République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Yahia Farés de Médéa

Faculté des sciences



Mémoire

Présenté pour obtenir le diplôme de master en génie mécanique

Spécialité : énergétique et thermique des systèmes

Présenté par :

BENAICHA Youcef

CHELGHOUM Ameur

Thème

LA DISPERSION DES POLLUANTS GAZEUX DANS UN MILIEU URBAIN

Soutenue publiquement le : 24/05/2017.devant le jury composé de :

Président : ABUDURA Salem

Examinateur : BELHADJ Abdelmounaim

Examinateur : YOUCEFI

Encadreur : ZIRARI Mounir

Promo : 2016/2017

Remerciements

*Avant de commencer la présentation de ce travail, nous tenons à remercier sincèrement et profondément en premier lieu notre Dieux ***ALLAH**** *le tout puissant.*

Je remercie chaleureusement ***Mr. ZIRARI Mounir*** *d'avoir réussi à me convaincre de réaliser cette thèse et de m'avoir encadré pendant tout le déroulement de celle-ci. Sa disponibilité à toute épreuve, son excellence scientifique, sa patience m'ont été très précieuses et de m'avoir laissé beaucoup de liberté tout en étant présent quand le besoin s'en faisait ressentir.*

Je remercie ***Mr.ABOUDHER Salem*** *qui m'a fait l'honneur de présider mon jury en plus d'en être un des rapporteurs de mon travail de thèse et pour l'analyse qu'ils ont pu en faire. Je voudrai aussi remercier les professeurs* ***Mr.BELHADJ Abdelmounaim*** *pour avoir accepté d'être membres du jury.*

Je souhaiterai aussi le remercier Professeur ***Mr. REBHI Redha*** *pour les aides précieuses, les conseils avisés et surtout pour leur temps qu'il a consacré à ce travail.*

Je tiens à remercier du fond du cœur mes parents, ma grande famille ,mes proches et mes amis pour m'avoir soutenu en permanence et motiver quand c'était nécessaire.

Un grand merci à toutes mes collègues que j'ai croisées durant tous mes années d'étude pour la bonne ambiance, les discussions toujours intéressantes et tous les merveilleux moments hors thèse.

Merci à tous mes invités pour me partager de mon grand jour.

Enfin, un énorme merci pour le binôme pour avoir donné un sens à la fin de travail.

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

Aux deux personnes les plus proches de mes âmes et cœurs, mes chères parentes qui ont sacrifie toute leur vie pour nous soutenir et nous encourager à réaliser mes rêves et ambitions, qu'ils trouvent ici tout mon amour et gratitude.

A ma grande famille ***CHELGHOUM*** *et* ***HORMA****, à mes chers frères et sœurs, à tous mes amis et proches, à tous ceux qui m'encouragé sur mon travail, a tous les professeurs et les étudiants de la promotion 2017,*
à tous ceux qui ont participé de près ou de loin de ce projet, je les réaffirme tout mon respect et ma reconnaissance.

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

Aux deux personnes les plus proches de mes âmes et cœurs, mes chères parentes qui ont sacrifient toute leur vie pour nous soutenir et nous encourager à réaliser mes rêves et ambitions, qu'ils trouvent ici tout mon amour et gratitude.

A ma grande famille ***BENAICHA*** *et* ***BELHADJ****, à mes chers frères et sœurs, à tous mes amis et proches, à tous ceux qui m'encouragé sur mon travail, a tous les professeurs et les étudiants de la promotion 2017,*
à tous ceux qui ont participé de près ou de loin de ce projet, je les réaffirme tout mon respect et ma reconnaissance.

SOMMAIRE :

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Chapitre I :la pollution atmosphérique	
I.1.Introduction	**1**
I.2. Les polluants atmosphériques	**2**
I.2.1. Définition de la pollution atmosphérique	**2**
I.2.2. Source de pollution et de différents polluants	**3**
I.2.2.1. Les sources naturelles	**3**
I.2.2.2. Les sources dues aux activités industrielles	**4**
1. Les installations fixes de combustions	**4**
2. Les installations industrielles	**4**
3. Les sources automobiles	**4**
I.2.2.3. Les différentes échelles de la pollution atmosphérique	**4**
I.2.3. Les principaux polluants et leurs sources	**5**
I.2.3.1. Le dioxyde de soufre (SO2)	**6**
I.2.3.2. Les oxydes d'azote (NO et NO2)	**6**
I.2.3.3. Les particules	**6**
I.2.3.4. Les métaux lourds	**7**
I.2.3.5. Les hydrocarbures et les composés organiques volatils (COV)	**7**
I.2.3.6. Le monoxyde de carbone	**7**
I.2.3.7. L'ammoniac (NH3)	**7**
I.2.3.8. L'ozone et les polluants photochimiques	**7**

I.3.les effets de la pollution de l'air 1	**10**
1.3.1. Les Effets des polluants sur le cadre bâti	**10**
1.3.2. Les Effets des polluants sur l'environnement	**10**
I.3.3. Les Effets des polluants sur la santé	**11**
I.3.4. Les Effets des polluants sur les écosystèmes d'eau douce	**11**
1.3.5. Les effets de l'appauvrissement de la couche d'ozone	**12**
I.4. Les facteurs affectant la dispersion des polluants	**12**
I.4.1. Facteurs « indirects »	**12**
I.4.1.1. Rejets instantanés versus continus	**12**
I.4.1.2. Rejets ponctuels versus diffus	**13**
I.4.1.3. La dynamique et thermique du nuage	**13**
I.4.2. Facteurs « directs »	**15**
I.5. Caractéristiques de l'écoulement	**15**
Conclusion	**16**
Chapitre II : la modélisation mathématique	
II. Introduction	**17**
II.1 Modélisation de la turbulence	**17**
II.2 Equations mathématiques.	**17**
II.2. 1 Equation de continuité	**17**
II.2.2 Equation de diffusion	**19**
II.2.3 Equation de conservation de quantité de mouvement	**21**
II.2.4 Équation de bilan de l'énergie	**21**
II.2.5 Equation de conservation de l'énergie	**22**
II.2.6 Equation de conservation des espèces	**22**
II.2.7 L'équation de Navier-Stocks	**22**
Conclusion	**23**
Chapitre III : simulation numérique	
III.1 Introduction	**24**

III.2 Les éléments finis	**24**
III.2.1. Définition La méthode des éléments finis (MEF)	**24**
III.2.2. Historique	**25**
III.2.3 Principe mathématique	**25**
III.2.4 Etapes de la mise en œuvre	**25**
III.2.5 Présentation de la méthode	**26**
III.2.6 Mise en œuvre de la méthode des éléments finis	**26**
III.2.6.1 Formulation vibrationnelle forte	**26**
III.2.6.2 Formulation vibrationnelle faible	**26**
III.2.6.3 Forme générale des équations du système	**27**
III.2.7 Logiciels d'éléments finis	**27**
III.3 Logiciel ANSYS	**29**
III.3.1 A propos des modules d'apprentissage ANSYS	**30**
III.3.2 Principaux produits	**30**
III.3.3 Environnements logiciels	**32**
III.3.4 Présentation des étapes d'ANSYS	**33**
III.3.5 Les avantage d'ANSYS CFD	**36**
Conclusion	**37**
Chapitre IV : résultats et discussion	
IV.1. Partie d'identification	**38**
IV.2. Influence des cheminées sur la dispersion	**40**

IV.2.1 : Etude de l'influence de la deuxième cheminée (cas I)	**40**
IV.2.2 : Etude de l'influence de la hauteur de la deuxième cheminée (cas II)	**47**
IV.2.3 : Etude de l'influence de la distance entre les deux cheminées (cas III)	**53**
Conclusion	**61**
Conclusion générale	
Références bibliographiques	
Nomenclatures	
Table des matières	

Liste des figures :

Figure I.1: les processus de transport et de diffusion**.** (Source : Sourdain, 2006)

Figure I.2 : Emissions, transformation et dépôts de polluants. (Source : Ademe, 2010)

Figure I.3 : Rejet instantané d'un produit (Source : INERIS-DRA-25427-2002)

Figure I.4 : Rejet continue d'un produit (Source : INERIS-DRA-25427-2002)

Figure III.1 : InterfaceANSYS pour la construction de la géométre

Figure III.2 : Interface ANSYS pour le maillage

Figure III.3/4 : Interface ANSYS pour les conditions limites

Figure III.5/6/7 : Interface ANSYS pour la solution

Figure IV.1: schéma représentatif de domaine de simulation

Figure IV.2 : comparaison entre les profils de vitesse

Figure IV.3: Représentation spatiale de champs de vitesse **(cas I)**

Figure IV.4: Représentation spatiale de champs de Pression

Figure IV.5: Représentation spatiale de champs de dispersion de SO2

Figure IV.6: Représentation spatiale de champs de dispersion de CO2

Figure IV.7: Représentation spatiale de champs de Température

Figure IV.8: profils de vitesse en amont de l'obstacle

Figure IV.9 : profils de vitesse en aval de l'obstacle

Figure IV.10: profils de taux de dispersion en amont de cheminée 2

Figure IV.11: profils de taux de dispersion en aval de cheminée 2

Figure IV.12: profils de taux de dispersion en amont de l'obstacle

Figure IV.13: profils de taux de dispersion en aval de cheminée 2

Figure IV.14: profils de température en aval et en amont l'obstacle

Figure IV.15: Représentation spatiale de champs de vitesse **(cas II)**

Figure IV.16: Représentation spatiale de champs de Pression

Figure IV.17: Représentation spatiale de champs de dispersion de SO2

Figure IV.18: Représentation spatiale de champs de dispersion de CO2

Figure IV.19: Représentation spatiale de champs de Température

Figure IV.20: profils de vitesse en amont de cheminée 2

Figure IV.21: profils de vitesse en aval de cheminée 2

Figure IV.22: profils de taux de dispersion en amont de cheminée 2

Figure IV.23: profils de taux de dispersion en amont de cheminée 2

Figure IV.24: profils de taux de dispersion en aval de cheminée

Figure IV.25: profils de température en aval et en amont l'obstacle

Figure IV.26 : Représentation spatiale de champs de vitesse **(cas III)**

Figure IV.27 : Représentation spatiale de champs de Pression

Figure IV.28 : Représentation spatiale de champs de dispersion de SO2

Figure IV.29 : Représentation spatiale de champs de dispersion de CO2

Figure IV.30 : Représentation spatiale de champs de température

Figure IV.31: profils de vitesse en amont de l'obstacle

Figure IV.32: profils de vitesse en aval de l'obstacle

Figure IV.33: profils de taux de dispersion en amont de l'obstacle

Figure IV.34: profils de taux de dispersion en amont de l'obstacle

Figure IV.35: profils de taux de dispersion en aval de l'obstacle

Figure IV.36: profils de température en amont de l'obstacle

Figure IV.37: profils de température en aval de l'obstacle

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/kg^1
E	L'énergie totale	J/kg^1
$\vec{q}$	Flux de chaleur	$J/m^2 \cdot s^1$
c	La chaleur massique	
T	Température	K°
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	m^2/s^2
λ	La conductivité thermique	J/s.m.k
μ	La viscosité dynamique	Kg/m.s
μ_t	La viscosité dynamique turbulente	Kg/m.s
ρ	Masse volumique	Kg /m3

τ	Contrainte de cisaillement	N /m²
ϕ	Variables généralisée par unité de masse	
φ	Flux de chaleur transmis	W
δ_{ij}	Symbole de Kronecker	
Σ	tenseur des contraintes	N.kg/m²

Espèces chimiques

SO2	Dioxyde de soufre
O2	Oxygène
CO2	Dioxyde de carbone
CO	Monoxyde de carbone ;
HC	Hydrocarbures ;
HO_2	Radicaux hydropéroxyles ;
HNO_3	Acide nitrique ;
NO	Monoxyde d'azote;
NO_2	Dioxyde d'azote;
NO_x	*NO+NO2;*
O_3	Ozone;
OH·	Radical ydroxyle ;
RO_2	Radicaux péroxyles ;
PAN	Peroxyacylnitrates ;
RCHO	Aldéhydes ;

Abréviation

CFC	chloro-fluoro-carbones
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

Résumé :

Un grand problème que doit affronter actuellement la population mondiale est celui de la pollution de l'air engendrée principalement par les rejets des installations industrielles sur la santé humaine dans les zones urbaines, cette pollution en croissance constante durant les cinq derniers décennies contribue à un déséquilibre de l'écosystème pour apporter des modifications profondes du climat à l'échelle planétaire .basons sur les outils modernes de la modélisation numérique CFD (Computational Fluid Dynamics) qui utilisent la méthode des éléments finis et reprennent la formulation mathématique des interactions très complexe impliquées dans les processus des écoulements biphasique miscible.

Dans ce travail, nous avons étudié l'influence des caractéristiques des fumées, des conditions atmosphériques et de la topologie du site sur la dispersion des polluants.

Mots clé :

Pollution, installations industrielles, écosystème, modélisation numérique, dispersion, polluants gazeux

Summary:

A major problem facing the world's population today is that of air pollution caused mainly by the discharges of industrial facilities onto human health in urban areas, this constantly growing pollution during the last five decades contributes to an imbalance of the ecosystem to bring about far-reaching changes in the global climate. We are using the modern CFD (Computational Fluid Dynamics) modeling tools that use the finite element method and take up the mathematical formulation of the very complex interactions involved in the biphasic flow processes miscible.

In this work, we studied the influence of smoke characteristics, atmospheric conditions and site topology on the dispersion of pollutants.

Key words:

Pollution, industrial installations, ecosystem, numerical modeling, dispersion, gaseous pollutants

Chapitre I

La pollution atmosphérique

I.1.Introduction :

Depuis décembre 1996, la loi sur " l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie " impose une surveillance accrue des émissions dans l'atmosphère des polluants d'origine anthropique. La connaissance et le suivi à plus long terme, la prévision de la dispersion de ces polluants présente donc un intérêt d'étude croissant **[1]**.

Ce projet est consacré à la dispersion des polluants gazeux dans l'atmosphère. Afin de la modéliser efficacement, il est nécessaire de bien connaître et comprendre les différents processus physiques mis en jeu. Une fois le polluant émis, son séjour dans l'atmosphère peut se résumer à trois processus :

– Le transport influencé par les circulations d'air dans l'atmosphère et en particulier dans la couche limite atmosphérique, le déplacement des polluants les plus stables sur de longues distances.

– Les transformations physico-chimiques qui modifient la concentration du polluant au cours de son séjour dans l'atmosphère : la filiation radioactive (pour les radioéléments), les réactions chimiques, éventuellement multiphasiques et les processus liés aux particules (évaporation/condensation).

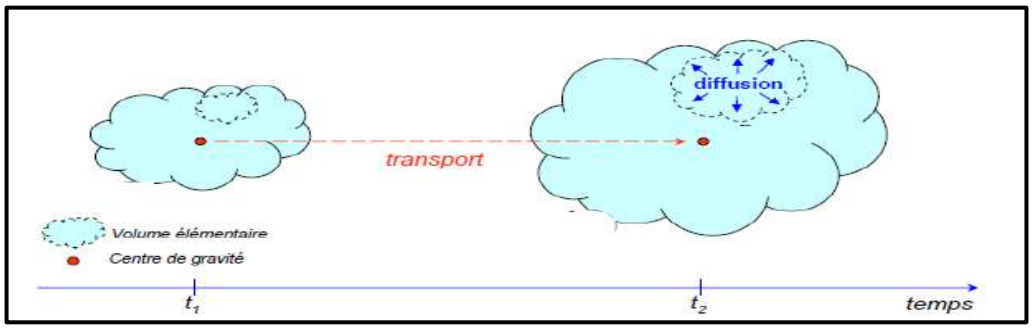


Figure I- 1 : les processus de transport et de diffusion. *(Source : Sourdain, 2006)*

– Les processus de perte par dépôt : d'une part le dépôt sec et d'autre part le dépôt humide, sous l'influence des précipitations

Dans les deux cas, l'échelle caractéristique de la variabilité spatiale peut être de quelques mètres seulement.

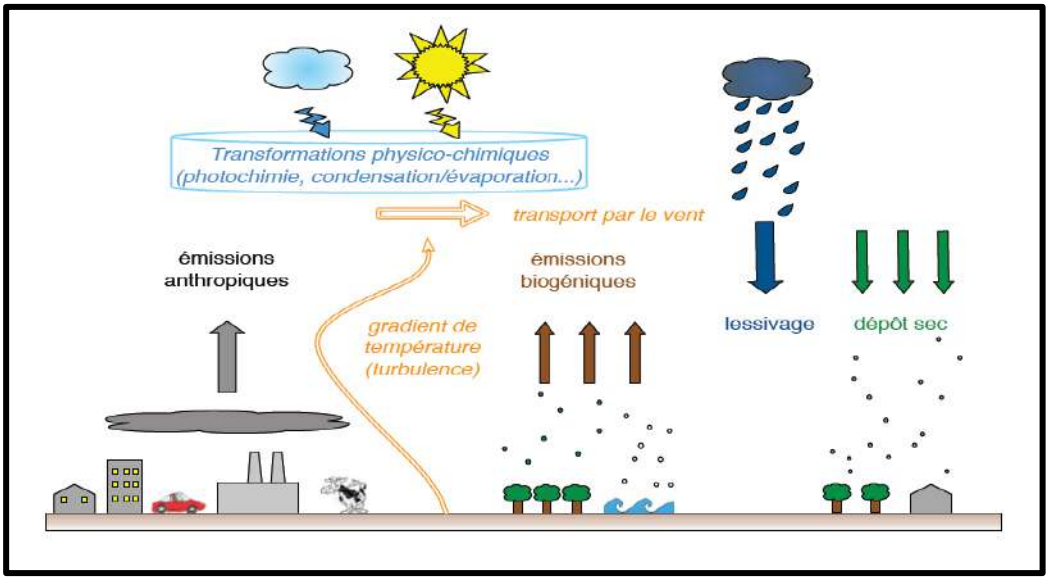


Figure I-2 : Emissions, transformation et dépôts de polluants. *(Source : Ademe, 2010)*

I.2. Les polluants atmosphériques

I.2.1. Définition de la pollution atmosphérique

La pollution atmosphérique représente 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. C'est une 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).

