



**HAL**  
open science

## Contribution à l'étude de dispersion des principaux polluants atmosphériques à Tunis

Tarek Bouebdelli

► **To cite this version:**

Tarek Bouebdelli. Contribution à l'étude de dispersion des principaux polluants atmosphériques à Tunis. Physique Atmosphérique et Océanique [physics.ao-ph]. Université de Tunis el Manar, 2020. Français. NNT: . tel-03353005

**HAL Id: tel-03353005**

**<https://hal.science/tel-03353005>**

Submitted on 23 Sep 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



# **Thèse préparée au sein du Laboratoire des procédés thermiques du CRTEn**

Contribution à l'étude de dispersion des principaux polluants  
atmosphériques à Tunis

Présentée pour obtenir le titre de

**Docteur en Physique**

Par

**Tarek BOUEBDELLI**

Soutenue le 25/09/2020

Devant le jury composé de :

Mourad BOUTERRA	Professeur, FST	Président
Dalila Elhmaidi-Oueslati	Professeur, FST	Rapporteur
Mohamed Ali KNANI	Professeur, IPEIT	Rapporteur
Leila DEHMANI	Professeur, CRTEn	Examineur
AmenAllah GUIZANI	Professeur, CRTEn	Directeur de thèse

*A mes parents*

*Et à tous ceux*

*Qui me sont*

*Chers*

## ***REMERCIEMENTS***

Je voudrais tout d'abord remercier grandement mon directeur de thèse, **Mr. Amenallah GUIZANI**, professeur au centre de recherches et des technologies de l'Energie CRTEn, pour toute son aide. Je suis ravi d'avoir travaillé en sa compagnie car outre son appui scientifique, il a toujours été là pour me soutenir et me conseiller au cours de l'élaboration de cette thèse.

Je tiens à remercier particulièrement **Mr. Karim BOUCLAGHEM**, maître assistant à l'Institut Préparatoire aux Etudes d'Ingénieurs de Kairouan IPEIK, qui m'a co-encadré, pour ses conseils tout au long de ce travail et pour son aide considérable dans la rédaction de mes premiers articles scientifiques qui présentent mes débuts dans le domaine de la recherche.

Je remercie également **Mr. Mourad BOUTERRA**, professeur à la faculté des sciences de Tunis FST, pour l'honneur qu'il me fait d'être le président du jury de ma thèse. Je tiens à l'assurer de ma profonde reconnaissance pour l'intérêt qu'il porte à ce travail.

**Mme Dalila Elhmaidi-Oueslati**, professeur à la Faculté des Sciences de Tunis FST, et **Mr. Mohamed Ali KNANI**, professeur à l'Institut Préparatoire aux Etudes d'Ingénieurs de Tunis IPEIT, m'ont fait l'honneur d'être les rapporteurs de ma thèse. Je les remercie pour le temps consacré à la lecture de cette thèse et pour les remarques et les suggestions judicieuses qu'ils m'ont indiquées.

J'exprime ma gratitude à **Mme Leila DEHMANI**, professeur au centre de recherches et des technologies de l'Energie CRTEn, qui a bien voulu examiner mon travail. Je suis sensible à l'honneur qu'elle m'a fait en participant à mon jury de thèse

Il m'est impossible d'oublier **Mr. Ridha CHOUIKH**, professeur au centre de recherches et des technologies de l'Energie CRTEn, pour son aide précieuse dans la partie numérique de mon travail. Il a toujours fait de son mieux pour m'aider.

Je remercie toutes les personnes avec qui j'ai partagé mes études et notamment ces années de thèse.

Finalement je remercie mes parents pour leur soutien qui m'a été bien utile durant ma thèse.

# Sommaire

Nomenclature.....	11
Introduction générale.....	13
Chapitre I : Généralités et étude bibliographique.....	15
1. Introduction.....	15
2. L'atmosphère.....	15
3. Définition de la pollution atmosphérique .....	16
4. Les sources de la pollution atmosphérique.....	17
5. Les principaux polluants.....	17
a) Monoxyde de carbone (CO) .....	18
b) Oxydes d'azote NO <sub>x</sub> .....	18
c) Les particules en suspension .....	19
d) Le dioxyde de soufre .....	20
e) Les composés organiques volatils COV .....	21
f) L'ozone .....	22
6. Facteurs intervenant dans le transport et la diffusion des polluants .....	23
a) Facteurs météorologiques.....	23
b) Facteurs physiques .....	24
7. Le dépôt des polluants .....	24
8. Les unités de mesures .....	24
9. Normes .....	25
a) Normes internationales.....	25
b) Cas de la Tunisie .....	26
10. Revus bibliographiques .....	28
11. Conclusion .....	37
Chapitre II : Méthodes et techniques de mesures .....	38
1. Introduction.....	38
2. Les méthodes et les techniques de mesures les plus utilisées .....	38
a) Les méthodes statiques.....	38
i. Echantillonnage en utilisant les végétaux .....	38
ii. Les prélèvements .....	39
b) Les méthodes dynamiques.....	42
c) Les méthodes analytiques.....	44
i. La chromatographie .....	44

ii.	La luminescence .....	44
iii.	Analyse par variation de conductivité .....	45
3.	La méthode DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) .....	45
a)	La spectroscopie d'absorption .....	45
i.	Historique .....	45
ii.	Principe .....	46
b)	La spectroscopie dans le domaine UV-Visible .....	48
c)	Spectromètre d'absorption moléculaire .....	48
i.	Sources .....	49
ii.	Monochromateur .....	50
iii.	Echantillons .....	50
iv.	Détecteurs .....	50
d)	Principe de la méthode DOAS .....	51
4.	Etude expérimentale .....	55
a)	Le dispositif .....	55
b)	Résultats expérimentaux et discussion .....	56
5.	Conclusion .....	62
Chapitre III : Outils mathématiques et modélisation numérique .....		63
1.	Introduction .....	63
2.	Les équations physiques utilisées dans la modélisation numérique .....	63
a)	Présentation du problème et hypothèses : .....	63
b)	L'équation de conservation de la masse .....	63
c)	L'équation de conservation de la quantité de mouvement .....	64
d)	L'équation de conservation de l'énergie .....	64
e)	L'équation de conservation des espèces .....	65
f)	Equation générale .....	65
3.	La discrétisation des équations différentielles .....	65
a)	Les méthodes de discrétisation .....	66
i.	La méthode des différences finies .....	67
ii.	Méthode des volumes finis .....	68
b)	Conditions aux limites .....	69
4.	Modélisation de la turbulence .....	70
a)	Moyenne de Favre .....	70
b)	Moyenne de l'équation de conservation de la masse .....	70

c)	Moyenne de l'équation de conservation de la quantité de mouvement .....	71
d)	Moyenne de l'équation de conservation de l'énergie .....	71
e)	Moyenne de l'équation de conservation des espèces .....	71
5.	Fermeture du système d'équations .....	72
a)	Classification des modèles de turbulence de fermeture en un point .....	72
i.	Modèles du premier ordre .....	73
ii.	Modèles du second ordre .....	73
b)	Les modèles de turbulence utilisés dans la modélisation numérique .....	74
6.	Résolution numérique .....	77
7.	Conclusion .....	81
Chapitre IV : Interprétation des résultats numériques .....		82
1.	Introduction.....	82
2.	Le comportement d'un jet dans l'atmosphère.....	82
a)	Les différentes étapes de dispersion des polluants .....	82
b)	L'effet de la turbulence sur la dispersion atmosphérique .....	83
c)	L'effet de la stabilité atmosphérique .....	84
3.	Interprétation des résultats .....	86
a)	Aspect général de la dispersion du panache .....	86
b)	Etude de la dynamique du jet .....	88
c)	Etude de la variation thermique du jet .....	96
d)	Etude de la variation massique du jet .....	97
4.	Conclusion .....	102
Conclusion générale et perspectives.....		103
Bibliographie .....		105

## Liste des figures

Figure 1 : Les différentes couches de l'atmosphère.....	16
Figure 2 : Principe de base des analyseurs automatiques.....	43
Figure 3 : le spectromètre d'absorption moléculaire.....	49
Figure 4 : Schéma d'un photomultiplicateur.....	51
Figure 5 : Spectre analysé par la méthode DOAS.....	52
Figure 6 : Spectre typique atmosphérique mesuré en DOAS et spectres de référence des gaz qui contribuent au spectre atmosphérique.....	54
Figure 7 : Schéma des composants d'un DOAS.....	54
Figure 8 : La variation du Benzène et du Toluène suivant les différentes saisons au centre ville de Tunis.....	57
Figure 9 : (a) Les mesures de la période (04-10/12/2010), (b) les mesures de la période (18-22/08/2010) des concentrations du Benzène (ligne continue) et du Toluène (ligne interrompue).....	57
Figure 10 : La variation de la concentration du Benzène (ligne continue) et du Toluène (ligne interrompue) le 06/12/2010.....	58
Figure 11 : (a) Les mesures de la période (04-10/12/2010), (b) les mesures de la période (17-22/08/2010) des concentrations du NO <sub>2</sub> (ligne continue) et du SO <sub>2</sub> (ligne interrompue).....	58
Figure 12 : L'évolution des concentrations du SO <sub>2</sub> et du NO <sub>2</sub> durant les journées du 05/12/2010 (a), et 20/08/2010 (b).....	59
Figure 13 : La variation des concentrations du O <sub>3</sub> et du Ox (NO <sub>2</sub> + O <sub>3</sub> ) durant les journées du 05/12/2010 (a), et 20/08/2010 (b).....	60
Figure 14 : (a) Les mesures de la période (04-10/12/2010), (b) les mesures de la période (17-22/08/2010) des concentrations du O <sub>3</sub> (ligne continue) et du NO <sub>2</sub> (ligne interrompue).....	61
Figure 15 : Schéma du volume de contrôle utilisé dans la méthode des volumes finis.....	68
Figure 16 : Le domaine d'étude.....	77
Figure 17 : Les dimensions du domaine d'étude.....	77
Figure 18 : Vue générale sur le maillage utilisé.....	78
Figure 19 : Vue sur le maillage utilisé aux alentours de la cheminée.....	79
Figure 20 : La surface d'entrée de l'air ambiant.....	80
Figure 21 : La surface de sortie de la cheminée.....	80
Figure 22 : Les surfaces de sorties du domaine.....	80
Figure 23 : Les différentes étapes de dispersion de polluants.....	83
Figure 24 : Profil idéalisé de température et évolution de la stabilité de la CLA au cours d'une journée.....	84
Figure 25 : L'influence de la stabilité atmosphérique sur la dispersion d'un panache pour un cycle de 24h.....	85
Figure 26 : L'apparition d'une sur-hauteur au niveau de la sortie de la cheminée.....	87
Figure 27 : La dispersion du panache dans l'atmosphère.....	87
Figure 28 : Le début du dépôt des polluants.....	87
Figure 29 : l'apparition d'une structure symétrique du panache à la sortie de la cheminée....	88
Figure 30 : Vue du dessus du panache à la sortie de la cheminée.....	88

Figure 31 : La variation de la vitesse verticale suivant la droite d'intersection des deux plans $Z=60\text{m}$ et $Y=0\text{m}$ .....	89
Figure 32 : La variation de la vitesse verticale suivant la droite d'intersection des deux plans $Z=180\text{m}$ et $Y=0\text{m}$ .....	89
Figure 33 : La variation de la vitesse verticale suivant la droite d'intersection des deux plans $Z=60\text{m}$ et $Y=2\text{m}$ .....	90
Figure 34 : La variation de la vitesse verticale suivant la droite d'intersection des deux plans $Z=60\text{m}$ et $Y=-2\text{m}$ .....	90
Figure 35 : La variation de la vitesse verticale suivant la droite d'intersection des deux plans $Z=60\text{m}$ et $Y=10\text{m}$ .....	90
Figure 36 : La variation de la vitesse verticale suivant la droite d'intersection des deux plans $Z=60\text{m}$ et $Y=-10\text{m}$ .....	91
Figure 37 : La variation de la vitesse verticale suivant la droite d'intersection des deux plans $Z=70\text{m}$ et $Y=8\text{m}$ .....	91
Figure 38 : La variation de la vitesse verticale suivant la droite d'intersection des deux plans $Z=70\text{m}$ et $Y=-8\text{m}$ .....	91
Figure 39 : La variation de la vitesse horizontale suivant la droite d'intersection des deux plans $Z=60\text{m}$ et $Y=0\text{m}$ .....	92
Figure 40 : La variation de la vitesse latérale suivant la droite d'intersection des deux plans $X=250\text{m}$ et $Z=70\text{m}$ .....	92
Figure 41 : La cartographie de la variation de la vitesse horizontale suivant le plan $Y=0\text{m}$ ...	93
Figure 42 : La cartographie de la variation de la vitesse horizontale suivant le plan $Z=70\text{m}$ ..	94
Figure 43 : La cartographie de la variation de la vitesse latérale suivant le plan $Z=70\text{m}$ .....	94
Figure 44 : La cartographie de la variation de la pression au niveau de la paroi de la cheminée (vue à partir de l'entrée du domaine) .....	95
Figure 45 : La cartographie de la variation de la pression au niveau de la paroi de la cheminée (vue à partir de la sortie du domaine).....	95
Figure 46 : La cartographie de la variation de la température suivant le plan $Z=70\text{m}$ (vue de dessus) .....	96
Figure 47 : La cartographie de la variation de la température suivant le plan de symétrie de la cheminée ( $Y=0\text{m}$ ).....	97
Figure 48 : La cartographie de la variation de la concentration du $\text{SO}_2$ suivant le plan de symétrie de la cheminée ( $Y=0\text{m}$ ) .....	98
Figure 49 : La cartographie de la variation de la concentration du $\text{NO}_2$ suivant le plan de symétrie de la cheminée ( $Y=0\text{m}$ ) .....	98
Figure 50 : La cartographie de la variation de la concentration du $\text{CO}_2$ suivant le plan de symétrie de la cheminée ( $Y=0\text{m}$ ) .....	99
Figure 51 : La cartographie de la variation de la concentration du $\text{CO}$ suivant le plan de symétrie de la cheminée ( $Y=0\text{m}$ ) .....	99
Figure 52 : La cartographie de la variation de la concentration du $\text{SO}_2$ suivant le plan $Z=70\text{m}$ (vue de dessus) .....	99
Figure 53 : La cartographie de la variation de la concentration du $\text{NO}_2$ suivant le plan $Z=70\text{m}$ (vue de dessus) .....	100

Figure 54 : La cartographie de la variation de la concentration du CO <sub>2</sub> suivant le plan Z=70m (vue de dessus) .....	100
Figure 55 : La cartographie de la variation de la concentration du CO suivant le plan Z=70m (vue de dessus) .....	100
Figure 56 : La variation de la concentration du SO <sub>2</sub> suivant la ligne d'intersection des deux plans Y=0m et Z=0m .....	101
Figure 57 : La cartographie de la variation de la concentration du SO <sub>2</sub> suivant le plan Y=0m (zoom sur le panache) .....	101

## ***Liste des tableaux***

Tableau 1 : Valeurs recommandées de la concentration de certains polluants pour le cas de la France	25
Tableau 2 : Valeurs recommandées par l'OMS pour quelques polluants atmosphériques .....	25
Tableau 3 : Norme tunisienne NT10604 de l'air ambiant .....	28
Tableau 4 : les différents types de luminescence .....	45
Tableau 5 : Limites de détection par la méthode DOAS de quelques gaz pour un trajet optique de 5 km .....	55
Tableau 6 : Les valeurs des constantes utilisées par défaut dans le modèle k-ε.....	76
Tableau 7 : L'effet des tourbillons sur la forme du panache .....	83

## Nomenclature

$A_\lambda$	Absorbance à la longueur d'onde $\lambda$
ANPE	Agence Nationale de Protection de l'Environnement
ANSYS	Analysis System
$C_p$	Capacité calorifique du fluide
C	Concentration molaire
CO	Monoxyde de Carbone
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de Carbone
COV	Composés Organiques Volatils
CFD	Computational Fluid Dynamics
D	Coefficient de diffusion moléculaire
DOAS	Differential Optical Absorption Spectroscopy
$f_i$	Forces volumiques
$G_b$	Terme de production dû à la flottabilité
$G_k$	Terme de production de k
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
H <sub>2</sub> S	Sulfure d'Hydrogène
HC	Hydrocarbures
I	Intensité de la lumière
k	Energie cinétique de turbulence
$k_s^\lambda$	Constante pour une longueur d'onde et un milieu donnés
LIDAR	Light detection and ranging
NO	Oxyde Nitrique
NO <sub>2</sub>	Dioxyde d'Azote
NO <sub>x</sub>	Oxydes d'Azote
O <sub>3</sub>	Ozone
OMS	Organisation Mondiale de Santé
PS	Particules en suspension
ppm	Partie Par Million
ppb	Partie Par Milliard
p	Pression statique
$P_k$	Production mécanique par effet de cisaillement
SO <sub>2</sub>	Dioxyde de Soufre
$S_{ij}$	Tenseur des vitesses de déformation
u	Vitesse du fluide
UV	Ultra-Violet

## Symboles grecs

$\lambda$	Longueur d'onde
$\beta$	Coefficient d'expansion volumique
$\sigma$	Section efficace
$\varepsilon$	Dissipation de l'énergie cinétique de turbulence
$\varepsilon_s^\lambda$	Coefficient d'absorption à la longueur d'onde $\lambda$ du milieu S
$\rho$	Masse volumique du fluide
$\tau_{ij}$	Contrainte visqueuse
$\mu$	Viscosité dynamique du fluide
$\phi$	Variable d'étude
$\Gamma_\phi$	Coefficient de diffusion de $\phi$
$\mu_t$	Viscosité turbulente
$\delta_{ij}$	Symbole de Kronecker

## Indices

$i,j,k$	Axes du repère x,y et z
---------	-------------------------

## Introduction générale

La pollution et les changements climatiques peuvent gravement affecter la vie de tous les êtres vivants sur notre planète. A l'issue de cette situation, plusieurs recherches ont été menées dont les résultats se sont avérés inquiétants. C'est pour cela que ce sujet constitue aujourd'hui une préoccupation mondiale et nécessite une prise de conscience collective.

Pour limiter les émissions des polluants dans l'atmosphère, des mesures réglementaires de plus en plus sévères ont été prises à l'échelle mondiale. La Tunisie s'est intéressée à la surveillance de la qualité de l'air en créant un réseau composé du Centre International des Technologies de l'Environnement de Tunis CITET et l'Agence Nationale de Protection de l'Environnement ANPE. Les premières actions prises étaient l'installation des outils de mesures sophistiqués permettant le contrôle de la qualité de l'air. Ainsi, nous trouvons aujourd'hui en Tunisie des stations fixes, des laboratoires mobiles et un système de télédétection Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS).

Le sujet qui fait l'objet de notre recherche s'inscrit dans ce cadre et constitue une contribution à l'étude de la qualité de l'air en Tunisie.

Notre étude sera divisée en deux parties contenant chacune deux chapitres. La première partie portera, essentiellement, sur une étude expérimentale montrant la variation des valeurs de concentrations de différents polluants au centre ville de la Tunisie. Ce travail a été fait en collaboration avec l'Association Nationale de Protection de l'Environnement ANPE. La deuxième partie portera sur une étude physique basée sur une modélisation numérique avec laquelle nous essayerons d'analyser le comportement global d'un panache éjecté à partir d'une cheminée.

Pour ce faire, nous commencerons nos travaux de recherche avec une étude bibliographique qui nous permettra d'avoir une idée générale sur l'état de l'art actuel et de nous familiariser avec le thème de notre étude. Ces différents travaux de recherche qui porteront sur la pollution atmosphérique nous conduiront à définir les termes les plus importants en rapport avec notre sujet et à présenter les principaux polluants ainsi que les facteurs essentiels à leur dispersion. Nous enchaînerons, ensuite, par évoquer les différentes méthodes et techniques utilisées dans la prise des mesures de concentration des polluants dans l'atmosphère. Puis, nous effectuerons une description plus détaillée du dispositif et de la méthode utilisés lors de la campagne de

mesures à savoir la méthode DOAS. Nous concluons cette première partie par l'analyse et l'interprétation des mesures collectées.

La deuxième partie qui portera sur l'étude physique de la dispersion de polluants sera entamée par l'étude du comportement global d'un jet de polluants dans l'atmosphère. Ensuite, nous citerons les différents outils mathématiques et numériques à utiliser. Ces derniers, nous permettront d'étudier, à travers une modélisation numérique, le cas d'un panache émis à partir d'une cheminée. Cette deuxième partie sera conclue par l'analyse et l'interprétation des résultats trouvés.

# Chapitre I : Généralités et étude bibliographique

## 1. Introduction

Avant de commencer nos travaux de recherche, il est important d'avoir une idée générale sur le sujet à étudier et c'est le but principal de notre premier chapitre. Dans cette partie, nous commencerons par définir les termes les plus importants en rapport avec le sujet à traiter. Ensuite, nous présenterons les principaux polluants ainsi que les facteurs essentiels à leur dispersion. Nous enchaînerons par citer les principales normes nationales et internationales. Nous clôturons ce chapitre par une recherche bibliographique qui nous donnera la possibilité d'avoir une idée approfondie sur l'état de l'art actuel du phénomène de la pollution atmosphérique.

## 2. L'atmosphère

L'atmosphère terrestre est composée de quatre couches superposées et qui sont séparées par la couche d'ozone. Depuis le sol, nous distinguons la troposphère et la stratosphère qui sont situées au dessous de la couche d'ozone. Au-delà, nous trouvons la mésosphère et la thermosphère [1].

Dans la troposphère et à une altitude inférieure à 10 km nous avons deux parties distinctes :

- **La couche libre** : c'est la partie supérieure de la troposphère. Dans cette zone, le vent appelé "vent géostrophique" est déterminé par de grands mouvements d'ensemble à l'échelle de la planète. Il résulte de l'équilibre entre les forces de gradient de pression et la force de Coriolis due à la rotation de la Terre [1].
- **La couche limite atmosphérique (CLA)** : c'est la partie proche de la surface terrestre. Dans cette zone, le sol perturbe l'écoulement de l'air et donne naissance à une forte agitation appelée turbulence. La variation diurne du rayonnement solaire y est directement perceptible d'un point de vue thermique [1].

La couche inférieure dans laquelle nous vivons, la troposphère, est la zone la plus dense. Elle est constituée essentiellement d'azote et d'oxygène. L'air propre et sec est constitué de 78% d'azote, 21% d'oxygène, 1% d'argon et de 0.33% de dioxyde de carbone. Le reste est constitué principalement de la vapeur d'eau et d'aérosols [1].

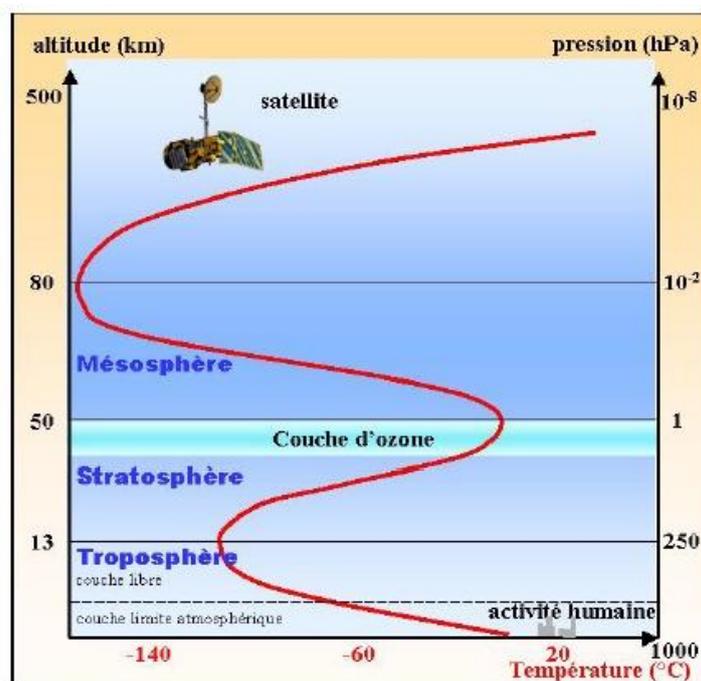


Figure 1 : Les différentes couches de l'atmosphère [1]

### 3. Définition de la pollution atmosphérique

Nous pouvons trouver plusieurs définitions de la pollution atmosphérique et parmi lesquelles nous trouvons la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (loi-96-1236 du 30 décembre 1996 intégrée au code de l'environnement-LAURE) dont le texte dit « Constitue une pollution atmosphérique [...] l'introduction par l'homme, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur les échanges climatiques, à détériorer les biens matériels, à provoquer des nuisances olfactives excessives.» La pollution atmosphérique résulte donc soit d'une modification quantitative, par l'augmentation de la concentration dans l'air de certains constituants normaux (gaz carbonique, peroxyde d'azote, ozone...), soit d'une modification qualitative engendrée par l'introduction de composés étrangers dans ce milieu (radio-éléments, substances organique de synthèse, etc.), soit encore et c'est le cas général, d'une conjugaison de ces deux derniers phénomènes.

La pollution atmosphérique peut être étudiée en quatre grandes échelles spatio-temporelles. Ces dernières sont distinguées en fonction du transport de polluants et de leur durée de vie. Nous trouvons donc [1]:

- **Echelle locale (10 m à 10 km) :** la pollution provient des produits domestiques, panaches industriels et différents modes de transport. L'impact de ces divers polluants est direct sur la santé des êtres vivants et sur les matériaux.
- **Echelle régionale (de l'ordre de 100 km) :** à cette échelle, des phénomènes physico-chimiques interviennent (polluants secondaires). L'impact des polluants est essentiellement sanitaire et environnemental.
- **Echelle continentale (environ 1000 km) :** à cette échelle, les études couvrent des régions vastes où les effets des polluants agissent sur l'environnement et sur le climat.
- **Echelle planétaire (environ 10000 km) :** dans cette échelle, nous nous intéressons aux polluants qui ont un temps de séjour relativement long, de quelques années à des milliers d'années, où les effets agissent essentiellement sur le climat.

Dans notre étude, nous nous intéresserons à l'échelle locale. Plus particulièrement, à la dispersion des polluants en milieu urbain et par suite nous n'allons pas étudier les problèmes climatiques liés à la pollution.

#### **4. Les sources de la pollution atmosphérique**

Dans notre environnement, nous trouvons plusieurs sources de pollution atmosphérique qui peuvent être classées en deux groupes :

- **Les sources naturelles :** nous trouvons dans ce groupe tous les phénomènes naturels qui participent au dégagement des différents polluants. Nous citons à titre d'exemple le cas des volcans qui émettent des gaz comme le dioxyde de soufre, les feux de forêts et celui des êtres vivants qui rejettent des quantités importantes de dioxyde de carbone.
- **Des sources anthropiques :** dans ce groupe, nous trouvons toutes les sources liées à l'activité humaine. Ce groupe est divisé en deux sous groupes : les sources fixes ou ponctuelles telles que les installations industrielles et les sources mobiles telles que le trafic automobile ou le trafic aérien.

#### **5. Les principaux polluants**

Un polluant, d'origine anthropique ou naturelle, peut se présenter à l'état solide, liquide ou gazeux. Suivant un critère de toxicité, de spécificité de sources et de la pollution générée, les principaux polluants atmosphériques se classent dans deux grandes familles bien distinctes : les polluants primaires ( $\text{SO}_2$ , PS,  $\text{NO}_x$ , COV, CO) et les polluants secondaires ( $\text{O}_3$ ). Les polluants primaires sont directement issus des sources de pollution alors que les polluants secondaires

résultent des phénomènes de dispersion et de transformation photochimique dans l'environnement.

#### a) Monoxyde de carbone (CO)

Le monoxyde de carbone (CO) est un gaz sans couleur, inodore, toxique avec une diffusivité très rapide. Il disparaît rapidement dès qu'il s'éloigne de sa source d'émission. Cela tient au fait que le CO a une densité voisine à celle de l'air [2].

- **Origines :** le monoxyde de carbone provient de la combustion incomplète des combustibles et carburants. « Lors de sa combustion, le carbone est d'abord oxydé en gaz carbonique (CO<sub>2</sub>). Si nous ajoutons à cette molécule un nouvel atome de carbone, dans certaines conditions de température et de pression, il y aurait une formation de deux molécules de monoxyde de carbone (CO). S'il y a suffisamment d'oxygène en présence, le monoxyde s'oxyderait à nouveau en dioxyde de carbone. [...] [3].
- **Pollutions générées :** le monoxyde de carbone contribue essentiellement à la formation de l'ozone [3].
- **Effets sur la santé :** le monoxyde de carbone se fixe à la place de l'oxygène sur l'hémoglobine du sang conduisant à un manque d'oxygénation du système nerveux, du cœur et des vaisseaux sanguins. A des taux importants et à des doses répétées, il peut être à l'origine d'intoxication chronique avec céphalées, vertiges, asthénie et vomissements. En cas d'exposition très élevée et prolongée, il peut être mortel ou laisser des séquelles neuropsychiques irréversibles [3].
- **Effet sur l'environnement :** le monoxyde de carbone intervient en tant que précurseur dans le processus de formation de la pollution photochimique, notamment de l'ozone troposphérique.

#### b) Oxydes d'azote NO<sub>x</sub>

L'oxyde nitrique (NO) est un gaz inodore et incolore qui est produit pendant la brûlure à hautes températures du carburant à l'intérieur, par exemple, des voitures et d'autres véhicules routiers, des radiateurs et des cuisinières. Une fois mélangé avec l'air, il se combine rapidement avec de l'oxygène, formant le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>). La plupart du dioxyde d'azote dans l'atmosphère est formé par l'oxydation de l'oxyde nitrique (NO) de cette façon, bien qu'une partie soit émise directement de la source. Il est également présent dans la fumée du tabac. Il s'agit d'un gaz brun rougeâtre, ininflammable, avec une odeur discernable. Dans des concentrations importantes, il est fortement toxique et peut endommager sérieusement les poumons avec un effet retardé. Le

dioxyde d'azote est un oxydant fort qui réagit dans le ciel pour former de l'acide nitrique corrosif et des nitrates organiques toxiques. Il joue également un rôle important dans les réactions atmosphériques qui produisent l'ozone au niveau du sol [4].

- **Origines** : les oxydes d'azote proviennent surtout des véhicules (environ 75%) et des installations de combustion telle que les centrales énergétiques. Le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) font l'objet d'une surveillance attentive dans les centres urbains. Nous trouvons des techniques comme l'utilisation de pot catalytique dans les véhicules qui contribue à une diminution de leur émission. Néanmoins, les concentrations dans l'air ne diminuent jamais compte tenu de l'âge et la forte augmentation du trafic automobile [4].
- **Pollutions générées** : les oxydes d'azote NO<sub>x</sub> interviennent dans le processus de la formation d'ozone dans la basse atmosphère. Ils contribuent aussi au phénomène des pluies acides [4].
- **Effets sur la santé** : les oxydes d'azote pénètrent dans les plus fines ramifications des voies respiratoires. Le dioxyde d'azote, par exemple, peut entraîner une altération de la fonction respiratoire et une hyperréactivité bronchique chez l'asthmatique et chez les enfants, à partir d'une dose de 200 µg/m<sup>3</sup> (microgrammes par m<sup>3</sup> d'air) [4].
- **Effet sur l'environnement** : Les NO<sub>x</sub> interviennent dans le processus de la formation de l'ozone dans la basse atmosphère. Ils contribuent également au phénomène des pluies acides. Les dépôts azotés issus des émissions d'oxydes d'azote peuvent aggraver les problèmes nutritionnels des peuplements de végétaux sensibles. Les NO<sub>x</sub>, en présence de divers autres constituants et du rayonnement solaire énergétique ultraviolet constituent, en tant que précurseurs, une source importante de pollution photochimique et d'ozone troposphérique [4].

### c) Les particules en suspension

Les particules en suspension sont un mélange complexe de substances organiques et inorganiques présentes dans l'atmosphère dans des phases liquides et solides. Les particules brutes se composent de deux types de particules : les grosses particules qui ont un diamètre plus grand que 2,5 µm et les fines particules qui disposent d'un diamètre inférieur à 2,5 µm. Les grosses particules contiennent habituellement des matériaux provenant de la croûte terrestre et de la poussière des véhicules routiers et des industries. Les particules fines contiennent les aérosols secondairement formés, les particules de combustion et les vapeurs organiques et métalliques recondensées. Le composant acide des particules en suspension dans l'air se

présente souvent en tant que fines particules. Une autre distinction qui peut être faite est de classer les particules en suspension en tant que primaires ou secondaires. Les particules en suspension primaires sont celles émises directement dans l'atmosphère, tandis que les particules en suspension secondaires sont celles constituées par des réactions impliquant d'autres polluants [4].

- **Origines :** les particules en suspension constituent un complexe de substances organiques ou minérales. Elles peuvent être d'origine naturelle (volcan) ou anthropique (combustion industrielle ou de chauffage, incinération, véhicules...). Nous distinguons les particules "fines" provenant des fumées des moteurs "diesel" ou de vapeurs industrielles recondensées et les grosses particules provenant des chaussées ou d'effluents industriels (combustion et procédés) [4].
- **Pollutions générées :** Les particules les plus fines peuvent transporter des composés toxiques dans les voies respiratoires (sulfates, métaux lourds, hydrocarbures,...). Elles potentialisent ainsi les effets des polluants acides, dioxyde de soufre et acide sulfurique [4].
- **Effets sur la santé :** Les plus grosses sont retenues par les voies aériennes supérieures. Les plus fines, à des concentrations relativement basses, peuvent irriter les voies respiratoires ou altérer la fonction respiratoire surtout chez l'enfant. Certaines particules ont des propriétés mutagènes et cancérogènes: c'est le cas de certains hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) [4].
- **Effet sur l'environnement:** Les particules en suspension sont à l'origine de salissure sur les bâtiments. D'autre part, elles ont une influence sur la formation des nuages, des brouillards et des précipitations. Elles tendent à réduire la visibilité et peuvent provoquer une réduction de la croissance et des nécroses chez les végétaux [4].

#### **d) Le dioxyde de soufre**

Le dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ) est un gaz sans couleur et ininflammable avec une odeur pénétrante qui irrite les yeux et les voies respiratoires. Il réagit sur la surface d'une variété de particules en suspension solides. Il est soluble dans l'eau et peut être oxydé dans les gouttelettes d'eau portées par le vent. Les sources les plus communes du dioxyde de soufre incluent la combustion des combustibles fossiles, la fonte, la fabrication d'acide sulfurique, la conversion de la pulpe de bois en papier, l'incinération des ordures et la production du soufre élémentaire. Le charbon brûlant est la plus grande source synthétique du dioxyde de soufre représentant environ 50%

des émissions globales annuelles, avec la brûlure du pétrole représentant 25-30% en plus. Les volcans sont la source naturelle la plus commune du dioxyde de soufre [4].

- **Origines :** le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) provient essentiellement de la combustion de combustibles fossiles contenant du soufre, du fioul et du charbon. Compte tenu du développement du nucléaire, de l'utilisation des combustibles moins chargés en soufre et des systèmes de dépollution des cheminées d'évacuation des fumées, des économies d'énergie, les concentrations ambiantes ont diminué de plus de 50 % depuis 15 ans [4].
- **Pollutions générées :** En présence d'humidité, le dioxyde de soufre forme de l'acide sulfurique qui contribue au phénomène des pluies acides et à la dégradation des pierres et des matériaux de certaines constructions [4].
- **Effets sur la santé :** le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) est un gaz irritant. Le mélange acido-particulaire peut, selon les concentrations des différents polluants, déclencher des effets broncho-spastiques chez l'asthmatique, augmenter les symptômes respiratoires aigus chez l'adulte (toux et gêne respiratoire) et altérer la fonction respiratoire chez l'enfant (baisse de la capacité respiratoire, excès de toux ou de crise d'asthme) [4].
- **Effet sur l'environnement :** En présence d'humidité, le dioxyde de soufre forme de l'acide sulfurique qui contribue au phénomène des pluies acides et à la dégradation des matériaux de certaines constructions. La formation des dépôts acides (pluies acides) peut avoir des effets néfastes sur la végétation et changer les caractéristiques des sols. Lorsque ces derniers sont déjà très pauvres, ils entraînent des pertes importantes de cations aggravant ainsi les difficultés d'alimentation en magnésium et en calcium des végétaux [4].

#### e) Les composés organiques volatils COV

Les composés organiques volatils (hydrocarbures, solvants...) proviennent notamment des sources mobiles et des procédés industriels tels que le raffinage du pétrole, le dégraissage des métaux, l'application de peintures et de vernis, l'imprimerie, etc. Ils constituent une famille de polluants d'une forte diversité et d'une grande complexité. Ils se différencient des hydrocarbures par le fait qu'ils comportent, en plus des atomes de carbone et d'hydrogène (constituants uniques des hydrocarbures), d'autres atomes divers et variés (chlore, oxygène, soufre, azote...) [4].

- **Origines :** les origines des composés organiques volatils COV sont multiples. Il s'agit d'hydrocarbures (émis par évaporation des bacs de stockage pétroliers, remplissage des réservoirs automobiles...), des composés organiques (provenant des procédés

industriels ou de la combustion incomplète des combustibles), des solvants (émis lors de l'application des peintures, des encres, le nettoyage des surfaces métalliques et des vêtements), de composés organiques émis par l'agriculture et par le milieu naturel [4].

