

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

Université du 20 Août 1955 Skikda

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique



N° d'ordre: D01211911D

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat en Sciences

Spécialité : Electromécanique

Par :

Mr. ABDERRAHMANE Nadhir

**ETUDE DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE EN PROVENANCE
DE LA ZONE PETROCHIMIQUE DE LA VILLE DE SKIKDA**

Soutenue le : 04 Juillet 2019

Devant le Jury composé par :

Mr. BOUZAOUIT Azeddine	Professeur	Université de Skikda	Président
Mr. GADRI Larbi	M.C.A	Université de Tébessa	Rapporteur
Mr. KELAIAIA Ridha	M.C.A	Université de Skikda	Co- Rapporteur
Mr. LOUAFI Messaoud	Professeur	Université de Tébessa	Examineur
Mr. LACHOURI Abderrazak	Professeur	Université de Skikda	Examineur
Mr. BENCHOUIA Nadjm edine	M.C.A	Université de Souk Ahras	Examineur

REMERCEMENTS

- ✓ *A dieu, source de tout effort et amour.*
- ✓ *A mes regrettés parents, pour l'éducation et l'exemple qu'ils ont su me donner.*
- ✓ *A tous ceux et A toutes celles qui m'ont jour après jour appris le peu que je sais.*

Je tiens ici à remercier toutes les personnes qui ont participé, d'une manière ou d'une autre, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, en m'excusant par avance pour tous les noms que j'aurais omis de noter mais qui restent chers à mon cœur ...

J'adresse tout d'abord mes remerciements à l'ensemble des membres de mon jury de Thèse, qui ont accepté sans hésitation d'être rapporteurs de ce travail et qui ont bien voulu en évaluer la qualité.

Merci à Dr. KHOUMANE Lakhdar, mon premier directeur de thèse et qui est décédé en mois de Mai passé, qui a suivi mes travaux depuis de longues années maintenant et qui a toujours su me faire confiance et m'apporter l'aide nécessaire, tant sur le plan scientifique que moral. Je remercie également Dr. GADRI Larbi et Dr. KELAIA Ridha qui ont accepté mon encadrement et qui ont bien voulu m'aider dans cette phase finale et critique de la thèse.

J'exprime ma gratitude à messieurs BOUZAOUI Azzedine, LOUAFI Messaoud, BENCHOUA Najmedine et LAACHOUR Abderrazak pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger mon travail et qui ont bien voulu faire partie de mon jury.

Un immense merci à mes amis pour leur encouragement et leur soutien moral, je ne cite aucun nom car ils me sont tous très chers.

Un très grand merci à ma famille et à mes proches pour les petits coups de pouce au quotidien qui ont représenté, en définitive, une aide aussi précieuse que conséquente.

Je ne saurais terminer sans saluer la confiance et l'attachement constant et déterminant de ma femme, qui sans son aide précieuse, je n'aurais jamais pu mettre à terme ce travail.

Alors à vous tous, merci et Pardon. Bien sûr, je dédie ce travail à mes enfants, sans oublier les autres ...MERCI !

A vous tous ... Nadhir

الملخص

يعتبر إنتاج الطاقة والصناعة والزراعة والنقل البري المصدر الرئيسي لتعرض السكان لتلوث الهواء. يرتبط التعرض طويل الأجل لملوثات الهواء مثل الجسيمات الدقيقة والأوزون وأكاسيد النيتروجين وثنائي أكسيد الكبريت بشكل واضح بتأثيرات صحية عمومية كبيرة وضارة. النشاط الصناعي هو مصدر العديد من التصريفات في مختلف وسائل الإعلام البيئية (الماء والهواء والتربة).

أثناء نقل الملوثات في الغلاف الجوي ، يصبح من الصعب تحديد تركيبة العناصر والمركبات لأنها تنتج من خلائط المواد والركام التي تختلف أصولها وأحجامها ومكوناتها الكيميائية حسب المصادر والبيئة ؛ في هذا العمل ، نحن مهتمون بالدراسة والتحليل الوصفي لعواقب التصريفات الصناعية العرضية و المنهج التحليلي لتقدير تلوث الهواء من خلال استخدام معادلة توازن المواد العامة ؛ سمحت لنا الملوثات الغازية والغبار الجوي بوضع منهجية سهلة لتقدير التلوث على مستويات مختلفة ؛ لتحديد المناطق المعرضة والتأثيرات التي تهددها.

كلمات مفتاحية: الآثار؛ التلوث؛ الغلاف الجوي؛ عواقب؛ البيئة

Abstract:

Energy production, industry, agriculture, road transport are the main source of exposure of the population to air pollution; Long-term exposure to air pollutants such as fine particulate matter, ozone and nitrogen oxides, as well as sulfur dioxide, is clearly associated with significant and adverse public health effects. Industrial activity is a source of many discharges into the various environmental media (water, air, soil). During the atmospheric transport of pollutants, the composition of elements and compounds then becomes complex to determine since it results from mixtures of substances and aggregates whose origins, particle sizes and chemical compositions vary according to the sources, the time and the environment.

In this work, we are interested in the study and the descriptive analysis of the consequences of accidental industrial discharges; An analytical approach to estimating air pollution through the use of the general material balance equation; gaseous pollutants and aerosols allowed us to establish an easy methodology for estimating pollution at different scales; for the identification of exposed areas and impacts threatening them.

Keywords: discards; impacts; pollution; atmospheric; consequences; environment.

Résumé :

La production d'énergie, l'industrie, l'agriculture et les transports routiers présentent la source dominante d'exposition de la population à la pollution de l'air ; L'exposition à long terme aux polluants atmosphériques tels que les particules fines, l'ozone et les oxydes d'azote, de même que le dioxyde de soufre, est clairement associée à des effets importants et néfastes sur la santé publique. L'activité industrielle est source de nombreux rejets dans les différents milieux de l'environnement (eau, air, sols). Durant le transport atmosphérique des polluants, la composition des éléments et composés devient alors complexe à déterminer puisqu'elle résulte de mélanges de substances et d'agrégats dont les origines, les tailles des particules et les compositions chimiques varient en fonction des sources, du temps et de l'environnement.

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'étude et l'analyse descriptive des conséquences de rejets industriels accidentels ; Une approche analytique d'estimation de la pollution atmosphérique par l'utilisation de l'équation générale du bilan matière ; des polluants gazeux et aérosols nous a permis d'instaurer une méthodologie facile d'estimation de la pollution à différentes échelles ; pour l'identification des zones exposés et des impacts les menaçant.

Mots clés : rejets ; impacts; pollution; atmosphérique; conséquences ; environnement.

Liste des figures

Figure I.1	Représentation schématique de la distribution granulométrique des aérosols atmosphériques selon (Whitby 1976).....	10
Figure I.2	Processus de dépôts de polluants.....	13
Figure I.3	Tableau de la classification périodique des éléments.....	14
Figure I.4	Spectre énergétique de la vitesse du vent.....	16
Figure I.5	Comparaison entre le gradient de température de l'atmosphère et le gradient thermique de l'adiabatique.....	17
Figure I.6	Ecoulement en présence d'un obstacle isolé (Turbelin, 2000).....	18
Figure I.7	Mécanisme conduisant à une brise de mer.....	18
Figure II.8	Sources anthropiques des polluants atmosphériques.....	23
Figure III.9	Image satellitaire de Skikda.....	38
Figure III.10	Carte géologique d'Algérie.....	41
Figure III.11	Géologie de la Wilaya de Skikda.....	41
Figure III.12	Carte de vulnérabilité des eaux souterraines.....	42
Figure III.13	Carte hydrogéologique du nord l'Algérie (Document SH/EXP, 1993.....	42
Figure III.14	Transect pluvial saisonnier de la région de Skikda (2002-2011).....	42
Figure III.15	Représentation des températures de la région de Skikda (2002-2011).....	43
Figure III.16	Diagramme ombrothermique de GAUSSEN de la région de Skikda (2002-2011)	43
Figure III.17	Moyennes saisonnières de l'humidité relative de la région de Skikda (2002-2011)	44
Figure III.18	Rose des vents annuelle de la région de Skikda.....	44
Figure III.19	Plan de situation des installations au niveau de la zone industrielle de Skikda	46
Figure III.20	Les évènements majeurs redoutés pour la ville de Skikda	51
Figure IV.21	Image des gaz brûlés par torche.....	56
Figure IV.22	Schéma générale d'un bac de stockage.....	57
Figure IV.23	Composition de l'air dans l'atmosphère	58
Figure V.24	Photos montrant les différents horizons du gisement ferrifère de l'Ouenza.....	68
Figure V.25	les facteurs de diffusion des polluants.....	68
Figure V.26	Les moyennes mensuelles des températures en (°C) station Tébessa (2007-2016)	69
Figure V.27	Les moyennes mensuelles des précipitations en (mm) de Tébessa (2007-2016)	70
Figure V.28	Les moyennes mensuelles des vitesses des vents en (m/s) Tébessa (2007-2016)	71
Figure V.29	Les moyennes mensuelles de l'humidité relative en H% Tébessa (2007-2016)	72
Figure V.30	Diagramme Ombrothermique de la station de Tébessa (2007-2016).....	74
Figure V.31	Localisation de la zone d'étude d'Ouenza (Google Earth d'une altitude de 220 Km	77
Figure V.32	Composants du modèle de dispersion.....	78
Figure V.33	Présentation de la fonction de dispersion de la concentration polluante	80
Figure V.34	Sources de prélèvement sur tout le contour de la mine de l'Ouenza.....	81
Figure V.35	Concentration polluante des postes de mesure.....	84
Figure 36	Hygromètre capacitif à diélectrique polymère, (En Annexe A).....	97
Figure 37	Réponse non linéaire d'un capteur à semi-conducteur. (En Annexe A).....	100

Liste des Tableaux

Tableau I.1	Echelles des mouvements atmosphériques (Atkinson, 995).....	15
Tableau II.2	Polluants atmosphériques courants et leurs sources.....	24
Tableau II.3	Contribution de la fraction sèche (%) au dépôt atmosphérique total.....	25
Tableau II.4	Contribution des flux de dépôts sec au flux total en milieux urbains et semi- urbains.....	26
Tableau II.5	Contribution de la fraction sèche des HAP au dépôt atmosphérique total (%)	26
Tableau II.6	Méthodes manuelles de mesure des gaz inorganiques.....	30
Tableau II.7	Procédures automatisées de mesure des gaz inorganiques.....	31
Tableau II.8	Procédures des plus importantes de mesure pour les particules en suspension (SPM)	32
Tableau II.9	Surveillance d'air en Rhénanie-du-Nord-Westphalie (Allemagne).....	33
Tableau II.10	Normes Algériennes de la pollution de l'air	34
Tableau II.11	Normes de l'OMS.....	35
Tableau III.12	Représentation des agglomérations les plus proches de GL1K.....	47
Tableau III.13	Les unités industrielles de la zone pétrochimique de Skikda.....	48
Tableau III.14	La situation de pollution engendrée par le secteur industriel à Skikda.....	50
Tableau IV.15	Production d'hydrocarbures	61
Tableau IV.16	Production commercialisé.....	61
Tableau IV.17	Consommation des chaudières en vapeur.....	62
Tableau IV.18	La quantité des gaz torchés par soustraction de la quantité de gaz autoconsommé	62
Tableau IV.19	Récapitulation des résultats	64
Tableau V.20	Températures moyennes mensuelles et annuelles en (°C) de Tébessa (2007-2016).....	69
Tableau V.21	Précipitations moyennes mensuelles et annuelles en (mm) de Tébessa (2007-2016).....	70
Tableau V.22	Vitesses des vents moyennes mensuelles et annuelles (m/s) de Tébessa (2007-2016).....	71
Tableau V.23	Humidité relative moyennes mensuelles et annuelles en H% de Tébessa (2007-2016).....	72
Tableau V.24	Température moyenne mensuelles interannuelles et précipitation moyennes mensuelles interannuelle de Tébessa (2007-2016).....	73
Tableau V.25	Appareil de mesure des polluants atmosphérique poussiéreux.....	82
Tableau V.26	Concentrations mesurés dans différentes stations de la mine de l'Ouenza	82
Tableau V.27	Analyse chimique du minerai de fer.....	83
Tableau 28	Classification de quelques types de capteurs de gaz selon leur principe de détection. (En Annexe 01).....	99

Les acronymes

AC : Autoconsommation

Boil-off : Gaz évaporé lors du stockage

BPCO : Broncho-pneumopathie chronique

CEN : Comité européen de normalisation

CFCx : Gaz, Chlorofluocarbures

COV : Composés organiques volatils,

DIN/EN/ISO 9000 : Normes de gestion de la qualité et d'assurance qualité

DIN/ISO : Normes DIN et ISO

DRIK : Direction régionale industrielle de Skikda,

EGZIK : Entreprise de gestion de la zone industrielle

EN 45000 : Conditions à remplir par les laboratoires d'essai

ERAP : Entreprise Française du Raffinage des Pétroles

ETM : Eléments traces métalliques

FGBP : Fuel gaz basse pression

FGHP : Fuel gaz haute pression

GL1/K : Complexe de liquéfaction du gaz naturel de Skikda

GNL : Gaz naturel liquéfié

HC : Hydrocarbures,

HPA : Hydrocarbures polycycliques aromatiques

ISO 25 : Conditions générales de compétence des laboratoires d'étalonnage et d'essai

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PAN : Le nitrate de peroxy acétyle

PM : Particulate Matter

Qx : Quintaux

RGPH : Recensement Général de la Population et de l'Habitat

SOMALGAZ : Société mixte Algérienne du Gaz

SPM: Suspended Particulate Matter

TCM : Tétrachloromercurate (Méthodes manuelles de mesure des gaz inorganiques)

TM : Tons Métriques

UV : Ultraviolet : Filtre ultraviolet, Indice UV, séchage UV, Télescopes spatiaux UV

VAG : Veille de l'Atmosphère Globale

VDI : Des directives (Virtual Device Interface).

Table des Matières

Page de garde	I
Remerciements	II
Résumés	III
Liste des Figures	VI
Liste des Tableaux	VII
Les acronymes	VIII
Table des Matières	IX
Introduction générale	1
Chapitre I : Caractérisation des polluants atmosphériques	6
I. Introduction	7
I.1 Concept de la pollution	7
I.1.1 Définition de la pollution atmosphérique	7
I.1.2 les particules atmosphériques.....	7
I.1.3 Les sources naturelles	8
I.1.3.1 Les poussières terrigènes	8
I.1.3.2 Les sels de mer	8
I.1.3.3 Les autres sources naturelles.....	9
I.1.4 Les sources anthropiques.....	9
I.1.4.1 Nucléation homogène de vapeur.....	9
I.1.4.2 Nucléation hétérogène de vapeur.....	9
I.2 Caractérisation des polluants atmosphériques.....	10
I.2.1 Caractérisation des particules atmosphériques.....	10
I.2.1.1 Taille des particules.....	10
I.2.1.2 Temps de résidence.....	11
I.2.1.3 Composition chimique des aérosols.....	11
I.2.2 Les modes de dépôts.....	12
I.2.2.1 Les retombées sèches.....	12
I.2.2.2 Les retombées humides.....	12
I.2.3 Nature des particules étudiées.....	13
I.2.3.1 Les éléments majeurs.....	14
I.2.3.2 Toxicité des éléments minéraux.....	14
I.3 Facteurs de transport des polluants.....	15
I.3.1 Facteurs météorologiques.....	15
I.3.1.1 Le vent.....	15
I.3.1.2 La température.....	16
I.3.1.3 La turbulence.....	17
I.3.1.3.1 La turbulence mécanique.....	17
I.3.1.3.2 La turbulence thermique.....	18
I.4 Les différentes échelles de la pollution atmosphérique.....	19
I.4.1 Pollution de proximité et à l'échelle locale.....	19

I.4.2 Pollution à l'échelle régionale.....	19
I.4.3 Pollution à l'échelle planétaire.....	19
I.5 Synthèse du chapitre.....	20
Chapitre II : Evaluation de l'ampleur des polluants atmosphériques	21
II. Introduction.....	22
II.1 La gestion de la pollution de l'air.....	22
II.1.1 Les sources de la pollution atmosphérique anthropique.....	23
II.1.2 Les types de polluants atmosphériques et leurs sources.....	23
II.1.2.1 Les polluants gazeux.....	23
II.1.2.1.1 Les particules en suspension.....	24
II.1.2.2 Les polluants secondaires.....	24
II.2 Modes de déposition des polluants.....	25
II.2.1 Les éléments métalliques.....	25
II.2.2 Les éléments majeurs.....	26
II.2.3 Les composés organiques.....	27
II.3 Techniques de collecte.....	27
II.3.1 Collecte des retombées totales.....	27
II.3.2 Collecte des retombées humides.....	27
II.3.3 Collecte des retombées sèches.....	28
II.3.4 La planification des mesures de pollution.....	28
II.4 Les différentes étapes concernant la procédure de mesure.....	28
II.4.1 Les dispositions concernant l'utilisateur.....	29
II.4.2 Les procédures de mesure pour les gaz inorganiques.....	29
II.4.2.1 Les méthodes manuelles.....	29
II.4.2.2 Les procédures automatisées.....	31
II.4.2.3 Les procédures de mesure des polluants atmosphériques solides.....	31
II.4.2.4 Les réseaux pour la mesure des échantillons aléatoires.....	33
II.4.2.5 Synthèse des résultats pour les substances réglementées.....	34
II.4.2.5.1 Normes de la pollution atmosphérique.....	34
II.5 Synthèse du chapitre.....	36

Chapitre III : Impact environnemental des polluants atmosphériques au sein de la zone pétrochimique de Skikda

III. Introduction.....	38
III.1 Situation géographique de Skikda.....	38
III.2 Description de l'environnement et du voisinage.....	38
III.2.1 Description de l'environnement naturel.....	38
III.2.1.1 Morphologie.....	38
III.2.1.2 Géologie.....	39
III.2.1.2.1 Géologie de la région.....	39
III.2.1.2.2 Géologie de la zone d'étude.....	40
III.2.1.2.3 Hydrogéologie.....	41
III.2.2 Caractéristiques climatologiques de la zone d'étude.....	42
III.2.2.1 La pluviométrie.....	42

III.2.2.2 La température.....	43
III.2.2.3 Diagramme ombrothermique.....	43
III.2.2.4 L'humidité.....	43
III.2.2.5 Les vents.....	44
III.2.2.6 Faune et flore.....	44
III.2.2.6.1 Faune.....	45
III.2.2.6.2 Flore.....	45
III.2.2.6.3 Servitudes.....	45
III.3 Présentation de la zone d'étude.....	45
III. 3 .1 Description de l'environnement humain.....	47
III.3.1.1 Implantation humaine.....	47
III.3.1.2 Activités.....	47
III.3.1.2.1 Activités agricoles.....	47
III.3.1.2.2 Activités industrielles.....	48
III.3.1.2.3 Activités tertiaires.....	49
III.4 Le pôle pétrochimique et son impact sur la ville de Skikda.....	49
III.4.1 Sources de pollution dans la ville de Skikda.....	49
III.4.2 Les évènements majeurs redoutés pour la ville de Skikda.....	50
III.5 Synthèse du chapitre.....	52
Chapitre IV : Approche analytique de la dispersion et la Concentration des polluants provenant de la zone pétrochimique de la ville de Skikda.....	53
IV.1 Introduction.....	54
IV.2 Présentation du complexe.....	56
IV.2.1 Le complexe comprend principalement.....	56
IV.2.1.1 Phénomène d'évaporation du GNL dans les bacs de stockage.....	57
IV.2.1.2 Procédé d'évaporation du GNL et problématique.....	57
IV.2.3 Composition de l'air.....	58
IV.2.4 Les effluents atmosphériques.....	58
IV.2.4.1 Monoxyde de carbone (CO) et le gaz carbonique (CO ₂).....	58
IV.2.4.2 les oxydes d'azotes (NO _x).....	59
IV.2.4.3 Vapeur d'eau.....	59
IV.2.5 Les hydrocarbures imbrûlés.....	59
IV.2.5.1 Impact dus aux effluents gazeux.....	59
A - Impact du CO ₂	59
B- Impact du CO.....	59
C- Impact du NO _x	60
IV.3 Estimation du boil-off.....	60
IV.3.1 Analyse de l'autoconsommation.....	61
IV.3.1.1 L'autoconsommation.....	61
IV.3.1.2 Le coefficient d'autoconsommation (AC).....	61
IV.3.1.3 Productions par unité.....	61
IV.3.1.4 Production commercialisée.....	61
IV.3.2 Consommation en gaz dans les chaudières.....	62

IV.3.3	Quantité des gaz torchés.....	62
IV.3.3.1	Les autres types de gaz torchés.....	63
IV.3.3.2	Quantification du BOIL- OFF.....	63
IV.4	Synthèse du chapitre.....	64

Chapitre V : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone minière de l'Ouenza 66

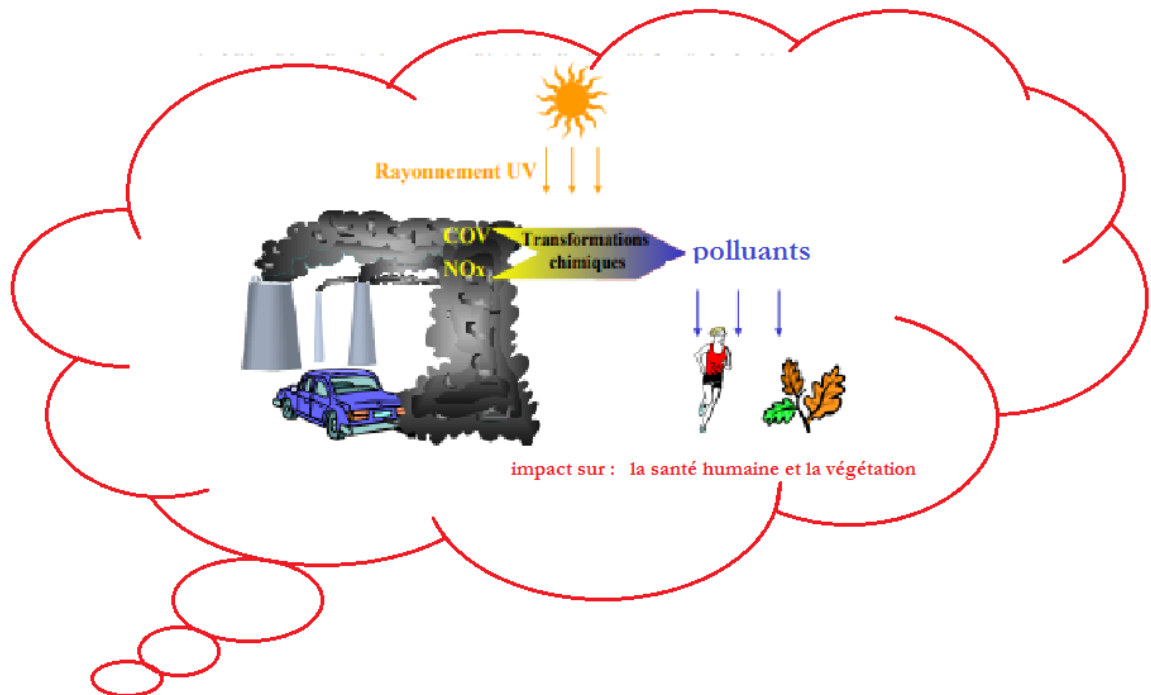
V.1	Introduction.....	67
V.2	Etude climatique.....	68
V.2.1	Les facteurs météorologiques.....	69
V.2.2	Les facteurs topographiques.....	69
V.2.2.1	Température.....	69
V.2.2.2	Précipitation.....	70
V.2.2.3	Le vent.....	71
V.2.2.4	Humidité.....	72
V.2.2.5	Courbe pluvio-thermique.....	73
V.2.2.6	Conclusion.....	74
V.3	Détermination de la pollution atmosphérique de la région de l'Ouenza.....	74
V.3.1	Introduction.....	74
V.3.2	Méthodologie.....	76
V.3.2.1	Zone d'étude.....	76
V.3.2.2	Modèles de dispersion de poussière.....	76
V.3.3	Modèle de conservation de masse.....	78
V.3.3.1	Résultats expérimentaux et discussions.....	80
V.3.3.2	Matériel de mesure.....	81
V.3.3.3	Les mesures techniques et analyse des résultats.....	82
V.4	Synthèse du chapitre.....	85

Conclusion générale et recommandations..... 86

Références Bibliographique..... 90

Annexes..... 95

Introduction générale



L'idée de base : la pollution atmosphérique nous concerne tous. Dans nos villes et ailleurs, nous sommes exposés à des mélanges de polluants atmosphériques qui influencent notre santé et notre bien-être. Les effets sont considérables : on estime que l'espérance de vie est réduite d'une à deux années dans les régions les plus polluées. Plusieurs sources contribuent à cette pollution : la production d'énergie, l'industrie, l'agriculture, les transports routiers. Ces derniers représentent d'ailleurs la source dominante d'exposition de la population à la pollution de l'air. L'exposition à long terme aux polluants atmosphériques tels que les particules fines, l'ozone et les oxydes d'azote, de même que le dioxyde de soufre, est clairement associée à des effets importants et néfastes sur la santé : cancer du poumon, asthme, broncho-pneumopathie chronique, infarctus du myocarde. L'impact en termes de santé publique est nettement identifiable : morts prématurées, qualité et espérance de vie nettement réduites.

L'activité industrielle est source de nombreux rejets dans les différents milieux de l'environnement (eau, air, sols), elle produit des déchets et peut être à l'origine d'accidents technologiques. L'impact sanitaire de l'activité industrielle sur la santé des populations va dépendre essentiellement des milieux contaminés (eau, air, sols), de la nature des risques (liés aux déchets, technologiques, etc.), des types de polluants, de leurs concentrations et des voies d'exposition (respiratoire, digestive, cutanée). Les effets sont divers, allant de la simple gêne olfactive à la survenue de cancers.

Durant le transport atmosphérique des polluants, la composition des éléments et composés devient alors complexe à déterminer puisqu'elle résulte de mélanges de substances

Introduction générale

et d'agrégats dont les origines, les tailles des particules et les compositions chimiques varient en fonction des sources, du temps et de l'environnement (Desboeufs *et al.*, 1999 et 2001). En effet, durant leur transport, les différents composés peuvent engendrer des composés dits secondaires au contact les uns des autres ou par synergie et réactions chimiques avec d'autres composants de l'atmosphère. Les particules en suspension sont principalement formées de composés minéraux tels que les métaux, les sels, les nitrates, les sulfates et de composés organiques tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques, les hydrocarbures aliphatiques, les dioxines. La nature dynamique de l'atmosphère favorise ensuite le transport de ces éléments et composés à différentes échelles spatiales et temporelles.

Ainsi, afin d'estimer l'impact des composés atmosphériques sur l'environnement, il semble intéressant d'étudier les éléments et composés se déposant par la voie des retombées sèches et humides sur les différents types de milieux plutôt que d'étudier les composés atmosphériques, qui sont amenés à évoluer durant leur transport.

L'Algérie, est un bon modèle des situations observées actuellement dans les pays à moyen niveau socio-économique en raison d'une explosion démographique, d'une forte urbanisation et d'une industrialisation rapide surtout dans la frange littorale et les hauts-plateaux. La quasi-totalité du tissu industriel est implantée dans ces zones qui représentent 20% de la superficie du territoire national et où réside plus de 80% de la population. En effet, c'est là que sont localisées les villes les plus importantes.

Dans le cadre des changements climatiques, l'Algérie participe à l'effort mondial de surveillance de l'atmosphère. Elle abrite, depuis 1995, à Tamanrasset dans le Sud du Sahara une des stations de référence du programme scientifique de la Veille de l'Atmosphère Globale (VAG). Ce programme est coordonné par l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale). Cette station assure en continu les mesures de la concentration des gaz à effet de serre comme le gaz carbonique et le méthane.

La pollution atmosphérique correspond à une modification moyenne naturelle d'une espèce chimique gazeuse ou particulaire dans l'atmosphère et peut être de nature biogénique dont les principales sources naturelles sont l'érosion éolienne, les feux, les émissions des gaz biogéniques, des écosystèmes et les éruptions volcaniques.

Elle peut être d'origine anthropiques, engendrées essentiellement par la combustion des ressources naturelles fossiles (gaz, pétrole, charbon) ou par de la biomasse et par l'évaporation de solvants et autre produits volatils.

La pollution atmosphérique représente un véritable enjeu de santé publique et environnementale que ce soit au niveau local, régional ou planétaire. Les polluants émis dans

Introduction générale

l'atmosphère ne reste pas confinés près de la source d'émission ou à l'environnement locale, et peuvent être transportés sur des longues distances, et créés plusieurs problèmes environnementaux régionaux et mondiaux.

Dans cette thèse nous allons essayer de faire une approche analytique d'estimation de la pollution atmosphérique par les polluants gazeux et aérosols; dans une première partie, l'étude de la toxicité des éléments considérés, dans une seconde partie, nous étudierons les particules atmosphériques qui sont des vecteurs de transport privilégiés de ce type d'éléments dans l'atmosphère., dans la troisième partie, nous aborderons les techniques de collecte des particules atmosphériques et en fin l'estimation des flux de retombées atmosphériques des éléments inorganiques et des composés organiques en milieux ruraux et urbains. On examinera par la suite les limitations auxquelles on se heurte lorsqu'on formule des solutions pour les divers milieux de pollution. Pour chacun des polluants, les niveaux atteints sont comparés aux références disponibles. Le danger relatif, présenté par les différents polluants gazeux et particulaires pour la santé, varie avec la concentration de ces polluants dans le temps et dans l'espace, et ainsi les effets sur la santé de ces polluants peuvent varier d'un pays à l'autre. La situation est encore plus compliquée car certaines combinaisons de polluants ont des effets cumulatifs et parfois synergétiques. C'est dans le même contexte qu'est conçu l'essentiel des polluants existant dans la nature.

Une étude environnementale détaillée sur la ville de Skikda sera réalisé. L'objectif est la présentation de notre zone d'étude : localisation géographique et historique de la ville de Skikda, la population urbaine, sa densité, ainsi que la présentation de la zone pétrochimique et de la nature du risque potentiel. Il aide à comprendre l'impact de la présence de l'industrie à risque dans la ville et l'effet de cette présence sur l'espace et la société. Les gaz torchés constituent une partie importante de l'autoconsommation du complexe GLIK ; la récupération de ce gaz en général et le Boil off en particulier qui constitue le plus haut pourcentage des gaz torchés permet la minimisation de l'autoconsommation ainsi que la préservation de l'environnement et ceci par la réduction des substances polluantes dans l'atmosphère. Enfin, l'estimation exacte du Boil-off reste un problème délicat, car ce phénomène est lié à plusieurs facteurs instables.

On a traité une deuxième forme de polluant atmosphérique dans les zones minières de l'Ouenza qui a fait l'objet, dans une approche, le modèle de dispersion atmosphérique, modèle de conservation de la continuité, est utilisé pour prédire la dispersion et la concentration au sol dans une mine à ciel ouvert, avec référence spécifique à la mine de l'Ouenza en tant qu'étude de cas.

