République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Dr. YAHIA Farés de MEDEA
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie de la Matière



MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Génie Mécanique
Option : Energie et Froid industriel

Thème

Dispersion de polluant industriel de milieu urbain

Proposé et dirigé par :

Dr. ZIRARI Mounir

Présenté par :

LADJLET Fatma Zohra

DHAOUI Ahlem

Promotion: 2016

Table des matières

CHAPITRE I : la pollution atmosphérique

I. Introduction…… 2
I.1Définition de la pollution atmosphérique ……..…..... 3
I.2 Principales sources de la pollution ……..…..... 3
I.2.1 Sources naturelles…… ..……..…... 4
I.2.2 Sources anthropiques ……....…... 4
I.3 .Divers polluants atmosphériques…… 5
I.3.1 Monoxyde de carbone (CO)……...……....… 5
I.3.2 Benzène …….....…….….. 5
I.3.3 Précurseurs de l'ozone……...…….…. 5
I.3.4 Oxydes d'azote……. 5
I.3.5 CFC et assimilés…….…..... 6
I.3.6 Méthane …… .. 6
I.3.7 Autres gaz……. 6
I.3.7.1 Dioxyde de soufre (SO2)…….…….. 6
I.3.7.2 Hydrocarbures aromatiques polycyclique.…….…….…….... 6
I.3.8 Particules solides en suspension dans l'air…….…….. 7
I.4 Problématique de la pollution industrielle…….…….... 7
I.4 .1 Les principaux polluants ……..……..…….…… 7
I.4 .1.1 Le dioxyde de soufre (SO2) ….……..... 8
I.4 .1.2 Les oxydes d'azote (Nox)……..…….……... 8
I.4 .1.3 Les composés organiques volatils (COV)……..…….…….. 8
I.4 .1.4 Le monoxyde de carbone (CO)……..……... 8
I.4 .1.5 Les autres polluants ……..……..…..... 9
I.4 .2 Cadre réglementaire du contrôle des rejets dans l'air en France……..…….. 10
I.4.2.1 La limitation des rejets de polluants …...…….. 10
I.4.2.2 La surveillance des rejets……...…… 10
I.4.2.3 La déclaration annuelle des rejets polluants…...……..... 11
I.4.2.4 Politique de gestion des risques industriels……...…… 11
I.4.3 Vers une réduction des émissions ……..…... 12
I.4.4 La place de la modélisation……...……..…… 14
I.4.4.1 Surveillance de sites ……..…… 14
I.4.4.2 Aide à la décision ……...…….. 14
I.5 structure de la Couche Limite Urbaine…… 15
I.5.1 Influence d'une ville sur l'environnement ……..……. 17
I.5.2 Ilots de chaleur urbaine……..……..... 18
I.5.3 Caractéristiques température et spatiales …….…….…….. 19
I.6 Echelles d'études de la pollution……..……... 20
I.6.1 Échelles spatiales de dispersion des pollutions……..……... 20
I.6.1.1 Pollution à l'échelle locale : la pollution de proximité ...……..... 20
I.6.1.2 Pollution à l'échelle régionale……..…….. 21
I.6.1.3 Pollution planétaire……...…….……..….. 21

I.6.2 Echelle méso…… 21
I.6.2.1 Echelles associées……... 21
I.6.2.2 Elément de dynamique de l'atmosphère urbaine…….. 22
Conclusion…… 22

CHAPITRE II : Les modélisations Mathématiques

II. Introduction..... 27
II.1 Modélisation de la turbulence 27
II.2 Equations mathématiques..... 27
II.2. 1 Equation de continuité..... 27
II.2.2 Equation de diffusion…… 29
II.2.3 Equation de conservation de quantité de mouvement……..... 30
II.2.4 Équation de bilan de l'énergie..... 31
II.2.5 Equation de conservation de l'énergie…… 31
II.2.6 Equation de conservation des espèces……. 32
II.2.7 L'équation de Navier-Stocks …… 32
Conclusion……..... 33

CHAPITRE III : Procédure Numériques

III. Introduction …….. 35
III.1 Les éléments finis……. 35
III.1.1Historique…… 35
III.1.2 Définition La méthode des éléments finis (MEF)…….. 35
III.1.3 Principe mathématique…….. 35
III.1.4 Etapes de la mise en œuvre …….. 36
III.1.5 Présentation de la méthode…… 36
III.1.6 Mise en œuvre de la méthode des éléments finis……..……. 37
III.1.6.1 Formulation vibrationnelle forte …… 37
III.1.6.2 Formulation vibrationnelle faible ……..... 37
III.1.6.3 Forme générale des équations du système ……. 38
III.1.7 Logiciels d'éléments finis …… 38
III.2 Logiciel Ansys ……. 40
III.2.1 A propos des modules d'apprentissage ANSYS ……. 40
III.2.2 Principaux produits…… 40
III.2.3 Environnements logiciels ……. 42
III.2.4 Présentation des étapes d'ANSYS …….. 43
III.2.5 Les avantage d'Ansys CFX…… 46
Conclusion……. 46

CHAPITRE IV : Résultats et discussion

IV. Introduction…… 48
IV.1 Formulation théorique du problème…… 48
IV.2 Etude de l'influence de la hauteur de cheminé …… 49
Conclusion……. 65
Conclusion générale…… 66

Liste des figures

Figure I.1 : Pourcentage d'émission des principaux polluants par secteur en 2008 (CITEPA, 2010……..... 9

Figure I.2 **:** Représentation schématique de la couche limite urbaine (CLU) à méso échelle (a), à l'échelle locale (b) et à micro-échelle (c) (Piringer et al, 2002)…....… 16

Figure I.3 : Cycle diurne de la CLA (Stull, 1988 ; Delmas et al, 2005)……....……. 16

Figure I .4 : Représentation schématique de l'îlot de chaleur urbain (ICU) en fonction des quartiers (Morris et Simmonds, 2000)……..... …… 19

Figure I.5 : Structure verticale de l'atmosphère urbaine des vents supérieurs et inférieurs à 3m/s (Mestayer, Anquetin, 1995)…….....….. 20

Figure I.6: Ozone stratosphérique et l'ozone à basse altitude…….....….. 21

Figure I.7: perturbation des basses couches de l'atmosphère par un site urbanisé en fonction des conditions météorologiques…….....….. 23

Figure I.8 : régimes d'écoulement en fonction des échelles caractéristiques de la rue (largeur W, hauteur H)……..... 24

Figure IV. 2 : Représentation spatiale de champs de vitesse……..... 49

Figure IV.3 : Représentation spatiale de champs de Pression……..... 50

Figure IV. 4: Représentation spatiale des champs de dispersion de SO2……..... 50

Figure IV.2.1 : profils de vitesse en amont de l'obstacle……..... 51

Figure IV.2.2 : profils de vitesse en aval de l'obstacle……...…..... 51

Figure IV.4.3 : profils de taux de dispersion en amont de l'obstacle…….....…… 52

Figure IV.4.4 : Profils de taux de dispersion en Aval de l'obstacle…….....……... 52

Figure IV.5 : Représentation spatiale de champs de vitesse……..... 53

Figure IV.6: Représentation spatiale de champs de Pression……..... 53

Figure IV.7:Représentation spatiale de champs de dispersion de SO2….....……. 54

Figure IV.5.5 : profils de vitesse en amont de l'obstacle……..... 54

Figure IV.5.6 : profils de vitesse en aval de l'obstacle…….....…….. 55

Figure IV.7.7 : Profils de taux de dispersion en amont de l'obstacle…….....… 55

Figure IV.7.8 : profils de taux de dispersion en Aval de l'obstacle……..... 56

Figure IV.8: Représentation spatiale de champs de vitesse…….....….. 56

Figure IV.9: Représentation spatiale de champs de Pression……..... 57

Figure IV.10 : Représentation spatiale de champs de dispersion de SO2…..... 57

Figure IV.8.9 : La vitesse en amont de l'obstacle…… 58
Figure IV.8.10 : Profils de vitesse en aval de l'obstacle…….. 58
Figure IV.10.11 : Profils de taux de dispersion en amont de l'obstacle…….. 59
Figure IV.10.12 : Profils de taux de dispersion en Aval de l'obstacle…….. 59
Figure IV.11: La vitesse en amont l'obstacle……...…… 60
Figure IV.12:la vitesse en amont l'obstacle……. 60
Figure IV.13: Dispersion de so2en amont l'obstacle…… 61
Figure IV.14: Dispersion de so2 en aval l'obstacle……..... 61
Figure IV.15 : la vitesse en amont l'obstacle…… 62
Figure IV.16: Teneur de vitesse en aval l'obstacle……... 62
Figure IV.17: Teneur de so2 en amont l'obstacle……..... 63
Figure IV.18: teneur de so2 en aval l'obstacle…… 63

Liste des Tables

Tableau I.1 : Evolution des émissions de quelques polluants de l'air en France (en kilotonne par an) et plafond d'émission 2010 fixé par la directive européenne 2001/81/CE……...13
Tableau IV.1 : récapitulatif des dimensions de l'expérience……...……....49

Nomenclatures

Notation	Signification	Unité
$\vec{U}$	vitesse d'une particule de fluide	
t	Temps	**s**
$\vec{v}$	Vecteur de vitesse	
$\Omega(t)$	Vitesse angulaire de rotation de la terre	
$\overline{\overline{\tau}}$	Tenseur des contraintes de Reynolds	
$\vec{f}$	résultante des forces massiques	**$N \cdot kg^{-1}$**
e	l'énergie totale	**$J \cdot kg^{-1}$**
$\vec{q}$	flux de chaleur	**$J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$**
c	La chaleur massique	
T	Température	
K	Energie cinétique turbulente	**J/Kg**
$\tilde{u}_j, \tilde{u}_i$	Tension de Reynolds	
U_i, U_j	Composante de la vitesse	**m/s**
c_p	Chaleur spécifique à pression constante	**j /kg K**
∇	Opérateur de gradient	
Δ	Opérateur de Laplace	
$\otimes$	Produit vectoriel	
$\boldsymbol{x}$	vectrices positions	**m**
G_k	Terme de production de l'énergie cinétique turbulente	
G_b	Terme de génération de la turbulence par la Buoyancy	
Symboles grecs		
ε	dissipation de l'énergie cinétique turbulente	**m2 /s**
λ	La conductivité thermique	**J/s.m.k**
μ	La viscosité dynamique	
μ_t	La viscosité dynamique turbulente	
ρ	Masse volumique	**Kg /m^3**
τ	Contrainte de cisaillement	**N /m^2**
ϕ	Variables généralisée par unité de masse	
φ	Flux de chaleur transmis	**W**
δ_{ij}	Symbole de Kronecker	

Σ	tenseur des contraintes	**N.kg.m-2**

Abréviation	
CFC	chlorofluorocarbones
C F D	Computational Fluide Dynamics
COV	Composés Organiques Volatiles
CITEPA	Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution
Atmosphérique	
PPRT	Plans de Prévention des Risques Technologiques
CLA	Couche Limite Atmosphérique
CLU	Couche Limite Urbaine

Références

[1] Florian VENDEL , Modélisation de la dispersion atmosphérique en présence d'obstacles complexes : application à l'étude de sites industriels, L'ECOLE CENTRALE DE LYON et TOTAL12 avril 2011

[2] LADJAL Naima, Calcul Numérique d'écoulements autour d'un faisceaux tubulaires d'échangeurs de chaleur, effets de l'orientation des chicanes sur l'efficacité thermique et dynamique, Université Dr "Yahia FARES" Médéa2014-2015

[3] REMILISadia,THEME OPTIMISATION DES METHODES DE MODELISATION DE LA POLLUTION DU TRAFIC AUTOMOBILE, 2009 – 2010

N. Mahjoub1, H. Mhiri S. El Golli 1, G. Le Palec et P. Bournot, Dispersion autour d'un Bâtiment d'un Polluant Issu d'une Cheminée, France2001

[4] Benkoussas Bouzid, Bouhdjar Amor et Mammeri Amryd, Etude de la dispersion atmosphérique des effluents émis par les cheminées de la cimenterie de Meftah, 10ème Séminaire International sur la Physique Energétique

10th International Meeting on Energetical Physics, Algérie

[5] ABDELDJOUAD Meriem, Impact de la morphologie du bâtiment sur la dispersion des polluants atmosphériques Cas d'étude : ville d'Annaba, Université Mohamed Khider – Biskra26 /06 /2014.

[6] BENZEKHROUFA AISSA, Caractéristiques et modèles de dispersions des sources ponctuelles de la pollution industrielle «Application aux émissions d'origine automobiles», UNIVERSITE HASSIBA BENBOUALI – CHLEF, *06 Décembre 2009*

ملخص

في هذه المذكرة استخدمنا دراسة محاكاة العددية لتدفق المضطرب وانتشار الملوث من طرف المدخنة. وذلك بالاعتماد على طريقة العناصر المنتهية (**EF**) وباستخدام برنامج (***ANSYS CFD***).

وهذا من اجل إبعاد الملوث عن مناطق الحضرية من خلال تغيير ارتفاع المدخنة .

المفاتيح : التلوث - المحاكاة العددية – العناصر المنتهية – التدفق المضطرب – المدخنة.

Résumé*

Cette étude est utilisée pour étudier la simulation numérique de l'écoulement turbulent et la dispersion du polluant de cheminée en appuyant généralement sur la méthode qui base sur les éléments finit et l'logiciel ANSYS CFD pour éloigner le polluant du milieu urbain. Dont on a trouvé variation de hauteur de cheminée.

Mots clés : pollution - simulation numérique - éléments finit – écoulement turbulent - cheminée

ABSTRACT*

This study is used to study the numerical simulation of turbulent and dispersion of chimney polluting generally based on the method based on elements and ends ANSYS CFD software to remove the pollutant in urban areas. Which has been found chimney height variation.

Keywords: pollution- numerical simulation – finie element – turbulent flow modeling– chimney

Abstract

Mesures La pollution atmosphérique est responsable, selon l'OMS, de la mort de 2,4 millions de personnes dans le monde chaque année (Communiqué de l'OMS publié à Genève, 2006).

En France, les 11 millions de tonnes de polluants émis chaque année dans l'atmosphère sont responsables de 30000 décès anticipés (ADEME). Ils causent des troubles cardiaques ou reproductifs, des cancers et favorisent également les maladies allergiques respiratoires (asthme) dont la prévalence a doublé en 20 ans (ADEME). Ce tableau peu reluisant des désastres dus à la pollution de l'air est une conséquence directe de l'activité humaine et de son accélération au cours du XXème siècle et de ce début de XXIème. En effet, au cours du siècle dernier, le développement des industries chimiques et pétrolières a conduit à une multiplication et une diversification des polluants, tandis que l'explosion démographique entrainait une hausse considérable des besoins énergétiques et une augmentation conséquente du trafic automobile.

Devant cette situation, dont l'évolution future semble pessimiste en raison notamment de l'émergence des pays tels que la Chine ou l'Inde, une prise de conscience des pouvoirs publics et de la population commence à naitre dans les pays développés, dont la France, depuis les deux dernières décennies. Des mesures réglementaires de plus en plus sévères ont alors été adoptées pour limiter les émissions de polluants, en particulier celles d'origines industrielles. Pour satisfaire les demandes de restriction des pouvoirs publics, le monde industriel s'est lancé dans une course aux réductions de leurs émissions de produits nocifs (depuis les années 1980, les rejets de dioxyde de soufre ont baissé de 85% par exemple). C'est ainsi qu'au cours des 20 dernières années, l'industrie a fait appel au secteur de la recherche pour développer et optimiser ses méthodes de production, par la mise en place de procédés de plus en plus perfectionnés. Cependant, la réduction des émissions industrielles passe aussi par la surveillance continue des sites et de leurs abords et par l'analyse de scénarii accidentels pour améliorer la compréhension des causes des pics de pollution et prendre les nécessaires pour éviter leurs reproductions futures. Cette approche nécessite alors le développement de réseaux de surveillance de la qualité de l'air et la mise en place de nombreux capteurs pour conseiller les autorités, informer et prévenir les populations. En appui de ces réseaux, le monde industriel s'est tourné vers la modélisation de la pollution

Généralités

Les problèmes liés à la pollution atmosphérique sont devenus ces dernières années une préoccupation permanente pour les pouvoirs publics, les scientifiques et même la société civile. La prise de conscience collective de l'impact des différents polluants sur la santé et l'environnement fait petit à petit évoluer les choses dans le sens d'une réduction de cette pollution.

Le monde industriel suit cette tendance. Au cours de cette première partie, nous allons présenter quelques généralités sur la pollution atmosphérique avant de recentrer le sujet d'étude au monde industriel (normes en vigueur, caractéristiques des polluants émis, etc.). Nous proposerons ensuite quelques rappels, nécessaires à la compréhension de ce travail de recherche, concernant la physique de la couche limite atmosphérique et de la dispersion turbulente. Dans un dernier chapitre, nous rappellerons les objectifs de cette étude ainsi que la démarche adoptée.

CHAPITRE : I

La pollution atmosphérique

I. Introduction

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 (Fanton. J, 2004).

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. Etude bibliographique

Le danger relatif, présenté par les différents polluants gazeux et particulaires pour la santé, varie avec la concentration de ces polluants dans le temps et dans l'espace, et ainsi les effets sur la santé de ces polluants peuvent varier d'un pays à l'autre. En conséquence, la surveillance continue, soignée et attentive des concentrations est nécessaire avant qu'une estimation inacceptable des effets soit faite. La situation est encore plus compliquée car certaines combinaisons de polluants ont des effets cumulatifs et parfois synergétiques.

La présence dans l'air de plusieurs polluants est mesurée depuis une trentaine d'années. Les données obtenues au fil des décennies ont guidé les nombreuses interventions des équipes chargées de faire appliquer et même évoluer la réglementation et les courbes de tendances qu'elles ont permis de tracer témoignent des résultats obtenus.

Des améliorations sensibles sont ainsi observables dans le cas des polluants dits «conventionnels» que sont le dioxyde de soufre (SO2), les oxydes d'azote (NOX), les particules en suspension totales (PST), le monoxyde de carbone (CO) et le plomb.

Pour d'autres polluants toutefois, la situation est plus préoccupante. C'est le cas de l'ozone (O 3), dont les concentrations sont à la hausse et souvent supérieures à la norme. C'est également le cas des particules, au diamètre inférieur à 2,5 microns $_{(PM2,5),}$ dont on réalise de plus en plus l'effet néfaste qu'elles ont sur la santé.

I.1 Définition de la pollution atmosphérique

La pollution de l'air ou pollution atmosphérique est un type de pollution défini par une altération de la pureté de l'air, par une ou plusieurs substances ou particules présentes à des concentrations et durant des temps suffisants pour créer un effet toxique ou écotoxique **.**On entend par pollution de l'atmosphère, l'émission dans l'atmosphère, de gaz, des fumées ou de particules solides ou liquides, corrosifs, toxiques ou odorantes de nature à incommoder la population, à compromettre la santé ou la sécurité publique ou à nuire aux végétations, la production agricole et aux produits agro-alimentaires, à la conservation des constructions et monuments ou au caractère des sites (Journal Officiel, 1983).

La pollution de l'air est la résultante de multiples facteurs qui caractérisent la civilisation contemporaine : croissance de la consommation d'énergie, développement des industries extractives, métallurgiques et chimiques, de la circulation routière et aérienne, de la navigation maritime, l'incinération des ordures ménagères, des déchets industriels, etc.

I.2 Principales sources de la pollution

Les principales substances polluant l'atmosphère peuvent se répartir en deux groupes principaux : les gaz et les particules solides (poussières, fumées). On estime que les gaz représentent 90 p. 100 des masses globales de polluants rejetés dans l'air et les particules les 10 p. 100 restants (Arques, 1998).

Cette pollution peut être :

- Brève ou chronique,
- Visible (fumée) ou invisible (pesticides dans l'air)
- Emise massivement ou en faible dose
- Emise en quantité dispersée (exemple : pollution émise par les centaines de millions de pots d'échappement)
- Locale et émise par une source fixe (ex : cheminée, usine...), ou émise par des sources - mobiles (voitures, épandeurs de pesticides, transport maritime ou aérien, etc.),

L'ensemble de ces sources contribuant à une pollution globale (ex : augmentation de l'effet de serre due au CO2).

La pollution de l'air résulte principalement des gaz et particules rejetés dans l'air par les véhicules à moteur, les installations de chauffage, les centrales thermiques et les

installations industrielles : dont les dioxydes de carbone, de soufre et d'azote, poussières, particules radioactives, produits chimiques (dont certains engrais et pesticides), etc....

On distingue deux types de sources :

- Anthropiques (émissions des chaudières, moteurs, usines, etc.).
- Naturelles (volcanisme, érosion éolienne, émissions naturelles de méthane)

Cette distinction est parfois difficile à établir ; la dégradation anthropique des sols (ex: échauffement des pergélisol) peut favoriser des émissions de méthane qu'on jugera ou non naturel, de même qu'une aridification anthropique induite par le drainage, le surpâturage, la salinisation et dégradation des sols favorise des envols de poussière qu'il est difficile de différencier des envols naturels à partir des déserts supposés naturels ou originels.

I.2.1 Sources naturelles

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

- Les feux des forêts, des cultures ou des prairies contribuent à des émissions importantes de noyaux de condensation, d'imbrûlés et de gaz.
- Les volcans émettent des gaz comme le dioxyde de soufre et de l'hydrogène sulfureux, et des particules des cendres en grande quantité, dont les nuages peuvent parcourir des distances considérables.
- Les embruns marins sont constitués par des aérosols renferment des cristaux de sels qui peuvent entraîner à une pollution.
- Les végétaux sont à leur tour à l'origine d'une pollution par les pollens, les spores et les champignons.
- L'homme et les animaux rejettent des quantités importantes de dioxyde de carbone et sont à l'origine d'une pollution microbienne.
- L'ozone est formé naturellement à haute altitude à partir de réaction photochimique impliquant l'oxygène de l'air, ainsi une fois transporté dans les zones rurales par le vent, l'ozone se forme en grande quantité lorsque l'insolation est très élevée.

I.2.2 Sources anthropiques

De plus en plus nombreux, ils rejettent des gaz polluants : gaz carbonique (non toxique mais cause essentielle de l'effet de serre), monoxyde de carbone oxydes d'azote, jusque dans la haute atmosphère avec les avions et fusées La plupart des moteurs font appel aux énergies

fossiles (pétrole, houille gaz_nature), à l'origine d'une pollution chronique depuis le début du XX^{ème} siècle. Près de 25% des gaz à effet de serre sortent des pots d'échappement.

I.3 .Divers polluants atmosphériques

I.3.1 Monoxyde de carbone (CO)

La cause principale des émissions de CO est le trafic routier lors de la combustion incomplète de carburants et de combustibles des véhicules. Le Monoxyde de carbone est un gaz incolore, inodore, toxique et il participe à la formation d'ozone dans la troposphère libre.

I.3.2 Benzène

Le benzène est un liquide incolore à odeur aromatique caractéristique. Ce composé est l'hydrocarbure aromatique le plus simple et également le plus répandu. Dans des conditions normales, le benzène est inflammable, chimiquement stable et peu soluble dans l'eau. Les sources principales de benzène sont le trafic routier, le chauffage et le stockage et le transvasement (station-service). Le benzène est un gaz très volatil, principalement sous forme gazeuse dans l'air ambiant en raison de sa pression de vapeur élevée. Il fait partie des polluants atmosphériques cancérogènes (leucémie). Aucun seuil en dessous duquel il ne présente pas de danger pour la santé n'a été mis en évidence. A des concentrations élevées, il provoque des effets aigus sur les yeux, les voies respiratoires et le système nerveux central. La fumée de cigarettes contient du benzène et constitue la principale source de benzène à l'intérieur des locaux.

I.3.3 Précurseurs de l'ozone

L'ozone est dit polluant secondaire ; il n'est pas émis directement dans l'air mais résulte d'une réaction photochimique impliquant des précurseurs, des polluants issus de l'automobile, essentiellement les oxydes d'azote. Il est une des causes du smog. L'ozone se développe plus intensément en période de temps chaud et ensoleillé : les concentrations en ozone sont ainsi plus élevées durant la période estivale. A noter que l'on parle ici de l'ozone troposphérique, c'est à dire de l'ozone des basses couches de l'atmosphère, qui est un polluant majeur et provoque notamment des problèmes respiratoires.

Au contraire, l'ozone dans la haute atmosphère, formé par des mécanismes différents, donne naissance à la couche d'ozone qui protège des rayonnements ultraviolets.