- **Pollutions générées :** les composés organiques volatils interviennent dans le processus de formation d'ozone dans la basse atmosphère [4].
- **Effets sur la santé :** Les effets des composés organiques volatils sont très divers, ils vont de la simple gêne olfactive à une irritation (aldéhydes), à une diminution de la capacité respiratoire jusqu'aux risques d'effets mutagènes et cancérigènes (benzène et toluène) [4].
- **Effet sur l'environnement:** Les COV au même titre que les NO<sub>x</sub> et CO interviennent en tant que précurseurs dans le processus de formation de la pollution photochimique, notamment de l'ozone troposphérique [4].

#### f) L'ozone

L'ozone (O<sub>3</sub>) est la forme triatomique de l'oxygène moléculaire (O<sub>2</sub>). C'est un gaz toxique bleuâtre et instable, avec une odeur piquante, trouvé naturellement dans l'atmosphère, en particulier dans la stratosphère, 19 à 30 kilomètres au-dessus de la surface de la Terre où il forme la couche d'ozone. À ces altitudes, l'ozone filtre les rayons ultraviolets (UV) entrant dans l'atmosphère. Cependant, près du niveau du sol, il peut altérer la fonction des poumons et peut causer des irritations de l'appareil respiratoire. La concentration d'ozone est en relation directe avec l'ensoleillement (UV). Les concentrations sont donc les plus importantes en période estivale (de mai à septembre) et l'après-midi. Pendant la nuit, la production est stoppée et l'ozone produit dans la journée est piégé ou détruit par la végétation [4].

Lorsque nous parlons de l'ozone, il s'agit donc de la pollution photochimique qui est définie comme un ensemble de phénomènes complexes conduisant à la formation d'ozone et d'autres composés oxydants (peroxyde d'hydrogène, aldéhydes, peroxyde acétyle nitrate ou PAN) à partir de polluants primaires (appelés précurseurs) en présence d'énergie apportée par le rayonnement Ultra Violet (UV) solaire. Ces phénomènes ont lieu dans les couches d'air proche du sol et dans la troposphère libre. L'ozone formé à ce niveau est qualifié de "mauvais ozone" en raison de ses effets néfastes sur la santé humaine et sur les végétaux [4].

- **Origines :** L'ozone au niveau du sol est formé indirectement par l'action de la lumière du soleil sur les composés organiques volatils en présence du dioxyde d'azote. Il s'agit

donc d'un polluant secondaire. Il n'y a aucune émission synthétique directe de l'ozone à l'atmosphère [4].

- **Effets sur la santé :** Gaz agressif, fortement irritant pour les muqueuses oculaires et respiratoires. Il pénètre aisément jusqu'aux voies respiratoires les plus fines. Il peut ainsi entraîner des irritations du nez, des yeux et de la gorge, des altérations de la fonction pulmonaire, des essoufflements et des toux et il accroît les crises d'asthme [4].
- **Effet sur l'environnement:** L'ozone peut perturber l'activité photosynthétique des végétaux, altérer leur résistance, diminuer la productivité des cultures et provoquer des lésions caractéristiques. L'ozone contribue aussi à l'effet de serre et accélère la dégradation des matériaux tels que le caoutchouc (craquelures) [4].

## 6. Facteurs intervenant dans le transport et la diffusion des polluants

En étudiant le transport et la diffusion des polluants, plusieurs facteurs doivent être pris en considération. Ces facteurs sont classés en deux familles : les facteurs météorologiques et les facteurs physiques.

### a) Facteurs météorologiques

Nous citons les trois facteurs prédominants : le vent, le gradient vertical de la température et la turbulence.

- **Le vent:** Il résulte du déplacement des masses d'air et dilue continuellement la pollution libérée au point d'émission. Une absence de vent contribuera donc à l'accumulation des polluants près des sources. Sa vitesse augmente généralement avec l'altitude [4].
- **Le gradient vertical de température :** Les mouvements des masses d'air sont dus aux différences de densité entre elles. Le gradient de température conditionne ainsi leur mouvement ascendant ou descendant. Le gradient vertical de température est également utilisé pour définir la stabilité de l'atmosphère. Si la température décroît trop rapidement, l'atmosphère est instable, ce qui favorise la dispersion des polluants [4].
- **La turbulence :** La turbulence est l'irrégularité du mouvement du vent. Elle est caractérisée par le croisement des trajectoires des masses d'air et par la superposition d'une fluctuation irrégulière, aléatoire et non reproductible de l'écoulement moyen du vent. Ce facteur est très difficile à traiter mathématiquement. La diffusion tourbillonnaire est le processus de mélange le plus important dans les basses couches de la troposphère. Il provoque la dispersion des polluants dans l'air. Nous pouvons distinguer deux types de turbulence : la turbulence mécanique (tourbillons créés par la différence de vitesse des masses d'air, ou par le mouvement de l'air qui

entre en contact avec des objets), et la turbulence thermique (tourbillons créés par la différence de température des masses d'air) [4].

## b) Facteurs physiques

Il s'agit d'obstacles (relief, bâtiments...) qui modifient le régime et la direction du vent suivant des trajectoires préférentielles (Vallée...). La vitesse sera aussi modifiée (plus élevée au sommet des ondulations du terrain et plus faible au fond de celles-ci).

## 7. Le dépôt des polluants

Il existe plusieurs mécanismes qui engendrent le dépôt des polluants tels que :

- **La déposition sèche :** La déposition sèche correspond aux retombées au sol des particules, en l'absence de précipitation. Ces dépôts se produisent sous l'effet conjugué de la diffusion, de la gravité et de l'interception des polluants par le sol et par la végétation [4].
- **La déposition humide :** La déposition humide correspond aux retombées au sol des particules par les précipitations. Ces dépôts résultent de la solubilisation des polluants au sein de gouttelettes formées autour de fines particules, ou de l'entraînement mécanique, au cours d'événements pluvieux. Les précipitations permettent donc le lavage de l'atmosphère [4].
- **La sédimentation :** La sédimentation désigne le dépôt des particules les plus grosses (diamètre > 50-100  $\mu\text{m}$ ) sous leur propre poids (force gravitaire) [5].
- **L'enlèvement sec :** L'enlèvement sec désigne un processus de coagulation et d'agglomération de fines particules sur d'autres particules plus grosses [5].
- **L'enlèvement humide :** L'enlèvement humide correspond à l'absorption de gaz et d'aérosols par les microgouttelettes des nuages et du brouillard [5].

## 8. Les unités de mesures

La concentration d'un polluant peut être exprimée en :

- **ppm ou ppmv :** partie par million en volume ( $10^{-6}$ ) soit  $1\text{cm}^3/\text{m}^3$ , c'est-à-dire nous trouvons une molécule du polluant en question sur un million de molécules d'air.

- **ppb ou ppbv** : partie par milliard (billion en Anglais) soit en volume ( $10^{-9}$ ) soit  $1\text{mm}^3/\text{m}^3$ .
- **ppt ou pptv** : partie par trillion en volume ( $10^{-12}$ ), rarement employée.

Nous trouvons aussi autres unités :

- **mt/an** : millions de tonne par an.
- **g/km ou mg/km** : masse moyenne émise pour un km (souvent utilisée pour les véhicules).
- **g/kwh** : masse moyenne émise en gramme par unité d'énergie dépensée (pour les machines industrielles).

## 9. Normes

### a) Normes internationales

Selon l'organisation mondiale de la santé OMS [6], les lignes directrices relatives à la qualité d'air évaluent les effets de la pollution atmosphérique sur la santé et donnent des valeurs seuils au-delà desquelles elle lui est nuisible. Ces lignes directrices sont applicables dans le monde entier et se fondent sur l'analyse des experts de données scientifiques contemporaines.

A titre d'exemple nous prenons le cas de la France, les valeurs seuils de certains polluants sont données dans le tableau suivant :

**Tableau 1 : Valeurs recommandées de la concentration de certains polluants pour le cas de la France [6]**

Polluant	Durée d'exposition	Valeur recommandée
O <sub>3</sub>	8h	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
NO <sub>2</sub>	Annuelle	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
CO	8h	10 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
SO <sub>2</sub>	Annuelle	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM <sub>10</sub>	Annuelle	30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

**Tableau 2 : Valeurs recommandées par l'OMS pour quelques polluants atmosphériques [6]**

Polluant	Durée d'exposition	Valeur recommandée
O <sub>3</sub>	8h	100 µg/m <sup>3</sup>
NO <sub>2</sub>	1h	200 µg/m <sup>3</sup>
	Annuelle	40 µg/m <sup>3</sup>
SO <sub>2</sub>	10 min	500 µg/m <sup>3</sup>
	24h	20 µg/m <sup>3</sup>
CO	15 min	100 000 µg/m <sup>3</sup>
	30 min	60 000 µg/m <sup>3</sup>
	1h	30 000 µg/m <sup>3</sup>
	8h	10 000 µg/m <sup>3</sup>
PM <sub>2.5</sub>	24h	25 µg/m <sup>3</sup>
	Annuelle	10 µg/m <sup>3</sup>
PM <sub>10</sub>	24h	50 µg/m <sup>3</sup>
	Annuelle	20 µg/m <sup>3</sup>

### b) Cas de la Tunisie

Le problème de la pollution atmosphérique fait impliquer plusieurs organismes tels que les industries, les centres de recherche, les associations civiles, etc. Pour cela le gouvernement adopte une stratégie pour lutter contre d'éventuels abus. Dans cette stratégie, nous trouvons, essentiellement, des normes qui sont en concordance avec les recommandations de

l'organisation mondiale de la santé, des conventions nationales et internationales, des centres de recherche et des stations de surveillance. Nous pouvons citer à titre d'exemple :

- La norme tunisienne relative à la qualité de l'air (NT 10604 sur la protection de l'environnement) : valeurs limites et valeurs guides pour certains polluants dans l'air (tableau 3).
- La norme tunisienne relative à la qualité de l'air NT 10605 sur la protection de l'environnement : valeurs limites d'émission des polluants des cimenteries.
- Les normes d'émission des gaz d'échappement des véhicules de transport routier qui concerne le monoxyde de carbone pour les voitures à essence et l'opacité pour les voitures diesel.
- Convention avec le groupe chimique de Gabès pour le raccordement de ses stations au Poste Central National.
- Convention avec la Direction d'Hygiène du Milieu et de Protection de l'Environnement (Ministère de la santé publique), pour le raccordement de ses stations au Poste Central National.
- Convention avec la société de British Gas pour le raccordement de sa station au Poste central National.
- Accord-Cadre avec l'institut Supérieur des Sciences Technologiques de Sousse dans le domaine de la pollution atmosphérique.
- Programme de coopération Tuniso-monégasque dans le domaine de la qualité de l'air et de renforcement des capacités des cadres et des techniciens de l'ANPE dans le domaine de surveillance de la qualité de l'air en date de 10 septembre 2001.
- Programme de coopération française dans le domaine de la qualité avec l'agence française de développement concernant la gestion de l'environnement industriel et urbain en Tunisie.

**Missions du Poste Central National :** Le poste central est équipé d'un système de télétransmission qui relie l'ensemble des cabines de surveillance. Ses principaux rôles sont la collection des données, le traitement des données, la consultation (valeurs, graphes) et la validation des données.

**Tableau 3 : Norme tunisienne NT10604 de l'air ambiant**

Polluant	Durée moyenne	Autorisation de dépassement	Valeur limite relative à la santé		Valeur guide relative au bien-être	
			Ppmv	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	ppmv	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
CO	8h	2 fois/mois	9	10000	9	10000
	1h	2 fois/mois	35	40000	26	30000
NO <sub>2</sub>	Annuelle	-	0.106	200	0.08	150
	1h	1 fois/mois	0.350	660	0.212	400
O <sub>3</sub>	1h	2 fois/mois	0.12	235	0.07-0.10	150-200
PS	Annuelle	-	-	80	-	40-60
	1 journée	1fois/an	-	260	-	120
SO <sub>2</sub>	Annuelle	-	0.03	80	0.019	50
	1 journée	1fois/an	0.12	365	0.041	125
	3h	1fois/an	0.50	1300	-	-
Pb	Annuelle	-	-	2	-	0.5-1
H <sub>2</sub> S	1h	1fois/an	0.14	200	-	-

## 10.Revus bibliographiques

Andreas Christien [7] décrit les différentes approches de mesure des gaz à effet de serre en citant quelques limites de chacune d'elles. Nous trouvons l'approche micro-échelle qui se base sur l'étude de panache des sources individuelles, l'approche à échelle locale par des mesures prises directement à la source et l'approche méso-échelle où les mesures sont prises sur une grande région aux alentours des sources.

Tengfei Zhang et al [8] proposent une méthode numérique pour quantifier les dégagements temporels des polluants en se basant sur la méthode Tikhonov. Cette méthode nécessite la connaissance de la localisation des sources, la concentration des polluants en un point donné et l'application à un courant en régime laminaire. Le modèle numérique utilisé a été validé par

une expérience faite dans une enceinte ventilée où les mesures expérimentales ont été en parfait accord avec les valeurs numériques.

Eric P. Johnson [9], l'auteur de cet article, compare les émissions du dioxyde de carbone pour deux systèmes de chauffage, l'un utilisant le fuel et l'autre utilisant le gaz liquéfié. Les résultats ont montré que l'impact environnemental a été réduit de 15% pour le système à gaz liquéfié par rapport à celui du système à fuel. Dans cet article, l'auteur a trouvé aussi un résultat inattendu, c'est que l'impact environnemental engendré par l'utilisation du système à gaz liquéfié a été proche de celui engendré par le système utilisant le biofuel.

Ding Juanjuan et Zhang Wenping [10] ont discuté le choix d'indicateurs pour le calcul du taux de CO<sub>2</sub>. Ils ont proposé un nouvel indicateur qui met en considération les émissions cumulatives à travers le temps et la densité du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Les auteurs ont trouvé des résultats différents par rapport à d'autres études antérieures.

Dans l'objectif de faire une estimation sur la pollution parvenue des différents véhicules qui circulent dans des routes à Shanghai. Yichao Pu et Chao Yang [11] ont pris en compte un modèle de dispersion atmosphérique des polluants dans lequel ils ont utilisé des paramètres météorologiques et de différentes variables liées aux émissions des polluants qui font l'objet de cette recherche (CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO, PM<sub>10</sub>, et PM<sub>2.5</sub>). Dans cette étude, les émissions des véhicules ont été localisées en utilisant le simulateur MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator) qui a été développé par l'agence Américaine de protection de l'environnement, et pour calculer les taux d'émission des polluants, les auteurs ont utilisé le modèle OSPM (Operational Street Pollution Model) qui est un modèle semi-empirique de dispersion. Les modèles utilisés ont été validés par des mesures prises directement sur les zones étudiées et qui ont été corrélées par des facteurs de correction adéquats.

Krauststrunk et al ont fait l'étude expérimentale du transport des polluants de l'air émis à partir de plusieurs sources ponctuelles ainsi que l'impact des circulations méso-échelles sur leurs concentrations. Ils ont observé l'effet du transport méso-échelle par des variations rapides des concentrations de SO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub> sur de longues distances. Ils ont déduit que les hautes cheminées servent à projeter les polluants des régions proches de la source vers des régions lointaines [12].

La hauteur du jet augmente dans la première phase en fonction de l'élévation de la fumée à cause de la force de la poussée d'éjection à la sortie de la cheminée et de la flottabilité dans l'écoulement transversal. Dans la deuxième phase, la hauteur diminue et l'écoulement se

trouve, sous l'effet de la convection à la surface, graduellement entretenu et mélangé par la couche limite atmosphérique. La concentration des polluants diminue par fumigation à cause de la diffusion du jet. Ce résultat a été approuvé par Luhar et Hurley et Hurley et al [13] [14].

Ines Bhourri et al ont étudié l'influence de la présence d'un obstacle sur la dispersion des polluants éjectés par une cheminée coudée. Leurs travaux ont été divisés en une partie expérimentale et une partie numérique. L'étude numérique consiste à simuler l'écoulement avec un modèle de fermeture au second ordre et la validation a été assurée par des mesures à échelle réduite. La partie expérimentale a été assurée par la vélocimétrie laser par imagerie de particules (PIV). Les résultats obtenus ont permis de déterminer l'effet de la variation de la hauteur du bâtiment et il en a été déduit que la dimension de l'obstacle est un paramètre très influant sur la dispersion des polluants [15].

Olivier Herz [16] a fait une recherche sur la contribution des avions à l'émission des gaz polluants comme le monoxyde de carbone (CO), les hydrocarbures (HC), les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), les particules, le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) ainsi que le gaz carbonique et la vapeur d'eau. L'auteur a pu conclure que les émissions des avions ne constituent que quelques traces de la pollution atmosphérique.

Egon T. Degens [17] a fait une recherche sur l'histoire du CO<sub>2</sub>, en particulier sa présence dans l'atmosphère à travers le temps. Dans cet article, l'auteur a montré que le CO<sub>2</sub> nous parvient naturellement par des réactions chimiques du carbone avec l'oxygène, l'hydrogène, le nitrogène et avec la vapeur d'eau sous des températures et des pressions critiques. Ces réactions se présentent essentiellement dans la profondeur de la terre telle que les réactions magmatique et dans la couche du globe. L'auteur a montré aussi que le taux du CO<sub>2</sub> parvenu naturellement reste pratiquement invariable avec le temps à cause des océans qui ont une grande capacité d'absorption de ce type de gaz. L'auteur a conclu que le taux principal qui affecte l'atmosphère et la qualité d'air est parvenu des productions humaines tel que les industries et les moyens de transport.

Un modèle Gaussien de dispersion a été développé par Economopoulos pour montrer la dispersion de certains polluants émis à partir des cheminées industrielles. L'auteur a montré que l'élévation du panache a une grande importance dans l'étude de la dispersion car il a un effet significatif sur la concentration des polluants à la surface. La forte éjection des polluants diminue la concentration à la surface mais elle permet de l'augmenter dans l'atmosphère. Le transport des effluents se fait donc avec l'existence de réactions chimiques des gaz éjectés qui

peuvent se transformer en aérosol plus dangereux. L'élévation du jet est dominée par les effets des forces d'impulsion et le cisaillement dû à l'interaction entre l'air ambiant et le gaz éjecté qui y contribue dans cette phase. Pour un panache thermique qui accentue le phénomène de flottabilité, un vent léger aura tendance à augmenter la hauteur du panache et tendra à diminuer la concentration [18] [19].

Carpenter et al suggèrent qu'une élévation du jet est définie comme le point dans lequel l'impulsion et la flottabilité n'auront plus de rôle important. Selon Whaley, cette hauteur est estimée être entre 450m et 1200m de la cheminée. Il montre que théoriquement, le niveau du panache ne s'arrête que sous l'influence de certaines conditions météorologiques. Dans toutes autres conditions, le jet continue à se propager. Des études ont montré que si la vitesse d'éjection est strictement inférieure à la moitié de la vitesse de l'air ambiant, la hauteur du jet sera réduite et le dépôt des polluants sera dominant près des parois. Ces études montrent que les jets à faible vitesse d'impulsion et à basse hauteur se comportent généralement d'une manière identique. Cependant, ils montrent que si la vitesse de l'effluent est 1.5 fois plus grande que la vitesse du vent ambiant qui passe au dessus de la source et que la hauteur de cette dernière est 2.5 fois la hauteur des obstacles qui l'entourent, le dépôt au voisinage sera évité [19].

Wilfrid Bach [20] a discuté l'impact de la présence du CO<sub>2</sub> sur le climat et l'environnement. Il a montré aussi que le taux du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère est en augmentation continue à cause de différentes causes telles que la déforestation, le développement industriel et les différents phénomènes naturels. A la fin, l'auteur a cité quelques solutions pour les problèmes causés par le CO<sub>2</sub>.

A.S.Talma et J.C.Voguel [21] ont effectué une étude, pendant 15 mois, sur la variation du taux du dioxyde de carbone selon les changements climatiques, les changements de saisons et en suivant les différents paramètres météorologiques. Après avoir effectué une comparaison lors des deux saisons d'hiver et d'été, ils ont prouvé que la concentration du CO<sub>2</sub> est plus importante la nuit. Ils ont déduit, en effet, que le taux du CO<sub>2</sub> est plus élevé en hiver en raison des nuits qui sont plus longues. Cette recherche leur a permis de déduire aussi que la variation du taux du CO<sub>2</sub> était inversement proportionnelle à la variation de la vitesse du vent et à l'hauteur du point de mesure par rapport au sol.

M.H Mirazai et al ont étudié expérimentalement la structure d'un écoulement autour d'un obstacle. Les résultats montrent que le dépôt et le transport du polluant dépendent de la forme et de l'orientation du bâtiment ainsi que de la nature de la couche limite [22]

Une étude a été faite par C.Hénault et al [23] sur l'émission du  $N_2O$  qui est un gaz à effet de serre. Cette étude a été réalisée sur les terres d'agricultures qui sont la plus grande source du  $N_2O$ . Ces émissions sont produites principalement par des procédés biologiques et chimiques. Les auteurs ont présenté deux techniques de capture et de calcul, la technique par chambre de capture et la technique micro météorologique. Ils ont montré que le taux du  $N_2O$  émis était variable suivant l'échelle temporelle, l'échelle spatiale et suivant plusieurs paramètres (nature de la terre et sa composition, produits d'agriculture utilisés, etc.). Les auteurs ont cité aussi quelques solutions proposées dans d'autres recherches telles que l'augmentation de l'utilisation des produits contenant l'azote et le contrôle des processus de nitrification et de dénitrification.

James M.Calm [24] a étudié la contribution des systèmes frigorifiques au réchauffement planétaire et à l'émission des gaz à effet de serre. Des solutions, qui n'ont pas aboutit à un résultat efficace, ont été proposées en remplaçant les hydrofluocarbures (HFC) par de différents autres frigorigènes. Dans cette étude, l'auteur compare, en outre, les plus importants frigorigènes utilisés selon différentes conditions et achève sa recherche en montrant que le choix des frigorigènes ne doit pas être fait selon les compositions chimiques, mais plutôt selon les caractéristiques des substances individuelles (appauvrissement de l'ozone, durée de vie dans l'atmosphère, etc.).

Xian-Xiang Li et al [25] discutent dans cet article les avancements des recherches sur l'étude de la pollution dans les rues. Ces avancements sont dus aux progrès et au développement des méthodes numériques et du pouvoir de résolution des ordinateurs. Les méthodes les plus utilisées se basent sur le modèle RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) et s'intéressant aussi à la configuration des rues et des bâtiments qui les entourent, la direction du vent, le phénomène de turbulence et la stratification thermique. De plus, Les auteurs ont présenté la méthode LES (Large Eddy Simulation) qui est une autre méthode de résolution numérique utilisée dans la simulation des effets de turbulence.

Yoshihide Tominaga et Ted Stathopoulos [26] ont discuté les modèles numériques utilisés en établissant quelques comparaisons entre eux et en mettant l'accent sur leurs limites. Pour commencer, les auteurs ont cité quelques recherches sur la modélisation de dispersion des polluants autours des constructions proches des sources. Ensuite, ils ont évoqué les problèmes de turbulence et des conditions aux limites qui doivent être prises en considération dans le choix du modèle numérique.

Sellers et Allen montrent que la diffusion est généralement basée sur des mesures instantanées qui supposent que l'écoulement est stationnaire et ses caractéristiques d'émission sont constantes. Ils ont montré que pour un gaz chaud les zones de mélange du panache sont responsables de la hauteur atteinte par le jet et que la diffusion latérale et verticale croissent en fonction de la hauteur de la source et du réchauffement du gaz [27].

Willis et al ont donné des descriptions détaillées basées sur des simulations numériques de la dispersion des polluants issus des cheminées courtes dans la couche limite convective mixte. Ils ont simulé au laboratoire la distribution du champ de concentration d'une cheminée de faible hauteur dans la couche limite convective mixte. La caractéristique exceptionnelle de ce profil est la montée de la ligne centrale du panache définie comme le lieu géométrique de la concentration maximale [28]

Gangoiti et al ont fait une modélisation tridimensionnelle de la structure d'un jet dans une atmosphère à profil complexe (avec cisaillement du vent et stratification thermique). Ils ont décrit les différentes étapes de l'apparition des deux phases de propagation du panache (l'élévation du panache et la diffusion). Leurs profils de température et de vitesse montrent la propagation du panache sur de longs trajets. Ceci était évident pour des faibles valeurs de la vitesse du vent (1-1.5m/s). Sellers a montré que l'axe du panache de forme conique est généralement vertical dans des conditions atmosphériques stables. Dans un régime venteux, le jet est rapidement courbé et suit son inclinaison. L'auteur a mis en cause, entre autres, la formation de la paire de vortex en aval de la source. Cette paire de vortex était responsable de la déformation et du changement de la direction du jet [29] [30].

Wilson montre que la transformation du gaz SO<sub>2</sub> vers l'aérosol sulfate dans le panache issu de la cheminée est négligeable durant les premières étapes de la dispersion. Lorsque le panache se mélange avec l'air ambiant, le taux de conversion augmente. La hauteur des sources permet d'augmenter le temps de résidence de SO<sub>2</sub> dans l'atmosphère ce qui engendre l'augmentation de la concentration en sulfate. Les hautes cheminées auront tendance donc à réduire le niveau de concentration du SO<sub>2</sub> à la surface [30].

M. Meraz et al [31] ont étudié la persistance dans l'atmosphère de quatre polluants (O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> et PM<sub>10</sub>). Les mesures ont été prises dans une station située à Mexico la capitale du Mexique sur la période qui se situe entre les années 1999 et 2014. Les résultats présentent des changements selon la variation de l'échelle temporelle et nous amènent à constater que les

polluants sont plus importants dans les saisons pluvieuses que ceux notés dans les saisons sèches.

Hervé Le Treut [32] a discuté dans cet article les rétroactions liées aux nuages et à la vapeur d'eau qui sont des facteurs importants à l'augmentation de l'effet de serre. Les incertitudes à la modélisation sont considérables et ceci est lié au problème d'estimation des futures variations des paramètres climatiques tels que l'humidité, la température et les précipitations ce qui rend les modèles utilisés plus complexes.

La dilution des polluants dans l'atmosphère se fait sur deux principales étapes qui sont l'élévation du panache et la dispersion. Dans la première étape, le jet atteint une altitude arbitraire définie comme l'hauteur du panache. A ce stade, les forces de flottabilité dues aux effets thermiques sont plus importantes que les forces d'impulsion dues à l'effet de la vitesse d'éjection. La première partie du mélange est influencée par la flottabilité, l'impulsion, le diamètre initial du jet et les forces de cisaillement appliquées par le vent. Dans cette zone, la turbulence induite par la flottabilité est le facteur principal de la diffusion tandis que la turbulence atmosphérique joue un rôle mineur. Selon Whaley, cette étape se produit généralement entre 0m et 300m de la source. Ensuite, le panache se propage en se dispersant latéralement et verticalement jusqu'à atteindre la surface. Pour la deuxième phase de la propagation du panache, la turbulence atmosphérique joue un rôle significatif dans le processus de diffusion. Mesurée par différents outils optiques, la hauteur asymptotique de l'écoulement définit la hauteur du panache. Dans cette région, l'auteur a remarqué que l'élévation du jet est proportionnelle à  $\ln(x)$  où  $x$  est la distance longitudinale [33].

Snyder et Lawson ont étudié numériquement la propagation d'un panache flottant à proximité des bords d'une cheminée. Ils ont réalisé une simulation du vent dans un tunnel pour deux nombres de Reynolds respectivement au dessous et au dessus d'un nombre de Reynolds critique. Leurs résultats ont montré que les bords de la cheminée créent une différence de pression négative qui a tendance à transporter le panache dans le sillage de la cheminée. Snyder et Lawson confirment ainsi que la trajectoire finale du jet tend vers une forme Gaussienne. Ils en déduisent aussi que pour avoir une bonne simulation d'un tel jet flottant, il faut réduire la vitesse du vent [34].

Carras et Williams ont fait une campagne de mesure des concentrations de polluants pour étudier leur dispersion. Les trajectoires de ces polluants ont été tracées par une photographie. Les mesures ont montré que, dans les conditions de convection, l'élargissement du jet est

gouverné par les effets de flottabilité. Ensuite, l'effet de la turbulence atmosphérique devient plus prépondérant [35].

Wilson a montré que les aérosols générés dans l'atmosphère sont plus toxiques que les polluants primaires. Dans ce contexte, l'auteur a montré que le  $\text{SO}_2$  peut être oxydé en  $\text{SO}_3$  et converti en Sulfate. Par photo-oxydation directe et dans des taux d'humidité importants, le  $\text{SO}_2$  peut se transformer en  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . L'auteur exige une diminution de 98% en  $\text{SO}_2$  pour pouvoir diminuer la concentration du sulfate de 80% [36].

Sheih a développé un modèle régional de la pollution atmosphérique pour simuler la distribution de la concentration du  $\text{SO}_2$  émise à partir des sources industrielles du Nord-Est des Etats-Unis. L'auteur a déterminé la localisation du centre du jet et sa déviation et il a défini aussi la taille du panache. Sheih a noté que l'augmentation de la hauteur de la cheminée, tout comme les réactions chimiques qui se produisent, réduit la concentration des polluants à la surface et l'augmente dans l'atmosphère. La concentration des polluants dans l'atmosphère et la trajectoire du jet dépendent des taux et de la vitesse des gaz évacués, des conditions météorologiques, de l'écoulement principal, de la température et de la hauteur de la source [37].

Smith et Frankenberg ont démontré 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 en dessous de celle-ci est observée. En revanche, si la cheminée débouche au dessus, les polluants diffusent normalement [38].

Fearn et Weston ont développé deux modèles semi-analytiques afin de déterminer la trajectoire du jet. Les tourbillons contrarotatifs qui se développent à l'aval de la source ont été détectés. Ces structures tourbillonnaires apparaissent immédiatement après l'orifice et sont fortement déviées par l'écoulement principal. Fearn et Weston ont noté que la diffusion de ces structures diminue en fonction du rapport de la vitesse du jet par rapport à celle de l'écoulement principal [39].

Benkoussas Bouzid et al ont réalisé une étude numérique de la dispersion atmosphérique des effluents émis par les cheminées de la cimenterie de Meftah en Algérie. L'influence du rapport de la vitesse du jet sur celle latérale du vent, de la hauteur de la cheminée et de la rugosité du milieu sur la dispersion des particules du panache éjecté ont été étudiées. L'étude a mis en évidence l'étendue de la dispersion en relation avec ces paramètres. Ainsi, les risques réels imputés aux rejets de la cimenterie ont été identifiés. Le résultat obtenu est déterminant pour la

prise de décision relative à l'amélioration des systèmes de filtrage afin de diminuer considérablement les rejets de poussière et préserver, ainsi, l'environnement [40].

Chassaing et al ont montré que la trajectoire du jet varie en fonction du rapport des vitesses et du diamètre du jet. Grâce aux mesures réalisées avec la technique des sondes à fil chaud, les auteurs ont montré l'existence de la structure du double vortex [41].

Alan H. Huber a étudié dans une soufflerie l'influence de la largeur et de l'orientation des obstacles par rapport au vent. Il a examiné les profils des concentrations dans le sillage des bâtiments. Les rapports largeur sur hauteur de ces derniers varient de 2 à 22 pour des angles d'orientation compris entre -30 et +60 degrés (0 degré correspondant à une direction perpendiculaire au vent). La hauteur de la cheminée est égale à 1.5 fois la hauteur du bâtiment. L'auteur a trouvé que la dispersion latérale du panache issu d'une source ponctuelle placée près du bâtiment est maximale pour un rapport largeur / hauteur égale à 10 [42].

Fric et Roshko ont défini les différentes structures tourbillonnaires. Ils suggèrent que les anneaux tourbillonnaires qui apparaissent sur la couche cisailée, située à la frontière du jet, évoluent à partir de la section d'éjection et se déforment en fonction de la déviation du jet. Le doublet tourbillonnaire contrarotatif, ayant la forme d'un rein et symétrique par rapport au plan vertical, évolue à partir de la couche cisailée et prend naissance juste après l'orifice d'éjection pour dominer la structure aval du jet. Le gradient de pression juste en amont du jet fait apparaître un tourbillon en fer à cheval à la base du jet dans la zone d'éjection. La partie amont de ce tourbillon est indépendante de la vitesse d'éjection. Bien qu'en fonction de cette dernière, les deux extrémités qui arrivent dans le sillage varient. Les tourbillons du sillage apparaissent dans la couche limite de la paroi intérieure et remontent sous le jet [43].

I. Marvoldis et al ont étudié expérimentalement la dispersion du polluant autour d'un obstacle isolé. Le but de cette étude est de varier la forme du bâtiment (cube, cylindre de différentes tailles) et son orientation par rapport la direction du vent. Ils ont montré que les concentrations du polluant sont affectées par la forme d'obstacle et l'emplacement latéral de la source par rapport à ce dernier [44].

Luke Curtis [45], a mis l'accent sur les différents effets des polluants sur la santé. Les polluants étudiés sont les particules volatiles, les monoxydes de carbone, les oxydes de sulfures et de nitrogène, les particules métalliques, les particules organiques, les solvants, les pesticides, les radiations et les bio-aérosols. Dans cet article qui est basé sur des études et des recherches

antécédentes, l'auteur a montré qu'il y a un lien direct entre les polluants aériens et les différentes maladies respiratoires, cardiovasculaires, immunologiques, hématologiques, et neurologiques.

## **11. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons défini les termes les plus importants en rapport avec notre sujet. Ensuite nous avons présenté les principaux polluants et les facteurs qui stimulent leur dispersion. En outre, nous avons cité les principales normes nationales et internationales et nous avons clôturé cette partie par une recherche bibliographique afin d'avoir une idée générale sur l'état de l'art actuel et sur les différents travaux de recherches qui ont porté sur la pollution atmosphérique.

## Chapitre II : Méthodes et techniques de mesures

### 1. Introduction

Dans notre étude, une grande partie concerne les mesures expérimentales in-situ. Il est important donc d'avoir une idée générale sur les différentes méthodes et techniques utilisées dans la prise de ces mesures. Pour ce fait, nous consacrerons la première partie de ce chapitre pour enrichir nos connaissances sur ce sujet. Dans la deuxième partie nous présenterons nos travaux, nos analyses et nos interprétations de la variation de concentration des principaux polluants atmosphériques au centre ville de la Tunisie.

### 2. Les méthodes et les techniques de mesures les plus utilisées

De nos jours, il existe plusieurs méthodes et techniques de mesures de polluants atmosphériques. Nous pouvons les regrouper en trois groupes : Les méthodes statiques, les méthodes dynamiques et les méthodes analytiques.

#### a) Les méthodes statiques

Dans les méthodes statiques nous trouvons essentiellement : l'échantillonnage, et ceci, en utilisant les végétaux pour la mesure des teneurs en polluants. Les prélèvements, à partir des surfaces des obstacles ou à partir de la surface du sol, en utilisant des collecteurs de particules et de précipitations qui recueillent les retombées liquides et solides.

#### i. Echantillonnage en utilisant les végétaux

Cette partie nous mène à définir plusieurs termes liés à l'échantillonnage en utilisant les végétaux. Nous définissons essentiellement :

- **La bioindication** : c'est une méthode d'observation des effets visibles de la pollution atmosphérique sur les végétaux. Elle ne permet pas de quantifier exactement le ou les polluants étudiés, mais permet de déterminer si une étude plus poussée sera nécessaire [46].
- **Les bioessais** : ce sont des techniques qui ont pour objectif la détection des polluants et la mesure de leur teneur [47].
- **La bioaccumulation** : elle consiste en un dosage de substances contenues dans le végétal étudié. Les végétaux peuvent accumuler aussi bien des polluants gazeux que des polluants métalliques [48].

- **La bioestimation** : elle représente la mise en relation de la présence d'espèces avec un niveau moyen de pollution [49].
- **Le biomonitoring** : c'est le suivi dans le temps de l'état de la végétation. Nous distinguons le biomonitoring passif qui est une analyse de l'évolution de la végétation naturelle et le biomonitoring actif avec lequel nous transplantons des végétaux élevés dans des conditions standardisées [50].

Pour ces méthodes d'estimations nous notons quelques limites. D'abord, la disponibilité non permanente liée au climat ou au cycle de végétation puisque l'estimation des émissions ne peut être effectuée que pendant la phase végétative du bioindicateur [51]. En outre, nous avons la possibilité d'interférence avec d'autres stress (maladies, ravageurs, climat) [52].

## ii. Les prélèvements

Pour les prélèvements il faut tenir compte du type d'écoulement (turbulent ou laminaire), des forces physiques (gravité, inertie, diffusion...) qui s'exercent sur les particules et la conception de la ligne du prélèvement (obstacle, coude, rétrécissement).

Afin que l'échantillon soit représentatif, plusieurs sous-échantillons sont prélevés pour chaque site d'échantillonnage [53]. Les prélèvements peuvent être pris pour différents profondeurs selon les études et selon ce que nous cherchons à mettre en évidence : le dépôt de la pollution et/ou la pénétration des polluants dans le sol.

Dans les méthodes de mesures des particules par prélèvement nous trouvons les méthodes intégrales qui collectent et mesurent les aérosols sans sélection de dimension d'une part et les méthodes discrètes qui collectent et mesurent les aérosols en fonction de leurs dimensions d'autre part.