Donc 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.2.2. Source de pollution et de différents polluants

Les différentes sources émettent de très nombreux polluants dits « primaires » car ils sont émis directement dans l'atmosphère. Une fois les principaux polluants de l'air émis dans l'atmosphère, ils peuvent soit se redéposer ou soit se dégrader chimiquement, in situ dans l'atmosphère, les produits de ces réactions sont alors appelés polluants « secondaires ». Ces deux types de polluants jouent un rôle déterminant par les impacts qu'ils peuvent avoir sur le climat, la santé et les écosystèmes **[2].**

I.2.2.1. Les sources naturelles

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

- Les volcans émettent des gaz comme le dioxyde de soufre et de l'hydrogène sulfureux, et des particules des cendres en grande quantité, dont les nuages peuvent parcourir des distances considérables.
- Les feux des forêts, des cultures ou des prairies contribuent à des émissions importantes d'imbrûlés et de gaz.
- Les embruns marins sont constitués par des aérosols renfermant des cristaux de sel qui peuvent entraîner une pollution.
- Les végétaux sont à leur tour à l'origine d'une pollution par les pollens, les spores et les champignons.
- L'homme et les animaux rejettent des quantités importantes de dioxyde de carbone et sont à l'origine d'une pollution microbienne.
- L'ozone est formé naturellement à haute altitude à partir de réaction photochimique impliquant l'oxygène de l'air, ainsi une fois transportée dans les zones rurales par le vent, l'ozone se forme en grande quantité lorsque l'insolation est très élevée **[3].**

I.2.2.2. Les sources dues aux activités industrielles

De nombreux types d'installations industrielles émettant cependant également des polluants dans l'atmosphère constituent généralement un problème local à l'échelle d'une zone ou d'un quartier et planétaire à grande échelle **[4].**

1. Les installations fixes de combustions

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

2. Les installations industrielles

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

3. Les sources automobiles

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

I.2.2.3. Les différentes échelles de la pollution atmosphérique

Nous pouvons classer la pollution atmosphérique en trois catégories :

- **Pollution de proximité et à l'échelle locale** :

Elle concerne les sources d'émission de gaz ou d'autres substances indésirables le plus souvent produites en milieu urbain (industries, chauffage, trafic...). Elle affecte en premier lieu la santé des populations par son action directe à court terme mais exerce aussi une toxicité à plus long terme pour certaines pathologies. Elle peut également procurer une gêne olfactive importante et participer à la dégradation du patrimoine bâti (corrosion, salissure). **[5].**

❖ **Pollution à l'échelle régionale :**

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

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

La pollution photochimique qui désigne les mécanismes conduisant à la rupture naturelle de formation et de destruction de l'ozone troposphérique (à basse altitude) et à l'augmentation de sa concentration dans l'air. **[6].**

❖ **Pollution planétaire :**

Elle concerne les deux problèmes identifiés :

✓ La diminution (« trou ») de la couche d'ozone stratosphérique due essentiellement à l'action des composés halogénés (chlore, brome, iode) libérés par les activités humaines, et à la réduction du pouvoir filtrant a des conséquences néfastes sur la santé (cancers de la peau).

✓ L'augmentation de l'effet de serre qui constitue un processus naturel à la vie terrestre car sans ce phénomène, la température de l'air serait inférieure à - 30 °C à la valeur moyenne actuelle qui est de 15°C sur notre planète. Cependant, son augmentation liée à la production excessive de certains gaz (CO, CO2, COV) entraînera de grave changements climatiques (élévation de la température du globe) et des conséquences lourdes pour la vie terrestre **[7].**

I.2.3. Les principaux polluants et leurs sources

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

I.2.3.1. Le dioxyde de soufre (SO2)

Ce gaz résulte des combustions (oxydation du soufre des combustibles fossiles) et il est associé à des nombreuses pathologies respiratoires souvent en combinaison avec les particules.

Il peut entraîner des inflammations et une altération de la fonction respiratoire et les études épidémiologiques montrent également souvent des liens entre concentration en dioxyde de soufre et particules dans l'air et hospitalisations pour troubles respiratoires et cardiaques. Le dioxyde de soufre peut se transformer en particules de sulfates dans l'air ambiant et concourt également au phénomène des pluies acides néfastes pour les écosystèmes aquatiques et terrestres **[8]**.

I.2.3.2. Les oxydes d'azote (NO et NO2)

Ils sont émis lors des combustions (chaudières, moteurs...) et le dioxyde d'azote est le plus nocif pour la santé humaine. C'est un gaz irritant pour l'appareil respiratoire et il favorise l'hyperréactivité bronchique. Les populations asthmatiques semblent plus sensibles également à ce polluant. Chez l'enfant il peut favoriser des infections pulmonaires. Les oxydes d'azote participent en outre à la formation de polluants photochimiques comme l'ozone néfastes pour la santé et concourent au phénomène des pluies acides **[9]**.

I.2.3.3. Les particules

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

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

I.2.3.4. Les métaux lourds

Ce sont des métaux de densité élevée comme le plomb (Pb), le Mercure (Hg), l'Arsenic (As), le Cadmium (Cd), le Nickel (Ni), le Mercure (Hg). Dans l'air, ils sont sous forme de particules à l'exception du mercure qui est principalement gazeux. Ils proviennent de la combustion dans certains procédés industriels et de l'incinération des déchets. Ils peuvent s'accumuler dans l'organisme et les effets sont variables selon les métaux ; atteintes du système nerveux, des fonctions rénales, hépatiques, etc. Leur dépôt sur les surfaces (sols, eaux, etc.) conduit également à une contamination de la chaîne alimentaire **[11]**.

I.2.3.5. Les hydrocarbures et les composés organiques volatils (COV)

Ils sont émis par diverses sources (solvants, pétrochimie, automobiles...) et recouvrent de nombreux composés aux effets différents (odeurs, altération de la fonction respiratoire, troubles nerveux). Certains COV comme le formaldéhyde et le benzène sont cancérigènes. Les COV contribuent aussi à la mauvaise combustion du bois (dans des cheminées et foyers ouverts) et pour une plus faible part de la circulation automobile **[12]**.

I.2.3.6. Le monoxyde de carbone

Ce gaz est issu des combustions dans les chaudières mal réglées, et de la circulation automobile. Il se fixe sur l'hémoglobine et peut entraîner des troubles respiratoires, des effets asphyxiants, des maux de tête et des troubles cardiaques **[13]**.

I.2.3.7. L'ammoniac (NH3)

Ce gaz est notamment émis par les lisiers d'élevage. Il est malodorant et irritant à forte concentration. Dans l'air, l'ammoniac contribue à la formation de fines particules et de nitrate d'ammonium et contribue aux phénomènes d'acidification et d'eutrophisation des milieux naturels par dépôt de matière azotée **[14]**.

I.2.3.8. L'ozone et les polluants photochimiques

L'ozone troposphérique résulte majoritairement de réactions chimiques sous l'effet du rayonnement solaire, entre les oxydes d'azote, les composés organiques volatils et le

Monoxyde de carbone. Ces réactions forment aussi d'autres polluants (nitrate de peroxyacétyle, acide nitrique, aldéhydes, fines particules, etc.) regroupés sous le terme de « pollution photochimique ». L'ozone en est le principal constituant et il est néfaste pour la santé humaine et la végétation. L'ozone contribue également à l'effet de serre et constitue, avec les particules, l'une des priorités du programme CAFE (Clean Air For Europe) en matière de préservation de la qualité de l'air en Europe. **[5]**

Polluant	**Nature**	**Substance**
Gaz	Inorganiques	Dérivés oxygénés du souffre (dioxyde et trioxyde de souffre, acide sulfurique, sulfates...)
		Dérivés oxygénés d'azote (monoxyde et dioxyde d'azote, acides nitreux et nitrique)
		Monoxyde et dioxyde de carbone
		Autres (dérivés du plomb, hydrogène sulfuré, ammoniac, chlore, chlorures, acide fluorhydrique, fluorures...)
	Organiques	Hydrocarbures (aliphatiques saturés ou non, cyclaniques, aromatiques légers ou polycycliques)
		Aldéhydes et cétones (formaldéhyde, acroléine, acétone)
		Autres (alcools, hydrocarbures chlorés, mercaptans, sulfures...)
Particules		Particules de matière solide (poussières, fumées)
		Particules de matière liquide (brouillard d'huile ou de goudrons, gouttelettes entraînées...)

Tableau I.1: Classification des polluants atmosphériques.

On peut aussi classer quelques polluants et ses caractéristiques suivant le tableau au-dessus :

Polluants	Composition	Caractéristiques
Anhydride sulfureux	SO2	Incolore, gaz lourd, soluble dans l'eau avec une odeur irritante.
Oxyde de carbone	CO	Incolore, gaz inodore toxique, légèrement soluble dans l'eau.
Ozone	O3	Gaz bleu pâle, soluble dans l'eau, instable, odeur douceâtre.
Oxydes d'azotes	NOX	Gaz brun rougeâtre légèrement soluble dans l'eau.
Les composés Organiques Volatiles	COV	Ces composés parfois dotés d'un fort caractère odorant. Sont représentés par de nombreux composés : le butane, propane, acétylène, isoprène, benzène, le toluène, le méthanol, éthanol et les éthers.
Hydrogène sulfureux	H2S	Gaz incolore avec une odeur repoussante « d'œufs pourris », légèrement soluble dans l'eau.
Oxyde nitrique	NO	Gaz incolore, légèrement soluble dans l'eau.
Plomb	Pb	Métallique, peut exister dans les composés chimiques variés avec différentes caractéristiques.
Mercure	Hg	Métallique, peut exister dans les composés chimiques variés (différentes caractéristiques).
Particules	Variable	Particules solides ou gouttelettes liquides incluant vapeurs, fumées, poussières et aérosols.
Hydrocarbures	Variable	Nombreux composés hydrogènent et de carbone.
Fluore	Variable	Irritants, incolore, gaz solubles dans l'eau.

Tableau I.2 : Composition moléculaire et caractéristiques des principaux polluants de l'air
Source :(MACKENZI et al, 2000)

I.3. Les effets de la pollution de l'air

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

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

La réglementation définit, pour certains indicateurs de la pollution, des concentrations de références pour guider l'action des pouvoirs publics. Il s'agit des valeurs limites et des seuils d'alerte. **[15]**

1.3.1. Les Effets des polluants sur le cadre bâti

Les matériaux sont essentiellement affectés par la pollution acide qui entraîne une dégradation des édifices, monuments ou façades d'immeubles. La pollution atmosphérique met en danger notre patrimoine culturel et occasionne d'onéreux travaux de ravalement de façades ou de restauration des monuments. **[15]**

1.3.2. Les Effets des polluants sur l'environnement

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

L'effet de la pollution atmosphérique sur l'environnement est divers, par exemple les arbres vivent et dépérissent pour des causes naturelles très variées ne serait-ce que l'âge. Le dépérissement soudain constaté surtout depuis 1980 semble relever de causes tout à fait inhabituelles. Les responsables considèrent que la pollution atmosphérique est l'un des nombreux éléments participant aux dépérissements forestiers. En France, le programme DEFORPA (dépérissement des forêts attribué à la pollution atmosphérique) ainsi que des recherches en laboratoires, ont montré que les causes du dépérissement forestier sont très complexes telles que les sols de mauvaise qualité, sécheresse anormale, présence de polluants dans l'atmosphère principalement la pollution acide et l'ozone. **[15]**

I.3.3. Les Effets des polluants sur la santé

Les polluants peuvent agir à différents niveaux du corps humain :

- Au niveau de la peau : c'est le cas notamment des vapeurs irritantes et des phénomènes d'allergies,
- Au niveau des muqueuses le sang peut s'accumuler dans des organes.
- Au niveau des alvéoles pulmonaires. Les polluants se dissolvent et passent dans le sang ou dans les liquides superficiels et au niveau des organes **[15]**

I.3.4. Les Effets des polluants sur les écosystèmes d'eau douce

L'acidification des lacs et des cours d'eau entraîne une destruction parfois irréversible de la vie aquatique. La baisse du pH provoque la mise en solution de métaux contenus naturellement dans le sol, comme l'aluminium toxique à l'état dissous pour presque la totalité des organismes vivants. **[15]**

1.3.5. Les effets de l'appauvrissement de la couche d'ozone

La diminution de la couche d'ozone représente un redoutable problème environnemental. L'amincissement de cette couche protectrice accroît, à la surface de la Terre, le rayonnement des ultraviolets causant les coups de soleil. Il a été prouvé que l'exposition à ces rayons ultraviolets a des effets importants sur notre environnement. Elle peut causer la détérioration de l'écosystème aquatique, réduire le rendement des cultures agricoles et être néfaste pour les forêts. L'exposition aux rayons UV est nuisible pour la santé humaine car elle endommage les yeux, elle diminue l'efficacité de notre système de défense immunitaire et peut provoquer l'apparition du cancer de la peau.

C'est pourquoi, en France, la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie est à l'origine de trois plans régionaux :

- Le plan régional pour la qualité de l'air présenté en 1999 (PRQA).
- Le plan de protection de l'atmosphère (PPA).
- Le plan de déplacement urbain (PDU) présenté en 1999, actuellement en révision

Chacun de ces plans tente d'exposer et de mieux comprendre les composantes de la pollution atmosphérique afin d'y remédier suivant des objectifs propres par des propositions et des décisions. Ainsi, "pour être durable, la ville se doit de conjuguer densité urbaine et circulation douce, qualité urbanistique et transport en commun." **[15]**

I.4. Les facteurs affectant la dispersion des polluants :

Lorsqu'un polluant est émis dans l'atmosphère, il est soumis au processus de dispersion très variable dans le temps et dans l'espace. Il résulte principalement de deux facteurs affectant la dispersion dans l'air (directs/indirects) :

I.4.1. Facteurs « indirects » :

Qui sont liés aux paramètres de rejet :

I.4.1.1. Rejets instantanés versus continus

-**Les rejets de type instantané** sont définis par le relâchement critique de la totalité d'un polluant et sont caractérisés par la quantité émise dans l'atmosphère et la pression de la capacité au moment de la rupture (éclatement). Le rejet peut être accidentel, avec des émissions à l'atmosphère ponctuelles dans le temps. **[16]**

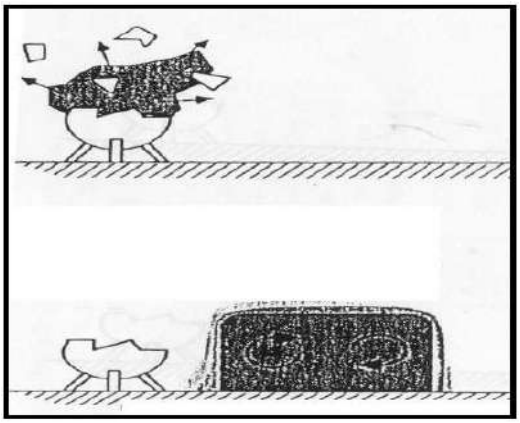
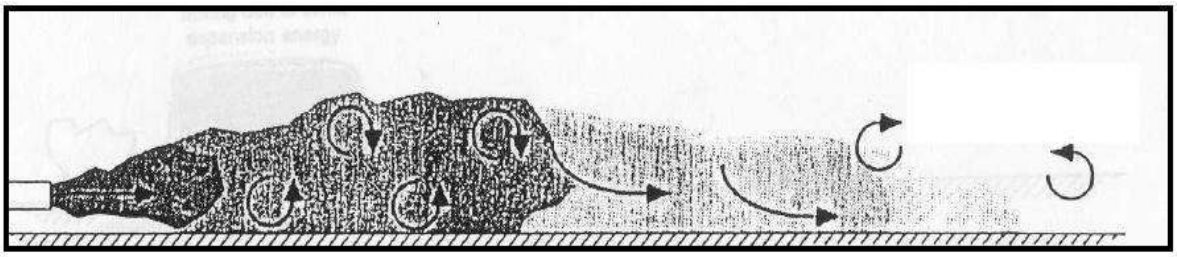


Figure I-3 : Rejet instantané d'un produit

(Source : INERIS-DRA-25427-2002)

- **Les rejets de type continue :** se produit à partir d'une conduite ou d'une cuve de stockage ou de l'émission par une cheminée d'extraction. C'est le relâchement de polluants lié à la combinaison de l'installation (rejets de routine). Le rejet peut être aussi chronique, avec des émissions à l'atmosphère plus ou moins continues ou périodiques dans le temps. Les rejets sont les sous-produits indésirables de toute activité humaine, par exemple les gaz

d'échappement des voitures, les fumées d'usines, de chauffages urbains ou toute forme de pollution diffuse. **[16]**



FigureI-4 : Rejet continue d'un produit

(Source : INERIS-DRA-25427-2002)

I.4.1.2. Rejets ponctuels versus diffus

Une cheminée est un exemple de source ponctuelle, c'est un rejet qui peut être bien définie Il est facile de mesure le débit et la nature des polluants émis par de telles sources. Par contre un rejet diffus ou il est impossible de suivre les émissions atmosphériques de chaque voiture, de chaque cheminée de maison ensemble, ces sources participent de façon importante au total des émissions.