I.3.4 Oxydes d'azote

Les oxydes d'azote, notés d'une façon générale par le sigle NO_X, regroupent : le monoxyde d'azote (NO), et le dioxyde d'azote (NO2). Les NO_X sont essentiellement produits par l'Homme. Toutes les combustions à haute température et à haute pression :

moteurs des automobiles, en particulier les moteurs diesel qui, du fait de leur fonctionnement à plus haute pression, émettent 2 à 3 fois plus de NO_X que les moteurs à essence.

I.3.5 CFC et assimilés

Dès les années 1980, il a été démontré que les chlorofluorocarbones (CFC, dits « fréons ») ont des effets potentiellement négatifs : destruction de la couche d'ozone dans la stratosphère. Ils sont utilisés dans les systèmes de réfrigération et de climatisation pour leur fort pouvoir caloriporteur, ils s'en échappent à l'occasion de fuites des appareils ou sont libérés lors de la destruction des appareils hors d'usage.

Ils sont utilisés également comme propulseur dans les bombes aérosols, une partie est libérée à chaque utilisation. Les bombes aérosols utilisent désormais comme gaz de propulsion de l'air comprimé, ou du dioxyde de carbone (CO2).

I.3.6 Méthane

Le méthane (CH4) est nuisible par sa grande contribution à l'effet de serre. Son potentiel de réchauffement global sur une durée de 100 ans est de 25 fois celui du CO2. Comme le méthane se dégrade assez rapidement dans l'atmosphère, la valeur est encore plus forte sur une durée de 20 ans : 72 fois celui du CO2.

Les sources sont diverses : Fermentation, Gaz de digestion des animaux d'élevage (ruminants notamment) ; il faut savoir que cette pollution représente 18% du changement climatique, alors que tous les moyens de transport réunis n'en produisent "que" 13,5%) Culture de riz, Gaz naturel.

I.3.7 Autres gaz

I.3.7.1 Dioxyde de soufre (SO2)

C'est l'un des principaux déchets rejetés lors de la combustion d'origine fossile. Ces origines peuvent être anthropiques (chauffage domestique, transports, industrie, métallurgie) mais également naturelles: marécages, océans, volcanisme. Il est un agent irritant du tractus respiratoire. Le dioxyde de soufre est aussi un composant de la formation des pluies acides nuisibles aux écosystèmes tels que les forêts et les lacs.

I.3.7.2 Hydrocarbures aromatiques polycycliques

Ce sont un ensemble de composés dont certains sont cancérigènes émis dans le cadre de la combustion notamment la combustion domestique, mais également dans les moteurs Diesel.

- Le mélange BTX : benzène, toluène, xylène.
- Composés organiques volatils (COV)

I.3.8 Particules solides en suspension dans l'air

Les particules solides en suspension dans l'air sont principalement constituées : de suies (particules cancérigènes riches en carbone), résidus de combustion incomplète (dues aux moteurs Diesel, à l'activité industrielle, au chauffage au bois résidentiel, par exemple). De poussière (provenant de l'érosion des sols ou d'activité volcanique), de particules d'origine biologique (pollen, virus, bactéries, spores, excréments, d'acariens) Les pollens peuvent être rendus allergènes par contact avec les polluants oxydants (ozone en particulier) ou suite à un long séjour dans l'air ou exposé aux UV, des procédés industriels, comme le sciage du bois d'œuvre.

Le poids de ces particules et leur taille, de l'ordre du micromètre à la centaine de micromètres de diamètre, leur permettent de se diffuser au gré des vents, voire pour les nanoparticules de se comporter comme des gaz. Une fois émises, elles peuvent rester en suspension pendant des heures et même des jours ou des mois. Elles peuvent pénétrer profondément dans les poumons et ce d'autant plus que leur taille est réduit (particules fines, plus petites que 2,5 um). Dépendant de leur constitution (mélange comprenant plusieurs éléments), de leur concentration et des durées d'exposition, les particules peuvent causer des allergies, des difficultés respiratoires ou encore des lésions pouvant entraîner des cancers dans certains cas.

I.4 Problématique de la pollution industrielle

Les polluants d'origine industrielle sont responsables d'une pollution de proximité qui affecte la santé des populations lors des pics de pollution, mais participe aussi à la dégradation du patrimoine bâti et entraîne le plus souvent des nuisances olfactives. A l'échelle régionale, le transport et la transformation des substances oxydantes sont à l'origine des pluies acides.
L'émission de substances précurseurs de la pollution photochimique (oxydes d'azote, composés organiques, monoxyde de carbone) est également imputable en partie aux activités industrielles. Enfin comme d'autres activités humaines, l'industrie participe à l'effet de serre.
Ainsi l'impact de la pollution industrielle sur l'environnement et plus précisément sur la pollution de l'air est loin d'être négligeable et la diminution des rejets est devenue depuis quelques années une priorité pour l'Union Européenne qui souhaite améliorer la qualité de l'air de manière significative en imposant des normes d'émissions aux industriels pour les principaux polluants

I.4 .1 Les principaux polluants :

Les principaux polluants de l'atmosphère issus de l'industrie sont *(Cf. Figure 1)* :

I.4 .1.1 Le dioxyde de soufre (SO2)

Le dioxyde de soufre a pour origine principale la combustion des énergies fossiles (fioul, charbon) qui libère du soufre. Les principales sources de SO2 sont donc les installations de chauffage industriel, les raffineries de pétrole ainsi que certains procédés de fabrication. Le premier secteur émetteur de SO2 est la transformation d'énergie avec 51% des émissions de la France métropolitaine en

2008 (CITEPA, 2010), principalement du fait du raffinage de pétrole (26%) et de la production d'électricité (20%). Le SO2 est un gaz irritant pour l'appareil respiratoire et sous l'action du rayonnement solaire, il peut s'oxyder puis, en présence d'eau se transformer en acide sulfurique (phénomène des pluies acides)

I.4 .1.2 Les oxydes d'azote (Nox)

Bien que majoritairement émis par le secteur des transports (52% des émissions dont près de 24% des NOx sont émis par les poids lourds diesel (CITEPA, 2010), l'agriculture et l'industrie manufacturière représentent une part non négligeable des sources de NOx avec respectivement 14% et 12% des émissions de la France métropolitaine en 2007, juste devant les industries de transformation d'énergie (8% des émissions).

Les effets des oxydes d'azote sont différents. Le dioxyde d'azote (NO2) est un gaz irritant pour les bronches tandis que le protoxyde d'azote (N2O) est classé gaz à effet de serre. Les oxydes d'azote constituent en outre l'un des principaux précurseurs de la pollution photochimique et contribuent au phénomène des pluies acides.

I.4 .1.3 Les composés organiques volatils (COV)

Le terme générique de composés organiques volatils (COV) regroupe des milliers de composés aux caractéristiques très différentes (hydrocarbures, solvants …). La part des COV d'origine naturelle (essentiellement le méthane) n'est pas à négliger. Les COV non méthaniques (ou COVNM) proviennent notamment de procédés industriels.

En 2008, les principaux secteurs émetteurs sont l'industrie manufacturière, ainsi que le secteur tertiaire qui totalisent chacun 31% des émissions totales loin devant le secteur de la transformation d'énergie représentant quant à lui 4% des émissions en France métropolitaine (CITEPA, 2010). Les COV peuvent avoir une action irritante et être à l'origine de troubles neuro-digestifs. Ils interviennent également dans le phénomène de pollution photochimique en réagissant avec les oxydes d'azote.

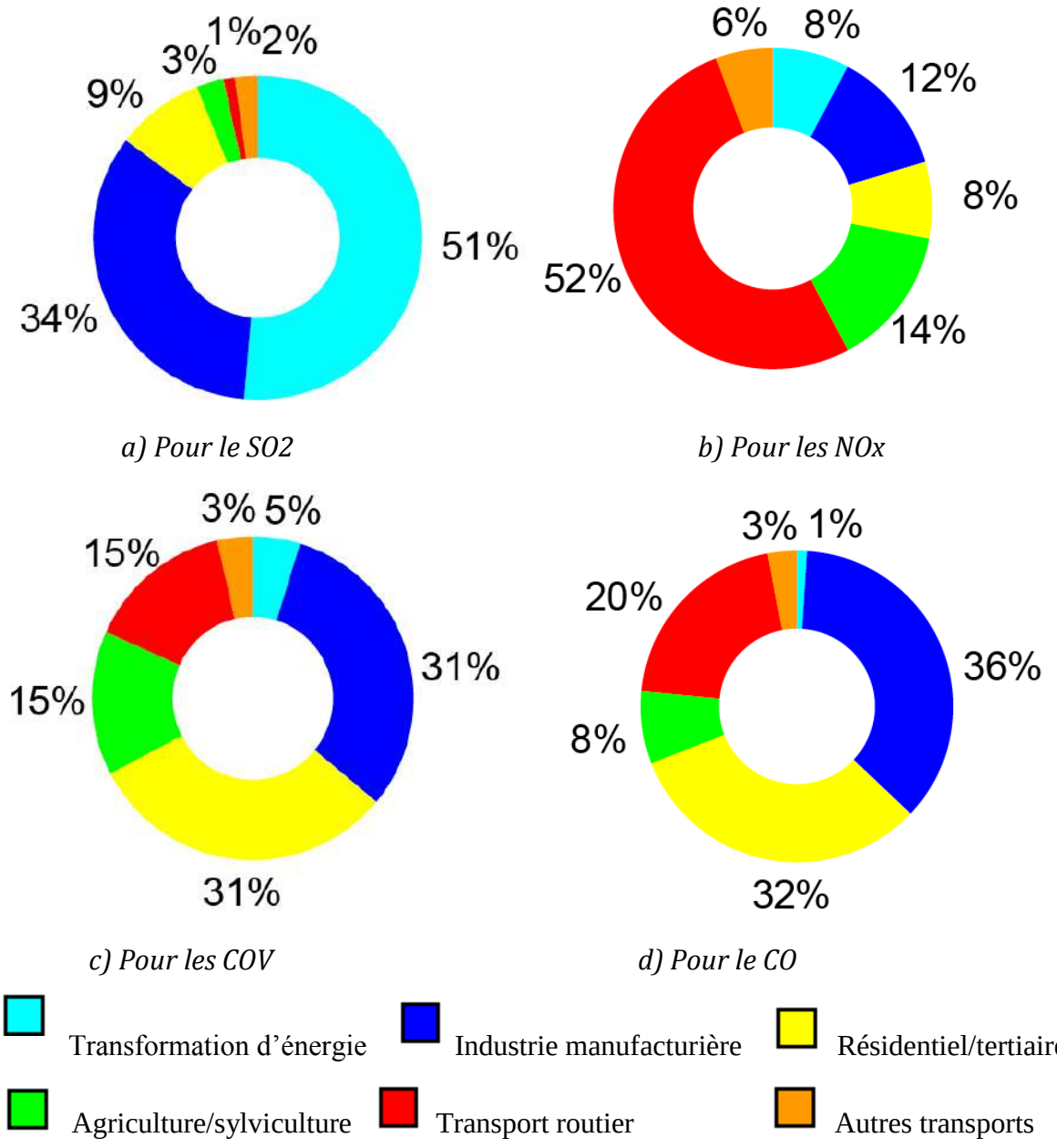
I.4 .1.4 Le monoxyde de carbone (CO)

Le monoxyde de carbone est formé par la combustion incomplète du carbone et provient essentiellement des moteurs des véhicules et des installations de combustion mal

réglées. L'industrie manufacturière représente 36% des émissions de CO en 2008 (CITEPA, 2010).

I.4 .1.5 Les autres polluants

D'autres polluants sont émis par le secteur industriel en moindre quantité, mais leur présence dans l'atmosphère n'est pas sans conséquence sur l'environnement et la société. On pourra citer les poussières, particules très fines qui sont émises lors de certains procédés industriels, l'acide chlorhydrique dégagé entre autre lors des traitements des déchets industriels, les métaux lourds (mercure, plomb),



a) Pour le SO2 *b) Pour les NOx*

c) Pour les COV *d) Pour le CO*

Figure I.1 : Pourcentage d'émission des principaux polluants par secteur en 2008 (CITEPA, 2010)

I.4 .2 Cadre réglementaire du contrôle des rejets dans l'air en France

I.4.2.1 La limitation des rejets de polluants :

La prévention des pollutions atmosphériques est prise en compte, pour les établissements industriels, dans le cadre de la législation relative aux installations classées. La réduction des rejets dans l'air s'inscrit dans le cadre d'une analyse globale visant à réduire au maximum les émissions correspondantes tout en évitant tout transfert de pollution vers un autre milieu (approche intégrée) et en recourant aux meilleures technologies disponibles.

Celles-ci sont souvent à la base des valeurs limites et des pratiques définies dans des arrêtés ministériels sectoriels (installation de combustion, usine d'incinération de déchets, etc.) ou par défaut dans l'arrêté ministériel du 2 février 1998. Cet arrêté relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau, ainsi qu'aux rejets de toute nature des installations soumises à autorisation, définit les concentrations limites de rejets à l'atmosphère pour de nombreux polluants (SOx, NOx, HCl, poussières, COV).

C'est sur la base de ces arrêtés ministériels mais aussi des meilleures technologies disponibles que les prescriptions adaptées à chaque industriel sont rédigées dans l'arrêté préfectoral d'autorisation.

I.4.2.2 La surveillance des rejets :

Les modalités de surveillance des principaux rejets sont également définies par l'arrêté ministériel du 2 février 1998. Le principe de base est de considérer que l'industriel est responsable du contrôle de qualité de ses rejets. Les plus gros pollueurs sont obligés à cette fin de surveiller régulièrement leurs effluents : c'est ce que l'on appelle l'auto surveillance.

Plus précisément l'auto surveillance comprend :

- La prescription, par voie d'arrêté préfectoral, de la nature et de la fréquence des mesures à réaliser ;
- La réalisation par l'exploitant lui-même des mesures prescrites aux points de rejet indiqués suivant des normes de prélèvement et d'analyse des échantillons ;
- La communication régulière des résultats de mesure à l'inspection des installations classées ; des analyses périodiques de contrôle, réalisées par un organisme extérieur agréé, qui permettent de confirmer les résultats de l'auto surveillance et de vérifier le bon fonctionnement des matériels d'analyse.

Des contrôles inopinés de rejets peuvent être réalisés par un organisme indépendant à la demande de l'inspection et aux frais de l'exploitant. L'auto surveillance permet ainsi une bonne connaissance des principaux rejets d'origine industrielle.

I.4.2.3 La déclaration annuelle des rejets polluants

La déclaration annuelle des rejets polluants, instituée par l'arrêté ministériel du 24 décembre 2002 aujourd'hui abrogé et remplacé par celui du 31 janvier 2008, concerne en particulier les rejets dans l'air. Les installations concernées sont :

- Les installations de combustion dont la puissance thermique maximale est supérieure à 20 MW ;
- Les usines d'incinération d'ordure ménagères de capacité supérieure ou égale à 3t.h-1 ;
- Les installations rejetant certains polluants (de type SO2, NOx, HCl, COV, CO2, etc.) au-delà d'un certain seuil.

I.4.2.4 Politique de gestion des risques industriels

Aujourd'hui, la proximité de l'industrie et de la population a pour effet d'accroitre les Conséquences d'un éventuel accident industriel. Il est donc important pour les pouvoirs publics d'engager une réflexion sur la répartition des populations près des sites industriels et de mettre en place des contraintes dans les plans d'occupation des sols pour éviter la présence humaine dans des zones à risque.

Le risque industriel est alors défini comme un évènement accidentel se produisant sur un site industriel mettant en jeu des produits et/ou des procédés dangereux et entraînant des conséquences immédiates graves pour le personnel, les riverains, les biens et l'environnement. Afin d'en limiter la survenue et les conséquences, les établissements les plus dangereux sont soumis à une réglementation particulière et à des contrôles réguliers. Ainsi une directive européenne dite Seveso ou directive 96/82/CE (officialisée en 1982) a été mise en place afin que les états membres de l'Union Européenne identifient les sites industriels présentant des risques d'accidents majeurs. Cette directive appliquée aux sites les plus dangereux impose donc aux exploitants diverses contraintes visant à minimiser l'exposition des populations aux risques industriels, et oblige les pouvoirs publics à limiter la constructibilité des zones proches des sites industriels.

La loi prévoit également l'élaboration de Plans de Prévention des Risques Technologiques (PPRT) pour ces sites industriels soumis à la directive Seveso. Ce PPRT est un outil réglementaire qui participe à la politique de prévention des risques industriels des établissements les plus dangereux en agissant sur la maîtrise des risques à la source par la mise en œuvre de mesures.

Leur objectif est double : d'une part, aider à résoudre les situations difficiles en matière d'urbanisme héritées du passé (habitations construites avant 1982 près des sites

industriels par exemple) et d'autre part, de mieux encadrer l'urbanisation future. Ainsi, le PPRT pourra, à l'intérieur d'un périmètre d'exposition aux risques, délimiter des zones dans lesquelles les constructions nouvelles ou extensions seront interdites ou soumises à réglementation. Cette démarche des PPRT se veut au service de la sécurité des populations, du maintien d'activités industrielles performantes, et d'un développement durable des territoires.

I.4.3 Vers une réduction des émissions

Les sources de polluants atmosphériques sont nombreuses et variées et ne sont pas aisément quantifiables, notamment lorsqu'elles sont diffuses ou fugaces. Les inventaires les plus fiables remontent aux années 1950-1960 et les travaux du Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique (CITEPA) montrent que c'est au cours de la période 1960-1990 que les émissions des principaux polluants de l'air (dioxyde de souffre, oxyde d'azote, particules en suspension, monoxyde de carbone, métaux, etc.) ont en France atteint les valeurs les plus importantes. Depuis cette période, les rejets sont en diminution constante, notamment pour les installations fixes (chaudières et foyer de combustion, activités industrielles, domestiques, agricoles, etc.), et les évolutions suivantes ont été plus particulièrement constatées en France au cours des 15 dernières années (Elichegaray *et al.*2009) :

- Baisse de plus de 60% des émissions de SO2 ;
- Baisse de plus de 40% des émissions de COV, CO, métaux lourds, dioxines et furannes ;
- Baisse de l'ordre de 30% des émissions de NOx ;
- Baisse de l'ordre de 20% des émissions de PM2.5 ;
- Baisse de 6% des émissions de NH3 ;
- Baisse de près de 20% des émissions de PM10.

Les progrès résultent de l'amélioration des technologies et des procédés, et de réglementations nationales ou européennes de plus en plus sévères en matière de qualité des combustibles (limitation du contenu en souffre et suppression du plomb dans l'essence, etc.) et de normes à l'émission, en particulier dans les secteurs de l'industrie, du traitement des déchets et de l'automobile. En France, une partie du progrès (notamment pour les oxydes de soufre et d'azote) provient aussi de la part importante du nucléaire et de l'hydraulique dans la production de l'électricité, ce qui limite le recours aux centrales thermiques classiques au fioul ou au charbon. Ce sont les émissions des foyers de combustion qui ont donc le plus baissé depuis les années 1980 et depuis la dernière décennie on observe une réduction assez

conséquente de la part de l'industrie dans la pollution de l'air de par l'augmentation en parallèle des déplacements et du parc automobile (environ 35 millions de véhicule en France aujourd'hui, contre 21 millions en 1980).

La meilleure manière d'améliorer la qualité de l'air consiste à agir sur les sources de Pollution et, au niveau national, le ministère de l'environnement a adopté un programme de réduction des émissions de polluants atmosphériques. Ce programme vise notamment à respecter la directive 2001/81/CE, fixant des plafonds d'émission pour quatre polluants dans chaque état membre d'ici 2010 (Cf. Tableau I.1). De nouveaux plafonds plus sévères sont également en discussion au sein de l'Union européenne pour fixer des objectifs pour 2020

Années	**1980**	**2003**	**Objectifs 2010**
SO2	~3200	~492	375
NOx	~1980	~1220	810
COV	~3000	~1400	1050
NH3	840	~753	780

Tableau I.1 : Evolution des émissions de quelques polluants de l'air en France (en kilotonne par an) et plafond d'émission 2010 fixé par la directive européenne 2001/81/CE

L'aspect législatif est une solution permettant d'imposer aux industriels une diminution de leurs émissions. Mais cette réduction des rejets de polluants d'origine anthropique passe aussi par la mise en œuvre de solutions technologiques alternatives. Les améliorations d'un procédé peuvent porter sur :

−**Les produits utilisés** : on remplace un produit polluant par un produit moins polluant.
Par exemple, le plomb présent dans l'essence a été remplacé par des composés
(MTBD) qui remplissent la même fonction ;

−**La consommation d'énergie :** il est possible de diminuer la consommation d'énergie d'un procédé et par conséquent la pollution générée par la production de cette dernière, en optimisant le rendement d'un procédé ;

−**Les traitements des effluents** : Au jour d'aujourd'hui, il existe des techniques,
Utilisant des procédés de filtrage ou de dépoussiérage des fumées par exemple, qui permettent le retraitement de certains rejets que l'on ne peut pas complètement éliminer.

I.4 .4 La place de la modélisation

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

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

I.4 .4.1 Surveillance de sites

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

I.4.4.2 Aide à la décision

Aux exploitants de réagir de manière adaptée et rapide à une situation de pollution repérée par un capteur, mais elle apporte aussi, par des études

L'un des principaux intérêts de la modélisation pour les exploitants de sites industriels est de pouvoir étudier les modifications engendrées par un changement des conditions d'un problème. Ainsi, il est possible avec les outils actuels de prédire l'impact de l'ajout d'une

géométrie ou d'un terme source sur les sites industriels. Plusieurs scénarii peuvent être testés et simulés afin de d'aider les politiques et les exploitants à choisir le meilleur compromis entre rentabilité et protection des populations aux alentours. Ainsi la modélisation prend une place très importante dans l'optique de réalisation de PPRT par exemple. Les études de dangers sont alors réalisées en partie par des modèles de calcul, qui lors d'aménagements particuliers (implantation d'usine, réorganisation de l'urbanisme aux alentours d'un site, etc.) apportent des renseignements sur la pollution engendrée et évaluent l'efficacité des différentes politiques mises en œuvre. Finalement, l'apport de la modélisation atmosphérique au niveau de l'aide à la décision est très important et permet de faciliter la coexistence entre la rentabilité et la production du monde industriel et la sécurité des populations environnantes.

I.5 structure de la Couche Limite Urbaine

Un cas particulier de la CLA est la Couche Limite Urbaine (CLU) qui se développe au-dessus des villes du fait de sa structure particulière (figure I.6). En effet la ville se caractérise par une forte hétérogénéité des types de surfaces, des matériaux utilisés, des hauteurs des bâtiments, et par une longueur de rugosité beaucoup plus grande que les zones rurales ou même qu'une forêt homogène. Oke (1976) évoque un principe fondamental pour les recherches en climatologie urbaine qui ont suivi ses travaux ; il distingue la CLU de la Couche de Canopée Urbaine. Cette dernière englobe les éléments urbains rugueux, depuis le sol jusqu'au niveau moyen des toits.

L'échelle des processus existant dans ces deux couches est en effet à séparer ; dans la Couche de Canopée Urbaine, l'écoulement et les échanges d'énergie sont régis par des processus de micro-échelle, et dépendent précisément du lieu et du type de surface. La sous-couche rugueuse de la CLU est particulièrement perturbée. Bien qu'elle existe également pour un sol peu rugueux, son épaisseur devient beaucoup plus conséquente au-dessus d'une ville. Dans certaines conditions, elle pourrait atteindre plusieurs fois la hauteur moyenne des bâtiments (Arnfield, 2003). L'épaisseur de la sous-couche rugueuse est en général difficile à déterminer. Elle est souvent considérée proportionnelle à la hauteur de la Couche de Canopée Urbaine (Arnfield, 2003 ; Rotach, 2005), avec un facteur compris entre 2 et 5. Dans cette couche, l'écoulement ne vérifie pas les conditions d'homogénéité horizontale et de stationnarité nécessaires à l'application de la théorie de similitude de Monin-Obukhov (Annexe 1). Au contraire les flux turbulents varient fortement.