### ➤ Méthodes intégrales :

Les méthodes intégrales peuvent, eux-mêmes, être divisées en deux types de mesures différentes. Nous trouvons ceux qui sont basées sur la masse des particules et ceux qui sont basées sur leurs nombres.

#### ▪ Les techniques basées sur la masse des particules

Dans ces techniques nous trouvons essentiellement :

- Les précipitateurs électrostatiques et thermiques qui fonctionnent par la mise en place de gradients électrique et thermique et l'utilisation d'une électrode pour attirer les particules des aérosols chargés électriquement [54].
- La jauge à absorption bêta basée sur l'absorption de rayonnement bêta par la lumière, dans laquelle, Les poussières sont collectées par filtration ou impactions sur un support

approprié qui peut être traversé par des rayons  $\beta^-$ . La diminution du nombre de ces rayons permet, après étalonnage d'évaluer la masse de poussière. Nous notons que des erreurs peuvent se produire si la taille des particules collectées est très importante, si le dépôt n'est pas homogène ou si l'aérosol est composé de particules de poids atomique élevé [54].

- La balance piézo-électrique fonctionnant à travers le quartz qui vibre à une fréquence propre très précise s'il est placé dans un circuit oscillant approprié. Les aérosols forment une masse supplémentaire sur la surface active du cristal, nous observons alors une décroissance de la fréquence d'oscillation en fonction de la masse ajoutée. Cette méthode permet avec un temps de réponse très court la mesure de masse de l'ordre de  $10^{-8}$ g. Pour obtenir une mesure représentative et précise il faut prendre des précautions en ce qui concerne l'adhérence des particules et leur distribution sur le cristal et tenir compte de l'influence de la température et de l'humidité [54].

- **Les techniques basées sur le nombre de particules :**

Dans ces techniques nous trouvons essentiellement :

- Les opacimètres, les photomètres et les néphélomètres qui sont des appareils basés sur les propriétés optiques des particules et ne donnent de résultats quantitatifs qu'après étalonnage. Les opacimètres sont basés sur l'extinction de la lumière par les aérosols, ils sont utilisés généralement pour la mesure des concentrations élevées (mesure à la source). Les photomètres mesurent la diffusion de la lumière. Ces derniers permettent la mesure des concentrations plus faibles. Les néphélomètres mesurent la diffusion de la lumière par les particules dont le diamètre est compris entre 0.1 et 2  $\mu\text{m}$  environ.
- Les compteurs de noyaux de condensation qui peuvent détecter, par des méthodes classiques d'optique, les particules qui ont la propriété de grossir en atmosphère sursaturée pour former des gouttelettes. Les compteurs de noyaux de condensation permettent de détecter les particules dont le diamètre était situé entre 2 et 10nm, pour une concentration comprise entre  $10^4$  et  $10^{13}$  particules/ $\text{m}^3$ . Malgré les améliorations faites à cet appareil, le défaut principal reste le faible débit d'échantillonnage (300  $\text{cm}^3/\text{min}$ ).

- **Méthodes discrètes :**

Dans les méthodes discrètes nous trouvons plusieurs techniques utilisées telles que :

- Les filtres : placés devant l'air à analyser, ils retiennent les particules suivant la taille choisie. Ces particules fixées sur le filtre peuvent servir d'échantillons pour plusieurs analyses [55].
- Les impacteurs en cascade : ils se composent d'une série d'étages d'impaction constitués d'un orifice perpendiculaire à une surface plane. Cet appareil nous permet de capter des particules de plus en plus petites. A chaque étage, toutes les particules supérieures au diamètre de sélection doivent être captées et les plus petites sont entraînées vers l'étage suivant. Les résultats des impacteurs sont nettement améliorés avec l'utilisation d'une adhésive double face en carbone conducteur comme surface de collection. Nous notons que l'utilisation de la surface de collection, enduite ou non de graisse, sert à éviter un réentraînement ou un rebond des particules et influence, par conséquent, la qualité des résultats obtenus.
- Les analyseurs électriques d'aérosols : les plus utilisés sont les détecteurs photoélectriques de HAP (Hydrocarbure Aromatique Polycyclique) [56]. Après sa dilution par une flamme, l'échantillon de gaz passe dans le chargeur à diffusion qui contient une source radioactive. Les particules sont alors chargées électriquement. Ensuite, le gaz et les particules en suspension passent dans l'analyseur de mobilité différentielle (DMA) qui sélectionne les particules d'un même diamètre en fonction de leur charge électrique. Enfin, les particules seront retenues par un filtre relié à un femto-ampèremètre qui mesure la charge électrique. En variant le voltage du DMA, des particules de différents diamètres sont sélectionnées et mesurées. Nous obtenons ainsi la distribution des tailles en suspension. Cet ensemble est appelé « l'électromètre d'aérosol ».
- Les batteries de diffusion : elles peuvent être présentées sous la forme de faisceaux de tubes, de plaques parallèles, d'empilement de grilles ou de lits granulaires placés en série ou en parallèle. Quand un gaz contenant un aérosol s'écoule, en régime laminaire, dans une conduite, les particules les plus fines diffusent vers les parois sous l'action du mouvement brownien. Cette propriété peut être utilisée pour mesurer les dimensions submicroniques. A partir de la concentration particulaire mesurée en amont et en aval de chaque unité par un compteur de noyau de condensation, nous pouvons donc à l'aide d'un algorithme remonter à la distribution granulométrique. Cette technique est applicable aux particules dont le domaine de dimension est compris entre 0.002 et 0.2  $\mu\text{m}$  [54].

- Les spectromètres diffusionnels et inertiel : ils associent un impacteur en cascade à des batteries de diffusion. Ils permettent d’obtenir la distribution en masse des aérosols comprise entre 0.05 et 10  $\mu\text{m}$ . Les résultats sont plus fiables si les concentrations sont plus élevées.

### **b) Les méthodes dynamiques**

Pour réaliser des mesures en continu, nous utilisons des analyseurs automatiques reliés à un système informatique qui permet le stockage des données.

Nous trouvons plusieurs techniques qui permettent de mesurer en continu les concentrations des polluants tels que :  $\text{O}_3$  et  $\text{CO}_2$  (chimiluminescence et photométrie),  $\text{NO}_2$  et  $\text{SO}_2$  (séparation par absorption et ampérométrie), BTX, HAP (spectrométrie de masse), etc.

Nous notons que le terme « mesures en continu » n’est pas utilisé dans le sens strict du terme. En pratique nous utilisons des mesures discrètes à des intervalles plus ou moins rapprochés.

#### **➤ Principe des analyseurs automatiques :**

Selon les polluants, nous pouvons trouver divers principes des analyseurs automatiques. Ces principes se composent essentiellement des éléments suivants :

- Pompe à air : la pompe à air est raccordée à un dispositif permettant la programmation de la fréquence de l’échantillonnage.
- Filtre ou Barboteur : suivant le système d’analyse, l’air est filtré ou barboté à travers un réactif pour préparer l’échantillon à analyser.
- Capteurs ou analyseurs : système basé sur les variations de conductivité, la chromatographie, la spectrométrie, la chimiluminescence, etc.
- Système informatique : pour l’analyse et le stockage des données.

Pour les appareils utilisés dans les mesures en temps réel nous notons quelques inconvénients comme le coût élevé du matériel utilisé, l’emplacement (l’équipement ne doit pas être très proche des sources, l’obligation de la présence de l’alimentation, être à l’abri du vandalisme), la maintenance, etc.

#### **➤ Description de quelques appareils :**

Parmi les appareils utilisés dans les méthodes dynamiques nous trouvons le DOAS qui nous intéresse le plus car il a été utilisé dans nos mesures expérimentales in-situ. Nous présenterons cet appareil dans la suite de notre étude. En outre, nous trouvons plusieurs autres appareils que nous citerons ci-dessous.

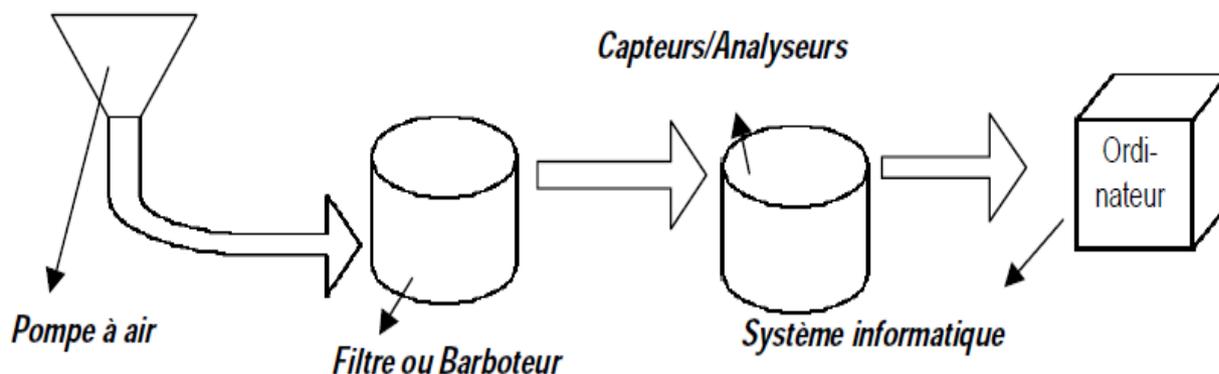


Figure 2 : Principe de base des analyseurs automatiques [56]

- **Mesure en temps réel avec le détecteur photoélectrique de HAP :**

Avec cette technique, nous utilisons une flamme pour diluer les particules et les molécules contenues dans les gaz. Une petite quantité de gaz dilué par la flamme passe par une soupape qui s'ouvre à intervalles réguliers. Le gaz se répand ainsi dans une chambre à vide où l'échantillon est fortement dilué avec un gaz froid inerte comme l'argon ou l'azote. Les limites de cette technique c'est que les concentrations de deux espèces différentes ne peuvent pas être comparées puisque le rendement de la détection est différent pour chaque molécule [56].

- **Mesure en temps réel des HAP avec le PAS (Photoelectric Aerosol Sensor) :**

L'air est ionisé à pression atmosphérique par la lumière ultraviolette d'une lampe à mercure. La charge électrique produite par cette ionisation est proportionnelle à la quantité d'HAP adsorbée à la surface des particules. Il faut noter que les résultats du PAS sont relativement difficiles à comparer avec les résultats obtenus par les techniques classiques car ce sont tous les HAP d'une façon globale qui font la mesure alors que les méthodes traditionnelles observent certains HAP présélectionnés [57].

- **Les LIDAR (Light detection and ranging):**

Ces appareils fonctionnent sur le principe des radars optiques. Ils envoient de brèves impulsions de lumière laser dans l'atmosphère. Ces dernières seront captées par un détecteur, placé à côté du laser, qui enregistre les « échos », c'est-à-dire les impulsions qui reviennent vers l'émetteur au bout d'un certain temps. Tout obstacle présent sur le trajet du laser absorbe ou diffuse une partie de l'énergie lumineuse, ce qui affaiblit ou en modifie l'écho. Les LIDAR permettent la mesure des concentrations des différents polluants à une très grande sensibilité mais l'inconvénient reste le prix élevé des équipements [58].

### ▪ **Spectroscopie avec diodes à émission de lumière (Light emitting diodes):**

Ces diodes émettent dans l'infrarouge moyen (bande d'absorption moléculaire d'un grand nombre de polluants atmosphériques tels que le monoxyde de carbone, le dioxyde de carbone, le méthane, etc) et permettent de détecter et de doser ces composés. Parmi les avantages de cette technologie nous pouvons citer la réduction des coûts et l'utilisation à température ambiante.

### c) **Les méthodes analytiques**

La spectroscopie d'absorption, qui sera développée dans la suite de ce chapitre, est considérée comme la méthode la plus utilisée et la plus ancienne des méthodes analytiques. Nous trouvons aussi plusieurs autres méthodes telles que la chromatographie, la luminescence et l'analyse par variation de conductivité.

#### i. **La chromatographie**

La chromatographie est une technique analytique de séparation de constituants d'un mélange homogène liquide ou gazeux. Le principe de cette méthode est basé sur un processus appelé l'élution. Ce processus est créé par le mouvement d'une phase mobile sur ou à travers une phase stationnaire. Nous distinguons deux méthodes : la chromatographie sur colonne dans laquelle une phase mobile progresse dans une colonne par gravité ou sous l'action d'une différence de pression et la chromatographie sur couche mince qui se fait sur une surface plane [59].

#### ii. **La luminescence**

La luminescence est la restitution de l'énergie sous forme d'émission de lumière lors du passage de certaines molécules d'un état excité à l'état fondamental. Suivant le mode d'excitation, nous trouvons différentes sortes de luminescence (tableau 4) [59].

Dans le phénomène de luminescence, nous nous intéressons surtout à la fluorescence et la chimiluminescence qui sont les plus utilisés dans la détection de certains polluants.

- **Chimiluminescence** : nous parlons de chimiluminescence lorsque l'excitation des molécules provient d'une réaction chimique. Les domaines d'utilisation sont nombreux. Nous la trouvons surtout dans la criminologie, où la chimiluminescence est utilisée pour la détection de sang par réaction d'oxydation entre le luminol et le fer de l'hémoglobine, et dans le dosage du monoxyde d'azote (NO) par réaction chimique avec l'ozone (O<sub>3</sub>).
- **Fluorescence** : lorsque l'excitation des molécules provient de la lumière, deux phénomènes peuvent se présenter. Il s'agit de la fluorescence et de la phosphorescence. Pour avoir la fluorescence, l'émission doit se produire entre deux états de même multiplicité de spin. Les domaines d'utilisation sont multiples. Nous trouvons la

médecine avec la visualisation des anomalies circulatoire de la rétine, la criminologie avec le marquage de sécurité des billets de banque et la sécurité avec l'utilisation des vêtements fluorescents dans les chantiers.

**Tableau 4 : les différents types de luminescence [59]**

Sortes de luminescence	Modes d'excitation
Photoluminescence (phosphorescence/fluorescence)	Lumière
Chimiluminescence	Réaction chimique
Bioluminescence	Réaction biochimique
Thermoluminescence	Elévation de température
Electroluminescence	Champ électrique

### iii. Analyse par variation de conductivité

La conductivité d'une solution est la capacité des ions à transporter le courant électrique. Le passage du courant électrique s'effectue donc par la migration des ions dans un champ électrique produit généralement par un courant alternatif. De ce fait, la conductivité électrique d'une solution est proportionnelle aux concentrations des ions présents dans une solution quelconque. La mesure des concentrations doit être comparée à celle d'une solution étalon où les concentrations des ions sont connues à l'avance.

Les résultats obtenus peuvent être influencés par différents paramètres tels que la température, l'agitation et la présence des bulles d'air piégées dans la solution.

## 3. La méthode DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy)

La méthode DOAS est une méthode à long trajet optique qui permet de mesurer plusieurs polluants sur une certaine distance. Elle est basée sur le principe de la spectroscopie d'absorption dans le domaine ultraviolet-visible. Cette technique, a été utilisée la première fois par U.platt et D.Perner dans les années 70 [60].

### a) La spectroscopie d'absorption

#### i. Historique

La spectroscopie d'absorption atomique a été liée aux observations du spectre solaire au début du 19<sup>ème</sup> siècle. En 1802, Wollaston a découvert des raies noires dans le spectre de la lumière

solaire. Ce phénomène a été étudié en détails par Fraunhofer en 1814, interprété par Brewster en 1832 et mieux expliqué par Kirchoff qui a montré que les raies noires étaient dues à l'absorption par divers espèces présents dans l'atmosphère solaire telles que (H, O, Ca, Na, etc.). En 1861 Kirchoff et Bunsen ont mis les bases d'une nouvelle méthode d'analyse chimique. Ils ont montré que la raie jaune émise par le sodium dans une flamme était identique à la raie noire catalogué dans le spectre solaire. Suite à ses expériences Kirchoff à énoncer la loi de base de l'absorption atomique : "tout corps chimique peut absorber certaines radiations qu'il émet lui-même" [61].

En 1909, Wood a constaté que la raie émise par le mercure à 253,6 nm était réabsorbée par les vapeurs de cet élément. Il a exploité, aussi, ce phénomène pour déceler des traces de ce métal toxique dans l'air. De nos jours l'absorption atomique est devenue une technique remarquable par sa sensibilité, sa sélectivité et sa rapidité.

## ii. Principe

Un atome excité thermiquement ou électriquement à un état  $E_2$  émet une radiation de fréquence  $\nu$  lorsqu'il revient à un état inférieur  $E_1$ . C'est le phénomène d'émission qui est régi par l'équation de Planck [61].

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad \text{Equation (1)}$$

L'absorption atomique résulte du processus inverse. C'est l'absorption du photon  $h\nu$  qui fait passer l'atome de l'état  $E_1$  à l'état  $E_2$  d'énergie supérieure.

L'intensité d'une onde lumineuse de longueur d'onde  $\lambda$  traversant un échantillon homogène (S) qui absorbe à cette longueur d'onde, diminuera progressivement pendant toute la durée de son trajet à travers l'échantillon. Il a été déterminé qu'il existe une proportionnalité entre la fraction absorbée ( $dI/I$ ) et l'épaisseur traversée  $dx$ , normale au trajet lumineux.

Nous pouvons écrire donc [61]:

$$\frac{dI}{I} = -k_s^\lambda dx \quad \text{Equation (2)}$$

$k_s^\lambda$  : Constante pour une longueur d'onde et un milieu donnés

Pour un trajet de 0 à la longueur  $l$  de l'échantillon, l'intégration de l'équation précédente nous indique la diminution de l'intensité lumineuse depuis  $I_0$  jusqu'à  $I$ , c'est-à-dire la diminution de l'intensité lors de son passage à travers l'échantillon (S).

L'intégration donne l'équation appelée Loi de Lambert qui s'écrit [61]:

$$\ln \frac{I_0^\lambda}{I^\lambda} = k_s^\lambda l \quad \text{Equation (3)}$$

En passant aux logarithmes décimaux cette dernière équation s'écrit [61]:

$$A_\lambda = \log \frac{I_0^\lambda}{I^\lambda} = \frac{k_s^\lambda}{2.302} l = \varepsilon_s^\lambda l \quad \text{Equation (4)}$$

Nous appelons  $A_\lambda$  "absorbance" et  $\varepsilon_s^\lambda$  "coefficient d'absorption" à la longueur d'onde  $\lambda$  du milieu S.

Nous pouvons parler aussi de transmission au milieu d'absorbance en utilisant le pourcentage de la lumière transmise [61]

$$T_\lambda = \frac{I^\lambda}{I_0^\lambda} \times 100 \quad \text{Equation (5)}$$

Nous obtiendrons ainsi [61]:

$$A = \log \frac{100}{T} \quad \text{Equation (6)}$$

Toutes ces relations ne sont pas valables uniquement pour l'absorption atomique, mais également elles sont valables aussi pour l'absorption moléculaire où nous utilisons la relation connue sous le nom de loi de Beer-Lambert [61] :

$$A = \varepsilon^\lambda C l \quad \text{Equation (7)}$$

Les unités utilisées dans cette relation sont ( $\text{mol.l}^{-1}$ ) pour la concentration, (cm) pour la longueur et ( $\text{l.cm}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ ) pour le coefficient d'absorption molaire. L'absorbance n'a pas d'unité.

**Domaine de validité de la loi de Beer-Lambert :** La loi de Beer-Lambert s'applique pour des radiations monochromatiques et elle est valide pour des solutions suffisamment diluée pour ne pas modifier les propriétés des molécules.

La loi de Beer-Lambert peut avoir des déviations et leurs origines sont :

- Physico-chimique : si la concentration en soluté est très élevée, il peut y avoir des interactions ainsi qu'une modification de l'indice de réfraction de la solution et cela peut varier le coefficient d'absorption molaire.

- Instrumentale :

- La lumière n'est pas suffisamment monochromatique, c'est-à-dire si la largeur de la bande spectrale incidente n'est pas suffisamment petite par rapport à la largeur de la bande spectrale d'absorption, l'absorbance n'est plus une fonction linéaire de la concentration
- En sortant du monochromateur, le rayonnement peut être contaminé par la lumière diffuse qui provient du montage et par conséquent il engendre le même problème de polychromaticité de la lumière incidente.
- La non linéarité du détecteur avec la lumière.

### b) La spectroscopie dans le domaine UV-Visible

Nous trouvons plusieurs techniques qui reposent sur l'interaction des radiations lumineuses et de la matière dans le domaine du proche UV au très proche IR, nommé le domaine "UV-Visible", soit entre 180 et 1100 nm. L'absorbance des composés dans le proche UV et le visible est exploitée de manière importante en analyse quantitative par l'application de la loi de Beer-Lambert.

Cette méthode est très commune dans les laboratoires. Elle est basée sur la capacité des molécules à absorber des radiations lumineuses de longueur d'onde déterminée. Ces rayonnements peuvent parfois provoquer des ruptures de liaisons ou, plus généralement, ils provoquent des transitions électroniques entre les différents niveaux d'énergie des molécules.

- **Le spectre d'absorption :** Le spectre présente très peu de bandes comparativement au spectre IR mais leur allure est beaucoup plus large. Généralement, l'abscisse présente la longueur d'onde et l'ordonnée peut être A, T ou  $\epsilon$  [62].

Dans le domaine UV-visible, la bande d'absorption est caractérisée par sa position en longueur d'onde  $\lambda_{\max}$  (nm) ou en nombre d'onde ( $\text{cm}^{-1}$ ) et par son intensité reliée au coefficient d'extinction molaire  $\epsilon_{\max}$  [62].

- **Absorption et couleur :** La couleur d'un composé est le complémentaire de ce qu'il absorbe (bleu-orange, jaune-violet, vert-rouge) [62].

### c) Spectromètre d'absorption moléculaire

Un spectromètre d'absorption moléculaire comporte généralement : une source de rayonnement, un monochromateur, un échantillon, un détecteur et un système de traitement de signal [61].

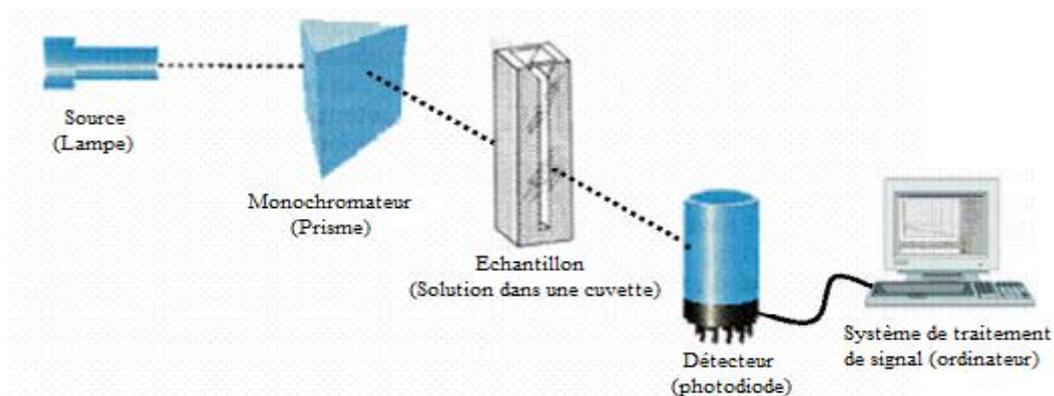


Figure 3 : le spectromètre d'absorption moléculaire [61]

### i. Sources

Pour la spectroscopie d'absorption UV-Visible, nous utilisons des sources qui fournissent un spectre continu et intense. Nous trouvons par exemple :

Les lampes à hydrogène ou à deutérium : en utilisant ces lampes, nous obtenons un spectre continu dans l'UV par une décharge électrique dans le gaz à basse pression. Cette décharge produit une molécule excitée d'énergie quantifiée  $E_{H_2}$  qui se dissocie en deux atomes animés d'énergie cinétique  $E_{CH_1}$  et  $E_{CH_2}$ . Le phénomène est accompagné de l'émission d'un photon  $h\nu$  dans l'UV. Nous avons donc  $E_{H_2} = E_{CH_1} + E_{CH_2} + h\nu$ .

Avec cette source, le spectre est continu entre 160 et 375nm et l'excitation peut être provoquée de différentes façons :

- Une décharge entre deux électrodes d'aluminium entre lesquelles une différence de potentiel de 2000 à 6000V est appliquée, un refroidissement par eau est requis pour les puissances élevées.
- Formation d'un arc entre filament recouvert d'oxyde et chauffé par effet Joule, et une électrode métallique placée à un potentiel élevé.

Les lampes à filament de tungstène : C'est la source la plus utilisée dans le visible dont la distribution énergétique est proche de celle d'un corps noir. Nous notons que la température normale d'un filament de tungstène est de 2875K et qu'en pratique, ce filament est utilisée avec des lampes dites "halogènes" dans lesquelles la présence de l'halogène joue un rôle protecteur ce qui permet d'augmenter la durée de vie de la lampe.

Les lampes à arc ou xénon : L'émission est produite par une décharge dans le gaz. Le spectre est continu entre 250 et 600nm avec un maximum à 500 nm. Nous pouvons obtenir des

intensités très élevées et dans certains cas, la décharge est intermittente grâce à l'interposition d'une capacité.

## **ii. Monochromateur**

Le rôle du monochromateur est d'isoler la raie de résonance en éliminant les autres raies de la source, il est généralement constitué de :

- Une fente d'entrée pour donner une forme et des dimensions bien définies au faisceau.
- Un collimateur d'entrée, qui peut être une lentille ou un miroir, de distance focale permettant la production d'un faisceau parallèle de radiation.
- Un disperser généralement constitué d'un réseau ou d'un prisme
- Un élément de focalisation, qui peut être une lentille ou un miroir, de distance focale dont le rôle est de former l'image de la fente d'entrée sur une surface plane (plan focal)
- Un plan focal

Tous ces éléments doivent être centrés sur un axe optique.

## **iii. Echantillons**

En général, il s'agit de substances en solution. Nous utilisons des cellules, d'épaisseur fixe et calibrée, dont la longueur doit être connue avec grande précision pour pouvoir déterminer les concentrations via la loi de Beer-Lambert. Ces cellules doivent être faites avec un matériau transparent à la longueur d'onde à utiliser (UV = quartz, visible = verre ou plastique) et leurs faces doivent être optiquement planes. De ce fait, deux critères importants sont à considérer pour choisir le solvant de l'échantillon. Ce sont la transparence et les interactions éventuelles solvant soluté.

## **iv. Détecteurs**

Pour les détecteurs nous trouvons souvent l'utilisation des Photomultiplicateurs dont le rôle est d'amplifier le signal de sortie. Le photomultiplicateur, sous l'impact d'un photon, ajoute à l'émission électronique de la photocathode un processus d'amplification par une émission d'électrons secondaires en utilisant des dynodes successives placées à des potentiels positifs de l'ordre de 100V l'une par rapport à l'autre. Ces dynodes, ou anodes secondaires, sont recouvertes d'un dépôt de nature voisine à celle de la photocathode, mais mieux adaptées à l'émission secondaire d'électrons sous l'impact d'électrons incidents. Chaque photoélectron expulsé de la photocathode est accéléré et focalisé sur la première dynode, et de celle-ci, s'en expulsent en moyenne 2 à 6 électrons qui viennent frapper la deuxième et ainsi de suite. Après la dernière dynode, les électrons sont collectés sur l'anode. Un photomultiplicateur de 9

dynodes fournit une amplification supérieure à  $10^6$  par rapport au courant photocathodique. De ce fait, le principe est plutôt simple : un photon incident éjecte un électron de la photocathode. L'électron est ensuite dirigé vers la première dynode par une électrode du collimateur. La dynode, étant à un potentiel positif de 100V, permet d'accélérer l'électron et ce dernier produira, alors, l'éjection de deux autres électrons ou plus lors de son impact. Ce processus se répète à chaque dynode et par conséquent le signal s'amplifie.

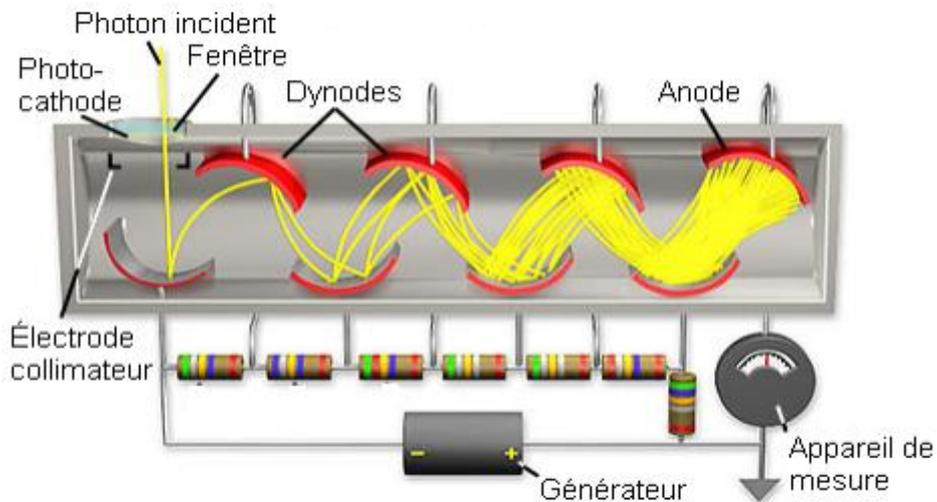


Figure 4 : Schéma d'un photomultiplicateur [61]

Les photomultiplicateurs présentent plusieurs avantages surtout lorsque les signaux de sorties étudiés sont faibles. Parmi ces avantages nous pouvons citer la linéarité, la stabilité, le temps de réponse et la sensibilité.

#### d) Principe de la méthode DOAS

Dans la troposphère, le spectre solaire est modifié à cause des phénomènes d'absorption et de diffusion (diffusion Rayleigh et Mie) [63]. La diffusion Rayleigh contribue à l'atténuation de l'intensité du spectre solaire dans le domaine ultraviolet puisque l'intensité de ce phénomène est proportionnelle à  $1/\lambda^4$ . Quant à la diffusion Mie, elle est liée à la présence des aérosols et son intensité est nettement moins dépendante de la longueur d'onde. A cause de ces deux derniers phénomènes, l'intensité en absence d'espèces absorbantes ou diffusantes, ne peut pas être mesurée dans le domaine ultraviolet (ligne en pointillé dans la figure 5) [64].

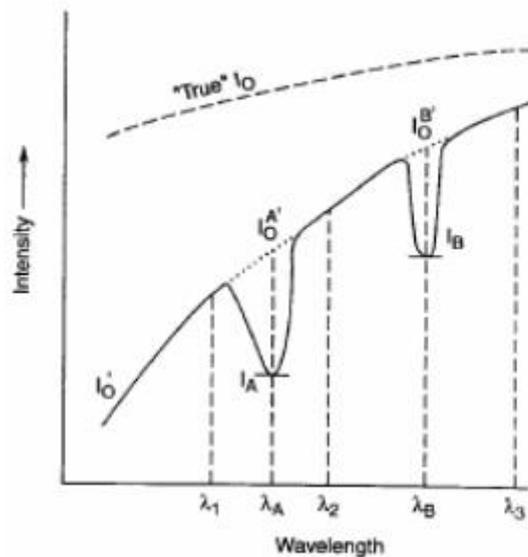


Figure 5 : Spectre analysé par la méthode DOAS [64]

La figure précédente montre la base de cette technique pour une seule espèce qui a des bandes étroites aux longueurs d'onde  $\lambda_A$  et  $\lambda_B$  superposées à un fond lentement variable. Au lieu de mesurer le rapport  $(I_0/I)$ , impossible à obtenir en atmosphère réelle, les rapports  $(I_0^A/I^A)$  et  $(I_0^B/I^B)$  sont mesurés pour obtenir la concentration de ces espèces. Les valeurs de  $I_0^A$  et  $I_0^B$  sont estimées par interpolation polynomiale.

L'absorption optique différentielle peut être employée pour la mesure des concentrations puisque elle suit la loi de Beer-Lambert [64]:

$$A(\lambda) = \ln \left( \frac{I_0^A}{I^A} \right) = \varepsilon(\lambda) \cdot l \cdot C \quad \text{Equation (8)}$$

$\varepsilon$  présente le coefficient d'extinction et  $l$  le trajet parcouru par la lumière

La relation entre  $I$  et le vrai  $I_0$  peut être exprimée comme [64]:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) A e^{(-l[\sum \sigma_i(\lambda)C_i + \varepsilon_R(\lambda) + \varepsilon_M(\lambda)])} \quad \text{Equation (9)}$$

Dans cette équation,  $A(\lambda)$  présente le facteur d'atténuation caractéristique du système de mesure,  $\varepsilon_R$  et  $\varepsilon_M$  sont les coefficients d'extinction équivalents dus aux diffusions de Rayleigh et de Mie des gaz et des particules et  $\sigma_i$  correspond à la section efficace d'absorption. Toutes les sections efficaces d'absorption ( $\sigma_i$ ) d'un gaz à l'état de trace simple peuvent être décomposées en définissant des sections efficaces pour chaque type d'absorption. Nous parlons

donc, de la contribution de la partie structurée (absorption différentielle) et la contribution de la bande large qui varie lentement avec les longueurs d'onde (absorption non résolue). En pratique, nous trouvons beaucoup plus qu'un seul composant dans une gamme de longueurs d'onde données et la valeur de  $I_0'$  peut difficilement être estimée par interpolation linéaire. L'utilisation de cette technique en analyse quantitative nécessite le recours à des algorithmes de déconvolution des spectres, qui permettent d'isoler l'absorption spécifique d'un constituant de l'absorption globale due à l'atmosphère.

La figure 6 [65] montre un spectre typique mesuré en DOAS dans l'air après correction du niveau du fond atmosphérique. Nous trouvons des spectres de référence des gaz qui contribuent au spectre atmosphérique. Dans ce cas particulier, il y a ceux du  $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ , et  $HCHO$ . Après décomposition du spectre atmosphérique, nous obtenons un spectre résiduel présentant des absorbances très faibles.

La figure 7 [64] montre un schéma des composants d'un système DOAS. La source lumineuse peut être une source artificielle (lampe à arc sous haute pression de Xénon, lampe incandescente de quartz-iode ou laser à bande large) ou une source naturelle comme le soleil, la lune ou les étoiles. Le faisceau traverse l'échantillon d'air, avec un système simple passage ou un système multipassage en utilisant par exemple une cellule de White [66]. En suite, le faisceau rentre dans le spectromètre qui disperse le rayonnement. La détection, en fonction de la longueur d'onde de la lumière dispersée, est effectuée en utilisant généralement un photomultiplicateur et une rangée de photodiodes (PDA) ou une caméra CCD (Charge Coupled Device).

L'avantage important de la méthode DOAS est sa sensibilité élevée pour les espèces qui répondent à l'exigence d'avoir des bandes d'absorption étroites dans l'UV-Visible. En outre, parce que les coefficients d'absorption optique différentiels sont des propriétés spectroscopiques fondamentales de la molécule, les mesures n'ont pas besoin d'être calibrées sur le terrain. Par contre, elles nécessitent de longs trajets optiques (des dizaines de Km) afin d'éviter certaines limites de détection.

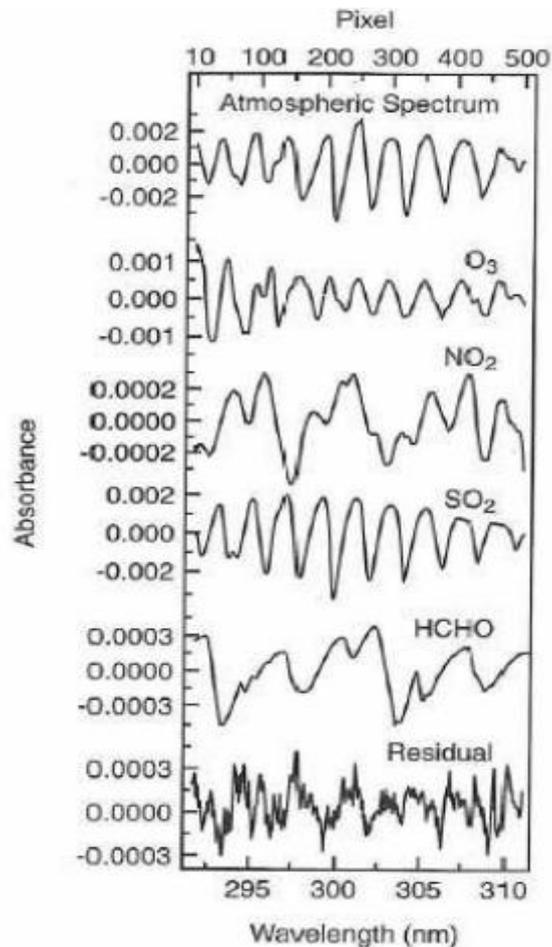


Figure 6 : Spectre typique atmosphérique mesuré en DOAS et spectres de référence des gaz qui contribuent au spectre atmosphérique [65]

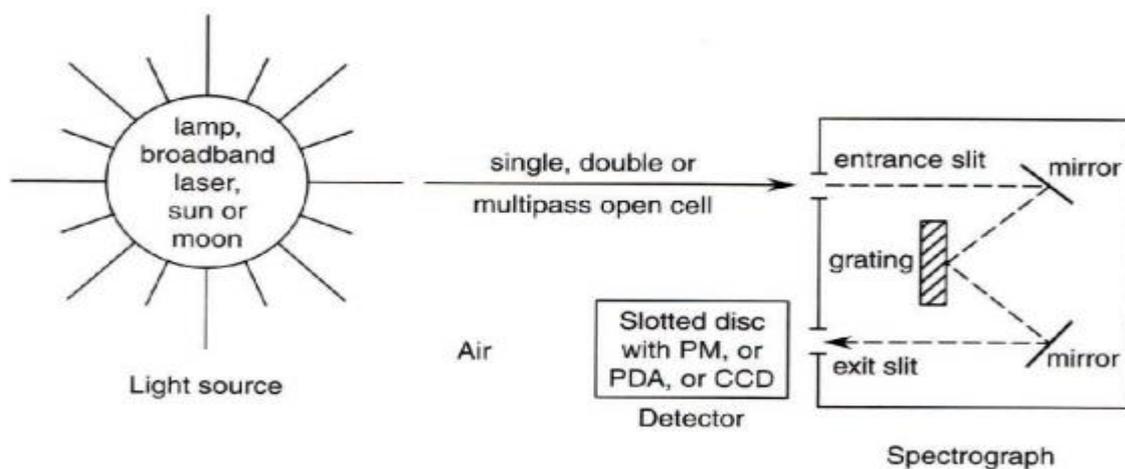


Figure 7 : Schéma des composants d'un DOAS [64]

Le tableau ci-dessous [65] montre des limites de détection par la méthode DOAS, utilisant une barrette de photodiode, de quelques gaz d'intérêt atmosphérique pour une longueur de trajet de 5 km.