Introduction générale

A cette fin le présent travail s'articule sur cinq chapitres d'études.

Le premier chapitre a pour objectif de synthétiser les connaissances acquises sur la caractérisation des flux de déposition des éléments inorganiques et des composés organiques en milieux ruraux et urbains, incluant, pour les éléments inorganiques, une description des techniques de collecte et des modes de traitement des échantillons. En effet, cette partie méthodologique ne concerne que les éléments minéraux pour lesquels une validation des méthodes de collecte a été mise au point durant ce travail.

Le deuxième chapitre vise à donner un aperçu général des méthodes utilisées pour la détermination du degré de pollution, prévenir et combattre la pollution. On examinera les limitations auxquelles on se heurte lorsqu'on formule des solutions pour les divers milieux de l'environnement. Ainsi, pour protéger l'air, il ne suffit pas d'éliminer les traces de métaux des gaz de cheminée en se contentant de transférer ces contaminants aux sols par des méthodes inappropriées de gestion des déchets solides. Pour chacun des polluants, les niveaux atteints sont comparés aux références disponibles. Celles-ci peuvent être des valeurs limites qui doivent obligatoirement être respectées, et dont le dépassement implique l'élaboration de plans de réduction visant à diminuer la pollution. Il existe également des valeurs cibles, aussi appelées valeurs guides, qui sont indicatives, ainsi que des seuils d'alerte, seuils d'information, seuils de protection de la santé et seuils de protection de la végétation. Le danger relatif, présenté par les différents polluants gazeux et particulaires pour la santé, varie avec la concentration de ces polluants dans le temps et dans l'espace, et ainsi les effets sur la santé de ces polluants peuvent varier d'un pays à l'autre. En conséquence, la surveillance continue, soignée et attentive des concentrations est nécessaire avant qu'une estimation inacceptable des effets soit faite. La situation est encore plus compliquée car certaines combinaisons de polluants ont des effets cumulatifs et parfois synergétiques. C'est dans le même contexte qu'est conçu l'essentiel des polluants existant dans la nature (type, source, impacts et législation).

Le troisième chapitre traite la présentation de notre zone d'étude de point de vue localisation géographique et historique de la ville de Skikda, la population urbaine, sa densité, ainsi que la présentation de la zone industrielle et de la nature du risque potentiel. Il aide à comprendre l'impact de la présence de l'industrie à risque dans la ville et l'effet de cette présence sur l'espace et la société.

Le quatrième chapitre expose les méthodes de classification des stations correspond aux problèmes de pollution atmosphérique rencontrés en fonction de la zone géographique où elles sont implantées. L'implantation répond elle-même à des critères de classification bien spécifiques. Ces critères dépendent du nombre d'habitants dans une zone urbaine, de la

Introduction générale

position de la station, du trafic automobile quotidien, du rapport entre les différents polluants rencontrés, et enfin de la hauteur du point de prélèvement (Mathé, 2010). On distingue 2 groupes de stations : les stations de fond et les stations de proximité (Mathé, et al. 2009). La qualité de l'air peut être contrôlée par l'utilisation de capteurs de gaz basés sur des concepts physiques ou physicochimiques offrant des méthodes de mesure plus simples et une plus grande souplesse d'utilisation (Pijolat, 1997). Les progrès technologiques de la microélectronique et l'élaboration de nouveaux matériaux sensibles utilisés dans l'élaboration de ces capteurs de gaz (Lalauze, 1997) sont à l'origine des avancées majeures dans ce domaine. Le complexe de liquéfaction du gaz naturel GL1/K de la zone pétrochimique de Skikda est conçu pour transformer une quantité très importante de gaz naturel de l'état gazeux à l'état liquide (GNL) ; avant son expédition par voie maritime le GNL est stocké dans des bacs à pression quasi atmosphérique ou l'évaporation par suite de l'échange thermique avec le milieu ambiant par les trois mécanismes de transfert de chaleur (rayonnement, convection conduction) d'une certaine quantité est inévitable. Le travail qui va suivre consiste à estimer la quantité des gaz torchés au sein de la zone d'étude.

Le dernier chapitre va être consacré aux estimations des polluants aérosols dans une zone minière ; Outre les concentrations ferrifères considérées comme les plus importantes en Algérie, des minéralisations polymétalliques à Cu-Pb-Zn-Ba-F, d'ordre économique moindre, sont signalées dans certains secteurs du massif de l'Ouenza.

Des conclusions et recommandations feront l'objet de la partie finale de ce travail.

Chapitre I : Caractérisation des polluants atmosphériques

I. Introduction

I.1 Concept de la pollution

I.1.1 Définition de la pollution atmosphérique

I.1.2 les particules atmosphériques

I. 1.3 Les sources naturelles

I.1.3.1 Les poussières terrigènes

I.1.3.2 Les sels de mer

I.1.3.3 Les autres sources naturelles

I.1.4 Les sources anthropiques

I.1.4.1 Nucléation homogène de vapeur

I.1.4.2 Nucléation hétérogène de vapeur

I.2 Caractérisation des polluants atmosphériques

I.2.1 Caractérisation des particules atmosphériques

I.2.1.1 Taille des particules

I.2.1.2 Temps de résidence

I.2.1.3 Composition chimique des aérosols

I.2.2 Les modes de dépôts

I.2.2.1 Les retombées sèches

I.2.2.2 Les retombées humides

I.2.3 Nature des particules étudiées

I.2.3.1 Les éléments majeurs

I.2.3.2 Toxicité des éléments minéraux

I.3 Facteurs de transport des polluants

I.3.1 Facteurs météorologiques

I.3.1.1 Le vent

I.3.1.2 La température

I.3.1.3 La turbulence

I.3.1.3.1 La turbulence mécanique

I.3.1.3.2 La turbulence thermique

I.4 Les différentes échelles de la pollution atmosphérique

I.4.1 Pollution de proximité et à l'échelle locale

I.4.2 Pollution à l'échelle régionale

I.4. 3 Pollution à l'échelle planétaire

I.5 Synthèse du chapitre

Chapitre I : Caractérisation des polluants atmosphériques

I. Introduction

Ce premier chapitre a pour objectif de synthétiser les connaissances acquises sur la caractérisation des flux de déposition des éléments inorganiques et des composés organiques en milieux ruraux et urbains, incluant, pour les éléments inorganiques, une description des techniques de collecte et des modes de traitement des échantillons. En effet, cette partie méthodologique ne concerne que les éléments minéraux pour lesquels une validation des méthodes de collecte a été mise au point durant ce travail.

Ce chapitre se scinde en quatre parties avec, dans une première partie, l'étude de la toxicité des éléments considérés. Dans une seconde partie, nous étudierons les particules atmosphériques qui sont des vecteurs de transport privilégiés de ce type d'éléments dans l'atmosphère. Enfin, dans la troisième partie, nous aborderons les techniques de collecte des particules atmosphériques et l'estimation des flux de retombées atmosphériques des éléments inorganiques et des composés organiques en milieux ruraux et urbains.

I.1 Concept de la pollution

La pollution atmosphérique est un phénomène très complexe compte tenu de la diversité des polluants susceptibles d'être présents dans l'atmosphère. Les niveaux de pollution au sol dépendent de la nature et des conditions de rejets polluants ainsi que des conditions atmosphériques qui déterminent le transport, la diffusion et les retombées de ces mêmes polluants. Ces phénomènes ont lieu dans la troposphère (la plus basse couche de l'atmosphère). Des quantités croissantes de gaz et de particules potentiellement nuisibles sont émises dans l'atmosphère et entraînent des dommages à la santé humaine et à l'environnement. Elles endommagent également, à long terme, les ressources nécessaires au développement durable de la planète.

I.1.1 Définition de la pollution atmosphérique

On entend par pollution de l'atmosphère, l'émission dans l'atmosphère, de gaz, des fumées ou de particules solides ou liquides, corrosifs, toxiques ou odorantes de nature à incommoder la population, à compromettre la santé ou la sécurité publique ou à nuire aux végétations, la production agricole et aux produits agro-alimentaires, à la conservation des constructions et monuments ou au caractère des sites .(Journal Officielle, 1983)

I.1.2 les particules atmosphériques

Les éléments inorganiques, aussi bien que les composés organiques, peuvent être présents sous forme gazeuse ou solide dans l'atmosphère. Ainsi, par exemple, les éléments tels As, Hg, Se et S présentent des parts importantes, voire, majoritaires dans la phase gazeuse (Chiaradia et Cupelin, 2000). De même, les hydrocarbures se divisent en phases gazeuse et particulaire

Chapitre I : Caractérisation des polluants atmosphériques

en fonction de leurs propriétés physico-chimiques et de leurs tailles (Colombo et al., 1999). Dans le cas des éléments inorganiques la forme particulaire reste prépondérante. Ces derniers sont associés à des particules atmosphériques qui sont leurs vecteurs de transport privilégiés (Koutrakis, 1984). Ainsi, la compréhension de la dynamique atmosphérique des polluants suppose une connaissance du comportement physico-chimique des particules de ce compartiment qui sont des constituants naturels de la biosphère. La présence de ces particules dans l'atmosphère résulte de processus naturels (érosion éolienne, émissions foliaires, activité volcanique, aérosols marins, etc.) et anthropiques (industries diverses, trafic automobile, usines d'incinération, chauffage domestique, etc.).

I.1.3 Les sources naturelles

Les sources naturelles d'aérosols sont multiples et produisent des types de particules très variés (Allen, 2001). Cependant, ce sont les zones arides et les océans qui produisent naturellement la majorité des aérosols présents dans l'atmosphère (D'Almeida et al., 1991). Ces aérosols sont formés par des processus mécaniques de dispersion du substrat, qu'il soit terrigène ou marin.

I.1.3.1 Les poussières terrigènes

Le sol est constitué d'un fond géochimique correspondant à la teneur naturelle ou originelle en éléments traces ($< 1\text{g.kg}^{-1}$) trouvée dans les sols en absence d'apport ou d'exportation. Cette présence n'est pas pour autant uniforme. Les teneurs en éléments traces d'un sol sont liées aux propriétés et à la nature de la roche mère et au climat. Ces composés minéraux ainsi exposés sont chimiquement et mécaniquement altérés par l'action combinée du vent, de l'eau et des variations de température (Pye, 1987). Cette altération permet de mettre en suspension des particules d'un diamètre supérieur à $0,1\ \mu\text{m}$ constituées d'un assemblage de minéraux dépendant du sol érodé, mais principalement composées d'argiles, de quartz et de calcite (Gomes, 1990).

I.1.3.2 Les sels de mer

Le vent soufflant à la surface des océans crée des vagues qui sont responsables de la formation des particules d'aérosols d'origine marine. D'une part, les vagues produisent à leur crête des gouttelettes, dont les plus fines restent en suspension dans l'air et finissent par s'évaporer donnant naissance à des aérosols solides. D'autre part, l'éclatement des bulles produit par l'entraînement d'air lors du déferlement de la vague produit des particules atmosphériques. L'ensemble de ces processus produit des particules solides de diamètre supérieur à $0,2\ \mu\text{m}$ (Pruppacher et Klett, 1997). Ces sels de mer sont principalement constitués d'halite (NaCl), le plus abondant sel de l'océan auquel sont associés d'autres éléments.

Chapitre I : Caractérisation des polluants atmosphériques

Cependant, la composition chimique exacte des particules de sels de mer reste relativement locale puisqu'elle découle de la composition de l'eau de l'océan dans la zone émettrice (Junge, 1964).

I.1.3.3 Les autres sources naturelles

L'un des principaux phénomènes naturels émetteur d'aérosols est le volcanisme. Sous le vocable volcanisme nous incluons l'ensemble des phénomènes physico-chimiques qui participent au transfert de la matière, de la terre vers l'atmosphère, par le biais de volcans aériens ou marins (Allen, 2001). Cependant, l'atmosphère renferme, à côté des éléments de base, une quantité variable de substances naturelles provenant de sources très diverses qui, dépassant un seuil, crée une source de pollution tel que: Les feux des forêts ; Les volcans ; Les embruns marins ; Les végétaux ...ect (Allen, 2001 ; D'Almeida et al., 1991) .

I.1.4 Les sources anthropiques

Deux types de sources anthropiques peuvent être distingués. D'une part, les activités émettant directement vers l'atmosphère comme par exemple l'abrasion des pneumatiques et des plaquettes de frein ou encore les cimenteries. D'autre part, les particules formées par conversion gaz/particule qui représentent la majorité des aérosols d'origine anthropique. Cette conversion, qui intervient lors de tous les processus de combustion à haute température tels les moteurs automobile, les usines d'incinération ou les centrales thermiques, peut être effectuée de deux façons différentes : la nucléation homogène ou hétérogène de vapeur (Pruppacher et Klett, 1997).

I.1.4.1 Nucléation homogène de vapeur

Une telle nucléation se passe au niveau des produits de combustion. Cela concerne principalement les gaz de faible température d'ébullition qui se trouvent en super-saturation.

Les vapeurs émises condensent sous forme de gouttes ou de particules après avoir réagi ou non en phase gazeuse. Les composés typiquement impliqués dans ces mécanismes sont les suies, les huiles, l'acide sulfurique, les sulfates ou encore les carbonates. Les particules formées recouvrent une large gamme de taille avec cependant un diamètre majoritairement inférieur à 0,1 μm .

I.1.4.2 Nucléation hétérogène de vapeur

Cette voie de conversion implique des particules d'aérosols préexistantes. Les éléments les plus volatils présents en phase gazeuse lors du processus de combustion se condensent à la surface des particules déjà présentes dans le milieu lors de la diminution de la température (Linton et al., 1976). La taille de ces particules dépend de la quantité de matière ajoutée à l'aérosol initial mais cependant, elle est en général comprise entre 0,1 et 2 μm .

I.2. Caractérisation des polluants atmosphériques

I.2.1 Caractérisation des particules atmosphériques

I.2.1.1 Taille des particules

Les particules d'aérosols présents dans l'atmosphère ont des tailles comprises entre 10 et 100 μm de diamètre (Lodge, 1991). Elles peuvent être séparées en trois classes (Whitby, 1976):

- Les grosses particules dont le diamètre est compris entre 2 et 100 μm ;
- Les fines, de diamètre compris entre 0,1 et 2 μm ;
- Les particules ayant un diamètre inférieur à 0,1 μm .

Ces dernières, constituant 90 % de la masse des aérosols atmosphériques, sont des noyaux de condensation appelés noyaux d'Aitken. Ces aérosols ont une vitesse brownienne éliminés par impaction (Renoux, 1990). Cette distribution en taille dépend d'une part de l'origine de l'aérosol et d'autre part de la distance par rapport aux sources (Slinn, 1983).

En général, les particules de taille inférieure à 2 μm sont formées par conversion gaz/particule, alors que celles de taille supérieure à 2 μm sont formées par des processus mécaniques. La relation existante entre les mécanismes de formation des particules atmosphériques et leur taille est schématisée en Figure I.1.

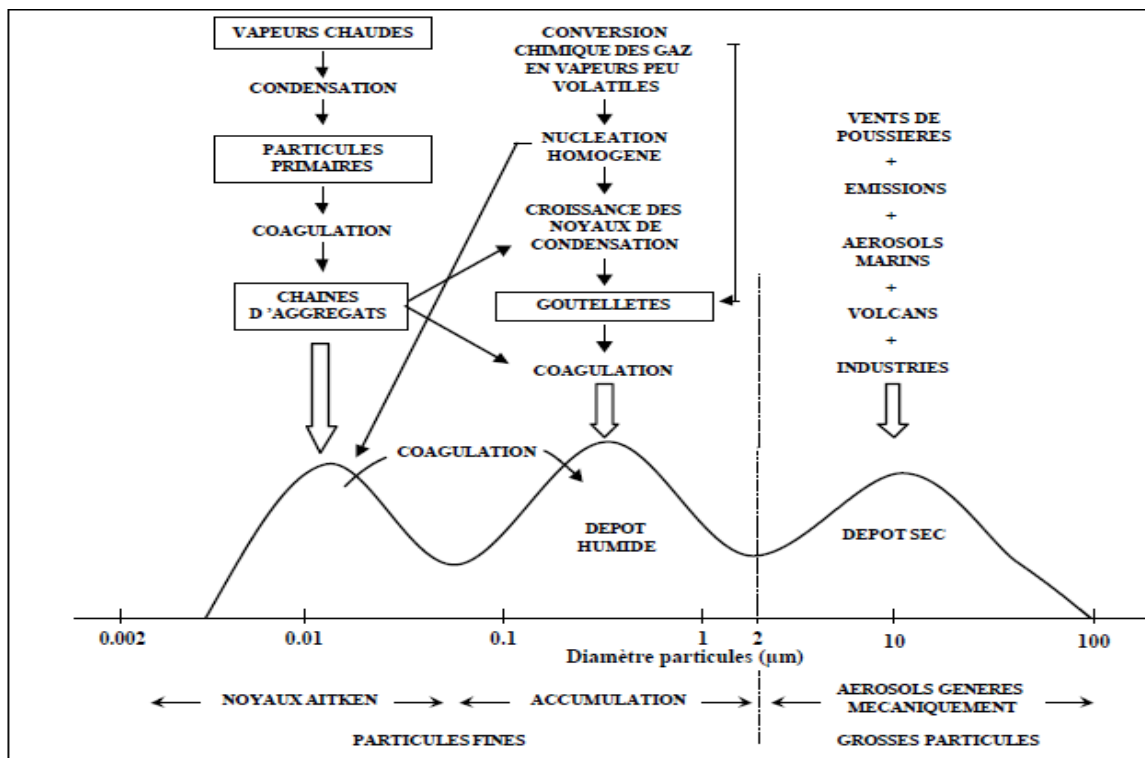


Figure I.1: Représentation schématique de la distribution granulométrique des aérosols atmosphériques selon Whitby (1976).

Il apparaît que les fines particules formées par nucléation homogène ou par condensation de gaz sur des particules préexistantes, peuvent passer dans le mode

Chapitre I : Caractérisation des polluants atmosphériques

d'accumulation par coagulation. Les aérosols subissent des collisions les uns avec les autres du fait des mouvements thermiques ou browniens et s'agrègent en une particule de taille plus importante. Ce processus de grossissement est particulièrement important lors du transport longue distance des aérosols (Prospero et Ness, 1987).

I.2.1.2 Temps de résidence

La durée du séjour atmosphérique des aérosols varie en fonction de plusieurs paramètres dont les conditions météorologiques (vent, température, humidité), la nature des particules (matrice minérale ou organique) et surtout leur granulométrie (Junge, 1979). D'après Renoux (1990), dans la troposphère (0 à 11 km d'altitude), le temps de séjour le plus long (environ 10 jours) correspond à des aérosols de 0,1 μm . Par contre les particules les plus grosses ($> 10 \mu\text{m}$) et l'aérosol ultra- fin (10^{-4} à $10^{-3} \mu\text{m}$) possèdent les temps de séjour les plus courts (quelques minutes à quelques heures) : leur principale cause de disparition est le dépôt sec. Dans la stratosphère (11 à 53 km d'altitude), la durée de vie d'une particule peut atteindre plusieurs années. Dans l'atmosphère, il y a une véritable dichotomie physique entre les particules fines ($< 2 \mu\text{m}$) et les plus grosses ($> 2 \mu\text{m}$) qui évoluent de façon tout à fait indépendante et disparaissent par des mécanismes séparés. Un des corollaires à ces phénomènes de temps de résidence est la distance de transport des particules atmosphériques qui est comprise entre quelques mètres (pour les plus grosses) et des milliers de kilomètres (pour les plus fines) (Boutron et al., 1993 ; Wrobel et al., 2000).

I.2.1.3 Composition chimique des aérosols

L'origine des aérosols est étroitement corrélée avec leur taille, il apparaît une augmentation de la fraction insoluble avec la taille des particules (Pruppacher et Klett, 1997).

Ces changements reflètent l'évolution de la nature des particules dans les différentes classes de taille et particulièrement de leur mode de formation, c'est-à-dire un arrachement au substrat terrestre ou une conversion gaz/particule (Heintzenberg, 1998). Les prélèvements d'aérosols à leur source mettent ainsi en évidence que les aérosols anthropiques sont principalement composés d'espèces solubles. Ainsi, les particules urbaines (émises par des sources anthropiques) mais également celles d'origine marine possèdent une fraction soluble plus importante que les aérosols provenant de l'érosion éolienne. La première catégorie, constitué des particules anthropiques est formée d'éléments comme les sulfates, les nitrates, des métaux lourds tels Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Sb, Sn, V et Zn (Giusti et al., 1993 ; Heintzenberg, 1998 ; Sternbeck et al., 2002) et des hydrocarbures aliphatiques et aromatiques (Colombo et al., 1989). La fraction grossière terrigène contient principalement de la matière insoluble comportant essentiellement Al, Fe, Si de même que Ca, K et Mg, des carbonates (Gomes, 1990), alors que les particules issues du pétillage marin sont principalement

Chapitre I : Caractérisation des polluants atmosphériques

constituées de halite avec des quantités variables de CO₃, SO₄, K, Mg et Ca (Pruppacher et Klett, 1997). Toutefois, plusieurs observations montrent que les particules prélevées en zone éloignée ne présentent pas des compositions uniformes, typiques de celle des zones sources, mais plutôt des mélanges de plusieurs types d'aérosols (Levin et Ganor, 1996).

I.2.2 Les modes de dépôts

Les particules peuvent être éliminées de l'atmosphère par des processus de piégeage, lessivage ou par gravitation. Le premier phénomène concerne les particules qui se trouvent piégées lors de la formation des gouttes d'eau nuageuses. Le second mécanisme se produit lorsque les particules atmosphériques sont lessivées durant les précipitations. Le dernier phénomène est le dépôt sec (Renoux, 1990 ; Vukmirovic et al., 1997). Ces modes d'élimination des particules de l'atmosphère permettent de définir deux processus de dépôt atmosphérique : les retombées sèches et les retombées humides. La nature des sources, les conditions météorologiques et les caractéristiques physiques des composés piégés sur ces particules (taille de la particule, pression de vapeur, solubilité, température) déterminent ces deux processus (Galloway et al., 1982 ; Harrison et al., 1993).

I.2.2.1 Les retombées sèches

Ce type de retombées atmosphériques fait intervenir des processus physico-chimiques complexes qui dépendent principalement de deux paramètres (Bidleman, 1988 ; Golomb et al. 1997). D'une part, le dépôt sec est fonction de la nature des particules, à savoir du type de la source émettrice, de la taille et de la composition des particules et de leur vitesse de chute. D'autre part, les conditions extérieures, regroupant les conditions météorologiques (vitesse du vent, turbulence, température) ou la nature des milieux récepteurs (herbe, sol, surface imperméable, eau, etc.) Interviennent sur ce type de dépôt. Ainsi, les retombées sèches, nettement influencées par la granulométrie des particules, peuvent être distinguées en 3 modes :

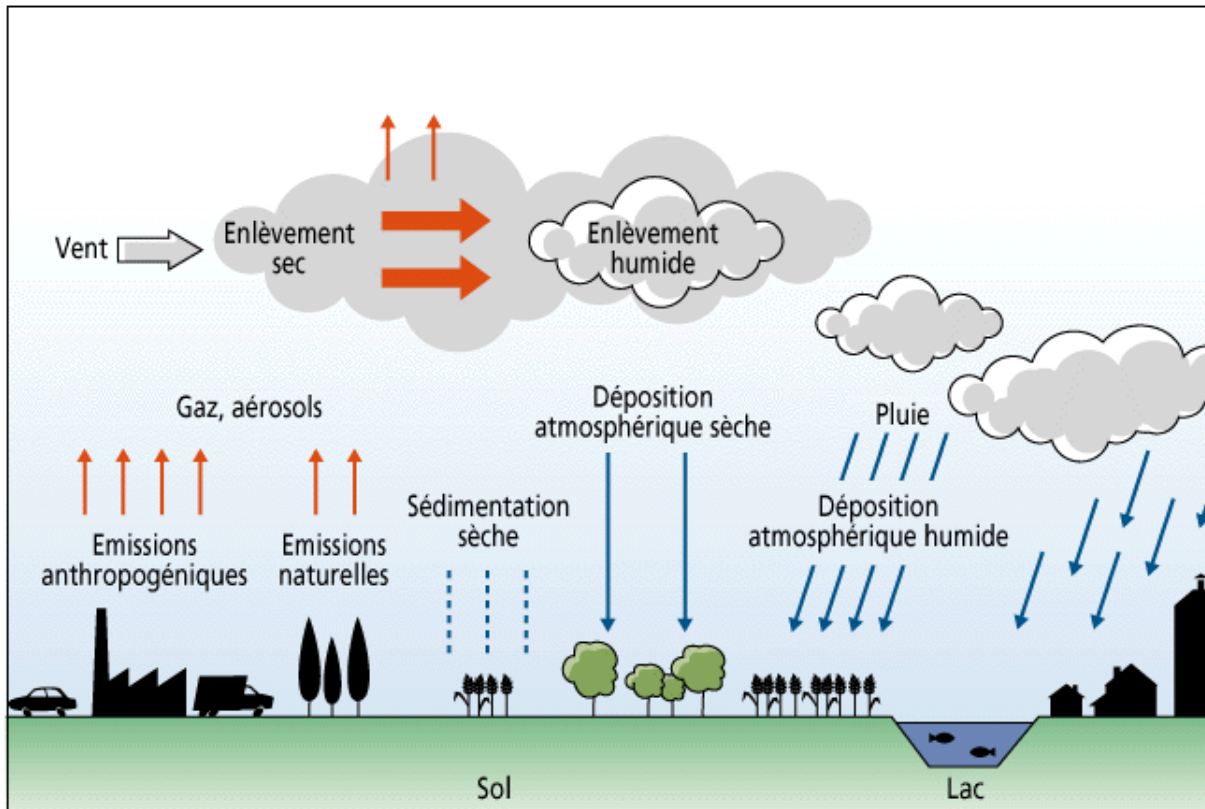
- La gravitation, qui concerne généralement les grosses particules ($> 2 \mu\text{m}$) ;
- Le mouvement Brownien, concerne les plus petites particules ($< 0,1 \mu\text{m}$) qui migrent grâce à leur agitation thermique propre ;
- L'impaction et l'interception, qui mettent en cause l'interaction entre les particules et les surfaces réceptrices et qui concernent toutes les classes de taille de particule.

I.2.2.2 Les retombées humides

Le dépôt humide est composé de deux processus distincts d'élimination des aérosols : le "rain-out" et le "wash-out". Le "rain-out" résulte de la capture des particules par les gouttelettes d'eau nuageuses en cours de formation (Flament, 1985). Les particules fines et les gaz, qui peuvent être transportés haut dans la troposphère sont ainsi incorporés lors de la

Chapitre I : Caractérisation des polluants atmosphériques

formation des gouttes de pluie (Galloway et al., 1982). Le "wash-out" est le piégeage des particules lors d'évènements pluvieux, entre le nuage et le sol, soit par capture à la suite de chocs, soit par entraînement de l'air déplacé lors de la chute des gouttes (Flament, 1985 ; Golomb et al., 1997). Ce lessivage dépend notamment de la hauteur des nuages et de l'efficacité de la collision (rôle du diamètre des gouttes et des particules). Flament (1985) a trouvé que l'efficacité deviendrait négligeable pour des aérosols de taille inférieure à 2 μm . Ce processus d'élimination des aérosols ne concerne donc pas la même classe de taille que le processus de "rain-out".



"Santé et pollution de l'air", Jean Martin, Lucien Yves Maystre *et al.*, copyright 1988, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne. Reproduit avec l'autorisation de l'éditeur.

Figure I.2 : processus de dépôts de polluants

I.2.3 Nature des particules étudiées

La convention de Genève désigne par le terme « métaux lourds » les éléments possédant une masse volumique supérieure ou égale à 4,5 g.cm^{-3} . Cependant, ce terme est souvent remplacé par «éléments traces métalliques » (ETM). Les métaux lourds sont dits à l'état de trace lorsque leur concentration est inférieure à 1 g.kg^{-1} de matière sèche dans la croûte terrestre ou inférieure à 0,1 g.kg^{-1} de matière sèche chez les êtres vivants. La plupart des ETM ne sont que très faiblement volatils et ne sont pas biodégradables. Ces deux principales caractéristiques confèrent aux ETM un grand pouvoir d'accumulation dans tous les compartiments de la biosphère. Ainsi, même si nombre d'entre eux sont indispensables dans les différentes étapes des divers cycles métaboliques (Cu, Fe, Mn, Mo, Zn),

Chapitre I : Caractérisation des polluants atmosphériques

l'augmentation de leur concentration dans l'environnement, associée à leur capacité d'accumulation, induisent des risques pour le développement des différents organismes.

I.2.3.1 Les éléments majeurs

L'analyse qualitative et quantitative précise des éléments cationiques (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) ou anioniques (P provenant principalement de HPO₂ et S provenant principalement de SO₄), contenus dans les retombées atmosphériques sont essentielles car ces composés sont des traceurs de qualité et permettent l'estimation du degré d'impact des émissions anthropiques (Chang et al., 1997). Il existe par exemple une relation directe entre les sources atmosphériques d'aérosols et la concentration de différentes espèces chimiques dans les eaux de pluie (Löye-Pilot et Morelli, 1988). Le suivi de ces éléments majeurs apparaît donc comme un complément important de la mesure des métaux traces dans l'optique d'identification de sources. Pour des raisons de clarté, les charges portées par l'ensemble de ces éléments n'apparaîtront plus dans le reste du document.

I.2.3.2 Toxicité des éléments minéraux

La Figure 3 présente le tableau périodique des éléments chimiques selon Mendeleïev. Sur celui-ci, le cadre en gras précise les éléments considérés comme métaux lourds et sont marqués en grisé les éléments considérés comme toxiques dans divers documents (arrêtés, directives européennes, conventions internationales). Cette représentation souligne que plusieurs éléments toxiques n'appartiennent pas à la famille des métaux lourds. Certains de ces éléments possèdent des densités moyennes (métalloïdes : As, Se et Te) et même faible (Be).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	I	II											III	IV	V	VI	VII	VIII
1	H																	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Uuu	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo
	Lanthanides				Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
	Actinides				Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lw

Figure I.3. Tableau de la classification périodique des éléments. (Leygonie. 1993)

Ce tableau souligne également que plus de 65 % des éléments lourds ne sont pas considérés comme dangereux pour l'homme et l'environnement. En prenant comme critère de toxicité leur concentration maximale admise dans une eau potable (Tableau I.1), il apparaît que le Hg et le Cd sont 1000 fois plus toxiques que d'autres métaux de transition, comme le Cu ou le Zn. Dans une classe intermédiaire, se situent des éléments tels, l'As, le Cr, le Pb ou

Chapitre I : Caractérisation des polluants atmosphériques

le Ni qui sont toxiques en solution aqueuse. Ainsi, par exemple, le Cr et le Pb, et dans une moindre mesure le Cu, provoquent des troubles au niveau des systèmes nerveux et respiratoire chez l'homme alors que les effets sur les écosystèmes se présentent sous diverses formes comme l'anémie chez les mammifères ou des effets neurologiques sur les comportements de la méso et macro faunes (Galsomies et al., 1999). Enfin, d'autres métaux sont plutôt générateurs de goût (Na, Mg, K) ou de couleur (hydroxyde de Fe).