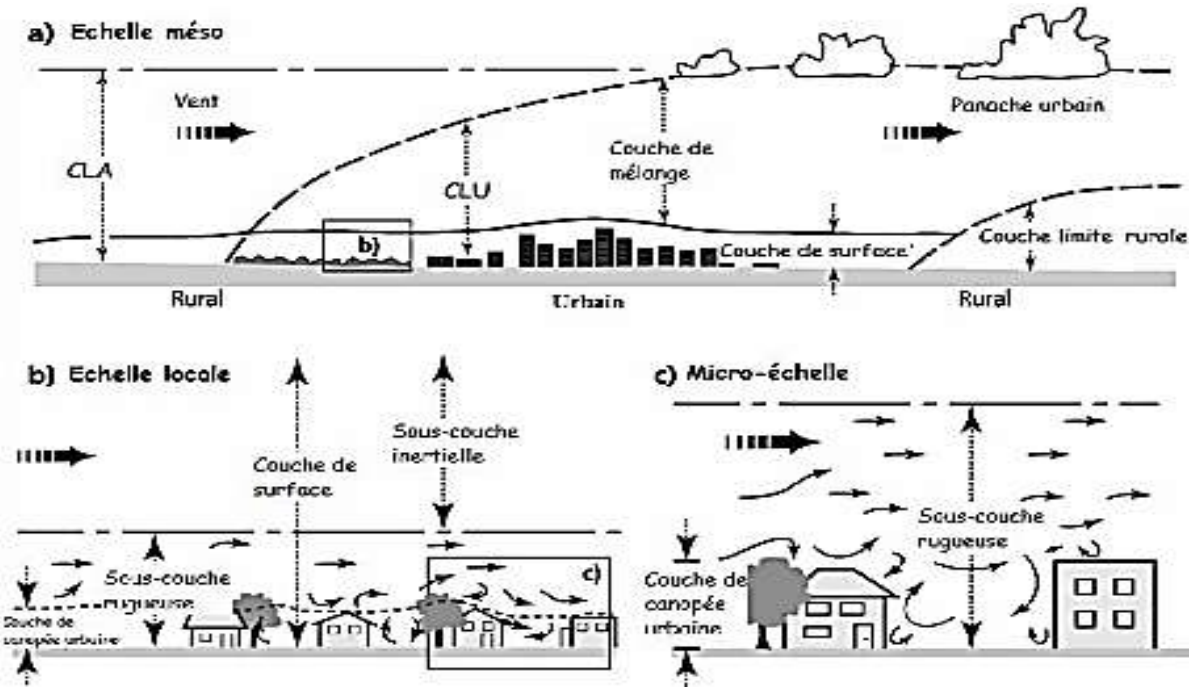


Figure I.2 : Représentation schématique de la couche limite urbaine (CLU) à méso échelle (a), à l'échelle locale (b) et à micro-échelle (c) (Piringer et *al, 2002).*

La sous-couche inertielle est la zone située au-dessus de la sous-couche rugueuse et qui s'étend jusqu'au sommet de la couche de surface. C'est uniquement dans cette partie de la couche de surface que les conditions d'application de la théorie de Monin-Obukhov sont réunies. Le problème qui se pose au-dessus des villes est que la sous-couche inertielle peut être très réduite voire même inexistante dans certaines conditions (Rotach, 2005). Dans tous les cas, l'altitude de mesure des flux turbulents au-dessus des villes est donc un paramètre très important, puisqu'il conditionne l'application de la théorie de similitude de Monin-Obukhov.

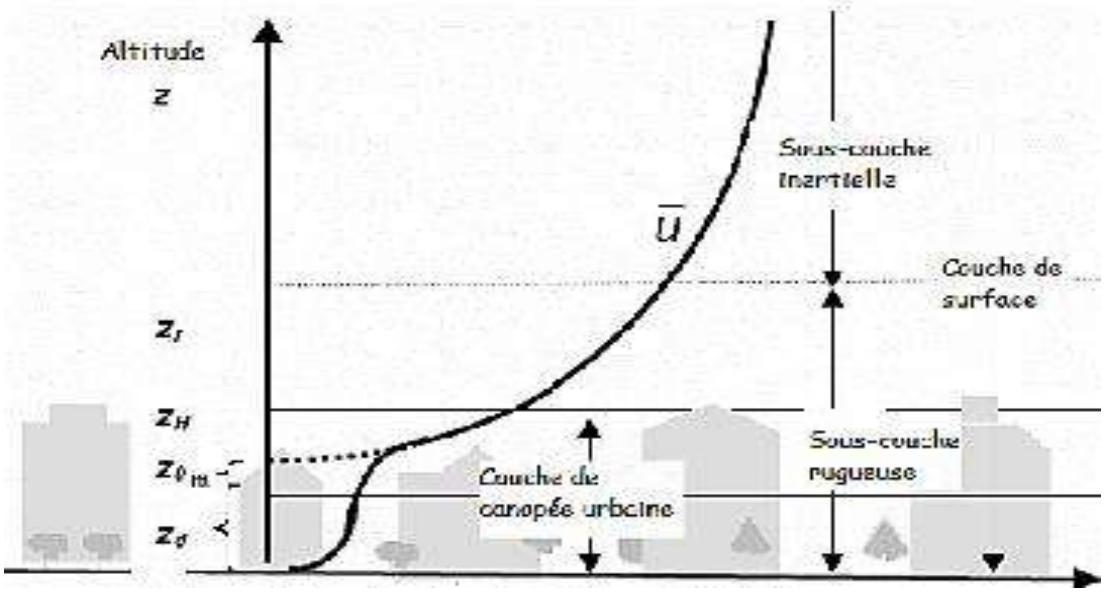


Figure I.3 : Cycle diurne de la CLA (Stull, *1988 ;* Delmas et *al, 2005).*

Pour une zone urbaine, la définition de la longueur de rugosité donnée pour les surfaces naturelles n'est plus valide, car la densité surfacique et la hauteur des éléments rugueux sont plus élevées (figure I.**3**). En effet il faut ajouter une hauteur de déplacement à la longueur de rugosité pour obtenir l'altitude à laquelle le profil logarithmique du vent moyen s'annulerait si on le prolongeait dans la couche de canopée urbaine.

Si l'on se place à méso-échelle, la présence d'une ville perturbe les caractéristiques de la CLA existant dans le milieu qui l'environne. En particulier, si le vent est suffisamment fort, une couche limite interne se développe à l'endroit du changement brutal de rugosité et de température de la surface. En effet, à la frontière d'une ville, la CLU prend forme et s'épaissit vers le centre de la ville. Une zone de transition se forme également au-dessus, à l'interface entre cette couche et la couche limite rurale. Plusieurs couches internes se succèdent si la ville est composée de quartiers bien délimités ayant une morphologie et des matériaux différents. La CLU forme un panache sous le vent de la ville, alors que près du sol la CLA est à nouveau influencée par la surface rurale. (Sylvie Leroyer, 2006).

I.5.1 Influence d'une ville sur l'environnement

L'agglomération urbain se caractérise et se différencié des zones non et faiblement bâties, par:

- La production d'énergie anthropique, quantité d'énergie due au chauffage des habitations, à la circulation automobile, et aux industries. Cette grandeur est étroitement liée à la taille et la densité de la ville, sa fonction et son industrialisation, ainsi qu'à la zone climatique et aux besoins en chauffage.

- La réduction de la vitesse du vent dans les basses couches, en général en raison d'une augmentation de la rugosité de surface causée par les constructions. Ainsi, par exemple, à Londres , qui dispose d'un réseau de stations assez dense en comparaison avec celui des autres villes, sur une période allant de 1961 à1970, la vitesse moyenne du vent est souvent de 20 à 30% plus faible qu'en dehors de la ville (Lee, 1984). Néanmoins, lors de condition anticyclonique très stables, la vitesse du vent peut localement être plus élevée en ville qu'à périphérie. Ceci peut s'observer lorsque le vent pénètre dans des rues parallèles au flux de circulation atmosphérique, qui vont donc le canaliser et l'accélérer par effet Venturi. Selon Oke (1978), un gradient de température entre la couche urbaine et la couche rurale suffisamment fort pourrait donner naissance à des brises soufflant de la compagne et convergeant vers le centre-ville, de la même manière que sont générées les brises de mer.

- La nette diminution de l'évapotranspiration, due à la réduction de la végétation, ainsi qu'à l'imperméabilisation de la majorité des surfaces. Un bassin urbain répond donc plus vite aux

précipitations, et les sorties d'eau par ruissellement y sont plus importantes : le stockage d'eau est moins important qu'à la compagne. Le réseau d'évacuation des eaux usées en soustrait un volume considérable.

- Un important stockage de chaleur en journée en raison des propriétés thermiques des matériaux des constructions. De plus, la verticalité des façades des immeubles augmente les surfaces d'échange de rayonnement par rapport à ce que l'on peut trouver en compagne.

L'importance de ces différents processus est fonction de la saison, des caractéristiques de la surface urbaine et des conditions météorologiques. Ainsi, à titre d'exemple, on comprendra aisément que la production d'énergie due au chauffage des habitations prédomine en hiver, et que l'évapotranspiration est plus élevée après un épisode pluvieux.

Tous ces facteurs sont responsables de caractéristiques spécifiques sur l'environnement climatique de la ville, dont la manifestation la plus visible est l'îlot de chaleur urbain.(Nicola Ringenbach, 2002).

I.5.2 Ilots de chaleur urbaine

Les îlots de chaleur sont des secteurs urbanisés caractérisés par des températures de l'air ou du sol plus élevées de 5 à 10°C que l'environnement immédiat du point de prise de mesure. La formation, l'intensité et la variabilité spatiotemporelle des îlots de chaleur sont associées à six principaux facteurs, de nature :

- Climatique (ciel clair, absence de vent, pollution atmosphérique);
- Energétique (rejet de chaleur provenant de la consommation énergétique); - géographique (emplacement de la ville);
- Morphologique (densité des bâtiments, concentration et taux de croissance des végétaux);
- Politique (pratiques d'aménagement du territoire);
- Structurelle (taille de la ville, rapport de surface minéralisée/végétalisée, occupation du sol).

Depuis une trentaine d'années, la communauté scientifique reconnaît l'existence de trois grandes catégories d'îlot de chaleur: <<urban boundary layer», <<urban canopy layer» et <<grounds surface». A l'échelle journalière, les îlots de chaleur de type <<boundary layer» et <<canopy layer», caractérisés par des températures de l'air élevées, sont à leur maximum d'intensité la nuit. Par opposition, les îlots de chaleur de type <<ground surface» ont habituellement une plus forte intensité et une plus grande variation spatiale en cours d'après-midi. Ce type d'îlot se développe sous forme d'archipel (petits îlots de tailles et de formes différentes) et est davantage représentatif des écarts thermiques intra-urbains (Genevieve Lachance, 2006).

I.5.3 Caractéristiques température et spatiales

La forme et la taille de l'îlot de chaleur urbain varient dans l'espace et dans le temps, en fonction des conditions météorologiques, et des caractéristiques propres à la ville. L'îlot de chaleur urbain est le plus marqué dans les parties les plus densément bâties, qui correspondent en général au centre-ville (figure I.**4**). Le gradient de température le plus fort s'observe généralement à la périphérie de la ville, alors qu'à l'intérieur, les gradients sont plus faibles d'où l'allusion à un îlot dans la terminologie utilisée pour décrire ce phénomène. Notons que la présence de parcs urbains coïncide avec des chutes de température, jouant ainsi un rôle d'îlot de fraîcheur. C'est par exemple le cas du Jardin Botanique à Strasbourg (Fischer, 2001).

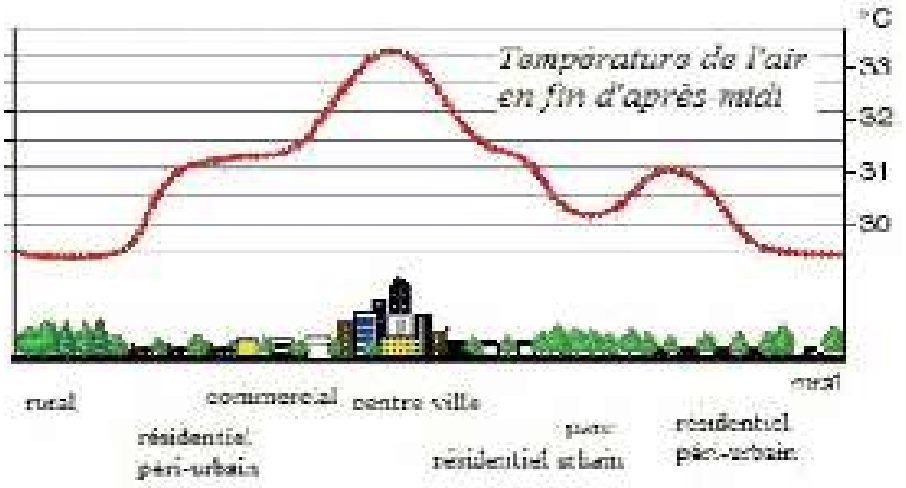


Figure I.4 : Représentation schématique de l'îlot de chaleur urbain (ICU) en fonction des quartiers (Morris et Simmonds, 2000)

Comme il a déjà été dit, l'intensité de l'îlot de chaleur urbain est liée à la taille de la ville. Lorsque le vent est très faible est le ciel bien dégagé, il est montré que l'îlot de chaleur urbain maximal est en relation avec l'algorithme (ou une fonction puissance) de la population de la ville (Oken, 1973). Cela signifie que même dans les petites villes, on retrouve une légère augmentation de la température par rapport à la campagne environnante. L'îlot de chaleur urbain présente également une extension verticale. Pendant le jour, il peut s'étendre de 600 à 1500 mètres au-dessus de la ville, en raison de l'importance de convection. La nuit en revanche, l'épaisseur de cette couche dépasse rarement 300 mètres en raison d'une stabilité plus importante. Cependant, l'atmosphère au-dessus de la ville est loin d'être homogène, et dans la couche limite générée par la ville des deux strates (figure I.5) :

La première strate est la canopée urbaine : dans cette couche que de nombreux processus physiques, à l'origine de flux de chaleur sensible ou latente, prennent naissance. La deuxième strate la couche limite urbaine (CLU) : quand cette couche est poussée par le vent à

l'extérieur de la ville, elle donne naissance à ce qui est appelé le panache urbain. Elle est alors séparée de la surface par une couche influencée par les caractéristiques de la compagne. En revanche, lorsque le vent est faible, une bulle d'air chaud se forme, entretenue par des cellules convectives d'air chaud ; il s'agit du dôme urbain.

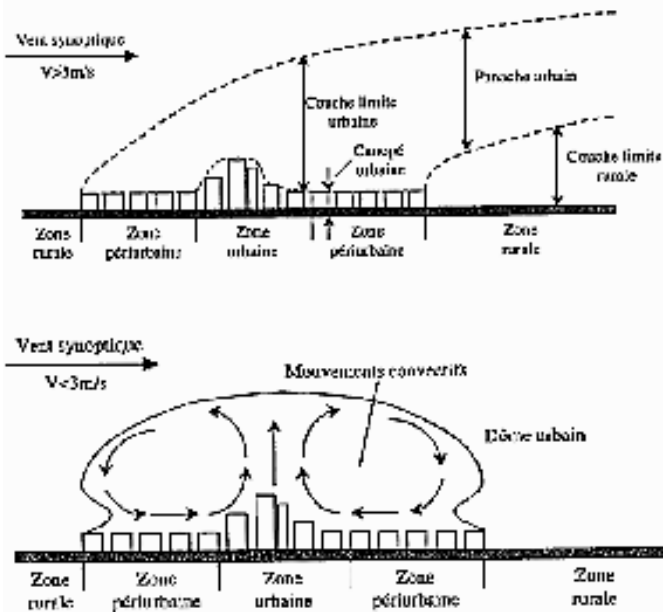


Figure I.5 : Structure verticale de l'atmosphère urbaine des vents supérieurs et inférieurs à 3m/s (Mestayer, Anquetin, 1995)

I.6 Echelles d'études de la pollution

I.6.1 Échelles spatiales de dispersion des pollutions

Les échelles de temps et d'espace qui caractérisent le phénomène sont multiples. Le temps de vie d'un polluant dépend essentiellement de la rapidité de chimie. Or, les vitesses de réaction sont très variables d'une réaction à une autre. Les échelles spatiales qui peuvent être regroupées en trois catégories : les échelles locales, régionales ou globales (Christelle Philippe, 2004).

I.6.1.1 Pollution à l'échelle locale : la pollution de proximité

Cette pollution est celle qui existe à proximité des sources (industries, chauffage, trafic). C'est par exemple la pollution urbaine. Elle affecte la santé des populations par son action directe et à court terme, mais exerce également une toxicité à plus long terme pour certaines pathologies. Outre les problèmes de santé, la pollution de proximité peut procurer un gène olfactif important et participer à la dégradation du patrimoine bâti par corrosion et salissure. C'est cette pollution locale qui, la première, a fait l'objet d'un suivi aux abords des grandes sites industriels.

I.6.1.2 Pollution à l'échelle régionale

Elle caractérise des pollutions que l'on observe dans des zones situées à quelques dizaines, voire à plusieurs centaines de kilomètre des sources de pollution. Trois phénomènes sont regroupés sous ce terme, la pollution photochimique (abordée précédemment), les rejets accidentels (par exemple : Tchernobyl) et les pluies acides. Les oxydes d'azote et le souffre par combinaison avec la pluie créent des acides nitriques et sulfurique qui attaque la végétation.

I.6.1.3 Pollution planétaire

Il s'agit de la diminution de la couche d'ozone stratosphérique et de l'effet de serre. Les rejets dus aux activités humaines tendent à diminuer l'épaisseur la couche d'ozone stratosphérique, qui est nécessaire, à l'inverse de l'ozone de basse altitude (Figure 6). En effet, la couche d'ozone filtre une grande part du rayonnement solaire ultraviolet, ce dernier peut engendrer une augmentation du risque de développer des pathologies telles que des cancers de la peau.



Figure I.6: Ozone stratosphérique et l'ozone à basse altitude.

Tout comme l'ozone, l'effet de serre est indispensable à l'équilibre biologique terrestre. Il consiste en un réchauffement de l'atmosphère par des molécules qui ont la propriété de piéger les radiations à grande longueur d'onde émises par la surface du globe.

Sans ce phénomène, la température de l'air serait inférieur de 30°C à sa valeur moyenne actuelle qui est de 15°C. Or, aujourd'hui, l'effet de serre augmente à cause des émissions anthropiques de certains gaz dits « à effet de serre », comme

N_2O ,CO_2 CH_4 CO_1

I.6.2 Echelle méso

I.6.2.1 Echelles associées

La dynamique de l'atmosphère est décrite par les équations de Navier-Stokes qui reposent sur des concepts de conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie.

Par une analyse aux ordres de grandeur bâtie sur les échelles caractéristiques du mouvement (échelles spatiales horizontale et verticale, échelle temporelle), le système d'équations est modifié conduisant ainsi à des méthodes de résolution différentes en fonction des échelles étudiées.

Afin de rendre compte de la forte in stationnarité des mouvements atmosphériques à l'échelle d'une agglomération ou d'un massif montagneux (échelle spatiale horizontale de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres) et notamment l'importance de la représentation des effets convectifs liés au cycle diurne (alternance jour - nuit) qui agissent sur la variation de l'accélération verticale tout particulièrement en zone de relief marqué, la formulation non hydrostatique des équations de la dynamique de l'atmosphère s'impose.

Pour l'atmosphère urbaine, la gamme d'échelles se situe entre celles associées à un quartier (quelques, inférieur à 100m), jusqu'à celles d'une agglomération (de l'ordre de quelques centaines de mètres). On s'attache par ailleurs à reproduire le cycle diurne complet afin de mettre en évidence le caractère fortement instationnaire de ces écoulements et de la réactivité associée.

I.6.2.2 Elément de dynamique de l'atmosphère urbaine

L'évaluation de la pollution induite par une zone urbaine impose la prise en considération d'un domaine d'échelles très étendues, depuis la méso-échelle (méso â, L= 200 km, T= quelques heures à un jour) jusqu'à l'échelle moléculaire des réactions chimiques, en passant par les échelles intermédiaires associées aux mouvements turbulents responsables des mélanges et de la dilution.

Au-dessus d'un sol homogène et plat, la couche de surface est définie comme étant la couche de quelques dizaines mètres à une centaine de mètres d'épaisseur où la force de Coriolis n'influe pas sur la structure de l'écoulement, les champs turbulents sont horizontalement homogènes et leurs distributions verticales dépendent essentiellement des conditions de surface (flux de quantité de mouvement, flux de chaleur). Dans cette couche, les flux de quantités transportés sont indépendants de l'altitude (cette couche est d'ailleurs appelée « couche à flux constant ») et, la répartition des vitesses moyennes suit une loi logarithmique. Au-dessus d'une zone urbaine, cette structure est fortement perturbée par l'hétérogénéité des surfaces conduisant ainsi au développement d'une succession de couches internes qui seraient déclenchées en considérant que le sol urbain serait formé d'une succession de quartiers relativement homogènes définis chacun par une hauteur de rugosité équivalent, une hauteur de déplacement et un flux de chaleur.

Une revue synthétique des différentes approches de la caractérisation du couvert urbain est présentée dans Mestayer and Anquetin (1994), trois échelles distinctes mais fortement imbriquées qui caractérisent la dynamique à l'échelle d'une agglomération : l'échelle de la rue (dont le rapport d'aspect hauteur / largeur conditionne la structure de l'écoulement et les capacités de mélange), l'échelle du quartier (groupe de bâtiments qui a des propriétés aérodynamiques et dispersives homogènes) et celle de l'agglomération. Ces échelles spatiales sont associées à des échelles temporelles propres qu'il convient de prendre en compte dans les modèles numériques.

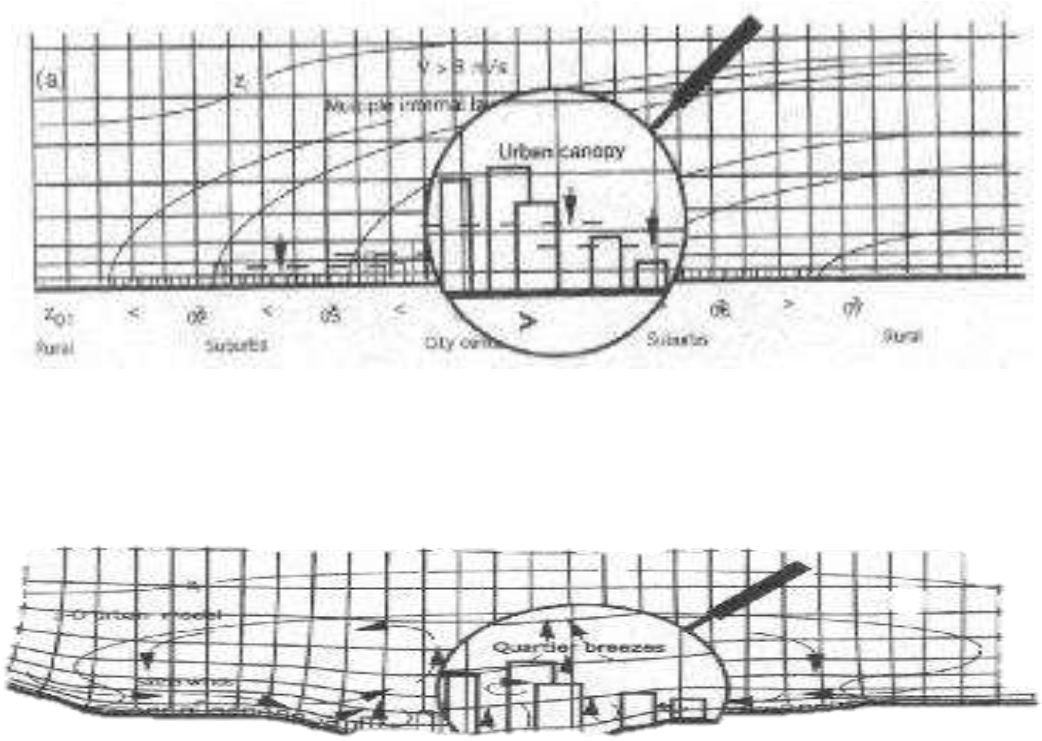


Figure I.7: perturbation des basses couches de l'atmosphère par un site urbanisé en fonction des conditions météorologiques.

La figure I.7 schématise la perturbation des basses couches de l'atmosphère par un site urbanisé en fonction des conditions météorologiques. Par conditions de vents forts (a), la ville sera "vue" comme une succession de sols aérodynamique ment différente qui conditionne le développement de couches internes. Lorsque le vent est faible (b), on observe un couplage fort entre les effets thermiques et dynamiques. Les interactions entre l'intérieur et l'extérieur de la rue délimiteront l'échelle du quartier à laquelle se met en place un régime de vent analogue aux effets de brise à l'interface mer - terre. La combinaison de l'ensemble des quartiers crée alors au-dessus de l'agglomération un îlot qui délimite les échanges verticaux.

La dynamique de l'atmosphère qui se développe à cette échelle (L= quelques dizaines de mètres, T est de l'ordre de la minute) a un impact considérable sur la quantité de polluant inhalée par le piéton ainsi que sur la mouillabilité des surfaces bâties modifiant ainsi le bilan énergétique à ces échelles.