**Tableau 5 : Limites de détection par la méthode DOAS de quelques gaz pour un trajet optique de 5 km [65]**

<b>Gaz</b>	<b>Domaine spectral (nm)</b>	<b>Limites de détection</b>
O <sub>3</sub>	220-230	0.17-1.4 ppb
SO <sub>2</sub>	290-310	0.05-0.1 ppb
NO <sub>2</sub>	330-500	0.1-0.2 ppb
HCHO	300-360	0.2-0.5 ppb
HONO	340-400	0.03-0.06 ppb

L'utilisation de la méthode DOAS peut avoir d'autres limites comme les mauvaises conditions climatiques telles que la présence d'une turbulence atmosphérique importante, le temps pluvieux et l'humidité. Ces facteurs accentuent le phénomène d'atténuation dans le domaine UV-visible et ceci diminue la fiabilité des mesures.

#### **4. Etude expérimentale**

##### **a) Le dispositif**

Lors de notre travail nous avons étudié expérimentalement le phénomène de dispersion des polluants atmosphériques en se basant sur des mesures in-situ faite avec la méthode DOAS. Cette étude a été réalisée en collaboration avec l'agence nationale de protection de l'environnement (ANPE) qui nous a fourni les données collectées à partir d'un système installé à une hauteur de 5m au centre ville de Tunis et dont les coordonnées sont (36° 49' N, 10° 11' E). Les mesures de notre étude ont été prises sur les différentes périodes de la journée (matinée, après midi et soir) tout en couvrant, aussi, les différentes saisons de l'année. Dans notre travail nous avons étudié la variation de la concentration des polluants suivants : NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>x</sub>, le benzène et le toluène.

L'agence nationale de protection de l'environnement utilise le système OPSIS AR500/AR600 qui contient une source de lumière xénon, un récepteur, une fibre optique et un analyseur. L'émetteur envoi, à l'aide d'un miroir, un faisceau parallèle à l'axe optique. Ce faisceau, après avoir entré en contact avec les polluants atmosphériques, sera réfléchi par un système de réflexion placé à une distance de 300m pour atteindre l'analyseur. A cette étape, le faisceau

passer par un système de diffraction (un spectromètre) puis, un ordinateur pour analyser les spectres obtenus.

### **b) Résultats expérimentaux et discussion**

La figure 8 montre les variations de la concentration du benzène et du toluène durant toute l'année 2010. L'origine de ces deux polluants est principalement les émissions des gaz des moteurs automobiles. Il est important donc d'étudier leur dispersion car le site de nos mesures est caractérisé par un grand trafic routier.

Nous avons remarqué que la moyenne mensuelle pour le Toluène a passé de  $18\mu\text{g}/\text{m}^3$  en Février (saison d'hiver) à  $29\mu\text{g}/\text{m}^3$  en Août (saison d'été). Cette variation était due aux conditions climatiques puisque en hiver nous avons moins d'ensoleillement et plus de précipitations qui limitent la dispersion des polluants dans l'atmosphère.

Emis à partir des automobiles, à des hauteurs très basses par rapport au sol, la concentration du Toluène dans l'atmosphère diminue en hiver et augmente en été. Avec le même aspect et avec un rapport à peu près de 2.5, Le Benzène passe de  $7\mu\text{g}/\text{m}^3$  à  $13\mu\text{g}/\text{m}^3$  [67].

Les concentrations annuelles du toluène et du benzène au centre ville, où les mesures ont été faites, sont  $23\mu\text{g}/\text{m}^3$  et  $9\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivement. Notons que la moyenne nationale enregistrée en 2010 pour le Benzène était de l'ordre de  $5\mu\text{g}/\text{m}^3$  tandis que l'objectif à atteindre était  $2\mu\text{g}/\text{m}^3$  ce qui représente un dépassement national de 2.5 de la valeur souhaitée.

Pour mieux comprendre la dispersion des concentrations du Benzène et du Toluène, nous avons affiché leur variation sur une période d'une semaine à chaque saison (Figure 9). La première courbe (a) montre la variation de concentration des deux polluants entre 04/12/2010 et 10/12/2010 ce qui convient à la saison de l'hiver, et la deuxième courbe (b) montre la variation de concentration en été entre 18/08/2010 et 22/08/2010. Nous avons remarqué dans cette figure qu'il y avait une similarité entre les allures des courbes de variation de concentration des deux polluants donc nous pouvons conclure qu'ils avaient le même caractère dispersif. Ceci s'explique par le fait qu'ils appartiennent à la même famille des hydrocarbures aromatiques et qu'ils ont la même source d'émission.

Dans la figure 10 nous avons réduit l'étude sur la journée du 06/12/2010, c'est-à-dire sur une durée de 24h. Nous avons remarqué que dans la période dans laquelle nous avons eu le maximum de concentration du Benzène et du Toluène,  $32\mu\text{g}/\text{m}^3$  et  $100\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivement,

l'atmosphère était stable selon les données prises de la base de données NOAA ARL data (www.arl.noaa.gov).

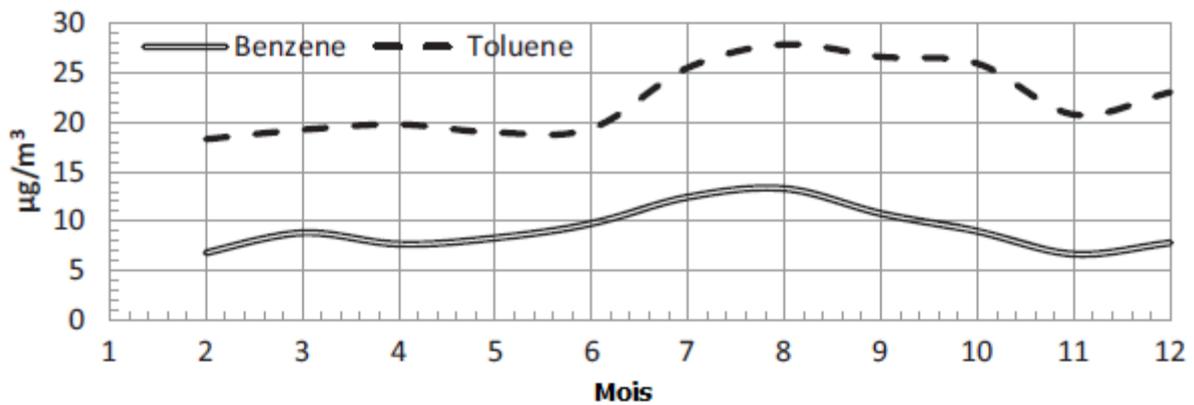


Figure 8 : La variation du Benzène et du Toluène suivant les différentes saisons au centre ville de Tunis [67]

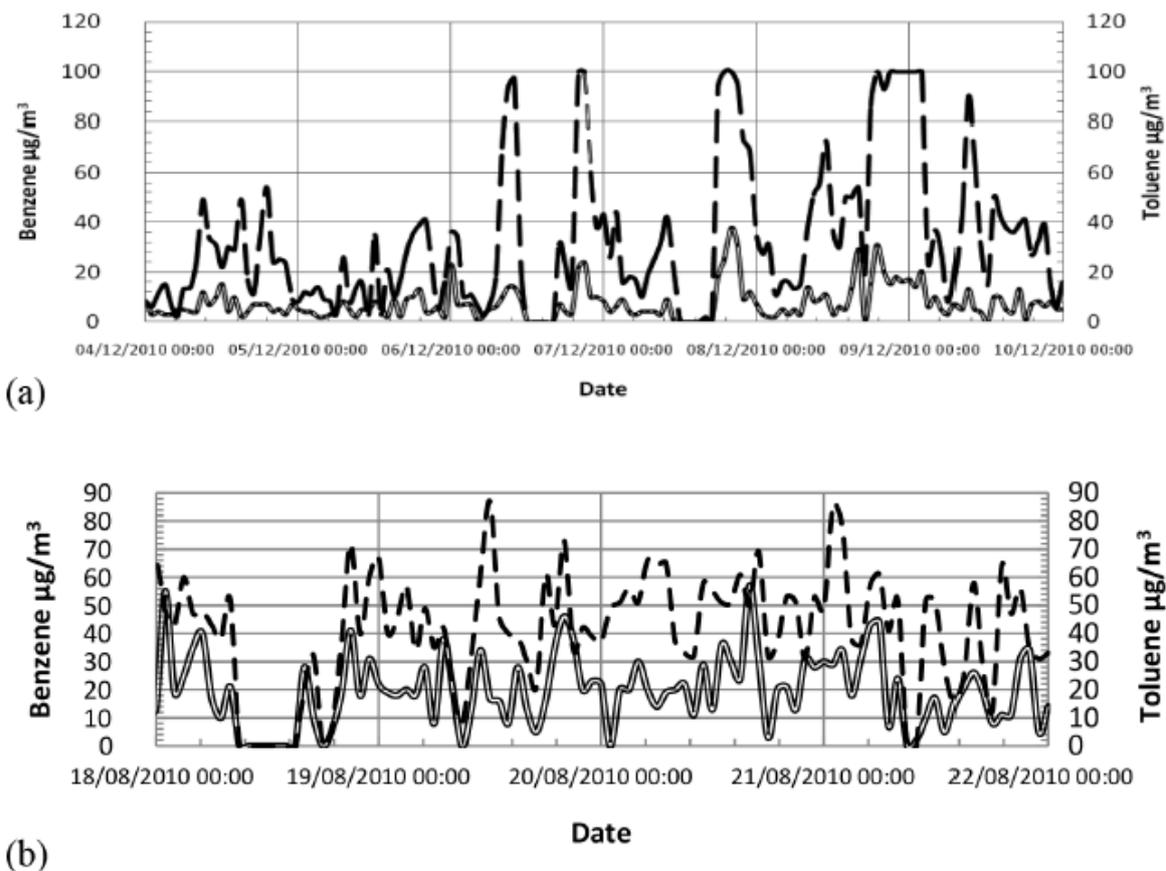


Figure 9 : (a) Les mesures de la période (04-10/12/2010), (b) les mesures de la période (18-22/08/2010) des concentrations du Benzène (ligne continue) et du Toluène (ligne interrompue) [67]

La figure 11 montre que les variations des concentrations du  $\text{NO}_2$  et du  $\text{SO}_2$  avaient la même allure. Le maximum enregistré (plus que  $180\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour le  $\text{NO}_2$  et plus que  $140\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour le  $\text{SO}_2$ ) coïncide avec le 06/12/2010. C'est-à-dire, dans des conditions d'atmosphère stable.

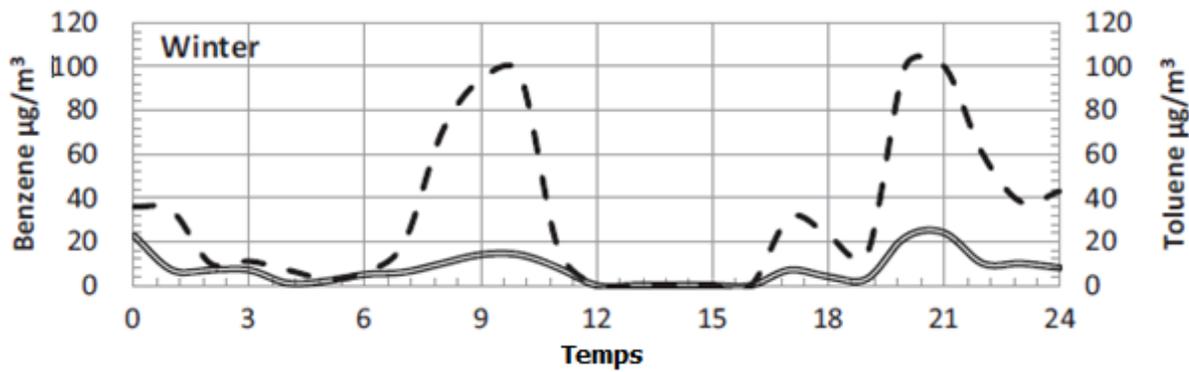
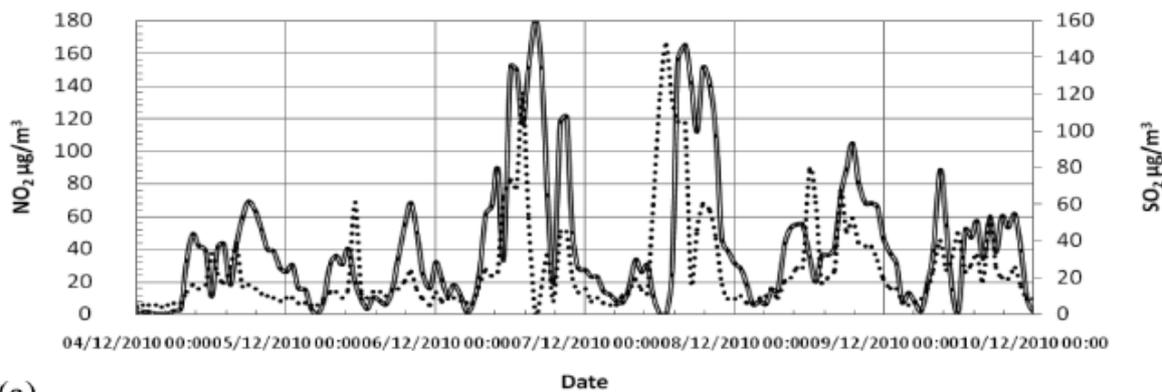
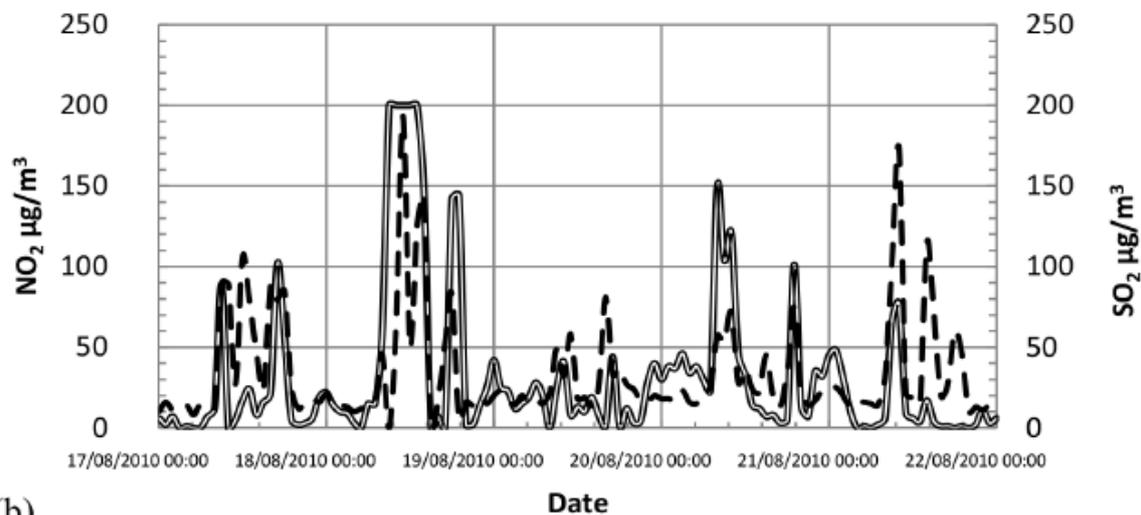


Figure 10 : La variation de la concentration du Benzène (ligne continue) et du Toluène (ligne interrompue) le 06/12/2010 [67]



(a)



(b)

Figure 11 : (a) Les mesures de la période (04-10/12/2010), (b) les mesures de la période (17-22/08/2010) des concentrations du NO<sub>2</sub> (ligne continue) et du SO<sub>2</sub> (ligne interrompue) [67]

Nous notons que la saison de l'hiver est caractérisée par des taux de concentrations de NO<sub>2</sub> et de SO<sub>2</sub> élevés (180µg/m<sup>3</sup> et 160µg/m<sup>3</sup> respectivement), dépassant ainsi les limites considérées. Outre que le trafic automobile important, ce dépassement s'explique aussi par la forte utilisation des chauffages domestiques en hiver et le manque d'ensoleillement qui a influencé la stabilité de l'atmosphère et ceci avait un impact direct sur la dispersion de ces polluants. Pour la saison

d'été, où l'activité photochimique est accentuée, nous avons remarqué que les concentrations sont aussi élevées.

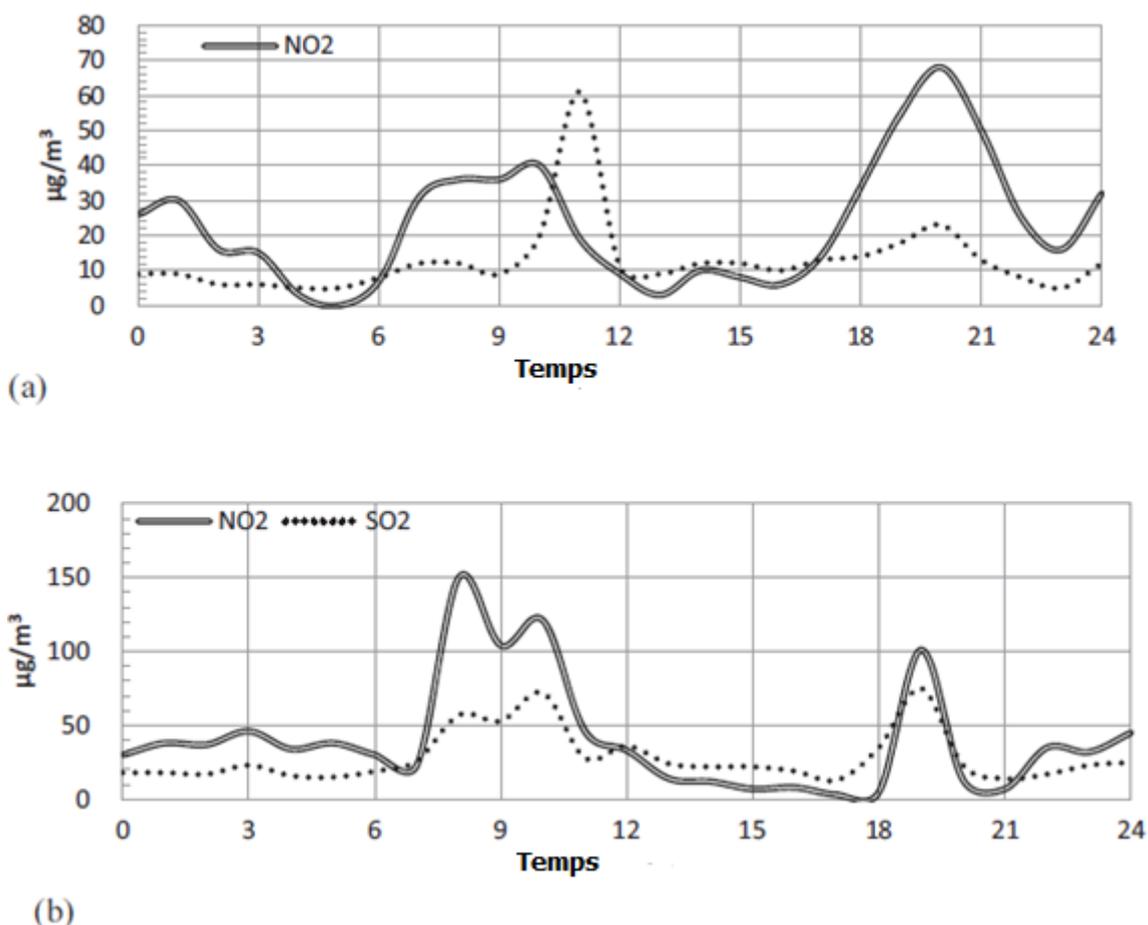
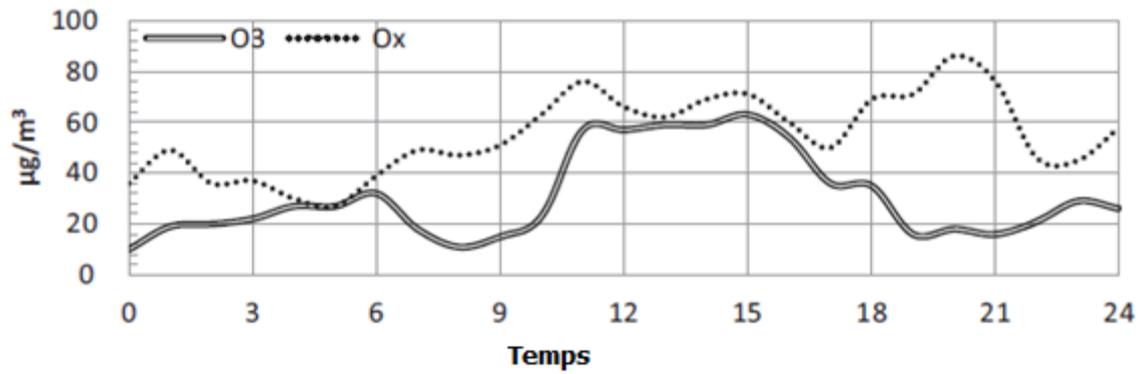


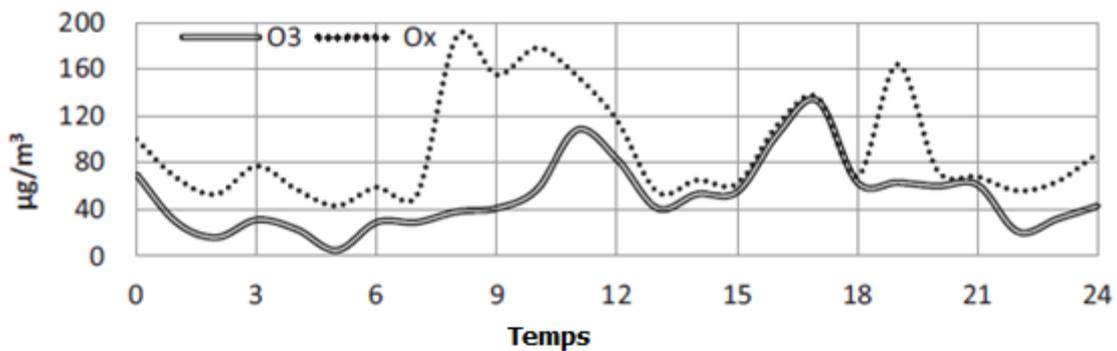
Figure 12 : L'évolution des concentrations du SO<sub>2</sub> et du NO<sub>2</sub> durant les journées du 05/12/2010 (a), et 20/08/2010 (b) [67]

Les pics de concentration du SO<sub>2</sub> et du NO<sub>2</sub> 60µg/m<sup>3</sup> et 40µg/m<sup>3</sup> respectivement, durant la saison d'hiver en prenant le 05/12/2010 comme référence (Figure 12), étaient observées dans les heures de la matinée et du soir. Ces intervalles du temps sont caractérisés par la baisse de température de la surface de la terre et par suite par une stabilité de l'atmosphère qui ne favorise pas la dispersion verticale des polluants. Durant l'après midi, ces taux de concentrations diminuent jusqu'à atteindre 15µg/m<sup>3</sup> comme maximum pour cette période de la journée.

Pour le NO<sub>2</sub> nous observons dans la journée du 05/12/2010 deux pics, l'une dans la matinée et l'autre durant la nuit (40µg/m<sup>3</sup> et 70µg/m<sup>3</sup>). A cause de l'activité photochimique et de l'ensoleillement, le taux de concentration du NO<sub>2</sub> diminue jusqu'à atteindre 10µg/m<sup>3</sup>. Nous notons que les pics observés étaient accentués par l'accroissement du trafic automobile au début de ces périodes.



(a)

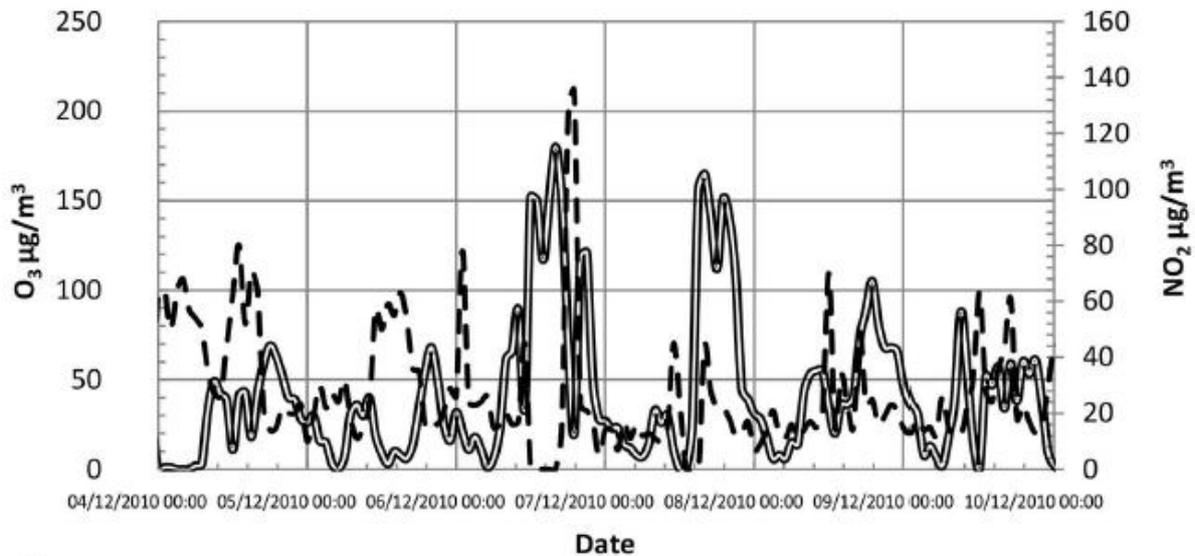


(b)

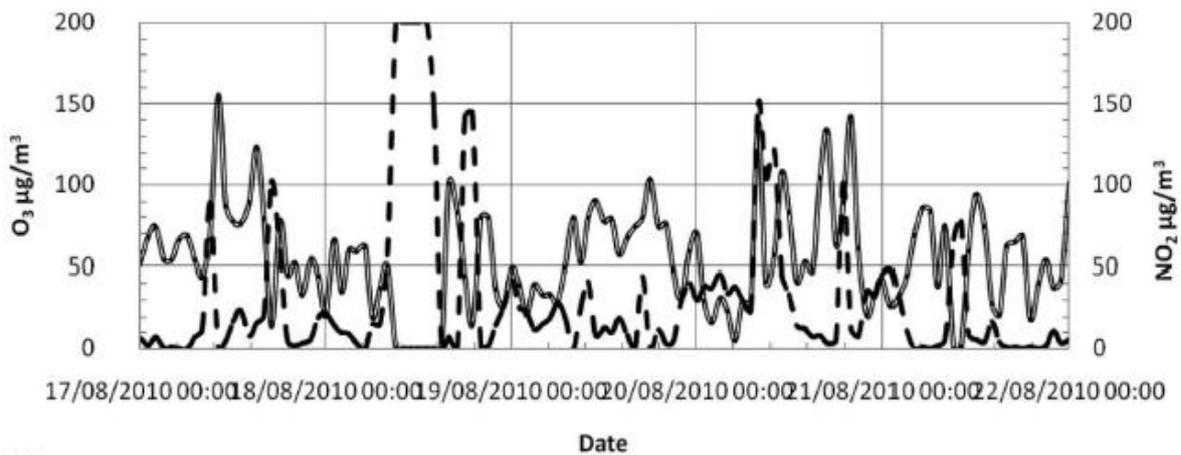
**Figure 13 : La variation des concentrations du O<sub>3</sub> et du Ox (NO<sub>2</sub>+ O<sub>3</sub>) durant les journées du 05/12/2010 (a), et 20/08/2010 (b) [67]**

Les figures 13 et 14 montrent la variation du NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> et O<sub>x</sub> (NO<sub>2</sub>+O<sub>3</sub>). Nous remarquons que dans la matinée nous avons un pic qui peut atteindre 150µg/m<sup>3</sup> et qui coïncide avec les heures de pointe dans lesquelles nous avons plus d'émission anthropogéniques. Le deuxième pic (plus de 100µg/m<sup>3</sup>) qui apparait le soir, coïncide avec l'augmentation du trafic automobile et la concentration du O<sub>3</sub> dans l'atmosphère. Ce dernier se dissocie et entre en réaction chimique avec les molécules du NO pour former plus du polluant NO<sub>2</sub>.

En été la concentration du O<sub>3</sub> est élevée par rapport à celle en hiver. Ceci est dû à l'activité photochimique qui croît avec l'ensoleillement. La concentration d'ozone est faible au début de la journée puis augmente en formant un pic dans l'après midi (plus de 140µg/m<sup>3</sup>). L'accumulation de l'ozone s'arrête avec la présence des molécules NO dont leur réaction produit de nouvelles molécules de NO<sub>2</sub>. Ces réactions chimiques expliquent la complémentarité entre la variation du O<sub>3</sub> d'une part et du NO<sub>2</sub> d'autre part dans certains intervalles de temps de la journée (Figure 13).



(a)



(b)

**Figure 14 : (a) Les mesures de la période (04-10/12/2010), (b) les mesures de la période (17-22/08/2010) des concentrations du O<sub>3</sub> (ligne continue) et du NO<sub>2</sub> (ligne interrompue) [67]**

Nous notons aussi un autre facteur à prendre en considération qui est l'agitation thermique qui augmente avec l'ensoleillement. Quand les radiations solaires sont intenses, le phénomène de convection s'accroît et par suite la distribution de l'ozone est plus homogène. La nuit, le mélange vertical diminue et les molécules du NO n'arrivent pas à bien réagir avec les molécules O<sub>3</sub> qui forment ainsi le réservoir d'ozone atmosphérique.

Durant la journée, l'agitation thermique et l'activité photochimique réintroduisent les molécules du O<sub>3</sub> du réservoir d'ozone dans l'atmosphère et les font réagir avec les émissions anthropiques pour déclencher à nouveau les cycles des réactions entre le O<sub>3</sub>, NO et le NO<sub>2</sub>.

Pour les  $O_x$ , défini dans notre étude comme la somme du  $O_3$  et du  $NO_2$ , le maximum de concentration en été dans le centre ville de Tunis a été enregistré le matin (plus de  $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) et en après midi (plus de  $140\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) à cause de l'activité photochimique élevée durant ces deux périodes des journées de l'été. Durant le soir, la diminution du  $O_3$  coïncide avec l'apparition du deuxième pic de la journée du  $NO_2$  et ceci explique pourquoi le taux de concentration des  $O_x$  reste élevé jusqu'à ce que le  $NO_2$  baisse de nouveau.

En hiver, et à cause des faibles radiations solaires, nous n'avons pas une activité photochimique importante et la différence de concentration entre le maximum de concentration du jour et celle de la nuit ne dépasse pas  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Figure 13).

## **5. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté d'abord les méthodes expérimentales les plus répandus dans la mesure des concentrations des polluants dans l'atmosphère. Ensuite, nous avons étudié la méthode DOAS qui était utilisée dans notre travail. Enfin, nous avons conclu ce chapitre par l'analyse et l'interprétation de nos résultats.

# Chapitre III : Outils mathématiques et modélisation numérique

## 1. Introduction

Pour comprendre les processus qui régissent la dispersion des polluants dans l'atmosphère, il faut bien décrire les caractéristiques des phénomènes observés. Dans la première partie qui constitue la base indispensable de l'étude de la qualité de l'air nous avons recueilli les données expérimentales in-situ en utilisant la méthode DOAS. Cependant, ces mesures forment une représentation discrète de la dispersion atmosphérique des polluants à travers des points de mesures. Pour améliorer la description de ces phénomènes, il sera intéressant d'utiliser des outils de modélisation et ceci s'effectue généralement en suivant différentes approches qui sont : la simulation en laboratoire (utiliser des maquettes, des souffleries, des cuvettes, etc.), la simulation numérique, ou les deux à la fois.

Notre travail a été enrichi avec une simulation numérique en utilisant le logiciel ANSYS. Dans ce chapitre, nous étudierons d'abord les outils mathématiques qui constitueront, par suite, notre base de la modélisation numérique.

## 2. Les équations physiques utilisées dans la modélisation numérique

### a) Présentation du problème et hypothèses :

Notre problème principal est l'étude de l'interaction entre un polluant émis à partir d'une source quelconque et l'atmosphère. Pour ce faire, nous avons choisi un cas simple schématisé par un panache émis, avec une vitesse et une température initiales, à partir d'une cheminée. L'écoulement sera considéré tridimensionnel, faiblement compressible, turbulent et stationnaire en moyenne.

### b) L'équation de conservation de la masse

L'équation de la conservation de masse est l'une des équations primordiales dans la résolution numérique de tous les types de problèmes de la mécanique des fluides. Dans notre cas, cette équation s'écrit [68]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad \text{Equation (10)}$$

$\rho$  : la masse volumique du fluide

$i=1,2,3$  respectivement pour  $x,y$  et  $z$

### c) L'équation de conservation de la quantité de mouvement

L'équation de conservation de la quantité de mouvement peut s'écrire sous la forme suivante [68]:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho f_i \quad \text{Equation (11)}$$

Avec :

$p$  : la pression statique

$u$  : la vitesse du fluide

$f_i$  : les forces volumiques

$\tau_{ij}$  : la contrainte visqueuse qui s'exprime par la forme suivante

$$\tau_{ij} = \mu \left[ \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

$\mu$  : la viscosité dynamique du fluide

### d) L'équation de conservation de l'énergie

L'équation de conservation de l'énergie peut s'écrire de la façon suivante [68]:

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \phi + \beta T \frac{dp}{dt} \quad \text{Equation (12)}$$

Avec :

$C_p$  : la capacité calorifique du fluide

$\lambda$  : la conductivité thermique du fluide

$\beta$  : le coefficient d'expansion volumique

$\phi$  : les sources internes de dissipation d'énergie

### e) L'équation de conservation des espèces

Dans le cas d'existence de plusieurs espèces chimiques dans le même problème. L'équation de conservation des espèces s'applique sur chacune d'elles. Pour une espèce noté 'm', nous pouvons écrire [68]:

$$\frac{\partial(\rho C^m)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j C^m)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho D^m \frac{\partial C^m}{\partial x_j} \right) \quad \text{Equation (13)}$$

Avec :

$D^m$  : le coefficient de diffusion moléculaire de l'espèce 'm'

$C^m$  : la concentration de l'espèce 'm'

### f) Equation générale

Le but du CFD est de résoudre les équations de continuité, d'énergie, de mouvement et de diffusion qui sont des équations différentielles dont les solutions sont difficiles à trouver. Pour faciliter l'étude nous utilisons une écriture générale pour les différentes équations dont les variables peuvent être U, k, T et h [68].

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U \phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad \text{Equation (14)}$$

Cette équation porte les sens suivants :

(L'échange ou l'accumulation) + (flux de convection) = (flux de diffusion) + (terme source)

$\phi$  : c'est la variable générale qui peut être la vitesse U, l'énergie cinétique de turbulence k, l'enthalpie h ou la température T et la concentration C

$\Gamma_\phi$  : le coefficient de diffusion de  $\phi$

L'écriture sous la forme générale donne l'avantage de construire une procédure numérique générale qui s'applique pour les différentes équations différentielles décrivant l'écoulement.

## 3. La discrétisation des équations différentielles

Les équations différentielles à résoudre doivent être transformées en équations algébriques dans lesquelles les variations continues des variables de l'écoulement sont représentées par des valeurs à des points discrets dans le temps et dans l'espace. Le domaine de l'écoulement se

subdivise par une grille numérique. Selon la nature et la géométrie du problème, nous utilisons généralement, une grille rectangulaire, une grille curvilinéaire et orthogonale, une grille curvilinéaire non orthogonale ou une grille à subdivision arbitraire.

#### a) Les méthodes de discrétisation

La procédure de discrétisation fait recours à des approximations aux dérivées dans le temps et dans l'espace des variables de l'écoulement à chaque nœud de la grille en fonction de ceux avoisinants.