I.3 Facteurs de transport des polluants

I.3.1 Facteurs météorologiques

Nous dénombrons trois facteurs prédominants : le vent, le gradient vertical de température et la turbulence. Nous allons voir successivement leurs influences.

I.3.1.1 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.

La vitesse moyenne du vent joue deux rôles dans le processus de diffusion : l'un dans le transport du produit, l'autre dans sa diffusion.

La vitesse instantanée du vent reflète la nature turbulente du vent. Elle se décompose en une partie moyenne et une partie fluctuante (ou turbulente) aléatoire :

la vitesse moyenne est une quantité qui traduit la « force » du vent en un point de l'espace sur des périodes de temps qui varient entre 10 minutes et une heure pour que le résultat ne soit sensible ni aux fluctuations lentes, ni aux variations rapides du vent ; la partie fluctuante du vent est une fonction aléatoire qui représente les fluctuations turbulentes de la vitesse autour de sa moyenne. Ces fluctuations sont décrites statistiquement (écarts types, densités spectrales, par exemple). Le vent est un écoulement turbulent d'air, constitué d'une multitude de tourbillons de tailles diverses, imbriqués les uns dans les autres, les petits étant transportés par les plus gros, eux-mêmes transportés par le mouvement d'ensemble.

L'écoulement de l'air atmosphérique est donc constitué d'une large gamme d'écoulements interdépendants caractérisés par des tailles allant du millimètre au millier de kilomètres (Crabot et al., 1999). De ce fait, la vitesse du vent en un point donné de l'espace, présente de fortes variations plus ou moins irrégulières en termes d'amplitudes et de fréquences différentes.

Tableau I.1 : Echelles des mouvements atmosphériques (Atkinson, 1995).

Taille (km)	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^2	10^3	10^3
Période	1s	10s	1min	10min	2h	15h	7j	10j
Echelles	Micro-échelles			Mésos-échelles		Grande échelles		

Parallèlement, une analyse spectrale permet de retrouver l'échelle des fluctuations de l'écoulement de l'air (voir la Figure 4) (Crabot, 1999).

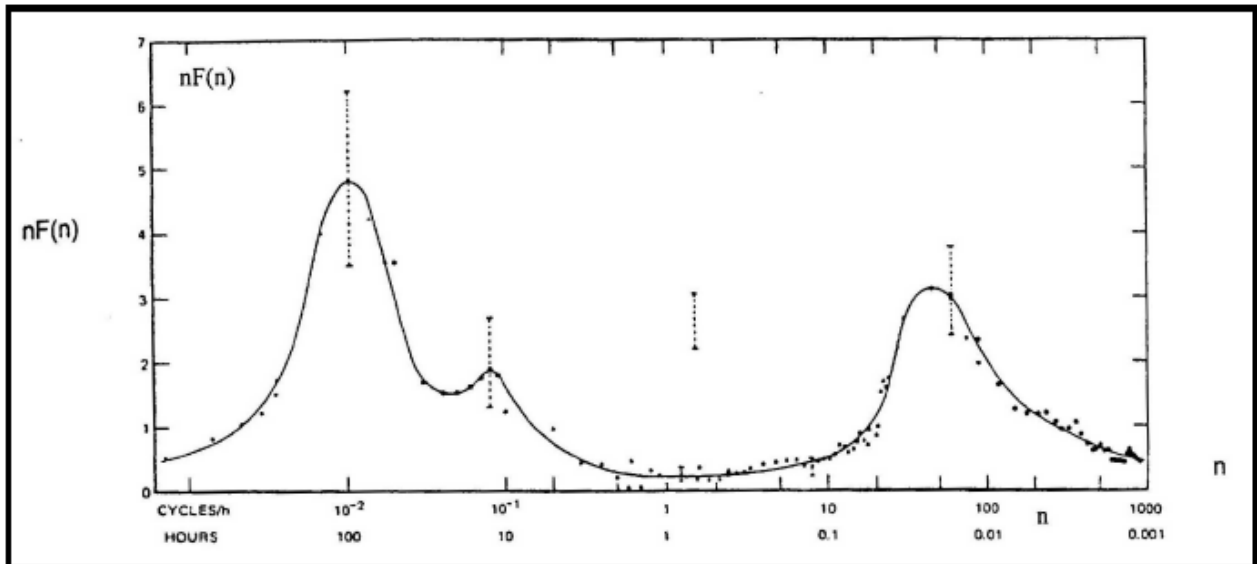


Figure I.4 : Spectre énergétique de la vitesse du vent

Les pics du spectre montrent dans quelle mesure les tourbillons participent effectivement à l'énergie turbulente. On retrouve les tendances explicitées précédemment avec :

- Le pic relatif à une période d'environ 100 heures traduisant les variations de vitesse du vent associées aux passages successifs de cyclones et d'anticyclones.
- Le pic relatif à une période d'environ 12 heures traduisant l'augmentation de la vitesse du vent dans la journée et sa diminution durant la nuit.
- Le pic relatif à une période comprise entre 10 s et 10 min traduisant la turbulence de petite échelle.

Pour l'étude de la dispersion de produits, dans la couche limite atmosphérique, seules les informations concernant la structure des mouvements de petites échelles (micro-échelles) sont pertinentes. A cette échelle, la forme du spectre dépend fortement de la stratification thermique de l'atmosphère.

I.3.1.2 La température

Les mouvements des masses d'air sont dus aux différences de densité entre elles. Le gradient de température conditionne ainsi le mouvement ascendant ou descendant d'une couche ou l'absence de celui-ci. La température de l'air diminue généralement avec l'altitude de 1 °C tous les 100 m.

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. Une inversion thermique conduira au contraire à de forts niveaux de pollution. Cette inversion peut se produire la nuit quand le sol refroidit rapidement ainsi que l'hiver par temps clair. L'absence de vent en général favorise l'apparition d'une

Chapitre I : Caractérisation des polluants atmosphériques

inversion thermique. L'évolution de la température de l'atmosphère avec l'altitude peut s'écarter de ces conditions (comme le montre la Figure I.5) : Des phénomènes d'inversion de température peuvent aussi survenir se traduisant par une augmentation de la température avec l'altitude puis une baisse.

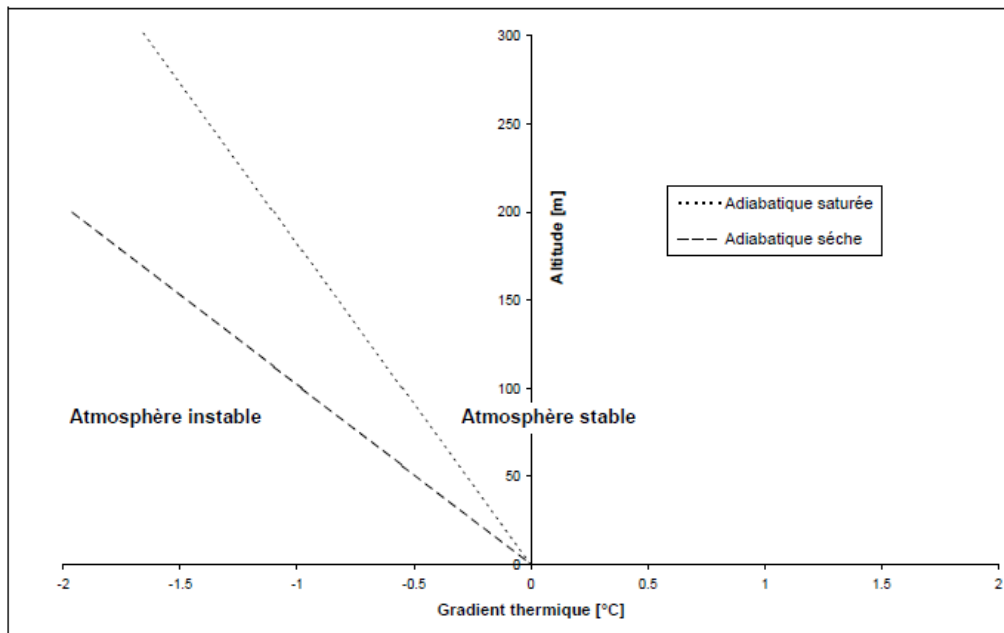


Figure I.5 : Comparaison entre le gradient de température de l'atmosphère et le gradient thermique de l'adiabatique

I.3.1.3 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 :

I.3.1.3.1 La turbulence mécanique

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).

La perturbation du champ de vent par la présence d'obstacles isolés (constructions, haies...) va dépendre :

- De la géométrie et des dimensions de l'obstacle ;
- De son état de surface ;
- Des caractéristiques du vent incident ;
- De l'environnement proche.

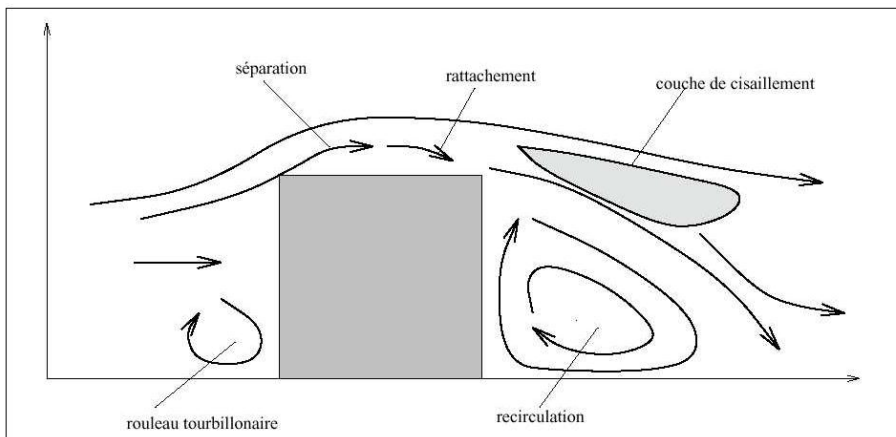


Figure I.6 : Écoulement en présence d'un obstacle isolé (Turbelin, 2000)

Autour d'un bâtiment de forme cubique:

- au niveau des parois de l'obstacle, se forment des couches limites qui se séparent et se rattachent, créant des zones de recirculation ;
- au niveau de la rencontre de l'écoulement décollé et du sillage, se forme une couche fortement cisailée ;
- au niveau de la face au vent, se forme un écoulement descendant qui, à la rencontre du sol, forme un rouleau tourbillonnaire. Ce rouleau se déplace en aval en contournant latéralement l'obstacle, formant des tourbillons dit en "fer à cheval".

I.3.1.3.2 La turbulence thermique

La turbulence thermique (tourbillons créés par la différence de température des masses d'air).

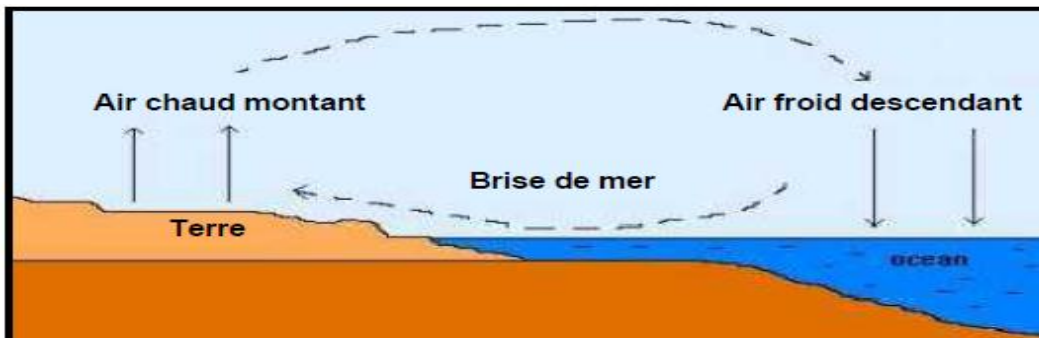


Figure I.7: Mécanisme conduisant à une brise de mer (J.C Couillet, et al INERIS-DRA-2002)

I.4 Les différentes échelles de la pollution atmosphérique

I.4.1 Pollution de proximité et à l'échelle locale

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

I.4.2 Pollution à l'échelle régionale

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

- Les pluies acides qui participent au dépérissement des forêts et des lacs. Elles désignent les phénomènes de retombées au sol de dépôts acides, secs et humides, qui touchent des zones étendues et éloignées des sources en raison des transformations physico-chimiques et des conditions climatiques (HCl, H₂SO₄ issu des émissions de SO₂, HNO₃ liées à celles des NO_x).
- La pollution photochimique qui désigne les mécanismes conduisant à la rupture naturelle de formation et de destruction de l'ozone troposphérique (à basse altitude) et à l'augmentation de sa concentration dans l'air.

I.4.3 Pollution à l'échelle planétaire

Qui concerne les deux phénomènes suivants

- La diminution (« trou ») de la couche d'ozone stratosphérique due essentiellement à l'action des composés halogénés (chlore, brome, iode) libérés par les activités humaines, et la réduction du pouvoir filtrant de la couche d'ozone a des conséquences néfastes sur la santé (cancers de la peau).
- L'augmentation de l'effet de serre qui constitue un processus naturel à la vie terrestre car sans ce phénomène, la température de l'air serait inférieure de 30°C à la valeur moyenne actuelle qui est de 15°C sur notre planète. Cependant, son augmentation liée à la production excessive de certains gaz (CO, CO₂, COV) entraînera de graves changements climatiques (élévation de la température du globe et modifications climatiques lourdes de conséquences pour la vie terrestre).

I.5 Synthèse du chapitre

- ❖ Les polluants organiques et inorganiques forment les éléments principaux de la pollution atmosphérique.
- ❖ Les polluants atmosphériques se caractérisent par leur taille, durée de dépôt et composition chimique.
- ❖ Les facteurs de transport de la masse d'air polluante prédominante sont, le vent, le gradient vertical de température et la turbulence et leurs influences sur la pollution atmosphérique.
- ❖ Les différentes échelles de la pollution atmosphérique sont :
 - Pollution de proximité et à l'échelle locale,
 - Pollution à l'échelle régionale,
 - Pollution à l'échelle planétaire.
- ❖ Il est apparu que les particules atmosphériques possèdent des propriétés physico-chimiques différentes en fonction de leurs origines. Les particules anthropiques, issues des phénomènes de combustion, ont des tailles inférieures à 2 μm et sont solubles alors que les particules naturelles, issues principalement de l'érosion des sols, ont des tailles plus conséquentes ($> 2 \mu\text{m}$) avec une fraction réfractaire plus importante.
- ❖ Cette différence de granulométrie induit des différences de temps de séjour atmosphérique, de distance de parcours et de mode de déposition entre les particules naturelles et anthropiques.
- ❖ Le degré de pollution diffère d'une région à l'autre suivant les conditions naturelles et anthropiques, l'évaluation de ce dernier fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre II : Evaluation de l'ampleur des polluants atmosphériques

II. Introduction

II.1 La gestion de la pollution de l'air

II.1.1. Les sources de la pollution atmosphérique anthropique

II.1.2. Les types de polluants atmosphériques et leurs sources

II.1.2.1 Les polluants gazeux

II.1.2.1.1 Les particules en suspension

II.1.2.2 Les polluants secondaires

II.2 Modes de déposition des polluants

II.2.1 Les éléments métalliques

II.2.2 Les éléments majeurs

II.2.3 Les composés organiques

II.3 Techniques de collecte

II.3.1 Collecte des retombées totales

II.3.2 Collecte des retombées humides

II.3.3 Collecte des retombées sèches

II.3.4 La planification des mesures de pollution

II.4 Les différentes étapes concernant la procédure de mesure

II.4.1. Les dispositions concernant l'utilisateur

II.4.2. Les procédures de mesure pour les gaz inorganiques

II.4.2.1. Les méthodes manuelles

II.4.2.2. Les procédures automatisées

II.4.2.3. Les procédures de mesure des polluants atmosphériques solides

II.4.2.4. Les réseaux pour la mesure des échantillons aléatoires

II.4.2.5. Synthèse des résultats pour les substances réglementées

II.4.2.5.1 Normes de la pollution atmosphérique

II.5 Synthèse du chapitre

Chapitre II : Evaluation de l'ampleur des polluants atmosphériques

II. Introduction

Le présent chapitre vise à donner un aperçu général des méthodes utilisées pour la détermination du degré de pollution, prévenir et combattre la pollution. On examinera les limitations auxquelles on se heurte lorsqu'on formule des solutions pour les divers milieux de l'environnement. Ainsi, pour protéger l'air, il ne suffit pas d'éliminer les traces de métaux des gaz de cheminée en se contentant de transférer ces contaminants aux sols par des méthodes inappropriées de gestion des déchets solides. Pour chacun des polluants, les niveaux atteints sont comparés aux références disponibles. Celles-ci peuvent être des valeurs limites qui doivent obligatoirement être respectées, et dont le dépassement implique l'élaboration de plans de réduction visant à diminuer la pollution. Il existe également des valeurs cibles, aussi appelées valeurs guides, qui sont indicatives, ainsi que des seuils d'alerte, seuils d'information, seuils de protection de la santé et seuils de protection de la végétation. Le danger relatif, présenté par les différents polluants gazeux et particuliers pour la santé, varie avec la concentration de ces polluants dans le temps et dans l'espace, et ainsi les effets sur la santé de ces polluants peuvent varier d'un pays à l'autre. En conséquence, la surveillance continue, soignée et attentive des concentrations est nécessaire avant qu'une estimation inacceptable des effets soit faite. La situation est encore plus compliquée car certaines combinaisons de polluants ont des effets cumulatifs et parfois synergétiques. C'est dans le même contexte qu'est conçu l'essentiel des polluants existant dans la nature (type, source, impacts et législation).

II.1 La gestion de la pollution de l'air

La gestion de la pollution de l'air vise à éliminer, ou à ramener à des niveaux acceptables, les polluants gazeux en suspension dans l'air, les particules en suspension ainsi que les agents physiques et, dans une certaine mesure, biologiques, dont la présence dans l'atmosphère peut avoir des effets nocifs sur la santé de l'humain (augmentation de l'incidence ou de la prévalence des troubles respiratoires, morbidité, cancer, surmortalité) ou sur son bien-être (effets sensoriels, réduction de la visibilité, par exemple), exercer une action délétère sur les animaux ou les végétaux et, enfin, causer des dommages aux matières qui présentent un intérêt économique pour la société et à l'environnement (modifications du climat, par exemple). Il faut aussi accorder une grande attention aux graves dangers liés aux polluants radioactifs ainsi qu'aux procédures spéciales qu'exigent leur maîtrise et leur élimination. On ne saurait trop insister sur l'importance d'une bonne gestion de la pollution atmosphérique à l'extérieur. En l'absence de mesures de réglementation adéquates, la multiplication des

Chapitre II : Evaluation de l'ampleur des polluants atmosphériques

sources de pollution dans le monde moderne peut conduire à des dommages irréparables pour l'environnement et l'humanité. Le présent travail vise à donner un aperçu des solutions possibles pour la gestion de la pollution de l'air ambiant causée par l'industrie. La gestion de la pollution atmosphérique exige donc une approche multidisciplinaire ainsi que des efforts conjugués des organes privés et publics.

II.1.1. Les sources de la pollution atmosphérique anthropique

Les sources de la pollution résultant des activités humaines (ou sources des émissions) sont fondamentalement de deux ordres:

- sources stationnaires, qui peuvent être divisées en sources sectorielles (les industries extractives et l'industrie), en sources ponctuelles et sectorielles (comme la fabrication la production de produits chimiques, de produits minéraux non métalliques, la grosse métallurgie et d'énergie).
- sources mobiles, comprenant tous types de véhicules à moteur à combustion interne (voitures légères à moteur à essence, véhicules légers et lourds à moteur diesel, motocyclettes, avions, y compris les sources linéaires avec émissions de gaz et de matières particulaires provenant de la circulation automobile) figure II.8.

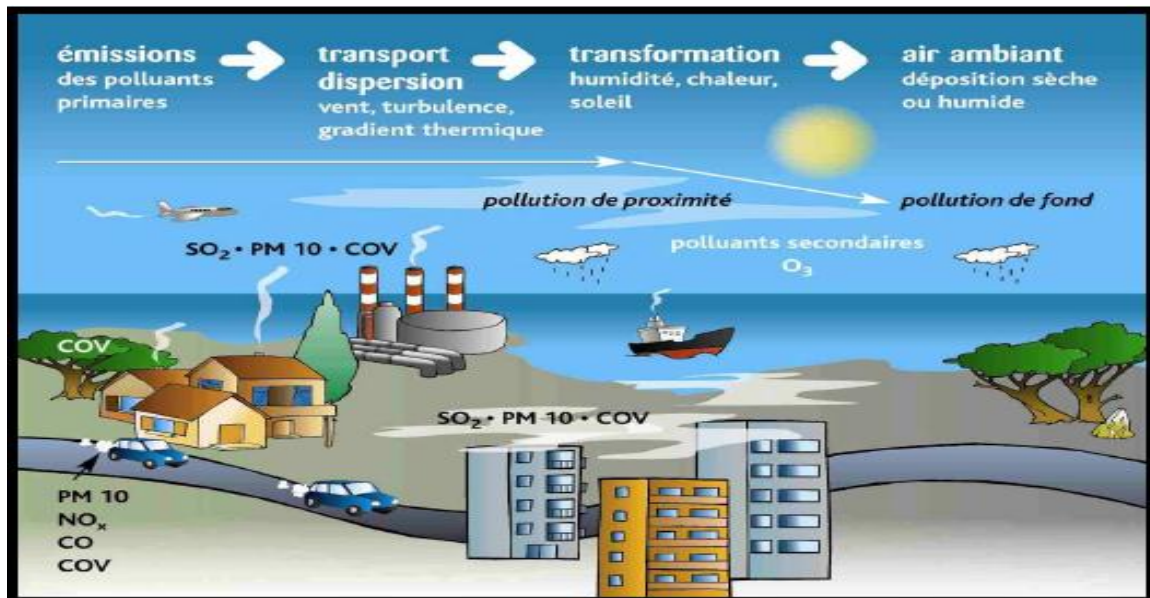


Figure II.8 : Sources anthropiques des polluants atmosphériques

II.1.2. Les types de polluants atmosphériques et leurs sources

On distingue généralement trois catégories de polluants atmosphériques:

II.1.2.1 Les polluants gazeux

Comprennent les composés du soufre, le monoxyde de carbone, les composés de l'azote, les composés organiques (hydrocarbures (HC), composés organiques volatils (COV),

Chapitre II : Evaluation de l'ampleur des polluants atmosphériques

hydrocarbures polycycliques aromatiques (HPA), aldéhydes), les composés halogénés et les dérivés halogénés, le sulfure d'hydrogène, le sulfure de carbone et les mercaptans.

II.1.2.1.1 Les particules en suspension

Comprennent les gaz d'échappement des diesels, les cendres volantes du charbon, les poussières minérales, les poussières et vapeurs et les brouillards acides, les fluorures, les pigments pour peintures, les aérosols de pesticides, le noir de carbone et les fumées d'hydrocarbures. Les polluants sous forme de particules en suspension ont non seulement pour effet de causer des affections respiratoires, des cancers et de la corrosion, de détruire la flore, etc., mais ils peuvent aussi constituer une nuisance, faire obstacle à la lumière du soleil et agir comme surfaces catalytiques pour la réaction des substances chimiques absorbées.

II.1.2.2 Les polluants secondaires

Qui peuvent se former sous l'effet de réactions thermiques, chimiques ou photochimiques. On trouvera au tableau II.2 des exemples des principaux polluants atmosphériques industriels et de leurs sources.

Tableau II.2 : Polluants atmosphériques courants et leurs sources

Catégorie	Source	Polluants émis
Raffineries de pétrole	Divers produits du pétrole et du charbon	SPM, SO ₂ , NO _x , CO, COV
Industries extractives	Extraction du charbon	SPM, SO ₂ , NO _x , COV
	Production de pétrole brut et de gaz naturel	SO ₂
	Extraction de minerais non ferreux	SPM, Pb
	Carrières de pierres	SPM
Industries manufacturières	Alimentation, boissons et tabacs	SPM, CO, COV, H ₂ S
	Textiles et industries du cuir	SPM, COV
	Produits du bois	SPM, COV
	Produits du papier, imprimerie	SPM, SO ₂ , CO, COV, H ₂ S, R-SH
Fabrication de produits chimiques	Anhydride phtalique	SPM, SO ₂ , CO, COV
	Chlore et soude	Cl ₂
	Acide chlorhydrique	HCl
	Acide fluorhydrique	HF, SiF ₄
	Acide sulfurique	SO ₂ , SO ₃
	Acide nitrique	NO _x
	Acide phosphorique	SPM, F ₂
	Oxyde de plomb et pigments	SPM, Pb
	Ammoniac	SPM, SO ₂ , NO _x , CO, COV, NH ₃
	Carbonate de sodium	SPM, NH ₃
	Carbure de calcium	SPM
Acide adipique	SPM, NO _x , CO, COV	

Chapitre II : Evaluation de l'ampleur des polluants atmosphériques

	Anhydride maléique et acide téréphtalique	CO, COV
	Production d'engrais et de pesticides	SPM, NH ₃
	Nitrate d'ammonium	SPM, NH ₃ , HNO ₃
	Sulfate d'ammonium	COV
	Résines synthétiques, matières plastiques, fibres	SPM, COV, H ₂ S, CS ₂
	Peintures, vernis, laques	SPM, COV
	Savon	SPM
	Noir de carbone et encre d'imprimerie	SPM, SO ₂ , NO _x , CO, COV, H ₂ S
Fabrication de produits minéraux non métalliques	Produits du verre	SPM, SO ₂ , NO _x , CO, COV, F
	Produits en argile de construction	SPM, SO ₂ , NO _x , CO, COV, F ₂
	Ciment, chaux et plâtre	SPM, SO ₂ , NO _x , CO
Industries des métaux de base	Fer et acier	SPM, SO ₂ , NO _x , CO, COV, Pb
	Métaux non ferreux	SPM, SO ₂ , F, Pb
Production d'énergie	Electricité, gaz et vapeur	SPM, SO ₂ , NO _x , CO, COV, SO ₃ , Pb
Agriculture	Combustion à ciel ouvert	SPM, CO, COV

II.2 Modes de déposition des polluants

Préalablement à la comparaison des modes de collecte, il est important d'étudier les mécanismes prépondérants de dépositions de ces retombées, à savoir l'importance relative des retombées sèches et humides.

II.2.1 Les éléments métalliques

Le Tableau II.3, présente la participation du dépôt sec de certains métaux au dépôt atmosphérique total, c'est-à-dire la somme des dépôts secs et humides, dans différents milieux. Globalement, le dépôt sec est le mode de dépôt préférentiel avec une participation importante quel que soit le milieu d'étude. En effet, la part relative du dépôt sec par rapport au dépôt total est supérieure à 43 % quel que soit l'élément considéré et le type de milieu. Pour des éléments tels que l'Al, le Cd, le Cr, le Pb, le Fe et le Zn, cette fraction est même majoritaire représentant de 50 à 80 % des retombées totales. Par contre le Mn, le Ni et le Co semblent être des éléments dont le mode de dépôt préférentiel est le type humide, puisque le dépôt sec ne présente respectivement que 43, 47 et 48 % du dépôt total.

Tableau II.3. Contribution de la fraction sèche (%) au dépôt atmosphérique total.

Sites	Al	Cd	Cr	Cu	Pb	Fe	Zn	Mn	Ni	Co
Urbain ¹	-	77	-	78,5	81	-	79	-	-	-
Semi urbain ²	-	50	-	73	81	-	52	-	49	74
Côtier ³	66	50	80	53	56	80	77	43	47	48

II.2.2 Les éléments majeurs

Les contributions des apports atmosphériques secs et humides varient entre les éléments majeurs. Le Tableau II.4 présente les parts relatives de flux de dépôt sec par rapport au dépôt total pour des sites urbains et semi-urbains.

Tableau II.4 : Contribution des flux de dépôts sec (%) au flux de dépôt total en milieux urbains et semi-urbains.

Sites	Ca	K	Mg	Na	P	S
Turquie ¹	93	50	78	71		45
Italie ²	35	28	27	21		19
Espagne ²	37	50	47	54		37
Paris ³	77	66	100	51	63	68
Fontainebleau ^{3,*}	44	50	50	20		45

(Kaya et Tuncel, 1997) ; 2 (Torfs et Van Grieken, 1997) ; 3 (Garnaud, 1999) ; * = site semi-urbain.

Quel que soit l'élément considéré, la part de dépôt sec varie fortement d'un site à l'autre. En effet, à l'exception du P, pour lequel nous n'avons qu'une seule estimation, les parts relatives de dépôt sec varient de 35 à 93,28 à 66,27 à 100, 21 à 71 et 19 à 68 % respectivement pour Ca, K, Mg, Na et S, les parts les plus faibles étant déterminées en Italie (Torfs et Van Grieken, 1997). Ces variations sont également importantes au sein d'une même étude puisque Garnaud (1999) a déterminé une fraction sèche comprise respectivement entre 52 à 98, 20 à 90,16 à 81 et 31 à 96 pour le calcium, le potassium, le sodium et les sulfates.

II.2.3 Les composés organiques

L'étude des proportions des différents types de dépôts atmosphériques des composés organiques porte principalement sur les HAP. Le Tableau II.5, présente la contribution du dépôt sec au dépôt total pour les HAP en milieux urbains.

Tableau II.5 ; Contribution de la fraction sèche des HAP au dépôt atmosphérique total (%).

	Leister et Baker (1994)	Dickhut et Gustafson (1995)	Golomb <i>et al.</i> (1997)	Golomb <i>et al.</i> (1997)
Naphtalène			48	30
Acénaphthylène			63	85
Acénaphthène			68	44
Fluorène	50		44	67
Phénanthrène	57	58	70	50
Anthracène	50	71	83	41
Fluoranthène	52	79	79	62
Pyrène	43	80	80	66
Chrysène	71	83	82	57
Dibenzothiophène			59	58
Pérylène			95	75
Benzo(ghi)perylène	85	82	85	61

Cette contribution varie de 30 à 48 % dans le cas du Naphtalène qui est l'élément le plus léger, et par conséquent, le plus volatil, mais atteint 85 % dans le cas de l'Acénaphthylène dont le poids moléculaire est similaire. Quelle que soit la masse moléculaire de ces composés,

la contribution du dépôt sec est importante et le plus souvent majoritaire. Ainsi, quel que soit le polluant considéré, la contribution du dépôt sec est importante dans l'estimation des flux de retombées totales.

II.3 Techniques de collecte

Les techniques de collectes varient suivant le type de retombées qui doit être échantillonné. La technique la plus simple concerne la collecte des retombées totales et devient plus contraignant pour la collecte des retombées humides et sèches.