Les résultats de simulation obtenus avec des modèles statistiques (3D, moyenne de Reynolds) montrent que la structure des champs de vitesse et de turbulence dans la rue est un enjeu pour connaître la qualité de l'air respiré par les piétons.

Ces champs résultent de la combinaison de l'advection dynamique induite par le vent et de la convection thermique générée par les différences de température entre les surfaces de la rue (ensoleillement, type de matériau). Cette dynamique dépend donc de la géométrie de la rue et des conditions météorologiques locales (Sini et *al,* 1996). Les résultats principaux font apparaître l'influence du rapport de forme d'une rue (hauteur / largeur) sur la typologie de l'écoulement induit par le vent. Les seuils de transition des différentes configurations sont identifiés en termes de régime d'écoulement, de qualité de ventilation et d'échelle de temps de dispersion.

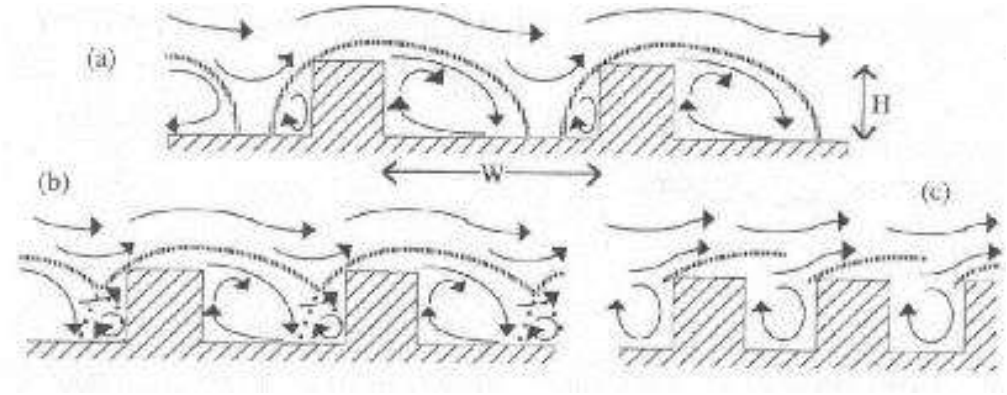


Figure I.8 : régimes d'écoulement en fonction des échelles caractéristiques de la rue (largeur W, hauteur H).

La figure I.8 présente une schématisation des régimes d'écoulement en fonction des échelles caractéristiques de la rue (largeur W, hauteur H). Ces trois régimes aérodynamiques ((a) rugosité isolée (isolated roughness flow), (b) interférence de sillages (wake interference flow), (c) écoulement rasant (skimming flow)) mettent en évidence l'impact du rapport d'aspect de la rue (W/H) sur les échanges verticaux entre l'intérieur et l'extérieur de la rue. L'idée est donc de définir les bornes qui délimitent ces trois régimes afin de pouvoir quantifier les flux verticaux à la seule lecture du plan d'occupation des sols de la ville (Hussain and Lee, 1980).

Conclusion

Depuis une vingtaine d'années, la pollution atmosphérique est devenue pour les décideurs un sujet de préoccupation certain. L'augmentation des densités de population dans les grandes métropoles et la proximité des installations industrielles ont contribué à faire de la pollution de l'air un problème sanitaire majeur. Ainsi en ce début de XXIème siècle, de nombreuses normes sont en places et constituent de forts moyens d'action pour limiter les rejets polluants, qu'ils soient d'origine automobile, tertiaire ou industrielle.

On peut d'ores et déjà observer les effets de ces mesures par une nette diminution des principaux polluants.

Avec l'amélioration des moyens informatiques et des connaissances, la modélisation s'est petit à petit développée afin de venir s'installer, en appui des limitations de rejet, dans un système de solution visant à réduire les émissions et à gérer les conséquences de la pollution.
Ainsi, cette introduction à la problématique de la pollution de l'air a permis de présenter le contexte général dans lequel s'instaure l'utilisation de la modélisation et plus particulièrement son utilisation dans le secteur de l'industrie. L'objectif de ce travail de recherche est de contribuer au développement des outils de modélisation qui permettent d'assurer la surveillance et la sécurité des sites industriels.

CHAPITRE : II

Les modélisations Mathématiques

II. Introduction

Dans ce chapitre on s'intéresse à la modélisation mathématique de transfert de Chaleur et d'écoulement turbulent de fluide incompressible en régime variable, ou les Modèles de fermeture sont abordés.

Tout d'abord, les lois fondamentales du transfert de la chaleur seront présentées, Aboutissent à l'équation de la chaleur régissant le comportement d'un système thermique. Ensuite nous avons faire une formulation des équations de Navier-Stokes qui régissent le Mouvement turbulence d'un fluide incompressible visqueux.

La mécanique des fluides est gouvernée par trois équations fondamentales. Celles-ci Sont l'équation de continuité, l'équation de la quantité de mouvement et l'équation de L'énergie.

II.1 Modélisation de la turbulence

Utilisation courante a été rendue possible par les progrès réalisés dans le domaine de la résolution des équations de la mécanique des fluides et surtout par l'évolution des moyens de calcul. Aujourd'hui la modélisation est un véritable complément aux études expérimentales La modélisation des écoulements turbulents est un considérable outil pour la compréhension des mécanismes physiques pour la conception et le développement dans l'industrie. Son permettant de limiter le nombre d'essais en soufflerie, entraînant une réduction des coûts et des délais de conception, et constitue ainsi un enjeu économique majeur.

Actuellement les applications concernant les géométries complexes réelles dans le domaine de la prévision atmosphérique et la qualité de l'air dans la couche limite urbaine, mettent en jeu des phénomènes complexes : transition laminaire, turbulence, décollements, etc.

II.2 Equations mathématiques.

II.2. 1 Equation de continuité

Quel que soit le domaine de fluide que l'on suit dans son mouvement, le fluide reste continu. Il ne peut y avoir ni apport extérieur, ni prélèvement de matière.

L'équation de continuité exprime la variation de la masse de fluide par rapport au temps dans un volume élémentaire donné.

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

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

On note ici :

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

- ρ : la masse volumique du fluide au point repéré par le vecteur $\vec{x}$ à l'instant t

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

- $\vec{U}$: la vitesse d'une particule de fluide se trouvant au point repéré par le vecteur $\vec{x}$ à l'instant
- Forme locale
- Cette écriture est la plus générale et la plus répandue.

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

- En faisant intervenir la notion de dérivée particulaire, on a l'écriture équivalent suivante :

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho\,\text{div}\,(\vec{U}) = 0 \qquad \text{(II.4)}$$

- Forme intégrale
- Cette formulation permet l'étude d'un "bloc" de fluide $\Omega(t)$ pouvant éventuellement se déformer au cours du temps.
- Elle traduit le fait que la masse du fluide enfermé dans le volume $\Omega(t)$ est constant

$$\frac{d}{dt}\int_{\Omega(t)} \rho(\,\vec{x}\,, t)\, d\Omega(t) = 0 \qquad \text{(II.5)}$$

- Écoulement incompressible
- Dans le cas où la masse volumique est constante au cours du temps et uniforme dans l'espace (écoulement incompressible), l'équation de conservation se réduit à

$$\text{div}\,(\vec{U}) = 0 \qquad \text{(II.6)}$$

Conditions de saut

- Lorsque le composé étudié est constitué de deux fluides différents non miscibles séparés par une interface $\sum(t)$ se déplaçant à une vitesse de propagation locale $\overrightarrow{W}(\vec{x}, t)$, la conservation de la masse s'exprime par la relation suivante :

$$\Delta(\rho(\vec{U} - \overrightarrow{W}))\ \cdot \vec{n} = 0 \qquad \text{(II.7)}$$

- où $\Delta(b) = b_2 - b_1$ si b_1 et b_2 sont les valeurs respectives de la grandeur b dans les deux fluides 1 et 2 et $\vec{n}$ est le vecteur normal à $\sum(t)$ orienté du fluide 1 vers le fluide 2
- La forme locale de la conservation de la masse s'applique seulement sur un point M du volume V de fluide, ce qui explique l'utilisation de l'outil différentielle. On parle de forme intégrale faible.
- On rappelle la forme intégrale forte:

$$\int \frac{d\rho}{dt} \cdot dv + \int \rho \cdot \vec{v} \cdot \vec{n} \cdot dS = 0 \qquad \text{(II.8)}$$

- Cette écriture est constituée d'une intégrale sur un volume et d'une intégrale sur une surface. Cela peut ne pas être pratique. Or, il existe un théorème permettant de transformer une intégrale double en intégrale triple et vice versa: le théorème de Green-Ostrogradski ou le théorème de flux-divergence:

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

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

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

-
- On retrouve dans cette dernière expression le principe fondamental de la mécanique: la conservation de la vitesse pour tout volume V' sur V.
- On rappelle que si $Ax + By + Cx^2 = 0$ est vrai pour tout (x, y), alors A = B = C = 0.
- En appliquant cette règle à la forme intégrale forte, on obtient la forme intégrale faible ou forme locale:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla \cdot j = 0 \quad (II.11)$$

II.2.2 Equation de diffusion

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

Déclaration L'équation est généralement écrite comme:

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

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

Plus généralement, lorsque D est une matrice symétrique définie positive, l'équation décrit la diffusion anisotrope, qui est écrite (pour les trois dimensions de diffusion) comme sui

$$\frac{\partial \phi(r,t)}{\partial t} = \sum_{i=1}^{3} \sum_{j=1}^{3} \frac{\partial}{\partial x_i} [D_{ij}(\phi, r) \frac{\partial \phi(r,t)}{\partial x_i}] \qquad (II.13)$$

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

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

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

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

Également appelé l'équation de la chaleur.

Histoire et développement

Dérivation

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

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

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

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

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

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

II.2.3 Equation de conservation de quantité de mouvement

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

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

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

La formule **:**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{u}_i) = -\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\tau}_{ij} - \overline{\rho u_1^{"} u_1^{"}}) + (\bar{\rho}_\infty - \bar{\rho})g\delta_{ij} \quad \text{(II.18)}$$

II.2.4 Équation de bilan de l'énergie

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

Dans ces équations :

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

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

II.2.5 Equation de conservation de l'énergie

Un sysn'échange avec l'extérieur ni énergie par l'intermédiaire de forces (par exemple : gratème isolé se compose d'un ensemble d'objets physiques (généralement des particules: atomes, photons, etc.). Il est dit isolé, s'il vité , magnétisme, ni matière (on n'enlève ni n'ajoute de particules ayant une masse au système). Notamment, le système isolé n'échange pas de photons avec un autre système, ni n'en reçoit d'autre système

La formule :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{T} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{T}) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\frac{\lambda}{c_p}\frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} - \overline{\rho u_j^{"}}) \quad \text{(II.20)}$$

II.2.6 Equation de conservation des espèces

Exprime dans cette foremule

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{C}^m) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{C}^m) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}D^m\frac{\partial\tilde{C}^m}{\partial x_j} - \overline{\rho U_j^{"}C^{:}} \qquad \text{(II.21)}$$

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

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

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

II.2.7 L'équation de Navier-Stocks :

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

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

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

(1): terme force d'inertie.

(2): terme force appliqué.

(3): terme in stationnaire.

(4): terme convectif.

(5): terme pression.

(6): terme visqueux.

Conclusion

Connus sous de noms Navier-stoker » représente derniers marché de l'échelle dans les Nous avons présent dans ce chapitre les équation de bas de mécanique de fluide ; ces équation problème lies là la dynamique pour arriver ace niveau .de progrès très importent ont été réalisé dans les développement des teckenique numérique.

La génération résolution des équations de Navier-stoker soit désormais le seule moyen de semoule le comportent complexe d'écoulement réel et visqueux. Parmi les méthode utilise dans ce domaine, on retrouve les méthodes statique s ou probabiliste qui consistent à décompose les champs de vitesse et de concentration a une composant e moyenne et une fluctuation de turbulent de moyenne nulle

Actuellement, ces méthodes implantées dans plupart des codes de calcule de CFD résolvent numériquement les équations moyennés de la turbulent.

CHAPITRE: III

Procédure Numériques

III. Introduction

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

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

III.1 Les éléments finis

III.1.1Historique

Méthode des éléments finis est apparue avec l'analyse des structures, née vers 1850. Les premières études menées sur la résistance des matériaux dans des conditions de petites déformations, ce qui a permis d'obtenir des systèmes simples résolus « manuellement », notamment par Maxwell, Castigliano, Mohr. La formalisation, et le concept mathématique d'élément fini est apparu bien plus tard, vers 1940 et la définition est posée par Newmark, Hrenikoff, Mc Henry et Courant.

L'arrivée du calcul numérique et de méthodes de résolution performantes par ordinateur a permis de populariser la méthode.

III.1.2 Définition La méthode des éléments finis (MEF)

La méthode consiste à approcher, dans un sou –espace de dimension finie, un problème écrit sous la forme variation elle dans un espace de dimension infinie. Cette forme vibrationnelle est équivalente à une forme de minimisation de l'énergie en générale.

La solution approchée dans ce cas une fonction déterminée par un nombre fini de paramètres comme, par exemple, ses valeur en certain points ou nœuds du maillage.

Cette méthode est particulièrement bien adaptée aux problèmes d'équilibre. Elle permit de traiter des géométries complexes contrairement aux différences finies mais demande un grand coût de temps de calcul et de mémoire.

III.1.3 Principe mathématique

Le principe mathématique est basé sur les méthodes suivantes :

- Méthodes vibrationnelles (minimisation d'une fonctionnelle)
- Méthodes des résidus pondérés

III.1.4 Etapes de la mise en œuvre

- Discrétisation du domaine en un nombre fini d'élément ;
- Choix d'un modèle d'interpolation (variation de la variable sur l'élément) ;
- Ecriture des équations modèles sous forme algébrique aux niveaux local (dans un élément) : détermination des vecteurs et matrices caractéristiques ;
- Assemblage des vecteurs et matrices locaux en un vecteur global *B* et une matrice globale *A ;*
- Résolution de système AX=B

Avantage

-Adapté aux géométries complexes

Inconvénients

Formalisme mathématique plus compliqué et plus difficile à mettre en œuvre;

- Couteux en stockage mémoire (matrices pleins) et en temps de calcul (inversion);
- Caractère conservatif des équations nom forcément assuré.

Avantage

- Permet d'obtenir des solutions d'une très grande précision

Inconvénients

- Formalisme mathématique plus compliqué et mise en œuvre délicate
- Difficultés pour traiter les géométries complexes et des conditions aux limites nom académique.

Dans ce qui suit on se limite a examiné uniquement la méthode des éléments finis, nous venons de décrire succinctement l'approche globale de cette méthode. Par la suite, nous exposerons les principales étapes mathématiques de discrétisation de l'équation de chaleur par cette dernière.

III.1.5 Présentation de la méthode

Comme nous l'avons précédemment évoquée, La méthode des éléments finis a pour but de remplacer un problème mathématique défini dans un milieu continu et sous la forme d'équations différentielles ou d'intégrales, par un problème discret sous forme matricielle qu'il est possible de résoudre numériquement.

En résumé, cette méthode nécessite la discrétisation d'un continuum en un modèle composé d'un assemblage d'éléments finis qui possèdent des formes et des tailles variées.

De plus, le calcul de la solution nécessite la prise en compte d'un certain nombre de paramètres, tels que :

- La géométrie discrétisée en éléments finis,

- Les contraintes imposées sur le dispositif,
- Les excitations présentes dans le dispositif,
- Les propriétés des matériaux compo Sant le dispositif.

III.1.6 Mise en œuvre de la méthode des éléments finis

III.1.6.1 Formulation vibrationnelle forte :

La formulation forte d'un problème aux conditions aux limites s'écrit alors comme suit:

$$\mathcal{L}u - F = 0 \; \forall \; X \; \in \Omega B(u) = u0 \forall \; X \in \Gamma u0 \qquad \text{(III.1)}$$

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

III.1.6.2 Formulation vibrationnelle faible :

La formulation vibrationnelle faible peut être obtenue par les étapes suivantes :

Approcher la solution u, partout dans le domaine Ω, par tel que

$$\tilde{u} = \sum_{i=1}^{n} N_i \, \tilde{u}_i \qquad \text{(III.2)}$$

Ou $N_i = N_i(x, y)$ désignent les fonctions de forme et des valeurs nodales indéterminées.

Introduire (III .1) dans (III.2) il en résulte une erreur ou un résidu ε tel que

$$\varepsilon = \mathcal{L}(u) - F \neq \qquad \text{(III.3)}$$

Ou ε =0 ; u=u c.à.d. lorsqu'une solution exacte existe.

Obtenir une valeur nulle de ε en introduisant une fonction de point arbitraire W tel que

$$W_K = N_K \Longrightarrow \int N_K \mathcal{L}\left(\sum_{i=1}^{n} N_i \, \tilde{u}_j\right) d\,\Omega = 0 \qquad \text{(III.4)}$$

Ou N Nombre d'inconnues indépendants du système (III.1).

En formulation de Galerkine les fonctions tests sont assimilées aux fonctions de forme. On pose

$$W_k = N_k \Longrightarrow \int N_K \; \mathcal{L}\left(\sum_{i=1}^{n} N_i \; \tilde{u}_j\right) d\,\Omega = 0 \qquad \text{(III.5)}$$

On dit que $u \; \in H_0^1$ (Ω) (Ω) est une solution faible de (III.5) si :

$$\forall \in \mathcal{V}(\Omega) \;\; H_0^1$$

A (u, ν) est la forme bilinéaire associée à $(\mathcal{L})$ soit Ω un ouvert borné de Rd et $\partial\Omega$ est régulier.

On considère alors le problème :

$$Lu = f \text{ sur } \Omega \text{ et } u = 0 \text{ sur } \Omega = 0$$

III.1.6.3 Forme générale des équations du système :

Les équations du système sont écrites sous la forme généralisée suivante

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho C_{\phi}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho V_{x} C_{\phi} \phi\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho V_{y} C_{\phi} \phi\right)=\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial x}{\partial y}\right)+S_{\phi} \qquad \text{(III.6)}$$

III.1.7 Logiciels d'éléments finis

Quelques exemples de logiciels utilisant la méthode des éléments finis en mécanique des structures :

- **ABAQUS** : logiciel pluridisciplinaire développé par la société Dassault Systèmes
- **ADVANCE DESIGN** : logiciel français développé par GRAITEC (remplace EFFEL)
- **ANSYS :** logiciel pluridisciplinaire développé par ANSYS
- CAST3M : logiciel pluridisciplinaire français développé par le CEA (gratuit pour l'enseignement et la recherche)
- ASTER : logiciel pluridisciplinaire libre français développé par EDF
- **COMSOL Multiphasiques** : logiciel pluridisciplinaire développé par Comsol,
- **Cosmos Works** : Ancienne version de Solid Works (Dassault Systèmes)
- **Dytran** : logiciel américain développé par MSC.Software
- **EFFEL** : logiciel français développé par GRAITEC
- **Euro Plexus** : logiciel français
- **Femm :** logiciel de simulation par éléments finis de dispositifs à géométrie 2d plan ou à symétrie cylindrique, modélisés par les équations de l'électrostatique ou de la magnétostatique basses fréquences. Citons comme exemples de dispositifs les circuits magnétiques de transformateurs ou ceux des machines électriques (machine synchrone, machine à courant continu, etc.).
- **Flux2D/3D** : logiciel 2D&3D éléments finis français (développé en collaboration avec le GE2Lab) permettant le calcul des états magnétiques, électriques ou thermiques en régimes permanents, harmoniques et transitoires, avec des fonctionnalités d'analyse multi-paramétrique étendue, les couplages circuit et cinématique.
- **Free Fem** : logiciel pluridisciplinaire libre.
- **Feel** : logiciel pluridisciplinaire libre.
- **Getfem** : logiciel pluridisciplinaire libre (avec dominante mécanique des structures).
- **ICAB** : logiciel de calcul pour poutres et coques avec vérifications réglementaires selon Document technique unifié DTU France (NV65, CM66, AL76, CB71...), Eurocodes, AISC américain

- **IMPETUS Afea Solver** : logiciel de calcul de grandes déformations utilisant des éléments finis iso géométriques d'ordre 3.
- **JMAG** : logiciel japonais (distribué en Europe par Powersys) permet un couplage entre les analyses électromagnétiques et structurelles.
- **LS-DYNA** : logiciel de dynamique rapide américain
- **Marc** : logiciel de grandes déformations américain développé par MSC .Software
- miniFE fournit une implantation parallèle minimaliste (moins de 8000 lignes de code). Mini FE est conçu pour être exécuté sur un grand nombre de plate-forme matérielles de type HPC (Microprocesseur multi, processeurs graphiques, Intel MIC, etc.). Ce n'est pas un code de production, mais il sert de référence pour comparer des architectures matérielles.
- **Morfeo** : logiciel belge
- **MSC. Nastran** : logiciel Pluridisciplinaire américain développé par MSC. Software
- **NX. Nastran** : logiciel développé par Siemens
- **PAM-CRASH** : logiciel de dynamique rapide (crash) développé par la société française ESI
- **v**de tôle, développé par la société française ESI
- **PERMAS** : logiciel pluridisciplinaire développé par la société allemande INTES Gmbh, basée à Stuttgart.
- **Radioss** : logiciel pluridisciplinaire développé par la société américaine Altair
- **ROBOT MILLENIUM** : logiciel français développé par ROBOBAT pour le calcul de structures de type génie civil et bâtiment, il est intégré ensuite par Auto Desk
- **RFEM** : logiciel de calcul de structure, développé par la société allemande Dlubal Software.
- **SAMCEF :** logiciel pluridisciplinaire belge, développé par SAMTECH, propriété de Siemens Automotive
- **Structurix** : Programme gratuit de calcul de résistance des matériaux. Il permet de résoudre des problèmes 2D et 3D avec des éléments : barres et poutres. Des problèmes 2D avec des éléments triangulaires. Des problèmes de flexion des plaques à l'aide d'éléments rectangulaires.
- **Z-set** : logiciel pluridisciplinaire développé par MINES ParisTech, l'ONERA et North West Numerics, spécialisé dans les comportements non linéaires des matériaux
- **SYSWELD** : logiciel de Thermo-mécano-métallurgie français basé sur SYSTUS développé par la société ESI

III.2 Logiciel Ansys :

Qu'est-ce que ANSYS?

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

III.2.1 A propos des modules d'apprentissage ANSYS :

Ce cours ANSYS se compose d'un ensemble de modules d'apprentissage sur l'utilisation d'ANSYS pour résoudre les problèmes en mécanique des solides. Les modules d'apprentissage conduisent l'utilisateur à travers les étapes de la résolution d'un ensemble de problèmes en utilisant ANSYS sélectionné. Nous fournissons non seulement les étapes de la solution, mais aussi la raison derrière eux.

Il est utile pour l'utilisateur de comprendre les concepts sous-jacents comme elle passe par les modules d'apprentissage afin d'être en mesure d'appliquer correctement ANSYS à d'autres problèmes. L'utilisateur serait mal servi en naviguant sur les modules d'apprentissage en zombie-mode. Chaque module d'apprentissage est suivi par des problèmes qui sont orientés vers le renforcement et le renforcement de la connaissance et la compréhension acquise dans les modules d'apprentissage. Travailler à travers les ensembles de problèmes est une partie intégrante du processus d'apprentissage et ne doit pas être ignorée.

Ces modules d'apprentissage ont été mis au point par le Programme de simulation d'ingénierie Swan son dans the Sibley École de génie mécanique et aérospatial à l'Université Cornell. Le programme de simulation d'ingénierie Swan son a été établi dans le but d'intégrer des simulations sur ordinateur dans le programme de génie mécanique. Ce programme a été doté par le Dr John Swanson, le fondateur of ANSYS Inc. et ancien élève de l'École Sibley. Le développement de ces modules d'apprentissage est soutenu par une innovation Faculté en enseignement décerné par l'Université Cornell.

III.2.2 Principaux produits

ANSYS Structural :

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

- L'analyse statique
- L'analyse modale
- L'analyse harmonique (réponse forcée)

- L'analyse temporelle
- La gestion de différentes situations non-linéaires (contacts, plasticité matériaux, grands déplacements ou grandes déformations).

• **ANSYS Mechanical** :

Ce produit dispose des mêmes capacités qu'ANSYS structural, en y ajoutant notamment un solveur thermique, avec modélisation du rayonnement.