Généralement la discrétisation se fait suivant l'une des quatre méthodes suivantes :

- La méthode des différences finies
- La méthode des volumes finis
- La méthode des éléments finis
- La méthode spectrale

Dans le domaine de l'étude des écoulements des fluides, les méthodes les plus utilisées sont la méthode des différences finies et celle des volumes finis.

Les équations discrétisées prennent la forme générale suivante [68] :

$$a_p \phi_p = \sum_j a_j \phi_j + b \quad \text{Equation (15)}$$

$\sum_j$  : représente la sommation sur les nœuds au voisinage du nœud P

$a_j$  : coefficient de l'équation qui tient compte des effets combinés de l'accumulation, le transport par convection et la diffusion du terme source dans l'équation

$b$  : représente un part du terme source  $S_\phi$

Les quatre principales méthodes de discrétisation sont basées sur la série de Taylor et la méthode des résidus.

- **La formulation en série de Taylor** : C'est la procédure la plus simple et la plus utilisée pour exprimer les dérivées dans les équations différentielles. Autour d'un nœud P, la série de Taylor nous permet d'écrire [68]:

$$\phi_{i+1} = \phi_i + \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_i \delta_x + \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}\right)_i \frac{\delta_x^2}{2!} + \dots \quad \text{Equation (16)}$$

$$\phi_{i-1} = \phi_i - \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_i \delta x + \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}\right)_i \frac{\delta x^2}{2!} - \dots \quad \text{Equation (17)}$$

Nous pouvons écrire finalement :

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_i = \frac{\phi_{i+1} - \phi_{i-1}}{2 \delta x} \quad \text{Equation (18)}$$

$$\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}\right)_i = \frac{\phi_{i+1} + \phi_{i-1} - 2\phi_i}{\delta x^2} \quad \text{Equation (19)}$$

Ces deux écritures représentent un schéma de discrétisation aux différences centrées. Nous pouvons ainsi obtenir d'autres schémas.

- **La méthode des résidus :** c'est l'une des méthodes efficaces pour la résolution des équations différentielles.

Supposant  $\bar{\phi}$  une solution approchée qui contient un nombre de paramètres ( $a_i$ ). Par exemple:

$$\bar{\phi} = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_m x^m \quad \text{Equation (20)}$$

$$L(\bar{\phi}) = R \quad \text{Equation (21)}$$

R est le résidu que nous voulons maintenir proche du zéro. Nous considérons donc une fonction de balance W telle que  $\int W \cdot R \cdot \delta x = 0$  et nous faisons l'intégration sur tout le domaine d'étude.

En utilisant une succession de fonctions de balance W nous pouvons générer plusieurs équations algébriques qui permettent d'évaluer les paramètres ( $a_i$ ) et par suite déterminer la solution de l'équation différentielle.

### i. La méthode des différences finies

La méthode des différences finies présente la méthode la plus directe pour la discrétisation des équations différentielles décrivant une variable d'écoulement  $\phi$ . Les variations de la variable à étudier sont exprimées par des fonctions des distances  $\delta x_i$  dans les différentes directions de la grille numérique choisie.

Dans le cas d'un écoulement unidimensionnel l'équation générale s'écrit [68]:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U \phi)}{\partial x} - \frac{\partial^2(\Gamma_\phi \phi)}{\partial x^2} - S_\phi = 0 \quad \text{Equation (22)}$$

Nous pouvons écrire donc [68]:

$$\rho \frac{\phi_i^N - \phi_i^0}{\delta t} + (\rho U)_p \frac{\phi_{i+1} - \phi_{i-1}}{2 \delta x} - (\Gamma_\phi)_i \frac{\phi_{i+1} + \phi_{i-1} - 2\phi_i}{\delta x^2} - (S_\phi)_p = 0 \quad \text{Equation (23)}$$

Dans cette dernière équation les dérivées partielles et temporelles ont été approximées par des différences centrées ou avancées. Nous pouvons utiliser d'autres formulations.

## ii. Méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis ou volume de contrôle est basée sur la méthode des résidus. Le domaine de calcul est subdivisée en des petits volumes de contrôle finis et il suffit de poser  $W=1$  dans un sousdomaine et nul ailleurs. L'intégration de l'équation donnant le résidu  $R$  doit être égal à zéro. La méthode des volumes finis est la plus utilisée parmi les méthodes de discrétisation dans le domaine de la mécanique des fluides parce qu'elle est basée sur la conservation locale des variables d'étude.

- **Le principe de la méthode :** dans le cas d'un écoulement à une dimension l'équation à discrétiser est [68]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho U \phi) = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x}) + S_\phi \quad \text{Equation (24)}$$

La méthode consiste à subdiviser le domaine de calcul (volume géométrique de l'écoulement) en petits volumes de contrôle tel que chaque nœud est entouré par un seul volume de contrôle.

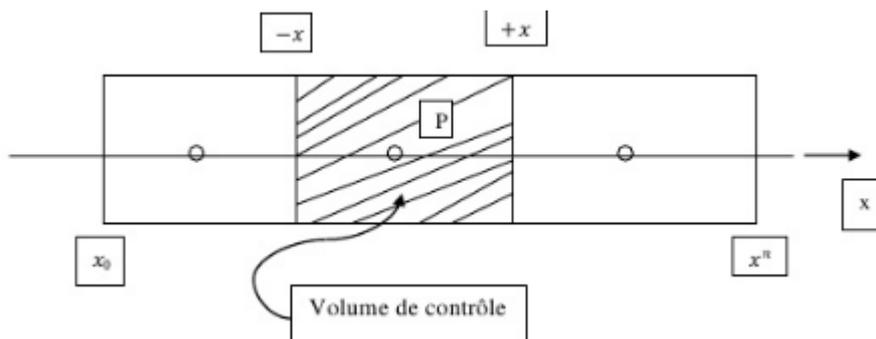


Figure 15 : Schéma du volume de contrôle utilisé dans la méthode des volumes finis [68]

L'équation est intégrable-différentielle exacte qui exprime une balance entre le flux convectif et le flux diffusif [68]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{x^-}^{x^+} \rho \phi dx + [(\rho U \phi)_+ - (\rho U \phi)_-] = \left[ (\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x})_+ - (\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x})_- \right] + \int_{x^-}^{x^+} S_\phi dx \quad \text{Equation (25)}$$

Cette approche est caractérisée par une propriété importante qui est la conservation. Pour  $s_\phi = 0$  et  $\frac{\partial}{\partial t} = 0$  le flux sortant de la face d'un volume de contrôle représente le flux entrant dans le volume de contrôle voisinant. D'où le principe de la conservation tout le long du domaine de calcul.

Nous écrivons l'équation comme suit [68]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla V\phi - \nabla(\Gamma_\phi \text{grad}\phi) = S_\phi \quad \text{Equation (26)}$$

L'intégration sur un volume de contrôle donne [68]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint \rho\phi dv + \iiint \nabla(V\phi - \Gamma_\phi \text{grad}\phi) dv = \iiint S_\phi dv \quad \text{Equation (27)}$$

A ce stade nous utilisons le théorème de Gauss pour transformer les intégrales de volume en intégrales de surfaces [68]:

$$\iiint \nabla A dv = \iint A nds \quad \text{Equation (28)}$$

L'équation s'écrit donc [68]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint \rho\phi dv + \iint (V\phi - \Gamma_\phi \text{grad}\phi) nds = \iiint S_\phi dv \quad \text{Equation (29)}$$

- **Approximation spatiale :** dans le cas d'un régime permanent ( $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ ) avec un terme source nul ( $s_\phi = 0$ ). Nous pouvons écrire [68]:

$$(\rho U \phi)_+ - (\rho U \phi)_- = (\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x})_+ - (\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x})_- \quad \text{Equation (30)}$$

Cette équation ne peut pas être résolue telle qu'elle est. Les valeurs de  $\phi$  et les dérivées le long des faces de volume doivent être exprimées en fonction des celles des nœuds avoisinants.

### b) Conditions aux limites

La présence de la diffusion rend les coordonnées spatiales en doubles directions et par suite le problème est considéré comme un problème aux frontières donc les conditions doivent être

connues. En général, les conditions aux limites se divisent en deux catégories : les valeurs prescrites aux frontières  $\phi_F$  et le gradient  $\left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_F$  qui représente les flux de diffusion.

#### 4. Modélisation de la turbulence

La résolution des équations dans le cas d'un écoulement turbulent est très compliquée. En effet, les solutions sont irrégulières dans l'espace et dans le temps. Face à cet aspect désordonné des évolutions turbulentes, la méthode la plus utilisée est l'introduction des méthodes statistiques utilisant différentes moyennes : moyennes temporelle, moyenne spatiale, moyenne stochastique, moyenne statistique ou moyenne d'ensemble.

##### a) Moyenne de Favre

C'est une moyenne classique généralement utilisée avec les écoulements à masse volumique variable. Pour une grandeur  $G$  quelconque autre que la pression et la masse volumique, si  $\overline{G}$  est la moyenne temporelle, la moyenne de Favre  $\tilde{G}$  de la grandeur  $G$  et sa fluctuation  $G''$  associée sont définies par [69]:

$$\tilde{G} = \frac{\overline{\rho G}}{\rho}, G = \tilde{G} + G'' \quad \text{Equation (31)}$$

La moyenne de Favre étant une pondération de la moyenne de Reynolds par la masse volumique, la moyenne utilisée pour la masse volumique sera toujours la moyenne de Reynolds. C'est aussi ce type de moyenne qui sera appliqué à la pression, afin de garder une consistance à la loi d'état des gaz parfaits. En décomposant ainsi les grandeurs,  $u$ ,  $p$ ,  $T$ ,  $C^m$  et  $\rho$  en leur grandeur moyenne et fluctuante, nous obtenons :

$$u_i = \tilde{u}_i + u_i'', T = \tilde{T} + T'', \rho = \tilde{\rho} + \rho'', p = \tilde{p} + p'', C^m = \tilde{C}^m + C^{m''} \quad \text{Equation (32)}$$

##### b) Moyenne de l'équation de conservation de la masse

En appliquant la moyenne de Favre à l'équation de la conservation de la masse, nous obtenons [69] :

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \left( \tilde{\rho} \tilde{u}_i \right)}{\partial x_i} = 0 \quad \text{Equation (33)}$$

### c) Moyenne de l'équation de conservation de la quantité de mouvement

En utilisant la moyenne de Favre pour décomposer la vitesse et celle de Reynolds pour la décomposition de la masse volumique et de la pression dans les équations de conservation de la quantité de mouvement, nous obtenons les équations suivantes [69]:

$$\frac{\partial \left( \overline{\rho \tilde{u}_i} \right)}{\partial t} + \frac{\partial \left( \overline{\rho \tilde{u}_j \tilde{u}_i} \right)}{\partial x_j} = - \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \overline{\tau_{ij}} - \overline{\rho u_i'' u_j''} \right) + \left( \overline{\rho_\infty} - \overline{\rho} \right) g \delta_{ij} \quad \text{Equation (34)}$$

$$\overline{\tau_{ij}} = \mu \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{Equation (35)}$$

$\overline{\rho u_i'' u_j''}$  : Contrainte turbulente

Les termes  $\overline{\rho u_i'' u_j''}$  proviennent de la non linéarité des équations de Navier-Stokes et traduisent l'interaction entre le mouvement moyen et le mouvement fluctuant.

### d) Moyenne de l'équation de conservation de l'énergie

L'application de la décomposition de Favre à l'équation de conservation de l'énergie nous conduit à l'équation suivante [69]:

$$\frac{\partial \left( \overline{\rho \tilde{T}} \right)}{\partial t} + \frac{\partial \left( \overline{\rho \tilde{u}_j \tilde{T}} \right)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} - \overline{\rho u_j'' T''} \right) \quad \text{Equation (36)}$$

### e) Moyenne de l'équation de conservation des espèces

Compte tenu de la décomposition de Favre, nous obtenons l'équation de conservation de la masse de l'espèce 'm' moyennée [69]:

$$\frac{\partial \left( \overline{\rho C^m} \right)}{\partial t} + \frac{\partial \left( \overline{\rho \tilde{u}_j C^m} \right)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho D^m \frac{\partial C^m}{\partial x_j} - \overline{\rho u_j'' C^{m''}} \right) \quad \text{Equation (37)}$$

Les flux turbulents thermique et massique sont représentés par les corrélations doubles des fluctuations de vitesse, de température et de fraction massique [69]:

$$F_T = \overline{\rho u_j'' T''}, F_{C^m} = \overline{\rho u_j'' C^{m''}} \quad \text{Equation (38)}$$

L'apparition de nouveaux termes inconnus dans les équations précédentes rend le problème ouvert. Le fait de prendre la moyenne d'une équation instantanée conduit à une perte d'informations qu'il faut compenser par des hypothèses physiques, appelées hypothèses de fermeture. L'introduction de ces hypothèses de fermeture permet donc d'obtenir un nombre d'équations égal au nombre d'inconnues.

Schématiquement, la fermeture des équations consiste à trouver une relation entre les tensions de Reynolds  $\overline{\rho u_i'' u_j''}$  et les scalaires  $\overline{\rho u_j'' T''}$  et  $\overline{\rho u_j'' C^{m''}}$ , avec les champs moyens de vitesse, de température et de fraction massique.

## 5. Fermeture du système d'équations

Les écoulements turbulents sont caractérisés par des échelles de longueur bien supérieures au libre parcours moyen des molécules composant le fluide. Le concept du milieu continu et les équations de la dynamique des fluides continuent à être applicables.

Les équations de Navier-Stokes moyennées font apparaître de nouvelles inconnues qui sont les composantes d'un tenseur appelé tenseur de Reynolds ou tenseur des contraintes turbulentes, et les composantes d'un vecteur appelé vecteur flux turbulent. La résolution du problème nécessite alors des relations supplémentaires. Il faudra donc modéliser le tenseur de Reynolds soit par de nouvelles équations, soit par une loi de comportement qui dépend alors de la nature de l'écoulement et non de la nature du fluide.

Les principales méthodes de fermeture utilisées sont la fermeture en un point qui est la plus utilisée, la seconde méthode consiste à considérer les équations différentielles régissant les corrélations en deux points où les variables sont définies dans le plan spectral et la troisième approche est la prise en compte des grandes structures de la turbulence, cette technique consiste à prendre la moyenne des équations de Navier-Stokes sur un temps plus petit que l'échelle de temps des grandes structures de turbulence de l'écoulement. Seuls les mouvements ayant une échelle de temps plus petite sont modélisés. Les deux dernières méthodes nécessitent une grande capacité de calcul.

### a) Classification des modèles de turbulence de fermeture en un point

Ces modèles étudient les équations statistiques aux dérivées partielles obtenues en moyennant les équations de Navier-Stokes. Nous obtenons alors un système ouvert. Mais ce passage

engendre une perte d'informations et il convient alors de choisir convenablement les schémas de fermeture pour qu'ils réintroduisent les informations perdues dans un nouveau système fermé que l'on pourra résoudre numériquement.

Nous pouvons classifier ces modèles suivant deux critères : nous distinguons les modèles par leur ordre et par le nombre d'équations de fermeture supplémentaire. Différents niveaux d'approximation sont considérés en commençant par les modèles à deux équations (de premier ordre) et leurs extensions aux problèmes de turbulence scalaire jusqu'aux modèles aux tensions de Reynolds (de second ordre).

### **i. Modèles du premier ordre**

Ces modèles limitent les études aux valeurs moyennes des variables de l'écoulement. Nous distinguons les modèles à :

- **Zéro équation** : ils consistent à relier les flux turbulents et les grandeurs moyennes sans introduire de nouvelles équations. Nous pouvons relier linéairement, par exemple pour un écoulement cisailé simple, les tensions de Reynolds et le gradient de vitesse, le coefficient de proportionnalité étant la viscosité turbulente (Boussinesq la supposait constante).
- **Une équation** : ces modèles ont pour avantages d'être assez simple et de prendre en compte l'histoire de la turbulence, mais le choix de l'échelle de longueur est empirique et l'extension au cas tridimensionnel est difficile.
- **Deux équations** : nous considérons dans ce cas que la viscosité turbulente dépend de deux paramètres représentatifs du phénomène. Les modèles à deux équations de transport utilisent une équation de transport pour l'échelle de l'énergie cinétique ( $k$ ) et une équation de transport pour la dissipation ( $\epsilon$ ).

### **ii. Modèles du second ordre**

Ces modèles dits à contraintes turbulentes algébriques, se distinguent des précédents par le fait que l'équation de transport des tensions de Reynolds est résolue tout comme les équations du champ moyen. Ils conviennent mieux aux écoulements avec tourbillons à forte anisotropie et permettent de ne pas surestimer l'énergie cinétique dans le cas de forts cisaillements.

Malgré le succès des modèles du premier ordre en pratique, beaucoup d'applications qui font intervenir des phénomènes complexes, exigent un niveau de modélisation plus avancé. Pour

traité ces cas, plusieurs approches ont été proposées allant des modèles à deux équations anisotropes aux modèles avancés aux tensions de Reynolds.

#### **b) Les modèles de turbulence utilisés dans la modélisation numérique**

Les modèles de turbulence sont rendus nécessaires par les échelles de longueurs très petites (échelles de Kolmogorov de l'ordre de  $10^{-4}$ ), qui rendent impossibles des simulations directes dans la plupart des applications parce qu'elles dépassent les capacités actuelles des ordinateurs. Pour contourner ce problème, des grandeurs moyennes sont utilisées.

L'influence de la turbulence sur l'écoulement moyen est constituée par le terme de la dérivée du tenseur de Reynolds. Pour 'fermer' le nouveau système d'équations ainsi créé, les logiciels de simulations proposent plusieurs modèles de turbulence dont les plus utilisés sont :

- Le modèle k- $\epsilon$  standard [70]
- Le modèle RNG k- $\epsilon$  [71]
- Le modèle étendu k- $\epsilon$  [72]
- Le modèle des tenseurs de Reynolds RSM (Reynolds Stress Models)

Les trois premiers modèles, dits de premier ordre, sont à deux équations utilisant une relation linéaire entre le coefficient de diffusion turbulente, la viscosité turbulente et le taux de déformation moyenne. Ils fournissent donc une viscosité turbulente isotrope. Ces modèles sont basés sur les équations de transport de l'énergie cinétique turbulente et de sa dissipation. En revanche, le RSM, modèle de second ordre, possède une fermeture à sept équations qui permettent de relâcher l'hypothèse d'isotropie et nécessite plus de données en entrée. Quant au modèle k- $\epsilon$ , il permet une description de la turbulence à haut nombre de Reynolds. Assurant une économie en espace et temps, ce modèle a été utilisé depuis de nombreuses années dans plusieurs domaines d'application. Le modèle RNG k- $\epsilon$  possède un domaine d'application encore plus vaste. En particulier, il conduit à des meilleurs résultats pour les écoulements avec des déformations et des courbes importantes, les écoulements instationnaires et les écoulements à faible nombre de Reynolds. Le modèle étendu k- $\epsilon$  est également susceptible de fournir une performance supérieure pour des écoulements comportant la rotation, les couches limites sous des gradients de fortes pressions défavorables, la séparation et la recirculation. Pour notre étude, nous avons choisi le modèle k- $\epsilon$  standard pour la fermeture du système d'équations. Le choix a été fait suite à plusieurs travaux qui confirment que le modèle k- $\epsilon$  standard représente le modèle le plus précis, le plus stable et le plus utilisé dans ce genre de problème [73].

### Le modèle standard k-ε :

Ce modèle est basé sur l'hypothèse de Boussinesq qui permet de relier les contraintes de Reynolds aux grandeurs moyennes de l'écoulement par l'équation [69]:

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left[ \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \left( \tilde{\rho} k + \mu_t \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad \text{Equation (39)}$$

Avec :

$\mu_t$  : viscosité turbulente

$\delta_{ij}$  : symbole de Kronecker

k : énergie cinétique de turbulence

Les flux turbulents fluctuants thermique et massique sont donnés par les expressions suivantes [69]:

$$-\rho \overline{u_i T} = \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i} \quad \text{Equation (40)}$$

$$-\rho \overline{u_i C^m} = \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \tilde{C^m}}{\partial x_i} \quad \text{Equation (41)}$$

Par définition, k vaut la moitié de la trace du tenseur de Reynolds [69]:

$$k = \frac{\overline{u_i u_i}}{2} \quad \text{Equation (42)}$$

Nous rappelons que l'expression de la dissipation visqueuse turbulente est [69]:

$$\varepsilon = 2\nu \overline{S_{ij} S_{ij}} \quad \text{Equation (43)}$$

Où  $S_{ij}$  est le tenseur des vitesses de déformation donné par l'équation [69]:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{Equation (44)}$$

Dans le modèle k-ε, la viscosité turbulente a pour expression [69]:

$$\mu_t = C_\mu \frac{\overline{\rho k^2}}{\varepsilon} \quad \text{Equation (45)}$$

Où  $C_\mu$  est une constante.

Si nous négligeons la gravité et en régime stationnaire, les valeurs de k et ε sont déterminées en tout point par la résolution des équations de transport [69]:

$$\frac{\partial \left( \overline{\rho u_j k} \right)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \overline{\rho \varepsilon} \quad \text{Equation (46)}$$

$$\frac{\partial \left( \overline{\rho u_j \varepsilon} \right)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{\varepsilon 3} G_b) - C_{\varepsilon 2} \overline{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad \text{Equation (47)}$$

Où  $G_k$  est le terme de production de k dû aux gradients moyens tel que [69]:

$$G_k = \mu_t \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \quad \text{Equation (48)}$$

$G_b$  est le terme de production dû à la flottabilité donné par l'équation [69]:

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i} \quad \text{Equation (49)}$$

Les constantes empiriques  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $C_{\varepsilon 3}$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$  sont données dans le tableau suivant [69]:

**Tableau 6 : Les valeurs des constantes utilisées par défaut dans le modèle k-ε [69]**

$C_\mu$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
0.09	1.44	1.92	1.0	1.0	1.3

## 6. Résolution numérique

L'étude de dispersion des polluants dans l'atmosphère dépend de plusieurs facteurs tels que les conditions climatiques, les propriétés physico-chimiques des différents écoulements qui interagissent, le nombre de sources et les concentrations des différents polluants émis, l'accumulation des dépôts, la géographie du milieu d'étude, etc. En plus de l'étude des réactions chimiques qui ne rentrent pas dans le cadre de notre étude, tous ces facteurs rendent la simulation très compliquée. Dans notre travail, ce qui nous intéresse le plus sont principalement les phénomènes physiques qui apparaissent lors de l'éjection d'un panache dans l'atmosphère, nous avons choisi donc de faire l'étude d'un cas général qui peut être adapté par la suite à différents cas réels selon leurs paramètres spécifiques.

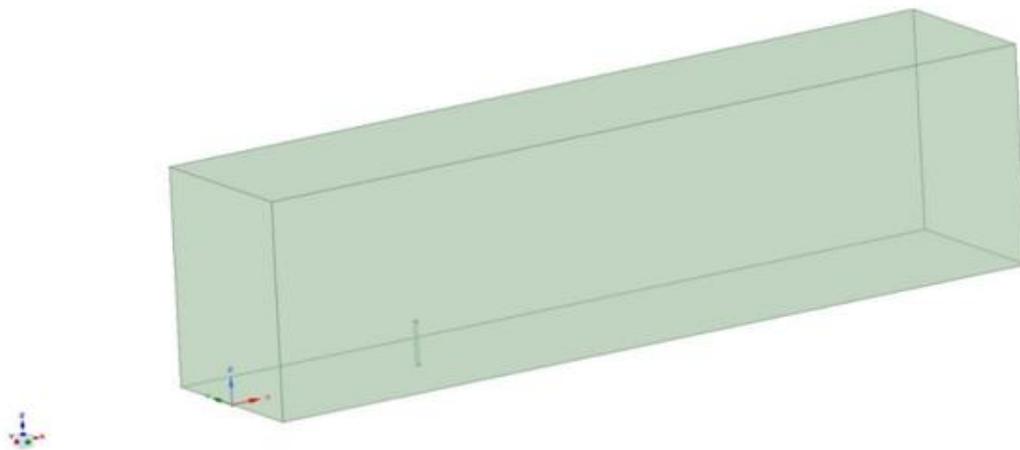


Figure 16 : Le domaine d'étude

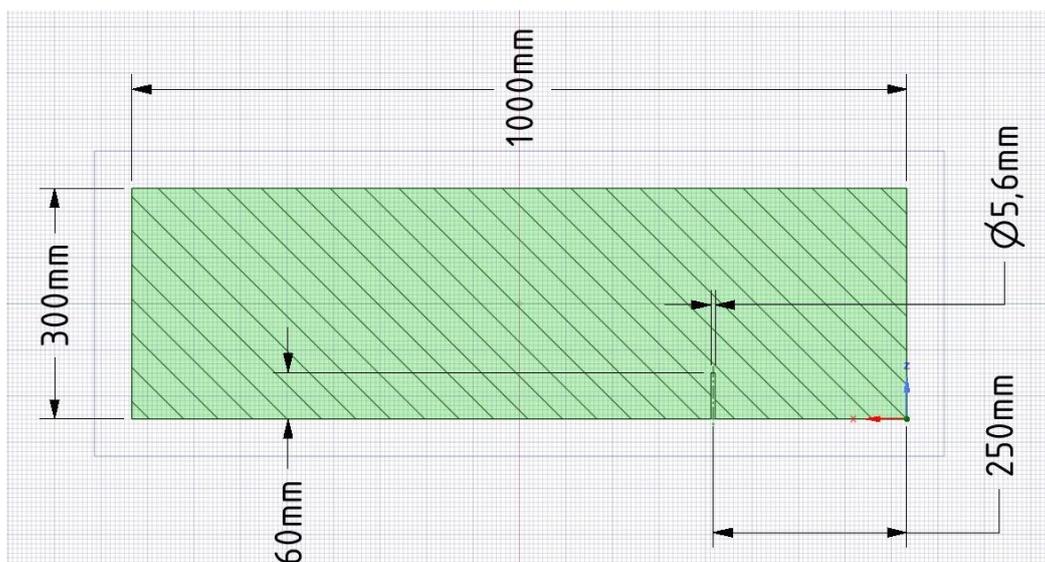
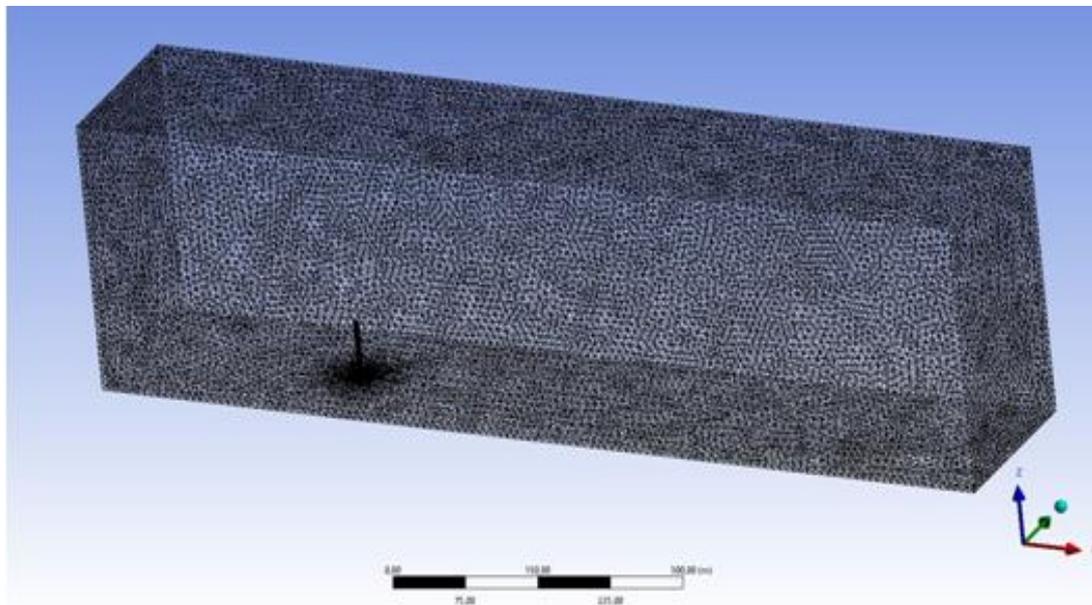


Figure 17 : Les dimensions du domaine d'étude

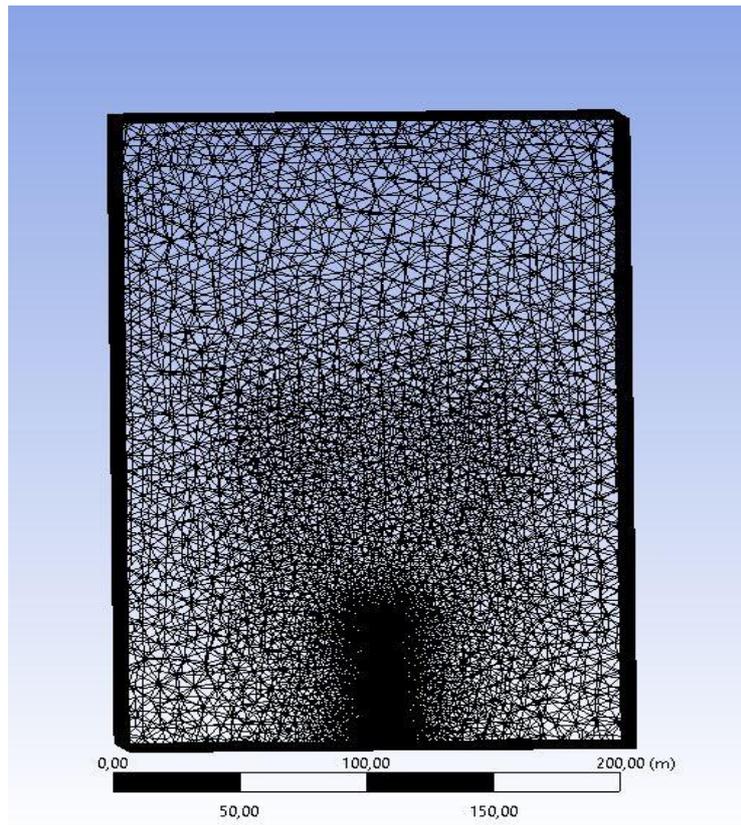
Pour se faire, nous avons fait appel aux outils informatiques pour résoudre les équations étudiées précédemment. A savoir, l'équation de conservation de la masse, l'équation de la quantité de mouvement, l'équation de l'énergie et l'équation de conservation des espèces. La méthode de discrétisation utilisée était la méthode des volumes finis qui, d'après la recherche bibliographique, est la plus adéquate aux phénomènes de la mécanique des fluides.

En utilisant le logiciel ANSYS, nous avons fait l'étude sur un domaine en forme d'un parallélépipède dont les dimensions sont 1000m de longueur (suivant l'axe x), 300m d'hauteur (suivant l'axe z) et 200m de largeur (suivant l'axe y). La cheminée est située à 250m de l'entrée du domaine et au milieu de la distance latérale. Cette dernière est caractérisée par une hauteur de 60m, un diamètre intérieur de 5m et un diamètre extérieur de 5.6m (figure 16 et Figure 17).



**Figure 18 : Vue générale sur le maillage utilisé**

Afin de faire les calculs numériques et aboutir aux résultats, il faut passer par plusieurs étapes. D'abord, nous avons dessiné le domaine d'étude. Ensuite, nous avons passé au maillage en utilisant le type hexagonal non uniforme. Le maillage était plus serré aux alentours de la cheminée car cette partie représente la zone où nous avons les plus grands gradients des variables tels que la température, la vitesse, les concentrations, etc. Dans cette zone, nous avons des variations importantes et très rapides d'où l'intérêt de l'utilisation d'un maillage plus serré qui nous permet d'avoir des résultats plus précis (Figure 18 et Figure 19). Par suite, nous avons passé à l'étape de l'introduction des paramètres de calcul en fixant les entrées et les sorties.



**Figure 19 : Vue sur le maillage utilisé aux alentours de la cheminée**

Pour l'entrée de l'air ambiant la vitesse était fixée à 10m/s perpendiculairement à la surface (figure 20), la température à 30°C et les concentrations des polluants sont nulles. A la sortie de la cheminée (figure 21), le panache était éjecté perpendiculairement au plan de l'orifice de la source avec une vitesse de 20m/s et une température de 100°C et avec les fractions massiques suivantes : 30% NO<sub>2</sub>, 30% SO<sub>2</sub>, 30% CO<sub>2</sub> et 10% CO. Nous notons que dans la bibliographie les chercheurs travaillent généralement avec un rapport de vitesses, appelé « R », des deux fluides qui interagissent (R représente la vitesse du jet à la sortie de la source divisée par la vitesse de l'air ambiant). Nous avons travaillé donc avec un rapport R=2. Le reste du domaine (figure 22) était mis sous des conditions atmosphériques normales en négligeant tout transfert thermique et massique avec les parois de la cheminée et le sol. Enfin, nous avons choisi le régime transitoire pour tenir compte de l'évolution temporelle et nous avons fixé le temps de calcul à 100s qui est le temps nécessaire pour balayer tout le domaine d'étude à partir de la surface de l'entrée de l'air ambiant jusqu'à la surface de sortie du mélange des deux fluides. Le critère de convergence des solutions a été fixé à  $1.e^{-4}$ .

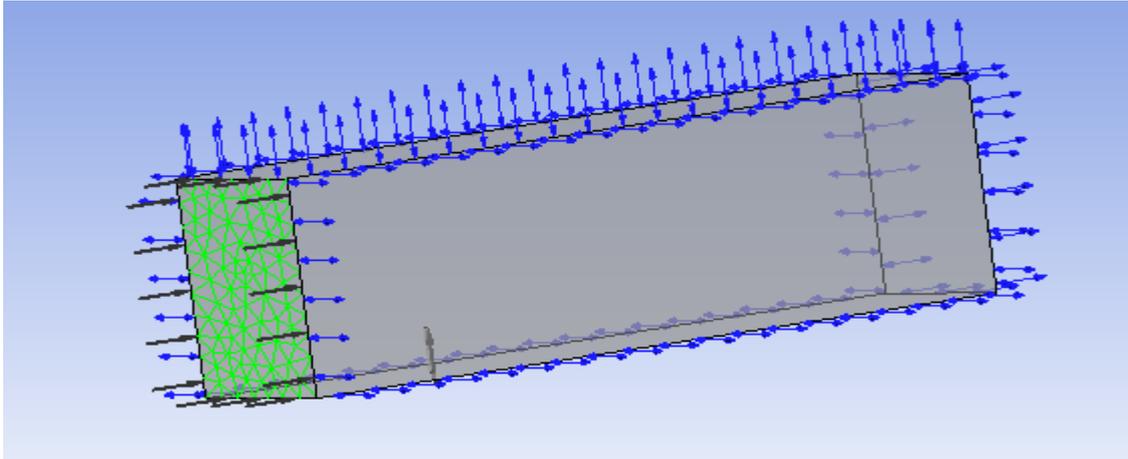


Figure 20 : La surface d'entrée de l'air ambiant

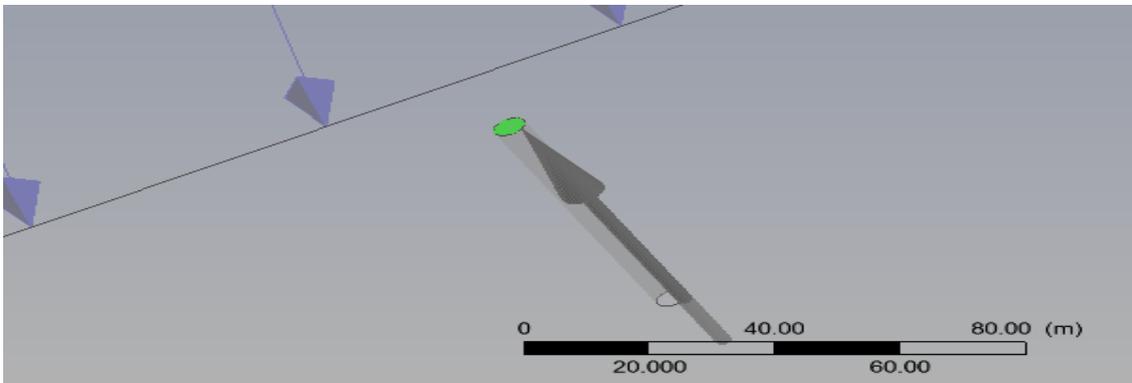


Figure 21 : La surface de sortie de la cheminée

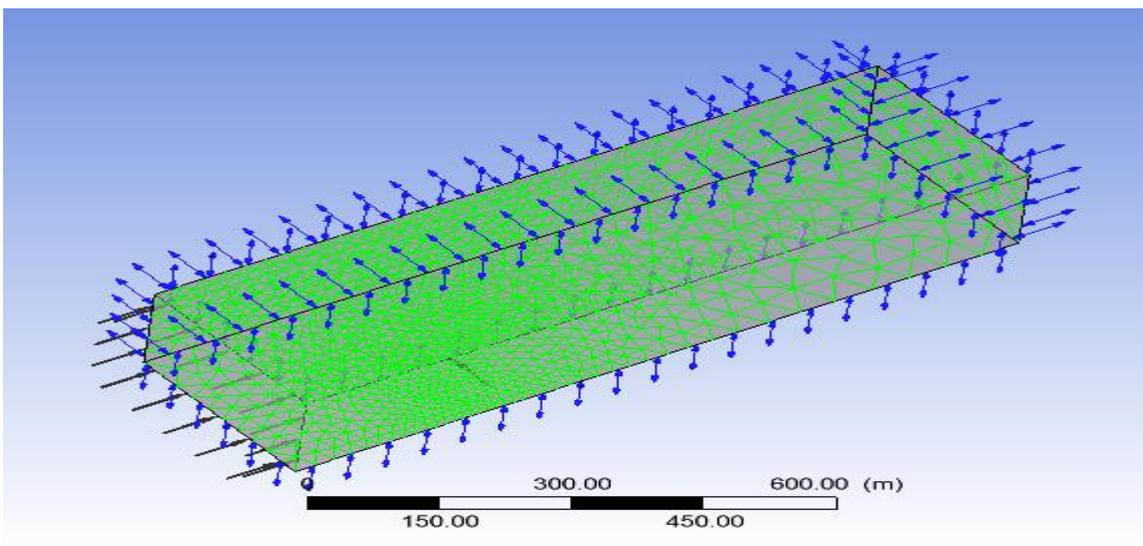


Figure 22 : Les surfaces de sorties du domaine

## **7. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons vu les principaux outils nécessaires pour mieux comprendre les méthodes de simulations utilisées ainsi que la démarche à suivre pour aboutir aux résultats numériques. D'abord, nous avons présenté les différentes équations différentielles appliquées à notre problème. Ensuite, nous avons parlé des méthodes de discrétisation. Puis, nous avons étudié les méthodes de modélisation de la turbulence ainsi que celles de fermeture des systèmes d'équations. Enfin, nous avons passé à la modélisation numérique du problème en utilisant le logiciel ANSYS.