II.3.1 Collecte des retombées totales

Le dépôt total est le plus simple à obtenir puisqu'il ne distingue pas les retombées sèches et humides. Un flacon surmonté d'un entonnoir permet la détermination de ce type de dépôt, avec cependant quelques différences suivant les travaux. Ainsi, par exemple, l'entonnoir peut être surmonté d'un cylindre d'une vingtaine de centimètres afin de permettre la collecte de la neige (utilisé dans les réseaux de collecte danois et norvégien) ou encore être protégé par une grille en plastique pour diminuer l'entrée d'insectes (utilisé dans le réseau de collecte de l'Ecole des Mines de Douai). De plus, il semblerait que des biais apparaissent dans l'estimation des flux de déposition totale, dus (1) à la géométrie des entonnoirs (Golomb *et al.*, 1997), (2) au matériaux constitutifs du collecteur (certains utilisent du matériel en polyéthylène basse et haute densité Landing *et al.*, 1998 ; Lindberg et Harriss, 1981 ; Orselli *et al.*, 1999 ; Vukmirovic *et al.*, 1997) alors que d'autres utilisent du téflon (Landis et Keeler, 1997 ; Sweet *et al.*, 1998) ou encore (3) à la période de collecte (qui est de 7 jours (Kaya et Tuncel, 1997 ; Vukmirovic *et al.*, 1997) ou 30 jours (Landing *et al.*, 1998 ; Morselli *et al.*, 1999 ; Thoni *et al.*, 1999)). Enfin, la plupart des protocoles de collecte des retombées atmosphériques ne comporte pas d'étape de rinçage des entonnoirs à la fin des périodes de collecte (Migon *et al.*, 1997 ; Thoni *et al.*, 1999). Or, il semble qu'une part non négligeable des retombées atmosphériques reste adsorbée sur les parois des entonnoirs (Landis et Keeler, 1997). Enfin, une estimation des précipitations doit être faite en parallèle afin d'évaluer les pertes par évaporation qui existent sur ce type de collecteurs ouverts (Garnaud, 1999).

II.3.2 Collecte des retombées humides

Les retombées humides sont collectées grâce à des collecteurs munis de couvercle et de détecteur de précipitations. Ainsi, lorsque des événements pluvieux sont détectés, le couvercle protégeant un flacon se retire afin de permettre la collecte des précipitations et se remet en place à la fin (Garnaud *et al.*, 1999 ; Kim *et al.*, 2000 ; Landis et Keeler, 1997). Certains systèmes de collecte adaptent une filtration automatique de la pluie lors de leur échantillonnage, permettant ainsi de séparer la fraction dissoute de la fraction particulaire. Ce procédé est particulièrement intéressant dans le cas des polluants dissous car les problèmes

Chapitre II : Evaluation de l'ampleur des polluants atmosphériques

liés à l'évolution de la répartition dissous / particulaire sont ainsi évités. Le point faible de ce type de collecte réside dans le temps de réponse du détecteur au début, à la fin et aux types d'événements pluvieux (pluie, neige, brume, etc.) (Garnaud, 1999).

II.3.3 Collecte des retombées sèches

Il existe plusieurs techniques de collecte des retombées sèches. Les valeurs de flux peuvent être obtenues par mesure directe, par différence entre les retombées totales et humides ou encore par l'association d'un modèle de calcul de vitesse et de la mesure de concentrations d'aérosols atmosphériques (Migon *et al.*, 1991 ; Viskari *et al.*, 1997).

II.3.4 La planification des mesures de pollution

Pour planifier les mesures, la première chose à faire est de formuler l'objectif avec autant de précision que possible. Dans la surveillance de la qualité de l'air, les questions et domaines d'activité importants sont:

- Les mesures à référence spatiale
- Les mesures aux installations ;

La planification a pour but d'utiliser correctement les procédures de mesure et d'évaluation pour répondre à des questions spécifiques avec une certitude suffisante.

- Une troisième méthode consiste à faire les mesures là où l'on pense que l'exposition est la plus élevée. Si cet emplacement répond aux normes d'évaluation, il existe une probabilité suffisante pour qu'il en soit de même pour tous les autres. En se focalisant sur les points critiques, cette méthode exige relativement peu d'emplacements d'échantillonnage, mais ceux-ci doivent être choisis avec un soin particulier. En effet, on risque de surestimer l'exposition réelle.

Les paramètres de la période de mesure, de l'évaluation des données obtenues et de la fréquence des mesures sont donnés en grande partie dans la définition des normes (limites) d'évaluation et des intervalles de confiance désirés pour les résultats.

Les valeurs limites admissibles sont liées aux conditions périphériques dont il faut tenir compte dans la planification des mesures. Grâce à des procédures de mesure en continu, on peut obtenir une densité qui ne laisse pratiquement aucun intervalle de temps entre les mesures.

II.4 Les différentes étapes concernant la procédure de mesure

Toute procédure complète de mesure comprend plusieurs étapes: échantillonnage, préparation et nettoyage de l'échantillon, séparation et détection (étape analytique finale), puis collecte et évaluation des données. Dans quelques cas, spécialement pour la mesure en continu de gaz inorganiques, certaines étapes peuvent être omises (la séparation, par exemple). Lors des mesures, il faut se conformer le plus possible aux procédures. Il faut que

Chapitre II : Evaluation de l'ampleur des polluants atmosphériques

celles-ci soient normalisées et, par conséquent, entièrement documentées, sous la forme des normes DIN/ISO, des normes CEN ou des directives VDI.

II.4.1 Les dispositions concernant l'utilisateur

Il ne suffit pas d'utiliser un matériel et des procédures normalisés et éprouvés dans la mesure des concentrations de polluants dans l'air ambiant pour obtenir un résultat acceptable; encore faut-il que l'utilisateur emploie des méthodes appropriées de contrôle de qualité. Les normes DIN/EN/ISO 9000 (normes de gestion de la qualité et d'assurance qualité), EN 45000 (qui définit les conditions à remplir par les laboratoires d'essai) et le guide ISO 25 (conditions générales de compétence des laboratoires d'étalonnage et d'essai) jouent un rôle important dans les dispositions que doit prendre l'utilisateur pour s'assurer de la qualité de l'air.

Les principales dispositions consistent à:

- accepter les méthodes prescrites et les mettre en œuvre selon les bonnes pratiques de laboratoire;
- procéder aux étalonnages et aux vérifications régulières pour garantir un bon fonctionnement;
- procéder aux essais inter laboratoires.

II.4.2 Les procédures de mesure pour les gaz inorganiques

Il existe un grand nombre de méthodes de mesure pour une large gamme de gaz inorganiques (voir Annexe 1). Nous examinerons séparément les méthodes manuelles et les procédures automatisées.

II.4.2.1 Les méthodes manuelles

Dans le cas des méthodes manuelles dont on se sert pour les gaz inorganiques, la substance à mesurer est habituellement absorbée lors de l'échantillonnage dans une solution ou une matière solide. Dans la plupart des cas, on fait un dosage photométrique après une réaction colorante appropriée. Plusieurs méthodes manuelles de mesure ont une importance spéciale en tant que pratiques de référence. Etant donné que leur coût en personnel est relativement élevé, elles ne sont que rarement appliquées aujourd'hui pour les mesures sur le terrain, car des procédures automatisées existent. Les méthodes manuelles les plus importantes sont brièvement exposées au tableau II.6.

Chapitre II : Evaluation de l'ampleur des polluants atmosphériques

Tableau II.6 : Méthodes manuelles de mesure des gaz inorganiques

Matière	Méthode	Exécution	Commentaires
SO ₂	Méthode TCM	Absorption dans une solution de tétrachloromercurate (flacon laveur); réaction avec le formaldéhyde et la pararosaniline pour donner l'acide sulphonique rouge-violet; dosage photométrique	UE = procédure de mesurage de référence; DL = 0,2 µg SO ₂ ; s = 0,03 mg/m ³ à 0,5 mg/m ³
SO ₂	Méthode au gel de silice	Elimination des substances gênantes à l'aide de H ₃ PO ₄ concentré; adsorption sur gel de silice; désorption thermique dans un flux de H ₂ et réduction à H ₂ S; réaction au bleu de molybdène; dosage photométrique	DL = 0,3 µg SO ₂ ; s = 0,03 mg/m ³ à 0,5 mg/m ³
NO ₂	Méthode de Saltzman	Absorption dans une solution réactive tout en formant un colorant azoïque rouge (flacon laveur); dosage photométrique	Etalonnage au nitrate de sodium; DL = 3 µg/m ³
O ₃	Méthode à l'iodure de potassium	Formation d'iodure à partir d'une solution aqueuse d'iodure de potassium (flacon laveur); dosage photométrique	DL = 20 µg/m ³ ; rel. s = ± 3,5% à 390 µg/m ³
F ⁻	Méthode aux grains d'argent; variante 1	Prélèvement avec un pré séparateur de poussière; enrichissement de F ⁻ sur des grains d'argent enrobés de carbonate de sodium; élution et mesurage à l'aide d'une chaîne d'électrodes au fluorure de lanthane à ions sensibles	Inclusion d'une portion indéterminée d'immissions de fluorure en particules
F ⁻	Méthode aux grains d'argent; variante 2	Prélèvement à l'aide d'un filtre à membrane chauffé; enrichissement de F ⁻ sur des grains d'argent enrobés de carbonate de sodium; dosage par la méthode électrochimique (variante 1) ou photométrique (alizarine-complexion)	Risques de trouver des valeurs inférieures à cause de la sorption partielle des immissions de fluorure gazeux sur le filtre à membrane; DL = 0,5 µg/m ³
Cl ⁻	Méthode au rhodanure de mercure	Absorption dans une solution d'hydroxyde de sodium 0,1 N (flacon laveur); réaction au rhodanure de mercure et aux ions de Fe(III) pour former un complexe de fer thiocyanate; dosage photométrique	DL = 9 µg/m ³
Cl ₂	Méthode au méthyle-orange	Réaction de blanchiment avec une solution de méthyle-orange (flacon laveur); dosage photométrique	DL = 0,015 µg/m ³
NH ₃	Méthode à l'indophénol	Absorption dans H ₂ SO ₄ dilué (appareil à impact/flacon laveur); conversion avec du phénol et de l'hypochlorure en teinture d'indophénol; dosage photométrique	DL = 3 µg/m ³ (appareil à impact); inclusion partielle de NH ₄ ⁺ - composés et amines
NH ₃	Méthode de Nessler	Absorption dans H ₂ SO ₄ dilué (appareil à impact/flacon laveur); distillation et réaction aux réactifs de Nessler, dosage photométrique	DL = 2,5 µg/m ³ (appareil à impact); inclusion partielle de NH ₄ ⁺ - composés et amines
H ₂ S	Méthode au bleu de molybdène	Absorption comme sulfure d'argent sur des perles de verre traitées au sulfate d'argent et au sulfate d'hydrogène potassium (tube de sorption); libéré sous forme de sulfure d'hydrogène et conversion en bleu de molybdène; dosage photométrique	DL = 0,4 µg/m ³
H ₂ S	Méthode au bleu de méthylène	Absorption dans une suspension d'hydroxyde de cadmium avec formation de CdS; conversion en bleu de méthylène; dosage photométrique	DL = 0,3 µg/m ³

II.4.2.2 Les procédures automatisées

Il existe sur le marché un grand nombre d'appareils de mesure en continu pour le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone et l'ozone. La plupart d'entre eux sont employés en particulier dans les réseaux de mesure (voir dans Annexe1). Les caractéristiques les plus importantes de chacune des méthodes sont résumées au tableau II.7.

Tableau II.7. Procédures automatisées de mesure des gaz inorganiques

Matière	Principe de mesure	Commentaires
SO ₂	Réaction par conductimétrie de SO ₂ avec H ₂ O ₂ en H ₂ SO ₄ dilué; mesurage de la conductivité accrue	Exclusion des interférences avec un filtre sélectif (KHSO ₄ /AgNO ₃)
SO ₂	Fluorescence UV; excitation des molécules de SO ₂ par rayons UV (190-230 nm); mesure du rayonnement de fluorescence	Il faut éliminer les interférences (par exemple, les hydrocarbures) par filtration
NO/NO ₂	Chimiluminescence; réaction de NO avec O ₃ en NO ₂ ; détection du rayonnement de chimiluminescence avec photomultiplicateur	NO ₂ n'est mesurable qu'indirectement; emploi de convertisseurs pour réduire NO ₂ en NO; mesure de NO et NO _x (= NO + NO ₂) dans des canaux séparés
CO	Absorption infrarouge non dispersive; mesure de l'absorption IR avec un détecteur spécifique par rapport à la cellule de référence	Référence: <i>a</i>) cellule avec N ₂ ; <i>b</i>) air ambiant après élimination de CO; <i>c</i>) élimination optique de l'absorption de CO (corrélation gaz/filtre)
O ₃	Absorption UV; lampe Hg à basse pression comme source de rayonnement (253,7 nm);	Référence: air ambiant après élimination de l'ozone (par exemple, Cu/MnO ₂)

Il faut souligner que toutes les procédures automatisées reposant sur des principes physico-chimiques doivent être étalonnées à l'aide des procédures de référence (manuelles). Etant donné que le matériel automatique des réseaux de mesure fonctionne souvent pendant de longues périodes (plusieurs semaines, par exemple) sans supervision humaine directe, il est indispensable de contrôler régulièrement et automatiquement son bon fonctionnement. On le fait généralement au moyen de gaz témoins et de gaz d'essai qui peuvent être produits par plusieurs méthodes (préparation de l'air ambiant, bouteilles de gaz sous pression, imprégnation, diffusion, dilution statique et dynamique).

II.4.2.3 Les procédures de mesure des polluants atmosphériques solides

Parmi les polluants atmosphériques particuliers solides, on distingue les retombées de poussières et les particules en suspension (Suspended Particulate Matter (SPM)). Les retombées de poussières sont des particules plus grandes, qui tombent au sol en raison de leur taille et de leur masse volumique. Les SPM comprennent la fraction des particules qui est

Chapitre II : Evaluation de l'ampleur des polluants atmosphériques

dispersée dans l'atmosphère de manière quasi stable et quasi homogène et qui y reste donc en suspension pendant un certain temps.

La mesure des particules en suspension et des composés métalliques dans les SPM tout comme dans le cas des polluants atmosphériques gazeux, on peut différencier pour les SPM les procédures de mesurage continu ou discontinu. En règle générale, les SPM sont d'abord séparées sur des filtres à fibres de verre ou à membrane. On procède ensuite à un dosage gravimétrique ou radiométrique. Selon l'échantillonnage, on peut distinguer deux procédures de mesure de la quantité totale de SPM: l'une sans fractionnement en fonction de la dimension des particules, et l'autre avec fractionnement pour mesurer les poussières fines.

Les avantages et les inconvénients des mesures fractionnées de poussières en suspension font l'objet d'un débat international. En Allemagne, par exemple, toutes les valeurs seuils et les normes d'évaluation sont fondées sur la totalité des particules en suspension. Cela signifie que, la plupart du temps, on mesure uniquement le total des SPM. Aux Etats-Unis, en revanche, on utilise très couramment la procédure PM-10 (Particulate Matter $PM \leq 10 \mu m$). Selon cette méthode, seules sont retenues les particules d'un diamètre aérodynamique maximal de $10 \mu m$ (proportion d'inclusion de 50%), qui sont inhalables et peuvent donc entrer dans les poumons. Il est prévu d'introduire la procédure PM-10 dans l'Union européenne en tant que référence. On trouvera au tableau II.8 des précisions sur les procédures les plus importantes de mesure des SPM.

Tableau II.8. Procédures des plus importantes de mesure pour les particules en suspension (SPM)

Procédure	Principe de mesure	Commentaires
Appareil à petits filtres	Prélèvements non fractionnés; débit d'air 2,7-2,8 m ³ /h; diamètre du filtre 50 mm; analyse gravimétrique	Maniement facile; horloge de commande; appareil fonctionnant avec pré-séparateur PM-10
Appareil LIB	Prélèvements non fractionnés; débit d'air 15-16 m ³ /h; diamètre du filtre 120 mm; analyse gravimétrique	Séparation de grandes quantités de poussière; avantageux pour l'analyse des composants de la poussière; horloge de commande
Echantillonneur à grand volume	Inclusion de particules atteignant jusqu'à 30 μm de diamètre environ; débit d'air de 100 m ³ /h environ; diamètre du filtre 257 mm; analyse gravimétrique	Séparation de grandes quantités de poussière, avantageux pour l'analyse des composants de la poussière; niveau de bruit relativement élevé
FH 62 I	Appareil de mesure radiométrique en continu; prélèvements non fractionnés; débit d'air 1 ou 3 m ³ /h; relevé de la masse de poussières retenue sur un dispositif de filtrage en mesurant l'atténuation du rayonnement β (krypton 85) lors du passage à travers un filtre exposé (chambre d'ionisation)	Etalonnage gravimétrique par exposition de filtres isolés à la poussière; l'appareil fonctionne aussi avec un pré-séparateur PM-10

Chapitre II : Evaluation de l'ampleur des polluants atmosphériques

Mesureur de poussières BETA F 703	Appareil de mesure radiométrique en continu des poussières; prélèvements non fractionnés; débit d'air 3 m ³ /h; relevé de la masse de poussières retenue sur un dispositif de filtrage en mesurant l'atténuation du rayonnement β (carbone 14) lors du passage à travers un filtre exposé (tube compteur Geiger Müller)	Etalonnage gravimétrique par exposition de filtres isolés à la poussière; l'appareil fonctionne aussi avec un pré-séparateur PM-10
TEOM 1400	Appareil de mesure de la poussière en continu; prélèvements non fractionnés; débit d'air 1 m ³ /h; poussière recueillie sur un filtre qui fait partie d'un système vibrant auto-résonant, dans un courant latéral (3 l/min); relevé de la diminution de la fréquence par l'accroissement des dépôts de poussière sur le filtre	Le rapport entre la diminution de la fréquence et la masse de la poussière doit être déterminé par étalonnage

II.4.2.4 Les réseaux pour la mesure des échantillons aléatoires

Outre le réseau de mesure télémétrique, d'autres systèmes sont utilisés à des degrés divers pour surveiller la qualité de l'air. A titre d'exemple, on citera les réseaux (partiellement automatisés à l'occasion) qui déterminent:

- les dépôts de poussières et leurs composants;
- la poussière en suspension (SPM) et ses composants;
- les hydrocarbures et les hydrocarbures chlorés;
- les matières organiques faiblement volatiles (dioxines, furannes, biphényles polychlorés).

On a classé comme cancérogènes une série de substances mesurées de cette manière, notamment les composés du cadmium, les HPA et le benzène. Il est donc particulièrement important de les surveiller. A titre d'exemple d'un programme complet, le tableau II.9 indique sommairement la surveillance de la qualité de l'air faite systématiquement en Rhénanie-du-Nord-Westphalie, qui, avec 18 millions d'habitants, est le Land le plus peuplé d'Allemagne.

Tableau II.9 : Surveillance systématique de la qualité de l'air en Rhénanie-du-Nord-Westphalie (Allemagne)

Systèmes de mesure en continu	Systèmes de mesure partiellement automatisés	Systèmes de mesure discontinu/mesures à multi composants
Dioxyde de soufre Monoxyde d'azote Dioxyde d'azote Monoxyde de carbone Particules en suspension (SPM) Ozone Hydrocarbures	Composition des SPM: Plomb Cadmium Nickel Cuivre Fer Arsenic Béryllium	Benzène et autres hydrocarbures Hydrocarbures halogénés Dépôts de poussières et leurs composants Suie Biphényles polychlorés Di-benzodioxines

Chapitre II : Evaluation de l'ampleur des polluants atmosphériques

Direction du vent	Benzo[a]pyrène	poly-halogénées et dibenzofurannes.
Vitesse du vent	Benzo[e]pyrène	
Température de l'air	Benzo[a]anthracène	
Pression de l'air	Dibenzo[a,h]anthracène	
Humidité relative	Benzo[ghi]pérylène	
Bilan radiatif	Coronène	
Précipitations		

Composés faisant l'objet d'une réglementation :

- Le dioxyde d'azote ; - Le dioxyde d'azote SO₂ ; - Les particules PM₁₀ et PM_{2,5} ;
- Le monoxyde de carbone; - Le benzène ; - Le plomb ; - Le benzopyrène ;
- Les métaux lourds : arsenic, cadmium et nickel.

II.4.2.5 Synthèse des résultats pour les substances réglementées

En Algérie, conformément à la loi sur l'environnement et le cadre du développement durable, Les conditions de surveillance de la qualité de l'air et les modalités d'information du public en cas de pollution est assurée par des réseaux agréés de surveillance, (Samasafia, 2004).

II.4.2.5.1 Normes de la pollution atmosphérique

a) Normes Algériennes

Le décret exécutif n°06 – 138 du 15 avril 2006 réglemente l'émission dans l'atmosphère de gaz, fumées, vapeurs, particules liquides ou solides, ainsi que les conditions dans lesquelles s'exerce leur contrôle (voir tableau II.10).

Tableau II.10 : Normes Algériennes de la pollution de l'air

Indicateur de pollution	Unité	Valeurs limites	Tolérances aux valeurs limites
Poussières totales	µg/m ³	50	100
Oxydes de soufre	µg/m ³	300	500
Oxydes d'azote	µg/m ³	300	500
Protoxyde d'azote	µg/m ³	300	500
Chlorure d'hydrogène et autres composés inorganiques gazeux du chlore	µg/m ³	50	100

b) Normes de l'OMS

Pour l'Organisation Mondiale de la Santé les normes sont les suivantes (tableau II.11):

Chapitre II : Evaluation de l'ampleur des polluants atmosphériques

Tableau II.11: Normes de l'OMS

Indicateur de pollution	Unité	10à15min	1heure	8heures	24heures	Année
SO ₂	µg/m ³	500	350		25	50
NO ₂	µg/m ³			400	-	150
CO	µg/m ³	100	30	10	-	
Pb	µg/m ³	-	-	-	-	0.5-1
O ₃	µg/m ³	-	150 à 200	100 à 120	-	

II.5 Synthèse du chapitre

Les dispositions que doit prendre l'utilisateur pour s'assurer de la qualité de l'air :

- accepter les méthodes prescrites et les mettre en œuvre selon les bonnes pratiques de laboratoire;
- procéder aux étalonnages et aux vérifications régulières pour garantir un bon fonctionnement;
- procéder aux essais inter laboratoires.

Il faut souligner que toutes les procédures automatisées reposant sur des principes physico-chimiques doivent être étalonnées à l'aide des procédures de référence (manuelles). Etant donné que le matériel automatique des réseaux de mesure fonctionne souvent pendant de longues périodes sans supervision humaine directe, il est indispensable de contrôler régulièrement et automatiquement son bon fonctionnement. On le fait généralement au moyen de gaz témoins et de gaz d'essai.

Les avantages et les inconvénients des mesures fractionnées de poussières en suspension font l'objet d'un débat international. Les valeurs seuils et les normes d'évaluation sont fondées sur la totalité des particules en suspension. Cela signifie que, la plupart du temps, on mesure uniquement le total des SPM. On utilise très couramment la procédure PM-10 (Particulate Matter $PM \leq 10 \mu m$), cette partie sera prise en détail dans le cinquième chapitre.

Chapitre III : Impact environnementale des polluants atmosphériques au sein de la zone pétrochimique de Skikda

III. Introduction

III.1 Situation géographique de Skikda

III.2. Description de l'environnement et du voisinage :

III.2.1 Description de l'environnement naturel :

III.2.1.1 Morphologie

III.2.1.2 Géologie :

III.2.1.2.1 Géologie de la région

III.2.1.2.2 Géologie de la zone d'étude

III.2.1.2.3 Hydrogéologie

III.2.2 Caractéristiques climatologiques de la zone d'étude

III.2.2.1 La pluviométrie

III.2.2.2 La température

III.2.2.3 Diagramme ombrothermique

III.2.2.4 L'humidité

III.2.2.5 Les vents

III.2.2.6 Faune et flore

III.2.2.6.1 Faune

III.2.2.6.2 Flore

III.2.2.6.3 Servitudes

III.3 Présentation de la zone d'étude

III.3.1 Description de l'environnement humain :

III.3.1.1 Implantation humaine

III.3.1.2 Activités :

III.3.1.2.1 Activités agricoles

III.3.1.2.2 Activités industrielles :

III.3.1.2.3 Activités tertiaires :

III.4 Le pôle pétrochimique et son impact sur la ville de Skikda

III.4.1 Sources de pollution dans la ville de Skikda

III.4.2 Les événements majeurs redoutés pour la ville de Skikda

III.5 Synthèse du chapitre

Chapitre III : Impact environnementale des polluants atmosphériques au sein de la zone pétrochimique de Skikda

III. Introduction

L'objectif est la présentation de notre zone d'étude : localisation géographique et historique de la ville de Skikda, la population urbaine, sa densité, ainsi que la présentation de la zone pétrochimique et de la nature du risque potentiel. Il aide à comprendre l'impact de la présence de l'industrie à risque dans la ville et l'effet de cette présence sur l'espace et la société.

III.1 Situation géographique de Skikda

La ville de Skikda se situe dans le nord-est de l'Algérie, limitée au nord par la mer Méditerranéenne, à l'Est par la wilaya de Annaba, à l'ouest par la wilaya de Jijel, au sud par Constantine et Guelma, et par Mila au Sud-ouest, entre les altitudes 36°5N et 36°15N et les longitudes 7°15E et 7°30 E .Couvrant une superficie totale de 4137,68 km2 avec une frange littorale de 142 Km de long, représentant ainsi 12% du littoral algérien (Figure III.9).



Figure III.9 : Image satellitaire de Skikda.

III.2 Description de l'environnement et du voisinage

III.2.1 Description de l'environnement naturel

III.2.1.1 Morphologie

Le relief est très accidenté sur la commune de Skikda. Dans ce relief, on distingue deux types de zones topographiques, les zones de montagnes et les zones de plaines :

Chapitre III : Impact environnementale des polluants atmosphériques au sein de la zone pétrochimique de Skikda

A. La Zone des Montagnes : Couvrant le tiers de la commune, elle constitue l'élément prédominant du relief, à l'Ouest elle forme ainsi une ossature composée d'un ensemble de Djebels qui appartiennent au prolongement de la chaîne Numidique Constantinoise, dont les plus importants sont M'sioune, Bouyala, Boulekroud, aux altitudes variant entre 200 et 300 mètres.

B. La Zone des Vallées et des Oueds : La vallée du Saf-Saf (Oued) est la plus importante de la commune avec celle de L'Oued Zeramna ; cette zone représente presque la moitié de la superficie totale de la commune.

La ville de Skikda se compose de dunes de sables, de falaises, de plages et de pentes :

- **Les dunes de sables :** Cette zone représente le 1/6 de la superficie de la commune ; elle est constituée par le premier plateau qui se trouve entre la zone industrielle et l'Oued K' Sob sur une largeur de 200 à 500 mètres.
- **Les falaises :** Cette zone couvre une superficie de 64 hectares et correspond au contact direct entre les zones de montagnes et la mer ;
- **Les plages :** C'est une bande étroite de 20 à 150 mètres, d'une longueur environ de 10 km, et est essentiellement localisée dans la partie Est, entre le nouveau Port et l'Embouchure de l'Oued K'Sob ;
- **Les pentes :** La forte déclivité relevée, correspond en majeure partie aux massifs montagneux de la commune et aux falaises dans la partie littorale. Ceci montre l'importance de l'élément montagneux. Les pentes de 0-8% et facilement urbanisable quoique cette proportion se voit largement diminuée du fait que l'agriculture et la zone industrielle en occupent déjà la majeure partie. En effet ces terrains à faibles pentes coïncident avec les vastes terrasses des vallées du Saf-Saf, Zeramna et le plateau de Larbi Ben M'hidi. Quant aux terrains classés dans les catégories de pentes 8-12,5%, 12,5-15% et 15-25% ils représentent respectivement 75 ; 187,50 et 37,50 hectares de la superficie communale et correspondent aux ravins encaissés et aux zones de piémonts.

III.2.1.2 Géologie

III.2.1.2.1 Géologie de la région

L'Algérie est divisée en deux unités tectoniques majeures séparées par la faille sud-atlasique :

- Le nord de l'Algérie portant l'empreinte de la tectonique alpine ;

Chapitre III : Impact environnementale des polluants atmosphériques au sein de la zone pétrochimique de Skikda

· La plate-forme saharienne, relativement stable, où la tectonique est moins prononcée.

Le Nord de l'Algérie est délimité par les éléments suivants :

- Au sud, l'Atlas saharien, une chaîne de montagnes d'origine alpine ;
- Au centre, des plateformes comme la Méséta Oranaise à l'Ouest et le môle d'Ain Regada à l'est ; Dans la partie septentrionale, l'Atlas tellien est une zone complexe constituée de nappes mises en place au Miocène inférieur. Des bassins néogènes tardifs comme le Chéelif et le Hodna se sont installés sur ces nappes.

Le nord de l'Algérie est un tronçon de la chaîne alpine des Maghrébines, dont la nature et la structure du substratum sont peu connues par suite de la complexité de sa géologie.

III.2.1.2.2 Géologie de la zone d'étude

Localement, sur la commune de Skikda, les terrains présentent une structure géologique compliquée, due à l'âge, la genèse des roches, le genre et les valeurs physico-mécaniques des dépôts. Ainsi les parties Ouest, Sud-Ouest et Sud de la commune y compris la ville de Skikda, sont de formations stratigraphiques anciennes composées par des roches métamorphiques, précambriennes et paléozoïques. Sous l'influence d'érosion intense, ces roches sont très altérées et recouvertes d'une couche d'altération superficielle argileuse d'une épaisseur variant de 0 à 2 mètres.

Les alluvions de vallées qui sont formées d'argiles limoneuses, d'argiles sableuses et de vases, remplissent les vallées de Zeramna et Saf-Saf ; leurs épaisseurs dépassent parfois les 30 mètres. Cette zone d'alluvions s'étend de la limite sud de la commune à l'Embouchure de l'Oued Saf-Saf.

La zone des dunes intérieures (provenant des dépôts éoliens anciens et des dépôts marins anciens), d'une largeur de 1 à 2 km se prolonge parallèlement au bord de la mer, de la vallée du Saf-Saf à l'Oued K'Sob.

La carte géologique de la zone industrielle de Skikda (échelle 1/5000) indique que celle-ci est formée de :

- Quaternaire récent indéterminé :
- Alluvions anciennes et terres arables : les terres arables sont installées sur des placages limoneux et supportent un sol brun peu ou pas calcaire ;
- Alluvions récentes ou actuelles : il s'agit de sables, de limons et de graviers.

A ces séries s'ajoutent, dans la région, les formations suivantes :

- Dunes : il s'agit d'amas éolisés de sables calcaires et de poussières limoneuses mêlées à des débris coquilliers fins ou végétaux, et qui forment de véritables cordons de dunes.