• **ANSYS CFX** et **Fluent** :

Ces deux logiciels permettent d'effectuer des simulations en matière de mécanique des fluides. Ils portent le nom des compagnies qui les ont développés, rachetées par ANSYS.Inc respectivement en février 2003 et en février 2006[2]. *Fluent* est un solveur : il ne comporte pas de meilleur (le maillage doit être réalisé avec un logiciel de maillage, Gambit par exemple, qui est également édité par ANSYS). Fluent est un solveur très utilisé dans l'industrie et la R&D à travers le monde. Il est souvent considéré comme une référence dans le domaine de la modélisation fluide. Le paramétrage du modèle se fait par une interface graphique. Il dispose d'une interface de scripts pour automatiser les processus de calcul. L'un des intérêts de ce logiciel de simulation généraliste, est qu'il dispose d'un nombre relativement important de modèles, pouvant faire face à divers aspects de la mécanique des fluides : écoulements diphasiques (miscible, non miscible, cavitation, solidification), turbulence (LES, KE, Kw, SA, Reynolds stress…), combustion (pré-mélangé et non pré-mélangé), transport de particules, écoulements en milieux poreux, maillages mobiles et dynamiques avec reconstruction du maillage, entre autres. Les schémas numériques temporels et spatiaux peuvent être modifiés pour améliorer la convergence. Fluent est parallélisé et permet de tirer parti de systèmes multiprocesseurs aussi bien au sein d'une seule machine qu'en réseau (cluster, dualcore, plateforme multi-CPU).

- Gambit : Un logiciel de maillage édité par la société ANSYS depuis 2006 (l'éditeur historique du logiciel était la société *Fluent*). Ce mailler permet de créer sa propre géométrie avec un grand degré de liberté et une grande précision, ou d'importer celle-ci depuis un fichier CAO. Il assure également le maillage automatique de surfaces et de volumes en parallèle de l'introduction de conditions aux limites. Gambit est souvent considéré comme un meilleur de référence par les modélisateurs utilisant Fluent.

• **ANSYS AUTODYN et ANSYS LS-DYNA** :

Ces logiciels possèdent des solveurs utilisant les formulations explicites des équations à résoudre, contrairement aux produits précédemment cités. Leur domaine d'application est

réservé aux modélisations mettant en jeu des situations mécaniques aux très larges déformations.

- **ANSYS Electromagnetics** et **Ansoft** :
- Ce produit permet de résoudre des modélisations mettant en jeu des phénomènes électromagnétiques.
- **ANSYS Multiphysics** :
- Ce produit rassemble l'ensemble des capacités d'ANSYS en matière de simulation numérique implicite.

III.2.3 Environnements logiciels

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

ANSYS classic :

Chronologiquement, c'est la première solution logicielle développée par le constructeur. Elle est destinée à la construction de modèles éléments finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques.

À partir de cet environnement, l'utilisateur construit directement un modèle éléments finis en utilisant le langage de script APDL (ANSYS Parametric Design Language). ANSYS classic est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.

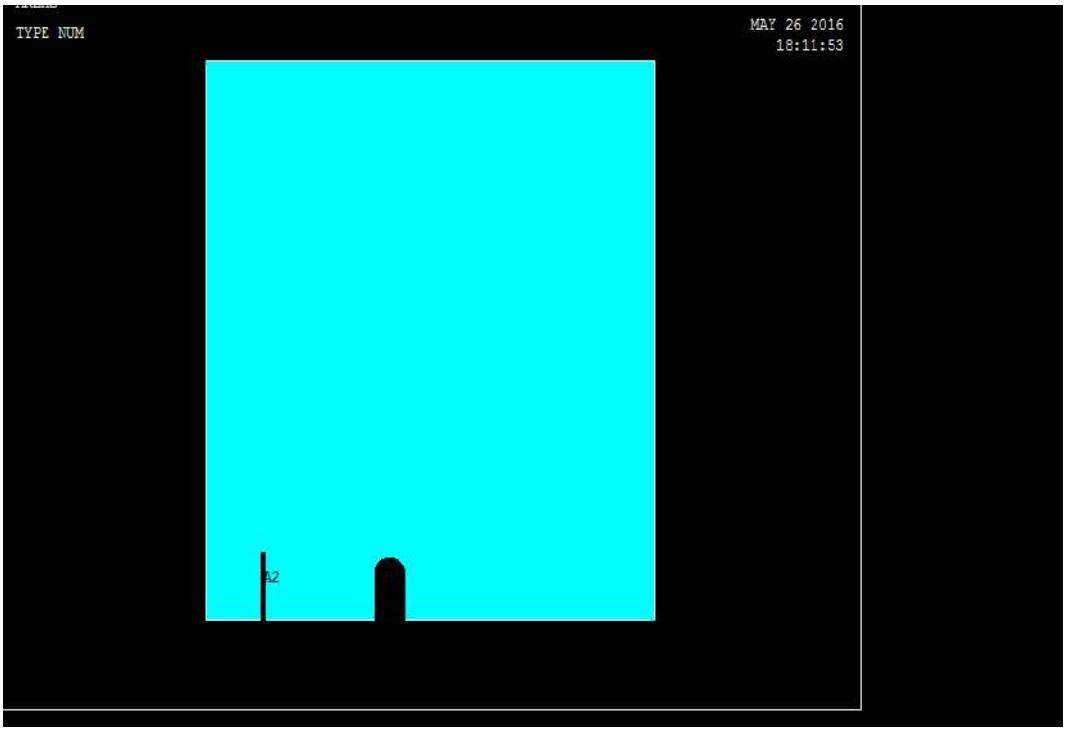
ANSYS Workbench :

Cette plate-forme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en ré-utilisant le code ANSYS initial. Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièces) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul. Dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même.

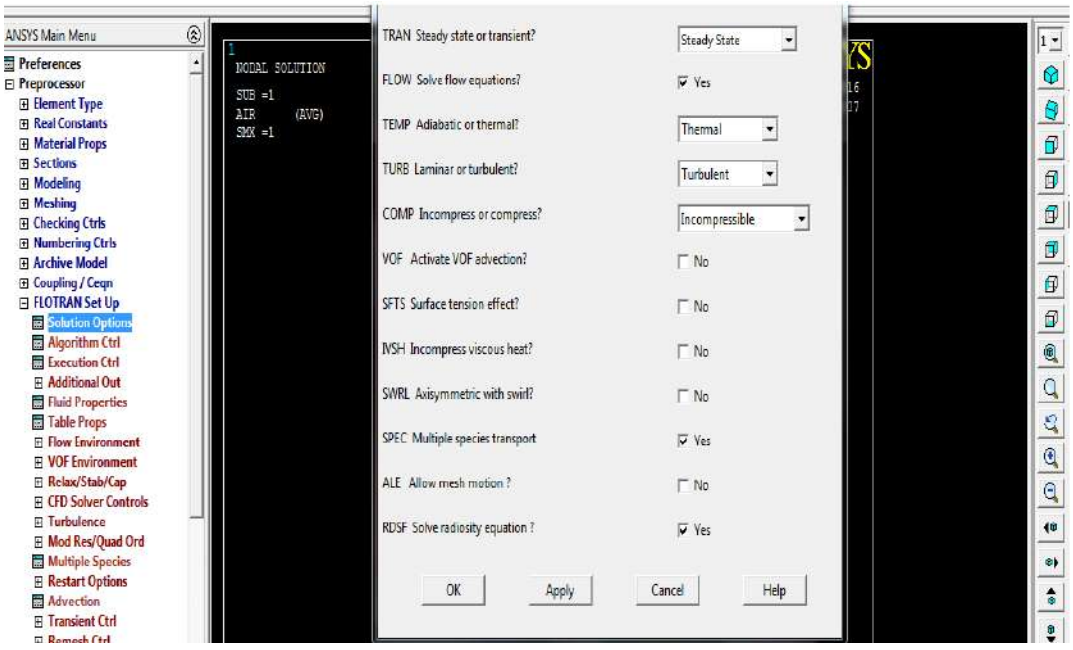
La plate forme est donc chargée de convertir les requêtes entrées par l'utilisateur en code ANSYS avant de lancer la résolution. Le modèle éléments finis généré reste néanmoins manipulable en insérant des commandes propres au code ANSYS.

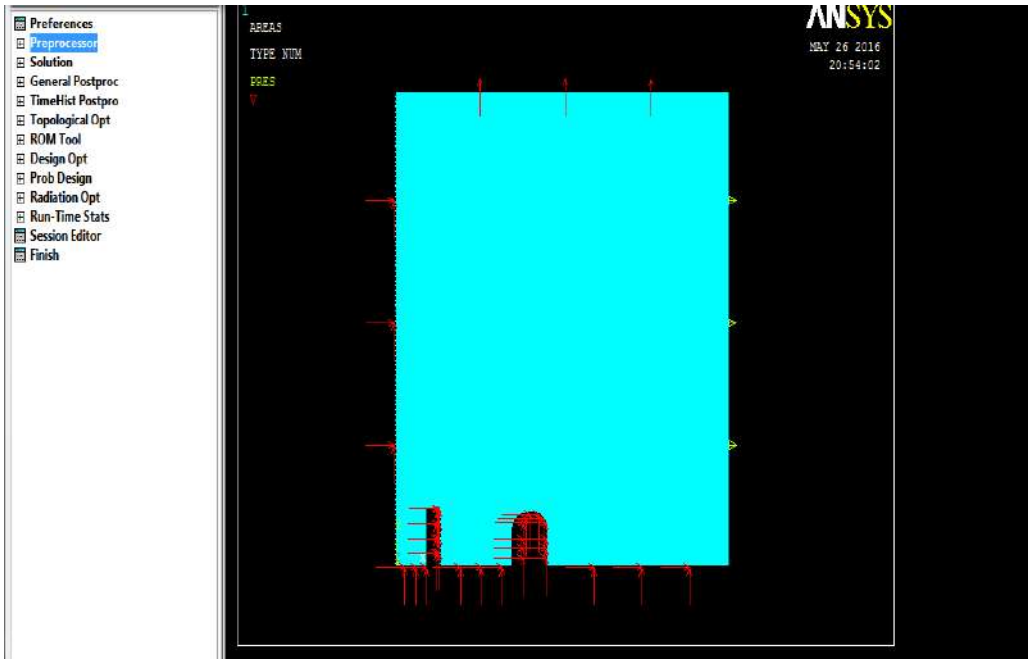
III.2.4 Présentation des étapes d'ANSYS

Interface ANSYS pour la construction de la geometre.

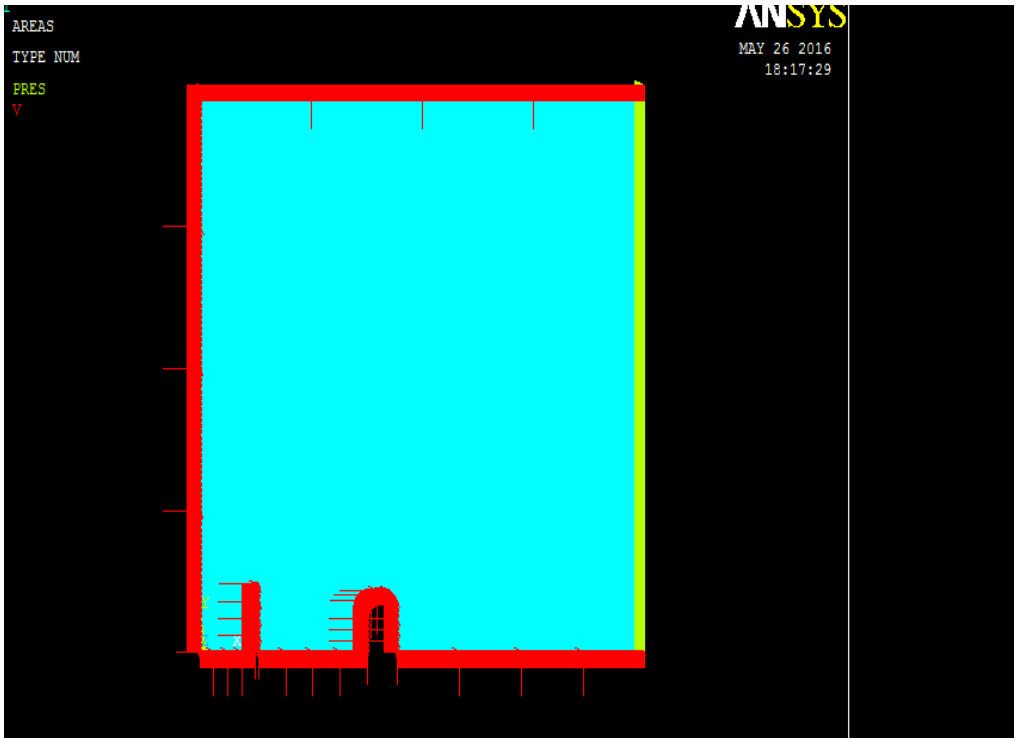


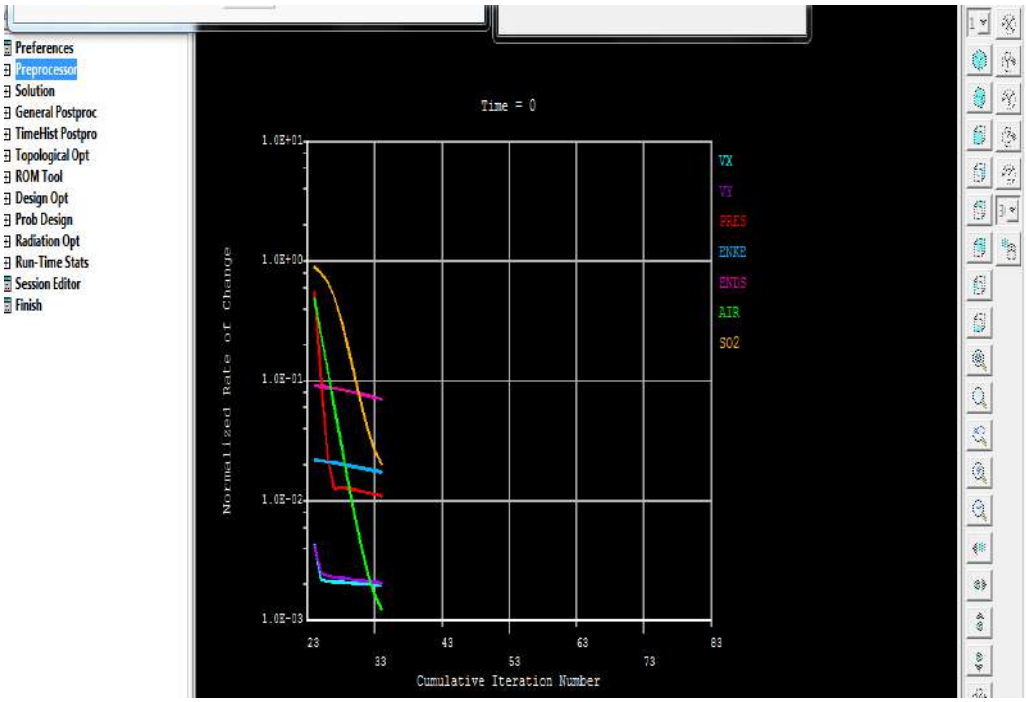
Interface ANSYS pour les conditions limites :

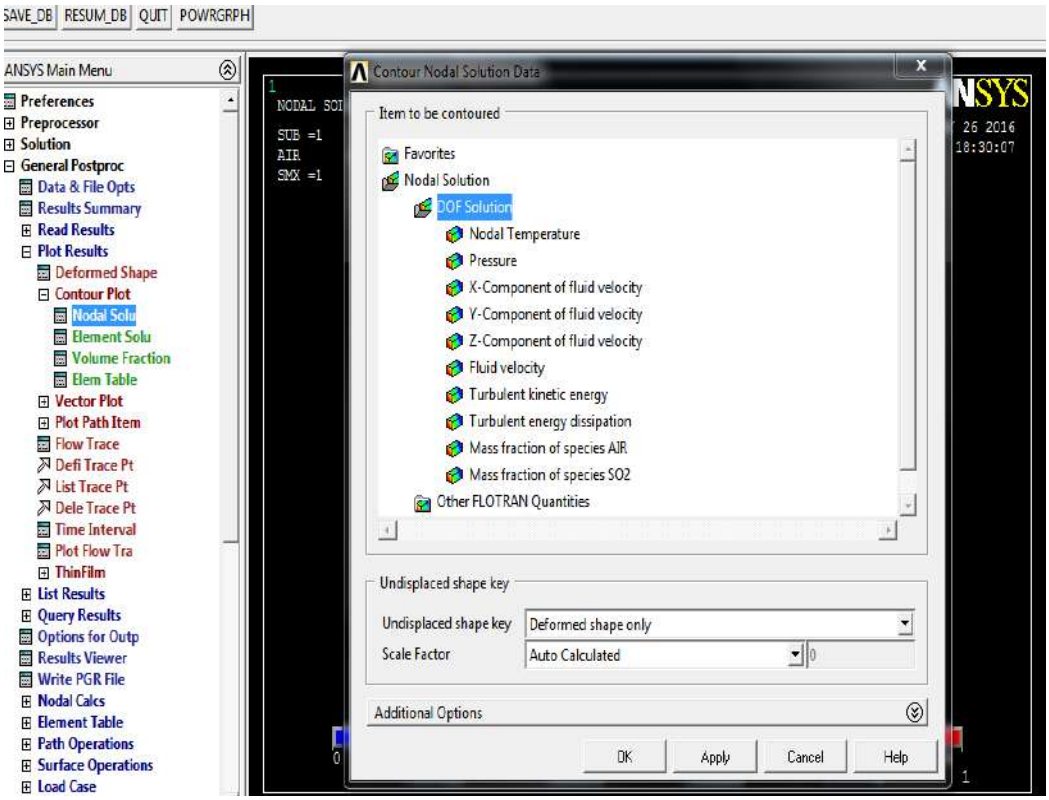




Interface ANSYS pour solution




Preferences
Preprocessor
Solution
General Postproc
TimeHist Postpro
Topological Opt
ROM Tool
Design Opt
Prob Design
Radiation Opt
Run-Time Stats
Session Editor
Finish
Time = 0
Normalized Rate of Change
1.0E+01
1.0E+00
1.0E-01
1.0E-02
1.0E-03
VX
VY
RMES
ENKE
ENDS
AIR
SO2
23
33
43
53
63
73
83
Cumulative Iteration Number


SAVE_DB
RESUM_DB
QUIT
POWRGRPH
ANSYS Main Menu
Preferences
Preprocessor
Solution
General Postproc
Data & File Opts
Results Summary
Read Results
Plot Results
Deformed Shape
Contour Plot
Nodal Solu
Element Solu
Volume Fraction
Elem Table
Vector Plot
Plot Path Item
Flow Trace
Defi Trace Pt
List Trace Pt
Dele Trace Pt
Time Interval
Plot Flow Tra
ThinFilm
List Results
Query Results
Options for Outp
Results Viewer
Write PGR File
Nodal Calcs
Element Table
Path Operations
Surface Operations
Load Case
Contour Nodal Solution Data
Item to be contoured
Favorites
Nodal Solution
DOF Solution
Nodal Temperature
Pressure
X-Component of fluid velocity
Y-Component of fluid velocity
Z-Component of fluid velocity
Fluid velocity
Turbulent kinetic energy
Turbulent energy dissipation
Mass fraction of species AIR
Mass fraction of species SO2
Other FLOTRAN Quantities
Undisplaced shape key
Undisplaced shape key
Deformed shape only
Scale Factor
Auto Calculated
Additional Options
OK
Apply
Cancel
Help

III.2.5 Les avantage d'Ansys CFX :

- Intégration bidirectionnelle totale
- Compatibilité avec tous les autres modules d'analyse
- Pilotage de géométries en fonction de la solution
- Système de détection d'erreurs alertant l'utilisateur
- Prétraitement automatique
- Mise en place et calculs
- Algorithmes de convergence
- Rapport automatique

Conclusion

Ansys est le premier éditeur mondial dans le domaine du calcul par éléments finis. Les outils proposés permettent de résoudre les problèmes de validations produits de manière efficace. Ils permettent d'optimiser le processus de conception (gain de temps énorme) et donc de proposer des produits plus innovants (intégration d'une pré-analyse dans le cycle de conception), de qualité plus élevée tout en minimisant les coûts.

CHAPITRE: IV

Résultats et discussion

IV. Introduction

Pour discerner les problèmes de pollutions en milieu urbain et expliquer l'origine des nuisances et la dégradation de l'environnement, nous nous sommes intéressés à la géométrie représenté sur la figure IV.1, qui peuvent représenté une grande catégories d'habitat et d'équipements existantes dans les ville algérienne.

Pour ensuite exposant d'une manière détaillée les résultats de la simulation numérique de la dispersion du pollution atmosphérique, sous le solveur ANSYS. Les résultats quantitatifs et qualitatifs de nos simulations CFD en fonction des différentes données météorologiques seront par la suite discutés dans la dernière partie de ce chapitre.

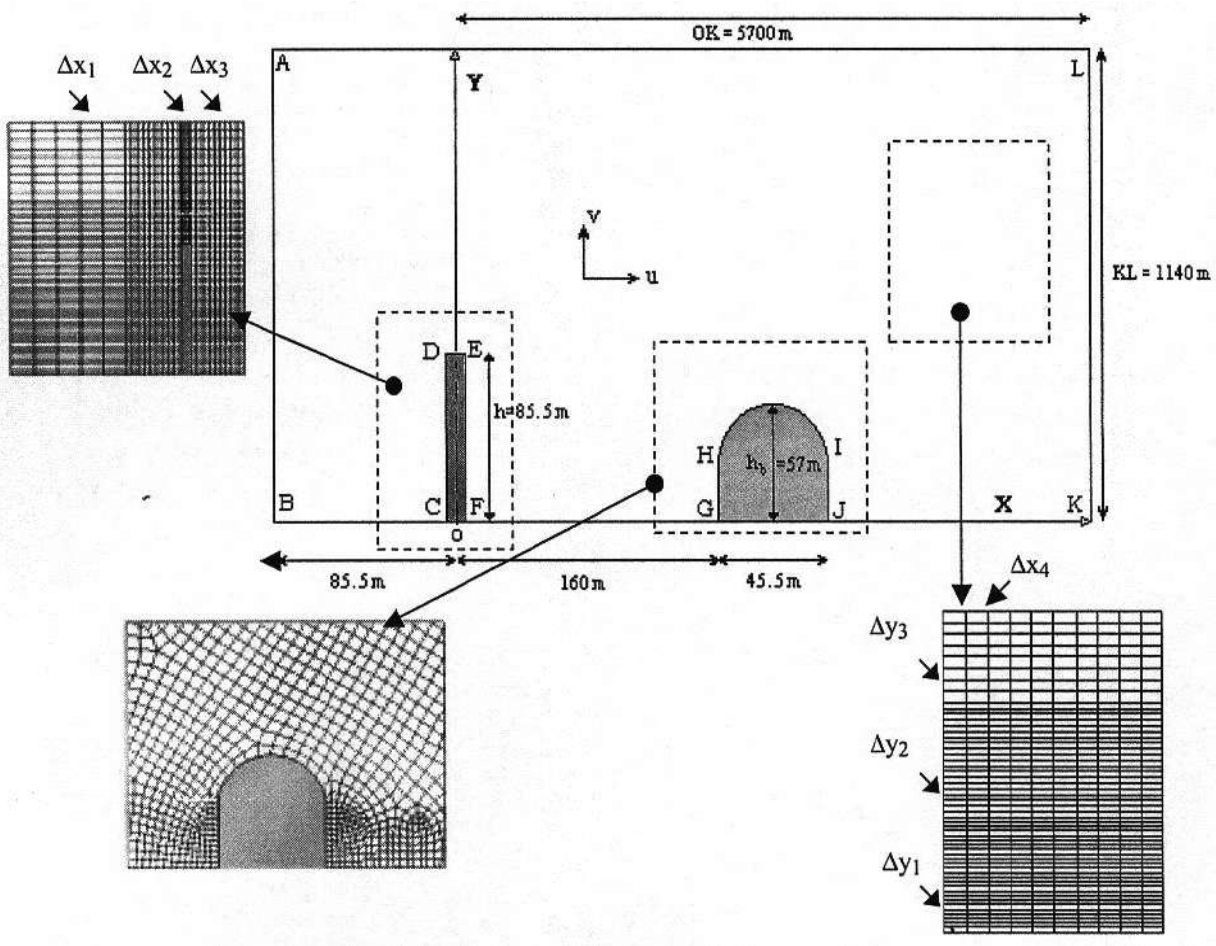


Figure IV.1:schéma représentatif de domaine de simulation

IV.I FORMULATION THEORIQUE DU PROBLEME

On considère une cheminée de hauteur h et de diamètre d qui émet un mélange de dioxyde de soufre et d'air avec une vitesse d'éjection v0, à une température T0 et une fraction massique du polluant (dans notre cas le SO2) f0, en présence d'un obstacle. Ce panache est soumis à un vent de vitesse u∞, la température ambiante est T∞.