## Chapitre IV : Interprétation des résultats numériques

### 1. Introduction

En réalité, le phénomène de dispersion des polluants dans l'atmosphère est très complexe où plusieurs paramètres doivent être étudiés tel que l'ensoleillement, la stabilité de l'atmosphère et les réactions chimiques possibles, l'angle de la direction de l'air par rapport à l'axe de la cheminée, le nombre des sources fixes et leurs emplacements, le nombre des sources mobiles, etc. Tous ces paramètres ne peuvent pas être pris avec précision ce qui peut engendrer un écart important entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques. Les études numériques de la dispersion des polluants dans l'atmosphère rentrent toujours dans un cadre estimatif.

Dans notre travail, nous avons décortiqué le problème et nous nous sommes intéressés au cas des polluants émis à partir d'une source fixe qui était schématisée par une cheminée. Nous avons pris un cas simple dans lequel l'atmosphère est neutre et la cheminée émet les polluants en continu et sans aucun obstacle aux alentours.

Dans le chapitre précédent nous avons discuté, en première étape, les différents modèles ainsi que les équations physiques utilisées dans la modélisation numérique. Puis, nous avons décrit notre domaine d'étude, citer les différents paramètres pris en considération et donner la démarche suivie pour aboutir aux résultats. Nous passerons donc dans ce chapitre à l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus en utilisant le logiciel ANSYS.

### 2. Le comportement d'un jet dans l'atmosphère

Avant de rentrer dans les détails de la dispersion atmosphérique d'un panache éjecté à partir d'une cheminée, il est important d'avoir une idée sur le comportement global d'un tel phénomène.

#### a) Les différentes étapes de dispersion des polluants

Lors de la dispersion atmosphérique nous distinguons trois étapes importantes. La première étape est caractérisée par l'émission des polluants qui sont généralement soit naturels soit anthropiques, la deuxième étape est la phase du transport des polluants sous l'effet du vent et la troisième étape représente la phase du dépôt qui s'effectue sous deux formes appelées « dépôt sec » et « dépôt humide » (Figure 23).

La dispersion des polluants dans les basses couches est liée à plusieurs facteurs essentiels tels que les conditions météorologiques (vitesse du vent, stabilité thermique de l'atmosphère,...), la

structure du paysage (nature du sol, obstacle, relief, ...), le type des particules (lourdes ou légères) et les caractéristiques de la source (hauteur, taille, température, composition chimique, ...) [74].



Figure 23 : Les différentes étapes de dispersion de polluants [74]

**b) L'effet de la turbulence sur la dispersion atmosphérique**

Tableau 7 : L'effet des tourbillons sur la forme du panache [74]

<p>a) Cas de petits tourbillons : accroissement régulier de la section du panache</p>
<p>b) Cas de grands tourbillons : oscillations du panache</p>
<p>c) Combinaison des deux cas de tourbillons : oscillations du panache combinées avec l'accroissement régulier de sa section</p>

Le phénomène de la turbulence qui apparaît lors de l'émission des polluants a un effet important sur leur dispersion dans l'atmosphère et ceci est remarquable à partir du changement de la forme du panache selon les différents types des tourbillons (tableau 7).

### c) L'effet de la stabilité atmosphérique

L'évolution de la stabilité atmosphérique au cours d'une journée se calcule à partir de l'écart à une situation adiabatique (gradient de  $\theta$ ). L'atmosphère peut être neutre, stable ou instable.

- Pour le cas de l'atmosphère neutre nous avons [74]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial z} = \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{ad} \quad \text{Equation (50)}$$

- Pour le cas de l'atmosphère stable [74]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} > 0 \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial z} > \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{ad} \quad \text{Equation (51)}$$

- Pour le cas de l'atmosphère instable [74]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} < 0 \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial z} < \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{ad} \quad \text{Equation (52)}$$

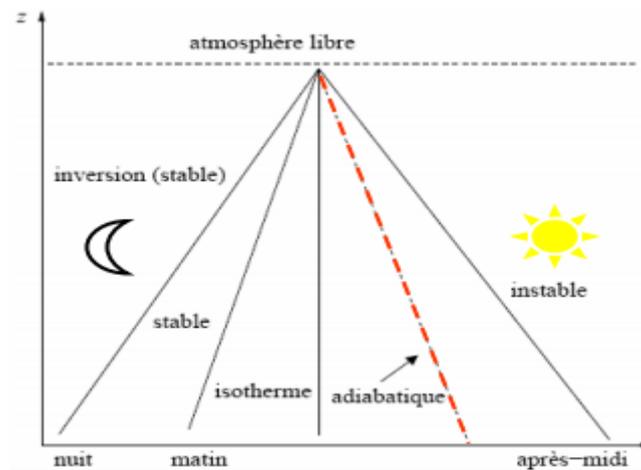


Figure 24 : Profil idéalisé de température et évolution de la stabilité de la CLA au cours d'une journée [74]

Le degré de stabilité atmosphérique peut être aussi caractérisé en comparant le gradient vertical de température au gradient des vitesses (Le nombre de Richardson) [74]

$$Ri_f = - \frac{P_h}{P_k} \quad \text{Equation (53)}$$

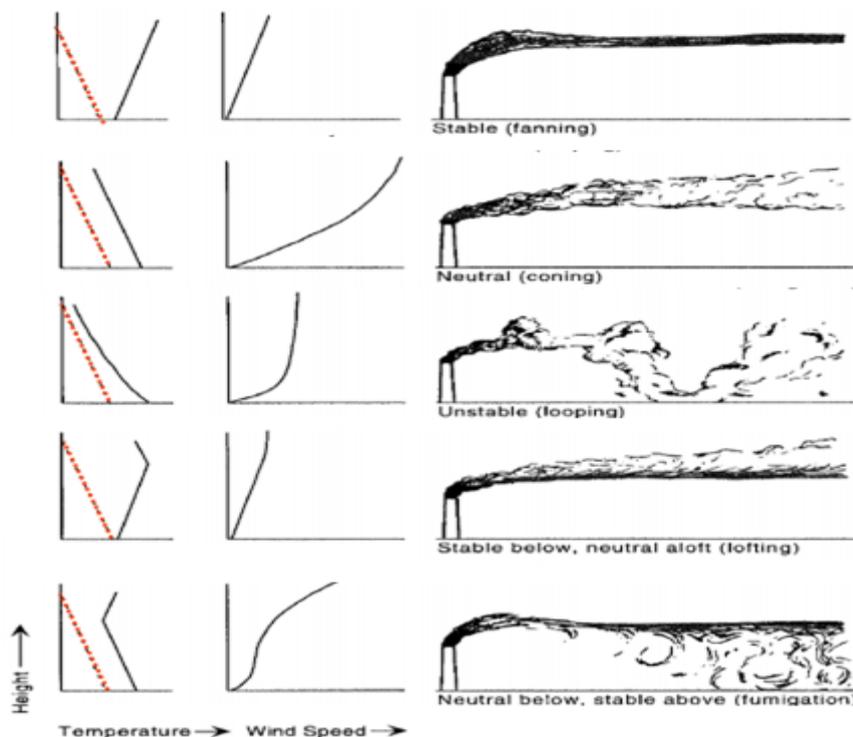
$P_h$  : Production thermique par effet de flottabilité

$P_k$  : Production mécanique par effet de cisaillement

Par définition  $Ri = \frac{N^2}{S^2}$

$S^2 = \frac{\partial u}{\partial z}$  : C'est le cisaillement vertical du vent

$N^2 = \frac{g}{T} \left[ \left( \frac{dT}{dz} \right) - \Gamma \right]$  **Equation (54)** [74]: Fréquence de Brunt-Väisälä définie comme la différence entre le gradient vertical de la température et le gradient adiabatique. C'est la fréquence d'oscillation d'une particule soumise à un déplacement vertical. Si  $N^2$  est strictement négative alors l'atmosphère sera instable, si  $N^2$  est nulle alors l'atmosphère est neutre et si  $N^2$  est strictement positive alors l'atmosphère est stable.



**Figure 25 : L'influence de la stabilité atmosphérique sur la dispersion d'un panache pour un cycle de 24h**  
[74]

Dans le premier cas de la figure précédente nous avons une forte stabilité avec un vent modéré. Cette situation correspond à trois période qui sont la nuit, peu après le coucher du soleil et peu après le lever du soleil. Dans ce cas, les transferts turbulents sont beaucoup plus faibles dans la direction verticale que dans la direction transversale et le panache peut être animé de fluctuations latérales importantes. Dans le deuxième cas qui correspond généralement à un temps nuageux, nous avons une condition de stabilité neutre avec un vent fort. Dans ce cas, la turbulence est d'origine dynamique. Dans le troisième cas, correspondant généralement à un temps clair avec un rayonnement solaire intense, nous avons une forte instabilité avec un vent

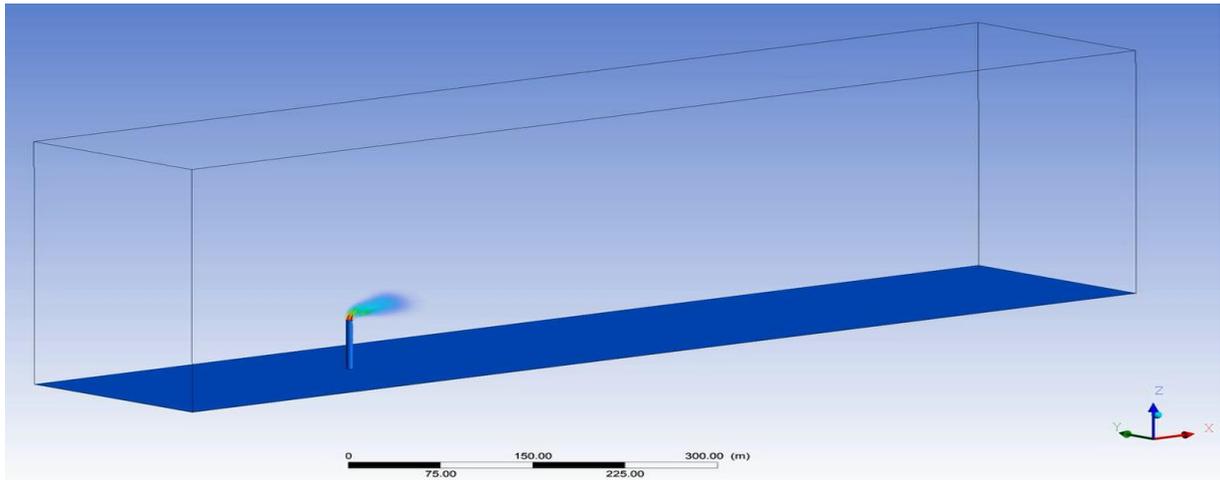
faible. La couche limite atmosphérique est, alors, instable et les polluants se dispersent rapidement. Dans le quatrième cas de figure qui coïncide généralement avec la fin de l'après midi, nous avons une inversion au dessous du sommet de la cheminée et instabilité ou neutralité au dessus. C'est un cas très favorable puisque la plus grande partie du panache est diffusée verticalement vers le haut et la diffusion vers le sol est bloquée par la couche d'inversion. Dans le dernier cas, qui s'observe généralement dans la matinée, nous avons une inversion au dessus du sommet de la cheminée avec instabilité ou neutralité au dessous. Dans cette situation, les parties les plus basses sont diffusées vers le sol assez rapidement alors que la partie supérieure reste intacte et tout le panache reste dans la couche instable. Dans ces conditions, la limite inférieure de la couche stable joue le rôle d'un plafond fictif et la couche d'inversion bloque les phénomènes d'ascendance. C'est le phénomène de fumigation qui est très défavorable [74].

### **3. Interprétation des résultats**

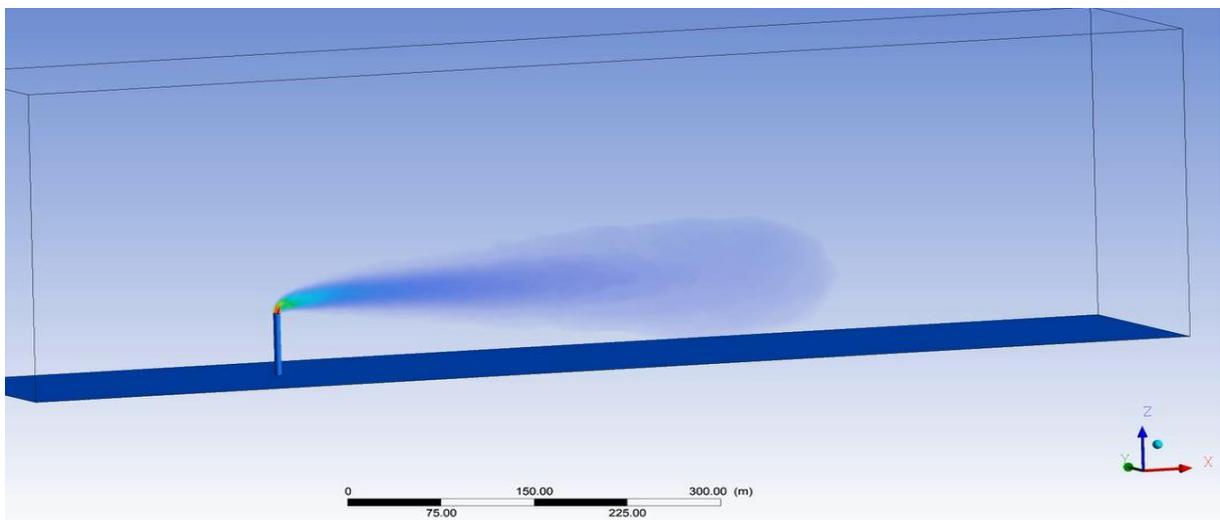
#### **a) Aspect général de la dispersion du panache**

Après avoir fait tous les calculs nécessaires, nous avons obtenus des résultats qui sont en accord avec ceux trouvés dans la recherche bibliographique. Conformément aux plusieurs études, nous distinguons les trois étapes importantes de la dispersion des polluants dans l'atmosphère. La première étape caractérisée par l'émission des polluants, la deuxième étape qui représente la phase du transport des polluants sous l'effet du vent et la troisième étape qui est la phase du dépôt [33].

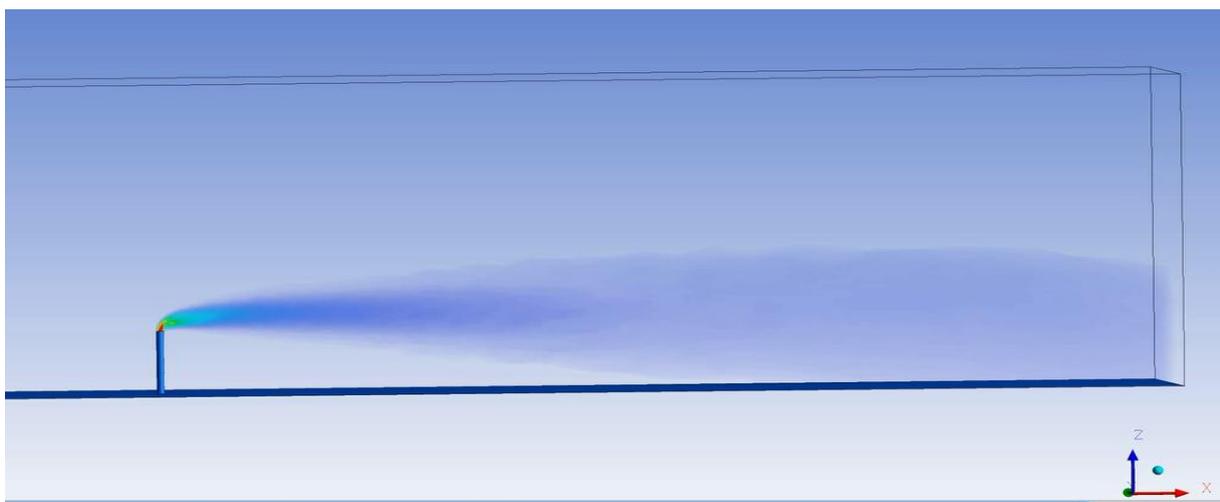
A la sortie de la cheminée, nous constatons l'apparition d'une sur-hauteur qui résulte des forces de flottabilité dues à la chaleur du panache. Ensuite, le jet suit le profil d'une courbe Gaussienne et commence à se déposer par effet de gravité à partir d'une certaine distance (Figure 26, figure 27 et figure 28)[34].



**Figure 26 : L'apparition d'une sur-hauteur au niveau de la sortie de la cheminée**

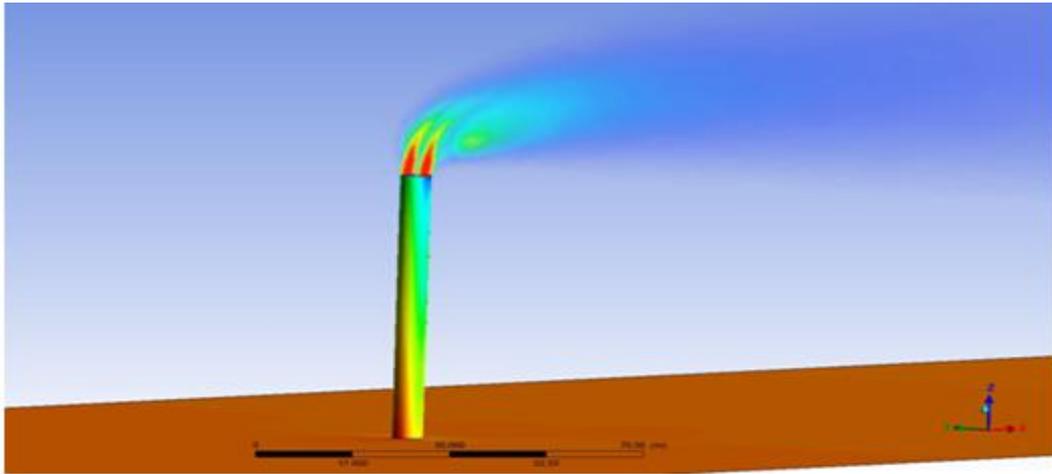


**Figure 27 : La dispersion du panache dans l'atmosphère**

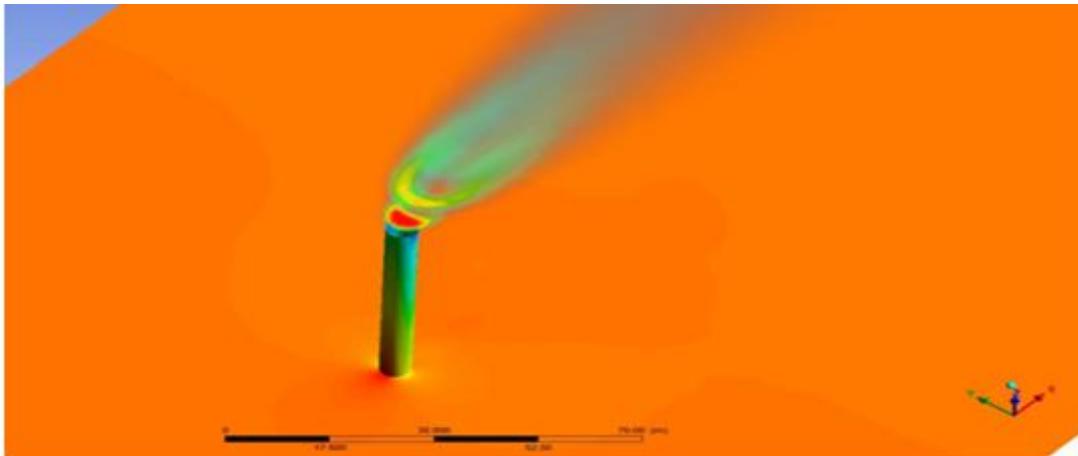


**Figure 28 : Le début du dépôt des polluants**

Nous constatons aussi l'existence d'une structure symétrique par rapport au plan vertical passant par l'axe de la cheminée (Figure 29 et Figure 30). Cette structure est formée par des anneaux tourbillonnaires de la couche cisillée située à la frontière du jet. Ces anneaux évoluent à partir de la section d'éjection et se déforment au fur et à mesure que le jet est dévié. Ces deux tourbillons ayant la forme d'un rein, suivant une coupe transversale, prennent naissance juste après l'orifice d'éjection pour dominer la structure aval du jet [43].



**Figure 29 : l'apparition d'une structure symétrique du panache à la sortie de la cheminée**

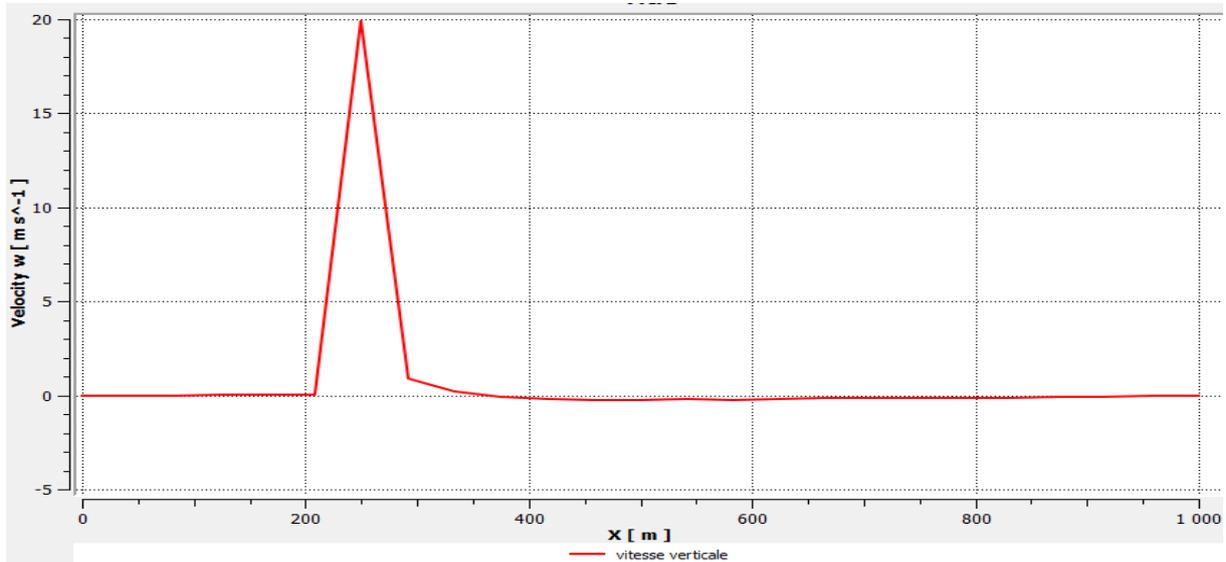


**Figure 30 : Vue du dessus du panache à la sortie de la cheminée**

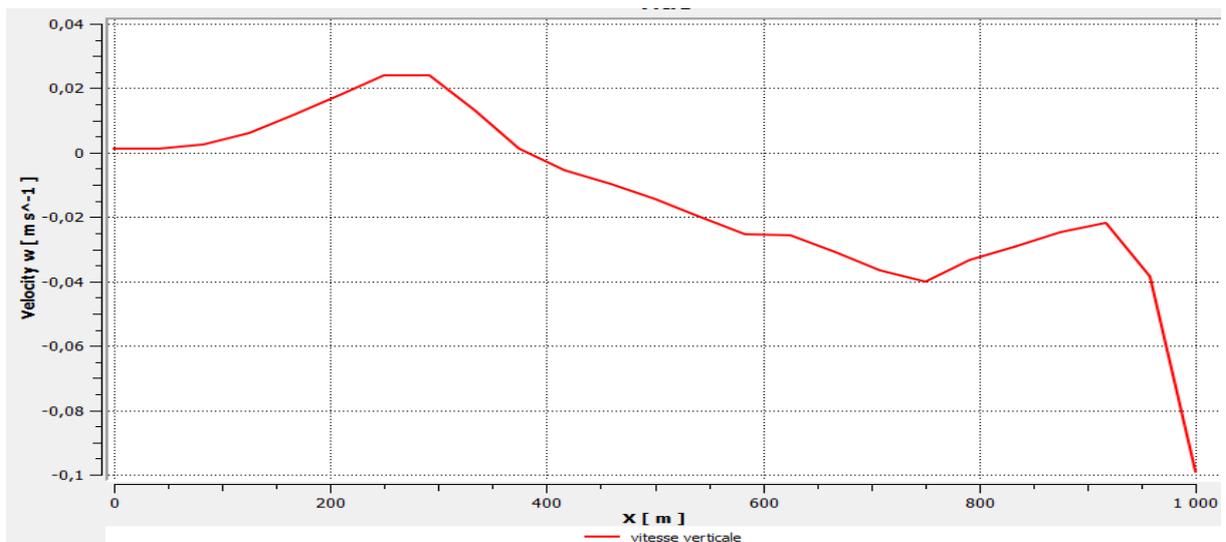
#### **b) Etude de la dynamique du jet**

La figure 31 montre la variation de la vitesse verticale suivant la droite d'intersection des deux plans  $Z=60\text{m}$  (le niveau de la sortie de la cheminée) et le plan  $Y=0\text{m}$  (le plan vertical passant par l'axe de la cheminée). Nous remarquons que la vitesse verticale est nulle en amont du jet puis elle augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne son maximum au niveau de l'axe de la cheminée

( $X=250\text{m}$ ). En aval cette vitesse diminue progressivement jusqu'à atteindre, à nouveau, une valeur nulle.



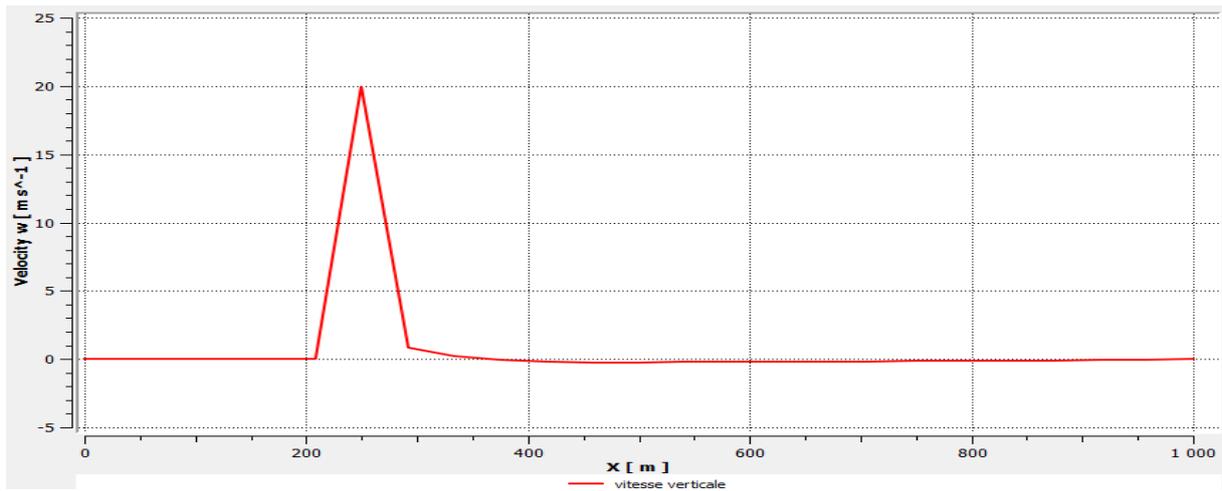
**Figure 31 : La variation de la vitesse verticale suivant la droite d'intersection des deux plans  $Z=60\text{m}$  et  $Y=0\text{m}$**



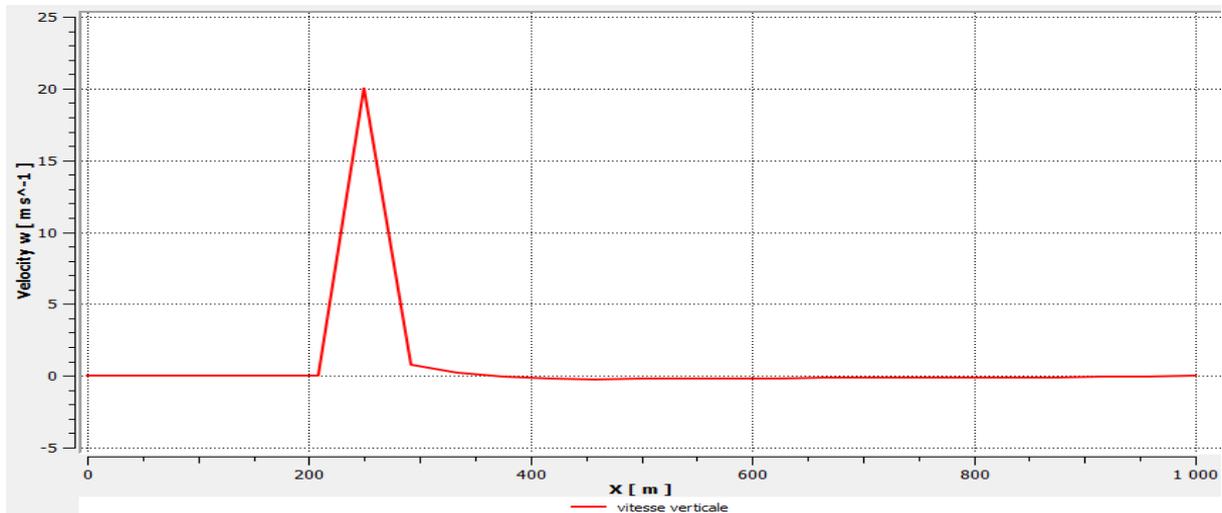
**Figure 32 : La variation de la vitesse verticale suivant la droite d'intersection des deux plans  $Z=180\text{m}$  et  $Y=0\text{m}$**

A la sortie de la cheminée le polluant, éjecté à  $20\text{m/s}$ , interagit avec l'air et voit sa vitesse diminuer progressivement et devient presque négligeable à une hauteur égale à  $180\text{m}$  (3 fois l'hauteur de la cheminée) (Figure 32).

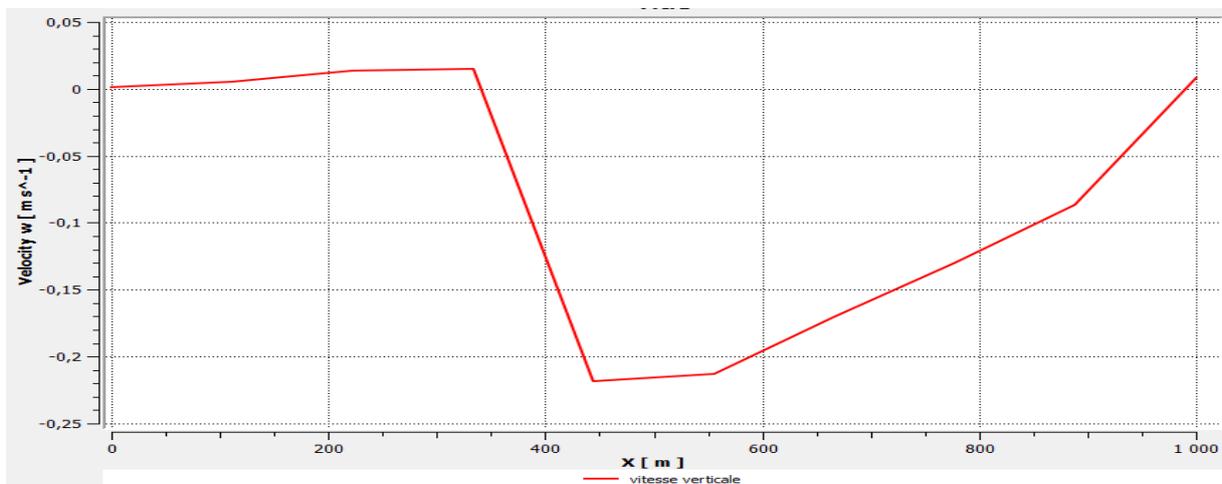
Etant donné que la hauteur du jet est définie par le point à partir duquel la vitesse verticale devient négligeable, nous pouvons noter que dans notre cas ce point est caractérisé par les coordonnées suivantes ( $250\text{m}$ ,  $0\text{m}$ ,  $180\text{m}$ ).



**Figure 33 : La variation de la vitesse verticale suivant la droite d'intersection des deux plans  $Z=60\text{m}$  et  $Y=2\text{m}$**



**Figure 34 : La variation de la vitesse verticale suivant la droite d'intersection des deux plans  $Z=60\text{m}$  et  $Y=-2\text{m}$**



**Figure 35 : La variation de la vitesse verticale suivant la droite d'intersection des deux plans  $Z=60\text{m}$  et  $Y=10\text{m}$**

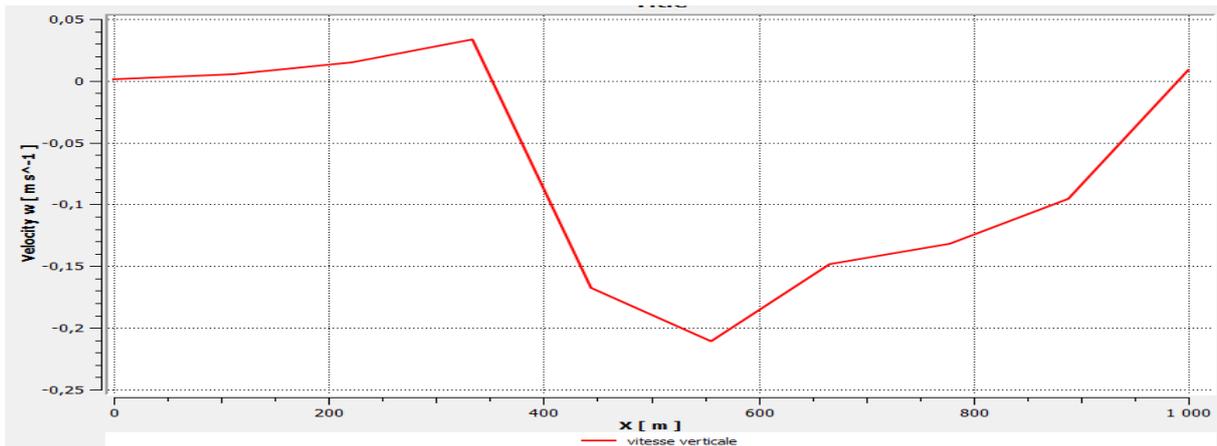


Figure 36 : La variation de la vitesse verticale suivant la droite d'intersection des deux plans  $Z=60\text{m}$  et  $Y=-10\text{m}$

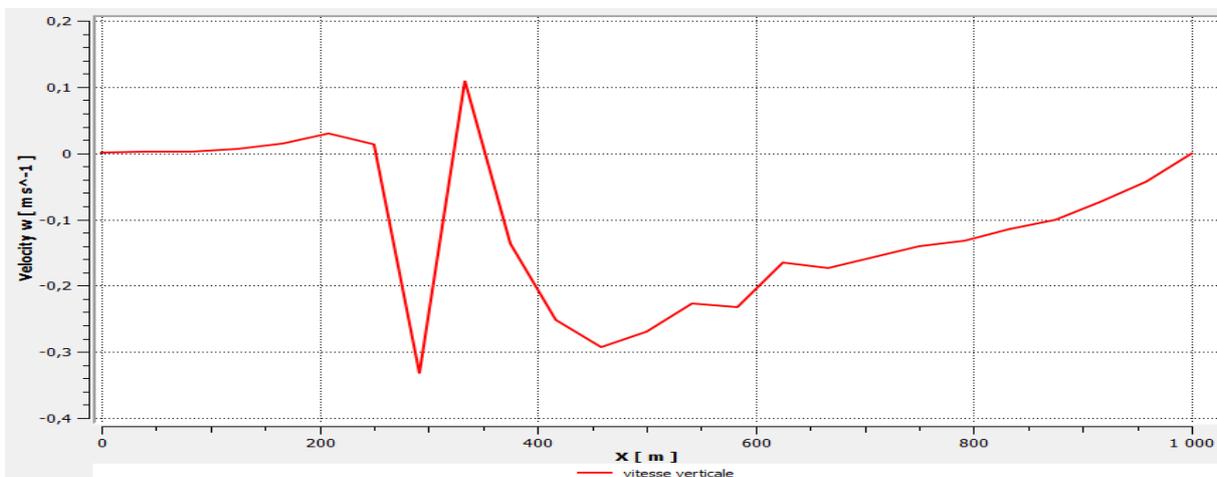


Figure 37 : La variation de la vitesse verticale suivant la droite d'intersection des deux plans  $Z=70\text{m}$  et  $Y=8\text{m}$

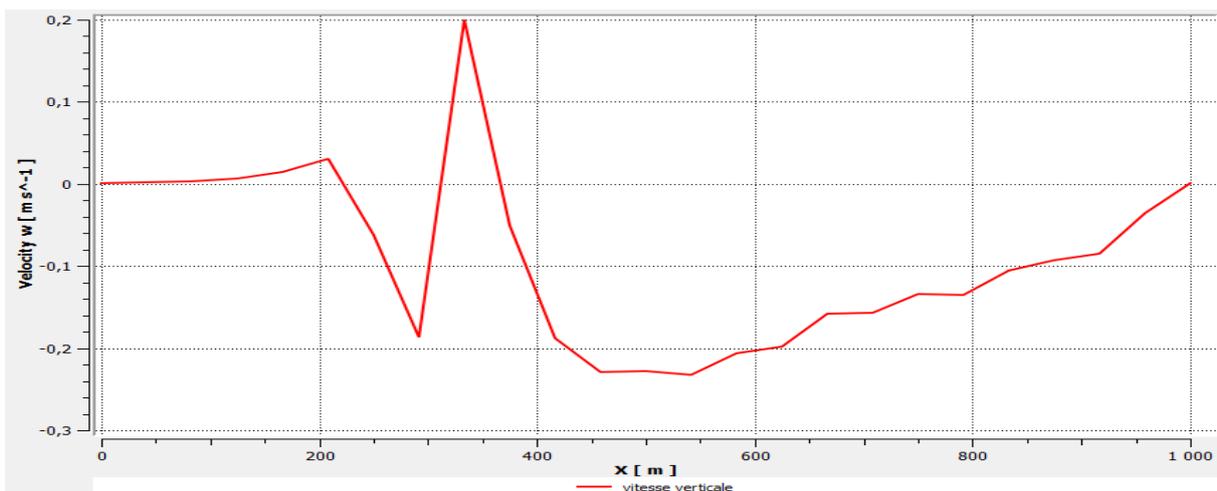


Figure 38 : La variation de la vitesse verticale suivant la droite d'intersection des deux plans  $Z=70\text{m}$  et  $Y=-8\text{m}$

Les figures 33 et 34 montrent la symétrie de la distribution des vitesses verticales par rapport au plan vertical passant par l'axe de la cheminée. Ces vitesses, qui sont dues à la flottabilité et à la force d'impulsion, s'annulent aux alentours de  $x=380\text{m}$ .

