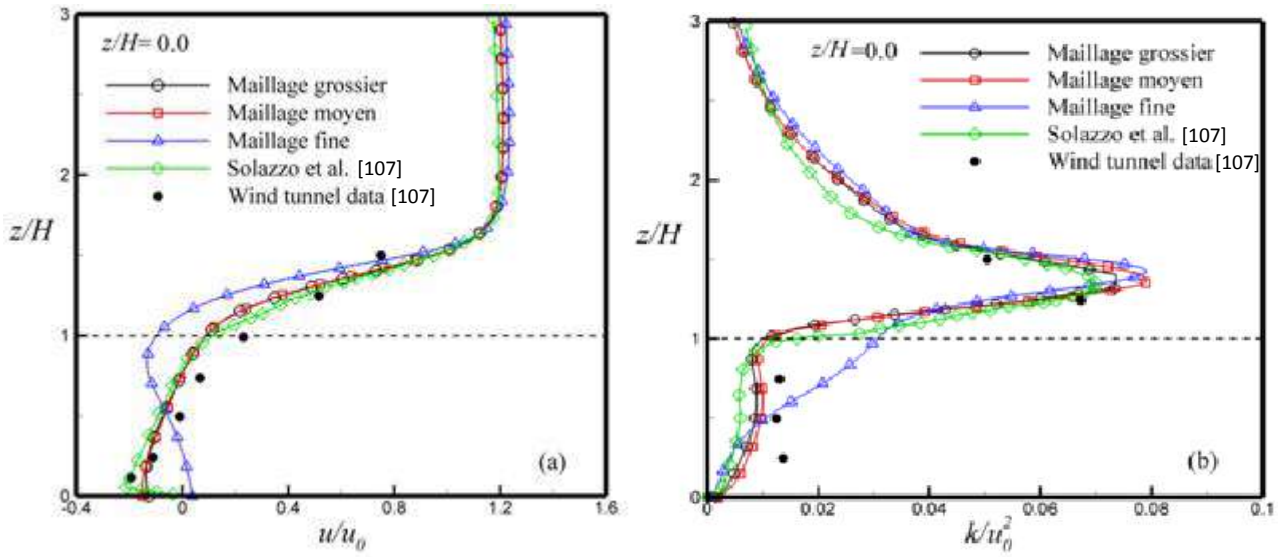
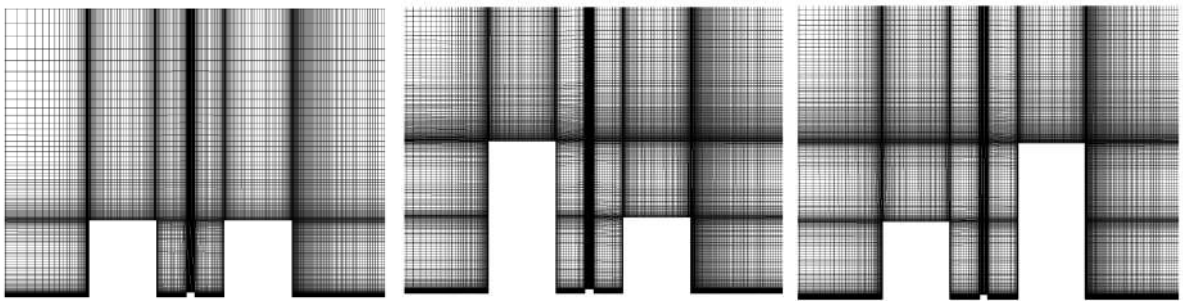
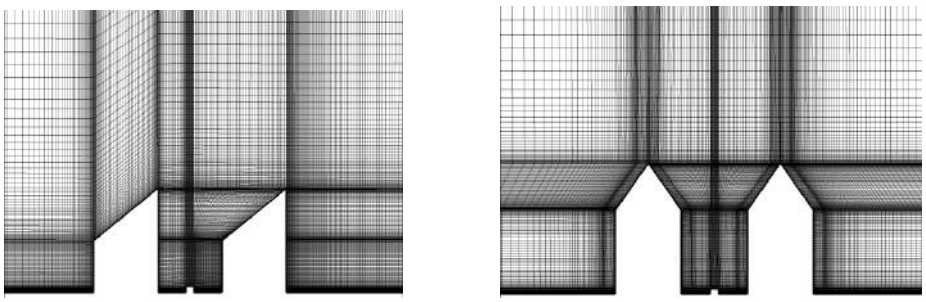


FIG.IV.6. Effet du maillage sur les profils, (a) de vitesse u/u_0 et (b) de l'énergie cinétique k/u_0^2.

Pour traiter toujours l'aspect architectural des canyons des rues et son impact sur la ventilation et le renouvellement de l'air dans les zones urbaines, on a ajouté dans cette simulation des autres configurations comme des toits inclinés avec un angle d'inclinaison de 45° et l'influence du rapport d'aspect de la hauteur et de la largeur entre les deux bâtiments.



a) toit plat b) 2H en amont du bâtiment c) 2H en aval du bâtiment



d) toit au vent incliné e) toit au vent et côté sous le vent incliné

FIG.IV.7. Distribution des maillages pour les différentes configurations géométriques.

IV.4. Résultats et discussions

La figure (IV.8) montre les profils de vitesse u dans les différentes sections ($x/H = 4.375, 6.218,$ 6.781 et 8.437) du bâtiment sont obtenus avec les cinq configurations géométriques (toit plat, 2H avant du bâtiment, 2H après du bâtiment, toit au vent incliné et toit au vent et côté sous le vent incliné). On peut montrer que, approcher du bâtiment, les profils de composant de la vitesse u obtenus avec les différents configurations géométriques sont comparables dans la section $x/H = 4.375$ et sauf la configuration (2H avant du bâtiment) sous-estimé une petite partie de la vitesse u prés de la paroi. Dans les deux sections $x/H = 6.218$ et 6.781, i.e. entre les deux bâtiments une grande variation des vitesses sera de l'ordre de -2 à 10.7 (m/s) et de -6 à 11 (m/s) respectivement, à un niveau d'environ une moitié de la hauteur du bâtiment. On peut dire aussi que la distribution des vitesses est constante en quelque sorte au dessus de l'épissure de la couche limite, δ. On peut montrer que, loin de deuxième bâtiment, ($x/H = 8.437$), les profiles de composant de la vitesse u obtenus avec les différents configurations géométriques, montrent une légère déviation a été observée à environ mi-hauteur de l'obstacle. Loin dans l'aval de l'obstacle, pratiquement toutes les configurations géométriques prédisent la récupération de l'écoulement. Les différentes configurations géométriques où les régions commencent parvient pas à estimer la vitesse correcte correspondent à l'apparition de vortex de recirculation qui se forme à la base frontale du bâtiment, entre les deux bâtiments et après le deuxième bâtiment. L'emplacement du toit sur l'immeuble au vent a détourné la direction de la vitesse, et réagit comme un obstacle ce qui réduit la vitesse d'écoulement entrant dans le canyon de rue. Pour les deux cas du toit côté sous le vent incliné et les toits côté sous le vent et au vent inclinés, on remarque l'inversion des profils dans le canyon de rue. Cette différence s'explique aussi par la position des toits sur l'immeuble au vent. L'immeuble au vent avec un toit incliné détourne les vitesses vers le canyon de rue par contre pour l'immeuble au vent avec un toit plat les vitesses se déplace hors de la cavité comme illustré les contours de vitesse dans les Figures (IV.12 et IV.16). Le changement rapide du gradient de pression, causée par le point de stagnation, empêche adéquatement pour capturer le champ d'écoulement dans cette région comme illustré dans les figures de l'effet de toit et la hauteur du bâtiment sur les profils de pression pour les différentes stations. Les figures (IV.9) montrent l'effet de la forme du bâtiment sur la pression. On constate aussi que, la variation de pression dépend fortement sur la forme des toits du bâtiment. En particulier, une grande variation de pression est observée dans le cas de toit au vent et côté sous le vent incliné par apport les autres formes des toits.