I.4.1.3. La dynamique et thermique du nuage

- Le jet turbulent : En fonction des conditions de stockage, le nuage peut avoir une quantité de mouvement importante au début du rejet. On parle alors de jet turbulent quand la différence entre la quantité de mouvement du nuage et celle de l'air environnant provoque une turbulence importante, à l'origine d'un taux important d'entraînement d'air favorisant la dilution du rejet. Les caractéristiques du jet dépendent de la quantité de mouvement du gaz émis. L'absence de prise en compte de ce phénomène peut conduire à une surestimation des valeurs de concentration dans l'atmosphère. **[16]**

- La densité du gaz

• **Gaz dense** Lorsque le gaz rejeté dans l'atmosphère est plus dense que l'air, il est qualifié de « gaz lourd ». Les forces de gravité influencent de façon importante la dispersion du nuage.

-A proximité du rejet, la force de gravité est à l'origine d'un mouvement d'ensemble vers le sol et l'expansion verticale du nuage est réduite.

-En contact avec le sol, le nuage se répand, poursuit son effondrement ce qui favorise son développement transversal. **[16]**

- **Gaz neutre (ou passif) :**

On dit un gaz neutre, lorsque le gaz a la même densité et la même température que l'air et n'a pas de quantité de mouvement

Ce type de rejet est rencontré lors des fuites d'un gaz de même densité que l'air ou très dilué quelle que soit sa densité à l'état pur. Le gaz neutre n'apporte aucune perturbation mécanique à l'écoulement atmosphérique et va se disperser du fait de la seule action du fluide porteur, l'air. Le déplacement et la dilution du gaz vont alors dépendre du vent de la turbulence atmosphérique d'origine mécanique ou thermique. **[16]**

- **Gaz léger :**

Lorsque le gaz est moins dense que l'air, il est appelé un « gaz léger ». Ce type de rejet concerne les fuites d'un produit rejeté à température ambiante de masse volumique moins importante que celle de l'air (hydrogène...) , mais rejeté à une température assez importante pour que sa masse volumique soit plus petite que celle de l'air (exemple des fumées d'incendie). Si la densité du gaz est suffisamment faible, l'effet des forces d'Archimède est susceptible de favoriser l'ascension du nuage de gaz. Si la vitesse ascensionnelle est suffisante, le frottement des bords du nuage avec l'atmosphère lors de l'ascension peut favoriser la dilution (apparition de turbulence sur les bords du nuage). Enfin, le cœur du nuage plus léger que la périphérie peut s'élever plus rapidement avec pour conséquence un accroissement de la surface de contact entre l'atmosphère et le gaz. Tous ces phénomènes sont susceptibles de favoriser la dilution du nuage (Proust, 1999). **[16]**

Cisaillement du champ de vent : Si le nuage monte ou descend, alors il cisaille le champ de vent horizontal. La différence entre la quantité de mouvement du nuage et de l'air produit des tourbillons favorisant le mélange de l'air dans le nuage.

Les effets thermiques : Les effets thermiques jouent un rôle significatif sur la dilution. Pour des gaz dont la température est très différente de celle de l'air et du sol, les échanges thermiques vont accélérer la dilution par convection thermique. **[16]**

I.4.2. Facteurs « directs » :

Dont les deux paramètres sont :

- Condition météorologique (vitesse du vent, stabilité thermique de l'atmosphérique, turbulence…)
- Condition d'environnement ou de la structure du paysage (nature du sol, bâtiments, reliefs…etc.). **[16]**

I.5. Caractéristiques de l'écoulement

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

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

Conclusion :

Dans le monde entier, plus de 50% de l'humanité vit dans des zones urbaines dont l'atmosphère est insalubre, et sont exposées à des polluants qui se dégagent de diverses sources.

L'air est un élément vital, si on ne prend pas garde de sa qualité en continuant de le polluer il deviendra un souci majeur pour notre santé ainsi que pour l'environnement.

Les centrales de production de l'énergie, La circulation automobile et les zones d'habitation résidentielle et industrielle sont considérés comme les principales responsables des émissions de gaz et de particules dans l'air.

Enfin il faut produire moins de gaz polluants pour préserver notre terre et notre vie.

Chapitre II

La modélisation mathématique

II. Introduction

La modélisation de la dispersion atmosphérique est une simulation de la dispersion de panaches de pollution dans une disposition et une temporalité donnée faite à l'aide d'outils mathématiques et des logiciels informatiques. Les modèles cherchent à prendre en compte les conséquences directes et indirectes dans l'espace et dans le temps des rejets de substances (gaz, particules, aérosols, radionucléides / indésirables, dangereuses ou toxiques…) **[17]**

La modélisation peut servir à plusieurs objectifs. Cependant, ce travail vise plus particulièrement l'objectif suivant : démontrer (par modélisation) qu'une nouvelle source ou qu'un ensemble de nouvelles sources ne contribuera pas au dépassement des normes en vigueur .pour les polluants concernés aux articles 6 à 9 du Règlement sur la qualité de l'atmosphère (RQA) ou pour tout autre polluant pour lequel le MDDEP a fixé des critères d'air ambiant

.

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.

La mécanique des fluides est dirigée par trois équations fondamentales. Celles-ci Sont l'équation de continuité, l'équation de la quantité de mouvement et l'équation de l'énergie**[18].**

II.2. 1 Equation de continuité

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

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

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

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

On note ici :

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

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

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

- $\vec{U}$: la vitesse d'une particule de fluide se trouvant au point repéré par le vecteur $\vec{x}$ à l'instant

Forme locale

Cette écriture est la plus générale et la plus répandue.

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

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

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

Forme intégrale

Cette formulation permet l'étude d'un "bloc" de fluide $\Omega(t)$ pouvant éventuellement se déformer au cours du temps.

Elle traduit le fait que la masse du fluide enfermé dans le volume $\Omega(t)$ est constant

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

Écoulement incompressible

Dans le cas où la masse volumique est constante au cours du temps et uniforme dans l'espace (écoulement incompressible), l'équation de conservation se réduit à $\text{div}(\vec{U}) = 0$ (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 $\vec{W}(\vec{x}, t)$, la conservation de la masse s'exprime par la relation suivante :

$\Delta(\rho(\vec{U} - \vec{W})) \cdot \vec{n} = 0$ (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 :

$\int \frac{d\rho}{dt} \cdot dv + \int \rho \cdot \vec{v} \cdot \vec{n} \cdot dS = 0$ (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 :

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

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

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

On retrouve dans cette dernière expression le principe fondamental de la mécanique : la conservation de la vitesse pour tout volume V' sur V.

On rappelle que si $Ax + By + Cx^2 = 0$ est vrai pour tout (x, y), alors $A = B = C = 0$.
En appliquant cette règle à la forme intégrale forte, on obtient la forme intégrale faible ou forme locale :

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

II.2.2 Equation de diffusion

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

Déclaration L'équation est généralement écrite comme :

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

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

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

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

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

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

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

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 :

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

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

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

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 **:**

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

II.2.4 Équation de bilan de l'énergie

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

Dans ces équations :

- t: représente le temps (unité SI : s) ;
- ρ : désigne la masse volumique du fluide (unité SI : $kg\cdot m^{-3}$) ;
- $\vec{v} = (v_1, v_2, v_3)$désigne la vitesse eulérienne d'une particule fluide (unité SI : $m\cdot s^{-1}$) ;
- p: désigne la pression (unité SI : Pa) ;
- $\bar{\bar{\tau}} = (\tau_{ij})_{ij}$ est le tenseur des contraintes visqueuses (unité SI : Pa) ;

- $\vec{f}$: désigne la résultante des forces massiques s'exerçant dans le fluide (unité SI : $N \cdot kg^{1}$) ;
- e : est l'énergie totale par unité de masse (unité SI : $J \cdot kg^{-1}$) ;
- $\vec{q}$: est le flux de chaleur perdu par conduction thermique (unité SI : $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) ;

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

II.2.5 Equation de conservation de l'énergie

Un Sys n'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 vite, 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 :

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

II.2.6 Equation de conservation des espèces :

Exprime dans cette formule

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

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

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

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

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

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

La génération résolution des équations de Navier-stokes soit désormais le seul moyen de semoule le comportent complexe d'écoulement réel et visqueux. Actuellement, ces méthodes implantées dans plupart des codes de calcule de CFD résolvent numériquement les équations moyennées de la turbulent.

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

Chapitre III

Modélisation numérique

III.1 Introduction

La simulation numérique des écoulements, du transfert de chaleur et de masse est évoluée un outil essentiel et favorisé dans plusieurs études telles que l'aéronautique les turbomachines et l'industrie automobile

Les codes de calcul numériques utilisés pour la détermination des champs de dispersion continue ou instantanée de polluants par les cheminées industrielles, sont des outils d'aide à la décision, leur résultat permet de déterminer les zones à risques, par conséquent, le choix de l'emplacement d'une usine.

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 différences finis, la méthode des volumes finis la méthode des éléments finis qui est la plus utilisée actuellement dans les codes CFD.

III.2 Les éléments finis

III.2.1. Définition La méthode des éléments finis (MEF)

La méthode des éléments finis fait partie des outils de mathématiques appliquées. Il s'agit de mettre en place, à l'aide des principes hérités de la formulation variationnelle ou formulation faible, un algorithme discret mathématique permettant de rechercher une solution approchée d'une équation aux dérivées partielles sur un domaine compact avec conditions aux bords et/ou dans l'intérieur du compact. On parle couramment de conditions de type Dirichlet (valeurs aux bords) ou Neumann (gradients aux bords) ou de Robin (relation gradient/valeurs sur le bord). Il s'agit donc avant tout de la résolution approchée d'un problème, où, grâce à la formulation variationnelle, les solutions du problème vérifient des conditions d'existence plus faibles que celles des solutions du problème de départ et où une discrétisation permet de trouver une solution approchée. Comme de nombreuses autres méthodes numériques, outre l'algorithme de résolution en soi, se posent les questions de qualité de la discrétisation :

- existence de solutions ;
- unicité de la solution ;
- stabilité ;
- convergence ;
- mesure d'erreur entre une solution discrète et une solution unique du problème initial

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 valeurs 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.2.2. Historique

La 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.2.3 Principe mathématique

Le principe mathématique est basé sur les méthodes suivantes :

-Méthodes vibrationnelles (minimisation d'une fonctionnelle).

- Méthodes des résidus pondérés

III.2.4 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

- Traitement possible de géométries complexes,
- Détermination plus naturelle des conditions aux limites,
- Possibilité de démonstrations mathématiques de convergence et de majoration d'erreurs.
- Permet d'obtenir des solutions d'une très grande précision

Inconvénients

- Caractère conservatif des équations nom forcément assuré.
- Complexité de mise en œuvre et coût en temps de calcul et en mémoire.

III.2.5 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.2.6 Mise en œuvre de la méthode des éléments finis

III.2.6.1 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.2.6.2 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

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

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, v) 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 sur Ω et u = 0 sur Ω = 0

III.2.6.3 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.2.7 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
- • **CALCULIX** : logiciel libre de calcul pour la 3D[5] utilisé, par exemple, par le logiciel libre de conception Free CAD[6].
- •**CAST3M** : logiciel pluridisciplinaire français développé par le CEA (gratuit pour l'enseignement et la recherche)
- • **ASTER** : logiciel pluridisciplinaire libre français développé par EDF

- • **CEETRON** : Solutions de visualisation 3D avancée de résultats de calculs CFD et FEA (visualisation, exportation, importation et partage Cloud IAO)
- • **COMSOL Multiphysics** : logiciel pluridisciplinaire développé par Comsol,
- • **CosmosWorks** : Ancienne version de SolidWorks (Dassault Systèmes)
- • **Dytran** : logiciel américain développé par MSC.Software
- • **EFFEL** : logiciel français développé par GRAITEC
- **EuroPlexus** : 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.
- • **FreeFem++** : 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 isogéométriquesd'ordre3.
- • **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). MiniFE est conçu pour être exécuté sur un grand nombre de plates-formes matérielles de type HPC (Microprocesseur multi-cœur, 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
- • **PAM-STAMP :** logiciel de simulation d'emboutissage et de mise en forme 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 en suite 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
- **OFISTIK :** logiciel de calcul aux éléments finis développé par SOFISTIKAG, utilisé notamment dans le domaine du génie civil.

III.3 Logiciel 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.3.1 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.3.2 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 février2003 et en février2006[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 réutilisant 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 plateforme 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.3.4 Présentation des étapes d'ANSYS

Preprocessor/Modeling/Create/Area/

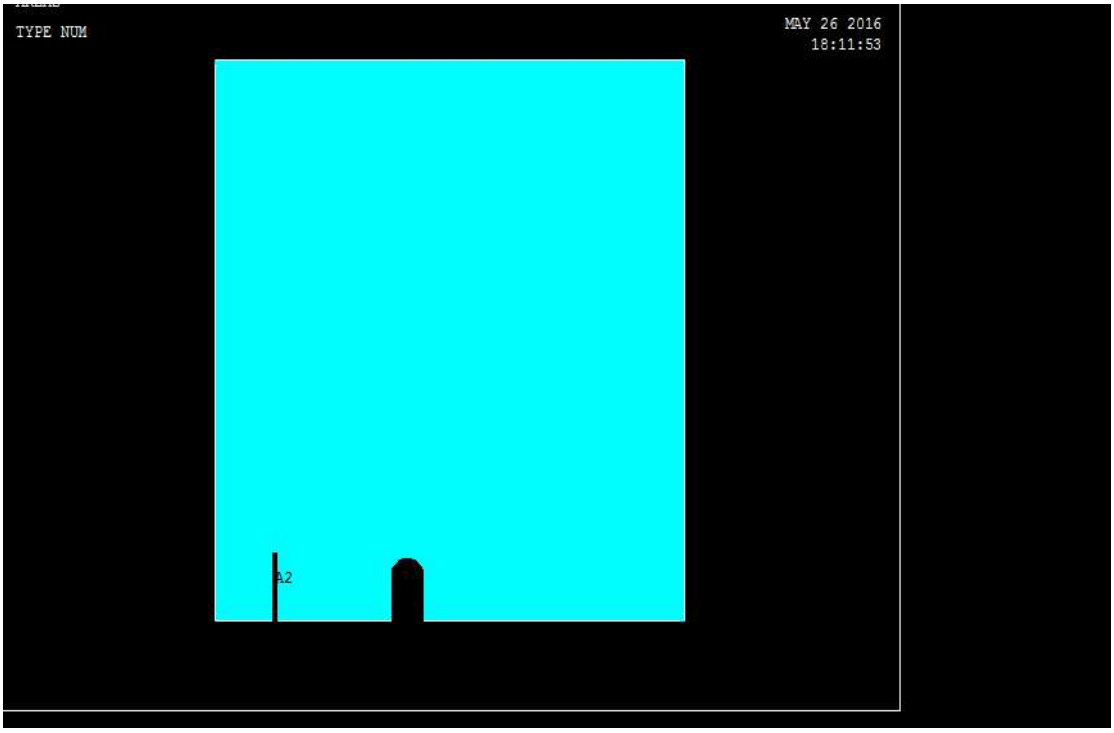


Figure III.1 : InterfaceANSYS pour la construction de la géométre.