Latéralement nous constatons que les vitesses verticales s'étalent symétriquement, de part et d'autre du plan vertical central du domaine passant par l'axe de la cheminée, jusqu'à atteindre une distance de  $10\text{m}$  où elles deviennent négligeables (Figures 35 et 36). Nous remarquons aussi que pour une hauteur de  $70\text{m}$  nous obtenons des valeurs négatives, de part et d'autre de ce même plan de symétrie, ce qui indique le développement de la paire symétrique de vortex (Figure 37 et 38).

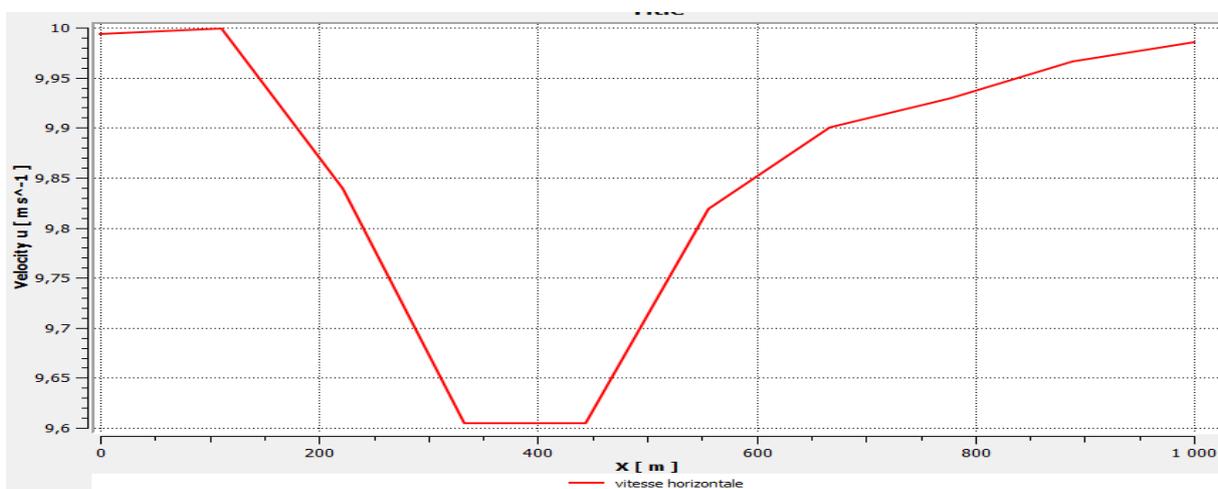


Figure 39 : La variation de la vitesse horizontale suivant la droite d'intersection des deux plans  $Z=60\text{m}$  et  $Y=0\text{m}$

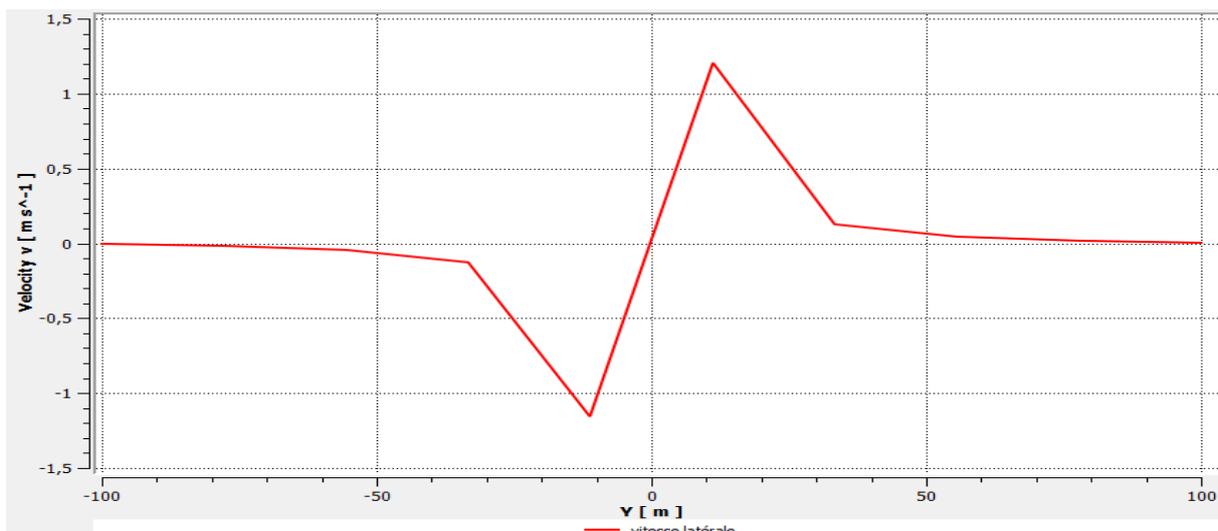
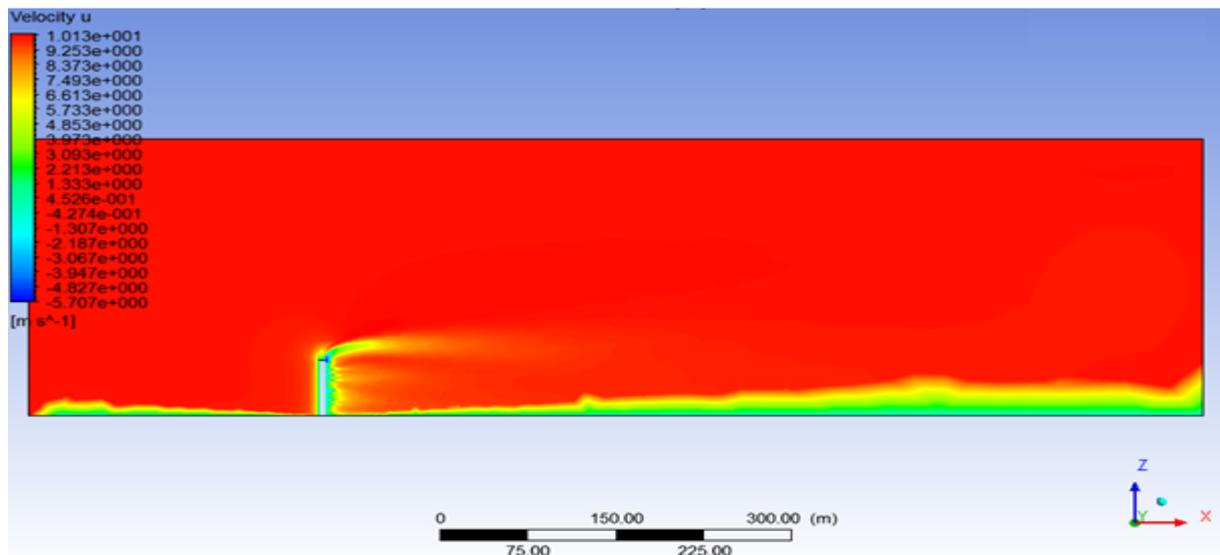


Figure 40 : La variation de la vitesse latérale suivant la droite d'intersection des deux plans  $X=250\text{m}$  et  $Z=70\text{m}$

La figure 39 représente la variation de la vitesse horizontale suivant la droite d'intersection des deux plans  $Z=60\text{m}$  et  $Y=0\text{m}$ . Nous remarquons que cette vitesse diminue aux alentours de la cheminée à cause de l'effet du mélange des deux fluides dans cette zone. Nous notons aussi que dès que la vitesse verticale devient maximale ( $X=250\text{m}$ ), la diminution de la vitesse horizontale décroît jusqu'à atteindre son minimum. A la fin du domaine, quand la composante verticale disparaît, la vitesse horizontale tend vers une vitesse asymptotique.

La figure 40 montre la variation de la vitesse latérale suivant la droite d'intersection des deux plans  $X=250\text{m}$  et  $Z=70\text{m}$ . Elle montre bien l'aspect symétrique et contrarotatif des deux tourbillons établis. Nous constatons que la vitesse latérale est nulle au niveau de l'axe de la cheminée ( $Y=0\text{m}$ ) et que les deux pics sont directement opposés par rapport à l'origine du repère. C'est-à-dire ils sont égaux, symétriques et de sens opposés. Ces deux sommets sont distants d'environ  $5\text{m}$  de part et d'autre du plan de symétrie du domaine d'étude. La vitesse latérale diminue en fonction de «  $y$  », ce qui montre que plus on s'éloigne du jet moins l'entraînement du courant latéral influence l'écoulement.

La figure 41 montre la variation de la vitesse horizontale suivant le plan de symétrie vertical de la cheminée. Nous remarquons la déviation mutuelle du jet et de l'écoulement ambiant. Le jet est recourbé, dévié et cisailé par l'écoulement transversal. Latéralement, ce dernier phénomène est aussi remarquable (Figure 42).



**Figure 41 : La cartographie de la variation de la vitesse horizontale suivant le plan  $Y=0\text{m}$**

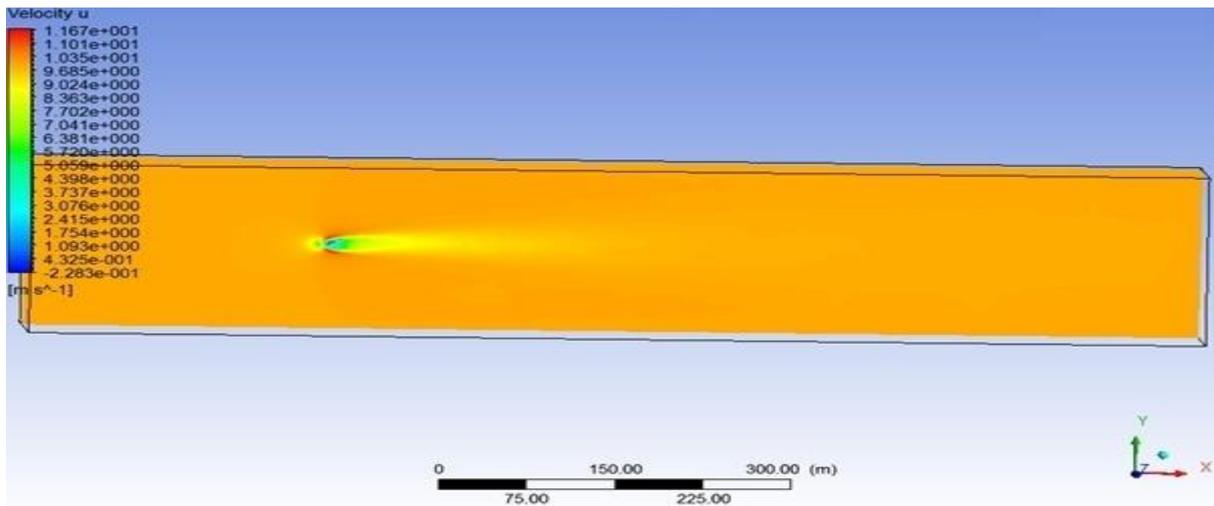


Figure 42 : La cartographie de la variation de la vitesse horizontale suivant le plan  $Z=70\text{m}$

Le jet pénétrant est entraîné dans l'écoulement transversal avec la formation d'un sillage tridimensionnel complexe derrière la section de sortie. Dans cette zone, l'écoulement longitudinal s'accélère et la conservation de la masse favorise le déplacement du fluide des côtés vers l'axe de symétrie de l'écoulement. Au niveau de la paroi, une recirculation se forme montrant la rentrée de l'écoulement transversal. Ce dernier est entraîné vers le haut par le jet puis dans le panache.

Le panache issu de la cheminée est ensuite réorienté dans une structure en paire de tourbillons contrarotatifs (figure 43) en forme de rein puis entraîné dans la région du sillage et dans le jet par le phénomène de turbulence.

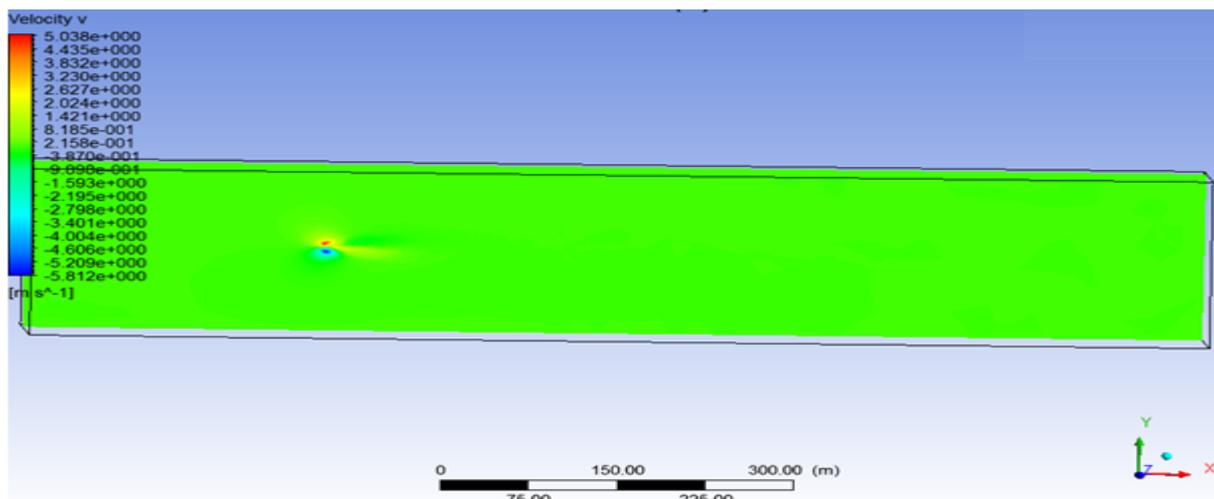
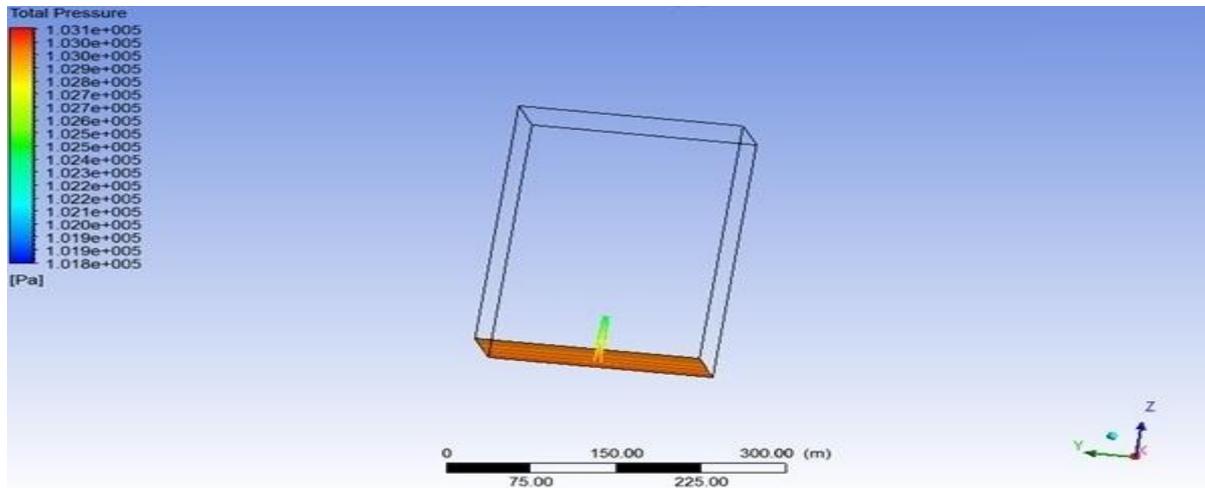
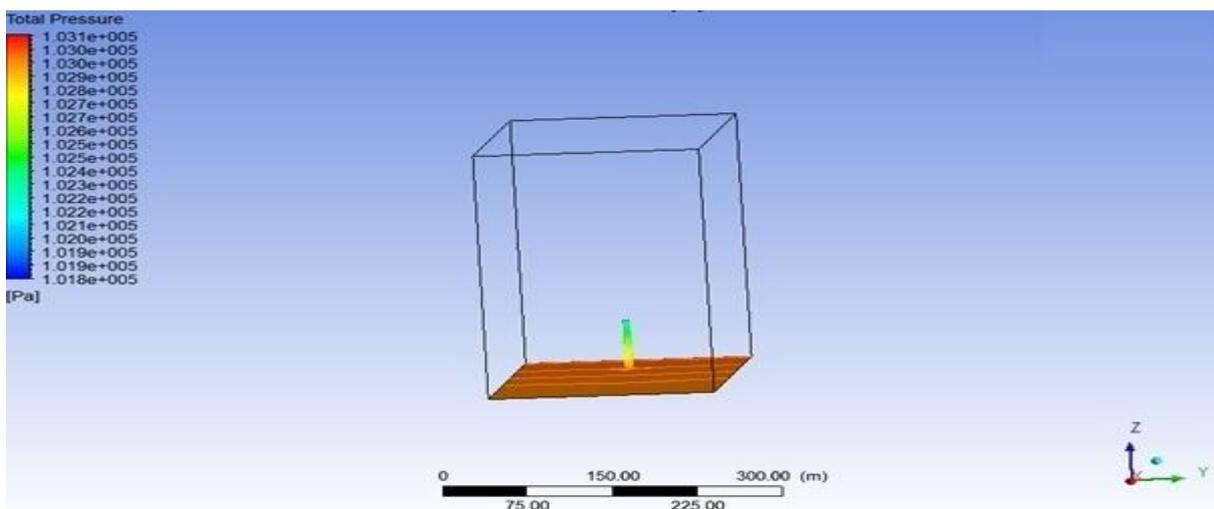


Figure 43 : La cartographie de la variation de la vitesse latérale suivant le plan  $Z=70\text{m}$

L'écoulement principal s'oppose au gradient de pression (Figure 44 et Figure 45) et perd son énergie de ce fait. Alors, il s'enroule et forme près de la paroi un système tourbillonnaire en fer à cheval qui se disperse ensuite dans l'écoulement aval.



**Figure 44 : La cartographie de la variation de la pression au niveau de la paroi de la cheminée (vue à partir de l'entrée du domaine)**



**Figure 45 : La cartographie de la variation de la pression au niveau de la paroi de la cheminée (vue à partir de la sortie du domaine)**

Dans notre étude de la dynamique du jet, nous avons constaté la formation de tourbillons contrarotatifs d'axes sensiblement parallèles induits par l'impulsion initiale du jet et de l'écoulement transversal. Nous avons aussi remarqué que la trajectoire de l'écoulement est régit par deux éléments, le mouvement ayant tendance à éloigner le fluide de la paroi dans la direction verticale résultant de l'impulsion initiale du jet et de l'écoulement principal d'une part, et les tourbillons contrarotatifs qui s'allongent lorsqu'on s'éloigne de la zone d'éjection d'autre part. Plusieurs études ont mis en évidence ces structures [39][41][43].

L'étude de la dynamique explique l'apparition des trois phases caractéristiques de la dispersion d'un panache à partir de la cheminée. Il s'agit dans la première phase de la dispersion verticale et latérale de l'écoulement à cause de la flottabilité résultant de la différence de température entre les deux fluides (effet thermique) et de l'impulsion du jet (effet mécanique). L'élargissement du panache à proximité de la sortie de la cheminée est dû à la turbulence propre auto-induite causée par le flottement du panache et les forces d'impulsion du jet pendant que la turbulence due à l'écoulement principal se maintient in affectée. Dans cette zone, l'effet de la flottabilité ne peut pas être négligé à cause de la différence de densité importante entre le gaz d'échappement très chaud et l'air environnant. L'interaction entre l'écoulement principal et le jet favorise l'apparition d'un phénomène d'entraînement et de mélange des deux fluides, et du cisaillement à proximité de la cheminée. Les figures de la variation de la vitesse latérale montrent que la trajectoire du panache est accompagnée de tourbillons de part et d'autre de l'axe de symétrie. Dans la deuxième phase, la composante verticale de la vitesse s'annule et la propagation de l'écoulement n'est plus contrôlée que par la composante horizontale dispersive. Enfin, durant la troisième phase de propagation, le fluide perd la majeure partie de son énergie et la dispersion se fait vers la surface de la terre selon une trajectoire gaussienne.

### c) Etude de la variation thermique du jet

Dans notre étude nous avons considéré que le jet éjecté à partir de la cheminée est à 100°C (373K) et l'écoulement ambiant est à 30°C (303K). Nous avons constaté que la température se propage symétriquement en suivant la trajectoire de la paire de tourbillons (Figure 46).

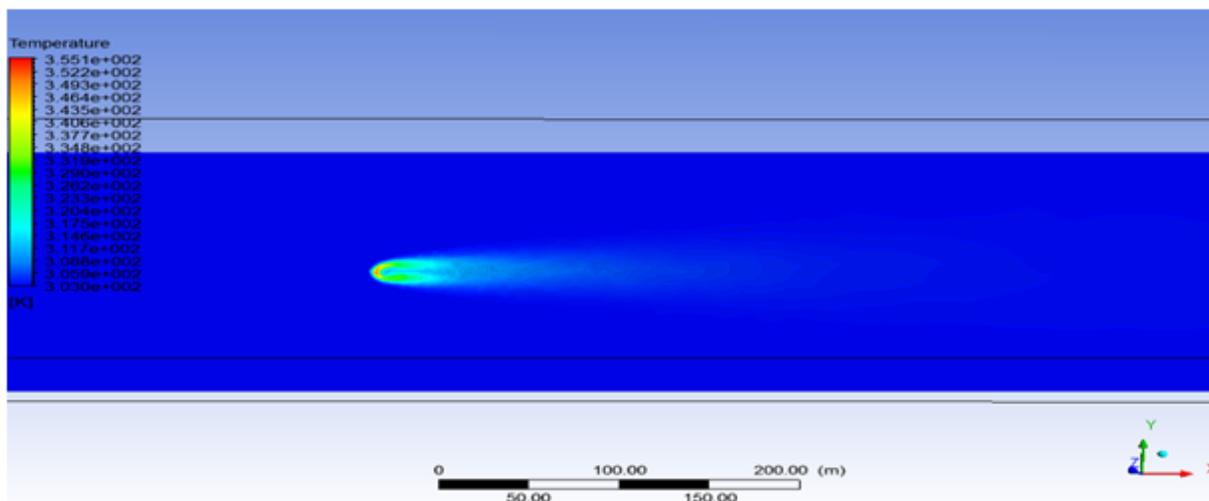
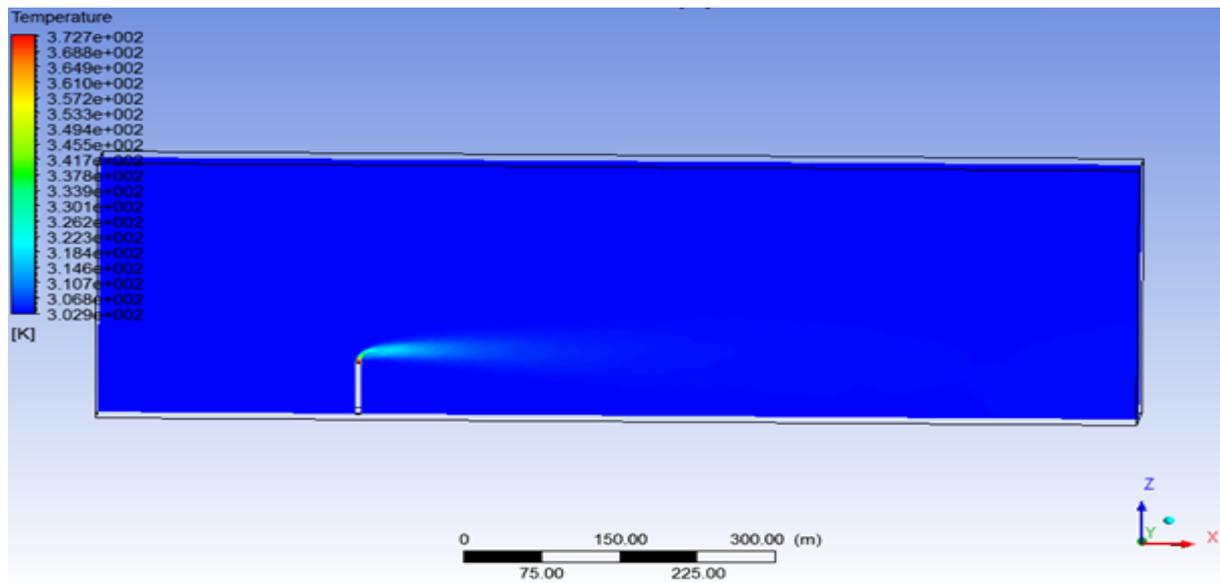


Figure 46 : La cartographie de la variation de la température suivant le plan Z=70m (vue de dessus)

La figure 47 représente la cartographie de la variation de la température suivant le plan vertical Y=0m. Nous remarquons que lorsque la hauteur augmente, le maximum de température se

déplace en aval du jet. En effet, la dispersion de la température est rapide dans le cas tridimensionnel à cause du mélange additionnel induit par les tourbillons transversaux. En aval, la température des polluants est d'autant plus faible que la vitesse de l'écoulement transversal est importante. La température la plus haute est obtenue dans les zones proches de la sortie de la source. Les résultats, trouvés dans l'étude thermique, étaient évidents et confirmés par plusieurs travaux de recherches faites dans ce sujet.



**Figure 47 : La cartographie de la variation de la température suivant le plan de symétrie de la cheminée (Y=0m)**

Les deux figures précédentes (Figures 46 et 47) nous montrent, aussi, les trois phases de la dispersion de polluants, la distribution qui a la forme d'une gaussienne, la structure symétrique du panache par rapport au plan de symétrie  $Y=0m$  et la forme de la paire de tourbillons contrarotatifs générés juste en aval du jet.

#### **d) Etude de la variation massique du jet**

Dans notre cas d'étude nous avons considéré que la fumée éjectée est composée de 30%  $CO_2$ , 30%  $NO_2$ , 30%  $SO_2$  et 10%  $CO$ . Nous ne tiendrons pas compte de la chimie de ces espèces dans l'atmosphère. En traitant l'évolution des différents composants de la fumée (Figure 48 jusqu'à la figure 55), nous avons constaté que toutes les espèces ont le même comportement. Pour cette raison, nous prendrons le  $SO_2$  comme référence d'étude. La figure 48 représente la cartographie de la variation du  $SO_2$  suivant le plan  $Y=0m$ . Nous constatons que la concentration maximale du polluant se situe à proximité de la sortie du jet. Le débit d'air permet la dilution du polluant et par conséquent la diminution de sa concentration. L'élévation du panache laisse la paroi externe de la cheminée à l'abri de tout éventuel contact avec le jet. Notons que la

distribution massique diminue lorsqu'on s'éloigne de la section de la sortie suivant z ou suivant x et ceci à cause de la flottabilité, l'élévation du panache et l'action de l'air ambiant sur le jet. Pour suivre le maximum de la fraction massique il faut se déplacer en aval du jet suivant les deux axes x et z à la fois.

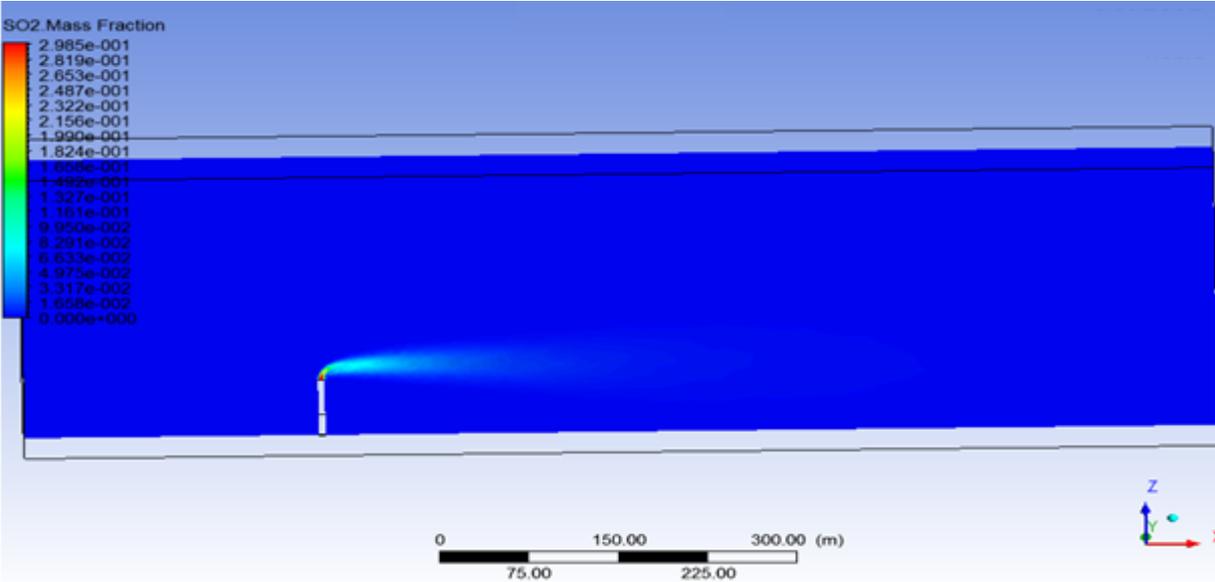


Figure 48 : La cartographie de la variation de la concentration du SO<sub>2</sub> suivant le plan de symétrie de la cheminée (Y=0m)

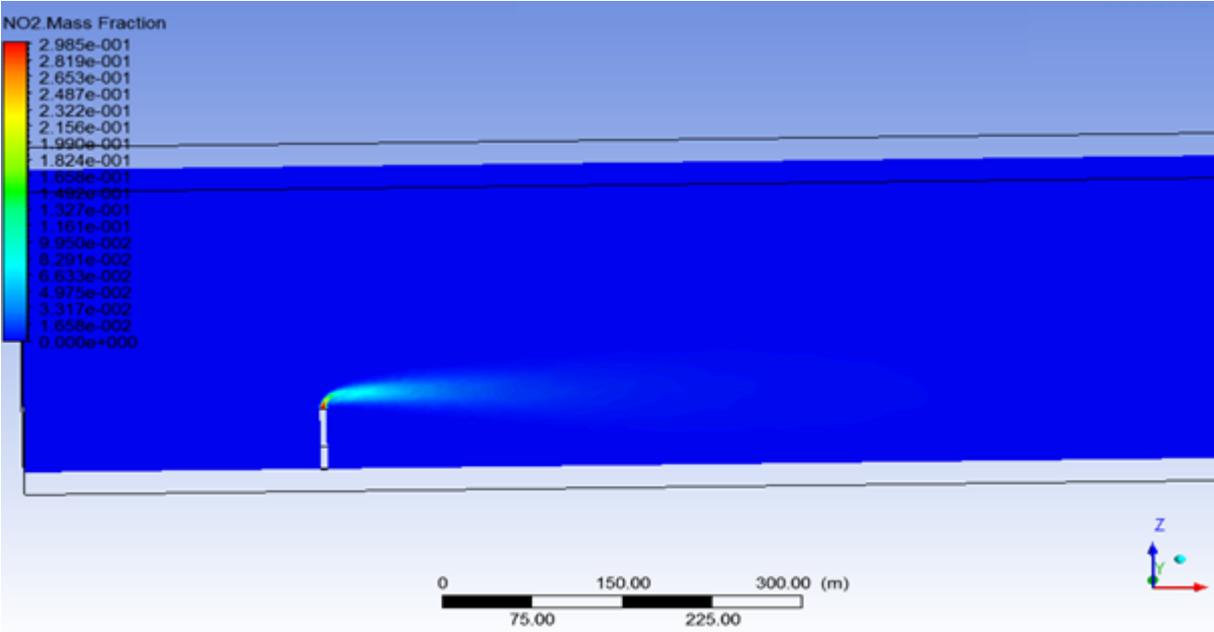


Figure 49 : La cartographie de la variation de la concentration du NO<sub>2</sub> suivant le plan de symétrie de la cheminée (Y=0m)

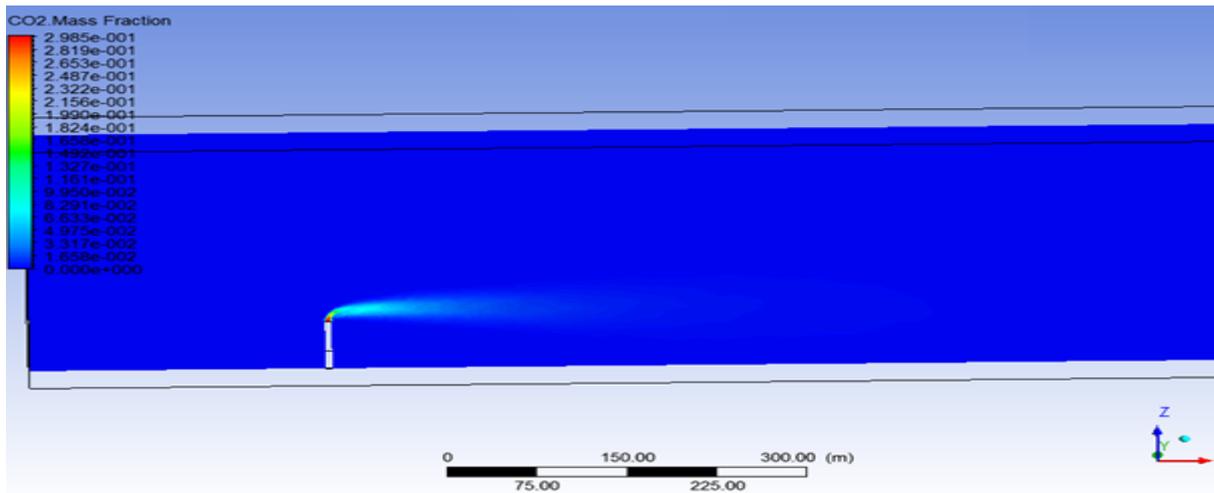


Figure 50 : La cartographie de la variation de la concentration du CO<sub>2</sub> suivant le plan de symétrie de la cheminée (Y=0m)