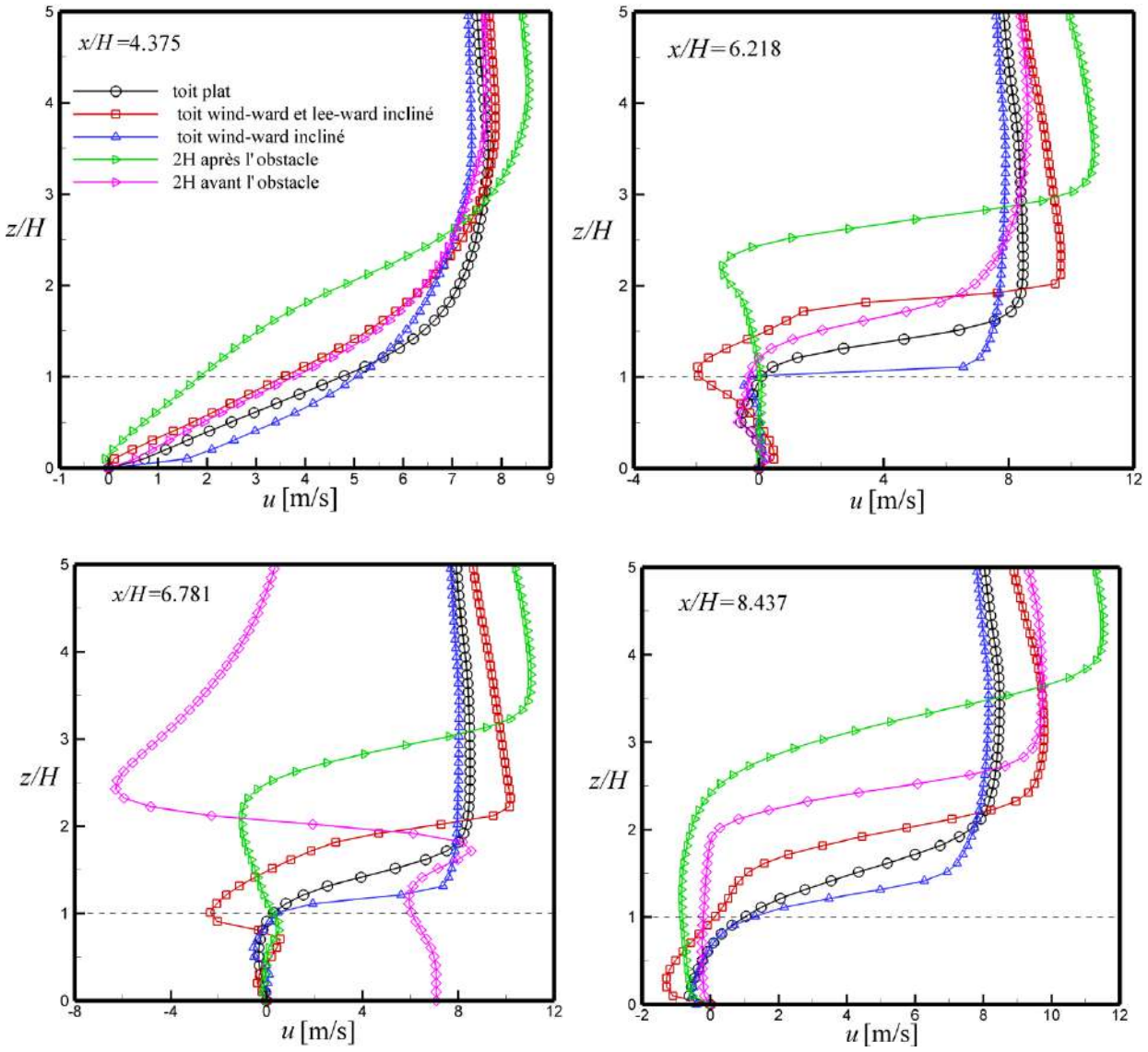
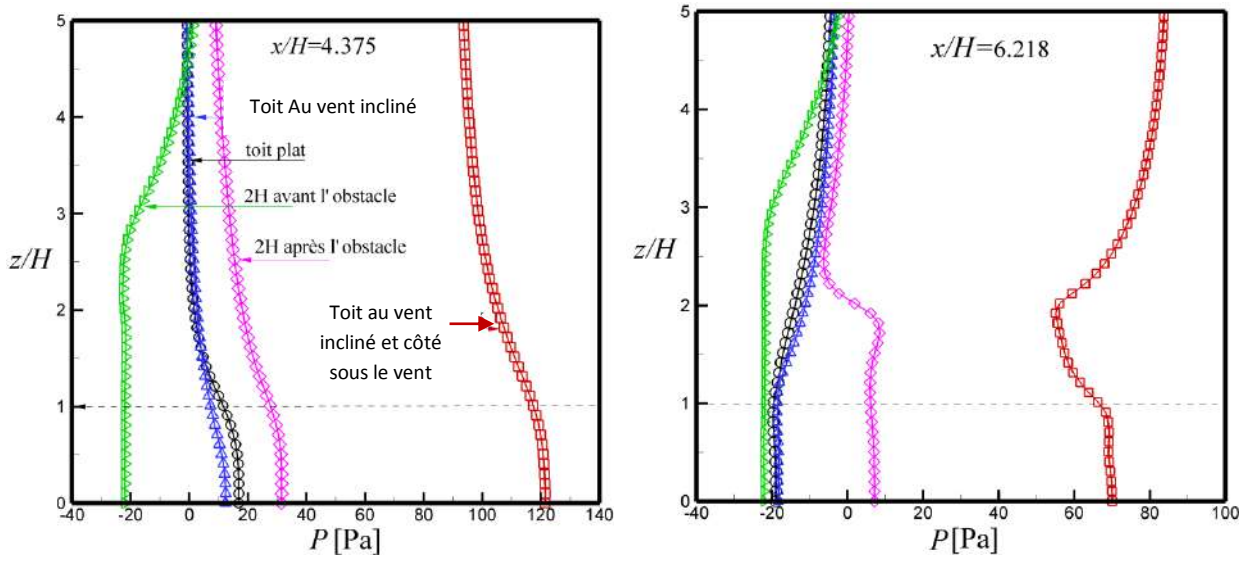


FIG.IV.8. Profils de vitesse obtenus pour les différentes configurations (toit au vent incliné, toit plat, 2H avant du bâtiment, 2H après du bâtiment et toit au vent et côté sous le vent incliné).



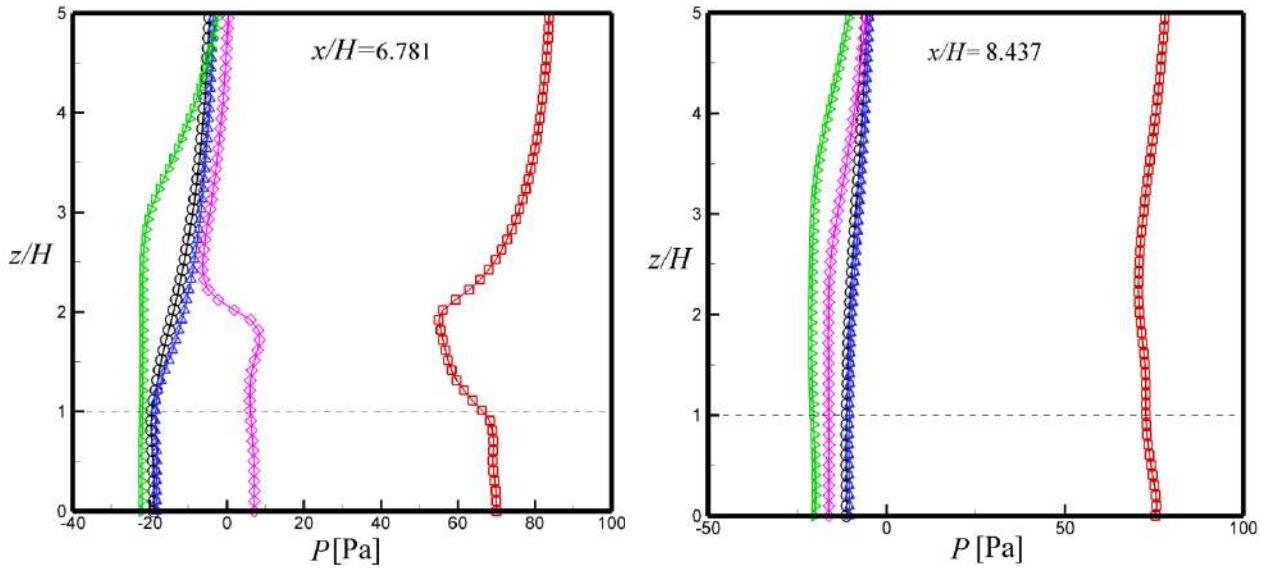


FIG.IV.9. Profils de pression obtenus pour les différentes configurations (toit au vent incliné, toit plat, 2H avant l'obstacle, 2H après l'obstacle et toit au vent et côté sous le vent incliné).

Les figures (IV.10) et (IV.11) illustrent les profils de température et de concentration pour les différentes sections ($x/H = 6.218$, 6.781 et 8.437) du bâtiment sont obtenus avec les cinq configurations géométriques. On constante que, les profils de concentration (température) se coïncident au dessus des toits du bâtiment pour les quatre géométries (toit plat, toit côté sous le vent incliné et au vent incliné, toit au vent incliné et 2H avant du bâtiment) vers une valeur constante dépendante du bâtiment, avec des faibles concentrations. Cependant pour la géométrie 2H après du bâtiment les résultats indiquent que la température et la concentration des polluants sont constantes loin de toit du bâtiment. Dans la partie($0 < z/H < 1$), la concentration est maximale puisque la source de pollution est placée à cet endroit pour les toits (toit plat, toit côté sous le vent incliné et au vent incliné, toit au vent incliné et 2H avant du bâtiment), tandis que, la température et la concentration des polluants, dans le cas de géométrie 2H avant du bâtiment, est maximum pour($0 < z/H < 3.5$). Pour les cinq cas le transport du polluant est généré par le vortex dominant dans le canyon de rue et par conséquent la concentration (température) des polluants est élevée sur le mur au vent (côté sous le vent). On peut noter que la forme des toits et la hauteur du bâtiment à une grande influence sur la dispersion des polluants dans un canyon de rue. Les résultats montrent que les rue-canyon avec des rapports d'aspect élevés, les polluants se transportent hors de la cavité. On peut dire que cette circulation du vent permet le renouvellement de l'air et la ventilation du canyon de rue. En général, les concentrations du mur au vent. Ceci affirme la présence d'un vortex inverse tournant dans le canyon de rue et qui tend à inverser le transport du polluant.