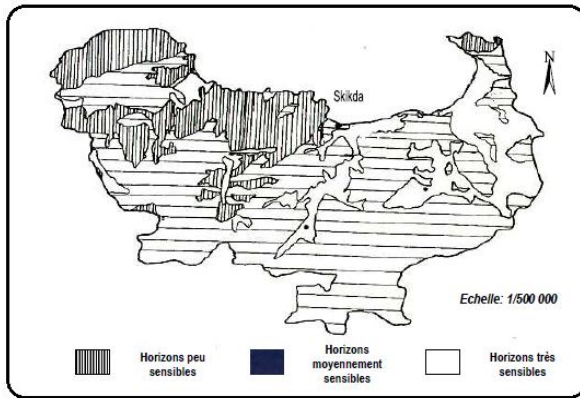


Figure III.12 : Carte de vulnérabilité des eaux souterraines

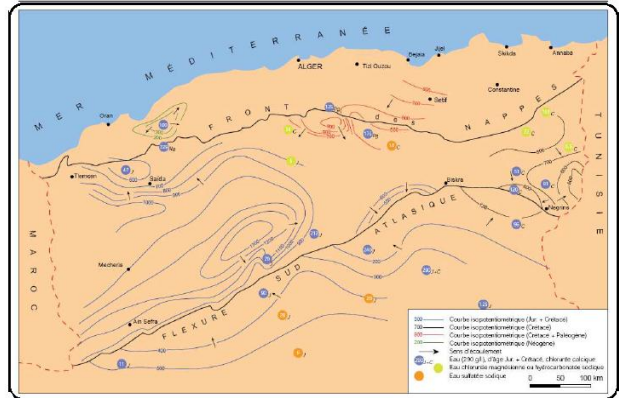


Figure III.13: Carte hydrogéologique du nord de l'Algérie (Document SH/EXP, 1993)

III.2.2 Caractéristiques climatologiques de la zone d'étude

L'ensemble des caractéristiques climatologiques, jouent un rôle très important dans le domaine de l'environnement. Des données climatologiques relevées de la station météorologique du port de Skikda sur une période de dix ans (2002 - 2011) illustrent le climat qui caractérise notre zone d'étude.

Notre zone d'étude se caractérise par un climat typiquement méditerranéen. Il est chaud et sec en été, doux et pluvieux en hiver. Il faut noter que la région de Skikda est l'une des régions les plus importantes du point de vue pluviométrique (ANPE, 1994).

III.2.2.1 La pluviométrie

Les variations des précipitations au niveau de notre zone d'étude durant la période 2002 à 2011 montrent que : les pluies sont abondantes, enregistre une quantité de 802,09 mm/an (O.N.M, 2012) (Figure III.14).

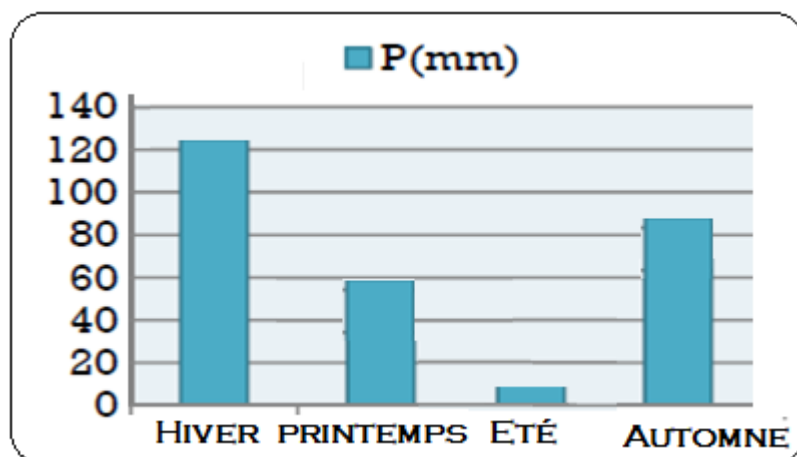


Figure III.14 : Transect pluviométrique saisonnier de la région de Skikda (2002-2011).

Chapitre III : Impact environnementale des polluants atmosphériques au sein de la zone pétrochimique de Skikda

III.2.2.2 La température

Les variations de la température durant la période s'étalant de 2002 à 2011 montrent que : les températures moyennes sont de l'ordre de 23,14°C à 26,32 °C avec un pic de 29,2°C, qui correspond à la saison chaude, alors que les températures moyennes enregistrées durant la période hivernale oscillent entre une valeur de 12,74°C à 15,45 °C et avec une température minimale de 10,2°C (figure III.15)

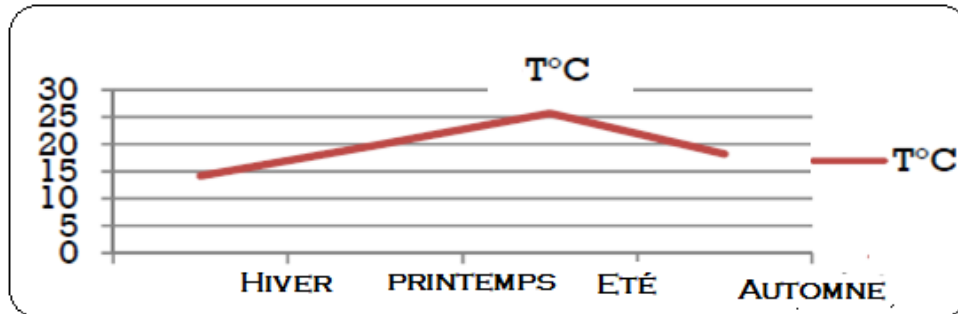


Figure III.15 : Représentation des températures de la région de Skikda (2002-2011).

III.2.2.3 Diagramme ombrothermique

Les variations des précipitations et des températures enregistrées durant la période 2002 – 2011 ont permis de délimiter une période sèche qui s'étend de la fin du mois de Juin jusqu'à la fin du mois de Septembre (Figure III.16).

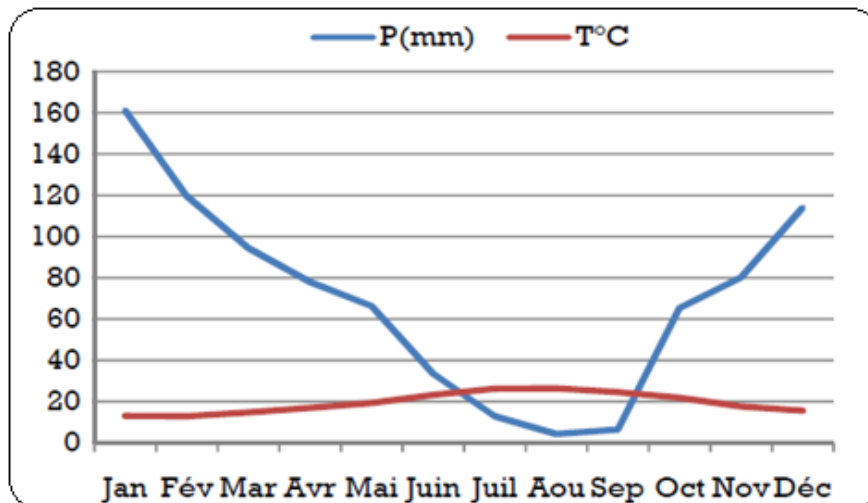


Figure III.16 : Diagramme ombrothermique de la région de Skikda (2002-2011)

III.2.2.4 L'humidité

L'humidité relative de la région de Skikda enregistre une valeur très importante durant toute la période s'étalant de 2002 à 2011, elle atteint une moyenne de 65.50 % et fluctuent entre une valeur minimale de 68.91 % et une valeur maximale de 75.34 %. La mer joue un rôle important dans le maintien d'une humidité élevée durant la saison estivale, diminuant ainsi la durée de sécheresse d'été (Figure III.17).

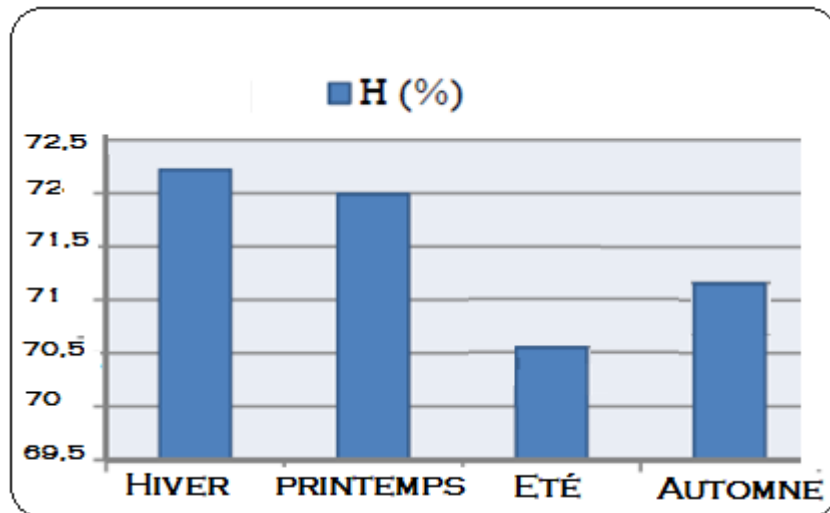
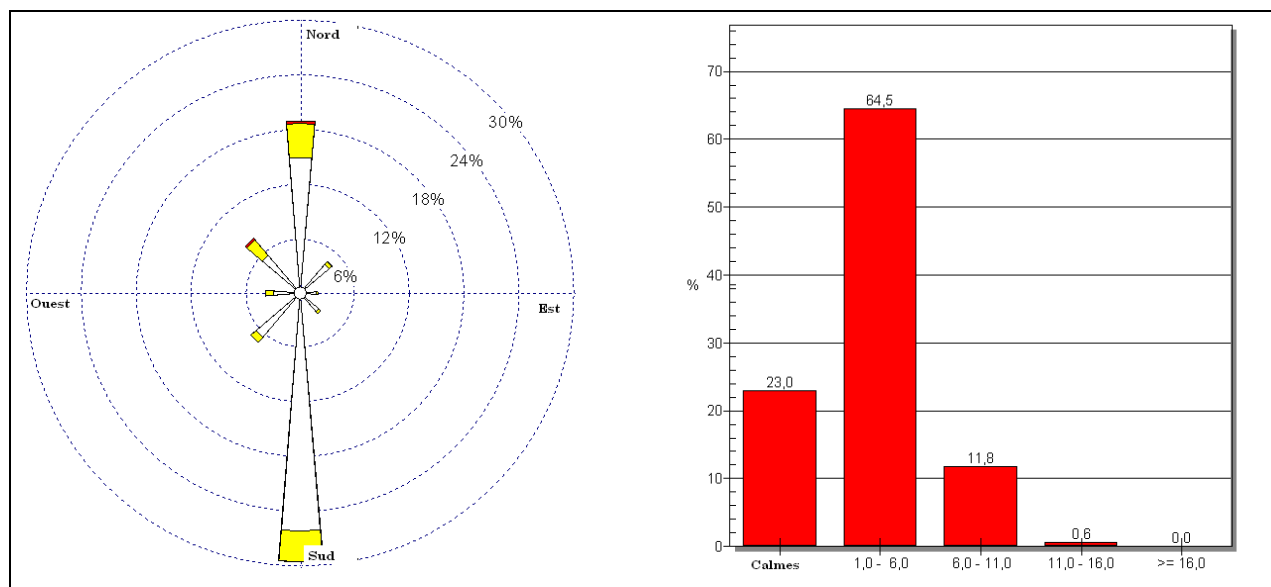


Figure III.17: Moyennes saisonnières de l'humidité relative de la région de Skikda (2002-2011)

III.2.2.5 Les vents

La zone littorale de Skikda, est particulièrement soumise à des vents qui sont généralement moyens à très violents dont la vitesse peut atteindre les 130 km/h en entraînant de multiples dommages.

A l'échelle annuelle, les vents dominants sont de secteur Sud. La deuxième direction dominante est la direction Nord (voir rose des vents figure III.18).



Source: Etude de danger (projet de Topping Condensat dans la zone industrielle de Skikda décembre 2006)

Figure III.18 : Rose des vents annuelle de la région de Skikda

III.2.2.6 Faune et flore

La wilaya de Skikda présente le linéaire côtier le plus long des wilayas côtières (130 km) et présente des potentialités naturelles importantes.

III.2.2.6.1 Faune

Skikda recèle une grande richesse en faune marine qui se trouve représentée par près de cinquante espèces pêchées dans les eaux territoriales de la wilaya et un nombre non déterminé d'espèces non pêchées et donc non recensées.

La faune terrestre de la région est celle qui caractérise la forêt algérienne : sanglier, chacal, etc.

III.2.2.6.2 Flore

D'une façon générale, la flore de la région de Skikda est assez riche et comporte plusieurs espèces rares, qui sont de formes différentes : les espèces végétales qui colonisent la baie de Skikda (espèces marines) et les terrains (continent).

III.2.2.6.3 Servitudes

La loi n°02-02 du 5 février 2002 relative à la protection et à la valorisation du littoral stipule, dans son article 15, que « toute implantation d'activité industrielle nouvelle est interdite sur le littoral tel que défini à l'article 7. Sont exclues de la présente disposition les activités industrielles et portuaires d'importance nationale prévue par les instruments d'aménagement du territoire. »

L'article 7 de la loi du littoral précise que « le littoral englobe l'ensemble des îles et îlots, le plateau continental, ainsi qu'une bande de terre d'une largeur minimale de 800 m longeant la mer ».

La zone industrielle de Skikda est comprise dans la zone littorale (moins de 800 m de la mer), elle donc considéré comme un projet industriel d'intérêt national pour être conforme à la loi du littoral.

III.3 Présentation de la zone d'étude

La zone est située de 2,5 Km à l'Est du chef lieu de wilaya de Skikda, sur le territoire de la commune de Flifla et une partie de Hamadi Krouma. Elle est présentée comme étant un des plus grands centres mondiaux de gaz naturel et de pétrole, elle présente deux caractéristiques majeures, c'est un instrument de valorisation des ressources non renouvelables, et une importante ressource de devises pour le pays. C'est un véritable champ d'hydrocarbures et de technologies d'avant-garde dans le domaine de traitements des hydrocarbures (Carte N° 06).

La zone industrielle de Skikda a été créée par décret 84/35 du 3 Mars 1984 relatif à l'administration des zones industrielles. Elle est située à l'Est de la Ville de Skikda à environ 4 km et s'étend sur surface totale de 1200 hectares, regroupant des unités industrielles dans le domaine des hydrocarbures (transport, raffinage, énergie et transformation).

Chapitre III : Impact environnementale des polluants atmosphériques au sein de la zone pétrochimique de Skikda

La gestion de cet espace pétrochimique (transport, assainissement et aménagement des routes, sécurité, intervention et prévention, environnement) est assurée par la direction régionale industrielle de Skikda DRIK, nommée, l'entreprise de gestion de la zone industrielle EGZIK précédemment. Les différentes unités industrielles étudiées au niveau de la plateforme pétrochimique de Skikda (ZI/K) sont comme suit :

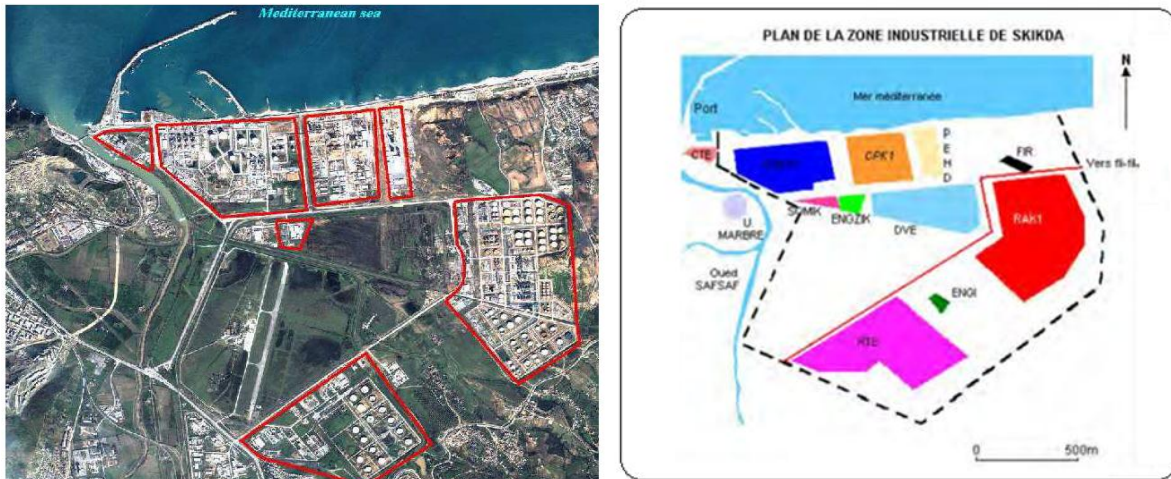


Figure III.19: Plan de situation des installations au niveau de la zone industrielle de Skikda.

Au plans réglementaire et selon le décret exécutif 06-161 du 17 mai 2006, déclarant la zone industrielle de Skikda zone à risque majeurs, la zone industrielle de Skikda, y compris le domaine portuaire des hydrocarbures y adossé, est déclarant zone à risque majeurs. Ce décret stipule, entre autres, qu'un plan interne d'intervention dans la zone industrielle de Skikda est élaboré par l'entreprise de la gestion de la zone industrielle de Skikda EGZIK et approuvé par les autorités compétentes.

En effet, avant la promulgation de la première loi relative à la protection de l'environnement (1983), les projets industriels étaient réalisés sans études d'impact sur l'environnement, les opérateurs économiques privilégiaient les sites faciles à aménager, proches de réservoirs de main d'œuvre, à proximité des voies de communication et disposant de toutes les commodités.

Dans le choix des procédés de fabrication, les critères de protection de l'environnement n'étaient pas essentiels à cet effet, des unités polluantes n'ont pas été dotées de systèmes antipollution et pour celles qui l'ont été leurs équipements de traitement ne fonctionnent pas selon les normes actuelles, donc, leur rendement épuratoire est toujours en deçà des normes de protection de l'environnement.

Chapitre III : Impact environnementale des polluants atmosphériques au sein de la zone pétrochimique de Skikda

Les grandes quantités de déchets toxiques stockés à l'air libre au niveau des unités industrielles (boues de mercure, boues de pétrole..) exposent la nappe phréatique de Saf Saf à une pollution permanente.

Par ailleurs, les effluents liquides chargés le plus souvent en polluants chimiques très dangereux (hydrocarbures et métaux lourds toxiques) constituent un facteur important de pollution pour les milieux naturels et sont responsables de graves pollutions des eaux superficielles (eaux de baignade, cours d'eau) et souterraines (nappe de Saf Saf).

Ces unités de production posent également le problème de la pollution atmosphérique, c'est ainsi que les agglomérations de Skikda, Ben Mhidi et Hamadi Krouma sont les plus exposées aux différents rejets non permanents.

Vu l'absence d'une politique de protection de l'environnement au niveau de chaque complexe nous vivons une situation inacceptable en matière de gestion des risques.

III. 3 .1 Description de l'environnement humain

III.3.1.1 Implantation humaine

Le tableau III.11 suivant présente les agglomérations les plus proches de **GL1K** ainsi que leur distance par rapport au complexe : Les premières habitations se situent à plus de 400 m à l'ouest du complexe GL1K.

Tableau III.12 : Représentation des agglomérations les plus proches de GL1K

Agglomérations	Distance par rapport au complexe GL1K
Cité Bouabaz	430 m
Larbi ben Mhidi	> 2 km
Hamrouch Hamoudi	> 2 km
Skikda Centre ville	> 2 km
Hammadi Krouma	> 2,5 km
El Hadaeik	~ 7km

III.3.1.2 Activités

III.3.1.2.1 Activités agricoles

- ✚ La production végétale est très diversifiée, céréales cultures, légumes secs, olivier, vigne,
- ✚ La production animale est de 86600 Qx Viandes rouges, 42103 Qx de viande blanche et 1523 Qx de miel.
- ✚ Pêche : 5634 tonnes de pêche maritime.
- ✚ Production Forestière : 15000 Qx de liège et 10000 m³ de bois (RGPH 2008).

Chapitre III : Impact environnementale des polluants atmosphériques au sein de la zone pétrochimique de Skikda

III.3.1.2.2 Activités industrielles

La zone industrielle de Skikda présente des risques de fuites accidentelles de produits dangereux ; elle est classée à haut risque. Les risques concernent essentiellement les explosions, les contaminations d'eaux ou les pollutions atmosphériques.

La particularité de cette zone est ; qu'elle est implantée au cœur d'un tissu urbain : environ 2 km du centre de la ville de Skikda, à 3 km de Hammadi Krouma, et à 1,5 km de Hamrouche Hamoudi. Le site de Skikda dispose d'un pôle industriel d'importance internationale constitué essentiellement de la zone pétrochimique s'étalant sur 1200 hectares et abritant les unités industrielles citées dans le tableau ci-après.

Tableau III.13 : les unités industrielles de la zone pétrochimique de Skikda.

Etablissement	Activité	Effectif	Distance par rapport à GL1K	Commentaires
CP1K	Complexe de matières plastiques	1134	Limitrophe	–
CTE	Centrale thermique Electrique	8	< 150 m	–
	Ancienne centrale thermique Electrique (SKS)	29	< 150 m	–
ENGI	Entreprise nationale de distribution et de transport de gaz	20	–	–
HELISON	Unité de production d'hélium et d'azote	34	Limitrophe	–
POLYMED	Unité de production de polyéthylène haute densité (PEHD)	156	~ 850 m	–
RA1K	Complexe de raffinage	1572	~ 1500 m	–
RTE	Unité de transport par canalisation des hydrocarbures	104	–	–
SOMIK	Société de maintenance industrielle	2189	~250 m	Personnel dispersé sur ZIK
GL2K	Complexe de liquéfaction, nouveau projet	450	Limitrophe	–
STH/ Nouveau port	Société de transport d'hydrocarbures	46	Limitrophe	–
TOPIC	Topping Condensats	450	~2 Km	–

On peut noter différents pipes (gazoducs, oléoducs et multi-produits), qui traversent la région. Ces pipes représentent des risques d'explosion et de pollution de la zone.

Chapitre III : Impact environnementale des polluants atmosphériques au sein de la zone pétrochimique de Skikda

III.3.1.2.3 Activités tertiaires

Un bon nombre d'activités sont liées à l'activité industrielle comme la maintenance (SOMIK), le transport des marchandises et du personnel, la restauration et la gestion de la zone (EGZIK). Il est important de souligner la présence de deux ports commerciaux, dont celui de Skikda qui est le deuxième port en trafic de conteneurs après celui d'Alger, et de trois ports de pêche d'importance régionale, qui alimentent toute la région intérieure en produits halieutiques.

III.4. Le pôle pétrochimique et son impact sur la ville de Skikda

Le pôle par son ampleur, son coût, sa technologie, et ses implications sur l'espace et la société de la ville de Skikda et le rapport conflictuel entre activité de production et l'espace urbanisé, nous a poussés à voir les mutations socio-spatiales de l'implantation d'un pôle pétrochimique sur notre zone d'étude et le risque du rapprochement entre habitat et industrie à Skikda.

La zone industrielle a un retombé économique national indiscutable, mais sur certains aspects locaux, elle a des conséquences plutôt négatives :

- Explosion démographique,
- Anarchisations de l'espace bâti, et consommation abusive du foncier urbain,
- Prolifération des bidonvilles et de l'habitat individuel aux bords de la zone industrielle,
- Naissance de couches sociales défavorisées et augmentation du taux de chômage.

III.4.1 Sources de pollution dans la ville de Skikda

Ce sont les fumées noirâtres engendrées par la raffinerie, le directeur de l'environnement dira à ce propos :

« La raffinerie de Skikda est la plus grande d'Afrique, c'est vrai que les fumées des gaz torchées dans les années passées étaient très importantes et se voyaient même à 50 kms. Cette pollution nuisait énormément à l'atmosphère mais elle est en nette diminution depuis 2000, ou un investissement de 44 milliards de centimes a été consenti pour minimiser la pollution et aussi pour récupérer l'équivalent de 16 tonnes qui seront réinjectés dans le procédé.

En temps de production, la majorité des gaz est récupérée, quant à l'apparition de temps à autre d'immenses couches de fumées, elle reste en relation avec des considérations techniques propre à tout procédé de production. Ces fumées apparaissent uniquement lors d'éventuels redémarrage des unités qui peuvent être arrêtées pour des considérations propres à l'entreprise.

Chapitre III : Impact environnementale des polluants atmosphériques au sein de la zone pétrochimique de Skikda

Le tableau III.14, suivant résume la situation de la pollution engendrée par le secteur industriel à Skikda :

Tableau III.14. La situation de pollution engendrée par le secteur industriel à Skikda

Unités	Types de déchets	Quantités rejetée	Usage
CP1K : Complexe des produits plastiques	- Boue de mercure -P.V.C -Résidus de V.C.M -Boue issue de la STEP des effluents	1000 tonnes/an 28800 tonnes/an 400 tonnes/an 40 tonnes/an	Stockés dans des cuves
GL1K : Complexe de liquéfaction du gaz	-Baril en fer -Bois, résidus de bois -Fer et matériaux plastiques -Barils en plastiques -Cuve de chlore	/ 10 tonnes/an 150 tonnes/an 1000 barils 15000 kg/an	Vendu aux particuliers Jetés / Vendu aux particuliers Stocké
RA1K : Complexe de Raffinage du pétrole	-Boue formée de sable -Hydrocarbures et matières plastiques	250 Kg à 500 Kg/ an	Stockés
UTE : Unité de transport d'hydrocarbures	Barils vide , ferrailles, papier	Variable	Recyclés
CTE : Centrale d'électricité	Ferrailles	60 Tonnes/ an	—
ENGI : Entreprise de production des gaz industrielles	Néant	Néant	—
Enamarbre : Unité de production des Marbres	Poussières et boue de marbre	60120 Kg/an	Une partie jetée

Source : Direction de l'Environnement de Skikda 2008.

Il existe bien sûr d'autres sources de pollution mais dont les conséquences sont de moindres importances comme, les déchets ménagers, les déchets des hôpitaux, les rejets de gaz des véhicules, pollution portuaire etc.

Pour les rejets industriels, un travail immense doit se faire pour pallier à ces carences, les quantités de rejet polluants sont faramineuses qui se font dans l'air de chaque unité industrielle avec le risque d'infecter la nappe phréatique déjà en souffrance.

III.4.2 Les évènements majeurs redoutés pour la ville de Skikda

La figure (III.20) suivante nous donne un scénario de conséquences tragique suite à une pollution qui peut apparaître dans cette zone du littoral ; les spécialistes affirment qu'à l'état actuel des installations, une contamination majeure peut emporter une zone d'un rayon de 80 Kms.

Chapitre III : Impact environnementale des polluants atmosphériques au sein de la zone pétrochimique de Skikda

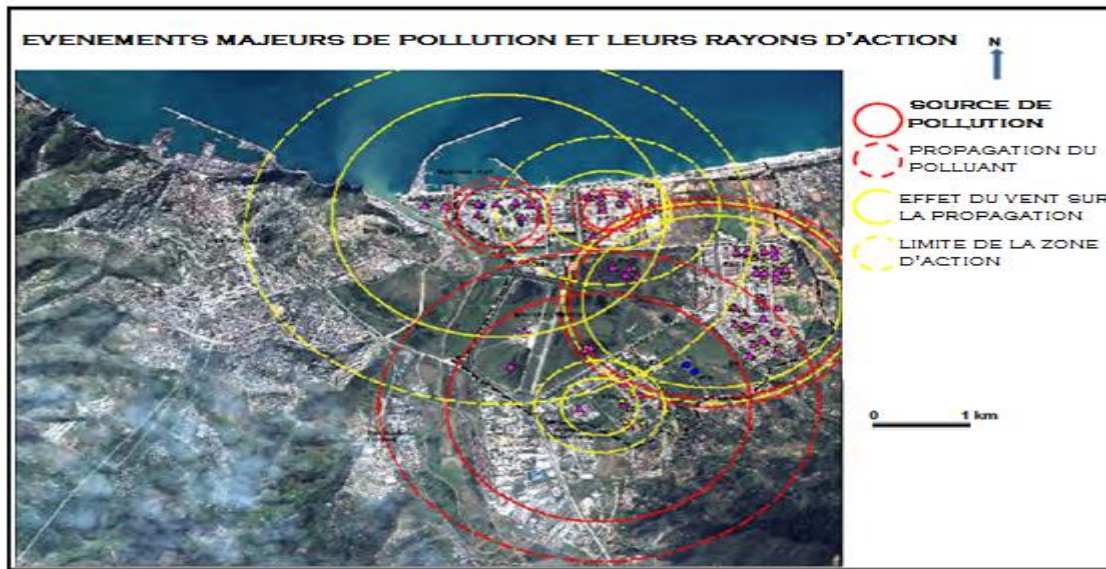


Figure III.20. Les évènements majeurs redoutés pour la ville de Skikda

III.5 Synthèse du chapitre

La dépollution doit apporter des éléments de réflexion techniques et économiques quant au choix d'une technologie lors de la mise aux normes d'une installation existante ou de la conception d'une nouvelle unité.

Enfin contrôler l'environnement du complexe pétrochimique de Skikda passe par l'évaluation des capacités actuelles de ses activités pour le bien être du grand public, adopter des techniques analytiques des dosages et des traitements physico- chimiques, biologiques, biodynamiques ; analysant et traitant des polluants industriels majeurs, ainsi que des nuisances associées aux odeurs, d'un côté et des polluants atmosphériques tels que le monoxyde de carbone, les oxydants, les halogènes, les métaux lourds.

Les aérosols, vecteurs de pollution atmosphérique interviennent dans la formation des milieux défavorables. Pour lesquels l'industriel doit les surveiller et les réduire par des procédés adéquats économiques et fiables pour la préservation de la santé publique.

Ce contexte aérosols fera l'objet du dernier chapitre sur la zone minière de l'Ouenza.

Chapitre IV : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone pétrochimique de la ville de Skikda

IV.1 Introduction

IV.2 Présentation du complexe

IV.2.1 Le complexe comprend principalement

IV.2.1.1 Phénomène d'évaporation du GNL dans les bacs de stockage

IV.2.3 Composition de l'air

IV.2.4 Les effluents atmosphériques

IV.2.4.1 Monoxyde de carbone (CO) et le gaz carbonique (CO₂)

IV.2.4.2 les oxydes d'azotes (NO_x)

IV.2.4.3 Vapeur d'eau

IV.2.5 Les hydrocarbures imbrûlés

IV.2.5.1 Impact dus aux effluents gazeux

A - Impact du CO₂

B- Impact du CO

C- Impact du NO_x

IV.3 Estimation du boil-off

IV.3.1 Analyse de l'autoconsommation

IV.3.1.1 L'autoconsommation

IV.3.1.2 Le coefficient d'autoconsommation (AC)

IV.3.1.3 Productions par unité

IV.3.1.4 Production commercialisée

IV.3.2. Consommation en gaz dans les chaudières

IV.3.3 Quantité des gaz torchés

IV.3.3.1 Les autres types de gaz torchés sont

IV.3.3.2 Quantification du BOIL- OFF

IV.3.3.2.1 La masse volumique du Boil –off

IV.3.3.2.2 Le débit massique du Boil-off

IV.4 Synthèse du chapitre

Chapitre IV : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone pétrochimique de la ville de Skikda

Chapitre IV: Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone pétrochimique de la ville de Skikda

IV.1 Introduction

Ce chapitre a comme premier objectif l'impact de la présence de l'industrie pétrochimique à risque dans la ville de Skikda, le degré de pollution, la densité et l'évolution, ainsi que l'occupation du sol et leurs effets sur l'espace et la société.