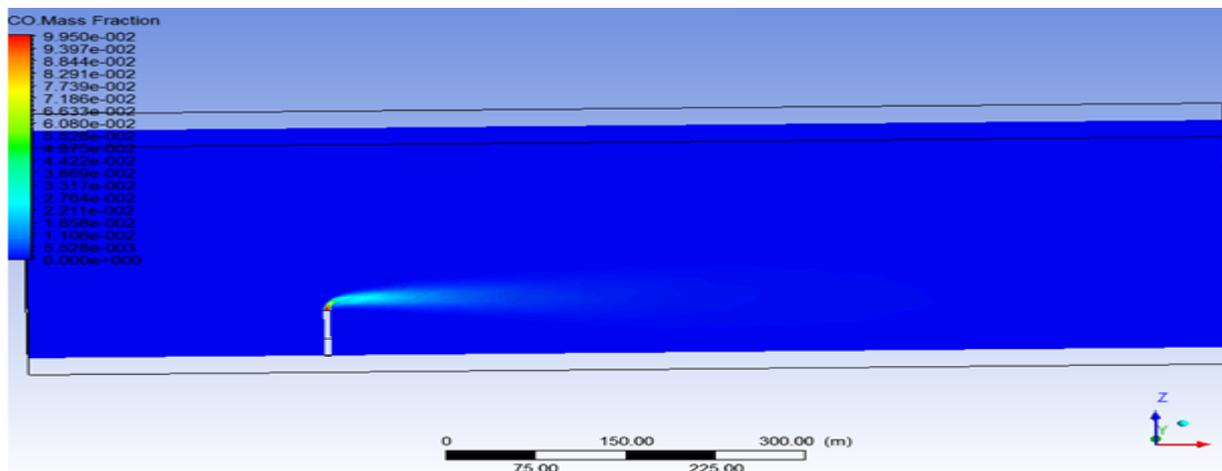


Figure 51 : La cartographie de la variation de la concentration du CO suivant le plan de symétrie de la cheminée (Y=0m)

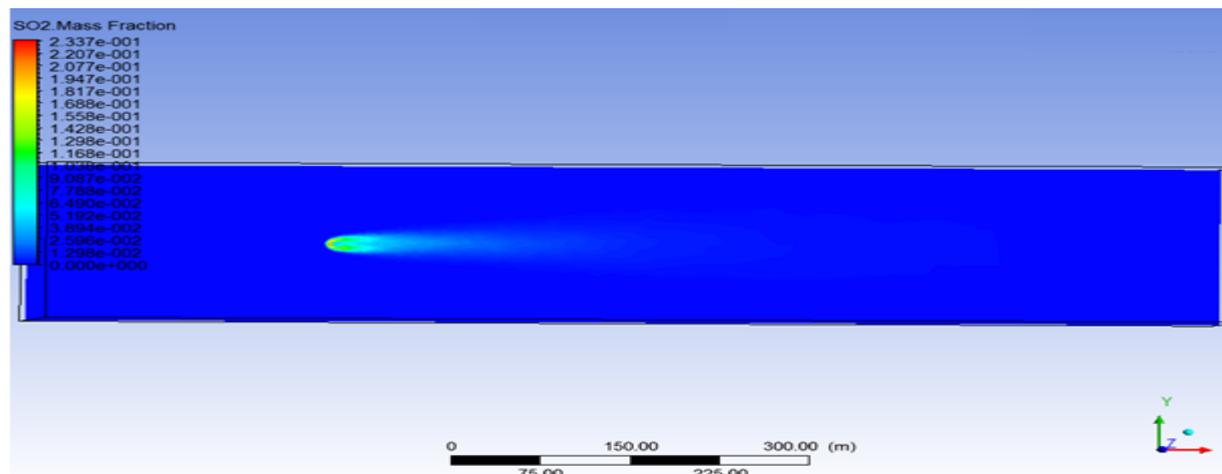


Figure 52 : La cartographie de la variation de la concentration du SO<sub>2</sub> suivant le plan Z=70m (vue de dessus)

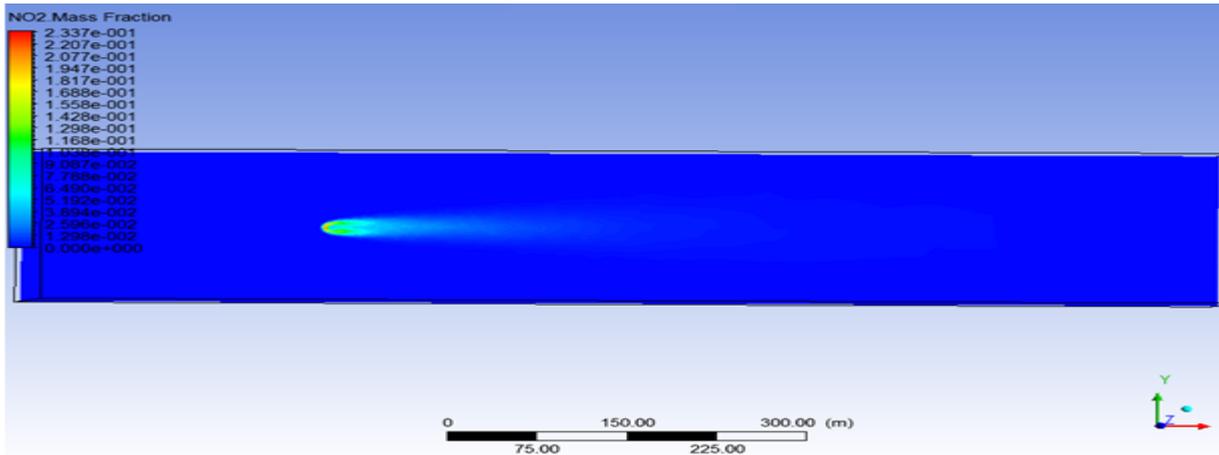


Figure 53 : La cartographie de la variation de la concentration du NO<sub>2</sub> suivant le plan Z=70m (vue de dessus)

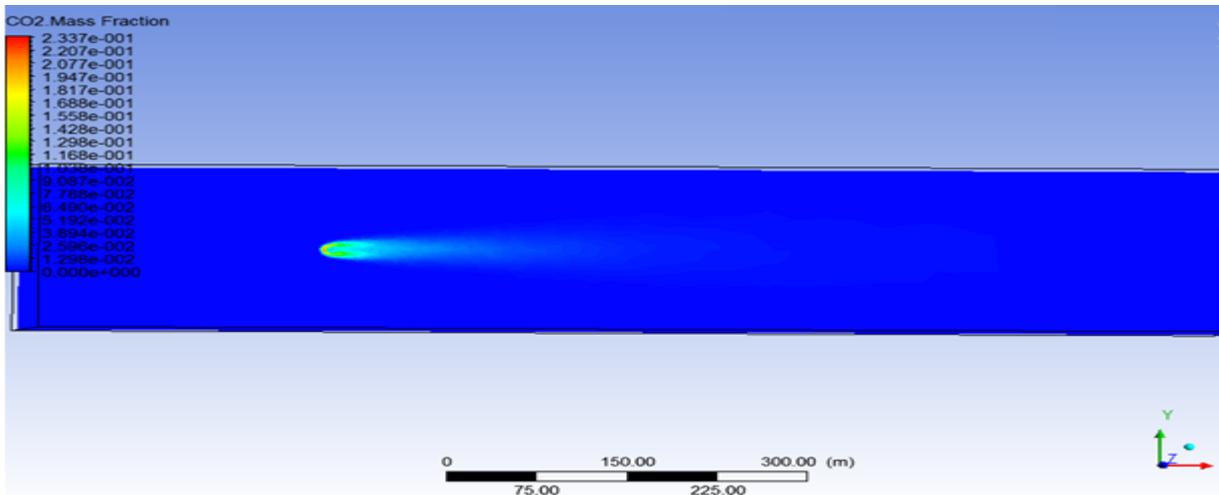


Figure 54 : La cartographie de la variation de la concentration du CO<sub>2</sub> suivant le plan Z=70m (vue de dessus)

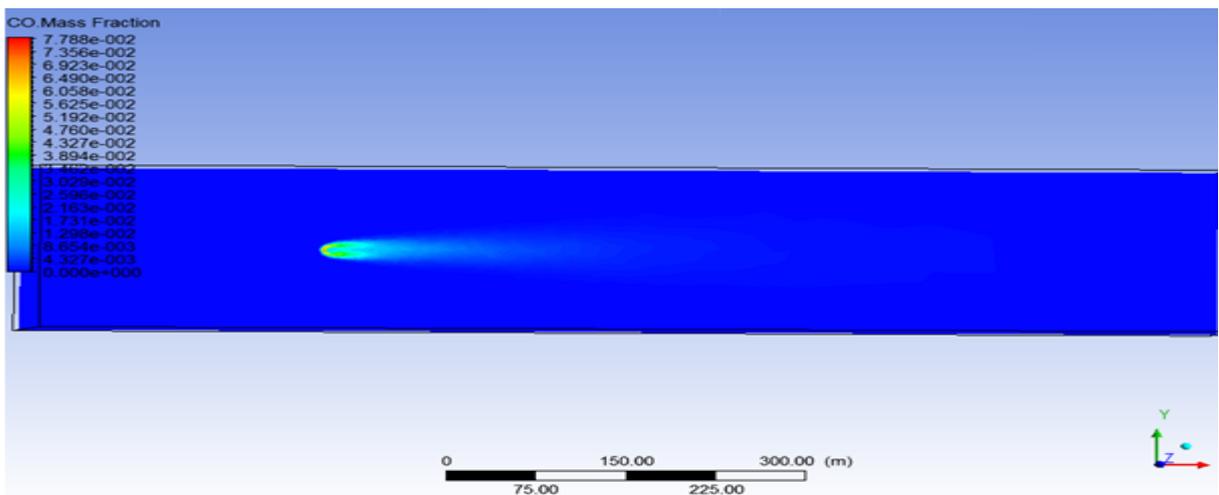


Figure 55 : La cartographie de la variation de la concentration du CO suivant le plan Z=70m (vue de dessus)

La variation des différentes concentrations suit la variation de la température. La dispersion des polluants évolue d'une façon symétrique par rapport au plan vertical passant par le centre de la cheminée et le maximum de concentration se situe juste à la sortie du jet puis il suit la trajectoire de la paire du vortex en diminuant de valeur en s'éloignant en aval de la source.

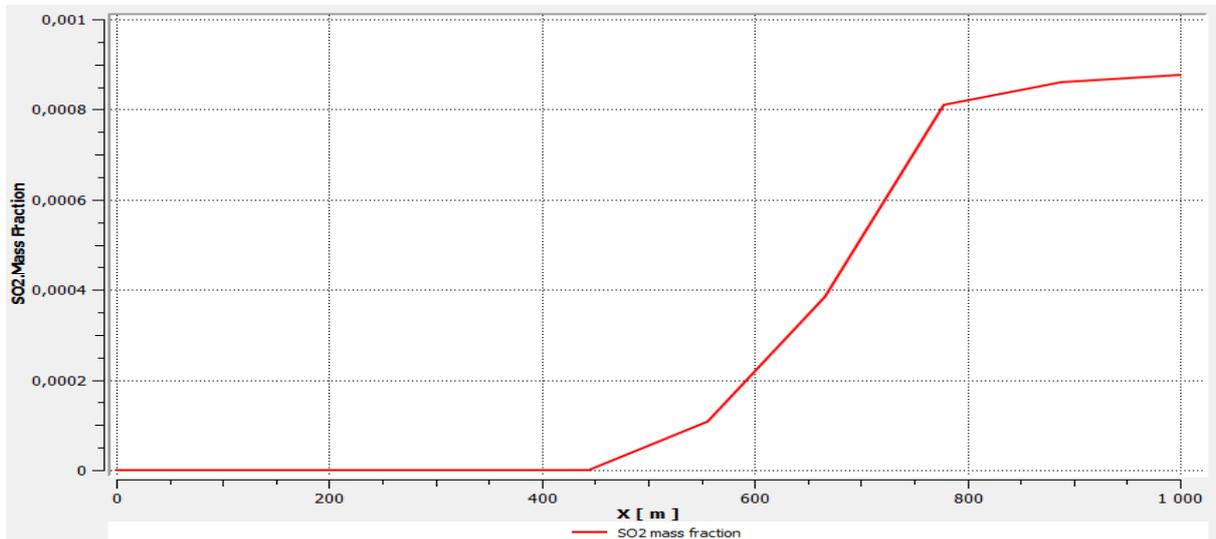


Figure 56 : La variation de la concentration du SO<sub>2</sub> suivant la ligne d'intersection des deux plans Y=0m et Z=0m

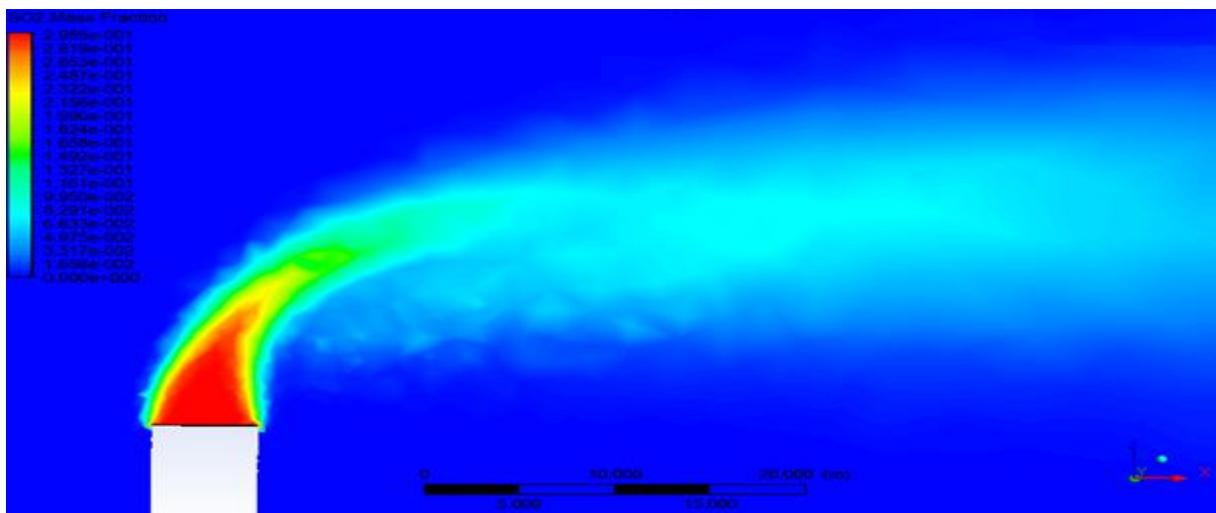


Figure 57 : La cartographie de la variation de la concentration du SO<sub>2</sub> suivant le plan Y=0m (zoom sur le panache)

Les figures 48 et 52 montrent que le jet est recourbé par l'écoulement principal. Il est affecté au voisinage de la section de sortie et pénètre dans l'écoulement transversal avant qu'il ne soit dévié. La concentration maximale du SO<sub>2</sub> est observée au voisinage immédiat du jet dans la zone de cisaillement. Loin en aval du jet, la fraction massique devient plus faible montrant une distribution gaussienne. La vitesse du vent permet une dilution importante, ce qui se traduit par une diminution de la concentration des polluants qui se dispersent ainsi. Ils perdent

graduellement leur énergie et tombent vers la surface. La figure 56 montre que les premières traces du SO<sub>2</sub> sont décelées à 200m en aval de la cheminée (X=450m).

Le comportement du panache à la sortie de la cheminée est complexe suite aux phénomènes d'entraînement et d'émergence entre les deux fluides.

Sur la figure 57 nous observons différentes zones de maximum et de minimum de concentration suite au phénomène de dilution. L'effluent, éjecté à partir de la cheminée, s'étend, s'élargit, se dilate et se mélange avec l'air pour former un aérosol plus dense. Les phénomènes d'entraînement et de mélange des deux fluides conduisent à l'élargissement du panache selon les directions x et z. L'élévation du panache est due à la force d'éjection, la force de flottabilité et de la haute température du gaz d'échappement.

La dilution des émissions dans l'atmosphère se produit dans deux principaux stades : la phase d'élévation du panache et la phase de dispersion. Le panache se propage latéralement et verticalement selon un processus dispersif jusqu'à atteindre la surface de la terre. La première zone de mélange du panache est définie par l'effet de flottabilité, d'impulsion et de la force de cisaillement horizontal appliqué par le vent. Dans cette zone, et à cause des émissions dues au processus de combustion, la turbulence due à la flottabilité du panache auto induite est le facteur dominant de la diffusion. Cependant, la turbulence due à l'écoulement principal joue un rôle secondaire. Avec le développement de la deuxième phase, la turbulence de l'écoulement principal commence à avoir un effet significatif dans le processus de diffusion. Dans cette région, appelée zone de diffusion accélérée, le panache perd une grande partie de son excès de température et d'impulsion verticale et tend vers une hauteur asymptotique. La concentration diminue dans cette zone à cause de la diffusion du mélange

#### **4. Conclusion**

Le travail de ce chapitre présente une analyse et une interprétation de la modélisation numérique réalisé sur l'interaction d'un panache éjecté à partir d'une cheminée avec l'air ambiant. Cette partie, basée sur des résultats obtenus avec le logiciel ANSYS, nous a servi à enrichir notre étude expérimentale pour mieux comprendre les phénomènes physiques qui régissent la dispersion des polluants dans l'atmosphère.

## Conclusion générale et perspectives

Le travail que nous avons fait porte sur le phénomène de dispersion des polluants dans l'atmosphère. Notre sujet traite un problème d'actualité qui préoccupe les gouvernements, les associations civiles, les industries, etc. La pollution atmosphérique est l'un des phénomènes les plus complexes et sa maîtrise nécessite l'implication de plusieurs domaines tels que les sciences physiques, la chimie et la mécanique.

Nous avons commencé notre travail par une recherche bibliographique afin d'avoir une idée générale sur l'état de l'art actuel et sur les différents travaux de recherches qui ont porté sur la pollution atmosphérique. Dans cette première partie, nous avons défini, aussi, les termes les plus importants en rapport avec notre sujet, citer les principaux polluants et les facteurs qui stimulent leur dispersion et présenter les différentes méthodes expérimentales utilisées.

La suite de notre étude a porté sur la méthode DOAS « Differential Optical Absorption Spectroscopy » utilisée dans le cadre de notre travail ainsi que l'analyse et l'interprétation des mesures trouvées. Nous avons décrit l'évolution des principaux polluants atmosphérique au centre ville de la Tunisie sur les différentes périodes de la journée des saisons d'hiver et d'été. Nous avons constaté que le benzène et le toluène suivent la même variation avec un rapport de 2.5 de concentration. Les pics du SO<sub>2</sub> et du NO<sub>2</sub> étaient enregistrés au début de la journée et du soir à cause de la forte circulation automobile et la stabilité de l'atmosphère. Le maximum de l'ozone était apparu dans les après midi où l'ensoleillement et l'activité photochimique croit. Les principaux paramètres qui affectent la dispersion des polluants étaient le taux des émissions des sources, l'activité photochimique et la stabilité de l'atmosphère. Pour les O<sub>x</sub>, définis comme la somme du NO<sub>2</sub> et du O<sub>3</sub>, les maximums étaient enregistrés durant la journée (matinée et après midi). Le soir le taux des O<sub>x</sub> a resté élevé malgré la baisse de concentration d'ozone car cette baisse est remplacée par le pic du NO<sub>2</sub> qui apparait le soir. La concentration des O<sub>x</sub> reste élevée jusqu'à ce que le taux du NO<sub>2</sub> rechute de nouveau.

D'après notre étude, les concentrations des polluants étudiées dépassent les limites nationales et internationales recommandées ce qui nécessite de prendre des décisions pour lutter contre la pollution afin de préserver la nature et la santé des êtres humains et contribuer aux efforts mondial fournis contre les changements climatiques.

Notre travail a été enrichi par une étude numérique qualitative dans laquelle nous avons étudié la dispersion de polluants éjectés à partir d'une cheminée. Nous avons commencé tout d'abord par présenter les différents outils mathématiques et numériques à utiliser. Ensuite, nous avons présenté notre démarche suivie pour implanter les paramètres essentiels au programme de calcul (ANSYS) et enfin nous avons présenté une modélisation numérique de l'interaction d'un panache éjecté à partir d'une cheminée avec l'air ambiant.

A sa sortie, l'effluent, possédant une température égale à 100°C, était éjecté verticalement à une vitesse de 20m/s. L'air ambiant, possédant une température égale à 30°C, coulait horizontalement à une vitesse constante égale à 10m/s. Cette approche a mis en évidence les trois phases d'écoulement en fonction de la propagation du panache. Durant la première phase, les mouvements verticaux dus à la force d'impulsion du jet et à la flottabilité des effluents chauds dominaient la zone proche de la sortie du jet. Ensuite le jet s'est dispersé d'une façon symétrique par rapport au plan vertical passant par le milieu de la cheminée avec l'apparition de tourbillons contrarotatifs de part et d'autre ayant la forme de rein. Nous avons montré que l'évolution de la température et de la concentration étaient similaires et tributaires des mouvements turbulents. La deuxième phase de l'écoulement s'est caractérisée par la dominance de la composante horizontale de l'écoulement où les vitesses des deux fluides étaient égales et la direction de propagation dispersive du panache devenait horizontale. La concentration a diminué dans cette zone suite à la diffusion du mélange. Durant la troisième phase, le panache a perdu une grande partie de son excès de température et d'impulsion verticale. Dans ces conditions, le maximum de concentration était dévié vers la surface de la terre.

Tous les résultats numériques trouvés étaient en concordance totales avec plusieurs autres travaux scientifiques que nous avons déjà cités dans la partie de la recherche bibliographique. Néanmoins, notre étude reste à améliorer en tenant compte de plusieurs autres facteurs comme l'agitation de l'atmosphère, la présence d'obstacles, la combinaison de sources mobiles et sources fixes, etc. Cette étude reste la base de nos futurs travaux dans lesquels nous essayerons de tenir compte de maximum de paramètres possibles pour se rapprocher des cas réels.

## Bibliographie

- [1] Anthony UNG, "Cartographie de la pollution atmosphérique en milieu urbain à l'aide de données multisources," Ecole des mines de Paris, Thèse de doctorat 2003.
- [2] ESCOURROU Gisèle, "contraintes climatiques & pollutions," Paris, Thèse 1996.
- [3] SCHÜTZ Michaël, "Environnement et pollution - Comment mesurer ? Comment réagir ?," 1995.
- [4] MALBREIL Nathalie, "La pollution en bordure d'autoroute et son impact sur la végétation," Université de Metz, DESS Ressources Naturelles et Environnement 1997.
- [5] SETRA-MAZOUÉ S, "Impact du trafic routier sur l'environnement - La contamination du sol par voie aérienne, DESS Pollution chimiques et environnement," Rapport SETRA - CSTR, B 9411, 67 pages.
- [6] (2014, Mars) Site officiel de l'organisation mondiale de la santé. [www.who.int](http://www.who.int)
- [7] Andreas Christen, "Atmospheric measurement techniques to quantify greenhouse gas emissions from cities," *Urban Climate*, vol. 10, p. 241–260, 2014.
- [8] Shi Yin, Shugang Wang Tengfei (Tim) Zhang, "An inverse method based on CFD to quantify the temporal release rate of a continuously released pollutant source," *Atmospheric Environment*, 2013.
- [9] Eric P. Johnson, "Carbon footprints of heating oil and LPG heating systems," *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 35, no. 11–22, 2012.
- [10] Zhang Wenping Ding Juanjuan, "The Analysis to the Influence of Carbon Dioxide Emissions in Different Countries," *Energy Procedia* 5, vol. 5, p. 2426–2431, 2011.
- [11] Chao Yang Yichao Pu, "Estimating urban roadside emissions with an atmospheric dispersion model based on in-field measurements," *Environmental Pollution*, vol. 192, pp. 300-307, 2014.
- [12] Neumann-Hauf, G., Schlager, H. Klemm, O., Beyrich, F., Corsmeier, U., Kalthoff, N., Kotzian, M. Krautstrunk M., "An experimental study on the planetary layer transport of air pollutants over East Germany," *Atmospheric Environment*, pp. no. 34, pp. 1247-1266, 2.
- [13] Hurley P.J. Luhar A.K, "Application of a prognostic model TAPM to sea breeze flows, surface concentrations and fumigating plumes," *Environmental Modelling and Software*, pp. no. 19, pp. 591-601, 2004.
- [14] Physick, W.L., Luhar, A.K. Hurley P.J., "TAPM: a practical approach to prognostic meteorological and air pollution modelling," *Environmental Modelling and Software*, pp. no. 20, pp. 737-752, 2005.

- [15] Hatem MHIRI, George LEPALEC, Philippe BOURNOT Ines BHOURI BOUAB Nejla MAHJOUB SAID, "Etude d'un écoulement issu d'une cheminée autour d'obstacle: Influence de la hauteur de l'obstacle".
- [16] Olivier Herz, "Transport aérien et pollution atmosphérique," *The Science of the Total Environment*, vol. 134, pp. 335-342, 1993.
- [17] Egon T. Degens, "The History of CO<sub>2</sub>," *Environment International*, vol. Vol.2, pp. 401-408.
- [18] A.P Economopoulos, "A model for the critical hourly concentration, receptor distance and meteorological conditions for point sources with momentum-dominated plume rise," *Environment International*, no. 18, pp. 73-86, 1992.
- [19] A.P Economopoulos, "A model for the maximum credible hourly impact on any ground receptor from point sources with thermal plume rise," *Environmental Pollution*, no. 74, pp. 1-29, 1991.
- [20] Wilfrid Bach, "Impact of Increasing Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentrations on Global Climate: Potential Consequences and Corrective Measures," *Environment International*, vol. vol.2, pp. 215-228, 2014.
- [21] A.S. Talma and J.C Vogel, "Carbon Dioxide Variations in Continental Air," *Environment International*, vol. vol.2, pp. 393-399.
- [22] M.H. Mirzai, "wind tunnel investigation of dispersion of pollutants due to wind flow around a small building," *atmospheric Environment*, vol.28, no. N°11, pp. 1819-1826, 1994.
- [23] C.Hénault et A.Grossel B.Marry M.Roussel J.Léonard, "Nitrous Oxide Emission by Agricultural Soils : A Review of Spatial and Temporal Variability for Mitigation," *Pedosphere*, pp. 426-433, 2012.
- [24] James M. Calm, "Emissions and environmental impacts from air-conditioning and refrigeration systems," *International Journal of Refrigeration*, p. 293-305, 2002.
- [25] Xian-Xiang Li et Chun-Ho Liu Dennis Y C Leung Kit Ming Lam, "Recent progress in CFD modelling of wind field and pollutant transport in street canyons," *Atmospheric Environment*, p. 5640-5658, 2006.
- [26] Ted Stathopoulos Yoshihide Tominaga, "CFD simulation of near-field pollutant dispersion in the urban environment: A review of current modeling techniques," *Atmospheric Environment*, pp. 716-730, 2013.
- [27] Allen, S.E Henderson-Sellers B., "Verification of the plume rise/dispersion model USPR: Plume Rise for single stack emissions," *Ecological Modelling*, no. 30, pp. 20-227, 1985.
- [28] Deardorff J.W Willis G.E, "A laboratory model of diffusion into convective planetary boundary layer," *Q.J.R met. Soc.* 102, pp. 427-445, 1976.

- [29] B Henderson-Sellers, "The cross-sectional asymmetry of plumes in inversion conditions," *Appl. Math. Modelling*, no. 3, pp. 327-331, 1979.
- [30] Sancho, J., Ibarra, G. Gangoiti G., "Rise Moist Plumes from Tall Stacks in Turbulent and stratified Atmospheres," *Atmospheric Environment*, no. 31, pp. 253-269, 1997.
- [31] E. Rodriguez, R. Femat, J.C. Echeverria, J. Alvarez-Ramirez M. Meraz, "Statistical persistence of air pollutants (O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> and PM<sub>10</sub>) in Mexico City," *Physica A* 427, p. 202–217, 2015.
- [32] Herd Le Treut, "Rétroactions liées aux nuages et à la vapeur d'eau et incertitudes de la modélisation climatique," *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes / Earth & Planetary Sciences*, pp. 241-247, 1999.
- [33] H Whaley, "A proposed Canadian standard for estimating atmospheric dispersion of combustion source pollution from chimneys," *Atmospheric Environment*, no. 3, pp. 177-195, 1969.
- [34] Lawson, R.E Snyder W.H., "Fluid Modeling simulation of stack-Tip downwash for neutrally buoyant plumes," *Atmospheric Environment*, no. 25A. 12, pp. 2837-2850, 1991.
- [35] Williams, D.J Carras J.N., "Experimental studies of plume dispersion in convective conditions-II Horizontal plume dispersion," *Atmospheric Environment*, no. 20. 12, pp. 2307-2314, 1986.
- [36] W.E Wilson, "Sulfates in the atmosphere: A progress report on project MISTT," *Atmospheric Environment*, no. 12, pp. 537-547, 1978.
- [37] C.M Sheih, "Application of a statistical trajectory model to the simulation of sulphur pollution over NorthEastern United States," *Atmospheric Environment*, no. 11, pp. 173-178, 1977.
- [38] Frankenberg M.E Smith and T.T, "Improvement of ambient sulfur dioxide concentrations by conversion from low to high stacks," *J. Air Pollut. Control Assoc*, no. 25, pp. 595-601, 1975.
- [39] Weston, R.P Fearn R., "Vorticity associated with a jet in a crossflow," *J.AIAA*, no. 12, pp. 1666-1671, 1974.
- [40] Bouhdjar Amor et Mammeri Amryd Benkoussas Bouzid, "Etude de la dispersion atmosphérique des effluents émis par les cheminées de la cimenterie de Meftah," *Journal of scientific Research*, vol 1, 2010.
- [41] Gerges, J., Claria, A. Sananes, F Chassaing P., "Physical characteristics of subsonic jets in a cross stream," *Journal of Fluid Mechanics*, no. 62, p. 41, 1974.
- [42] Alan H.Huber, "the influence of building width and orientation on plume dispersion in the wake of building," *Atmospheric Environment*, vol.23, no. N°10, pp. 2109-2116, 1989.

- [43] Roshko, A Fric T.F., "Structure in the near field of the transverse jet," *7th symposium on the turbulent shear flow, Stanford University*, 1989.
- [44] R.F. Hall, D.J I.Marvoidis Griffiths, "fields and wind tunnel investigation of plume dispersion around single surface obstacles," *Atmospheric Environment*, no. 37, pp. 2903-2918, 2003.
- [45] William Rea, Patricia Smith-Willis, Ervin Fenyves, Yaqin Pan Luke Curtis, "Adverse health effects of outdoor air pollutants," *Environment International*, no. 32, p. 815–830, 2006.
- [46] Lorenzini, "biological indicators for environmental monitoring," *ARES-SERONO*, vol. 27, p. 49, 1992.
- [47] Blandin, "Bioindicateurs et diagnostic des systèmes écologiques," *Bulletin d'écologie*, p. 233, 1986.
- [48] DELCARTE E., ROBERT M-J., TILMAN J.IMPENS R.A, "Bilan de l'exploitation d'un réseau de plantes indicatrices de la pollution atmosphérique," *VIème Congrès Mondial pour la Qualité de l'Air de UIAPPA (Union Internationale des Associations pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique)*, vol. 2, pp. 541-547., Paris 1983.
- [49] n.d., VAN HALUWYN Chantal, "Lichens et pollution atmosphérique, un an de suivi dans la communauté urbaine de Lille," p. 3.
- [50] POSTHUMUS A, "General philosophy for the use of plants as indicators and accumulators of air pollutants and as biomonitors of their effects," *VIème Congrès Mondial pour la Qualité de l'Air de l'UIAPPA (Union Internationale des Associations pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique)*, vol. 2, pp. 555-562, Paris 1983.
- [51] KEHLBERGER S HEIDT V., "Plants as bioindicators of air pollution, monitoring air quality, a critical representation," *VIème Congrès Mondial pour la Qualité de l'Air de l'UIAPPA (Union Internationale des Associations pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique)*, vol. 2, pp. 213-215, Paris 1983.
- [52] GARREC Jean-Pierre, "Les végétaux indicateurs de pollution atmosphérique en ville," *PHM revue horticole*, p. 24, 1996.
- [53] MULLER G, "Etude des répercussions de l'axe autoroutier A 36 Mulhouse - Belfort sur l'Environnement dans la vallée de la Doller," *Journées thématiques sur la pollution de l'air, Rapport CETE de l'Est & CERE-Pha (Centre d'Essais et de Recherche en Environnement et en Pharmacologie)*, 1994.
- [54] MADELAINE Guy, "Métrologie des aérosols, Pollution Atmosphérique," pp. 14-20, 1990.
- [55] BONTE Jacques, "Polluants gazeux : détermination des niveaux critiques, Pollution Atmosphérique," pp. 35-43, 1993.

- [56] SIEGMANN H.C SIEGMANN K., "The formation of carbon in combustion and how to quantify the impact on human health," *Europhysics News*, vol. 28, no. 2, pp. 50-57, 1997.
- [57] G., DeMaria, R., Fontana, M. and Zublena, M. Agnesod, "Determination of PAH in Airborne Particulate: Comparison between off-line Sampling Techniques and an Automatic Analyser Based on a Photoelectric Aerosol Sensor," *Sci. Total Environ*, vol. 190, p. 443–449, 1996.
- [58] WÖSTE Ludger WOLF Jean-Pierre, "La pollution urbaine surveillée par laser," vol. 26, pp. 448-452, 1995.
- [59] Marie–Paule Bassez, *Techniques spectroscopiques*, Université de Strasbourg, Ed. Strasbourg, France.
- [60] D. Perner, and H. W. Pätz U. Platt, "Simultaneous measurements of atmospheric CH<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub> by differential optical absorption," *J. Geophys. Res.* 84 , p. 6329–6335, 1979.
- [61] Gillet & Steve. La spectroscopie, 2009.  
<http://perso.latribu.com/shagar/steve/pdf/ch21MEC.pdf>
- [62] GUEDIRA. Spectroscopie d'absorption dans l'UV-Visible, 2012.  
<http://www.fsr.um5a.ac.ma/cours/chimie/GUEDIRA/SMC4-cours%20de%20Spectroscopie-PDF/Chapitre%20III-Spectroscopie%20d'absorption%20dans%20l'UV-visible.pdf>
- [63] Aline Gratien, "Spectroscopie ultraviolet-visible et infrarouge de molécules clés atmosphériques," Ecole doctorale Sciences et ingénierie, Matériaux, Modélisation et environnement, Université Paris12 – Val de Marne,.
- [64] B. J. and Pitts Jr, N. J Finlayson-Pitts, "Chemistry of the upper and lower atmosphere," *Academic Press, San Diego*, 2000.
- [65] J. and Platt, U. Stutz, "Improving long-path differential optical absorption spectroscopy with a quartz-fiber mode mixer," *Applied Optics*, vol. 36, no. 6, pp. 1105-1115, 1997.
- [66] J. U. White, "Long Optical Paths of Large Aperture," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 32, pp. 285-288, 1942.
- [67] Karim Bouchlaghem, Ridha Chouikh et Amenallah Guizani Tarek Bouebdelli, "Experimental study of pollutants concentrations variability in Tunisia," *Eur. Phys. J. Plus* , p. 131: 397, 2016.
- [68] Suhas V. Patankar, *Numerical heat transfer and fluid flow*, W.J.Minkowycz and E.M.Sparrow, Ed., 1980.
- [69] Ansys Inc, *Ansys Fluent Tutorial Guide*, 180th ed., 2017.
- [70] Launder et Spalding, "The numerical computation of turbulent flows," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 3, no. Issue 2, pp. 269-289, Mars 1974.

- [71] Yakhot & Orszag, "Renormalization group analysis of turbulence," *Journal of Scientific Computing*, vol. 1, no. 1, pp. 3-51, Mars 1986.
- [72] Y.S.Chen and S.W.Kim, "Computation of turbulent flows using an extended k-e turbulence closure mode," *NASA*, 1987.
- [73] Bengt Anderson, Ronnie Anderson, Love Hakansson, Mikael Mortensen et Rahman Sudiyo , "Computational Fluid Dynamics For Engineers," *Cambridge University Press*, 2012.
- [74] Hadjira Scmitt-Foudhil, "Dispersion atmosphérique," *Ecole des ponts Paris Tech*, Novembre 2010.

**Résumé :** Le travail que nous avons fait porte sur le phénomène de dispersion des polluants dans l'atmosphère. Notre sujet traite un problème d'actualité qui préoccupe les gouvernements, les associations civiles, les industries, etc.

Nous avons commencé notre travail par une recherche bibliographique afin d'avoir une idée générale sur l'état de l'art actuel et sur les différents travaux de recherches qui ont porté sur la pollution atmosphérique. La suite a été consacrée à la méthode DOAS « Differential Optical Absorption Spectroscopy », utilisée dans le cadre de notre travail, ainsi que l'analyse et l'interprétation des mesures trouvées. Nous avons décrit l'évolution des principaux polluants atmosphériques au centre ville de la Tunisie sur les différentes périodes des saisons d'hiver et d'été.

D'après notre étude, les concentrations des polluants étudiées dépassent les limites nationales et internationales recommandées ce qui nécessite de prendre des décisions pour lutter contre la pollution afin de préserver la nature et la santé des êtres humains et contribuer à l'effort mondial fourni contre les changements climatiques.

Notre travail a été enrichi par une étude numérique qualitative dans laquelle nous avons étudié la dispersion de polluants éjectés à partir d'une cheminée. Dans cette partie, nous avons présenté notre démarche suivie pour implanter les paramètres essentiels au programme de calcul (ANSYS) ainsi que les résultats trouvés.

**Mots clés :** Pollution atmosphérique, polluants, cheminée, jet, Tunisie, ANSYS, DOAS.