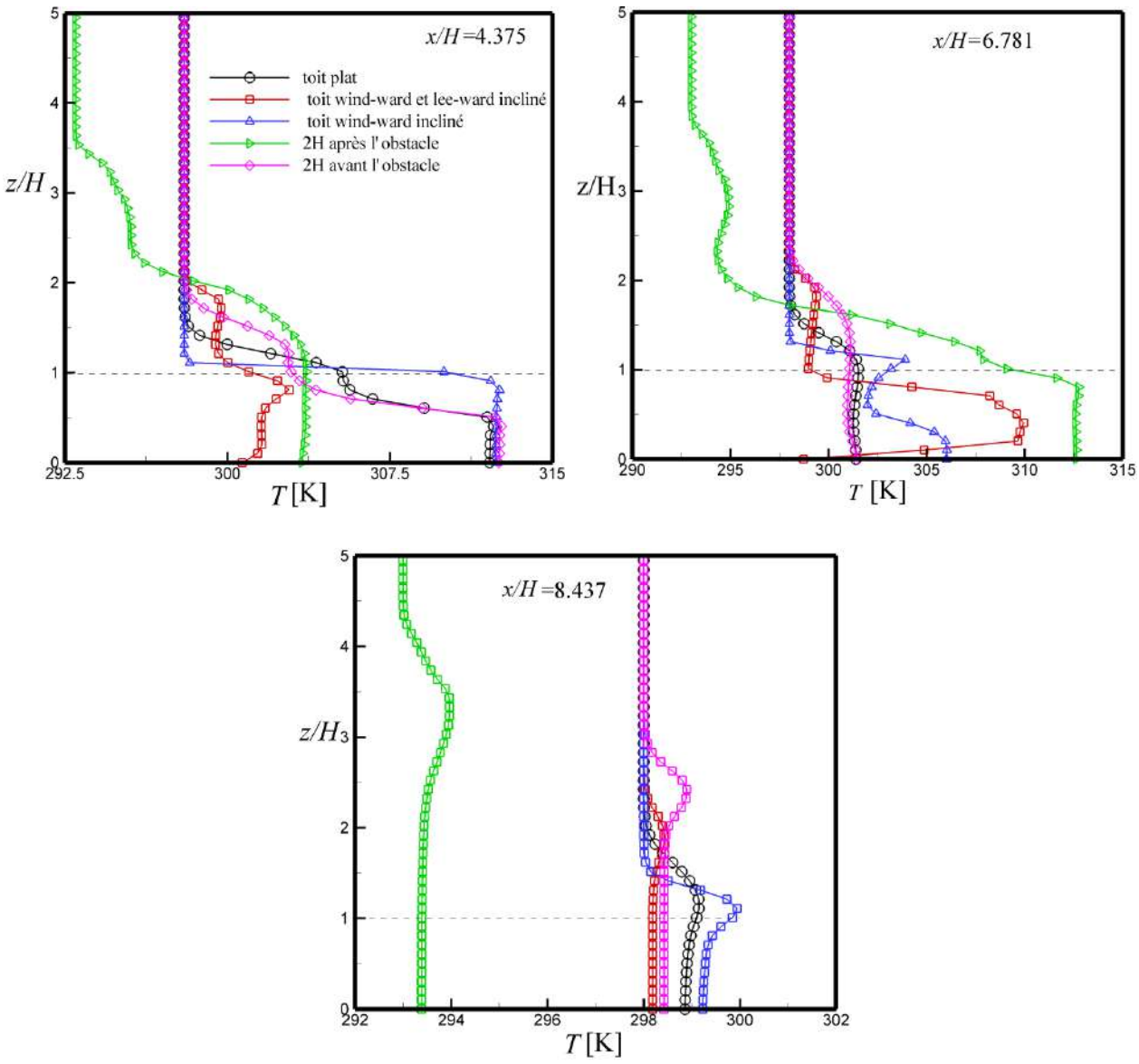


FIG.IV.10. Profils de température obtenus pour les différentes configurations (toit au vent incliné, toit plat, 2H avant l'obstacle, 2H après l'obstacle et toit au vent et côté sous le vent incliné).

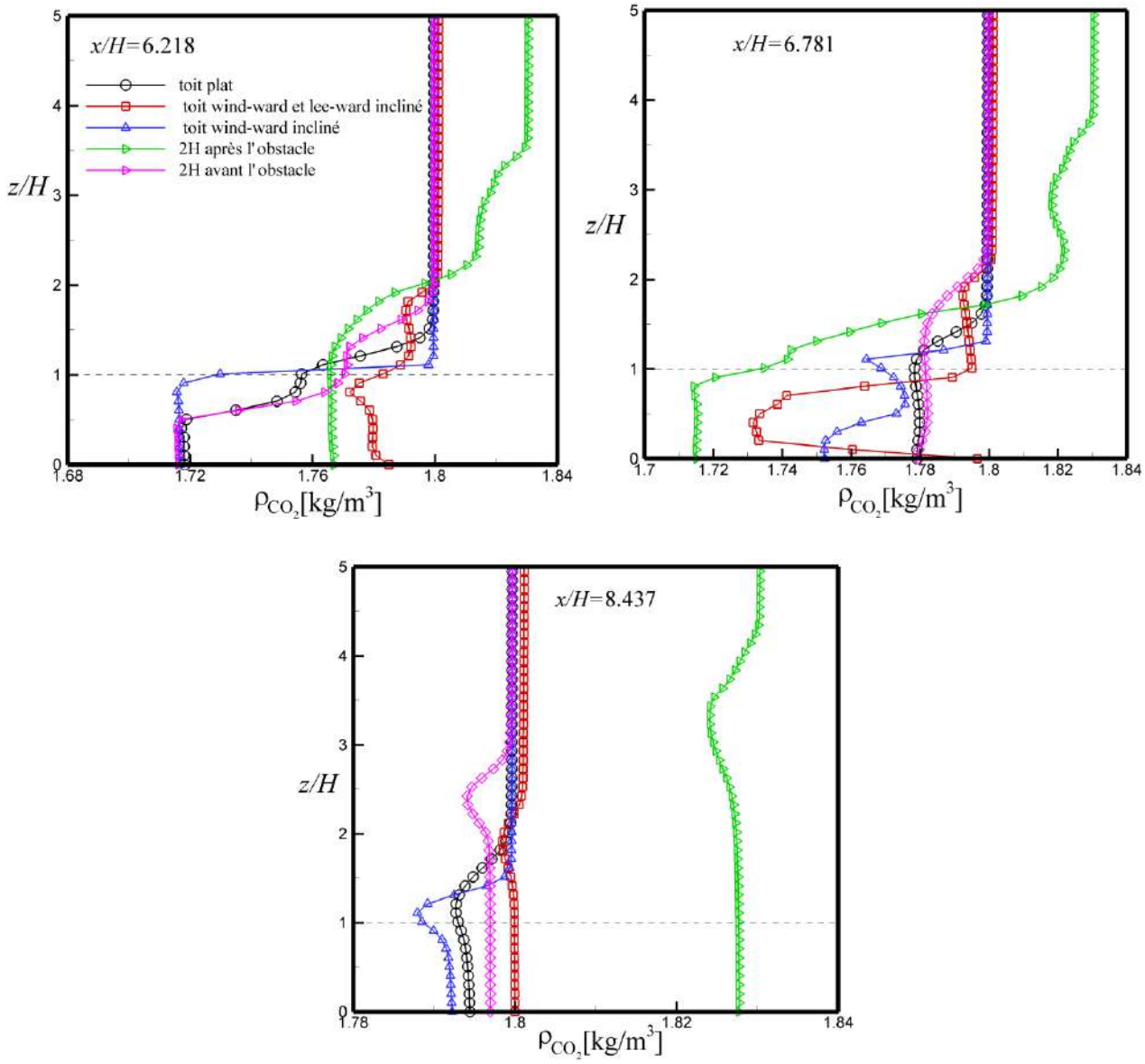


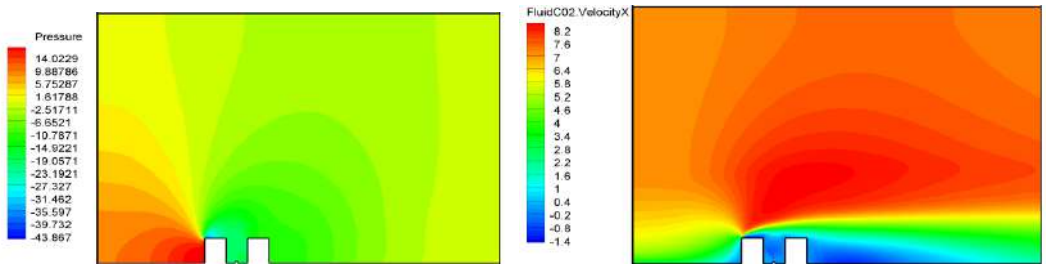
FIG.IV.11. Profils de concentration obtenus pour les différentes configurations (toit au vent incliné, toit plat, 2H avant l'obstacle, 2H après l'obstacle et toit au vent et côté sous le vent incliné).

Les contours de la distribution de pression, de vitesse, de température, de la densité (CO2) et les lignes de courant pour les différentes configurations géométriques sont utilisés pour visualiser la structure de l'écoulement dans le domaine. Les lignes de courant obtenues par les cinq géométries sont représentées sur les Figures (IV.12-IV.16) Généralement, en termes de forme qualitative globale toutes les configurations peuvent prédire la structure d'écoulement formé par la séparation, recirculation et rattachement. On peut montrer que, avec les cinq géométries utilisées, les caractéristiques générales de l'écoulement et la prédiction globale des modes avant, supérieur et arrière de vortex sont tout à fait semblables, bien que certaines différences soient visibles. La description de comportement commun est la

suivant: l'approche du bâtiment, le flux stagne à la surface au vent du bâtiment. Certains écoulement circule vers le bas et forme un petit vortex à la base frontale de premier bâtiment. L'écoulement s'écoulant vers le toit se sépare au niveau de bord du toit au vent formé deux ou trois vortex de recirculation un au niveau de toit du bâtiment dans le sens des aiguilles d'une montre (comme illustré dans les trois cas : toit plat et 2H en amont du bâtiment et 2H en aval du bâtiment incliné). L'autre vortex occupe le canyon de rue avec un sens de rotation opposé au vortex supérieur. On note que le vortex supérieur possède des vitesses assez élevées que le vortex inférieur. Trois vortex opposés sont ainsi observés, mais dans les deux cas : pour un toit au vent incliné et pour un toit au vent et côté sous le vent incliné. Le vortex supérieur est restreint entre les deux extrémités des toits et qui tend à inciter deux petits vortex inferieur dans la limite supérieur de canyon de rue. On remarque aussi dans ces deux cas, que les vitesses du vortex inferieur est plus faible par rapport au vortex supérieur. Par rapport au cas de référence (avec un toit plat, 2H en amont du bâtiment et 2H en aval du bâtiment), marqué par la présence d'un vortex unique principal et d'autre vortex secondaire faible, on remarque que la présence des toits inclinés sur l'immeuble au vent et côté sous le vent, en général, conduit à un déplacement de ce vortex principal à un haut niveau (entre les toits) et le développement d'un contre vortex occupant la cavité et avec des vitesses moins intenses. Une autre remarque, à propos des distributions de vitesses, il y'a un déplacement vertical induit par la forme des toits inclinés qui tend à dévier les vitesses. A la pointe du premier bâtiment, la séparation de l'écoulement créé un sillage de flux très recirculation, derrière de deuxième bâtiment, qui est dominé par un vortex en forme d'arc dans la région de sillage. La prédiction des points de séparation, stagnation et de rattachement peut considérer comme un test fondamental de l'effet de la forme du bâtiment dans les simulations d'écoulement séparé. Le tableau (IV.2), il peut montrer que le point de séparation de vortex en amont de l'obstacle est sous-prévu par les toits plat et la géométrie 2H en aval du bâtiment, la sous-estimation est plus prononcée dans la géométrie 2H en amont du bâtiment et le toit au vent et côté sous le vent incliné, cependant, il est légèrement surestimé par la géométrie de toit côté sous le vent incliné. En effet, la zone de recirculation en aval du bâtiment formé un grand tourbillon avec un point de réattachment X_r/H. La zone de recirculation de l'écoulement derrière du bâtiment est surestimée résultant dans une plus grande longueur de rattachement qui sous-estime donc la récupération de flux par les géométries 2H en aval et 2H en amont, mais les autres formes (toit plat, toit côté sous le vent incliné et au vent et côté sous le vent incliné) estimes assez la récupération de flux comme le montre dans les Figures (IV.12-IV.16) et Tableau (IV.2). Certaines instabilités de la couche cisaillée au niveau des toits sont responsables de la perturbation du mélange. La sensibilité de la couche cisaillée par la forme des toits a une

influence significative sur la ventilation d'un canyon de rue. Le cas des toits inclinés montre des valeurs de déformation pour la vitesse verticale prés des toits. Cette déformation indique une perturbation du mouvement vertical causé par la structure turbulente cohérente. Comme référence les résultats de Christen [108] ont montré une dynamique d'écoulement différente pour le cas des toits plats et des toits inclinés avec une déformation au niveau des vitesses verticales. Ceci indique une diminution dans l'échange vertical causé par le déplacement d'une structure turbulente présente dans le cas des toits plats et maintient le transfert de masse avec l'air au dessus du canyon de rue.