Preprocessor/Meshin/Mesh Tool

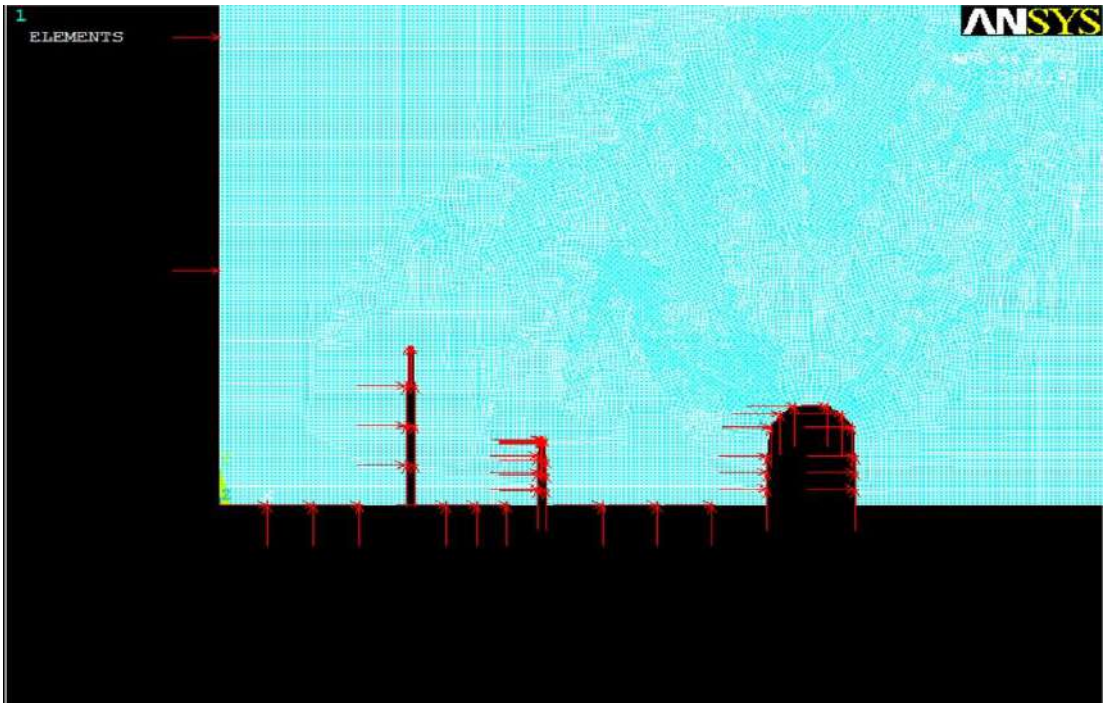


Figure III.2 : Interface ANSYS pour le maillage

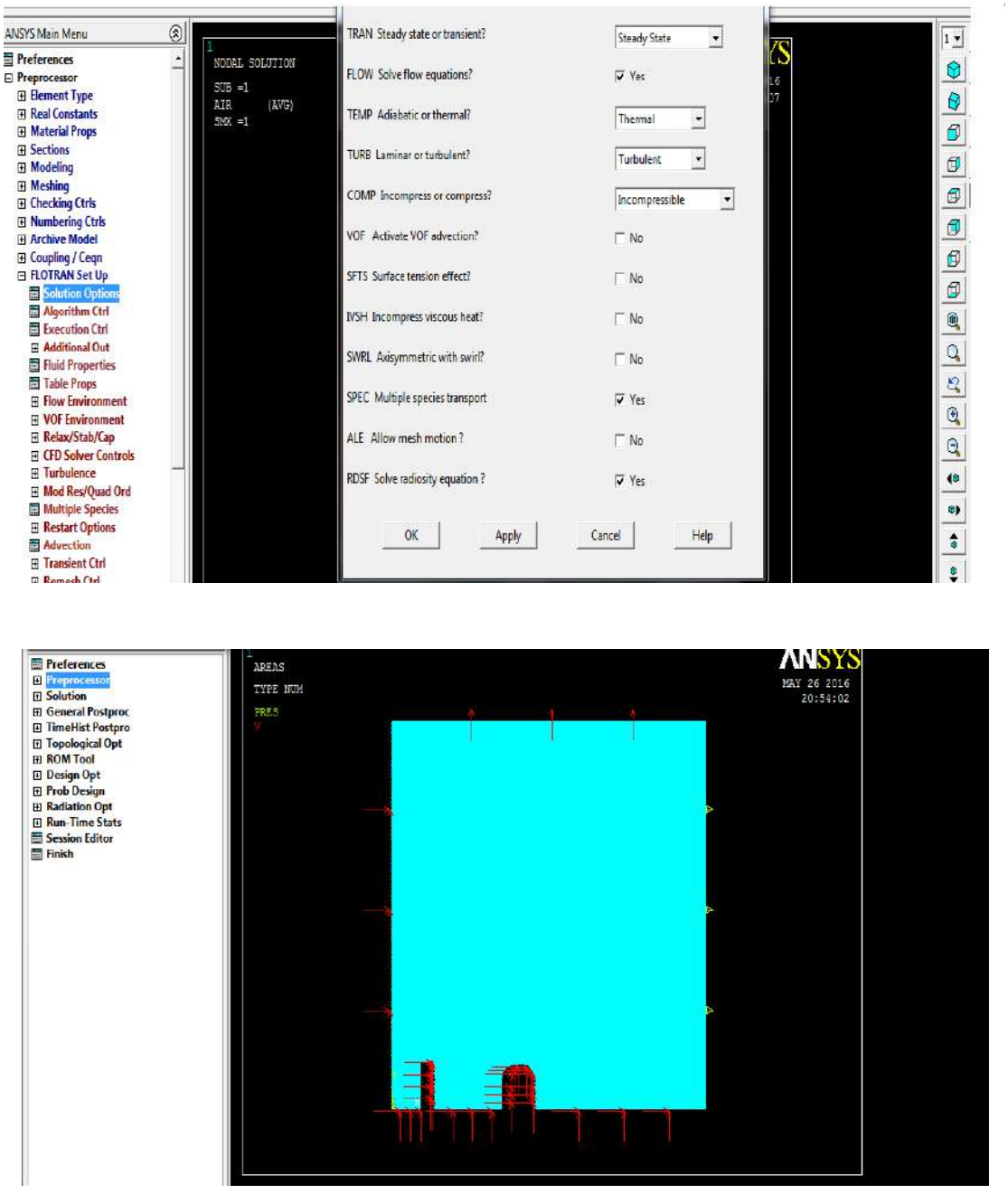
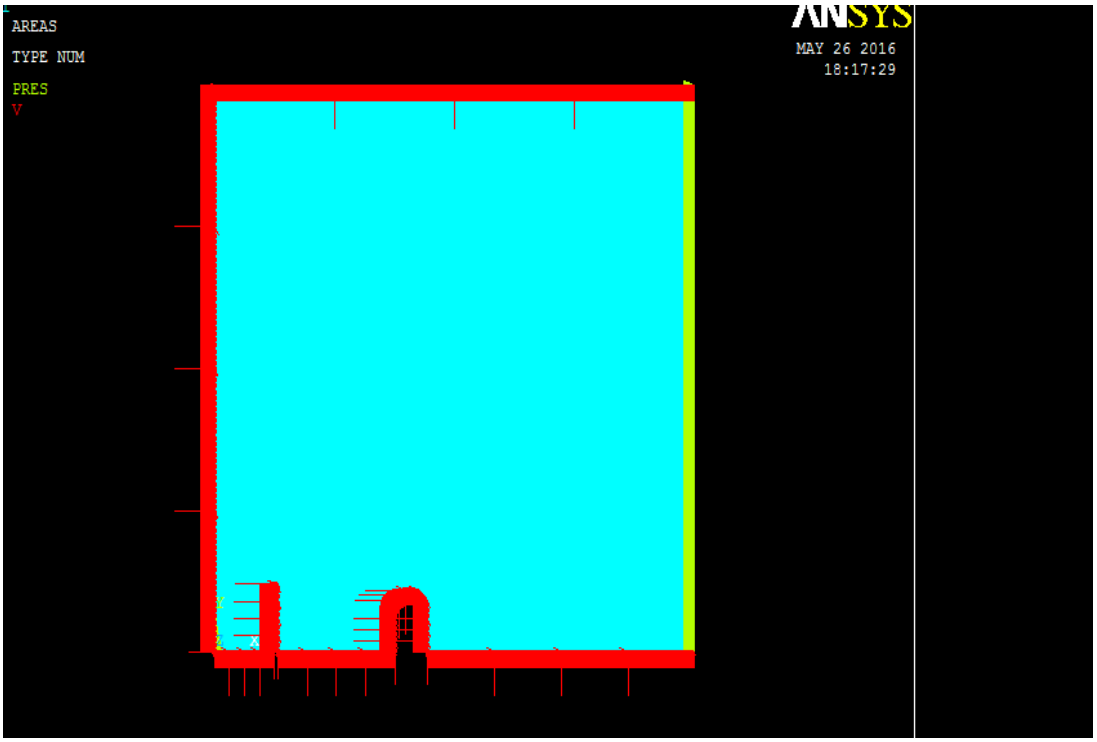
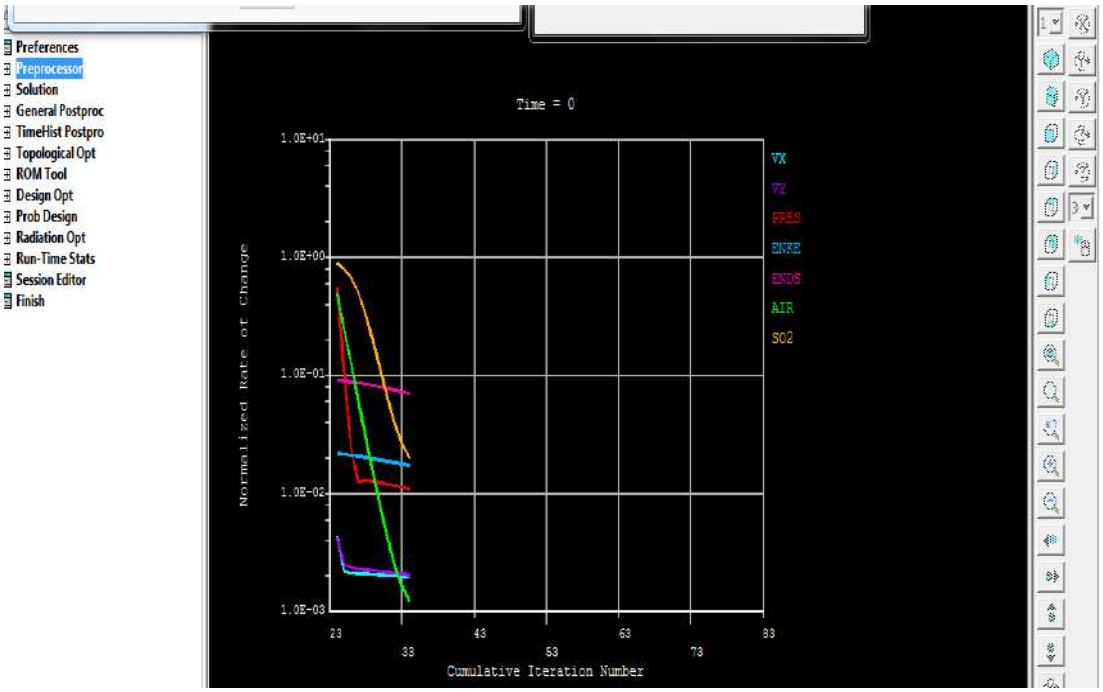


Figure III.3/4 : Interface ANSYS pour les conditions limites


AREAS
TYPE NUM
PRES
V
ANSYS
MAY 26 2016
18:17:29


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
23
33
43
53
63
73
83
Cumulative Iteration Number
VX
VY
PRES
ENKE
ENDS
AIR
SO2

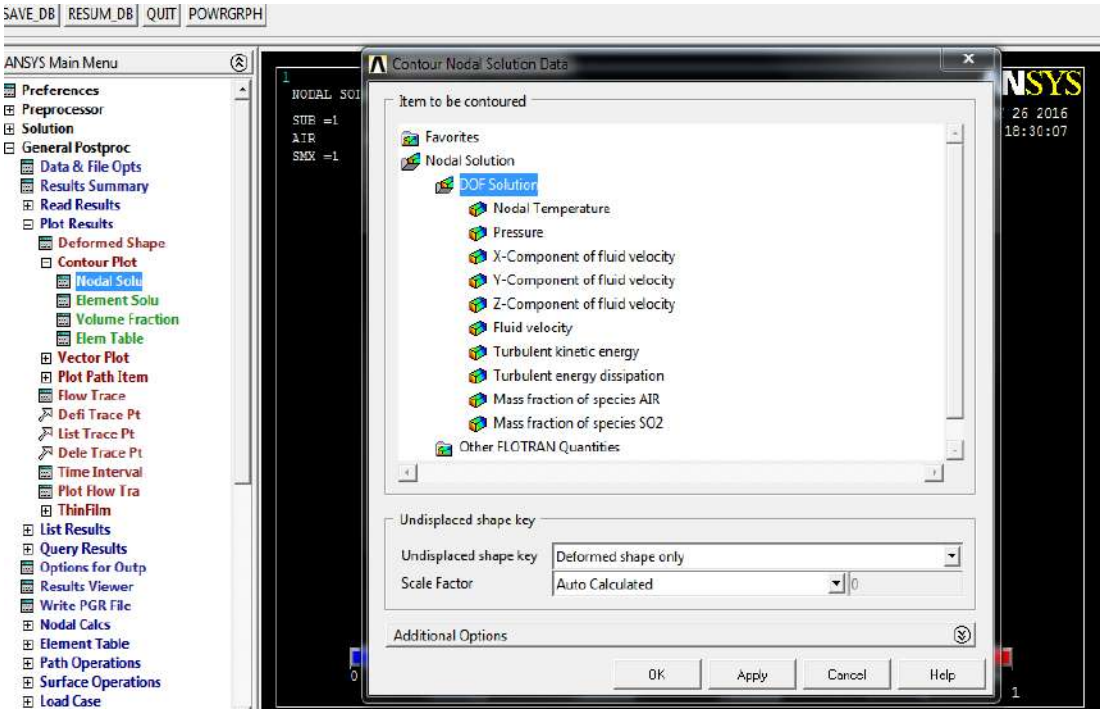


Figure III.5/6/7 : Interface ANSYS pour la solution

III.3.5 Les avantage d'ANSYS CFD :

- Accès rapide aux différents marchés financiers et aux actifs les plus liquides par l'intermédiaire d'un seul compte de trading, offrant de nombreuses possibilités de diversification des investissements ;

- Augmentation du bénéfice potentiel lié à l'utilisation du levier financier ;

- Faibles coûts de transaction et absence de commissions cachées ;

- Possibilité d'ouvrir à la fois des positions longues et courtes sans aucune limitation ;

- Facilité de trader à partir de n'importe où dans le monde grâce à l'ordinateur et les plateformes de trading.

Conclusion

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

ANSYS est parmi les premiers éditeurs mondial dans le domaine du calcul par éléments finis. Les outils proposés permettent de résoudre les problèmes de validations produits de manière très 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.1. Partie d'identification :

Le domaine d'étude concerne une installation industrielle dans un milieu urbain. Ce domaine a une longueur de **5700 m** et une hauteur de **1140 m**. L'usine avec sa cheminée est située à l'une des extrémités du domaine et émit le dioxyde de souffre. La hauteur de la cheminée est fixée à **85.5m,** le diamètre de sortie a été fixé à **4 m**. Dans le but d'étudier l'effet de l'obstacle, il a pour analyser notre problème de pollution en milieu urbain et expliquer l'origine des nuisances et la dégradation de l'environnement, nous nous sommes intéressés à la géométrie représentée sur la **figure IV.1**, qui peuvent représenter une grande catégorie d'habitat et d'équipements existantes dans des plusieurs villes.

Pour ensuite exposant d'une manière détaillée les résultats de la simulation numérique de la dispersion de la polluant gazeux 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.

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.

• Le milieu 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.

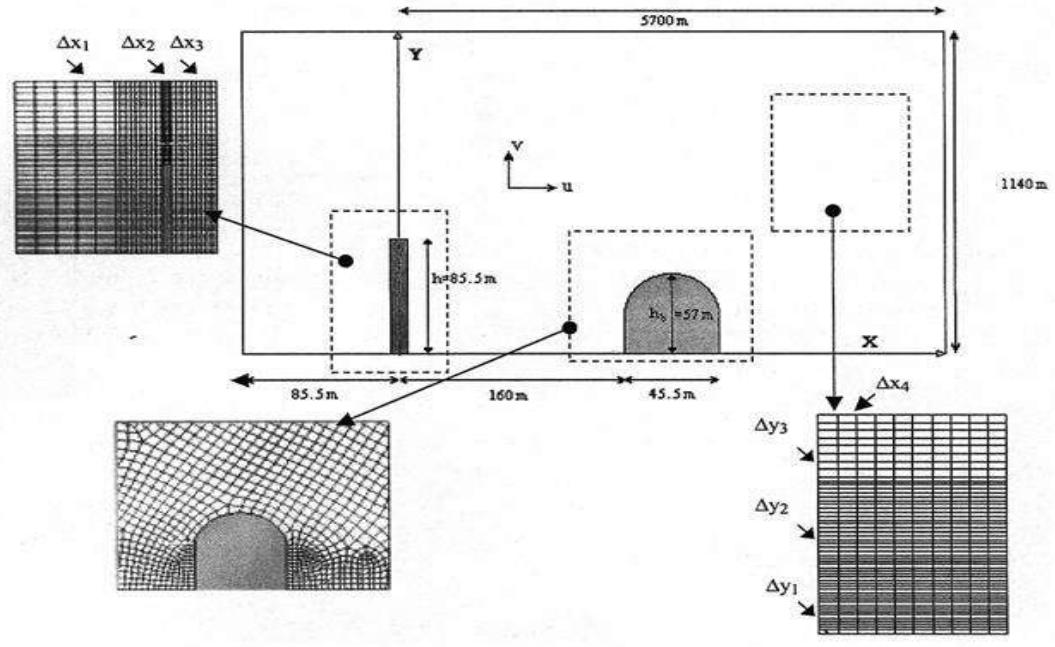
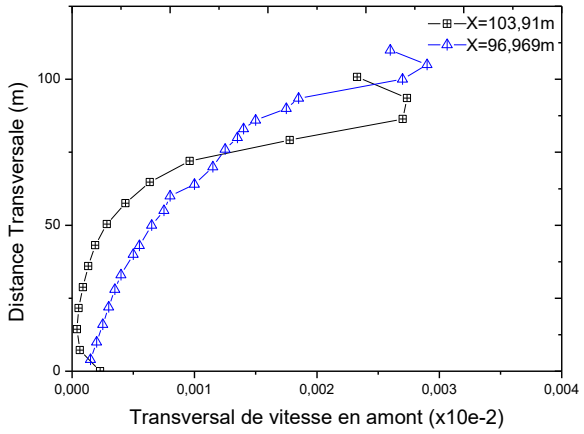


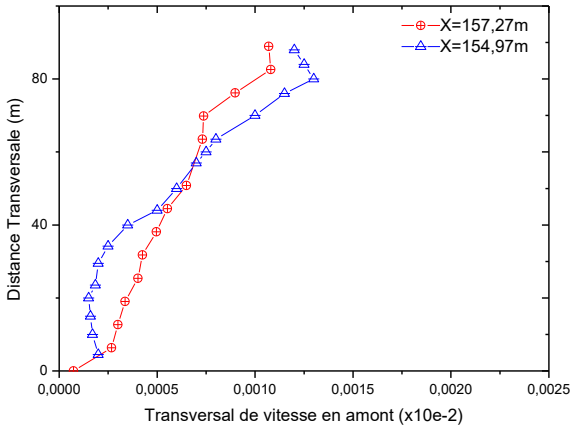
Figure IV.1 : schéma représentatif de domaine de simulation

Symbole	Température(°c) L'axe X	Température(°c) L'axe Y	Vitesse m/s L'axe X	Vitesse m/s L'axe Y
O_2	25	0	0.1	0
SO_2	0	100	0	0.1

Tableau IV.1 : récapitulatif des conditions limites

Les résultats obtenus comme suivants :





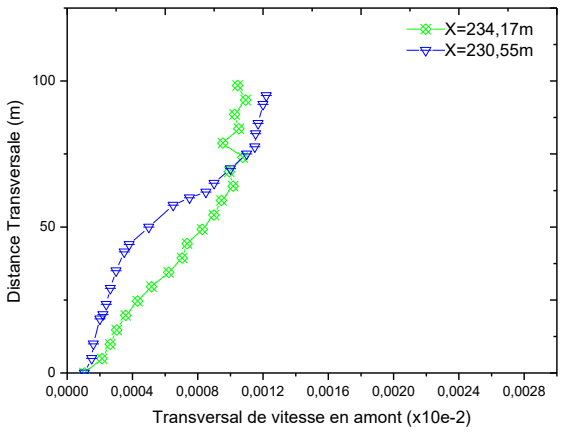


Figure IV.2 : comparaison entre les profils de vitesse

Les résultats du calcul sont presque identiques avec les résultats numériques obtenus par Ladjlet F. et al **[19]**, ce qui justifie l'utilisation de notre modèle**.**

IV.2. Influence des cheminées sur la dispersion :

IV.2.1 : Etude de l'influence de la deuxième cheminée :(cas I)

On considère une deuxième cheminée de hauteur **h=65 m**, à une distance de la première cheminée égale à **56m**qui émet le dioxyde de carbone à travers un trou de diamètre égal à **4m.** La vitesse d'éjection **v=0.1m/s** et sa température **T=100(°c).**

Symbole	Température(°c) L'axe X		Température(°c) L'axe Y	Vitesse m/s L'axe X	Vitesse m/s L'axe Y
CO_2	0		100	0	0.1
SO_2	0		100		
O_2	25		0	0.1	0

Tableau IV.2 : récapitulatif des conditions limites.