Le complexe GL1K, l'un des unités de la plateforme pétrochimique de Skikda, était pourtant une installation soumise à une autorisation ministérielle (installation classée). Le complexe du gaz naturel GL1K est considéré comme l'un des principales sources de risque et de pollution de la ville de Skikda. Vu la disponibilité de certaines données des rejets de cette unité et ses émissions de gaz nocives jetés dans l'atmosphère, nous voulons la prendre dans cette approche comme un échantillon d'étude et nous pouvons projeter ces répercussions sur l'ensemble des unités cités au-dessus dans le tableau (III.13) de la plateforme de Skikda.

Pour l'Algérie, la première découverte de Gaz Naturel a eu lieu en Novembre 1956 à Hassi-R'Mel, vers le 08 Décembre 1961, Le Complexe GL1/k de Skikda a été construit par la Société mixte Algérienne du Gaz (SOMALGAZ), construit par 51% des parts appartenant à SONATRACH et 49% à ERAP (Entreprise Française du Raffinage des Pétroles). L'étude du projet a duré deux ans avant le début des travaux en Mai 1969.

Le lundi 19 janvier 2004 à 18h40, une très forte déflagration s'est produite au niveau de la chaudière de l'unité 40 du complexe de la liquéfaction du gaz naturel (GLIK). Les services hospitaliers ont enregistré 27 morts, et 74 blessés parmi les travailleurs. L'ampleur de la déflagration et le souffle provoqué par celle-ci a été ressentie à plus de 4 km du complexe, endommageant la ville même où les vitres de plusieurs appartements ont volé en éclats.

Analyser la catastrophe, cela veut dire se pencher sur 32 ans d'histoire de la ville de Skikda, où le pôle pétrochimique s'est développé en même temps que la ville. C'est la question générale des rapports entre l'industrie et la ville qui est crûment posée, celle aussi de la régulation bancaire des processus d'urbanisation dans les zones à risque. Par ailleurs, la catastrophe de Skikda est une illustration de la cohabitation entre industrie pétrochimique et une partie de la ville et une leçon de géographie sociale (habitat spontané).

Le complexe de liquéfaction du gaz naturel GL1/K est conçu pour transformer une quantité très importante de gaz naturel de l'état gazeux à l'état liquide (GNL) ; avant son expédition par voie maritime le GNL est stocké dans des bacs à pression quasi atmosphérique ou l'évaporation par suite de l'échange thermique avec le milieu ambiant par les trois

Chapitre IV : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone pétrochimique de la ville de Skikda

mécanismes de transfert de chaleur (rayonnement, convection conduction) d'une certaine quantité est inévitable.

Le travail qui va suivre consiste à l'évaluation des quantités de gaz torchés du Boil-off (gaz évaporé lors du stockage), ces gaz toxiques à effet de serre sont composés généralement par (NO_x , CO, CO_2). Ces gaz résiduels inflammables dans le secteur pétrolier et gazier en amont est appelé brûlage à la torche, ainsi que dans les secteurs en aval du raffinage et du traitement des produits chimiques. La torche est habituellement formée d'une flamme libre à l'air qui se trouve au sommet d'une longue cheminée exposée aux vents.

Des gaz peuvent s'enflammer à la suite d'un arrêt d'urgence, de l'apparition non désirée d'un produit secondaire du raffinage ou du traitement de produits chimiques, ou encore, en tant qu'éléments de la production dans les champs de pétrole et de gaz naturel. À l'échelle mondiale, plus de 150 milliards de mètres cubes de substances produites par expansion des gaz dissous sont brûlés à la torche chaque année et rejetés dans l'atmosphère avec de nombreux impacts négatifs sur les écosystèmes et les vies humaines.

Les gaz brûlés à la sortie des torchères contribuent autant que le transport aérien au réchauffement climatique dont leur utilisation participerait à la réduction de la pollution atmosphérique, à la diminution du réchauffement de l'atmosphère et à la modération des changements climatiques. Outre ces aspects purement environnementaux, elle représente bien évidemment la valorisation d'une ressource non renouvelable jusqu'alors gaspillée.

En effet, des essais ont démontré les possibilités de libération dans l'atmosphère de quantités significatives de produits non entièrement brûlés dans certaines conditions éoliennes. Comme l'un de ces produits libérés risque d'être du méthane, on craint maintenant beaucoup pour la protection de l'environnement. En effet, le méthane présente de grands dangers au chapitre du réchauffement de la planète (le méthane est 23 fois plus dommageable que le dioxyde de carbone).



Figure IV.21 : Image des gaz brûlés par torche

IV.2 Présentation du complexe

Dans le cadre de l'objectif stratégique de valorisation des ressources en gaz naturel principalement du gisement de HASSI R'MEL, des usines de GNL ont été construites dans le nord du pays, dont le but principal est l'exportation du GNL vers l'Europe et les USA par Méthanier.

Parmi ces usines, nous citons le complexe de GL1K de SKIKDA dont le chantier a débuté en mars 1969 et la production en Novembre 1972. Ce complexe s'étend sur une superficie de 90 hectares et reçoit par pipe de 40 pouces et d'une longueur de 580 KM du GN du gisement de HASSI R'MEL. Sa capacité annuelle de production est de 13.2 millions de m³ de GNL et une capacité de stockage de 308 000 m³ de GNL .Il emploie 1200 travailleurs permanents.

IV.2.1 Le complexe comprend principalement

1. Trois trains de liquéfaction de GNL (U10, U5P et L'U6P)
2. Une unité GPL pour le traitement et le stockage du **propane** et du **butane**.
3. Un parc de stockage et des installations d'enlèvements conséquents comprenant :
 - ✚ Trois Bacs de Stockage de GNL d'une capacité totale de 308 000 m³.
 - ✚ Deux pomperies de GNL.
 - ✚ Deux postes de chargement de GNL.
4. Une unité centrale pour la production des utilités :
 - Vapeur ; Air instrument et Service ; Azote ; Eau déminéralisée et distillée ;
 - Hypochlorite de soude (Eau de Javel)

Chapitre IV : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone pétrochimique de la ville de Skikda

- ✚ En plus du GNL le complexe produit : 1915 T/J d'Ethane (C_2H_6) ; 1818T/J de propane (C_3H_8) ; 1554T/J de butane (C_4H_{10}) ; 917T/J de naphta léger (C_5H_{12}).

IV.2.1.1 Phénomène d'évaporation du GNL dans les bacs de stockage

Le processus d'évaporation du gaz naturel liquéfié (GNL) dans les bacs de stockage est étroitement lié aux infiltrations thermiques à travers les parois. Celles-ci varient au cours du temps sous l'effet de divers facteurs : la température atmosphérique, la pression de stockage, le niveau de liquide (le bac n'est jamais totalement rempli) et l'ensoleillement du bac. La maîtrise de ce phénomène revêt une importance particulière car il cause une perte sensible de quantité et de qualité du produit et peut avoir une incidence sur la sécurité du stockage. Cela peut se traduire par la récupération de ces produits destinés à être torché.

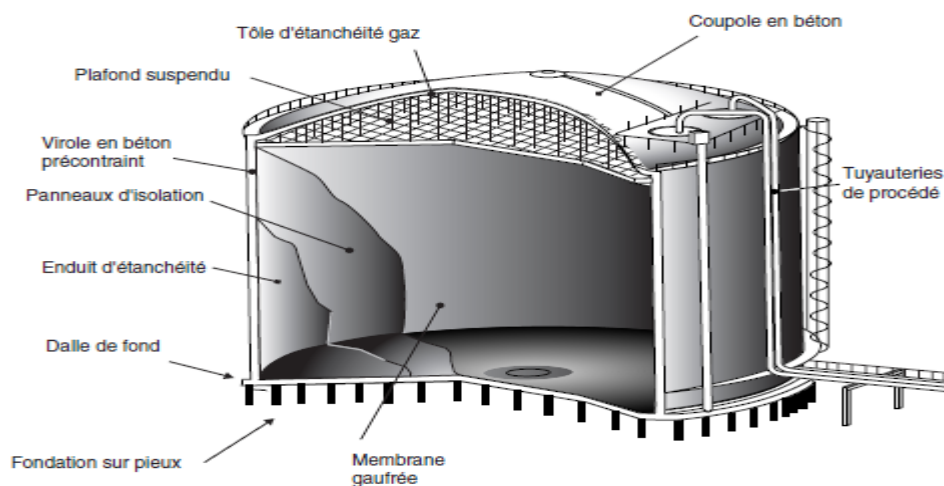


Figure IV.22 : Schéma générale constitutif d'un bac de stockage

IV.2.1.2 Procédé d'évaporation du GNL et problématique

Le GNL est un liquide composé essentiellement de méthane à plus de 90 %, il est produit, contenu et transporté à sa température d'ébullition, qui est considérablement inférieure à la température ambiante. Il en résulte des pertes par évaporation avec changement continu de la composition du liquide restant.

La manifestation directe de ces pertes se traduit par une diminution du volume de liquide constatée dans les bacs. Toutefois la perte réelle de produit commercialisé ne correspond pas à la perte brute de liquide constatée, l'effet d'évaporation se traduit par une élimination préférentielle d'azote et de méthane.

Le circuit des évaporations assure les fonctions de dégazage, d'équilibrage des pressions, et le maintien en pression des réservoirs.

Les bacs sont soumis à divers phénomènes, qui créent des variations de pression :

- ✚ Evaporation du GNL lors de son stockage, ces vapeurs ne sont pas recyclés et sont dirigées vers le réseau torche, ce type de gaz appelé Boil-off résiduel ;

Chapitre IV : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone pétrochimique de la ville de Skikda

- ✚ Déplacement du GNL, lors de la coulée ou le soutirage qui fait varier le volume gazeux, ce type de gaz est appelé Boil-off normal ;
- ✚ Retour d'une partie des vapeurs provenant du poste d'appointement lors du chargement d'un navire pour remplacer le volume libéré par le GNL soutiré, l'autre partie des vapeurs est dirigée vers la torche, c'est le Gaz retour méthanier.

Dans cette perspective nous allons répartir notre travail comme suit :

- ✚ Estimation de l'autoconsommation du complexe ;
- ✚ Estimation de la quantité du Boil-off ;

IV.2.3 Composition de l'air

On général l'air est constituée à presque 99 % par des molécules d'Azote et Oxygène, les autres gaz constituant l'atmosphère (pour un total de 1 % des molécules atmosphériques) comme le montre la figure suivante :

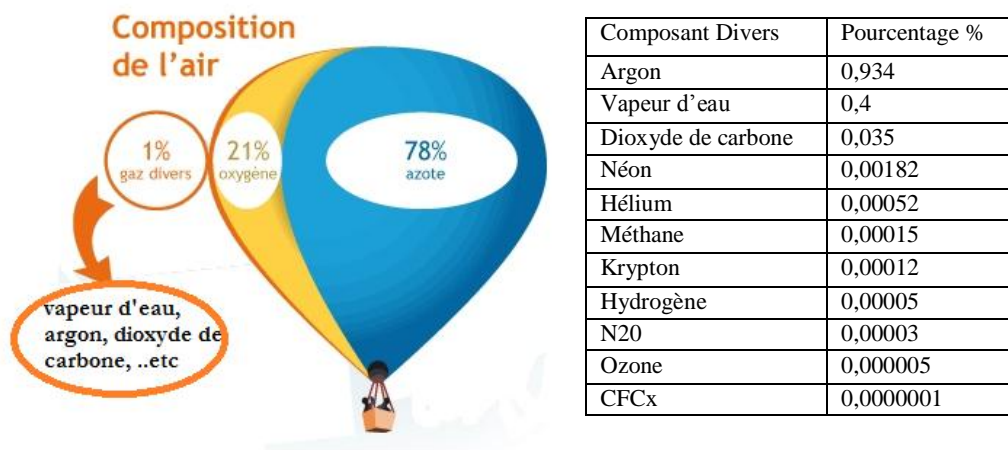


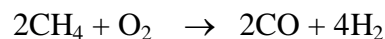
Figure IV.23 : Composition de l'air dans l'atmosphère

IV.2.4 Les effluents atmosphériques:

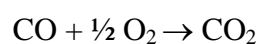
Les effluents atmosphériques qui résultent des réactions de combustion sont le monoxyde de carbone (CO), le gaz carbonique (CO₂), le dioxyde d'azote (NO_x), l'ozone (O₃), la vapeur d'eau (H₂O) et les HC imbrûlés.

IV.2.4.1 Monoxyde de carbone (CO) et le gaz carbonique (CO₂)

Dans les chaudières ou les torches si la combustion est incomplète, le CO est émis selon la réaction



D'une manière générale le CO est produit par l'oxydation incomplète des alcanes, ce dernier est peu oxydé à son tour en CO₂



Chapitre IV : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone pétrochimique de la ville de Skikda

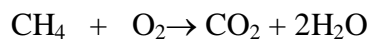
Le CO₂ est envoyé dans l'atmosphère à la fois à partir des chaudières (combustion du gaz naturel), les torches et les brûlots (combustion des substances hors spécification) et de la production.

IV.2.4.2 les oxydes d'azotes (NO_x)

Au début la notation NO_x désignait globalement NO et NO₂, par la suite elle a désigné tous les composés azotés oxygénés gazeux (NO, NO₂, N₂O₃, N₂O et même HNO₃). Ils proviennent essentiellement de la combustion de gaz dans les chaudières, les torches et les brûlots.

IV.2.4.3 Vapeur d'eau

La vapeur d'eau est évacuée dans l'atmosphère principalement à partir des chaudières, et de la production (la déshydratation du gaz libéré de la vapeur d'eau avec des traces d'hydrocarbures), les torches et les brûlots.



IV.2.5 Les hydrocarbures imbrûlés

Ce sont les fumées noires qui sont libérés dans l'atmosphère par les torches.

IV.2.5.1 Impact dus aux effluents gazeux

Les activités du complexe en général et le torchage en particulier génèrent des effluents atmosphériques directement dans l'environnement (atmosphère libre) sans récupération ou traitement. Les polluants atmosphériques qui méritent une attention particulière sont les hydrocarbures imbrûlés, le CO₂, CO et les NO_x. Ces polluants sont évacués en continu dans l'atmosphère à des concentrations variables selon la cadence de production (le nombre des unités en activité) particulièrement lors des arrêts ou démarrages des unités.

A - Impact du CO₂

Au niveau de l'atmosphère, le CO₂ est connu par ses capacités de réfléchir les rayons énergétiques vers les basses couches atmosphériques ce qui contribue au réchauffement de l'air à ces niveaux. Ce phénomène est connu sous l'appellation « **effet de serre** ».

Au niveau de l'atmosphère, le CO₂ est connu par ses capacités de réfléchir les rayons énergétiques vers les basses couches atmosphériques ce qui contribue au réchauffement de l'air à ces niveaux. Ce phénomène est connu sous l'appellation « **effet de serre** ».

B- Impact du CO

Le CO passe de la propriété de se fixer à la place de l'oxygène sur l'hémoglobine du sang, conduisant ainsi à un manque d'oxygène au niveau du système nerveux, du cœur et des vaisseaux sanguins. A taux important et à des doses respectées, il peut provoquer la diminution de la vigilance ainsi que des maux de tête, de vertige, d'asthénie ou de

Chapitre IV : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone pétrochimique de la ville de Skikda

vomissement. En cas d'exposition très élevée et prolongée, il peut même être à l'origine de séquelles neuropsychiques irréversibles.

C- Impact du NO_x

Les NO_x ont pour leur part, la double fonction d'entrer dans la formation des PAN (le nitrate de peroxy acétyl) et d'acidifier les pluies, en se combinant à l'humidité atmosphérique, les NO_x donnent naissance à l'acide nitrique (HNO₃) qui retombe sur les sols et les végétaux avec les premières précipitations. Les dégâts potentiels de ces « pluies acides » sont la destruction des végétaux et l'acidification des sols et eaux de surface et des eaux souterraines. Cette acidification favorise une érosion des métaux lourds des sols et roches d'où le double risque à la fois sur la santé et la qualité des eaux.

Les combustions incomplètes au niveau des torches du complexe génèrent des fumées noires constituées des hydrocarbures dont certains polycycliques aromatiques.

Si la toxicité aiguë de ces composés est certes faible (existent même dans la fumée de cigarette), les NO_x et les HC en général forment un nuage photo oxydant qui, sous l'effet d'un bon ensoleillement favorise la formation de PAN. Les NO_x subissent l'action énergétique du soleil pour donner du NO et de l'oxygène atomique qui va se combiner avec l'oxygène atmosphérique pour former de l'ozone (O₃) selon les équations suivantes :



Ainsi que l'oxygène moléculaire et atomique qui attaque les HC pour former des peroxy acyles nitrate (PAN),

Les PAN sont connus pour leurs effets néfastes sur les yeux (irritation et inflammations oculaires) et les sérieux dégâts qu'ils occasionnent aux végétaux. Ces effets sont perceptibles à partir d'une concentration atmosphérique.

Cette pollution atmosphérique, ne touche pas l'ensemble du territoire de la ville de Skikda, mais se trouve concentrée au niveau des zones situées au sud de la source d'émission du complexe.

IV.3 Estimation du Boil-off

La quantité du Boil-off est instable ainsi que la variation de la quantité des gaz torchés, cette variation est d'un mois à un autre et d'une année à une autre, dépend de :

- ✚ Nombre d'unité mise en production ou en service.
- ✚ Nombre de déclenchements mensuels et annuels.
- ✚ quantité de GNL produite et de la température de coulée.
- ✚ Nombre de chargement méthaniers.
- ✚ Conditions météorologiques...etc.

Chapitre IV : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone pétrochimique de la ville de Skikda

Notre travail tient en considération l'estimation du Boil-off de l'année 2008, Cette estimation est basée sur :

- ✚ l'analyse de l'autoconsommation.
- ✚ la détermination de la quantité de gaz consommé dans les chaudières.
- ✚ La détermination de la quantité des gaz torchés.

IV.3.1 Analyse de l'autoconsommation

IV.3.1.1 L'autoconsommation

Généralement l'autoconsommation d'une usine de liquéfaction est de l'ordre de 10 à 12 % du GAZ de charge. Cette valeur dépend largement du prétraitement nécessaire des installations d'expédition de GNL, du mode d'entraînement (turbines à gaz ou turbine à vapeur) et de l'efficacité intrinsèque du procédé de liquéfaction.

IV.3.1.2. Le coefficient d'autoconsommation (AC)

Le calcul de coefficient AC est basé sur les bilans faits par le service plans et programmes du département production, il est donné comme suit :

$$AC = (\text{énergie entrante} - \text{énergie sortante}) / \text{énergie entrante} \dots\dots(1)$$

Le numérateur de la relation (1) est égal au GN consommées La relation (1) s'écrit alors:

$AC = \text{énergie consommées} / \text{énergie entrante}.$

IV.3.1.3 Productions par unité

Tableau IV.15: production d'hydrocarbures

Unités	GNL (m ³)	Ethane (TM)	Propane(TM)	Butane(TM)	Naphta(TM)
10	1861868,551	42286,201	42487,320	29633,561	17780,672
5P	1567177,886	31744,982	35155,794	23859,055	14653,741
6P	2049551,507	46043,086	46334,308	31939,530	19555,522
CXE	5478597,944	120074,269	123977,422	85432,146	51989,935

TM : Tons Métriques ;

IV.3.1.4 Production commercialisée

Tableau IV.16 : Production commercialisé

Produits	Q com	PCS moyen	Thermies com
GNL (m ³)	547777,234	5811,852	31836024,894
Ethane(TM)	120074,269	12420,099	1491334,253
Propane(TM)	123977,422	12060,684	1495252,498
Butane(TM)	85432,146	11850,527	1012415,930
Iso But(TM)	952,710	11832,702	11273,134
Naphta(TM)	51989,935	11700,000	608282,240
GN en 10 ³ cm ³	4685070,370	9,411	44091472,664
Auto-consom.	811385,137	9,411	7636889,715

Le coefficient d'autoconsommation a été calculé comme suit :

Chapitre IV : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone pétrochimique de la ville de Skikda

d'après le Tableau numéro 16.

$$AC = (\text{Énergie entrante} - \text{Énergie sortante} / \text{Énergie entrante}) \cdot 100$$

$$A.N : AC = (44091472,664 - 36454582,949 / 44091472,664) \cdot 100$$

Donc on aura : **AC = 17.32 %**

On remarque que l'autoconsommation au niveau du complexe GL1K de Skikda étant anormalement élevé représente un peu plus de 17% du GAZ de charge.

IV.3.2 Consommation en gaz dans les chaudières

Le calcul de la quantité en gaz consommé par les chaudières est basé sur le bilan de vapeur des chaudières des trains de liquéfaction, ainsi que les chaudières de la centrale, pour l'année 2008 le bilan est le suivant :

Tableau IV.17: Total consommation en Cm^3/an

Chaudières	Débit VS, T/an	Rendement %	Débit GN, Mcm^3/an
51 H 01	35357	87,5	110,45
51 H 02	217274	87,5	
51 H 03	160307	87,5	
15 H 01	230652	92,3	183,45
55 B 101	1944101	92	171,95
65 B 102	2494232	92	191,95
Total consommation des chaudières			657,8

IV.3.3 Quantité des gaz torchés

A partir de la quantité des gaz consommés dans les chaudières, on déduit la quantité des gaz torchés par soustraction de cette dernière de la quantité de gaz autoconsommé.

Les résultats sont représentés dans le tableau récapitulatif suivant :

Tableau IV.18: la quantité des gaz torchés par soustraction de la quantité de gaz autoconsommé.

GN entrée complexe, Mcm^3	4685,10
Autoconsommation, Mcm^3	811,40
% Autoconsommé	17,32
Gaz consommé dans les chaudières Mcm^3	657,80
% Gaz consommé dans les chaudières	81,10
Pertes (Gaz torchés, appoints...) Mcm^3	153,35
% pertes (Gaz torchés, appoints.....)	18,90
Gaz torchés Mcm^3	127,85
% Gaz torchés	15,76
Pour autres pertes Mcm^3	25,50
% Autres pertes	5,58

Chapitre IV : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone pétrochimique de la ville de Skikda

IV.3.3.1 Les autres types de gaz torchés sont

Gaz de démarrage des trains de liquéfaction : représente une moyenne de 10.41 % de la totalité des gaz torchés.

- gaz de dégivrage/séchage : représente une moyenne de 2.95 % de la totalité des gaz torchés.
- Fuel gaz basse pression (FGBP) : représente une moyenne de 9.74 % de la totalité des gaz torchés. Ce gaz se produit lors du déclenchement du compresseur FGBP sur les unités 5P et 6P et il n'est pas récupérable à cause de sa pression trop faible (100mbars). La réduction ou l'élimination de ce gaz est liée à la fiabilité des compresseurs.
- Fuel gaz haute pression (FGHP) vers Hélicon (unité de récupération d'hélium) : représente une moyenne de 6.78 % de la totalité des gaz torchés.
- autres (appoints, vidanges, purges) : représente une moyenne de 0.99 % de la totalité des pertes.

IV.3.3.2 Quantification du Boil-off

Le **Boil-off** est calculé comme étant 1,4% vaporisé de la quantité de GNL produite, au niveau des réservoirs de stockage et pendant la coulée. Etant donné que le phénomène du boil-off est inévitable par suite de l'échange thermique avec le milieu ambiant par les trois mécanismes de transfert de chaleur (rayonnement, convection conduction) ce coefficient de 1,4% représente le pourcentage évaporé de GNL, et il est donné par le constructeur lors de la conception des réservoirs.

NB : Le Boil-off représente toujours la plus grande proportion de gaz torchés au niveau du complexe GL1/K (33,96 %), ce pourcentage est estimé par rapport à la quantité totale de l'ensemble des gaz torchés.

Le pourcentage de gaz consommé dans les chaudières, et celui des gaz torchés est estimé par rapport à la quantité de gaz autoconsommé.

Chapitre IV : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone pétrochimique de la ville de Skikda

IV.4 Synthèse du chapitre

Les gaz torchés constituent une partie importante de l'autoconsommation du complexe GL1K ; la récupération de ce gaz en général et le Boil-off en particulier qui constitue le plus haut pourcentage des gaz torchés permet la minimisation de l'autoconsommation ainsi que la préservation de l'environnement et ceci par la réduction des substances polluantes dans l'atmosphère.

Cette étude nous a permis d'obtenir les résultats suivants :

Tableau IV.19 : Récapitulation des résultats

% autoconsommation	% gaz torchés	% boil-off	Debit du boil off Cm^3/h
17,32	13,31	33,96	4957,6274

L'analyse de la pollution atmosphérique utilise des réseaux de stations de mesures de la qualité de l'air mettant en œuvre des analyseurs basés sur des techniques d'échantillonnage qui nécessitent souvent des équipements complexes, lourds, et coûteux.

Pour les applications de détection de pollution où la sélectivité et la précision ne sont pas une priorité, l'utilisation de ces techniques peut s'avérer surdimensionnée. Par ailleurs, l'utilisation des capteurs électroniques de gaz peut fournir une réponse à la problématique de surveillance de la qualité de l'air.

Enfin, l'estimation exacte du Boil-off reste un problème délicat, car ce phénomène est lié à plusieurs facteurs instables, ces facteurs sont :

- l'usure des bacs de stockage, par dégradation de la couche d'isolation ;
- mode d'exploitation des bacs par l'effet de flash lors de la coulée et le stockage du GNL dans les bacs, la pression et le niveau du GNL dans les bacs ;
- Facteurs externes aux bacs, tel que la quantité du GNL (la haute teneur en N_2), ainsi que la variation de la température ambiante ;

Ceci explique la difficulté de maintenir des conditions de marche uniformes sur une période suffisamment longue pour obtenir des résultats significatifs qui peuvent donner la performance d'exploitation des bacs et la maîtrise précise du Boil-off.

La pollution atmosphérique dans le complexe GL1K est attribuable en partie à l'instabilité de la production ; et dans une autre mesure à la configuration de la chaîne de production. Nous pensons que cette pollution peut être atténuée par:

- Une stabilisation de la production en évitant la multiplication des arrêts / démarrages souvent à l'origine des pics de pollution atmosphériques

Chapitre IV : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone pétrochimique de la ville de Skikda

- Un engagement du projet de récupération des gaz torchés est à prendre en considération.

Le prélèvement des échantillons gazeux est une opération très délicate et coûteuse ; vue quelle est limitée dans l'espace et le temps résiduel des efflux polluants. A cet effet nous allons opter pour une prise d'échantillons polluant solide afin de mieux adapté une politique de lutte contre la pollution atmosphérique dans l'environnement industriel. Le site choisi pour cette fin sera la mine de fer de l'Ouenza qui fera l'objet du chapitre suivant de cette thèse.

CHAPITRE V : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone minière de l'Ouenza

CHAPITRE V : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone minière de l'Ouenza

V.1 Introduction

V.2 Etude climatique

V.2.1 Les facteurs topographiques

V.2.2 Les facteurs météorologiques

V.2.2.1 Température

V.2.2.2 Précipitation

V.2.2.3 Le vent

V.2.2.4 Humidité

V.2.2.5 Courbe pluvio-thermique

V.2.2.6 Conclusion

V.3 Détermination de la pollution atmosphérique de la région de l'Ouenza

V.3.1 Introduction

V.3.2 Méthodologie

V.3.2.1 Zone d'étude

V.3.2.2 Modèles de dispersion de poussière

V.3.3 Modèle de conservation de masse

V.3.3.1 Résultats expérimentaux et discussions

V.3.3.2 Matériel de mesure

V.3.3.3 La mesure techniques et analyse des résultats

V.4 Synthèse du chapitre

CHAPITRE V : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone minière de l'Ouenza

Chapitre V : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone minière de l'Ouenza

V.1 Introduction

Le massif de l'Ouenza fait partie des confins Algéro-tunisiens qui sont géologiquement connus par leur caractère presque exclusivement sédimentaire. Les formations les plus anciennes exposées en surface sont les évaporites entremêlées (marnes bariolées à gypse, blocs de dolomies plus ou moins stratifiées, calcaires, cargneules, grès et rarement des ophites) du trias.

Le complexe minier de l'Ouenza est caractérisé par de nombreux gisements ferrugineux, représenté par: Chagoura Sud, Chagoura Nord, Saint Barbe, Conglomérats, hallatif, Douamis, Zerga, kahkouh, Dubordieu, Mrah el maiz, Souda et d'autres indices. (Cheriet.F, 2009)

La structure du massif de l'Ouenza correspond à un anticlinal dissymétrique de direction NE-SW avec une terminaison périclinale vers le SW. Son flanc sud-est se redresse près de la terminaison périclinale (Koudiate Tébaga) et devient chevauchant au sud-est (Koudiat el Kahkouh). L'ensemble de cette structure est affecté par des failles inverses et décrochantes de directions WSW-ENE et WNW-ESE. La présente structure du massif est due aux effets de la poussée diapirique du trias. (Bouzenoune. A, 1993).

Outre les concentrations ferrifères considérées comme les plus importantes en Algérie, des minéralisations polymétalliques à Cu-Pb-Zn-Ba-F, d'ordre économique moindre, sont signalées dans certains secteurs du massif. Ces gites sont généralement encaissés dans les calcaires à caractère récifal de l'Aptien : « les calcaires à milioles ». (Chain.R, 2006)

Le minerai de fer est constitué principalement d'hématite et sa teneur moyenne en fer est de 50 à 60 %, elle contient en outre 2 % de manganèse, 0,005 % de phosphore, 0,03 % de soufre, 0,02 à 0,03 % de silice et accompagnée par d'autres oxydes et hydroxydes de fer.

Il occupe généralement la charnière de l'antiforme de l'Ouenza au niveau des calcaires à Milioles. L'exploitation du minerai de fer se fait à ciel ouvert suivant un chapelet de carrières implantées suivant l'alignement de l'arête antiforme appelée « axe du 6 mai » et représenté par les quartiers de Douamis, Hallatif, Conglomérats, sainte barbe, ilot, chagoura nord, chagoura sud et le pic. (Chain.R, 2006)

CHAPITRE V : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone minière de l'Ouenza



Figure V.24 : Photos montrant les différents horizons du gisement ferrifère de l'Ouenza

L'hématite exploitée est considérée comme le produit d'oxydation des carbonates situés sous le niveau hydrostatique. Elle se présente soit sous une forme pulvérulente de couleur bleue ou noire rougeâtre, soit en masse terne sans cristaux apparents ou encore en masses homogènes mais laissant apparaître une trame rhomboédrique héritée du minerai carbonaté. La goethite forme des encrustements à surface mamelonnée. Elle accompagne souvent l'hématite et elle est très fréquente dans les géodes et zones de fracture.