Pour l'évolution de la pression, de vitesse, de température et de la densité pour satisfaire à l'équation de la quantité de mouvement, la pression statique augmente sensiblement dans la partie avant de la zone de recirculation et diminue au-dessus de l'obstacle. Pour les contours de vitesse, les résultats sont qualitativement similaires à ceux obtenus dans les contours de pression. On constate que la vitesse diminue dans la partie avant du bâtiment et augmente dans la partie au-dessus de toit du bâtiment. Les figures (IV.12-IV.16) montrent aussi la comparaison des températures et des concentrations des polluants sur différentes configurations géométriques. On constate que, dans le cas des configurations géométriques (toit plat, bâtiment de hauteur 2H en aval, toit au vent incliné et toit côté sous le vent et au vent incliné), les températures sont élevées sur le mur au vent, tandis que les autres géométries les températures sont élevées sur le mur côté sous le vent. Des concentrations du polluant sont réparties inversement par rapport au cas de température. Le transport des polluants vers le mur côté sous le vent se produit avec des valeurs considérables et des valeurs négligeables sur les murs au vent. Cette augmentation est continue au niveau du sol, jusqu'à atteindre la concentration maximale prés de l'emplacement de la source de pollution. Une chute de concentration (température) et est prévue à gauche de la source, jusqu'au mur côté sous le vent où la concentration (température) s'affaiblie.



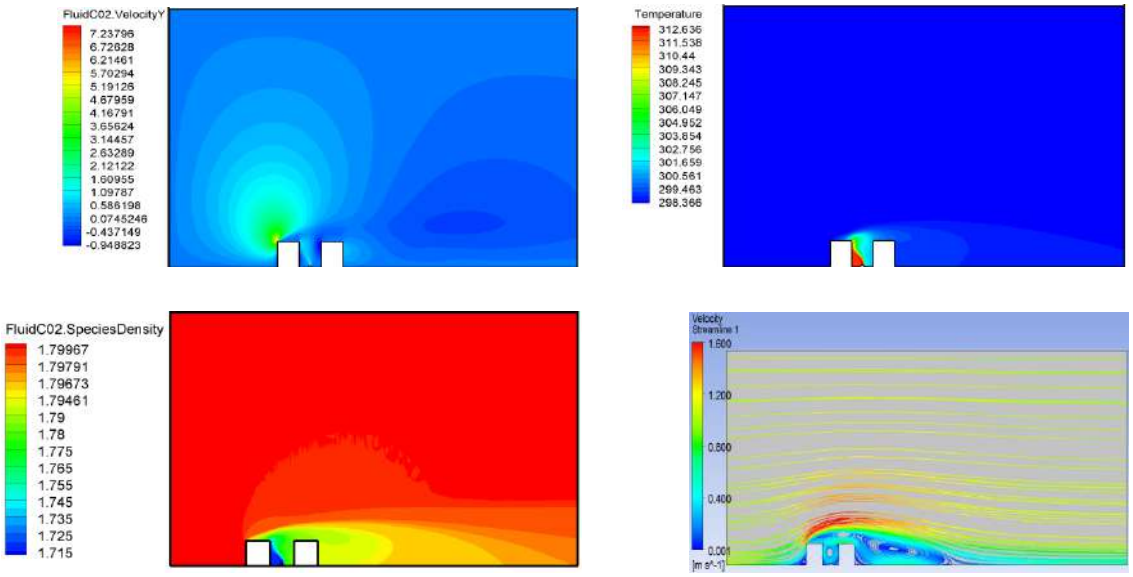


FIG.IV.12. Comparaison des contours dans le plan de symétrie $y/H = 0$: pression, vitesse, u, vitesse, v, température, densité et rationalise pour un toit plat.

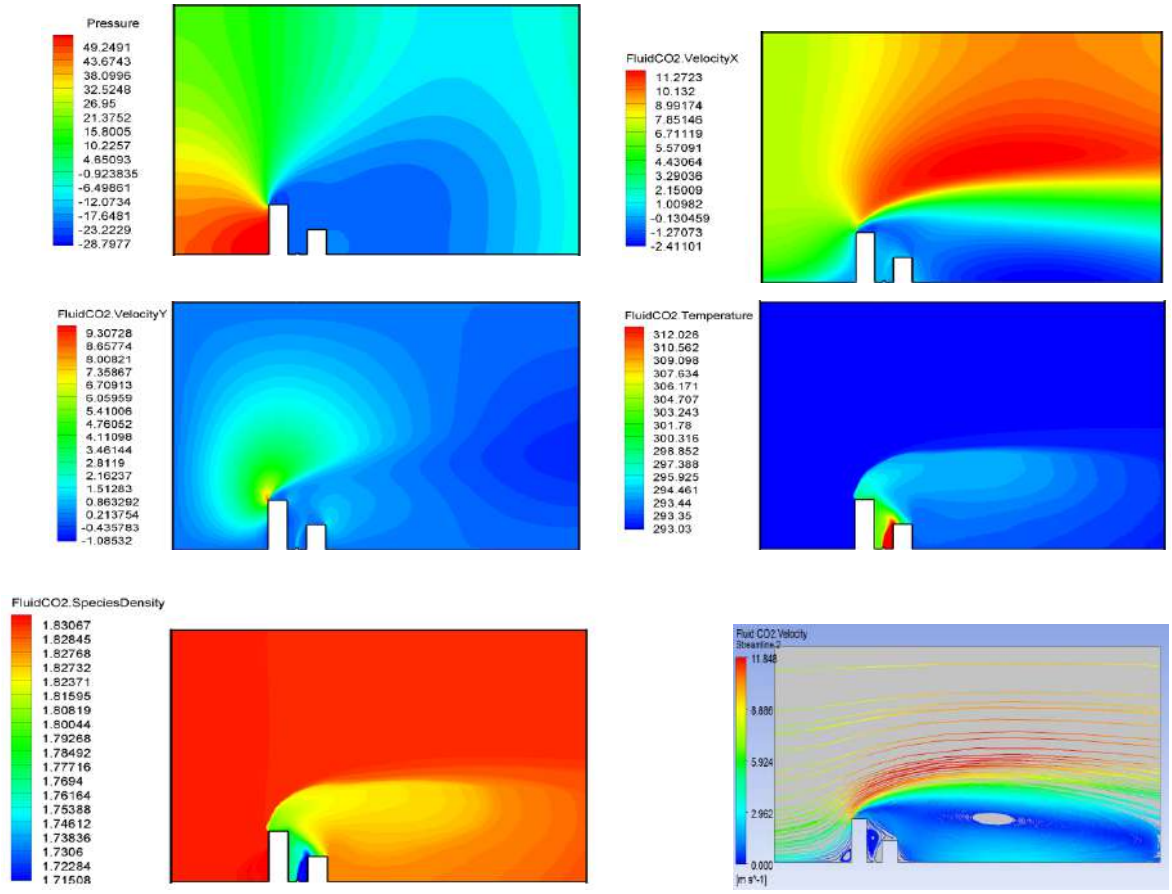


FIG.IV.13. Comparaison des contours dans le plan de symétrie $y/H = 0$: pression, vitesse, u, vitesse, v, température, densité et rationalise pour un bâtiment de Hauteur 2H en amont.