Les hypothèses suivantes forment la base de l'étude :

- L'écoulement est considéré bidimensionnel, compressible, turbulent et stationnaire en moyenne.
- Les gaz en présence sont non réactifs.
- La vitesse du vent est considérée constante.
- Le site étudié contient un bloc isolé dont le toit est de forme arrondie.
- On ne tient pas compte des gradients de température existant dans l'atmosphère.

Tableau IV.1 : récapitulatif des dimensions de l'expérience

symbole	Dimensions(m)
AB	114
BK	714
H	85.5
h	57

Condition limite :

Symbole	Température (°c) l'axe AB	Température (°c) l'axe DE	Vitesse m>s l'axe AB	Vitesse m>s l'axe DE
Air	25	0	0.1	0.1
so2	0	100		

IV.2 Etude de l'influence de la hauteur de cheminé :

CAS 1 : pour H=42.5m

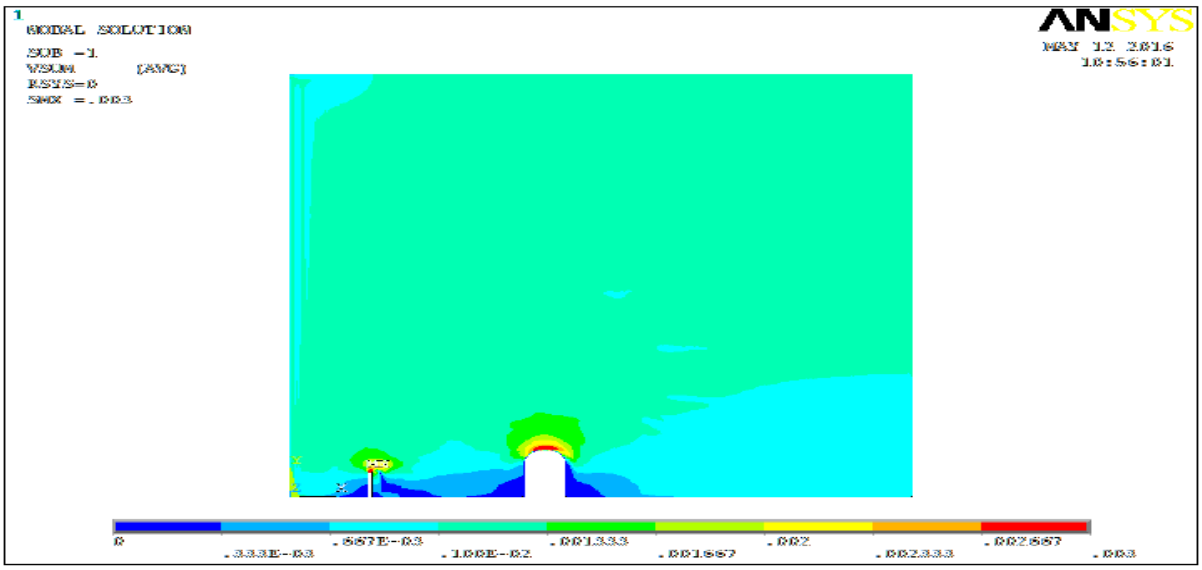


Figure IV. 2 : Représentation spatiale de champs de vitesse

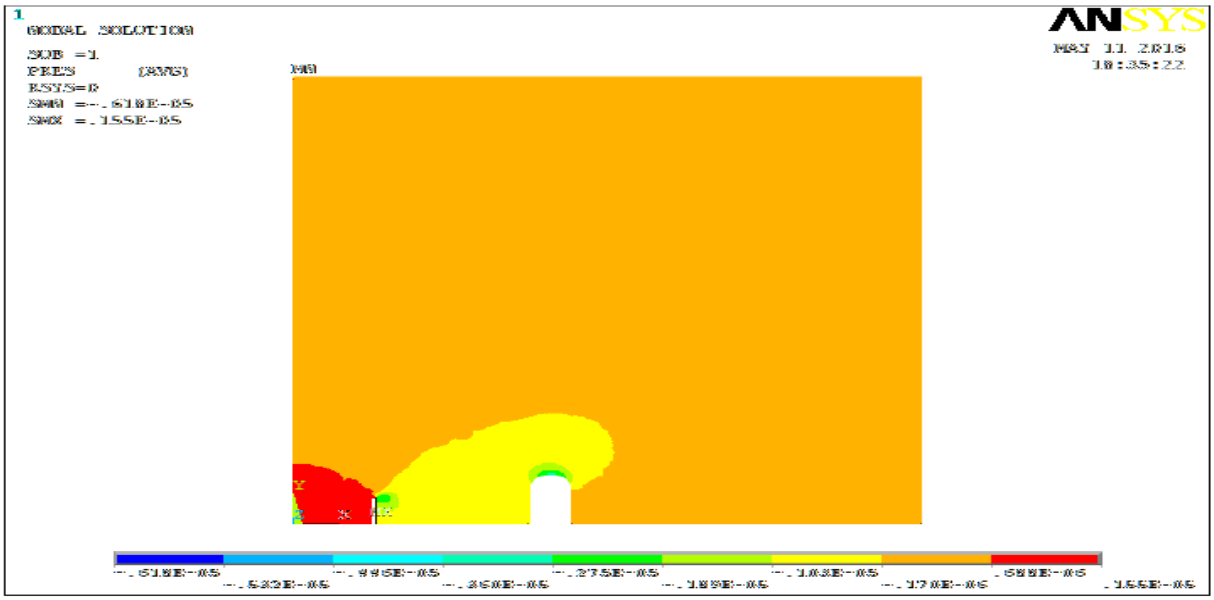


Figure IV.3 : Représentation spatiale de champs de Pression

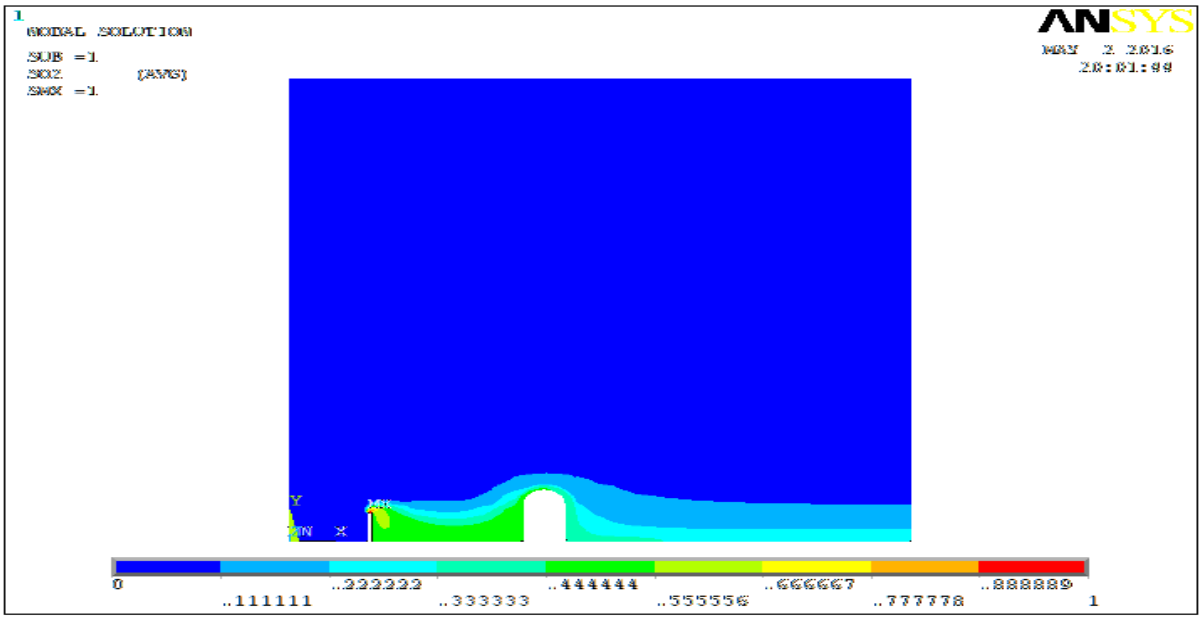
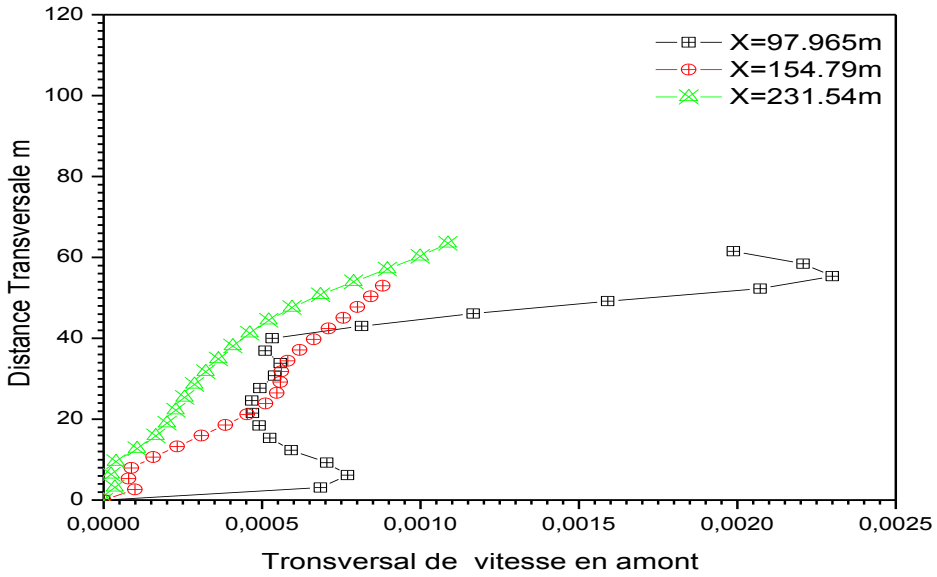


Figure IV. 4: Représentation spatiale des champs de dispersion de SO2

Dans ces figures, nous montrons l'interaction entre l'écoulement vertical (jet) et l'écoulement transversal (vent) pour un rapport de vitesse (**R**) égal à 2. A ce rapport (vitesse du jet égal deux fois celle du vent) la quantité de mouvement et l'énergie thermique du gaz éjecté prédominent, l'influence du vent n'est remarquée qu'à une certaine hauteur loin de la sortie de la cheminée. Le champ de vitesse du jet et du vent deviennent horizontaux dans la zone de faible concentration en particules, ou l'écoulement est réduit en aval, et il est peu perturbé.



.