Espèces	O_2	SO_2	CO_2
Densité (kg/m3)	1.429	2.63	1.977
Viscosité (Pa/s)	1.92e-5	1.65 e-5	1.49 e-5
Conductivité (w/m.k°)	0.0266	0.0077	0.0145
Chaleur spécifique (kJ/kg.k°)	0.919	0.64	0.846

Tableau IV.3 : les propriétés des espèces utilisées.

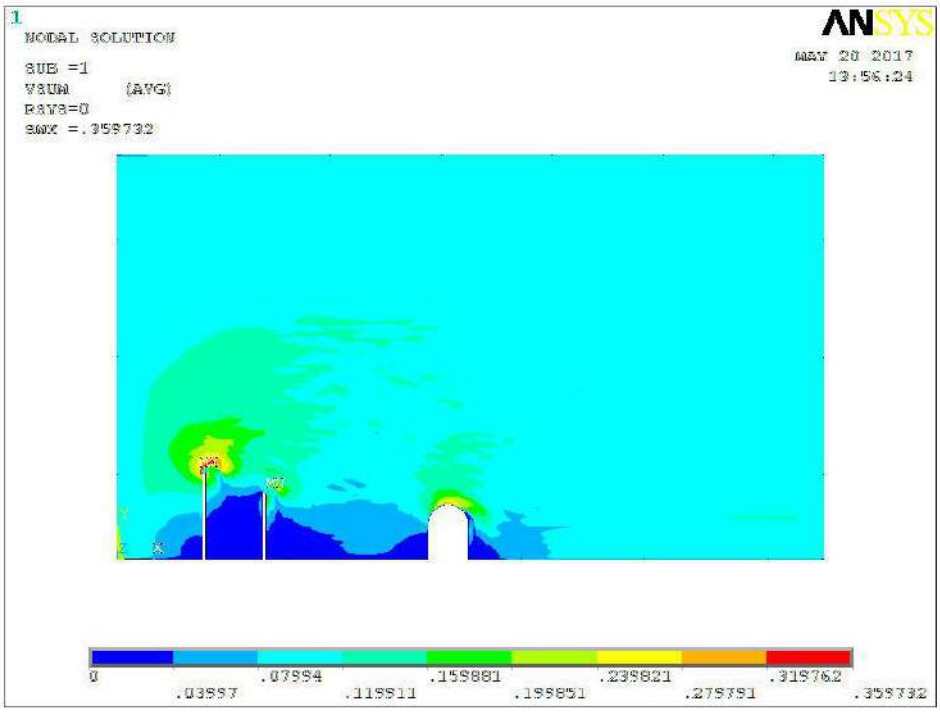


Figure IV.3 : Représentation spatiale de champs de vitesse

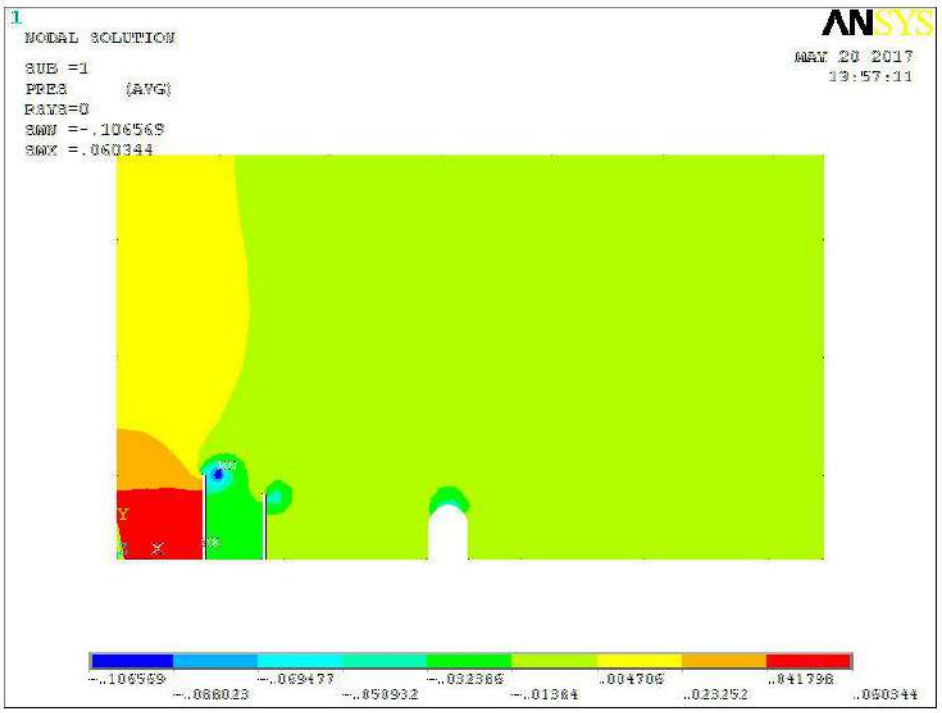


Figure IV.4 : Représentation spatiale de champs de Pression

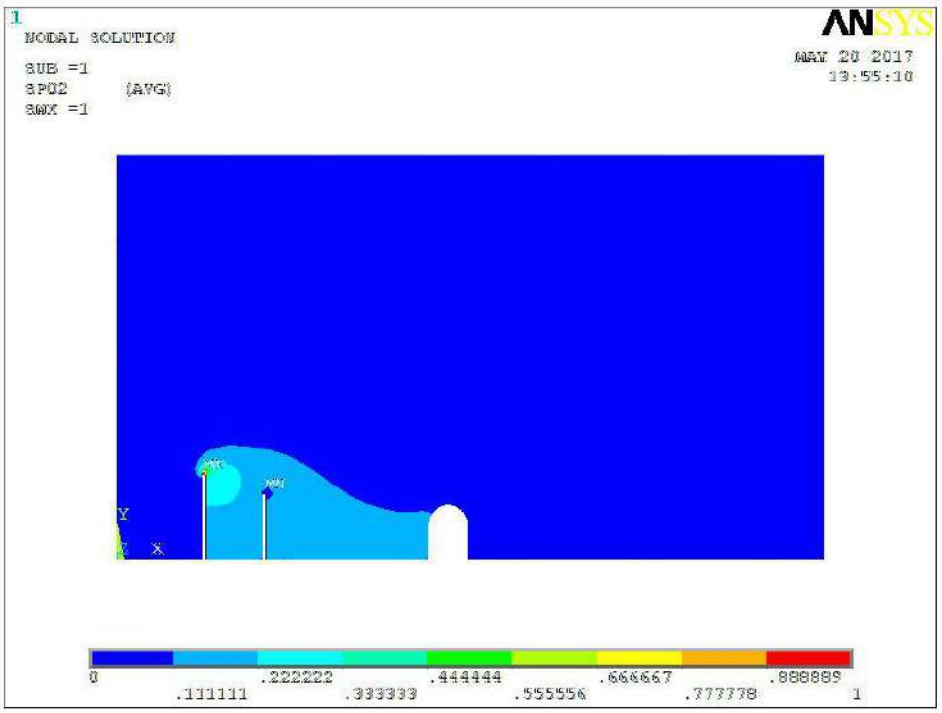


Figure IV.5: Représentation spatiale de champs de dispersion de SO_2

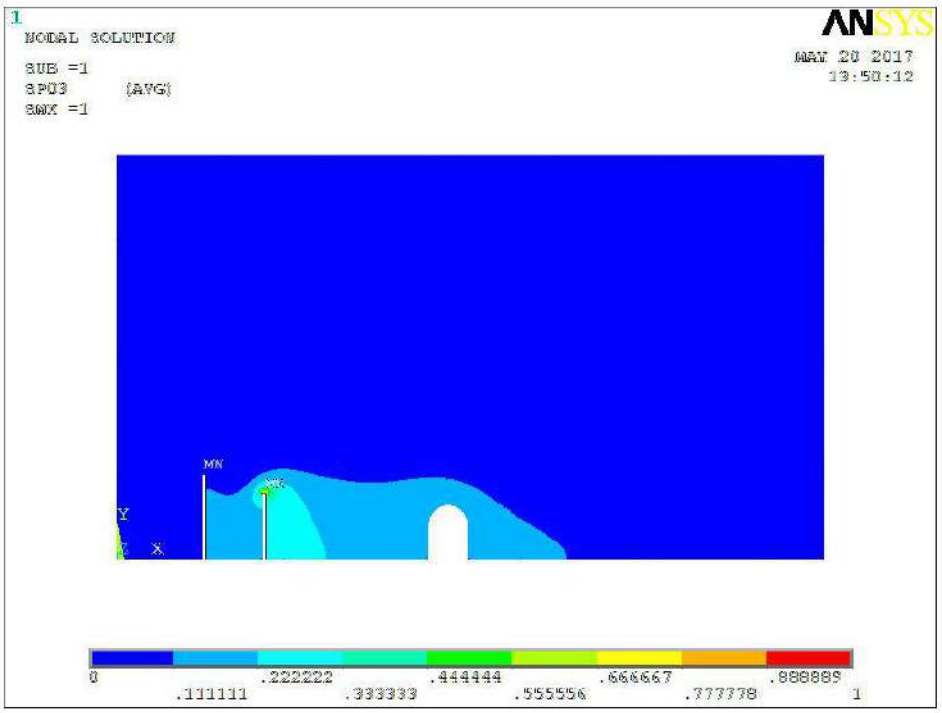


Figure IV.6 : Représentation spatiale de champs de dispersion de CO_2

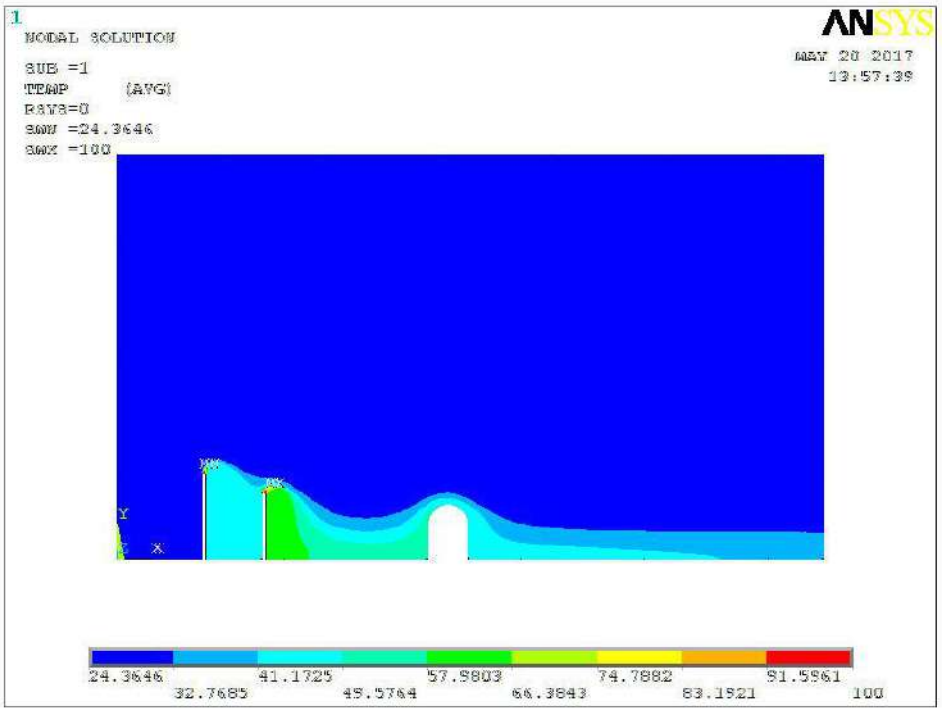


Figure IV.7 : Représentation spatiale de champs de Température

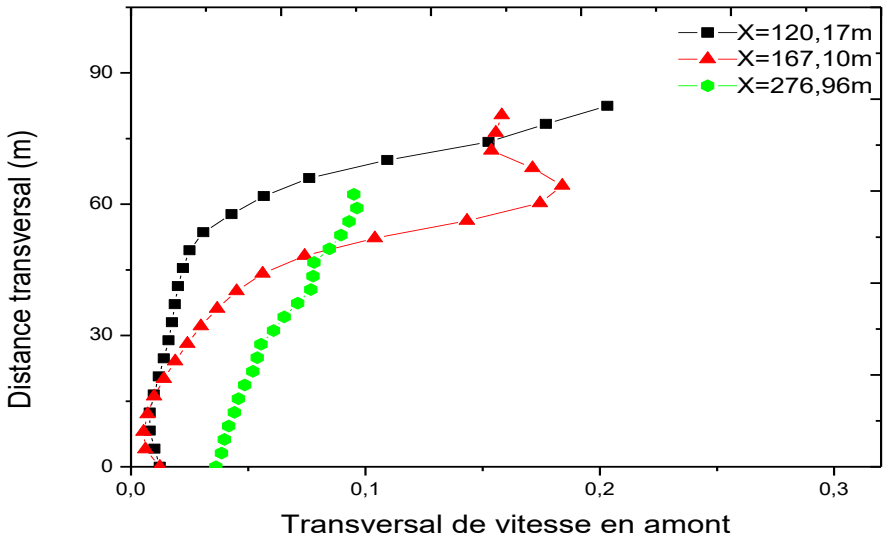


Figure IV.8: profils de vitesse en amont de l'obstacle

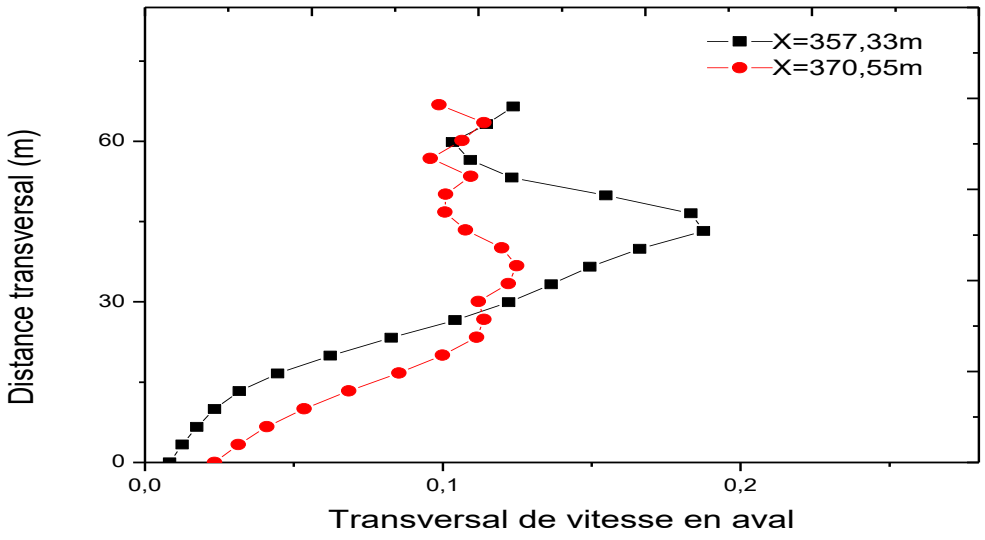


Figure IV.9 : profils de vitesse en aval de l'obstacle

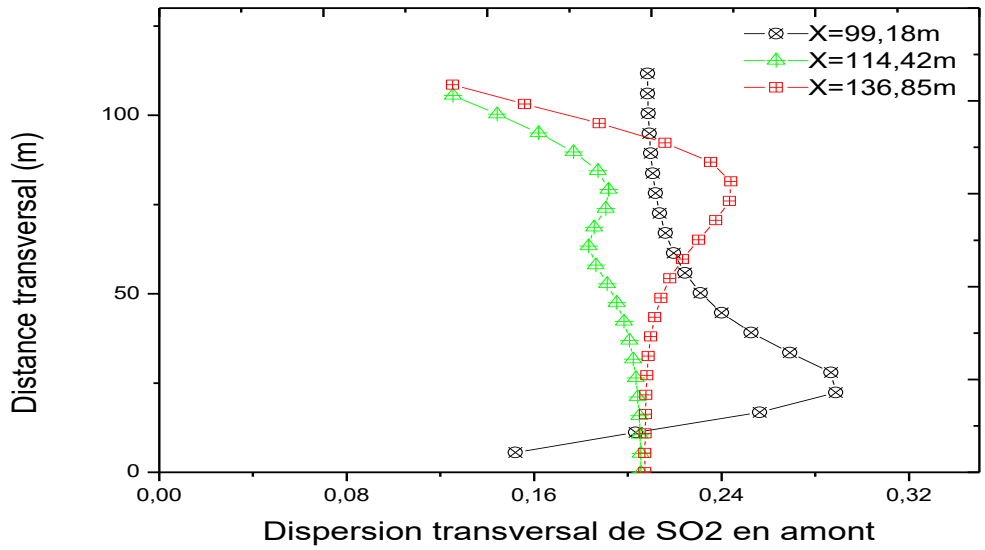


Figure IV.10 : profils de taux de dispersion en amont de cheminée 2

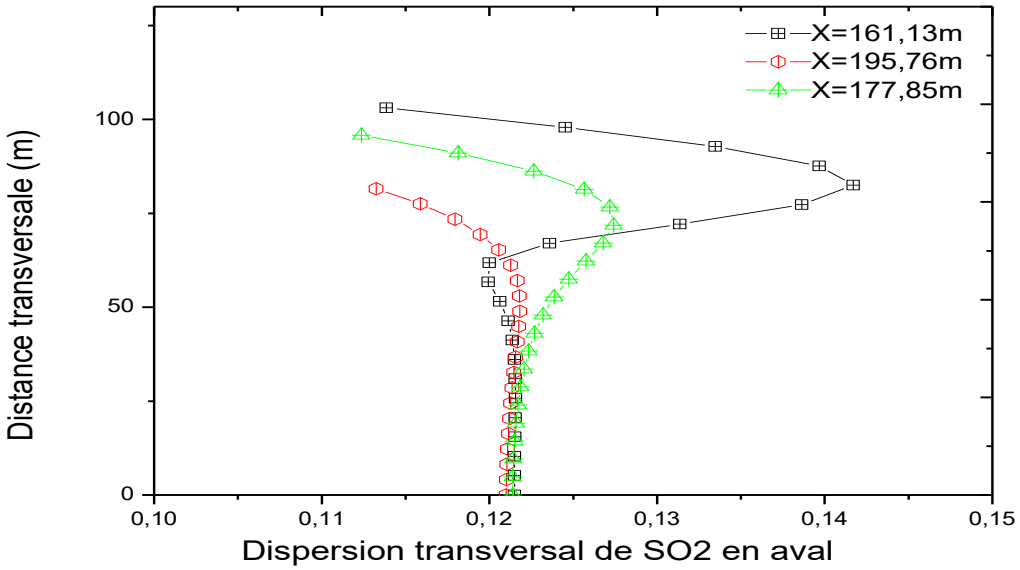


Figure IV.11: profils de taux de dispersion en aval de cheminée 2

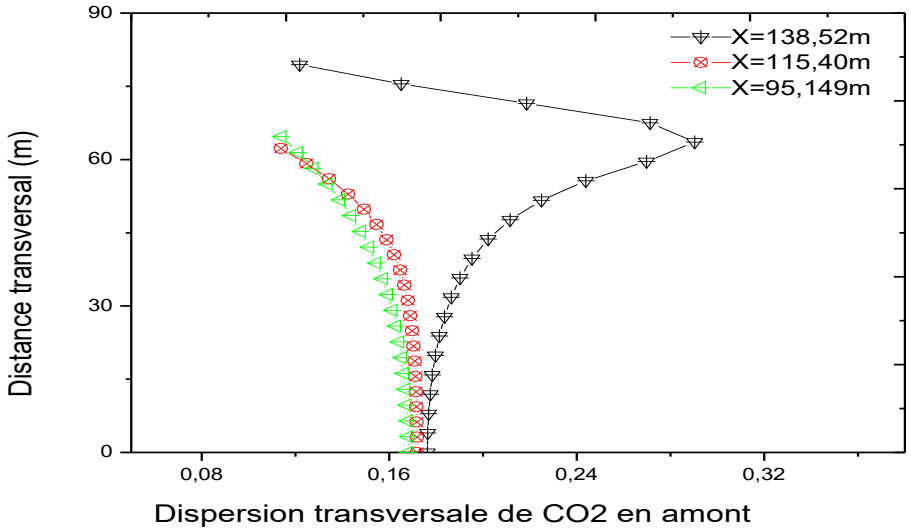


Figure IV.12: profils de taux de dispersion en amont de l'obstacle

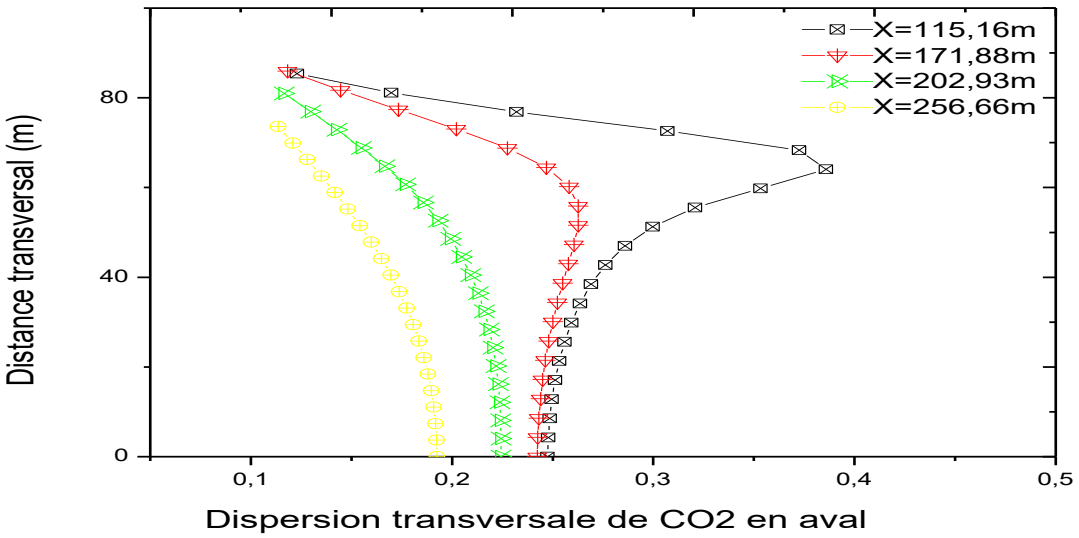


Figure IV.13: profils de taux de dispersion en aval de cheminée 2

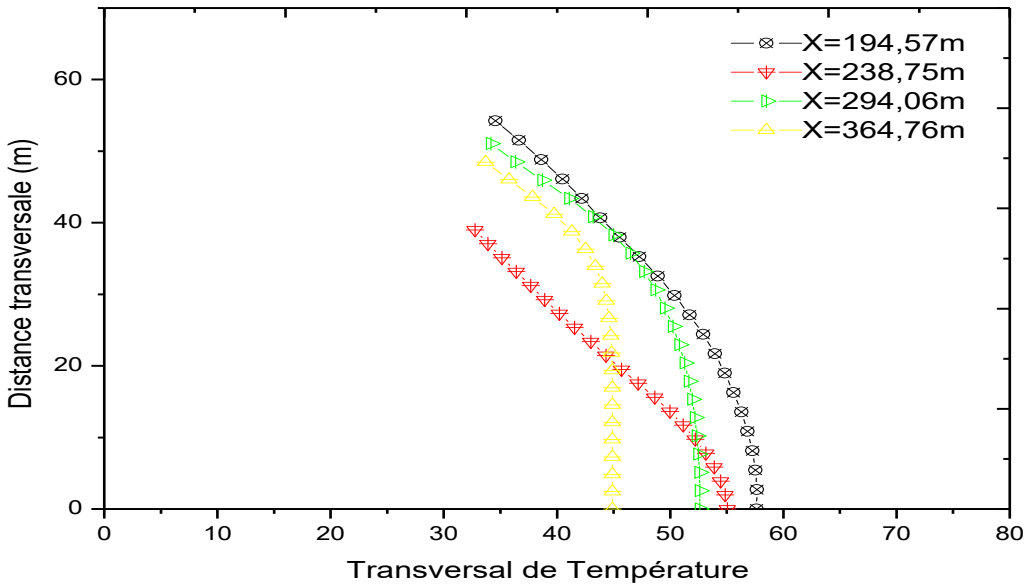


Figure IV.14 : profils de température en aval et en amont l'obstacle

D'après les résultats de Simulation représenté sur les figures dans notre cas, où on voit clairement que :

✓ Quand on ajoute une deuxième cheminée de hauteur h=65m (inférieur à celle de la première cheminée) positionnée entre la première cheminée et le bâtiment (obstacle), le SO_2 n'est plus libre qu'il était dans la simulation précédente.

✓ Lorsque le CO_2 a passé l'obstacle, il a produit une zone de recirculation en raison de la chute ce qui lui est arrivé et il a fait une trajectoire de courant inverse.

✓ Le CO_2 a également empêché la diffusion de SO_2.

IV.2.2 : Etude de l'influence de la hauteur de la deuxième cheminée (cas II)

La prochaine étape de ce travail sera l'étude de l'influence de la hauteur de la deuxième cheminée, on pose que la deuxième cheminée à une hauteur de **90m**