La limonite, quant à elle, est souvent associée à la goethite, notamment dans les zones bréchiques et de fracture. Elle correspond en fait à des argiles imprégnées de limonites. Quant aux carbonates de fer, elles sont représentées par la sidérite et l'ankérite qui montrent souvent un aspect bréchiques. (Chain. R, 2006)

V.2 Etude climatique

Le climat moyen correspond à l'ensemble des conditions qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère en un lieu ou une région donnée (Guyot, 1999).



Figure V.25 : les facteurs de diffusion des polluants

CHAPITRE V : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone minière de l'Ouenza

Plusieurs facteurs interviennent dans la diffusion et la dilution des polluants :

V.2.1 Les facteurs topographiques

L'existence de certaines formes de relief, végétation, construction, ainsi que la nature particulière des matériaux qui recouvrent la surface du sol constituent une autre série de facteurs dont dépendent la diffusion des polluants et l'auto purification de l'air, aussi bien directement que par l'intermédiaire des facteurs météorologiques. (Matei.B, 1974)

V.2.2 Les facteurs météorologiques

Ont un rôle particulièrement important et qui sont: le mouvement, la température, la turbulence et les précipitations. En revanche, l'humidité, les nuages et certains autres phénomènes météorologiques peuvent contribuer d'une manière secondaire à maintenir la pollution à un niveau élevé.

V.2.2.1 Température

Les données sur la température on dispose, sont des valeurs moyennes mensuelles et annuelles, mesurées à la station de Tébessa sur une période de 10 ans (2007-2016).

Le climat de Tébessa est caractérisé par un hiver froid et un été chaud durant une période de 10 ans on constate que la température moyenne peut atteindre un maximum de 26.47°C au mois d'Aout et son minimum au mois de janvier avec une moyenne de 6.47°C.

Tableau V.20: Températures moyennes mensuelles et annuelles exprimée en (°C) de la station de Tébessa (2007-2016)

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	Aou	Sept	Oct	Nov	Dec	Total
2007	5.5	6.8	11.6	10.4	14.2	21.8	26.3	25.6	21.9	18	12.1	7.8	177
2008	4.7	7.6	9.4	11.8	16.3	20.9	23.9	25.7	22.3	19.1	11.1	7.7	180,5
2009	5.2	5.6	8.7	13.9	19.2	24.8	20.8	27	23.6	16.7	13.2	8.1	134,2
2010	7.5	8.9	11.9	11.8	21.8	24.2	27	28.6	23.2	16.3	11.3	9.8	202,3
2011	5.7	10.3	9.2	12.7	20.1	22.9	27.1	24.6	20.5	15	12.9	10.2	242,5
2012	9	6.3	10.1	12.4	18.2	20.8	25.9	26.6	23.2	17	11.8	8.5	189,8
2013	8.7	9.3	9.2	12.2	20.4	26.6	27.8	25.2	23.6	15	10.2	6.3	194,5
2014	7.2	8.2	10.1	15.1	17.7	24.6	26.2	25.7	22.1	19.2	11.1	7.1	194,3
2015	7.1	5.8	9.3	14.3	22.1	25.8	27.5	28.9	22.3	15.9	12.8	9.4	201,2
2016	4.1	7.8	9.8	16.1	21.0	22.4	28.4	26.8	21.2	21.1	11.8	6.8	197,3
Moy	6,47	7.66	9.93	13.07	21,28	23,48	26.09	26.47	22.39	17.33	11.83	9,17	191,36

CHAPITRE V : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone minière de l'Ouenza

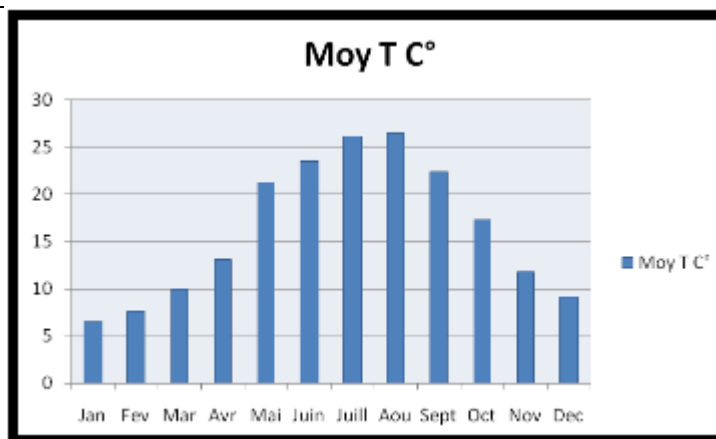


Figure V.26: Les moyennes mensuelles des températures exprimées en (°C) de la station de Tébéssa (2007-2016)

L'observation de la figure V.26 permet de distinguer que le mois le plus chaud est le mois de aout et le mois le plus froid est le mois de janvier.

V.2.2.2 Précipitation

Le tableau V.21 représente des précipitations moyennes mensuelles pour une période de 10 ans (2007-2016), nous montre un régime pluviométrique mensuel irrégulier d'un mois à l'autre.

Tableau V.21 : Précipitations moyennes mensuelles et annuelles exprimées en (mm) de la station de Tébéssa (2007-2016)

anné	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Total
2007	30.3	12.8	54	43	67.8	14.4	6.4	65.6	51.2	28.4	61.6	48.4	483,4
2008	34	29.9	24.3	43.6	82	23.2	13.4	4.5	22.7	3.8	16.8	28.7	326,9
2009	9.3	27.9	21.4	2.6	31.1	12.8	20.1	1.8	7.2	66.8	0.6	6.8	208,4
2010	31	23.9	19.4	23.3	41	2.4	4.5	11	149.7	39.7	26.6	18.2	390,7
2011	24.7	3.0	32.2	22.1	7.4	73.9	1.7	44.1	12.4	4.1	1.2	15	241,8
2012	24.9	72.9	56.3	47.8	30.2	38.9	13.2	30.3	64	72.5	45.2	21.5	517,7
2013	31.6	7.1	18.9	46.8	61.1	10.3	20.2	23.7	78.6	36.2	55.1	14.5	404,1
2014	22.3	10.2	28.7	29.2	16.7	31	00	15.1	22.1	81.5	64.6	34.5	335,9
2015	56.4	11.7	45.6	15.4	30.9	16.9	18.9	33.7	51	18.3	17	13.7	329,5
2016	3.7	4.1	10	14.7	86.5	76.4	21.6	18.8	55	10.7	23.3	7.1	331,9
Moy	32,5	20,35	31,08	28,85	45,47	29,98	12	24,86	51,39	36,2	31,2	15	357,03

CHAPITRE V : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone minière de l'Ouenza

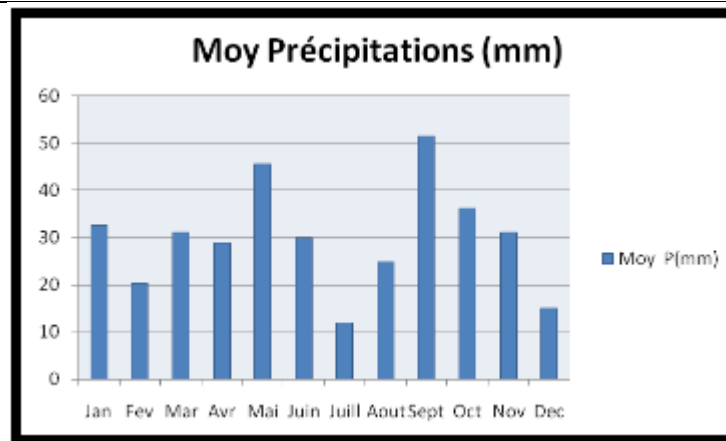


Figure V.27: Les moyennes mensuelles des précipitations exprimées en (mm) de la station de Tébessa (2007-2016)

La répartition mensuelle fait ressortir un maximum de précipitation en septembre et mai avec un minimum se produisant au mois de juillet et décembre.

Le maximum des précipitations est enregistré au mois de septembre (51.39 mm) par contre le minimum enregistré au mois de Juillet 12 mm La moyenne interannuelle des précipitations pour cette période est de 357,03 mm on constate que l'année la plus pluvieuse est 2012 avec une moyenne de 517.7 mm et le minimum en enregistré en 2009 avec une moyenne de 208,4 mm.

V.2.2.3 Le vent

La région de Tébessa est connue par des vents violents et fréquents de direction diverses. Les prédominants sont de direction "Ouest Nord-Ouest". La période (novembre à avril) et Sud-Ouest dans la période des plus significatifs de juillet à août.

Tableau V.22: Vitesses des vents moyennes mensuelles et annuelles exprimées en (m/s) de la station de Tébessa (2007-2016).

Anné	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	Aou	Sept	Oct	Nov	Dec	Total
2007	3.14	4.75	4.61	5.68	3.4	10.27	7.64	3.35	1.72	11.29	6.68	10.3	72,83
2008	9.32	11.42	19.4	13.48	3.67	11.54	14.62	2.58	10.62	4.62	11.31	10.03	122,61
2009	10.41	11.1	3.48	3.21	1.97	11.46	2.4	9.25	5.02	11.49	4.16	10.58	84,56
2010	9.12	4.63	11.6	10.17	8.98	11.25	11.46	3.39	5.56	8.7	8.36	13.59	115,79
2011	4.23	8.93	11.44	8.14	11.35	11.44	8.09	10.36	10.62	8.93	11.45	10.21	115,19
2012	8.22	8.92	11.36	3.49	3.05	11.43	8.25	5.35	8.12	11.29	11.57	11.43	102,48
2013	11.42	10.38	11.12	11.23	11.56	11.47	10.88	14.52	6.93	7.9	9.54	11.34	128,29
2014	1.85	1.00	11.46	9.36	3.4	10.52	11.43	11.43	11.42	10.51	11.55	11.47	105,04
2015	9.24	11.46	10.2	10.59	10.57	9.48	6.87	1.2	5.09	7.04	10.32	23.13	115,01
2016	11.38	11.54	11.54	9.34	10.54	1.12	5.71	9.34	6.79	4.71	9.04	9.34	88,85
Moy	7.83	8.41	10,62	8.46	6.84	9.99	8.73	7,07	7,18	8,64	9.39	12,14	105,06

CHAPITRE V : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone minière de l'Ouenza

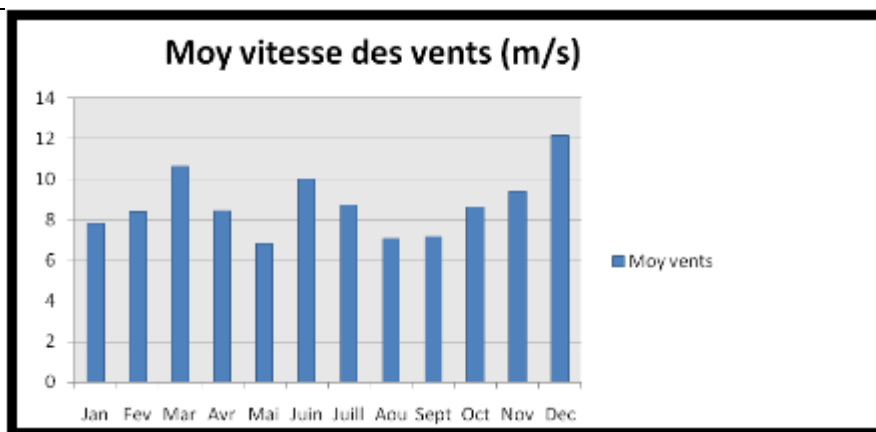


Figure V.28: Les moyennes mensuelles des vitesses des vents exprimées en (m/s) de la station de Tébessa (2007-2016)

V.2.2.4 Humidité

L'humidité relative de Tébessa varie entre un maximum de 72.24% mois de Janvier et un minimum de 39.9% au mois de juillet.

Tableau V.23: Humidité relative moyennes mensuelles et annuelles exprimée en H% de la station de Tébessa (2007-2016)

Anné	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Total
2007	80	72.4	67.1	75.9	64.6	51.1	42.2	44.2	53.9	52.1	67.2	69.1	739,8
2008	76.9	74.3	72.1	63.5	62.6	50	47.4	42.2	47.8	47.2	69.2	72.1	725,3
2009	73.4	77.1	64.7	54.6	49.9	42.9	46	39.1	49.4	70.2	64.5	70.3	702,1
2010	70.7	56.1	58.1	55	39.1	39.4	33.5	33.7	61.1	67.7	61.7	72.1	648,2
2011	71.9	61.8	61.8	54.7	43.3	50.9	40.2	14.6	53.9	61.1	54.2	54.2	622,6
2012	65.8	71.5	68.2	66.2	55.3	53.5	38.7	45.9	67	70	75	74	751,1
2013	65.3	62.4	63	64	43.7	42	40	50.8	58	65	60	74	688,2
2014	72.3	69	60.8	50.9	56	37	32	55.4	51.9	56.8	64.4	74.5	681
2015	73	72.4	60.7	54.3	43.3	42	40.5	39.6	53	65.3	66.2	61.9	672,2
2016	73.1	63	55.9	50.3	59	50	38.5	40	62	54	70	70.1	689,5
Moy	72,24	68	63,24	58.94	51.68	48,88	39,9	40.55	55,8	60,94	65,24	69,23	692,3

CHAPITRE V : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone minière de l'Ouenza

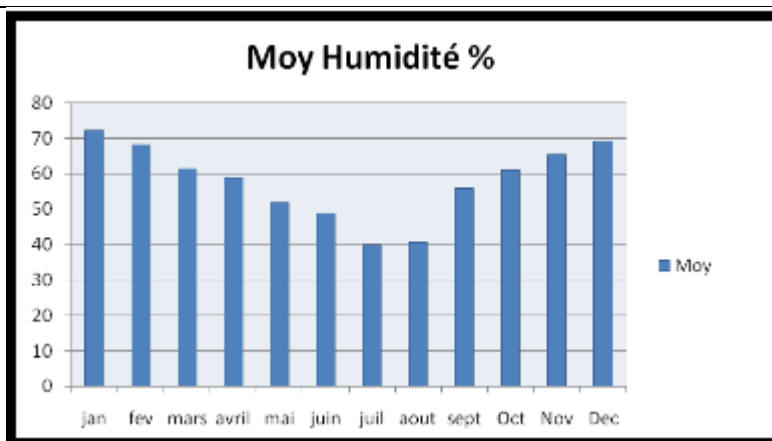


Figure V.29: Les moyennes mensuelles de l'humidité relative exprimées en H% de la station de Tébessa (2007-2016)

On constate que l'humidité relative est plus importante pendant le mois de janvier et diminue pendant le mois de juillet.

V.2.2.5 Courbe pluvio-thermique

Tableau V.24: Température moyenne mensuelles interannuelles et précipitation moyennes mensuelles interannuelle de la station de Tébessa (2007-2016).

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
T(°C)	6,47	7.66	9.93	13.07	21,28	23,48	26.09	26.47	22.39	17.33	11. 83	9,17
P(mm)	32,5	20,35	31,08	28,85	45,47	29,98	12	24,86	51,39	36,2	31,2	15

La détermination de la période sèche est réalisable selon le mode de représentation introduit par Gaussen (1954) qui consiste à comparer mois par mois le rapport entre les précipitations et température pour cela on porte sur un même graphique la courbe des moyennes mensuelle des températures et celles des totales mensuelles pluviosités établies à une échelle telle que 1°C correspond à 2 mm de pluies (Ozenda, 1982). Les données de tableau V.24 pour la station de Tébessa ont été utilisées pour la construction de ce diagramme (Fig. V.30). Le climat de la région se caractérise par deux périodes:

- Période sèche relativement courte qui dure du mois de mai jusqu'au mois de Septembre.
- Période humide qui commence du mois d'octobre jusqu'au mois d'avril.

CHAPITRE V : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone minière de l'Ouenza

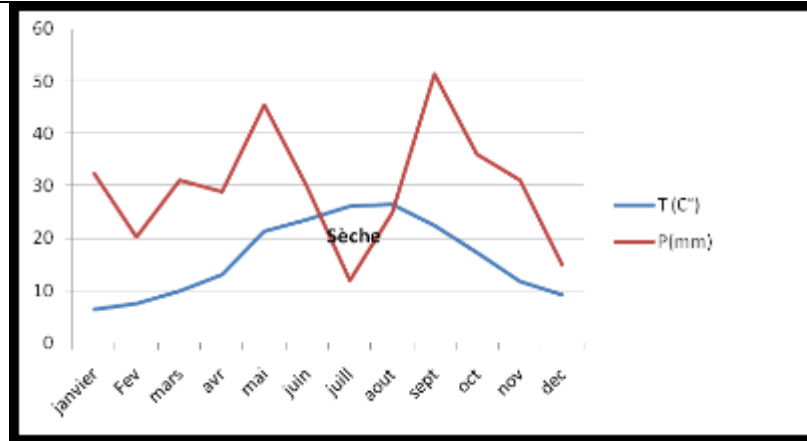


Figure V.30: Diagramme Ombrothermique de la station de Tébessa (2007-2016)

Durant cette période nous aurons une pluviométrie qui pourra participer à la recharge des nappes sous forme d'infiltration et alimenter les cours.

V.2.2.6 Conclusion

- ❖ Le climat de la région de l'Ouenza est semi aride marqué par deux périodes pluvieuses, à partir du mois de septembre jusqu'au mois de novembre, et de février jusqu'au mois de mai. Les moyennes annuelles des précipitations sont de 357,03mm.
- ❖ L'observation générale des fréquences des vents souligne que les vitesses des vents les plus élevées sont marquées pendant le mois de décembre durant la période (2007-2016) et les vitesses les plus basses sont marquées pendant le mois de mai.

V.3 Détermination de la pollution atmosphérique de la région de l'Ouenza

V.3.1 Introduction

L'invasion de poussières dans l'atmosphère, associée aux apports des émissions industrielles, peut avoir des conséquences négatives sur la qualité de l'air régional, cela crée plus de problèmes de pollution atmosphérique en ce qui concerne les poussières et les fines. Il n'y a pas de méthode bien définie pour évaluer les impacts sur la qualité de l'air dus aux rejets miniers.

Une enquête devrait être menée pour évaluer les impacts sur la qualité de l'air et les caractéristiques de la poussière en suspension dans l'air due à l'exploitation à ciel ouvert.

La pollution atmosphérique est causée par les émissions de sources ponctuelles, de sources de surface, de sources mobiles et de sources biogéniques. De nombreuses preuves ont démontré que la pollution de l'air affecte la santé des êtres humains et des animaux, endommage la végétation, le sol et détériore les matériaux, influence le climat, réduit la visibilité et le rayonnement solaire, contribue aux risques pour la sécurité et interfère avec le plaisir de la vie. La plupart des industries utilisent des équipements de contrôle de la

CHAPITRE V : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone minière de l'Ouenza

pollution atmosphérique pour se conformer aux réglementations en vigueur exigées, ces équipements vont des filtres à manches aux systèmes d'épuration à cyclones. L'application de ces équipements dépend principalement du type de polluant qui prédomine dans le flux de déchets, ainsi que la quantité et la qualité des déchets qui ont de graves conséquences sur la santé (Daly A., al, 2007). Ces effets prennent en compte le montant de la pollution qui est libérée pour augmenter les niveaux de polluants avec la concentration de l'air ambiant, il garantit ainsi que les polluants ne causeront pas de problèmes de pollution de l'air aux communautés vivantes en aval des sources de pollution. Afin de réduire les émissions de polluant dans l'atmosphère, il est nécessaire de surveiller en permanence la qualité de l'air. C'est pourquoi une modélisation précise de la concentration en polluant et la distribution à proximité sont très importantes. La modélisation de la qualité de l'air joue un rôle important dans la gestion de notre environnement.

L'attention des chercheurs a été attirée par la dispersion des polluants atmosphériques dans plusieurs façons. La modélisation de la dispersion atmosphériques dans est l'un des outils utilisables aux émissions et à la dispersion étudiées. La modélisation de la dispersion atmosphérique est une simulation mathématique de la dispersion des polluants principalement dans les limites des couches de l'atmosphère. Elle est entreprise en utilisant un programme informatique qui résoudra des équations mathématiques et des algorithmes simulant la dispersion des polluants. Différentes approches de solution et d'approximation ont été utilisées dans le passé pour faire face à la dispersion de la pollution atmosphérique. Au cours des dernières années, une nouvelle approche, des techniques de transformations de Laplace ont été utilisées pour résoudre l'équation d'advection-diffusion, c'est un modèle mathématique classique de dispersion utilisés pour la dispersion industrielle dont la modélisation inclut l'industriel source complexe (ISC) développé par la USEPA, Les modèles Gaussiens (modèles à panache, à bouffée et à fluctuation), modèle EPA SCREEN, modèles de régression, modèles de diffusion simple (modèle de boîte et turbulence atmosphérique) et modèles de théorie du gradient et modèles axés sur les récepteurs et modèles à cellules multiples. Des modèles plus complexes peuvent incorporer des traitements météorologiques plus réalistes, mais nécessitent des données qui sont difficile et couteux à obtenir. L'exploitation de mines à ciel ouvert génère une quantité considérable de poussières à travers diverses activités telles que le tir par dynamite, le transport routier non asphalté, le chargement et le déchargement et le stockage. La poussière générée est un danger pour l'environnement qui peut nuire un impact sur la santé humaine ainsi que sur l'environnement. La détermination des taux d'émission de diverses activités minières et la prévision de la concentration de polluants est nécessaire pour évaluer les impacts de l'exploitation minière

CHAPITRE V : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone minière de l'Ouenza

sur la qualité de l'air. L'étude du transport et de la dispersion des poussières dans l'atmosphère est cruciale pour gérer et améliorer les contrôles actuels, il détermine également l'occurrence et des pires scénarios météorologiques et à la fin, il permet aux gens d'éviter ou de minimiser les émissions dans ces conditions défavorables.

L'objectif principale de notre approche est de présenter une méthode facile à utiliser pour évaluer la présence de polluants atmosphérique dans la mine de l'Ouenza et l'exposition potentielle des fréquents à ce risque. Ces études consistaient à calculer la pollution atmosphérique et sa concentration dans cette mine en utilisant l'équation générale du bilan matière. Donc le but de cette approche est de passer en revue les polluants atmosphériques en discutant et appliquant des méthodes de modèle de conservation de la masse.

V.3.2 Méthodologie

V.3.2.1 Zone d'étude

Le massif d'Ouenza (1288 m) est situé dans la vieille ville de Morsott Joint, à 160km du port d'Annaba et 20km de la frontière Algéro-Tunisienne. La mine était relié au port d'embarquement un chemin de fer électrifié normal de 190 km. Le gisement ferrugineux d'Ouenza est situé au nord d'une chaîne de montagne, qui culmine à 1288 m du sommet, il mesure environ 12 km de long sur 5 km de large, l'extraction primaire de la plaque tournante du minerai de fer en Algérie est le gisement de Ouenza. Ce champ produit environ 2 millions de tonnes par an, dont 70% sont de qualité supérieure à 55% et de contenu variable de 45% à 50%. Quant à la teneur en minerai pauvre est de 45%, ils sont donc temporairement stocké sur le sol de la mine. Le minerai de fer est de l'hématite titrant 54% de fer, plus 2% de manganèse (Aptien du crétacé). Ces réserves en plein air présentent un potentiel danger pour la population de l'Ouenza.

La mine a connu une baisse de production à la suite de la mauvaise gestion de la qualité des matières premières exploitées. A cette fin, le reste de la quantité extraite représente des minerais à basse teneur et de différentes teneurs en fer, qui sont principalement l'hématite, la goethite, le calcaire et le gré. Ces pauvres minerais sont actuellement stockés près de la mine et de la ville de l'Ouenza.

Le gisement de fer de l'Ouenza est divisé en quartiers. Tous ces quartiers sont exploités dans la mine à ciel ouvert.

V.3.2.2 Modèles de dispersion de poussière

La modélisation de la dispersion utilise des équations mathématiques décrivant l'atmosphère, la dispersion, les processus chimiques et physiques influençant un polluant

CHAPITRE V : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone minière de l'Ouenza

rejeté par les sources d'une géométrie donnée et pour calculer les concentrations aux niveau des différents récepteurs suite à la libération des polluants.

Les modèles de dispersion nécessitent deux types de saisie de données : des informations sur les sources, y compris les taux d'émissions de polluant et les données météorologiques. En outre, ils ont également besoin d'information sur la topographie de la zone d'étude (Figure V.32).

La météorologie est fondamentale pour la dispersion des polluants car c'est le principal facteur qui détermine l'effet de dilution de l'atmosphère. Les modèles utilisent ensuite ces informations simuler mathématiquement le transport et la dispersion du polluant, en fin de compte on aura la concentration de l'air pollué, pour une période donnée, généralement à des emplacements spécifiques du récepteur.

Les modèles aident également à concevoir des stratégies de contrôle efficaces pour réduire les émissions de polluants atmosphériques nocifs. Un modèle de dispersion est un moyen de simulation utilisant des équations mathématiques pour prédire les concentrations de polluant de l'air basé sur les données météorologiques, topographiques et sur leurs émissions.

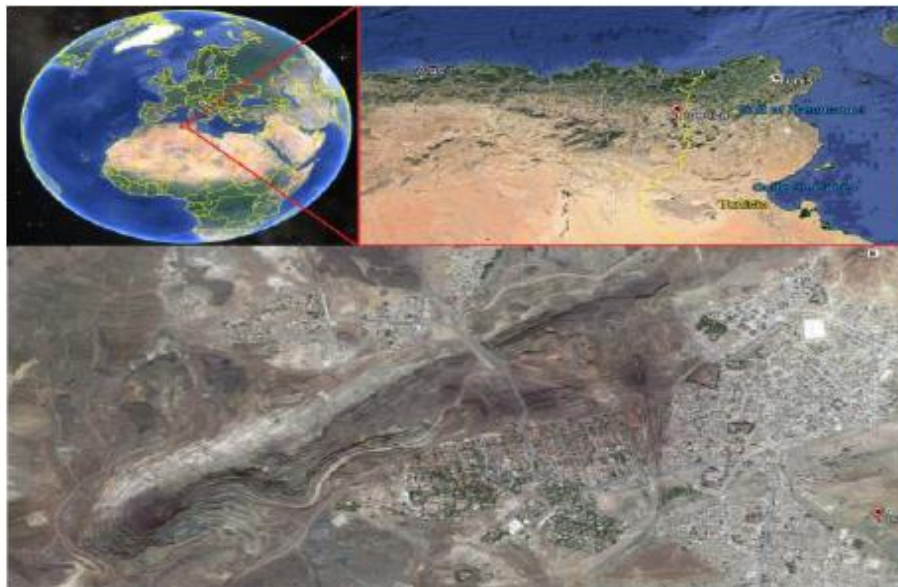


Figure V.31 : Localisation de la zone d'étude d'Ouenza (image Google Earth d'une altitude de 220,01 km)

Tout modèle dépend des entrées suivantes (Figure V.32): Paramètre d'émission: type de source, taux d'émission, emplacement, hauteur, température, etc.

Topographie: zone rurale ou urbaine, élévation du terrain, hauteur et largeur de tout obstacle, emplacement du récepteur (hauteur, distance de la source), etc.

CHAPITRE V : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone minière de l'Ouenza

Conditions météorologiques: vitesse et direction du vent, température atmosphérique, Stabilité atmosphérique, couverture nuageuse, rayonnement solaire, etc.

Le système de modélisation du transport et des dépôts de pollution est brièvement décrit ici.

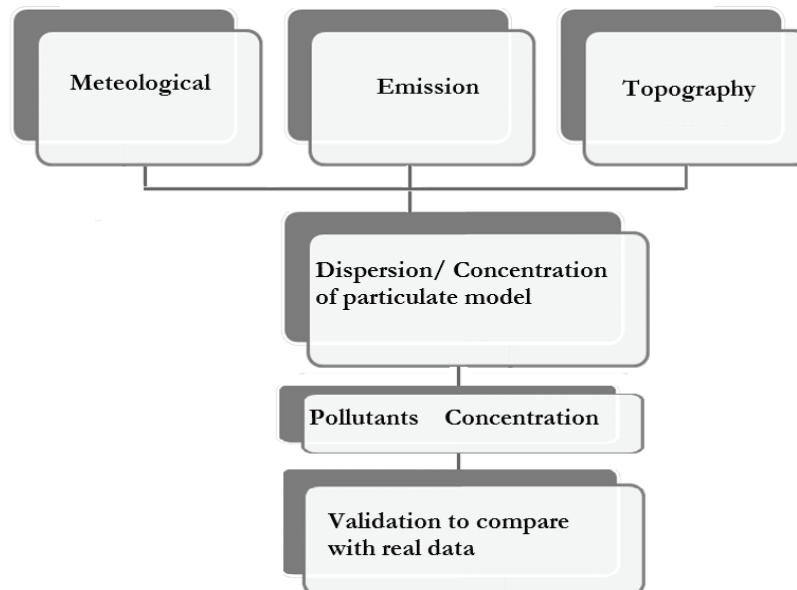


Figure V.32 : Composants du modèle de dispersion

Il existe plusieurs algorithmes mathématiques de base dont certains incluent:

Gauss modèle (panache, bouffée), (El-harbawi M., et al, 2009), modèle de Lagrange et Euler (Turner D.B., 1970), modèles de régression, boîte modèles, modèles de cellules multiples et autres nouvelles approches, par exemple, (Cassol M., et al, 2009). Ces modèles de différent type de polluant adapté, type de source de polluant et utilisation ou non approche du panache ou de la bouffée.

Aux fins de la présente étude, la modélisation de la dispersion des polluants atmosphériques à partir d'une source industrielle peut être décomposée en ce qui suit :

V.3.3 Modèle de conservation de masse

Ce principe décrit une réalité physique tout à fait compréhensible. Dans le cas présent, ce principe est appliqué à la masse des polluants, ainsi qu'au débit et à l'énergie cinétique et thermique du flux porteur. Pour être complet, il convient encore d'introduire des termes de source et puits. Un terme source correspondrait à l'émission des polluants par toute la chaîne de production de l'usine ; le terme puits (αk) décrirait l'absorption des polluants par un processus technologique, ou bien par les poumons humains.

Pour un volume de référence fixé, la variation de masse du polluant par unité de temps est donc donnée par la différence de deux phénomènes de transport qui influent sur la source directement sont :

1) Transport convectif (convection) du à la vitesse du vent.

CHAPITRE V : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone minière de l'Ouenza

2) Transport dispersif dû à la diffusion et à la dispersion mécanique ;

Ce modèle a l'ère d'un modèle mathématique qui a pour objectif de réduire une réalité physique complexe à un ensemble de relations mathématiques qui offrent prise au calculs, cette phase est souvent la plus difficile dans l'élaboration d'un mécanisme.

Les calculs numériques requis par le modèle mathématique sont implantés sur un ordinateur avec les différents programmes permettant de réaliser nos prévisions.

Les équations mathématiques sont nombreuses, il s'agit d'équations différentielles qui doivent être résolues au moyen d'ordinateurs performants parce que notre modèle de prévision du temps cherche à décrire la réalité de très près et l'avantage de ce genre de modèle est qu'il est très proche des équations de base.