Figure IV.2.1 : profils de vitesse en amont de l'obstacle

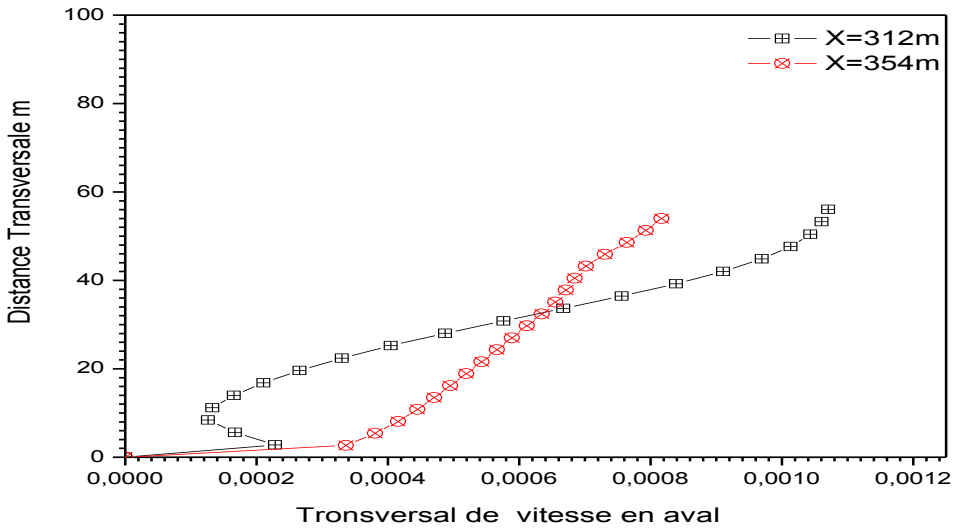


Figure IV.2.2 : profils de vitesse en aval de l'obstacle

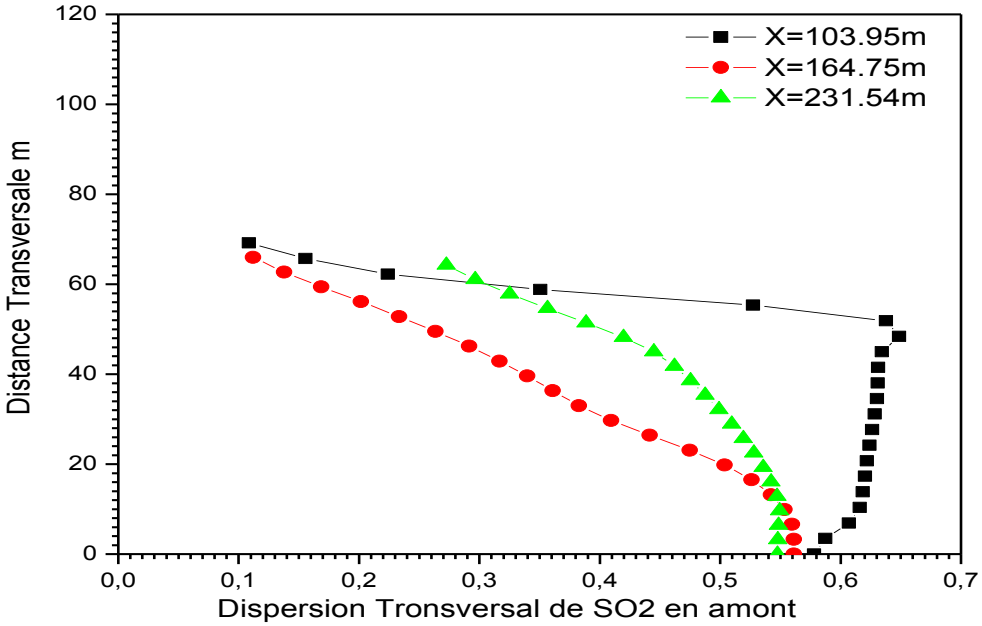


Figure IV.4.3 : profils de taux de dispersion en amont de l'obstacle

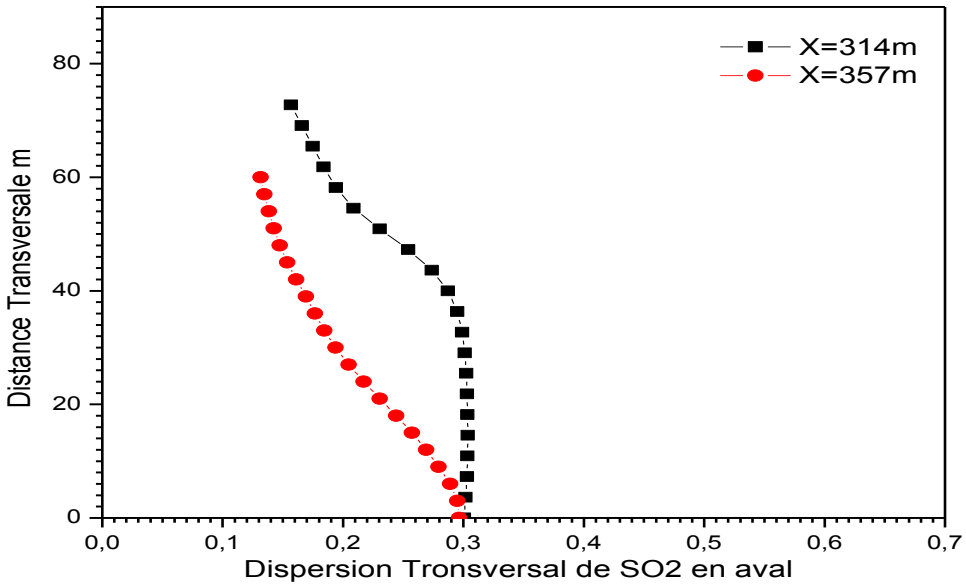


Figure IV.4.4 : Profils de taux de dispersion en Aval de l'obstacle

CAS 2 : Pour H=85.5m

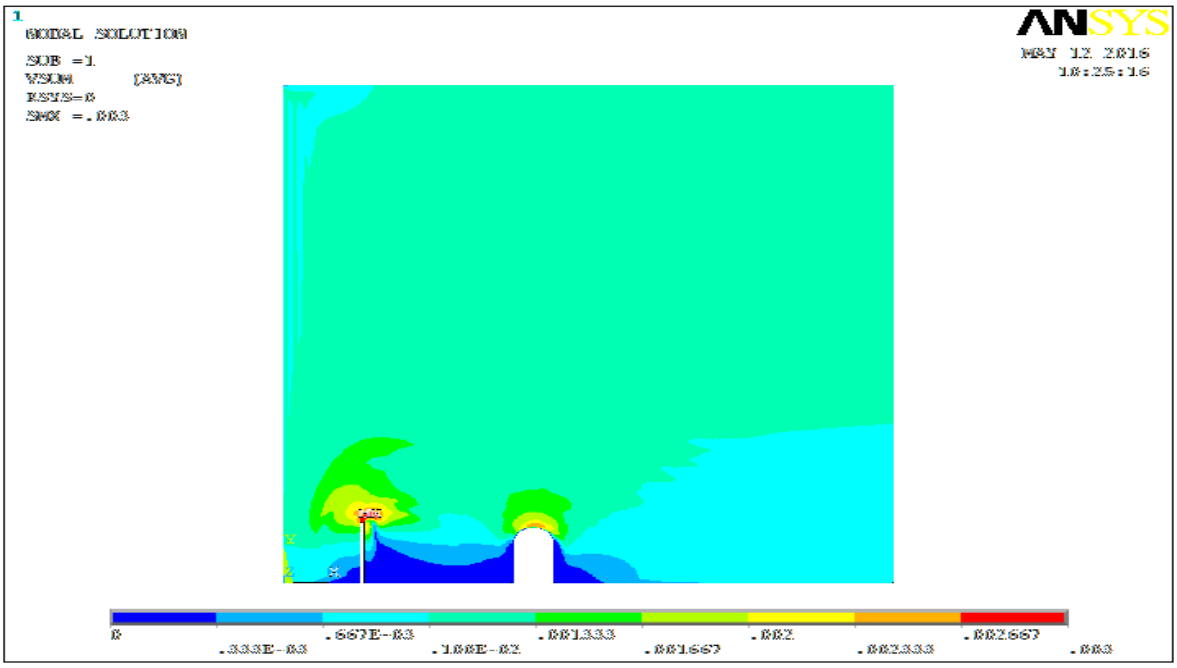


Figure IV.5 : Représentation spatiale de champs de vitesse

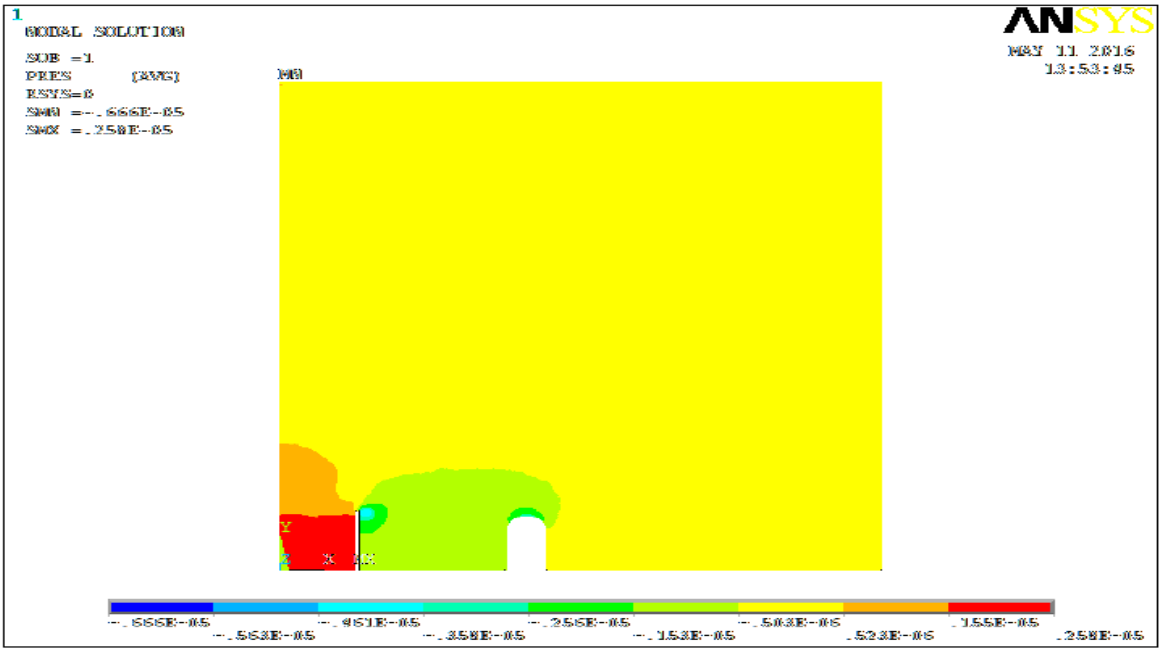


Figure IV.6: Représentation spatiale de champs de Pression

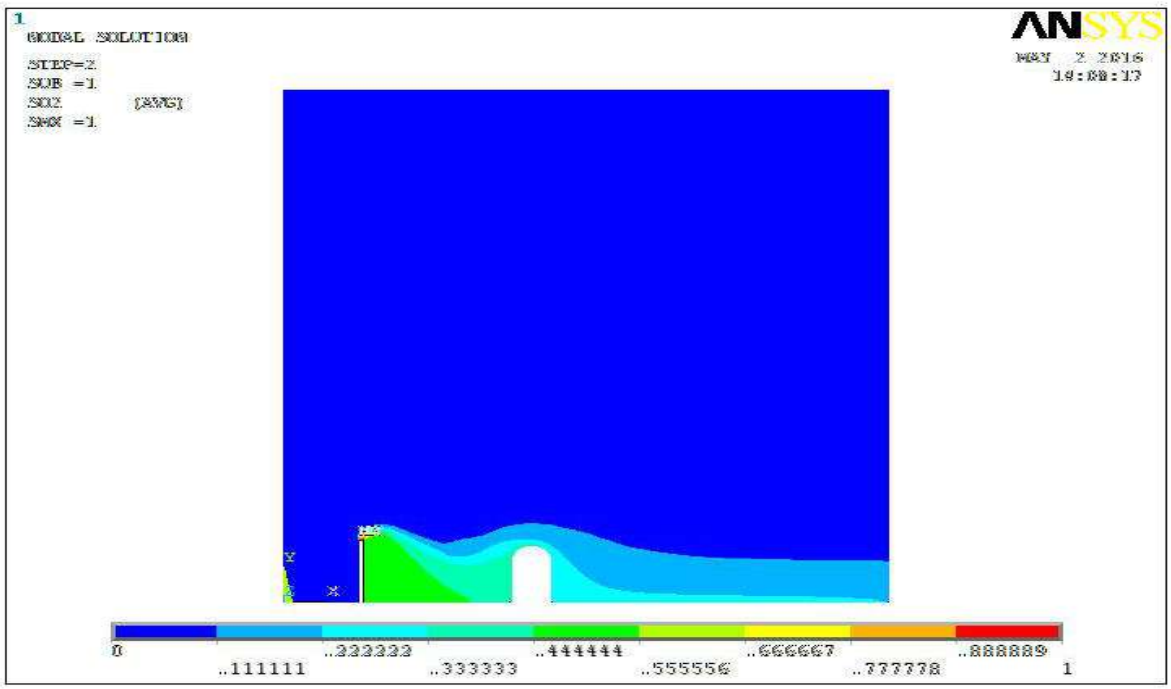


Figure IV.7: Représentation spatiale de champs de dispersion de SO2

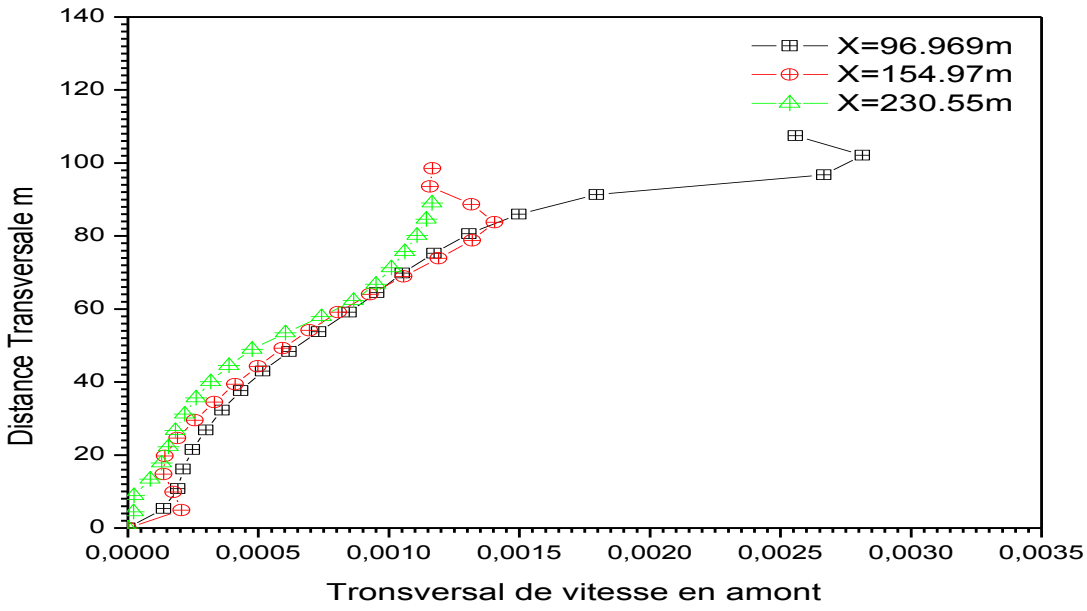


Figure IV.5.5 : profils de vitesse en amont de l'obstacle

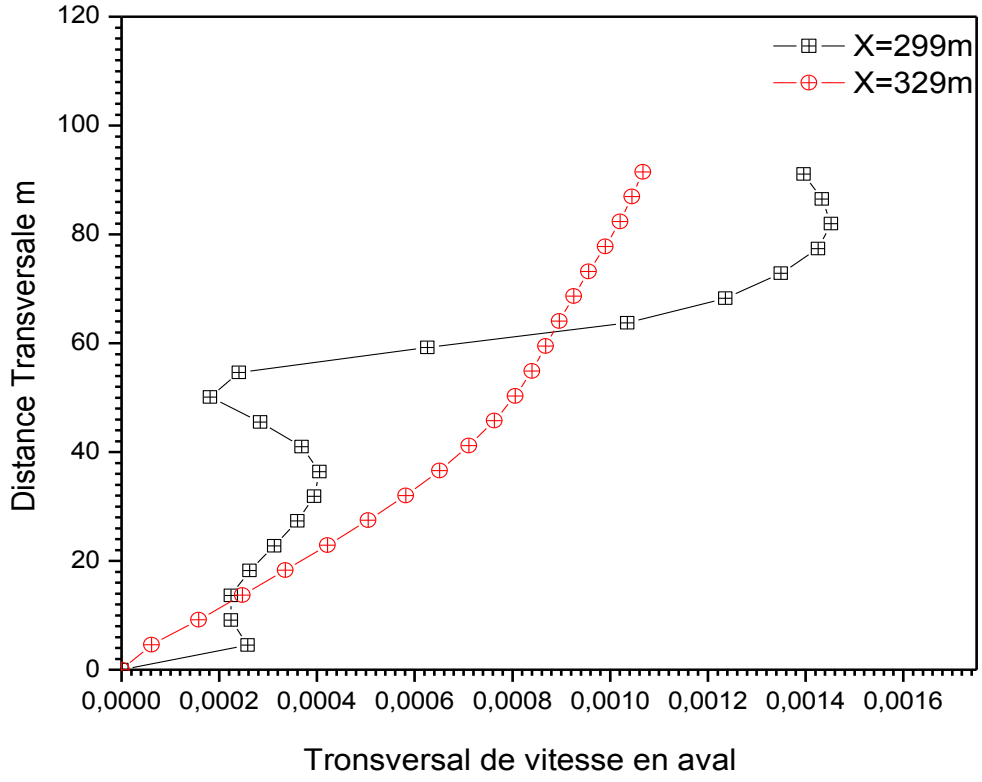


Figure IV.5.6 : profils de vitesse en aval de l'obstacle

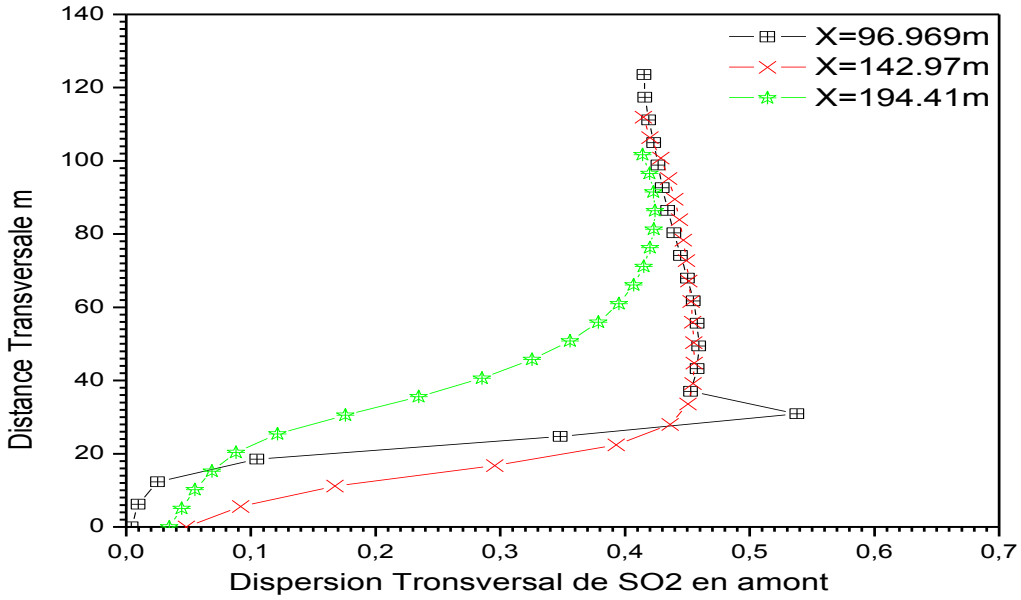


Figure IV.7.7 : Profils de taux de dispersion en amont de l'obstacle

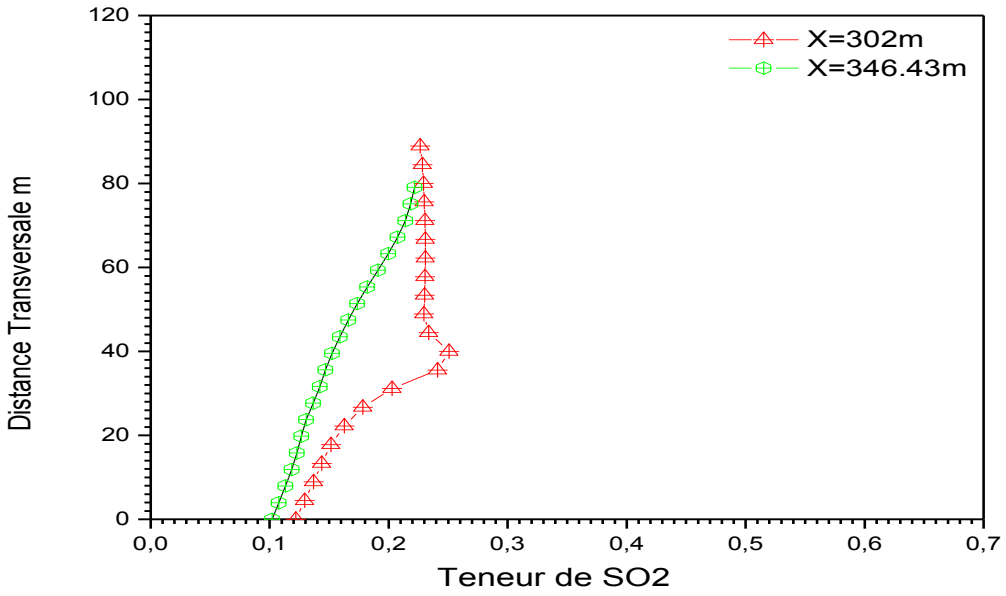


Figure IV.7.8 : profils de taux de dispersion en Aval de l'obstacle

CAS 3 : pour H=127.5m

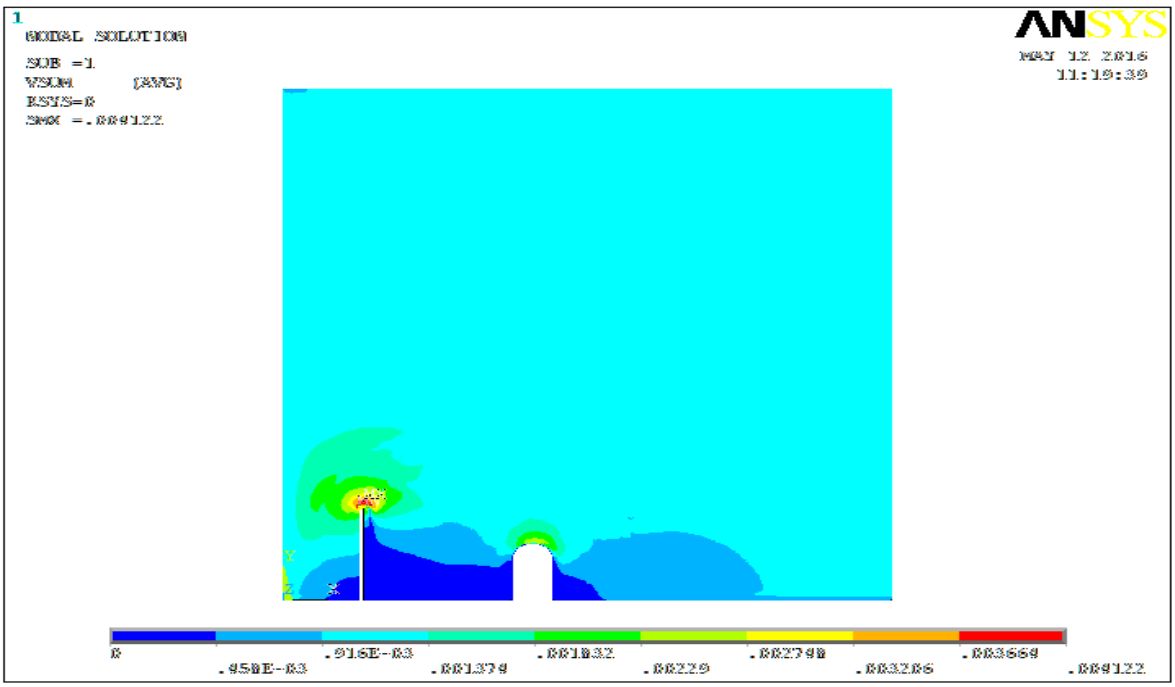


Figure IV.8: Représentation spatiale de champs de vitesse

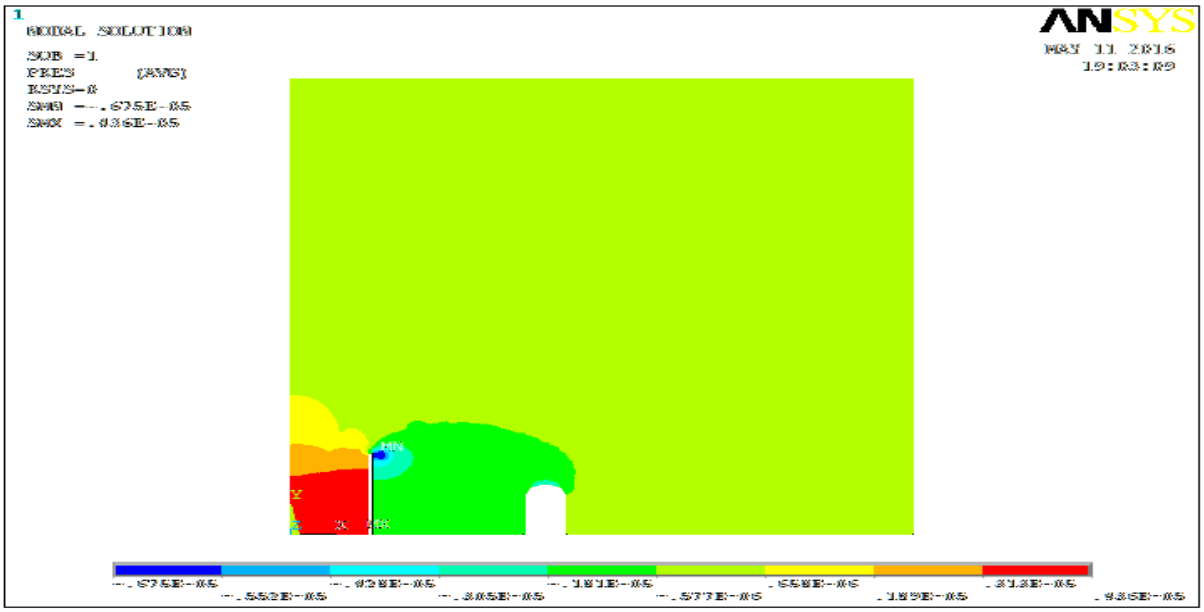


Figure IV.9: Représentation spatiale de champs de Pression

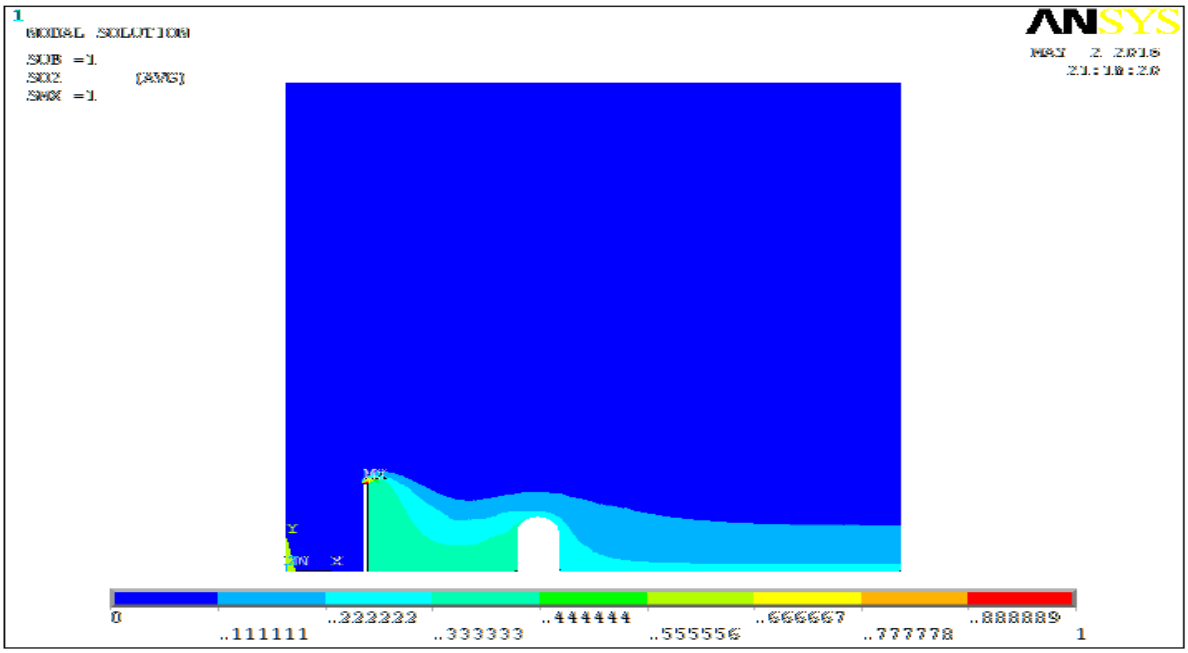


Figure IV.10 : Représentation spatiale de champs de dispersion de SO2

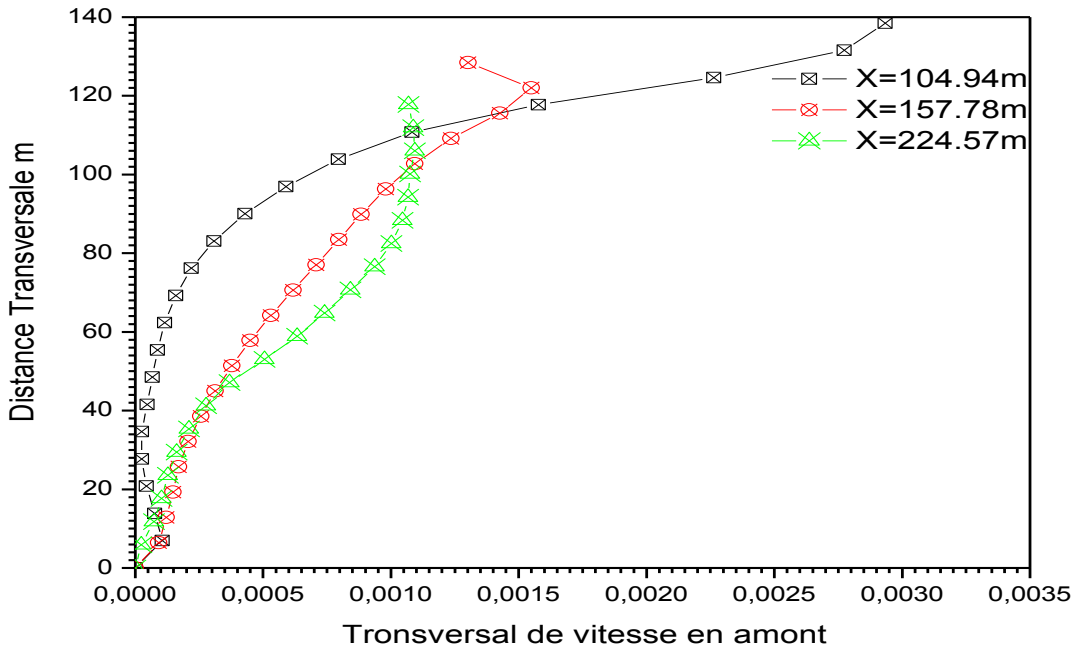


Figure IV.8.9 : La vitesse en amont de l'obstacle

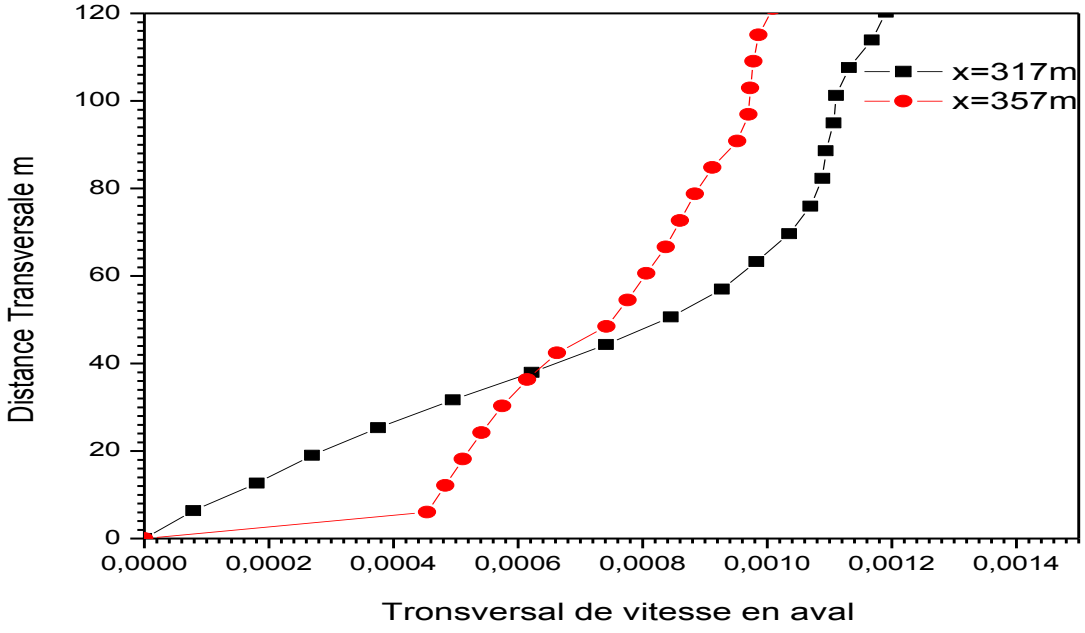


Figure IV.8.10 : Profils de vitesse en aval de l'obstacle

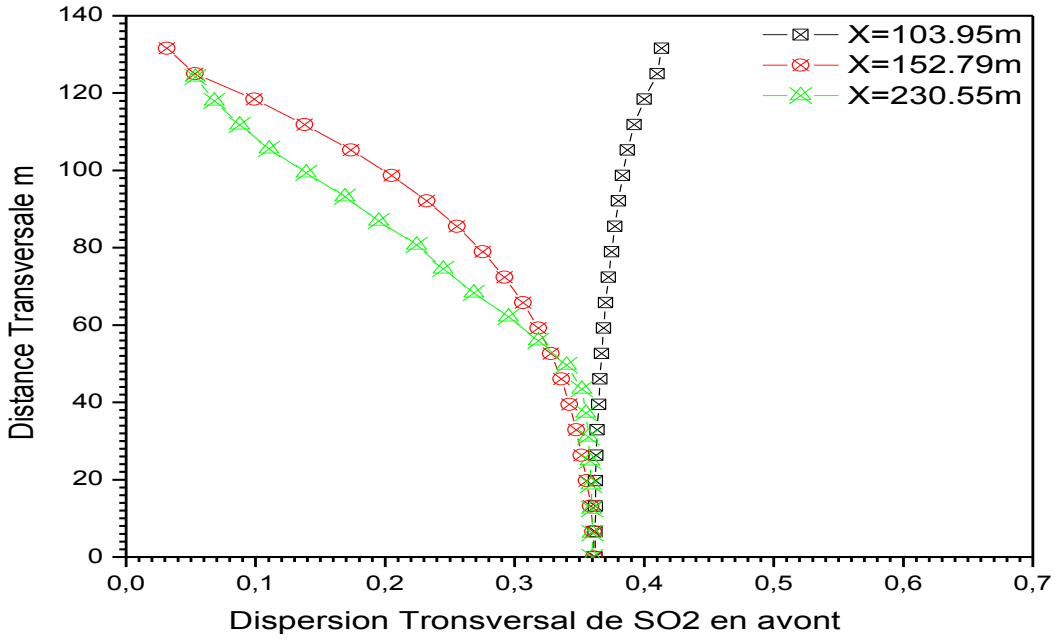


Figure IV.10.11 : Profils de taux de dispersion en amont de l'obstacle

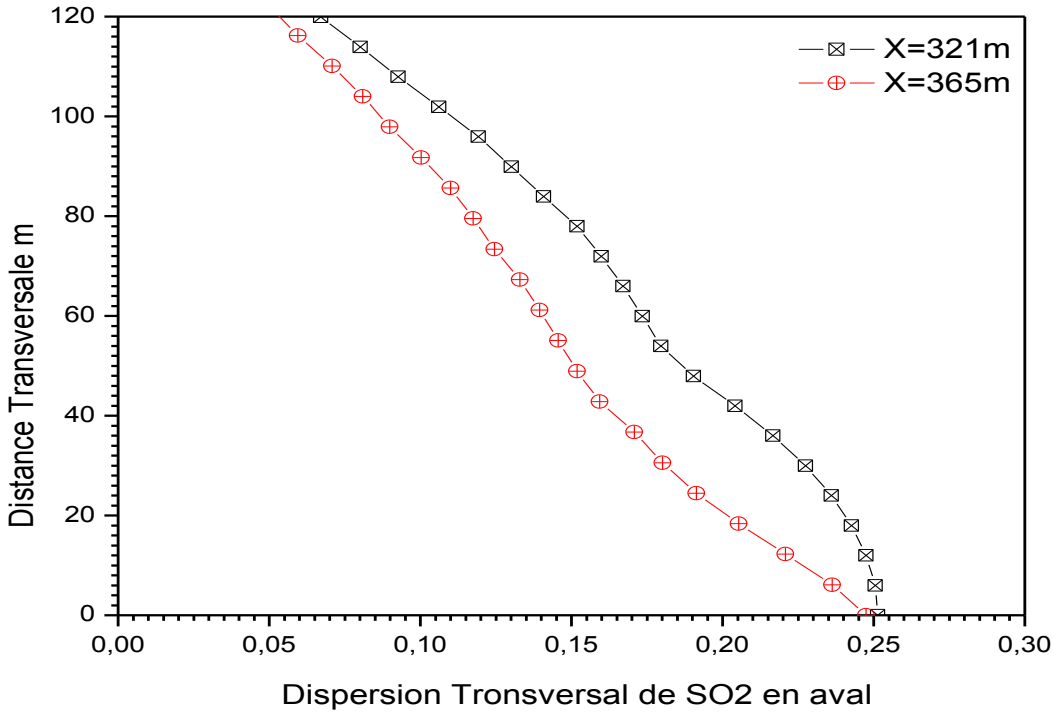


Figure IV.10.12 : Profils de taux de dispersion en Aval de l'obstacle

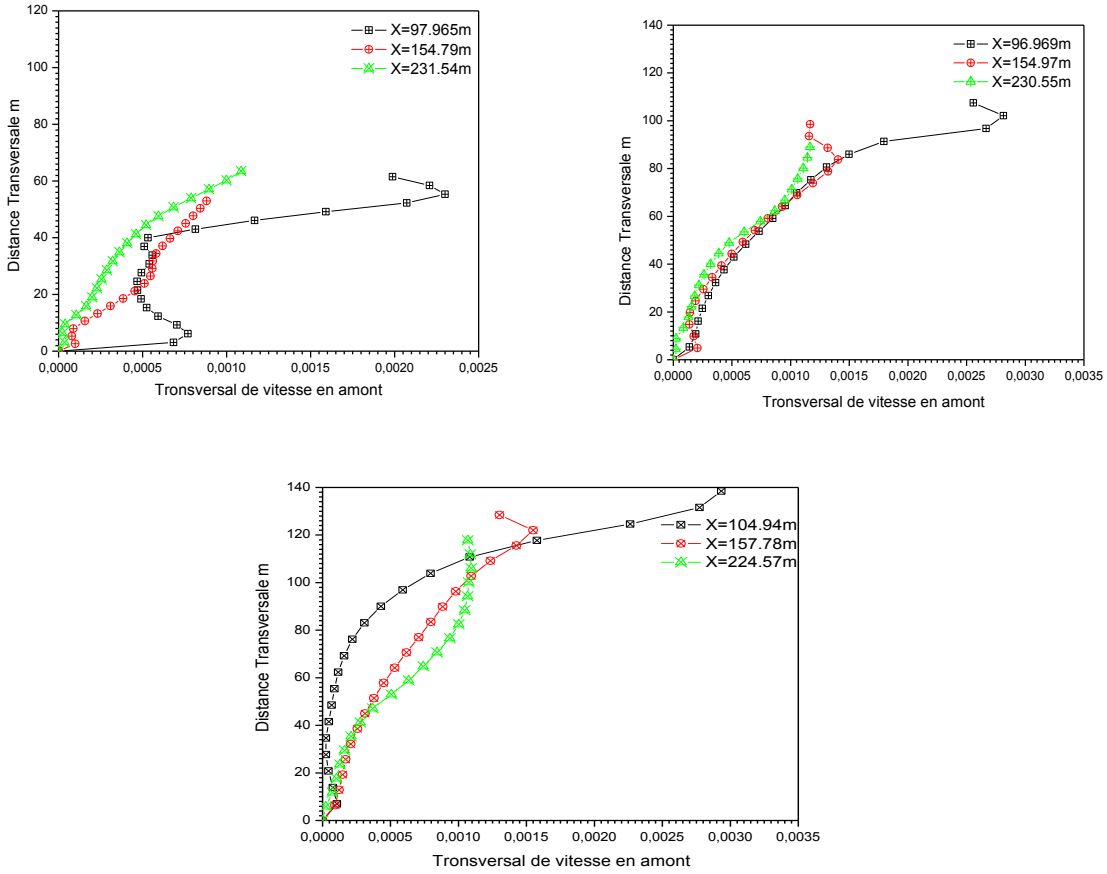


Figure IV.11: La vitesse en amont l'obstacle

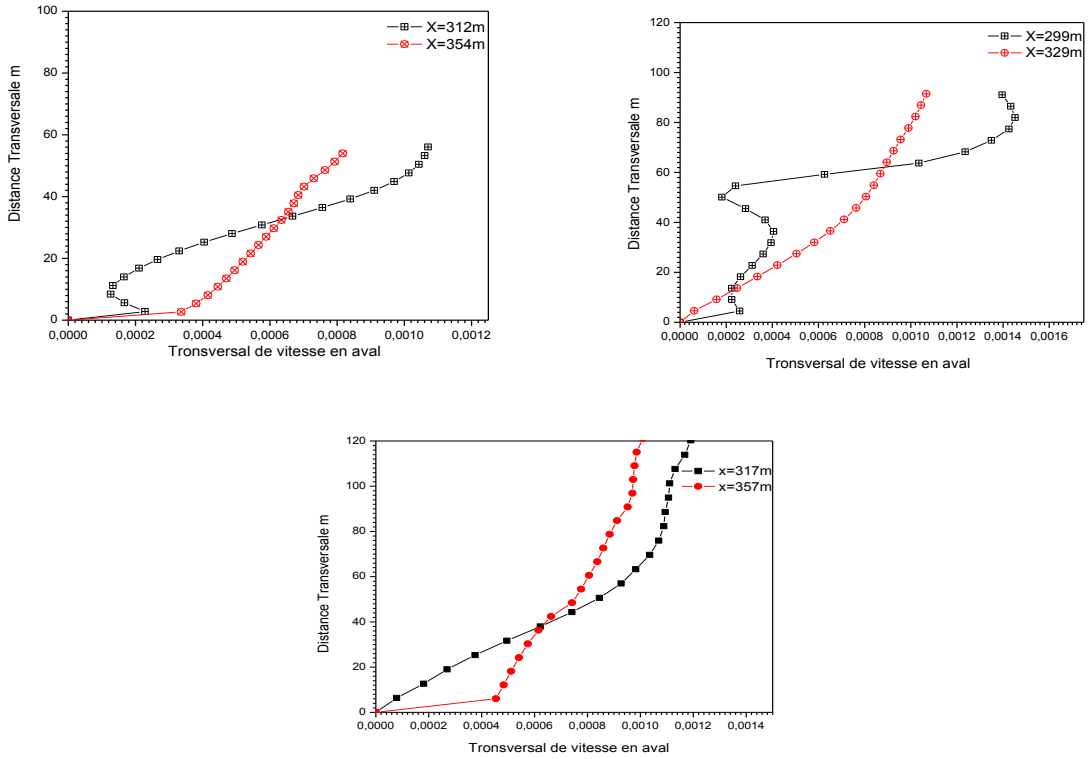


Figure IV.12:la vitesse en aval l'obstacle

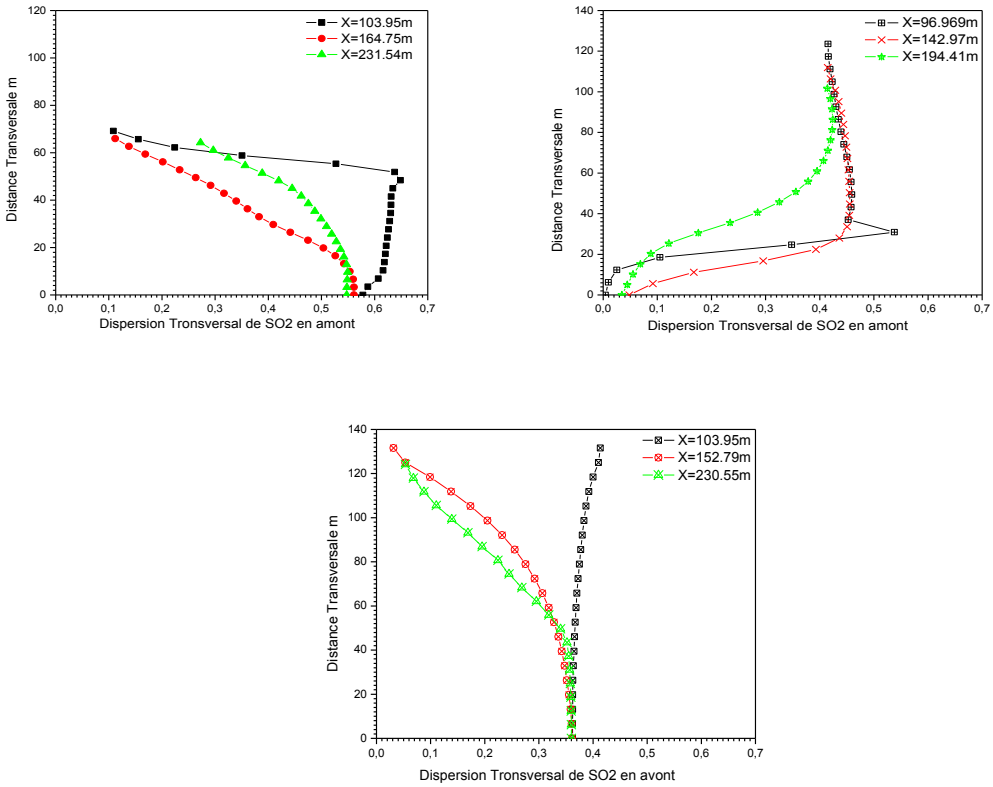


Figure IV.13: Dispersion de so2en amont l'obstacle

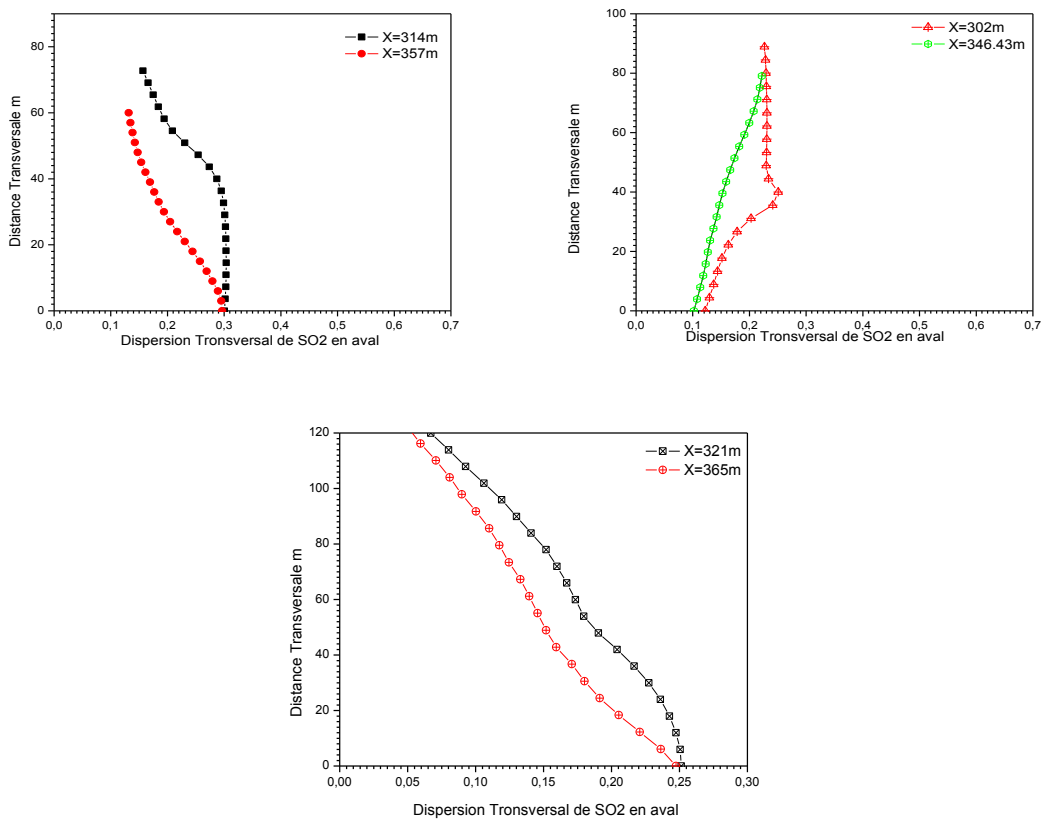


Figure IV.14: Dispersion de so2 en aval l'obstacle

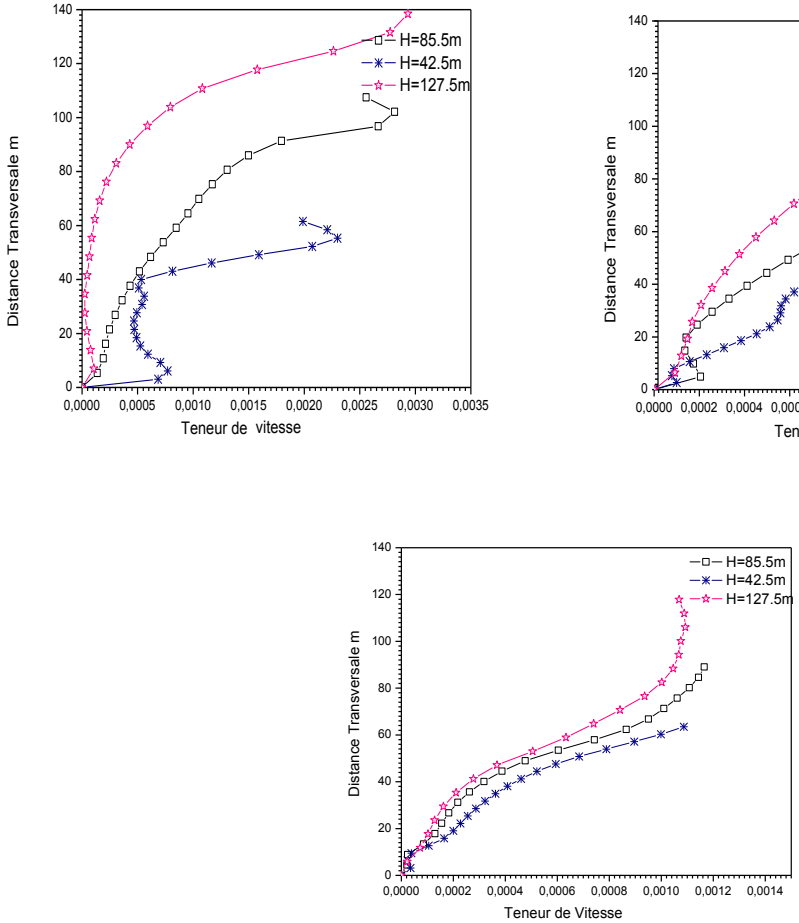


Figure IV.15 : Teneur de vitesse en amont l'obstacle

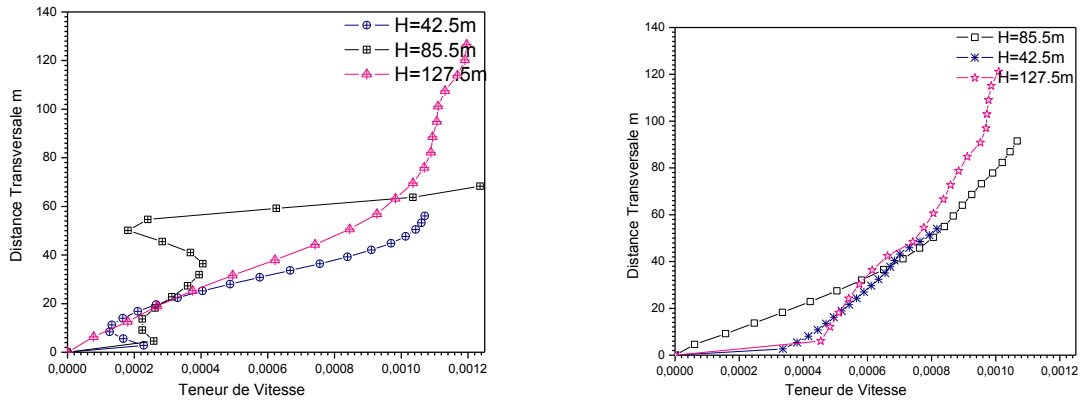


Figure IV.16: Teneur de vitesse en aval l'obstacle

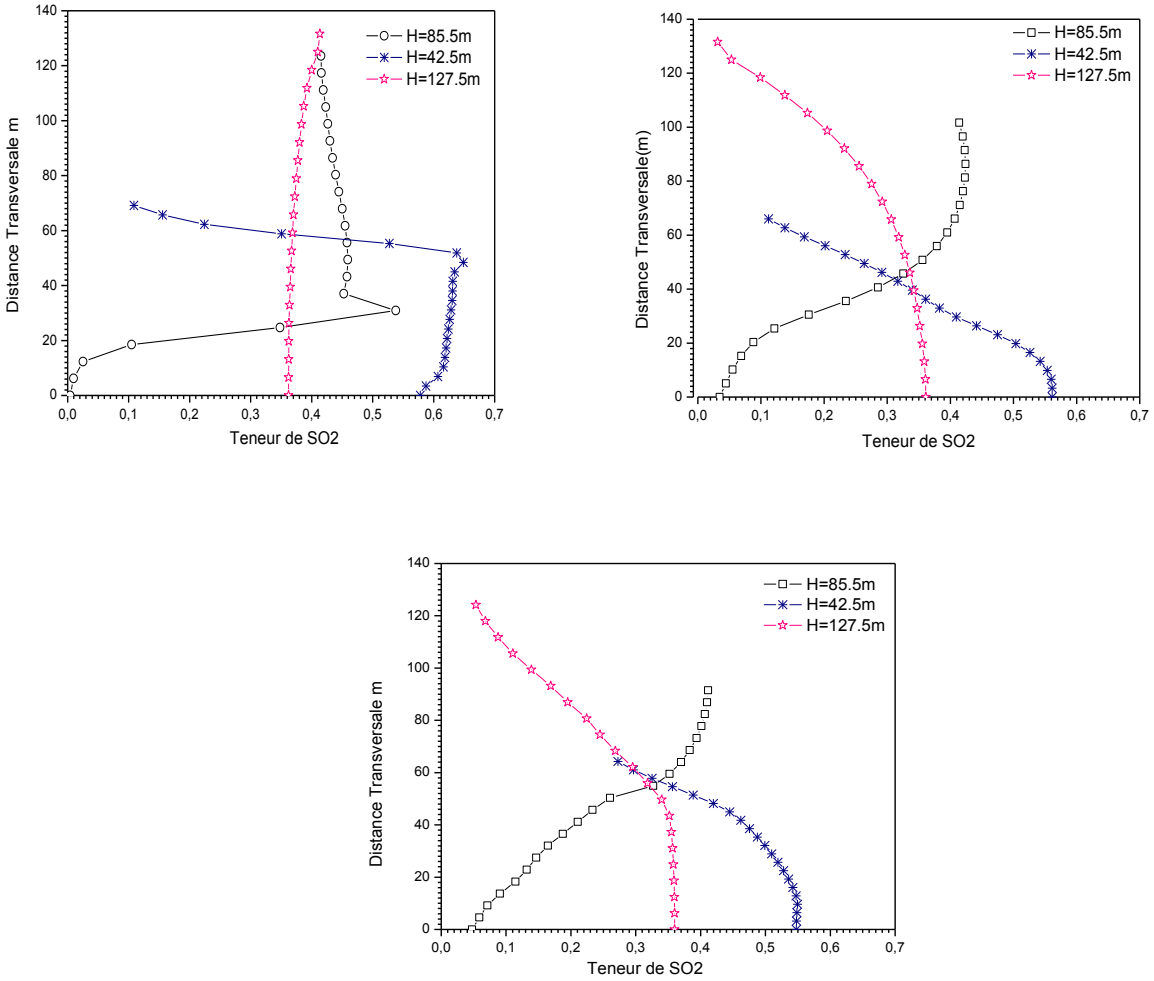


Figure IV.17: Teneur de so2 en amont l'obstacle

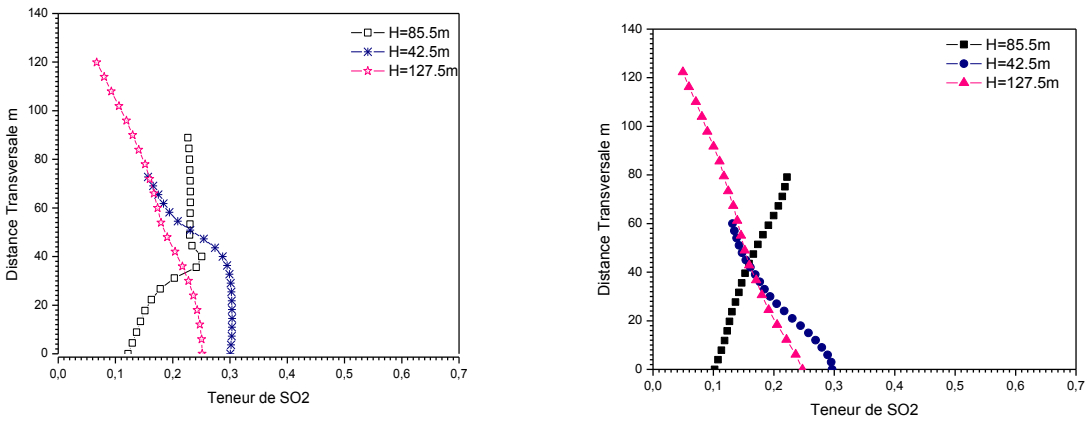


Figure IV.18: teneur de so2 en aval l'obstacle

Quant à l'écoulement de l'air la première lecture global des résultats obtenus pour les différentes hauteurs attribuées, on constate des résultats similaires pour les 03 valeurs de H attribuées pour un rapport de vitesse (**R**) égal à 2, on a remarqué que Le dépôt des particules se fait dans la zone plus proche de la cheminée pour les trois cas étudier. Les polluants tombent dans ces zones avec une concentration relativement élevée, cette situation peut se révéler un cas délétère pour une agglomération qui se situe à proximité de la zone d'émissions et c'est le cas des villes des zones industrielles. On observe une concentration élevé de 0.3 au niveau des parois en amont, et elle est importante au niveau du sol en amont de l'obstacle de l'air et diminue en aval.