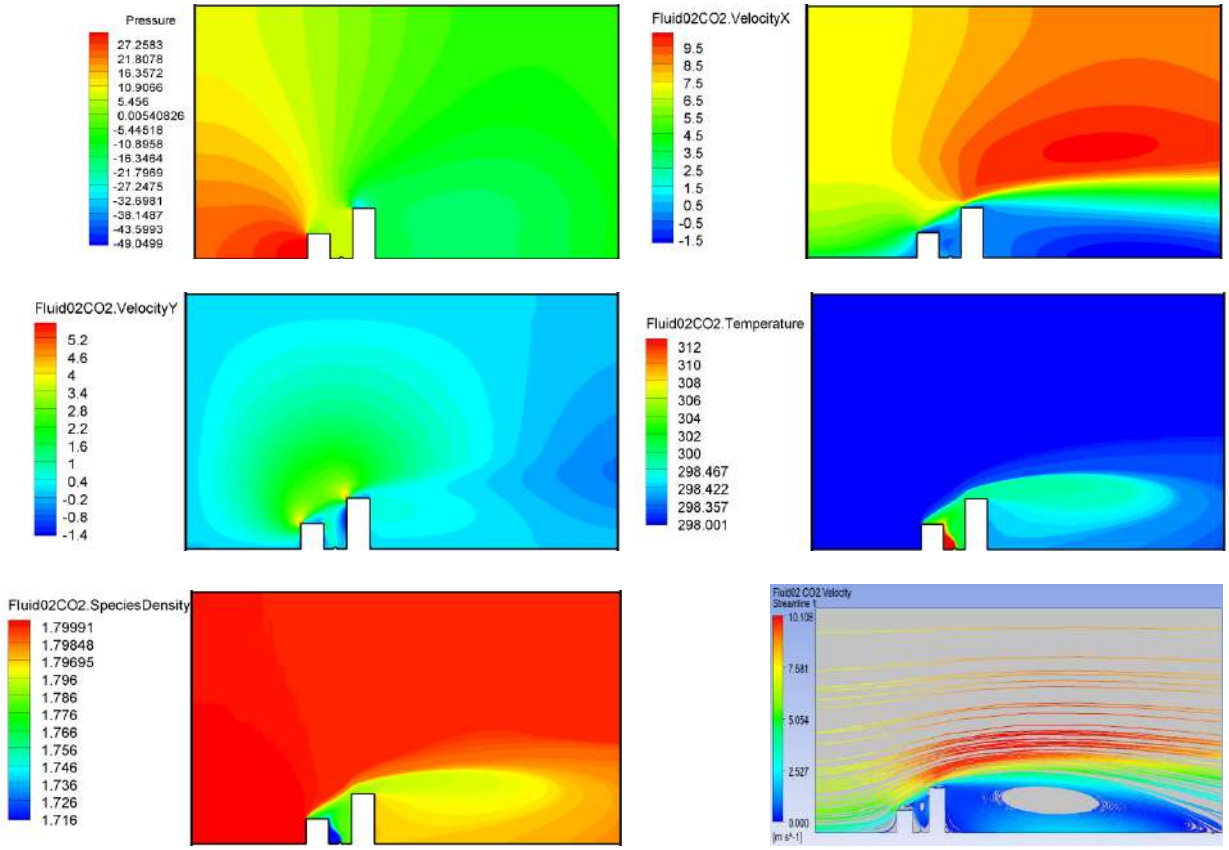
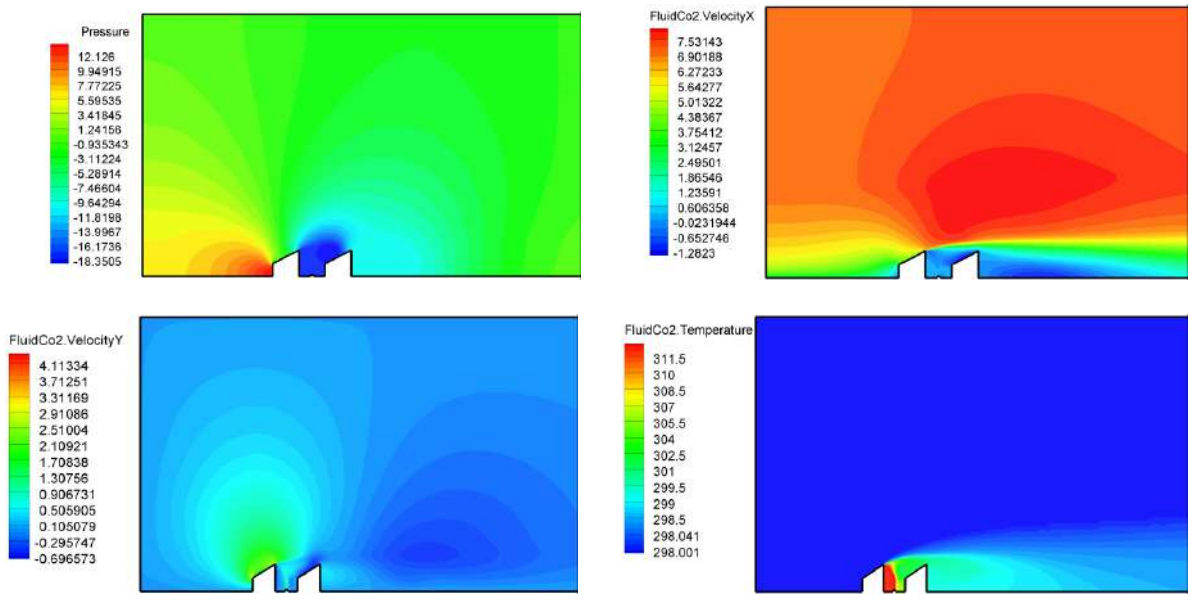


FIG.IV.14. Comparaison des contours dans le plan de symétrie $y/H = 0$: a) pression, vitesse, u, vitesse, v, température, densité et rationalise pour un bâtiment de Hauteur 2H en aval.



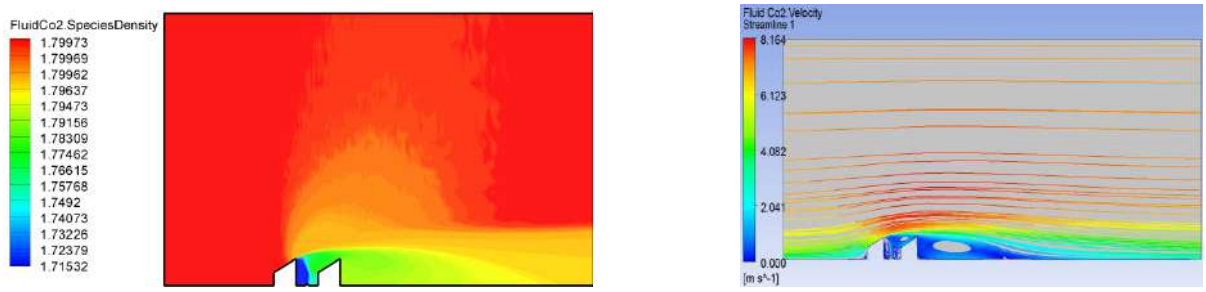


FIG.IV.15. Comparaison des contours dans le plan de symétrie $y/H = 0$: a) pression, vitesse, u, vitesse, v, température, densité et rationalise pour un toit au vent incliné.

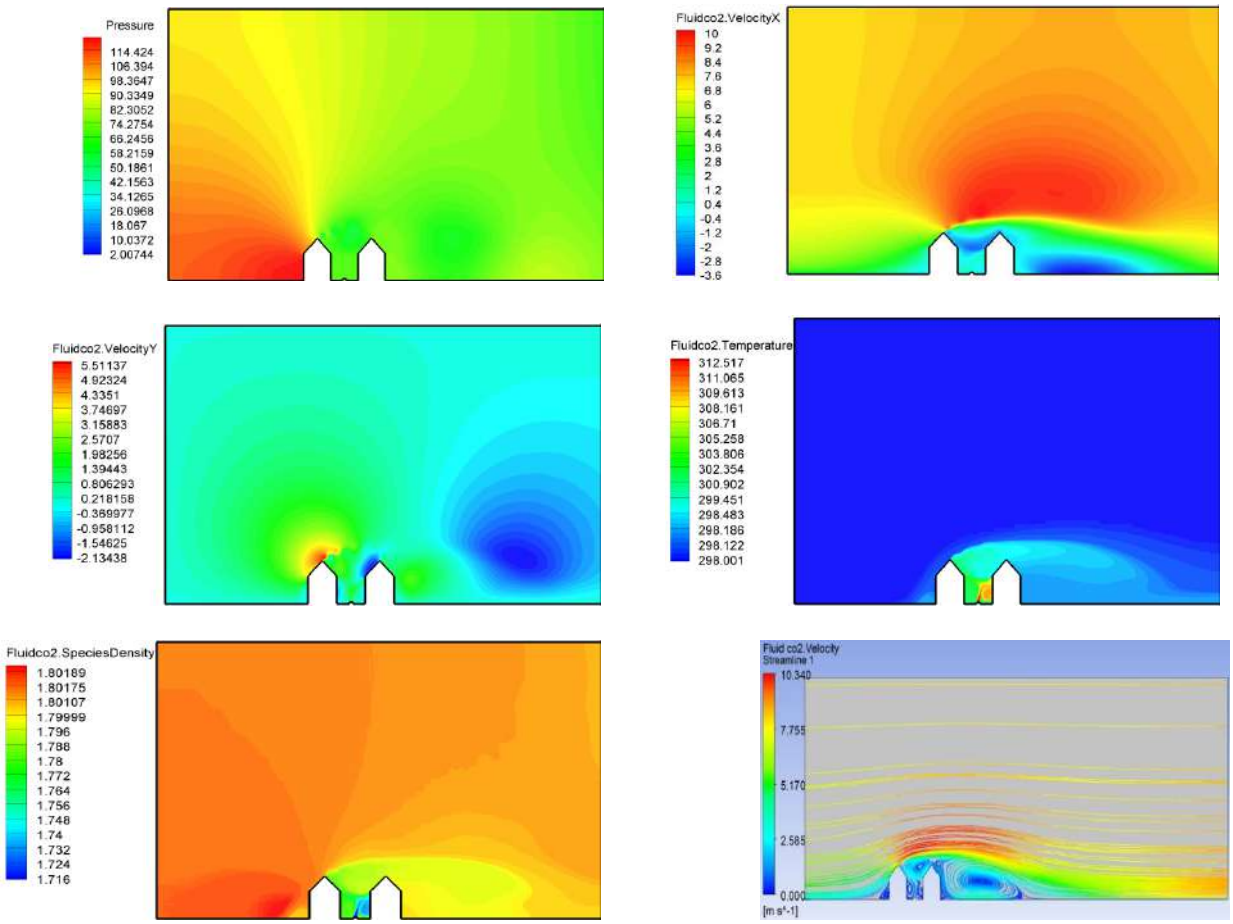


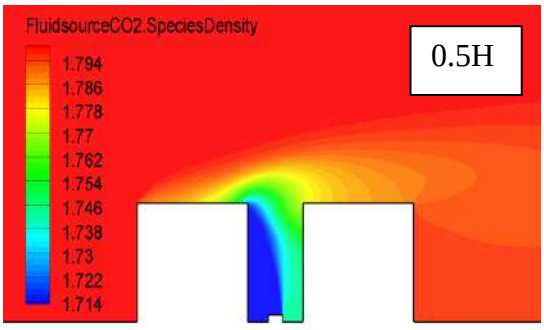
FIG.IV.16. Comparaison des contours dans le plan de symétrie $y/H = 0$: a) pression, vitesse, u, vitesse, v, température, densité et rationalise pour un toit au vent et côté sous le vent incliné.

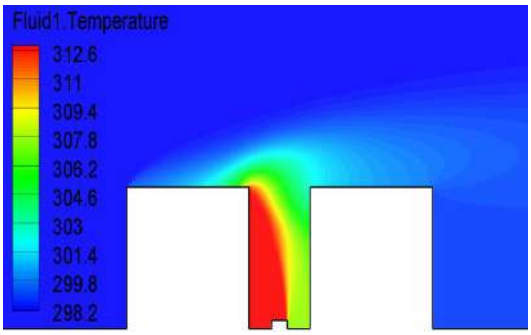
TAB.IV.2. les longueurs caractéristiques du champ d'écoulement pour les différentes configurations géométriques.