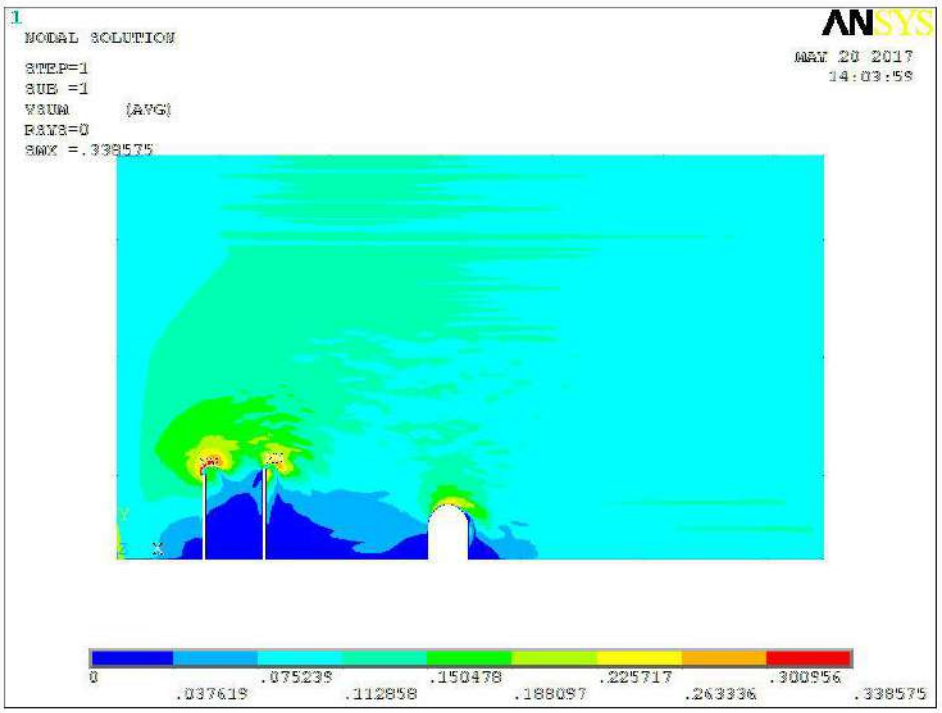


Figure IV.15 : Représentation spatiale de champs de vitesse

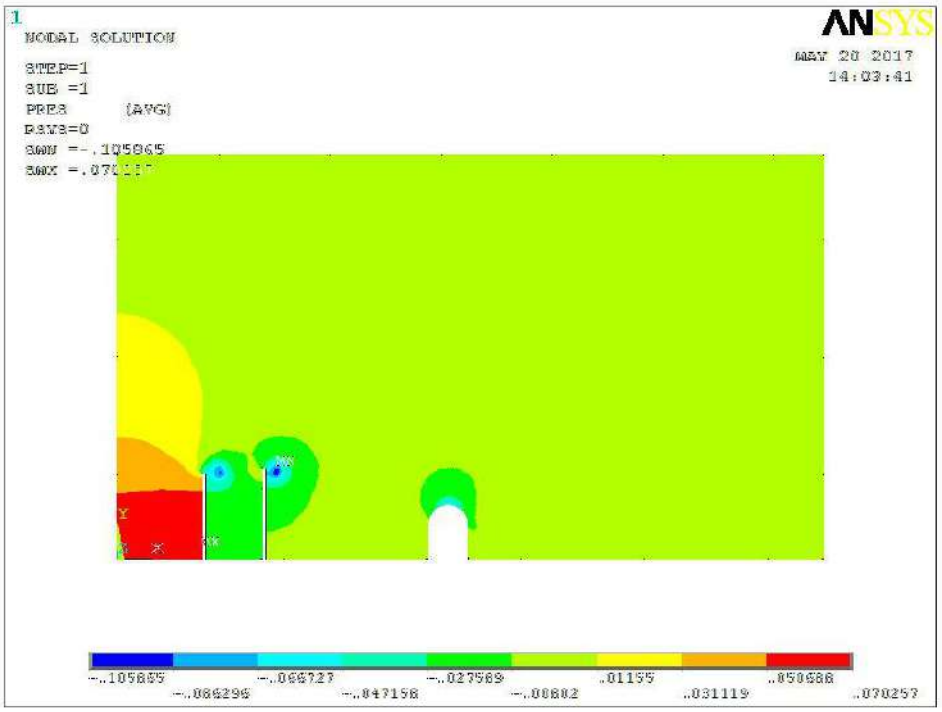


Figure IV.16 : Représentation spatiale de champs de Pression

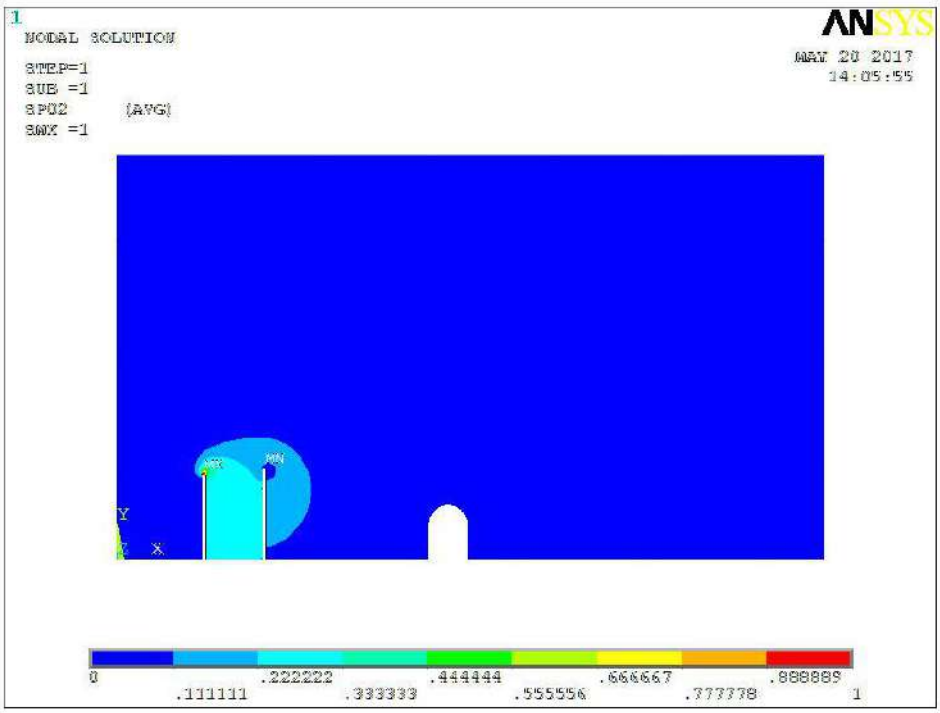


Figure IV.17: Représentation spatiale de champs de dispersion de SO_2

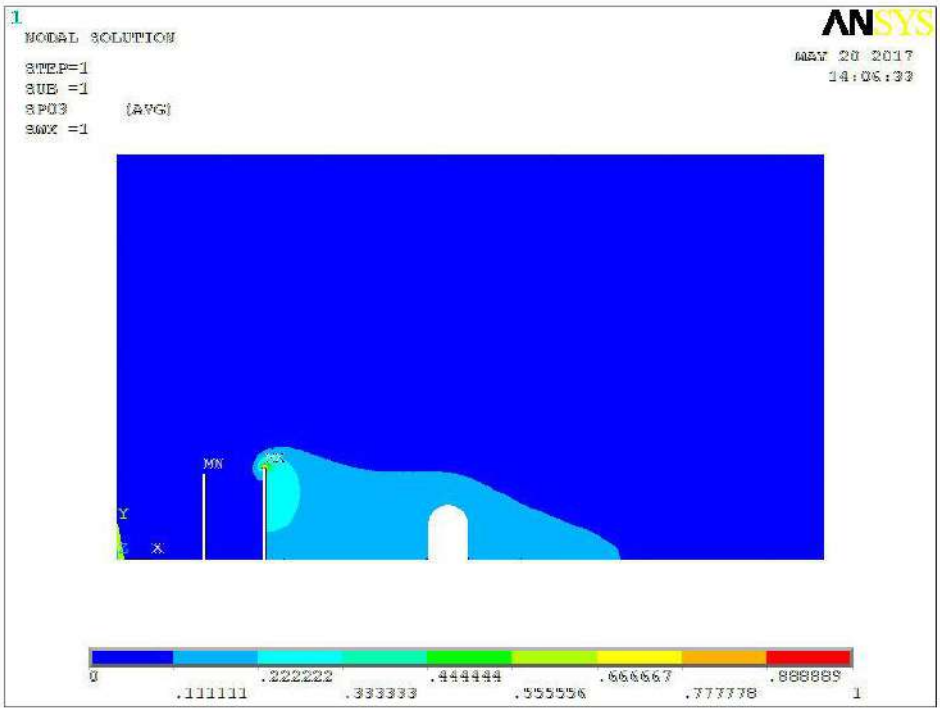


Figure IV.18 : Représentation spatiale de champs de dispersion de CO_2

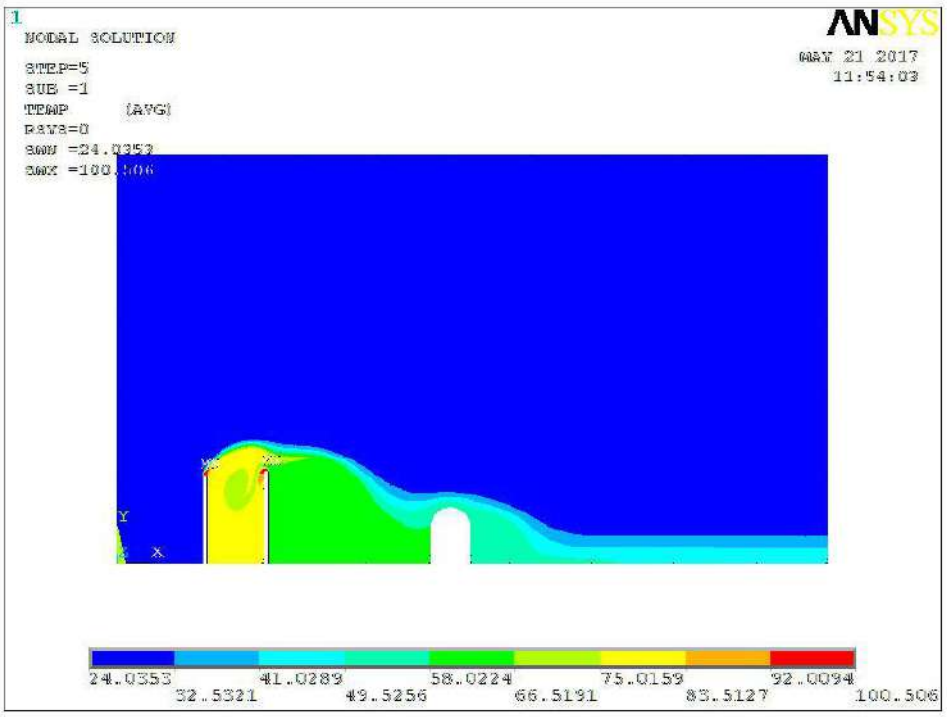


Figure IV.19 : Représentation spatiale de champs de Température

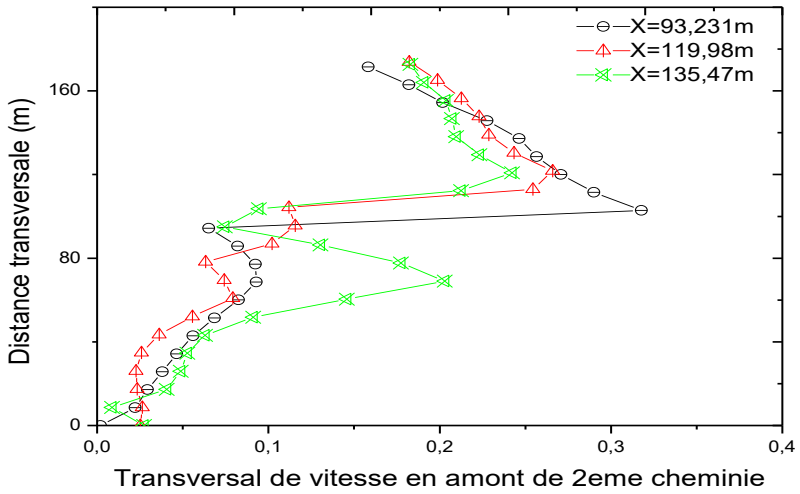


Figure IV.20: profils de vitesse en amont de cheminée 2

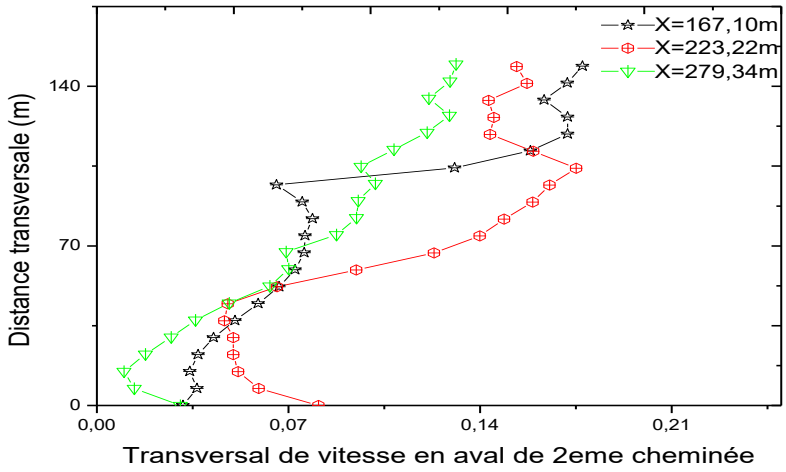


Figure IV.21: profils de vitesse en aval de cheminée 2

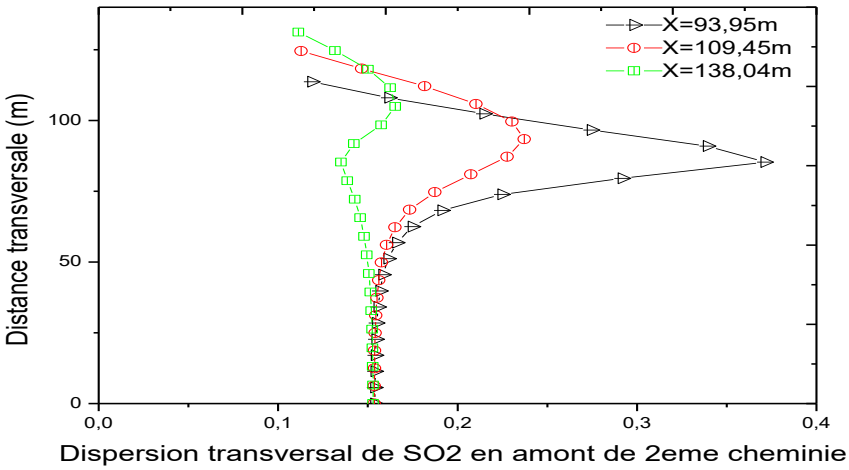


Figure IV.22: profils de taux de dispersion en amont de cheminée 2

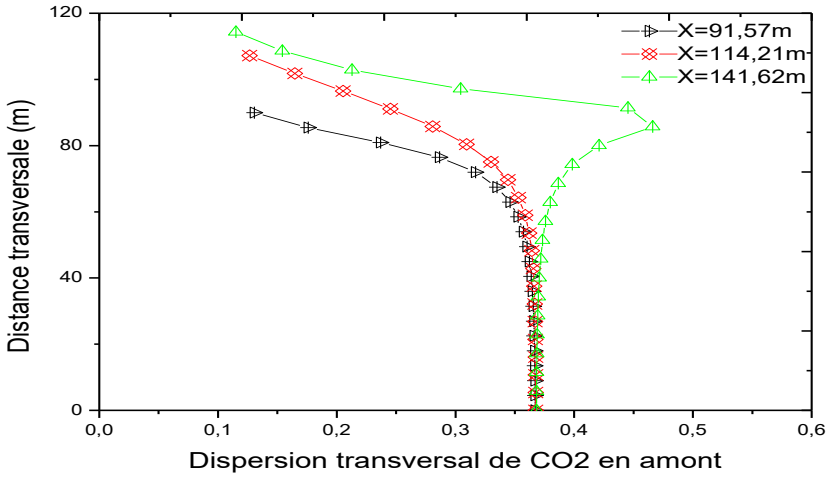


Figure IV.23: profils de taux de dispersion en amont de cheminée 2

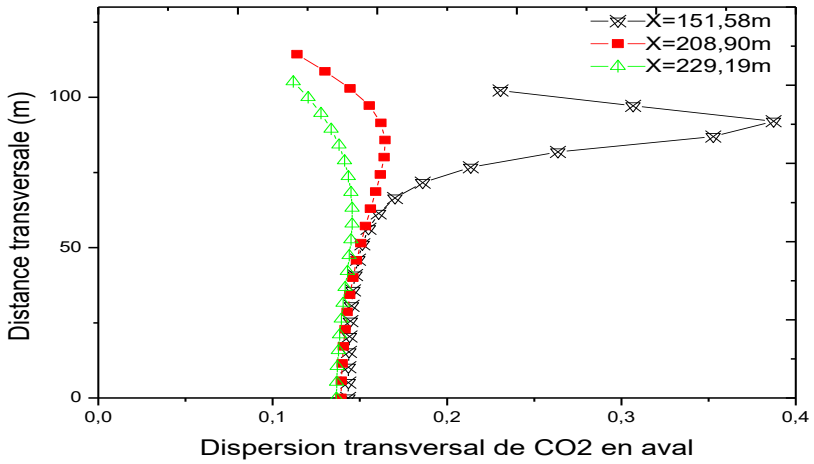


Figure IV.24: profils de taux de dispersion en aval de cheminée 2

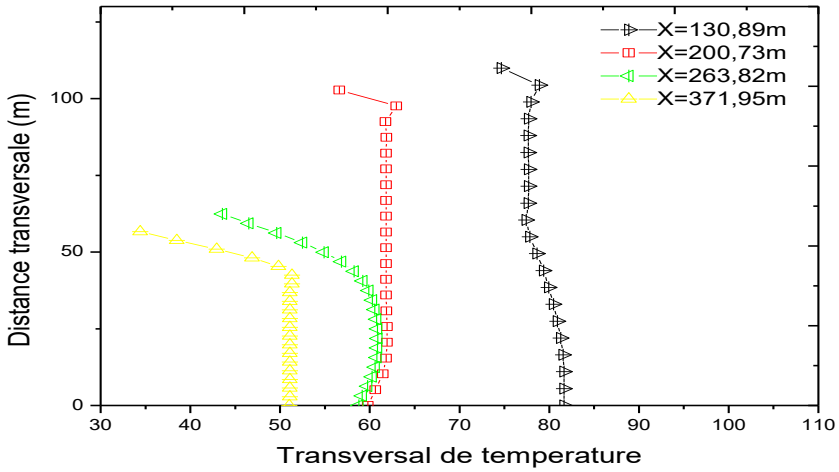


Figure IV.25: profils de température en aval et en amont l'obstacle

Les résultats de nos expériences montrent bien que la hauteur des cheminées influe sur la dispersion dans les cas d'inversion thermique, lorsqu'un polluant est émis par une basse cheminée débouchant sous la couche d'inversion thermique, une accumulation de ce dernier en dessous de celle-ci est observée, par contre si la cheminée débouche au-dessus de celle-ci les polluants diffusent normalement .Ceci est prouvé par Smith et Frankenberg **[20].**

IV.2.3 : Etude de l'influence de la distance entre les deux cheminées :(cas III)

Maintenant on augmente la distance entre les deux cheminés jusqu'à **160m**.