L'optimisation de la hauteur d'une cheminée industrielle est cruciale. Elle permet d'identifier les limites d'émissions autorisées par la législation. Selon la nature, le type, le débit d'éjection d'un polluant plusieurs hauteurs de cheminée peuvent êtres considérées. Pour étudier l'influence de la hauteur d'une cheminée sur la dispersion des particules rejetées, nous avons expérimenté numériquement trois hauteurs, 42.5, 85.5 et 127.5m pour le rapport (R=2). L'évolution de la dispersion des polluants en fonction de ces trois hauteurs est présentée dans les figures IV.17 et 18.

On montre d'après l'évolution du polluant en aval de la cheminée que les particules sont plus diluées quand la hauteur de la cheminée augmente. L'éjection à une hauteur plus élevée génère un panache plus large qui favorise la dilution. Le panache de polluants tombe au sol beaucoup plus loin et avec une concentration faible en particules. On remarque que le maximum de concentration obtenu pour la plus faible hauteur, figure IV.17et 18, se situe à l'intérieur du domaine considéré tandis que pour les hauteurs de 85.5 et 127.5 m, le maximum de concentration s'éloigne et sort du domaine.

La hauteur de la cheminée peut donc définir la zone susceptible d'être la plus affectée par les rejets des émissions SO2.

Conclusion

Afin de mieux cerner le problème de la dispersion atmosphérique d'un polluant, il est indispensable d'entreprendre des études d'une façon approfondie en incluant le grand nombre de phénomènes physiques qui interviennent dans le processus afin d'évaluer les risques réels imputés aux rejets des polluants.

Dans notre cas, bien que nous ayons abordé le problème en considérant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, on a mis en évidence la pertinence des paramètres étudiés qui confirment la nécessité d'une prise en charge sérieuse de la pollution atmosphérique dans zones industrielle. En perspective, l'étude peut être améliorée par la considération d'un vent multidirectionnel et l'introduction des effets de stratification thermique.

Conclusion Générale

Conclusion générale

La présente recherche a traité l'impact du polluant, qui a était notre première préoccupation.

Dans cette étude nous avons étudié la dispersion du polluant par rapport à la hauteur de cheminée.

Cette étude essaye d'analyser numériquement les caractéristiques de dispersion du panache d'échappement de cheminée fonctionnant avec des conditions simples et idéales en considérant la dispersion du panache d'échappement de cheminée à partir de sa point d'émission une certaines distance ascendants et descendante par rapport un obstacle .A la lumière du résultats trouvé ,on peut dégager les points suivants :

La dispersion du polluant par rapport la hauteur de cheminée :

La dispersion des émissions d'une cheminée située de faible élévation en milieu urbain dans ce cas la concentration est forte et considérée plus nocives pour les humains et pour l'environnement.

La dispersion des émissions d'une cheminée située de haut élévation, la concentration réduit sur tout la surface puisque le fait d'augmenter la hauteur de cheminée réduit la concentration d'une part ; d'autre part l'influence de l'orientation de la vitesse du vent de la dispersions du polluant .

Dans ce travail, nous avons présenté une étude numérique de l'évolution du polluant issu d'une cheminée en régime turbulent et en présence d'un obstacle pour un cas industrielle réel .Ce type d 'étude permet la détermination des zones plus particulièrement au niveau du sol ou la vitesse du vent est accélérée par le présence d'obstacle.