Modèle	Les longueurs caractéristiques		
	(X_R/H)	(X_{F1}/H)	(Y_{F1}/H)
Toit plat	6.0525	0.5062	0.4799
2H en amont	17.0000	1.1637	1.0597

2H en aval	16.4691	0.6625	0.6578
Toit côté sous le vent incliné	5.3223	4.7007	0.3193
Toit au vent et côté sous le incliné	5.0926	1.2590	0.7614

Les figures (IV.17) montrent la concentration et la température du polluant dans des canyons de rue avec les rapports d'aspect $W/H = 0.5,\ 1,\ 2,\ 4$. Dans le cas référence$W/H = 1$, on observe une grande concentration des polluants sur le mur au vent et une faible concentration des polluants dans le mur côté sous le vent, mais dans le cas des contours de température on observe que, une grande concentration de température des polluants sur le mus côté sous le vent et une faible température des polluants dans le mur au vent. Puisque l'écoulement de l'air dans le canyon de rue se caractérise par un vortex tournant dans le sens des aiguilles d'une montre, il sert à transporter les polluants vers le mur au vent. Pour le canyon de rue $W/H = 4,\ 2$ et 0.5 dans les figures, on remarque que, la dispersion des polluants est similaire au cas de référence$W/H = 1$. Une grande accumulation des polluants sur le mur au vent est générée par le vortex primaire caractérisant le mouvement de l'air dans les quatre cavités. Le niveau de transport des polluants sur le mur au vent dépend de l'intensité des vitesses caractérisant le vortex dans le canyon de rue. Dans le cas d'un canyon de rue $W/H = 0.5$, on note la présence d'une zone stagnante des polluants dans la partie inferieure de la cavité. Une grande accumulation des polluants se produit au niveau du mur côté sous le vent.





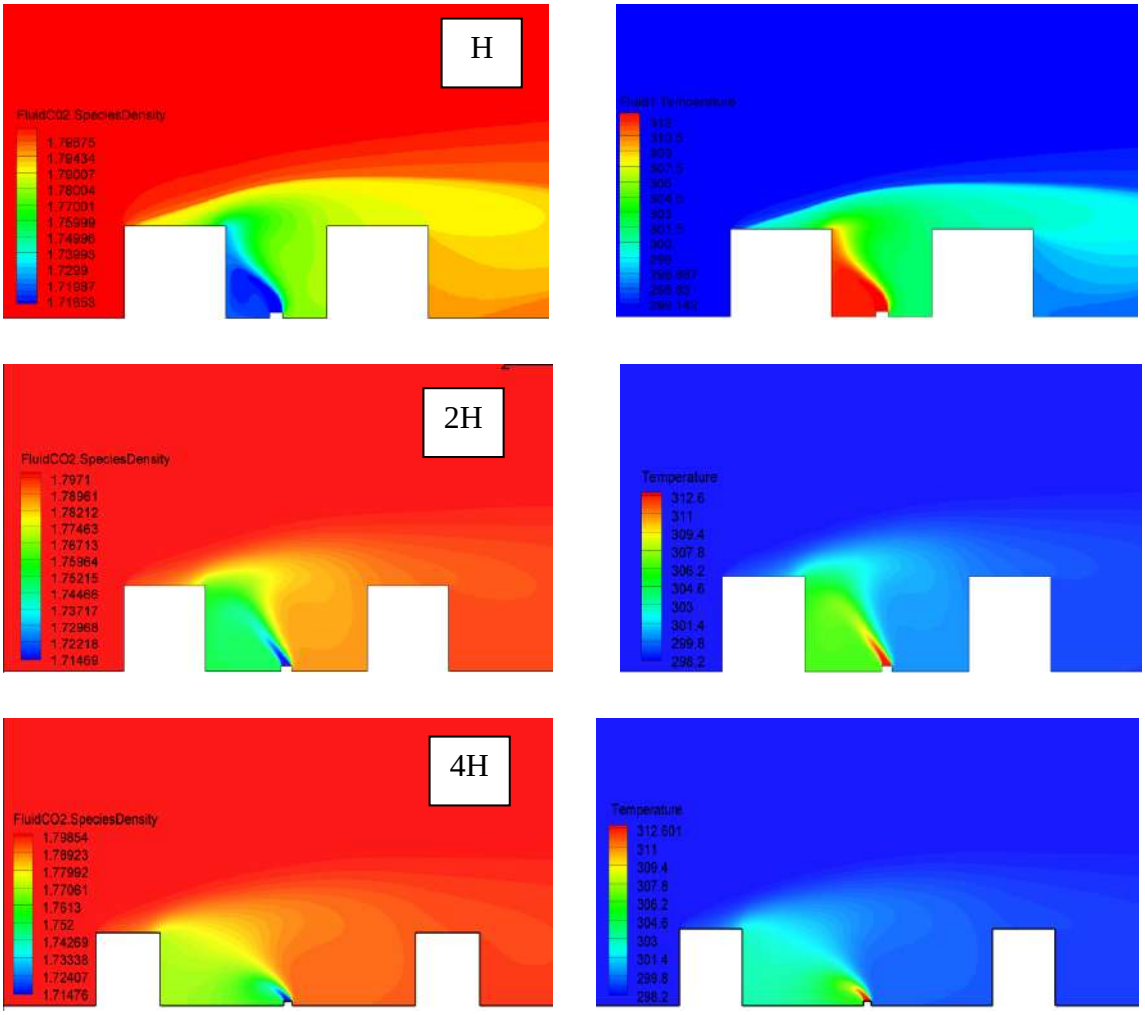


FIG.IV.17. Contours de concentration et de température des polluants dans les canyons *de rue* $W/H = 0.5$, 1, 2 et 4.

Conclusions générales

Ce travail propose une réponse partielle sur la dispersion des polluants d'un traceur passif, à savoir la circulation de l'air dans un canyon de rue. Le choix est porté sur une simulation numérique d'un écoulement de l'air dans un canyon de rue avec une variation du rapport d'aspect et une modification des formes des toits pour évaluer l'influence de l'architecture de la rue sur l'écoulement de l'air et la dispersion des polluants en ajoutant une source de pollution pour les même simulations. L'approche adaptée permet la détermination de la structure de l'écoulement.

Ce travail est inspiré par les expériences de la soufflerie qui ont été réalisé au sein du projet de Solazzo [107] dans le but de comparer avec nos résultats numériques et avec d'autres simulations numériques utilisées dans ce projet. Pour le cinq formes du bâtiment (toit plat, 2H avant du bâtiment, 2H après du bâtiment, toit au vent incliné et toit au vent et côté sous le vent incliné), on remarque une relation entre la variation de la forme du bâtiment et la présence de vortex en nombre, volume et forme, c'est à dire La modification des formes des toits est marquée par la présence d'un vortex unique principal. On remarque que la présence des toits inclinés sur l'immeuble au vent et côté sous le vent, en général, conduit à un déplacement de ce vortex principal à un haut niveau (entre les toits) et le développement d'un contre vortex occupant la cavité et avec des vitesses moins intenses. Pour le cas des rapports d'aspect variables x/H=0.5, 1, 2 et 4, on remarque avec des rapports d'aspect larges dans les simulations présentées x/H=4, la présence d'un vortex de grande taille qui tente à se déplacer légèrement vers le mur au vent et un petit contre vortex qui se développe au niveau de la largeur du canyon de rue . Pour un rapport d'aspect $x/H = 1$, seulement un vortex occupe la cavité complètement et pour un rapport d'aspect 0.7, $x/H = 0.5$, le vortex tente à se déplacer vers le haut de la cavité jusqu'à la création des nouveaux vortex diffusés suivant la hauteur du canyon de rue.

La comparaison de nos résultats avec les résultats expérimentaux et numériques (Solazzo et al. [107]) donne des résultats similaires. Dans les simulations avec la source de pollution, on remarque que le rapport d'aspect a une grande influence sur la dispersion des polluants dans un canyon de rue. Les résultats montrent que dans les canyons de rue avec des rapports d'aspect élevés, les polluants se transportent hors de la cavité. On peut dire que cette circulation du vent permet le renouvellement de l'air et la ventilation du canyon de rue. Par contre pour des faibles rapports d'aspect, une

mauvaise ventilation et une stagnation des polluants se produit dans le canyon de rue. On peut conclure, que la géométrie du toit a une forte influence sur la ventilation du canyon. En particulier, pour des configurations des toits inclinés sur le bâtiment côté sous le vent et au vent. Les valeurs de concentration significativement plus élevés ont été observées au niveau du mur au vent du bâtiment. Dans ces cas, la concentration maximale est également passée du mur au vent au mur côté sous le vent du canyon de rue, ce qui indique la disparition de la recirculation à l'intérieur et un mauvais système de ventilation et la stagnation des polluants à l'intérieur du canyon de rue. Aussi pour les résultats pour la dispersion des polluants dans des canyons de rue avec des toits inclinés ont donc démontré, que la modification des géométries des toits a un effet non négligeable. Leurs impacts sur la formation des vortex et la dynamique de l'air est plus grande que le rapport d'aspect d'un canyon de rue.

Le présent travail apporte la preuve de la capacité du logiciel ANSYS CFX 15 à résoudre des problèmes de la dispersion des polluants dans les canyons des rues. Il sert également, à réaliser des simulations d'écoulement plus complexes par exemple en 3D et en écoulement instationnaire. Le plus important est qu'il peut constituer et servir comme une base des donnés pour d'autre études dans le même axe et la même thématique.

Références Bibliographiques

[1] Ana Pilar, G. S., Jeroen, B. V. and Patrick, R. (2002). Numerical and Experimental Modelling of Pollutant Dispersion in a Street Canyon. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90 (2002) 321–339.

[2] Bouterra, M., Elcafsi, A., Belghith, A. (2003). Etude de L'effet de la Stratification Thermique sur la Dispersion d'un Polluant Autour d'un Obstacle. Rev. Energ. Ren. Vol. 6 (2003) 53-68.

[3] Cheng, H. C., and Robert, N. M. (2003). The Effect of Surroundings with Different Separation Distances on Surface Pressures on Low-Rise buildings. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 91 (2003) 1039–1050.

[4] Kim, J. J. and Baik, J. J. (2004). A Numerical Study of the Effects of Ambient wind Direction on Flow and Dispersion in Urban Street Canyons Using the RNG k–ε Turbulence Model.Atmospheric Environment 38 (2004) 3039–3048.

[5] Tominaga, Y. and Stathopoulos, T. (2012). CFD Modeling of Pollution Dispersion in Building Array: Evaluation of turbulent scalar flux modeling in RANS model using LES results. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 104–106 (2012) 484–491.