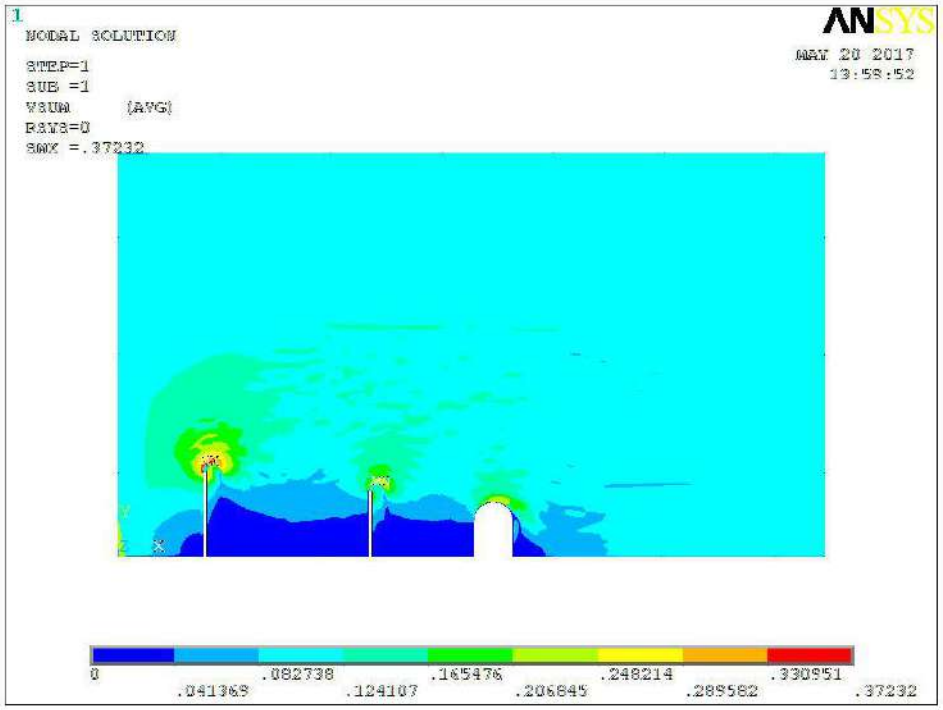


Figure IV.26 : Représentation spatiale de champs de vitesse

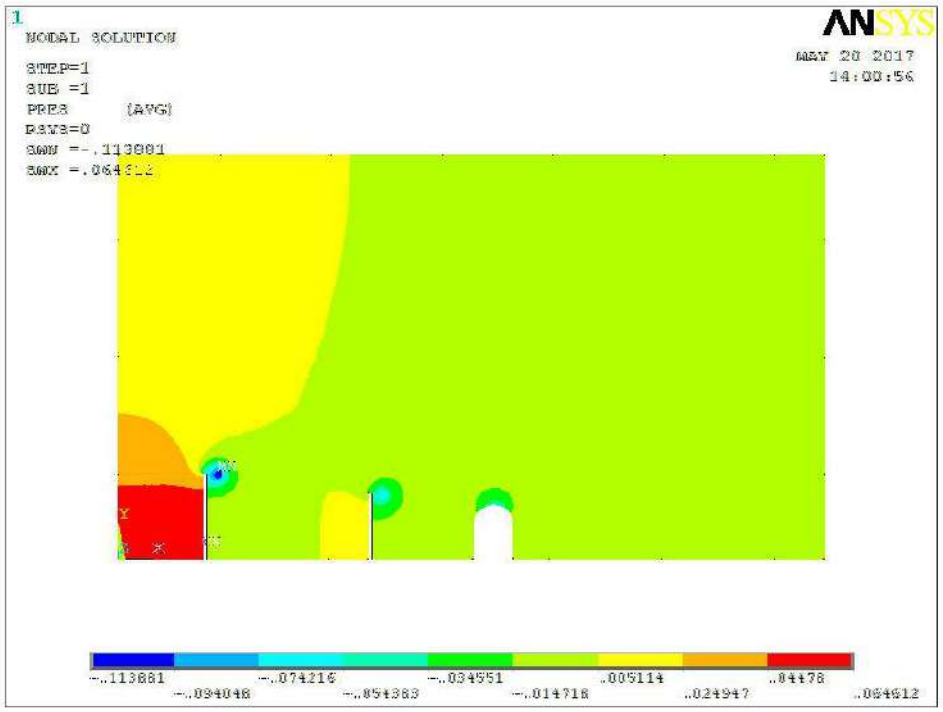


Figure. IV.27: Représentation spatiale de champs de pression

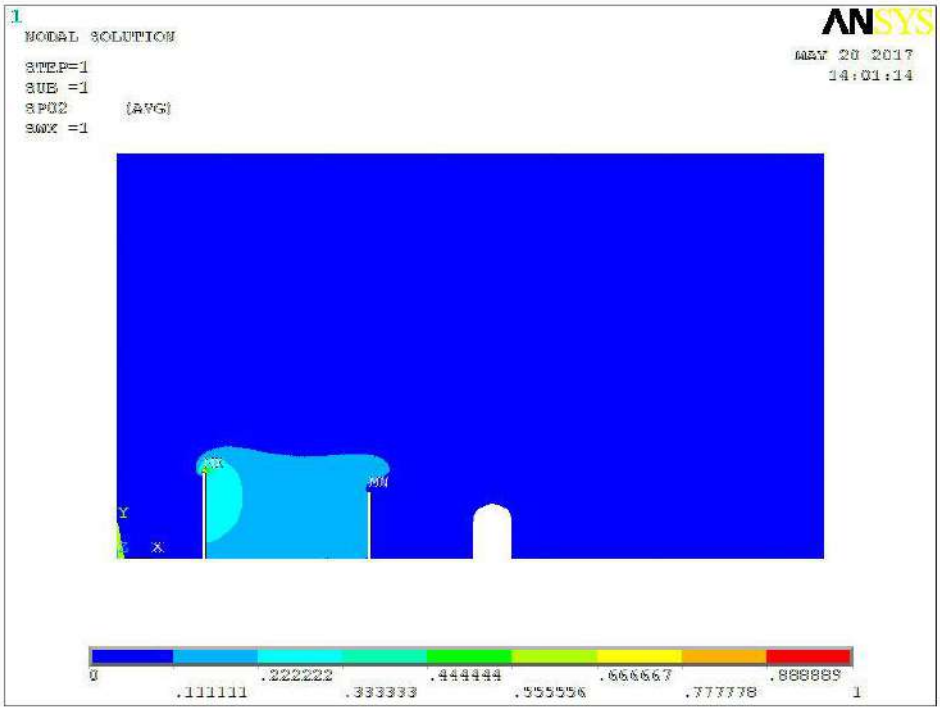


Figure. IV.28: Représentation spatiale de champs de dispersion de SO_2

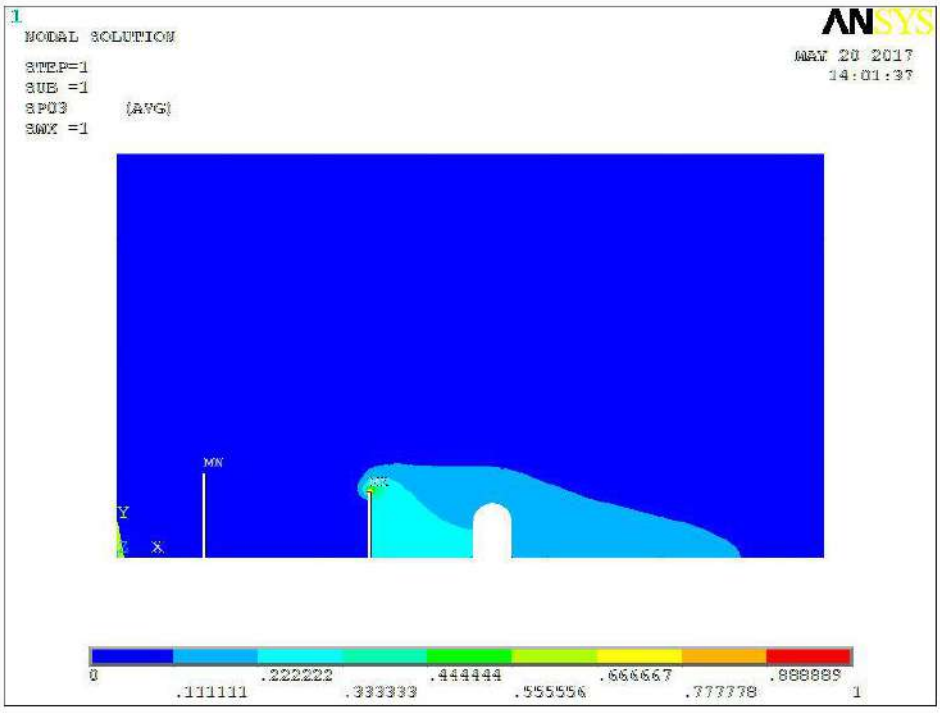


Figure. IV.29 : Représentation spatiale de champs de dispersion de CO_2

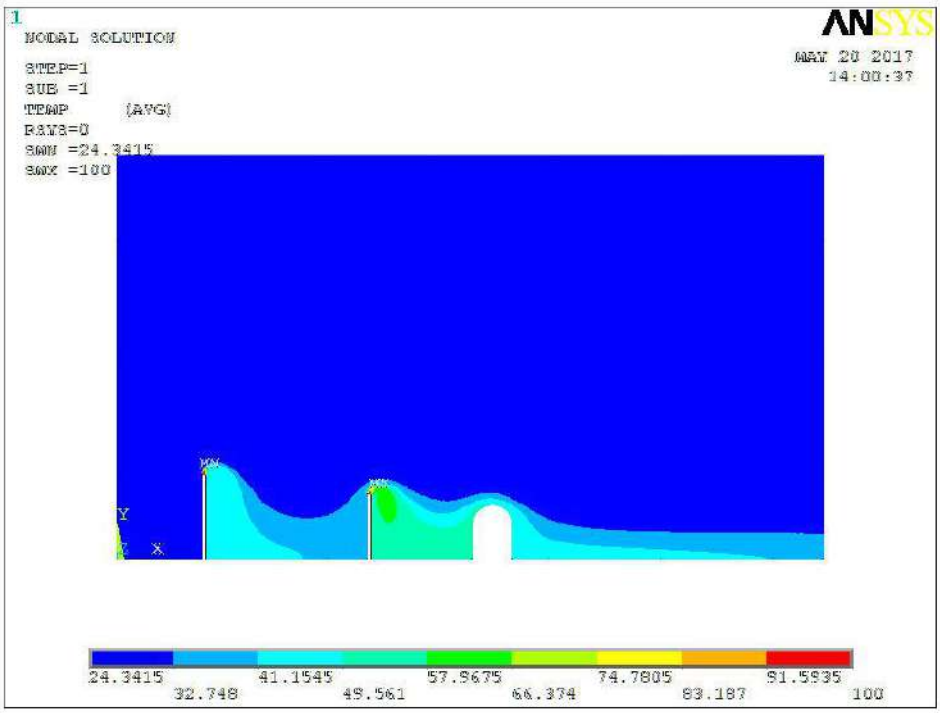


Figure IV.30: Représentation spatiale de champs de température

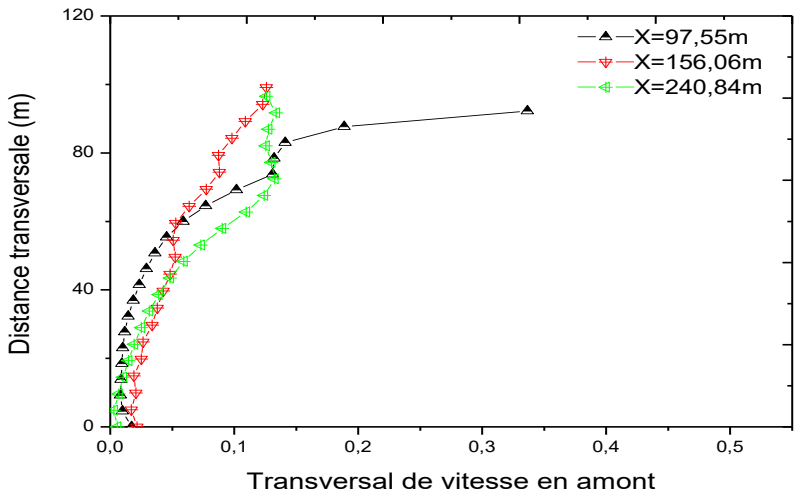


Figure IV.31: profils de vitesse en amont de l'obstacle

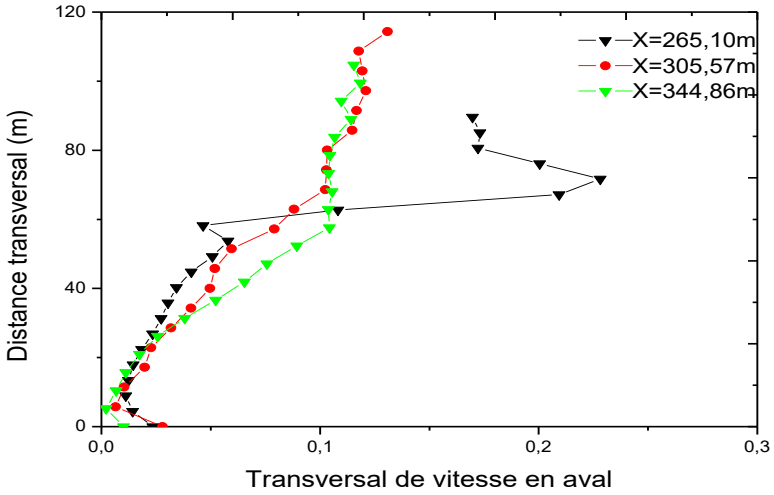


Figure IV.32: profils de vitesse en aval de l'obstacle

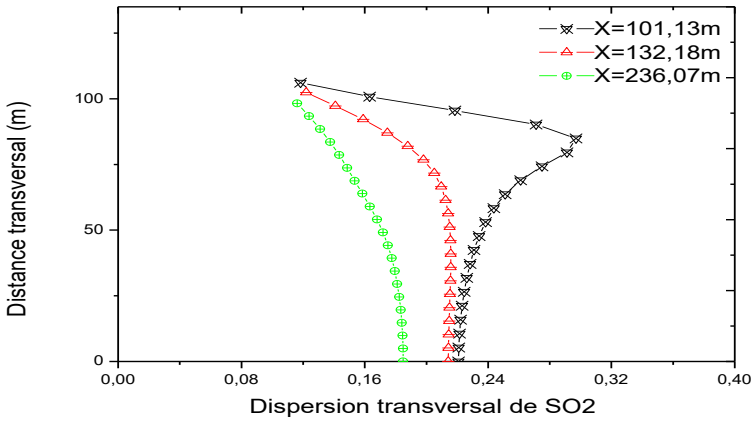


Figure IV.33: profils de taux de dispersion en amont de l'obstacle

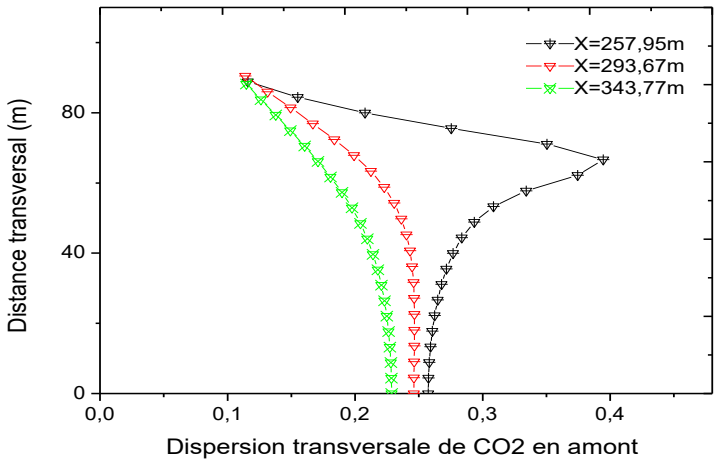


Figure IV.34: profils de taux de dispersion en amont de l'obstacle

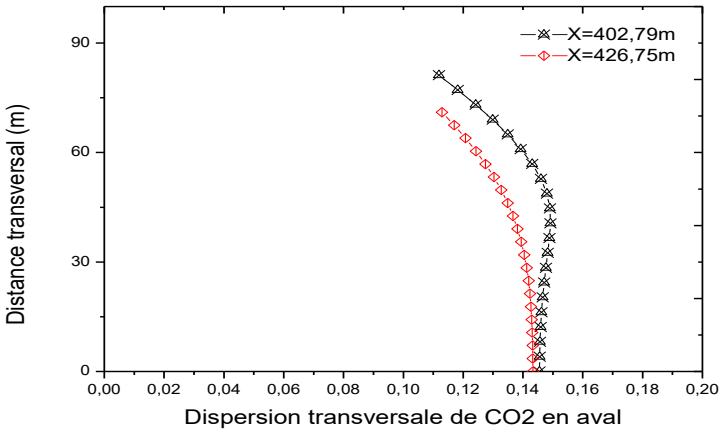


Figure IV.35: profils de taux de dispersion en aval de l'obstacle

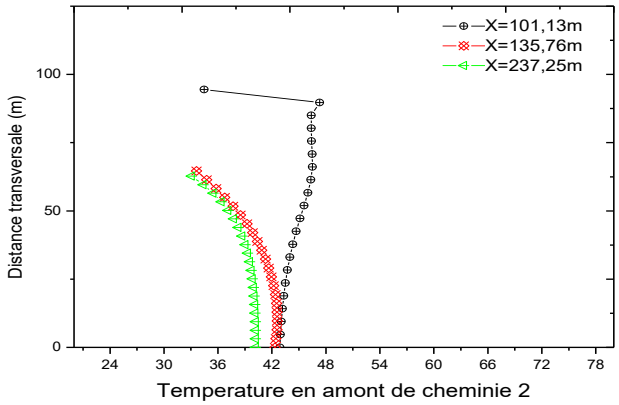


Figure IV.36: profils de température en amont de l'obstacle

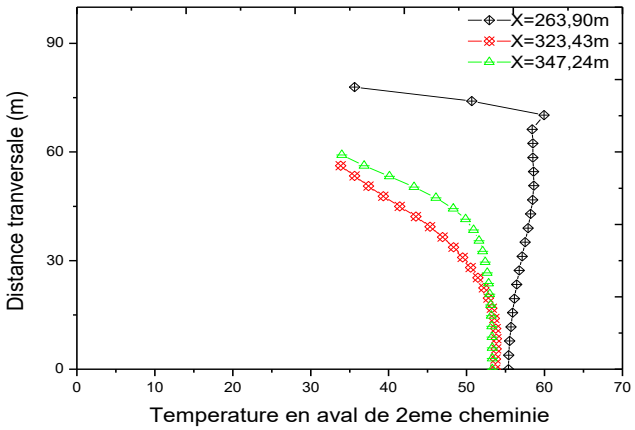


Figure IV.37: profils de température en aval de l'obstacle

Si on augmente la distance entre les deux cheminées, nous notons que le SO_2 ne peut pas surmonter la deuxième cheminée, on remarque une croissance de la zone de recirculation du CO_2.

Notre étude sur la dispersion des polluants était basée sur deux paramètres selon la distance et la hauteur de cheminée ; on constate des résultats similaires pour les trois cas attribués avec un rapport de vitesse de 0.1m/s.

L'optimisation de la hauteur et de la distance d'une cheminée industrielle est cruciale. Elle permet d'identifier les limites d'émissions autorisées par la législation selon la nature. Pour étudier l'influence de la hauteur et de la distance d'une cheminée sur la dispersion des particules rejetées, nous avons expérimenté numériquement une distance entre les deux cheminées de 56m vers 160m et de hauteur de 65m vers 90m.

Au regard des résultats obtenus pour la simulation, on a constaté :

- Que le dépôt des particules se fait dans la zone plus proche de la cheminée pour les cas étudies. 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 zones industrielles.
- Quand on a ajouté le 2ème cheminée avec une hauteur de 65m (cas1),la dispersion de SO_2 de 1ère cheminée était lente et moindre d'intensité vers le bâtiment et la dispersion de CO_2 de 2ème cheminée était d'intensité élevée vu qu'il n y'a pas d'obstacle.
- Quand on a augmenté la hauteur de la 2ème cheminée jusqu'au 90m (cas2), la dispersion de SO_2 n'est pas passé vers le milieu urbain et la dispersion de Co_2 elle a touché le milieu urbain avec une recirculation vers la 1ère cheminée.
- Quand on a rapproché la 2ème cheminée (CO_2) vers le milieu urbain (cas3), la dispersion de CO_2 était plus importante par rapport à SO_2.
- 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. (Figure18)
- Enfin on remarque que plus les cheminées sont proches du milieu urbain plus la chaleur importante de même plus la hauteur de cheminée est élevée plus la chaleur est importante.

Conclusion :

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

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

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

Le modèle permet de représenter l'évolution des champs de concentrations de SO_2 et de CO_2 sous l'influence de leur propriété chimique qui jouent un rôle décisif dans la détermination de la nature de la diffusion du polluant.

Conclusion générale

Pendant des décennies, les installations industrielles occupent une place importante parmi les causes de la pollution de l'air à ce qui est produit à partir de déchets industriels (polluants gazeux).

Dans notre étude nous avons basé sur la modélisation numérique CFD en utilisant le solveur ANSYS par la méthode des éléments finis pour analyser la dispersion du panache des fumées des cheminées.

Notre travail effectué dans ce domaine a concerné la détermination de l'influence de la hauteur de la cheminée et la présence d'obstacle qui situ à certaine distance sur les concentrations des fumées.

L'étude de la dispersion atmosphérique des polluants nécessaires pour les analyses des détails, y compris un grand nombre de phénomènes physiques impliqués dans le processus d'évaluation des risques réels attribuables aux émissions de polluants de ciment. Dans notre étude, bien que nous avons abordé le problème en considérant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, et a souligné l'importance des critères qui mettent l'accent sur la nécessité d'une gestion sérieuse de la pollution atmosphérique dans les zones urbaines

Référence bibliographiques :

[1] Modélisation de la dispersion des polluants dans l'atmosphère sur le littoral dunkerquois. Charles Talbot, Georges Khomenko et Véronique Willart.UMR 8013, ELICO, Université du Littoral Côte d'Opale, 62930 Wimereux, France

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

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

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

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

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

[7] Bruno Sportisse, 2007 « Modélisation et simulation de la pollution atmosphérique »Habilitation à Diriger les Recherches à l'université de Pierre et Marie Curie.

[8] Emmanuel Demaël, 2007 « Modélisation de la dispersion atmosphérique en milieu complexe et incertitudes associées» PhD Thesis, 273 pp.

[9] MATHIEU 2006 GAGNÉ 2006 «étude de sensibilité du climat de la baie d'Hudson à l'effet indirect de la rétroaction déshydratation -effet de serre durant la période

hivernale » mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en science de l'atmosphère à l'université du Québec à Montréal, France

[10] Ung, Anthony, 2005 « une cartographie de la pollution atmosphérique en milieu urbain a l'aide de données multi sources »thèse de doctorale: ED 129 l'université d'ÎLE de France.

[11] Edouard Debry, 2005 « Modélisation et simulation numérique de la dynamique des aérosols atmosphériques » thèse de doctorat, Paristech ENPC.

[12] KADEM Dhaou-El-Djabine 2005 « évaluation et comportement des métaux lourds (cd –cr – cu – ni – pb – zn et mn) dans les sols à vocation agricole et à végétation naturelle soumis à une pollution atmosphérique (El-Hadjar – Annaba – est algérien).influence de la végétation sur la dynamique de ces métaux.» Thèse de doctorat en écologie – Pédologue de 'Université de Constantine.

[13] J Sampic 2005 « Evolution de la qualité de l'air en France » Lyon, CERTU, 2005.- 50 p. France.

[14] Hassane Graïne, 2009 « Prédiction de la concentration d'un polluant dans l'air à proximité d'une route » Colloque international Environnement et transports dans des contextes différents Ghardaïa. Actes, ENP ed. Alger, p. 163-167

[15] KEBSA KHADIDJA. Utilisation du polluant du palmier dattier comme bioindicateur de la pollution atmosphérique dans la région de Ouargla/2009.univ. de Ouargla

[16]. ABDELDJOUAD. Meriem .Impact de la morphologie du bâtiment sur la dispersion des polluants atmosphériques/ ville d'Annaba /2014 /Université Mohamed Khider – Biskra/Faculté des ST /Département : Architecture

[17]. Monika Krysta, Modélisation numérique et assimilation de données de la dispersion de radionucléides en champ proche et à échelle continentale, Val de Marne, coll. « Thèse de doctorat de l'Université Paris XII ».

[18]. ANSYS help

[19] Ladjlet.F /Dhaouin.A. dispersion de polluant industriel au milieu urbain. Thèse de master en génie mécanique/2016/ univ de médéa

[20] M.E., Smith and T.T., Frankenberg, “Improvement of ambient sulfur dioxide concentrations by conversion from low to high stacks”, J. Air Pollut. Control Assoc., 25, 595- 601, 1975.