[6] Solazzo. E., Cai. X and Vardoulakis. S. (2009). Improved Parameterisation for the Numerical Modelling of Air Pollution with in an Urban Street Canyon. Environmental Modelling . Software 24 (2009) 381–388.

[7] Huang, Y. D., Ming, J. X and SUN, Y. (2007). Numerical Studies on Airflow and Pollutant Dispersion in Urban Street Canyon Formed by Slanted Roof Building. Journal of Hydrodynamics. Ser.B, 2007,19(1):100-106.

[8] Salim. S. M., Ong. K. C and Cheah. S. C. (2011). Comparaison of RANS, URANS, LES in the Prediction of Airflow and Pollutant Dispersion. Proceedings of the World Congress on engineering and Computer Science 2011 Vol II.

[9] Yongfeng. Q., Milliez. M., Genon. L. M and Carissimo. B. (2012). Numerical Study of the Thermal Effects of Buildings on Low-Speed Airflow Taking Into Account 3D Atmospheric Radiation in Urban Canopy.Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 104-106 (2012) 474–483.

[10] Pillai. S. S and Yoshie. R. (2012). Experimental and Numerical Studies on Convective Heat Transfer From Various Urban Canopy Configurations.Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 104–106 (2012) 447–454.

[11] Xie. X., Huang. Z., Wang. J and Xie. Z. (2005).The Impact of Solar Radiation and Street Layout on PollutantDispersion in Street Canyon. Building and Environment.40 (2005) 201–212.

[12] Kim. J. J andBaik. J. J. (2001). Urban Street-Canyon Flows with Bottom Heating. Atmospheric Environment. 35 (2001) 3395–3404.

[13] Xie. X., Liuc. C. H., Leung. D. Y. C and Leung. M. K. H. (2006). Characteristics of Air Exchange in a Street Canyon with Ground Heating. Atmospheric Environment. 40 (2006) 6396–6409.

[14] Cai. X. M, Barlow. J. F and Belcher. S. E. (2008). Dispersion and Transfer of Passive Scalars in and above Street Canyons—Large-eddy Simulations. Atmospheric Environment.42 (2008) 5885– 5895.

[15] Ryu. Y. H and Baik. J. J. (2009). Flow and Dispersion in an Urban Cubical Cavity. Atmospheric Environment. 43 (2009) 1721–1729.

[16] Defraeye. T., Blocken. B and Carmeliet. J. (2012). CFD Simulation of Heat Transfer at Surfaces of Bluff Bodies in Turbulent Boundary Layers: Evaluation of a Forced-Convective Temperature Wall Function for Mixed Convection. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 104–106 (2012) 439–446.

[17] Baratian. G. Z and Kaye. N. B. (2013). The Effect of Canyon Aspect Ratio on Flushing of Dense Pollutants From an Isolated Street Canyon. Science of the Total Environment.443 (2013) 112–122.

[18] Yassin. M. F. (2011). Impact of Height and Shape of Building Roof on Air Quality in Urban Street Canyons. Atmospheric Environment.45 (2011) 5220-5229.

[19] Jeong. S. J and Andrews. M. J. (2002). Application of the k–εTurbulence Model to the High Reynolds Number Skimming Flow Field of an Urban Street Canyon. Atmospheric Environment. 36 (2002) 1137–1145.

[20] Yakhot. A., Liu. H and Nikitin. N. (2006). Turbulent Flow Around a Wall-Mounted Cube: A Direct Numerical Simulation. International Journal of Heat and Fluid Flow.27 (2006) 994–1009.

[21] Xie. X., Liub. C. H and Leung. D. Y. C. (2007). Impact of Building Facades and Ground Heating on Wind Flow and Pollutant Transport in Street Canyons.Atmospheric Environment. 41 (2007) 9030–9049.

[22] Xiang Li. X., Liu. C. H and Leung. D. Y. C. (2005).Development of a k-ε Model for the Determination of Air Exchange Rates for Street Canyons. Atmospheric Environment.39 (2005) 7285–7296.

[23] Chan. T. L., Dong. G., Leung. C. W., Cheung. C. S and Hung. T.W. (2002). Validation of a Two-Dimensional Pollutant Dispersion Model in an Isolated Street Canyon. Atmospheric Environment. 36 (2002) 861–872.

[24] Uehara. K., Murakami. S., Oikawa. S and Wakamatsu. S. (2000). Wind Tunnel Experiments on How Thermal Stratification Affects Flow in and Above Urban Street Canyons. Atmospheric Environment.34 (2000) 1553- 1562.

[25] Sini. J.F., Anquetin, S and Mestayer, P.G. (1996). Pollutant Dispersion and Thermal Effects in Urban Street Canyons. AtmosphericEnvironment. 30 (1996), 2659–2677.

[26] Bouterra1. M., El Cafsi1. A., Belghith. A et Le Quéré. P. (2008). Etude Numérique de la Dispersion d'un Polluant Autour d'un Obstacle Soumis à un Ecoulement Turbulent Perturbé. Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 485 – 491.

[27] Cheng. W. C and Liu. C. H. (2011). Large-Eddy Simulation of Turbulent Transports in Urban Street Canyons in Different Thermal Stabilities. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 99 (2011) 434–442.

[28] Yang. Y and Shao. Y. (2008). Numerical Simulations of Flow and Pollution Dispersion in Urban Atmospheric Boundary Layers. Environmental Modelling & Software 23 (2008) 906-921.

[29] Olvera. H. A and Choudhuri. R. A. (2006). Numerical Simulation of Hydrogen Dispersion in the Vicinity of a Cubical Building in Stable Stratified Atmospheres. International Journal of Hydrogen Energy 31 (2006) 2356 – 2369

[30] Lakehal. D. (1998). Application of the Model to Flow Over a Building Placed in Different Roughness Sublayers. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 73 (1998) 59-77.

[31] Loureiro. J. B. R., Alho. A. T. P and Freire. A. P. S. (2008). The Numerical Computation of Near-Wall Turbulent Flow Over a Steep Hill. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 96 (2008) 540–561.

[32] Cheng. T. S and Yang. W. J. (2008). Numerical Simulation of Three-Dimensional Turbulent Separated and Reattaching Flows Using a Modified Turbulence Model. Computers & Fluids. 37 (2008) 194–206.

[33] Lateb. M., Massona. C., Stathopoulos. T andBédard. C. (2013). Comparison of Various Types of *k*–ε Models for Pollutant Emissions Around a Two-Building Configuration. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 115 (2013) 9–21

[34] Gousseau.P.,Blocken. B and G.J.F. VanHeijst. G. J. F. (2012). Large-Eddy Simulation of Pollutant Dispersion Around a Cubical Building: Analysis of the Turbulent Mass

Transport Mechanism by Unsteady Concentration and Velocity Statistics. Environmental Pollution. 167 (2012) 47-57.

[35] Santos. J. M., Reis Jr. N. C., Goulart. E. V and Mavroidis. L. (2009**).** Numerical Simulation of Flow and Dispersion Around an Isolated Cubical Building: The Effect of the Atmospheric Stratification.

[36] Kim. J. J.,Baik. J. J and Chun. H. Y. (2001). Two-Dimensional Numerical Modeling of Flow and Dispersion in the Presence of Hill and Buildings. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 89 (2001) 947–966.

[37] Tominaga. Y and Stathopoulos. D. (2009). Numerical Simulation of Dispersion Around an Isolated Cubic Building: Comparison of Various Types of *k–ε* Models. Atmospheric Environment.43 (2009) 3200–3210.

[38] Azli. A. R., Hagishima. A., Ikegaya. N and Tanimoto. J. (2013). Analysis of Airflow Over Building Arrays for Assessment of Urban Wind Environment. Building and Environment. 59 (2013) 56-65.

[39] Murakami. S., Mochida. A and Hayashi. Y. (1990). Examining the *k-ε* Model by Means of a Wind Tunnel Test and Large-Eddy Simulation of the turbulence Structure Around a Cube. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 35 (1990) 87-100.

[40] Zhang. C.X. (1994). Numerical Predictions of Turbulent Recirculating Flows With a *k-ε* Model. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 51 (1994) 177-201.

[41] Paterson. D. A. (1990). Simulation of Flow Past a Cube in a Turbulent Boundary Layer. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 35. (1990). 149-176.

[42] Evola. G and Popov. V. (2006). Computational Analysis of Wind Driven Natural Ventilation in Buildings. Energy and Buildings. 38. (2006). 491–501.

[43] Ratnam. S.G and Vengadesan. S. (2008). Performance of Two Equation Turbulence Models for Prediction of Flow and Heat Transfer Over a Wall Mounted Cube. International Journal of Heat and Mass Transfer.51 (2008) 2834–2846.

[44] Sedighi. K and Farhadi. M. (2006). Three Dimensional Study of Vortical Structure Around a Cubic Bluff Body in a Channel**.**Mechanical Engineering Vol. 4, No 1, (2006), pp. 1 – 16.

[45] Murakami. S and Mochida. A. (1988). 3-D Numerical Simulation of Airflow Around a Cubic Model by Means of the *k-ε* Model. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 31. (1988) 283-303.

[46] Vardoulakis. S., Reneta. D., Richards. K., Hamlyn. D., Camilleri. G., Weeks. M., Sini. J. F., Britter. R., Borrego. C., Schatzmann. M andMoussiopoulos. N. (2011). Numerical Model Inter-comparison for Wind Flow and Turbulence Around Single-Block Buildings.

[47] Shao. J., Liu. J and Zhao. J. (2012). Evaluation of Various Non-Linear k-εModels for Predicting Wind Flow Around an Isolated High-Rise Building Within the Surface Boundary Layer.Building and Environment. 57 (2012) 145e155.

[48] Köse. D. A and Dick. E. (2010). Prediction of the Pressure Distribution on a Cubical Building with Implicit LES. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 98 (2010) 628–649.

[49] Sohankar. A. (2006). Flow Over a Bluff Body From Moderate to High Reynolds Numbers Using Large Eddy Simulation. Computers & Fluids. 35 (2006) 1154–1168.

[50] Fragos. V. P., Psychoudaki. S. P and Malamataris. N. A. (2012). Tow-Dimensional Numerical Simulation of Vortex Shedding and Flapping Motion of Turbulent Flow Around a Rib. Computers & Fluids. 69 (2012) 108-121.

[51] Kawamura .F., Seki. Y., Iwamoto. K and Kawamura. H. (2007). DNS of Heat Transfer in Turbulent and Transitional Channel Flow Obstructed by Rectangular Prisms. Int. J. Heat and Fluid Flow. 28 (2007) 1291-1301.

[52] Maurizi. A. (2000). Numerical Simulation of Turbulent Flows Over 2D Valleys Using Three Versions of the *k*-ε Closure Model. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 85 (2000) 59-73.

[53] Jia-Song. W and Zhen.H. (2007). A TVD Scheme for Incompressible Flow Coupled with Different Turbulence Models on a Ground-Mounted Square Rib-Flow. Journal of Hydrodynamics. Ser.B, 2007, 19(6):743-750.

[54] Yeung. P.K and Kot .S. C. (1985). Computation of Turbulent Flows Past Arbitrary Two-Dimensional Surface-Mounted Obstruction.Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 18 (1985) 177-190.

[55] XinliangTian, Muk .C. O., Yang. J and Myrhaug. D. (2013). Unsteady RANS Simulations of Flow Around Rectangular Cylinders with Different Aspect Ratios. Ocean Engineering 58 (2013) 208–216.

[56] Iaccarino. G., Ooi. A., Durbin. B. A and Behnia. M. Reynolds averaged simulation of unsteady separated flow. Int. J. Heat and Fluid Flow 24 (2003) 147-156.

[57] Lien .F. S., Yee. E and Cheng. Y. Simulation of mean flow and turbulence over a 2D building array using high-resolution CFD and a distributed drag force approach. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 92 (2004) 117-158.

[58] Schmidt. S and Thiele. F. Comparison of numerical methods applied to the flow over wall-mounted cubes. Int. J. Heat and Fluid Flow. 23 (2002) 330-339.

[59] Garcia Sagrado. A. P. G., Beeck. J., Rambaud. P and Olivari. D. Numerical and experimental modelling of pollutant dispersion in a street canyon. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 90 (2002) 321-339.

[60] Ai and Mak. (2013).

[61] Meroney (1999).

[62] Aliane. K., Sebbane. O and etHoumat. A. Etude expérimentale de l'écoulement bidimensionnel autour d'un obstacle rectangulaire et un obstacle rectangulaire arrondi.Afrique SCIENCE 02(3) (2006) 285 – 29.

[63] Castro I.P., Measurements in shear layers separating from surface-mounted bluff bodies, J. Wind Eng. And Ind. Aero., vol. 7, (1981) 253-257.

[64] Iaccarino G., Durbin P., Unsteady 3D RANS simulations using the *v*2-*f* , model, Center for Turbulence Research, Annual Research Briefs, (2000) 263-269.

[65] Martinuzzi R., Tropea C., The flow around surface-mounted prismatic obstacles placed in a fully developed channel flow, ASME Journal of Fluids Engineering. Vol. 115 (1993) 85-92.

[66] Mouaici K. Etude De Quelques Sources De Polluants Atmosphériques Dans La Région De Bejaia. Mémoire De Fin De Cycle. Université De Bejaia – Ingéniorat. (2002)

[67] Grégory T. Modélisation De La Turbulence Atmosphérique En Vue De L'étude Du Chargement Aérodynamique Des Structures Soumises Aux Effets Du Vent. Thèse De Doctorat. Centre D'etudes De M´E Canique D'ile De France. (2000)

[68] Sacré C. Climatologie, Notes De Cours De Climatologie, Aérodynamique Et Effet Du Vent Sur Les Constructions, Ecole Nationale Des Ponts Et Chaussées – Cstb. (1995)

[69] Maouche W. Modélisation De La Dispersion d'un Polluant Gazeux Dans l'atmosphère. Mémoire De Magister. Université Hassiba Ben Bouali De Chlef. (2011)

[70] Atkinson B.W. Introduction To The Fluid Mechanics Of Meso-Scale Flow Fields, Diffusion And Transport Of Polluants In Atmospheric Mesoscale Flow Fields, Ercoftac Series, Edited By A.G. Gyr And F.S. Rys, Kluwer Academic Publishers. (1995)

[71] Holton J.R, an Introduction To Dynamic Meteorology, Academic Press. (1979)

[72] Poggi A., Introduction à La Micrométéorologie, Masson. (1977)

[73] Kaimal Et Finningan; Raupach, M.R, Antonia, R.A et rajagoplan, S rough-wall turbulent boundory layers, appl. Mech.rev. 44,1-25(1994,1991)

[74] Roth, M review of atmospheric turbulence over cities Q.J.R meteorol. Soc. 126, 941-990. (2000)

[75] Raupach, M.R, thorn A.S et Edwards I: A Wind tunnel Study of turbulent flow close to regulary arrayed rough surfaces. Boundary-layer Meteorol, 18, 373-397. (1980)

[76] Grimmond, C.S.B.et Oke, T. R: turbulent heat fluxes in urban arcas. obsrvations and a local-Scale urban Meteorological parameterization Scheme (L4MPS). J. Appl. Meteorol. 41. 792 - 810. (2002, 1987)

[77] Raupach Et Al G, Batch, E.et Gryning, S-E: progress in urban dispertion studies, theor. Appl. Climatol, 84, 57-67. (1980, 2006)

[78] Seinfeld, J.H: atmospheric chemistry and physics of Air pollution, Wiley –interscience. (1986)

[79] Allwine, K.J.,shinn,J.H.,streit,G.E.;clawson,K.L.et Brown,M.:2002,overview of Urban 2000.a Multixale field study of dispersion through au urban Environnement,Bull.Amer. Meteor.Soc., 83,521-536. (2002).

[80] Allwine,K.J.,leach,M.J.,Stockham,L.W.,Shinn,J.S.,Hosker,R.P.,Bowers J.F.et pace J.C: 2004, overview of joint urban 2003-Atmospheric dispersion study in Oklahoma City,Symposium on planning,Nowcasting and forecasting in the urban Zone,American Meteorological Society,Seatle,Washington,January 11-15. (2004).

[81] Arya, S.P: air pollution meteorology and dispertion, oxford university press. (1999).

[82] Duchene-Marullaz P, Sacré C, Ttraitement Statistique Des Données De Vent Pour La Determination De L'énergie Produite Par Les Systèmes Eoliens, Actes Du Colloque "Météorologie Et Energie Renouvelables", Valbonne, France. (1984).

[83] Tennekes H, the Logarithmic Wind Profile, Journal of the Atmospheric Sciences, Vol 30, Pp. 234-238. (1973).

[84] Costes J.P; Simulations Numériques Des Ecoulements Atmosphériques Sur Sols Fortement Hétérogènes, Thèse De Doctorat De L'université De Nantes - Ecole Centrale De Nantes. (1996).

[85] Panofsky H.A., Dutton J.A; Atmospheric Turbulence, Models and Method for Engineering Applications, John Wiley And Sons. (1984).

[86] Wieringa J, Representative Roughness Parameters for Homogeneous Terrain, Boundary-Layer Meteorology, Vol 63, Pp. 323-363. (1993).

[87] Kaimal J.C, Finnigan J.J. Atmospheric Boundary Layer Flows, Oxford University Press. (1994).

[88] Murakami S, Mochida A, Tominga Y, Numerical Simulation Of Turbulent Diffusion In Cities, Wind Climate In Cities, Nato Asi Series, Kluwer Academic Publishers. (1995).

[89] Rodi W., Introduction to the Numerical Simulation Approaches In Wind Engineering,

Wind Climate in Cities, Nato Asi Series, Kluwer Academic Publishers. 1995.

[90] Stull, R. B. An introduction to boundary layer meteorology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, (1988).

[91] Garratt, J. R. The atmospheric boundary layer, Cambridge at Atmospheric and Space Science Series-Cambridge University Press, (1992).

[92] Richardson, L. F. Weather prediction by numerical process, Cambridge, Cambridge University Press, (1922).

[93] Kolmogorov, A. N. Local structure of turbulence in an incompressible fluid at very high Reynolds numbers. Proceedings of the USSR Academy of Sciences, (1941).

[94] Speziale, C. G. On nonlinear K-l and K-epsilon models of turbulence. J. Fluid Mech., 178 :459-475, (1987).

[95] Wallin, S and Johansson, A. V. An explicit algebraic Reynolds stress model for imcompressible and compressible turbulent flows. J. Fluid Mech., 403 :89-132, (2000).

[96] Favre, A., Kovasznay, L. S. G., Dumas, R., Gaviglio, J et Coantic, M . La turbulence en mécanique des fluides. Ed Gauthier-Villars (1976).

[97] Allmaras, S. R. Spalart, P. R. A one equation turbulence model for aerodynamics flows. AIAA paper, 92-0439, (1992).

[98] Harlow, F and Nakayama, P. Transport of turbulence energy decay rate. Rapport technique LA-3854, Los Almas Science Lab., Univ. California (1968).

[99] Jones, W and Launder, B. The predictions of laminarization with a two equation model of turbulence. Journal of Heat and Mass transfert, 15, 301-314, (1972).

[100] Launder, B., Morse, A., Rodi, W and Spalding, D. The prediction of free shear flows a cornparison of the performance of six turbulent flow. Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng., 3, 269-289, (1972).

[101] Launder, B and Spalding, D. The numerical computation of turbulent flow. Cornp. Meth. in Appl. Mech. and Eng., 3, 269-289, (1974).

[102] Shih, T. H., Liou, W. W. Shabbir, A., Yang, Z and Zhu, J. A new k-ε eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows-model development and validation. Computers Fluids. 24 (3), 227-238, (1995).

[103] Wilcox, D. C. Turbulence modeling for CFD, DCW industries, La Cañada, États-Unis, 460 pages, (1993).

[104] Menter, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, AIAA Journal, vol 32, No 8 : 1598-160, (1994).

[105] Menter, F. R., Kuntz, M and Langtry, R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model: K. Hanjalic, Y. Nagano and M. Tummers, turbulence, Heat and Mass Transfer 4, Begell House, New-York, 625-632, (2003).

[106] Graf et Altinakar (1991).

[107] Solazzo. E, Cai. X and Vardoulakis. Sotiris Improved parameterization for the numerical modelling of air pollution within an urban street canyon. Environmental Modelling & Software 24 (2009) 381-388.

[108] Christen. A. Atmospheric turbulence and surface energy exchange in urban environments, PhD thesis, Institute of Meteorology, Climatology and Remote Sensing, University of Basel, (2005).