En se basant sur le mécanisme cité précédemment on peut établir la relation suivante :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + U \frac{\partial C}{\partial x} - \text{Puits} + \text{Autres sources} \dots \dots (1)$$

En remplaçant le terme puits par αk et le terme autres sources en Ssr , on trouve l'équation suivante :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + U \frac{\partial C}{\partial x} - \alpha k + Ssr \dots \dots \dots (2)$$

Dont :

$\frac{\partial C}{\partial t}$: La variation de la concentration en fonction du temps.

$\frac{\partial C}{\partial x}$: La variation de la concentration du polluant en fonction de la distance(x)

U : vitesse du vent de la région.

D : Indice de la dispersion des polluants, d'où on le calcul avec la formule suivante :

$$D = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n-1} \dots \dots \dots (3)$$

Où X : est la concentration prélevée ; \bar{X} : est la moyenne des concentrations

αk : exprime les puits ou le dispositif (technique) absorbant des polluants.

Ssr : est le nombre de sources de polluants considérées en dehors de l'unité de production.

Ainsi, nous supposons comme source les différentes sources dans l'unité, on peut les simulées par une seule source équivalente.

Parmi les principaux mécanismes qui interviennent du point de vue des flux et du Principe de continuité –conservation on peut citer :

1. la dilution due à la vitesse du vent : celle-ci d'autant plus grande que cette vitesse est élevée. Pour un débit de polluant fixé, le débit d'air permettant la dilution croit avec la vitesse. Les apports et les enlèvements de polluant sous l'effet du vent : ces

CHAPITRE V : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone minière de l'Ouenza

flux sont fréquemment désignés par le terme «advection». Ils dépendent non seulement de la vitesse, mais également de la direction du vent.

2. Le flux turbulent, qui dirigea principalement la dispersion des polluants.

Les effets de sources et de puits : Ceux-ci contribuent respectivement à une augmentation et à une diminution de la teneur en polluants.

Dans le cas de l'absence de ce dernier, on peut écrire que: $\alpha k = 0$.

D : est le coefficient de dispersion qui varie en fonction de la distance normale de la source.

Nous considérons que ce coefficient est le même que celui trouvé à l'intérieur des unités.

Enfin, l'équation de masse de notre mécanisme de conservation peut s'écrire comme suit:

$$-D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + U \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \dots \dots \dots (4)$$

Elle a la forme suivante:

$$\emptyset(k) = k^2 - pk + q = 0 ; \dots \dots \dots (5)$$

Il est évident de l'équation écrite ci-dessus que c'est une équation différentiel de second ordre à coefficient constant p et q sans second membre peut être mis dans la formule :

$$C(x) = C1 \cdot e^{K1x} + C2 \cdot e^{K2x} \dots \dots \dots (6)$$

Ou : $K1 = \frac{v}{D}$ et $K2 = 0$

$k1$ et $k2$ Sont réels où $k1 = -k2$

Ensuite, nous trouvons que la solution générale de notre équation est la suivante:

$$C(x) = C1 \cdot e^{\left(\frac{v}{D}\right)x} + C2 \dots \dots \dots (7)$$

Les données obtenues sont traitées par un code numérique (MATLAB) est présentées dans la figure suivante (figure V.33).

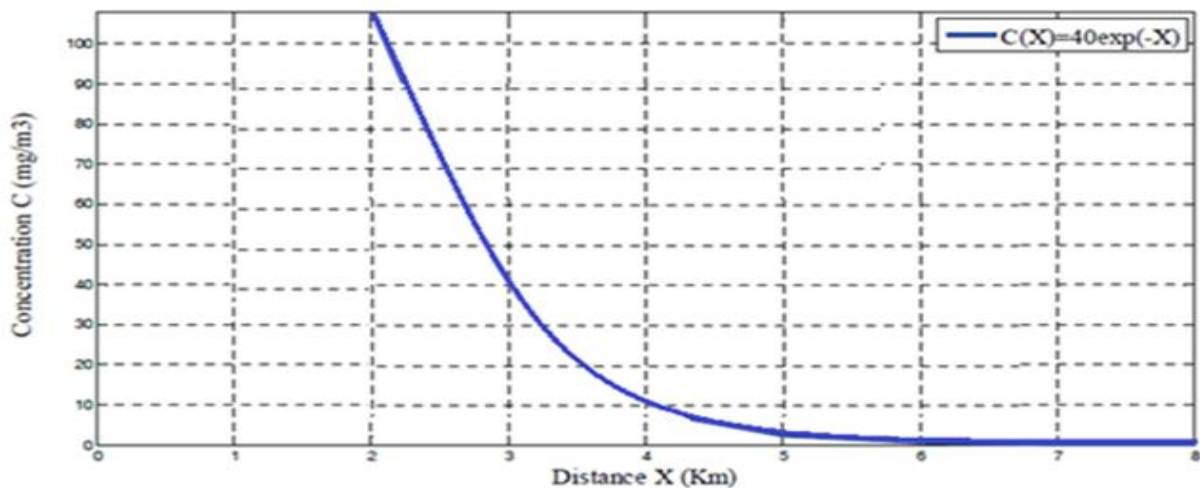


Figure V.33 : Présentation de la fonction de dispersion de la concentration polluante des postes de mesure

CHAPITRE V : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone minière de l'Ouenza

Conclusion :

L'observation de la courbe ci-dessus permet de présenter les points suivants :

- La concentration de la poussière dans la fourchette (0-2 km) dépasse largement les 100 (mg/m³).
- La concentration de la poussière dans la fourchette (2-4 km) est entre (10-100 mg/m³).
- Cette concentration élevée peut atteindre le périmètre urbain de la ville de l'Ouenza et nuire à la santé de la population et la végétation.

V.3.3.1. Résultats expérimentaux et discussions

La recherche a été menée sur la dispersion des modèles de concentration de masse dans la mine d'Ouenza (Figure 34). Sur la carte, il y a quatre endroits marqués sur la mine d'Ouenza.

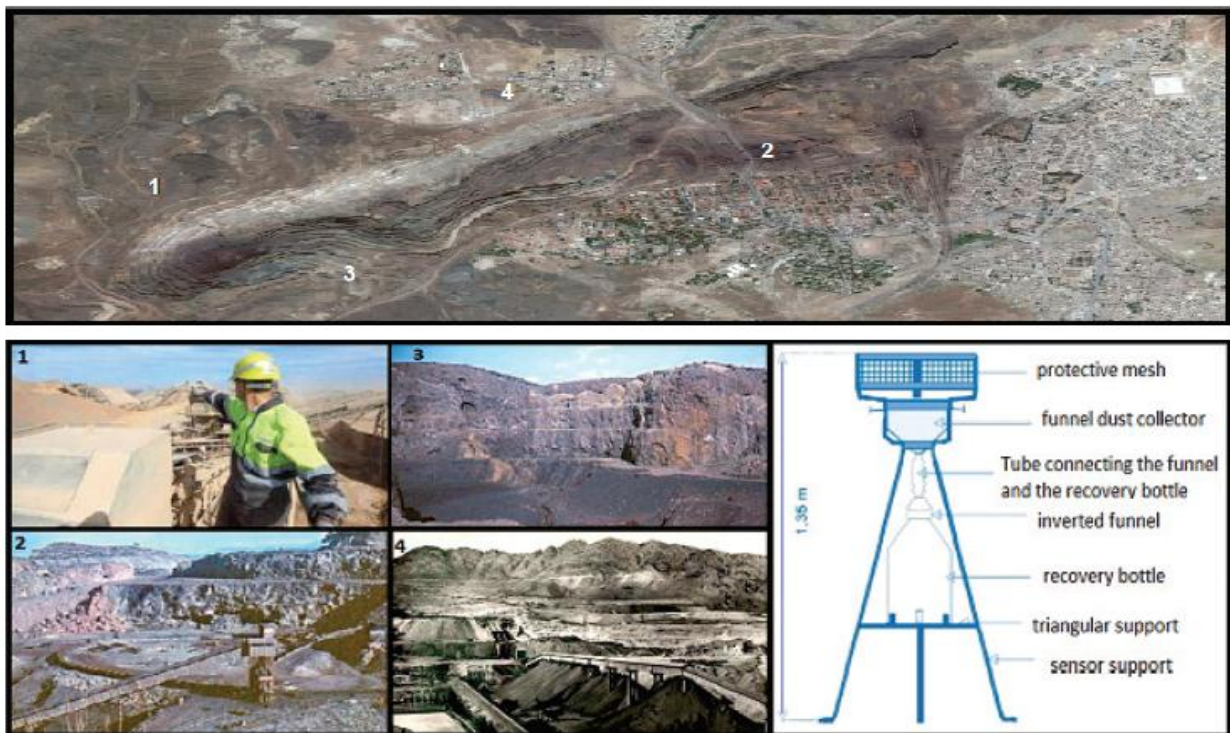


Figure V.34 : Sources de prélèvement sur tout le contour de la mine de l'Ouenza

La détermination de la concentration du polluant a permis d'établir le degré de concentration et l'impact sur l'état de santé du personnel directement ou indirectement exposés à des substances poussiéreuses. Nous avons indiqué les endroits sensibles considérés sources de poussière dans les zones de production dans la figure V.34.

V.3.3.2 Matériel de mesure

Pour l'analyse et la mesure des polluants, nous devons utiliser le dispositif de mesure existant actuellement dans la mine (type CPM3). Cet appareil est destiné à mesurer le poids à respirer dans l'atmosphère des sites de travail ou des ateliers pour surveiller dans

CHAPITRE V : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone minière de l'Ouenza

conformément aux dernières données médicales. Après la récupération des postes de travail avec le périphérique mentionné ci-dessus, le filtre est récupéré de l'appareil et amené dans le laboratoire d'hygiène industrielle et au laboratoire de chimie pour en déterminez la concentration de poussières et la composition chimique du polluant atmosphérique dans les tableaux : V.26 et V.27.

Tableau V.25 : Appareil de mesure des polluants atmosphérique poussiéreux.

Type d'appareil	Caractéristiques			
CPM3(Français)	Poids : 03 Kg	Débit d'air : 03m ³ /h	Autonomie 10 h	Durée de charge 14 h

Les données météorologiques pertinentes qui incluent la vitesse du vent et l'humidité sont collectées par un anémomètre et un hygromètre, respectivement. Dilution et dispersion de particules dans une mine à ciel ouvert est en fonction du plan de travail de la mine et des conditions météorologiques locales.

V.3.3.3 Les mesures techniques et analyse des résultats

A. Cas 1: mesure de la poussière

Connaissant les facteurs d'influence (concentration, composition chimique, etc.) des polluants sur le corps humain reflètent un très important agent pour localiser certaines maladies professionnelles spécifiques telles que la silicose, pneumoconiose et autres. Les valeurs du tableau (V.26) indiquent les mesures des concentrations moyennes de poussière dans la mine (mg / m³) est une menace de danger poussiéreuse dans le champ de travail de la population travailleuse.

Tableau V.26 : Concentrations mesurés dans différentes stations de la mine de l'Ouenza

Lieu de prélèvement	Poste de travail	Date	P1 (mg)	P2 (mg)	P1-P2 (mg)	T1 h, min	T2 h,min	T	Volum M ³	Concent mg /m ³	Teneur En Slice
1/Concasseur	Surveillance De l'installation	08/07/13	1538	7858	6329	7h22	9h22	2h	6	1053	13 .06
		08/07/13	1813	8091	6278	13h15	15h15	2h	6	1046	
		02/10/14	2000	7838	5838	7h40	9h40	2h	6	973	
		07/10/14	1929	8839	6910	8h00	11h00	3h	6	767	
	Concasseuriste	10/07/13	1820	3941	3621	8h30	9h30	1h	3	1207	08.80
		10/07/13	1702	5395	3693	13h00	14h00	1h	3	1231	
		21/10/14	1912	7990	6078	8h30	10h30	2h	6	1013	
		21/10/14	1823	7841	6018	13h00	15h00	2h	6	1003	
2/ Navette La bande	Conducteur de la Navette	21/07/13	2805	5070	2265	10h15	11h15	1h	3	755	08.80
		10/11/13	1815	6045	4230	7h45	9h45	2h	6	690	
		21/07/14	2210	4603	2393	13h30	14h30	1h	3	731	

CHAPITRE V : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone minière de l'Ouenza

3/ Quartier 6 Mai (Carrière)	Sondeur	14/07/13	1513	4957	3444	8h45	10h45	2h	6	574	08.80
		14/07/13	1528	5578	4050	13h15	15h15	2h	6	690	
		22/10/14	2338	6845	4506	8h25	10h25	2h	6	760	
		24/10/14	2317	7157	4440	9h00	11h00	2h	6	740	
4/Chargement sur train	Poste de manipulation	15/07/13	2117	5120	3003	9h00	10h00	1h	3	1010	08.80
		09/11/14	1853	8466	6612	9h00	11h00	2h	6	1102	
		20/11/14	1915	8347	6432	8h25	10h25	2h	6	1072	

B. Cas 2: analyse chimique des poussières

Des échantillons ont déterminé que la concentration moyenne de SiO₂ se situe entre 8,8 et 13,60 (mg / m³)(voir tableau V.27), cela montre clairement que cette valeur est supérieure à la norme de santé 4,40 mg /m³ provoquant des maladies professionnelles (silicose, sidérose, etc.), la pollution mesurée peut être utilisés pour évaluer la nocivité potentielle de l'atmosphère, surveiller la pollution et déterminer l'impact des mesures d'assainissement.

Tableau V.27 : Analyse chimique du minerai de fer

Substances		Fe	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃
% des composants	mg/ m ³	52,52	4,25	8,8 à 13,6	2,34

C. Cas 3 : Traitement et analyse des résultats :

Pour le traitement des résultats, nous avons utilisé une analyse de régression, en supposant que la relation entre la concentration de polluant Ci et le poids de divers échantillonnages Pi des stations de la mine de l'Ouenza est une ligne droite dont la fonction est suivie:

$$C_i = b + c.P_i \dots\dots\dots(8)$$

Ou b et c sont les inconnues de l'équation à déterminer expérimentalement.

Les résultats de l'expérience de la Figure (V.35) nous permettent de souligner que la relation entre la concentration de poussière et le poids des particules de poussière est une ligne droite dans le pas de variation de poids p = 20 à 32 mg et l'emplacements des échantillons broyeur de la carrière de la bande, et la charge sur le train, l'augmentation de poids P améliore la concentration des poussières.

La figure (V.35) montre les résultats expérimentaux de la dispersion des polluants en appliquant le modèle de conservation de masse.

En utilisant Matlab-Simulink, (Shamsijey M., 2004) on peut déterminer la concentration de la poussière en fonction des différentes distances d'une distance initiale X₀ à la distance de 8 km.

CHAPITRE V : Approche analytique de la dispersion et la concentration des polluants provenant de la zone minière de l'Ouenza

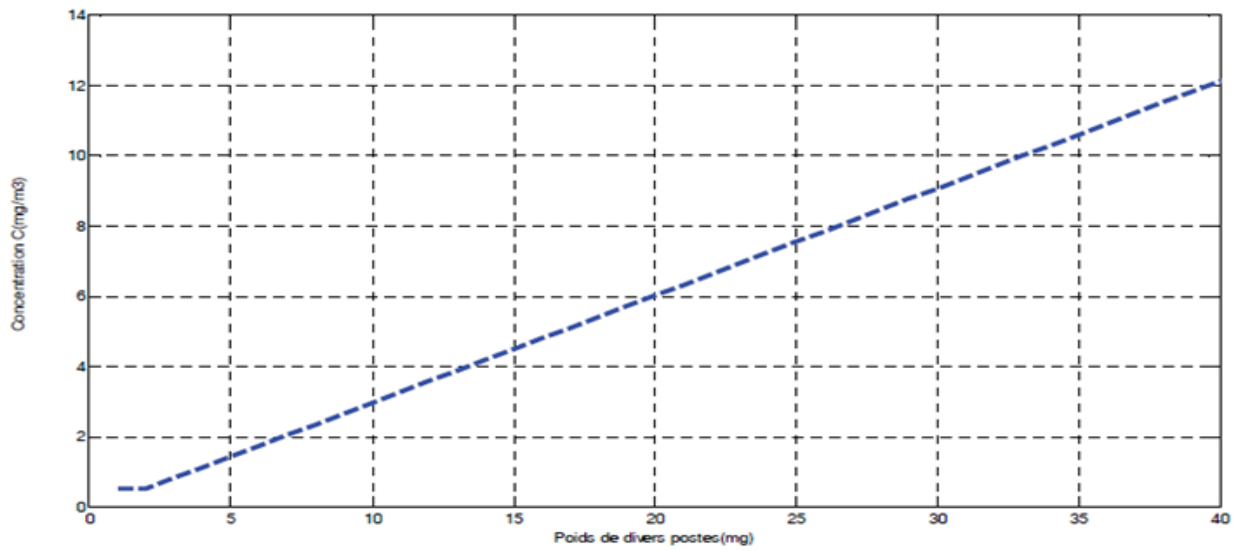


Figure V.35 : Concentration polluante des postes de mesure.

V.4 Synthèse du chapitre

La santé de la population peut être gravement endommagée par l'exposition continue à ces concentrations de polluants pendant une aussi longue durée. Notre étude des polluants atmosphériques poussiéreux à divers postes de l'industrie minière (mine de l'Ouenza) a eu pour conséquence mesures de résultats permettant de signaler les anomalies dans certaines installations de production.

Dans cette approche, le modèle de dispersion atmosphérique, modèle de conservation de la continuité, est utilisé pour prédire la dispersion et la concentration au sol dans une mine à ciel ouvert, avec référence spécifique à la mine de l'Ouenza en tant qu'étude de cas.

Le modèle discuté ci-dessus est utile pour connaître la concentration de polluants, et l'analyse chimique des polluants collectés dans la région par un échantillonnage approprié est nécessaire de connaître les caractéristiques chimiques. En effet, la comparaison des expériences résultantes avec les normes montre que le taux de formation de poussière dépasse de loin les limites, la santé des travailleurs est liés aux risques des polluants (danger pour l'homme, danger pour la machine, danger pour l'environnement). Nous recommandons de prendre toutes les mesures préventives pour identifier les pollutions et assurer une bonne fiabilité de l'outil de production.

À l'avenir, le modèle de dispersion de l'air gaussien de la performance peut être analysé et testé contre des mesures à la concentration au sol de SO₂ quotidiennement moyenne obtenue sur les sites de la zone industrielle de la ville de Skikda.

**CONCLUSIONS GENERALES
ET RECOMMANDATIONS**

Conclusions générales et recommandations

Les polluants atmosphériques se caractérisent par leur taille, durée de dépôt et composition chimique. Les polluants organiques et inorganiques forment les éléments principaux de la pollution atmosphérique. Les facteurs de transport de la masse d'air polluante prédominante sont, le vent, le gradient vertical de température et la turbulence et leurs influences sur la pollution atmosphérique

Il est apparu que les particules atmosphériques possèdent des propriétés physico-chimiques différentes en fonction de leurs origines. Les particules anthropiques, issues des phénomènes de combustion, ont des tailles inférieures à 2 μm et sont solubles alors que les particules naturelles, issues principalement de l'érosion des sols, ont des tailles plus conséquentes ($> 2 \mu\text{m}$) avec une fraction réfractaire plus importante.

Cette différence de granulométrie induit des différences de temps de séjour atmosphérique, de distance de parcours et de mode de déposition entre les particules naturelles et anthropiques. Ainsi, ces dernières restent plus longtemps dans l'atmosphère, sont transportées sur des distances plus grandes et sont soumises à des mécanismes de déposition complexes qui comprennent à la fois les retombées sèches et les retombées humides.

La dépollution doit apporter des éléments de réflexion techniques et économiques quant au choix d'une technologie lors de la mise aux normes d'une installation existante ou de la conception d'une nouvelle unité.

Enfin contrôler l'environnement du complexe pétrochimique de Skikda passe par l'évaluation des capacités actuelles de ses activités pour le bien être du grand public, adopter des techniques analytiques des dosages et des traitements physico- chimiques, biologiques, biodynamiques ; analysant et traitant des polluants industriels majeurs, ainsi que des nuisances associées aux odeurs, d'un côté et des polluants atmosphériques tels que le monoxyde de carbone, les oxydants, les halogènes, les métaux lourds.

Les aérosols, vecteurs de pollution atmosphérique interviennent dans la formation des milieux défavorables. Pour lesquels l'industriel doit les surveiller et les réduire par des procédés adéquats économiques et fiables pour la préservation de la santé publique.

L'analyse de la pollution atmosphérique utilise des réseaux de stations de mesures de la qualité de l'air mettant en œuvre des analyseurs basés sur des techniques d'échantillonnage qui nécessitent souvent des équipements complexes, lourds, et coûteux.

Pour les applications de détection de pollution où la sélectivité et la précision ne sont pas une priorité, l'utilisation de ces techniques peut s'avérer surdimensionnée. Par ailleurs, l'utilisation des capteurs électroniques de gaz peut fournir une réponse à la problématique de surveillance de la qualité de l'air.

CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMANDATIONS

Enfin, l'estimation exacte du Boil-off reste un problème délicat, car ce phénomène est lié à plusieurs facteurs instables, ces facteurs sont :

- l'usure des bacs de stockage, par dégradation de la couche d'isolation ;
- mode d'exploitation des bacs par l'effet de flash lors de la coulée et le stockage du GNL dans les bacs, la pression et le niveau du GNL dans les bacs ;
- Facteurs externes aux bacs, tel que la quantité du GNL (la haute teneur en N₂), ainsi que la variation de la température ambiante.

Ceci explique la difficulté de maintenir des conditions de marche uniformes sur une période suffisamment longue pour obtenir des résultats significatifs qui peuvent donner la performance d'exploitation des bacs et la maîtrise précise du Boil-off.

La pollution atmosphérique dans le complexe GLIK est attribuable en partie à l'instabilité de la production ; et dans une autre mesure à la configuration de la chaîne de production. Nous pensons que cette pollution peut être atténuée par:

- Une stabilisation de la production en évitant la multiplication des arrêts / démarrages souvent à l'origine des pics de pollution atmosphériques
- Un engagement du projet de récupération des gaz torchés est à prendre en considération.

Le prélèvement des échantillons gazeux est une opération très délicate et coûteuse ; vue quelle est limitée dans l'espace et le temps résiduel des efflux polluants.

La santé de la population peut être gravement endommagée par l'exposition continue à ces concentrations de polluants pendant une aussi longue durée. Notre étude des polluants atmosphériques poussiéreux à divers postes de l'industrie minière (mine de l'Ouenza) a eu pour conséquence mesures de résultats permettant de signaler les anomalies dans certaines installations de production.

Dans cette approche, le modèle de dispersion atmosphérique, modèle de conservation de la continuité, est utilisé pour prédire la dispersion et la concentration au sol dans une mine à ciel ouvert, avec référence spécifique à la mine de l'Ouenza en tant qu'étude de cas.

CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMANDATIONS

Le modèle discuté ci-dessus est utile pour connaître la concentration de polluants, et l'analyse chimique des polluants collectés dans la région par un échantillonnage approprié est nécessaire de connaître les caractéristiques chimiques. En effet, la comparaison des expériences résultantes avec les normes montre que le taux de formation de poussière dépasse de loin les limites, la santé des travailleurs est liée aux risques des polluants (danger pour l'homme, danger pour la machine, danger pour l'environnement). Nous recommandons de prendre toutes les mesures préventives pour identifier les pollutions et assurer une bonne fiabilité de l'outil de production.

À l'avenir, le modèle de dispersion de l'air gaussien de la performance peut être analysé et testé contre des mesures à la concentration au sol de SO₂ quotidiennement moyenne obtenue sur les sites de la zone industrielle de la ville de Skikda.

Références bibliographiques

- 1/ **Azimi S. (2004)**. Sources, flux et bilan des retombées atmosphériques de métaux en Ile-de-France. thèse de doctorat de L'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, spécialité Sciences et Techniques de l'Environnement de l'université Paris XII.
- 2/ **Chang M.B., Lin N.H., Lee H.M. et Lo Y.C. (1997)**. Rainwater contamination and sources in Taoyuan county, Taiwan. A32, 1641 - 1653.
- 3/ **Chiaradia M. et Cupelin F. (2000)**. Gas-to-particle conversion of mercury, arsenic and selenium through reactions with traffic-related compounds (Geneva)? Indications from lead isotopes. Atmospheric Environment, 34, 327-332.
- 4/ **Colombo J.C., Landoni P. et Bilos C. (1999)**. Sources, distribution and variability of airborne particles and hydrocarbons in La Plata area, Argentina. Environmental Pollution, 104, 305-314.
- 5/ **Koutrakis P. (1984)**. Physico-chimie de l'aérosol urbain : identification et quantification des principales sources par analyse multivariable. Thèse de doctorat: University Paris VII, 143 pp. p.
- 6/ **Allen A.G. (2001)**. Size distributions of trace metals in atmospheric aerosols in the United Kingdom. Atmospheric Environment, 35, 4581-4591.
- 7/ **D'Almeida G.A., Koepke P. et Shettle E.P. (1991)**. Atmospheric aerosols : Global climatology and radiative characteristics. A. Deepak publishing, 126, 561 pp.
- 8/ **Gomes L. (1990)**. Approche géochimique du soulèvement des aérosols à l'interface sol-atmosphère en zone désertique. Thèse de doctorat: Paris VII, p.
- 9/ **Pye K. (1987)**. Aeolian dust and dust deposits. Academic Press, London, 334 p.
- 10/ **Pruppacher H.R. et Klett J.D. (1997)**. Microphysics of clouds and precipitation. Kluwer Academic Publishers, 976 p.
- 11/ **Whitby K. (1976)**. Physical characterization of aerosols in methods and standards for Environmental measurement. Proceedings of the 8th Materials Research Symposium, Gaithersburg, MD, USA, 165-173.
- 12/ **Renoux A. (1990)**. Ce qu'il faut savoir sur l'aérosol atmosphérique. Pollution Atmosphérique, Janvier - Mars, 10 - 13.
- 13/ **Junge C. (1979)**. The importance of mineral dust as an atmospheric constituent, mobilization, transport and deposition dans Saharan Dust. Morales (Eds.). John, Wiley and Son, New York, pp.49-60.
- 14/ **Boutron C.F., Ducroz F.M., Gorlach U., Jaffrezo J.L., Davidson C.I. et Bolshov M.A. (1993)**. Variations in Heavy Metal Concentrations in Fresh Greenland Snow From January to August 1989. Atmospheric Environment, 27, 2773-2779.
- 15/ **Wrobel A., Rokita E. et Maenhaut W. (2000)**. Transport of traffic-related aerosols in urban areas. The Science of the Total Environment, 257, 199-211.
- 16/ **Pruppacher H.R. et Klett J.D. (1997)**. Microphysics of clouds and precipitation. Kluwer Academic Publishers, 976 p.
- 17/ **Heintzenberg J. (1998)**. Condensed water aerosols dans Atmospheric particles. (Eds.). Wiley Europe, pp.
- 18/ **Sternbeck J., Sjodin A. et Andreasson K. (2002)**. Metal emissions from road traffic and the influence of resuspension-results from two tunnel studies. Atmospheric Environment, 36, 4735-4744.
- 19/ **Levin Z. et Ganor E. (1996)**. The effect of desert particles on cloud and rain formation in the eastern Mediterranean dans The impact of Desert dust across the Mediterranean. R. (Eds.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 77-86.
- 20/ **Vukmirovic Z., Marendic Miljkovic J., Rajsic S., Tasic M. et Novakovic L.A. (1997)**. Resuspension of trace metals in Belgrade under conditions of drastically reduced emission levels. Water, air and soil pollution, 93, 137-156.

Références bibliographiques

- 21/ **Harrison S.J., Vale J.A. et Watts C.D. (1993).** The estimation of aerial inputs of metals to estuarine waters from point pattern data using an isoplething technique : Severn estuary, U.K. *Atmospheric Environment*, 27A, 2365 - 2373.
- 22/ **Galloway J.N., Thornton J.D., Norton S.A., Volchok H.L. et McLean R.A.N. (1982).** Trace metals in atmospheric deposition : a review and assessment. *Atmospheric Environment*, 16, 1677 - 1700.
- 23/ **Bidleman T.F. (1988).** Atmospheric processes. *Environmental Science and Technology*, 22, 361 - 367.
- 24/ **Golomb D., Ryan D., Underhill J., Wades T. et Zemba S. (1997).** Atmospheric deposition of toxics onto Massachusetts bay II. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. *Atmospheric Environment*, 31, 1361-1368.
- 25/ **Flament P. (1985).** Les métaux traces associés aux aérosols atmosphériques : apports au milieu marin du littoral Nord-Pas de Calais. Thèse de doctorat: Université des Sciences et Techniques de Lille, 189 p.
- 26/ **Chang M.B., Lin N.H., Lee H.M. et Lo Y.C. (1997).** Rainwater contamination and sources in Taoyuan county, Taiwan. *A32*, 1641 - 1653.
- 27/ **Löye-Pilot M.D. et Morelli J. (1988).** Fluctuations of ionic composition of precipitations collected in Corsica related to changes in the origins of incoming aerosols. 19, 577 - 585.
- 28/ **Leygonie R. (1993).** Les métaux lourds dans l'air: sources, émissions, mesure, effets. *Pollution Atmosphérique*, 63-74.
- 29/ **Galsomies L., Savanne D., Letrouit M.A., Ayrault S. et Chabre B. (1999).** Retombées atmosphérique de métaux en France : estimation par dosage dans les mousses - Campagne 1996. ADEME Edition, France,
- 30/ **Makri A, 2005.** Sécurisation des complexes pétroliers et gaziers, La voix de l'Oranie,
- 31/ **Atkins, D.H.F. et Quirino, I., 1992:** A Survey of Nitrogen Dioxide in Paris (Bruxelles, Commission des Communautés européennes).
- 32/ **Bartels, U. et Block, J., 1985,** dans *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* , vol. 148, pp. 689-693.
- 33/ **Beier, R., Gonzáles, P.L., Mc Innes, G., Mullye, E., Stevenson, K. et Zierrock, K.H., 1987:** A Study of Network Design and Measurement Methods in the Member States for the EC Air Quality Directive for Nitrogen Dioxide (Bruxelles, Commission des Communautés euro-péennes).
- 34/ **Bennett, D., 1991:** «Pesticide reduction, a case study from Canada», *New Solutions* (automne).
- 35/ **Both, R., Otterbeck, K. et Prinz, B., 1993:** «Die Geruchsimmissions-Richtlinie: Kommentar und Anwendung in der Praxis», *Staub-Reinhaltung der Luft* , vol. 53, pp. 407-412.
- 36/ **Brasser, L.J. et Mulder, W.C. (directeurs de publication), 1989:** Man and his Ecosystem: Proceedings of the 8th World Clean Air Congress (The Hague, 11-15 September 1989) (Amsterdam, Elsevier Science).
- 37/ **Buck, M., 1989:**«Konzept der Qualitäts kontrolle bei Immissions messungen», *Staub-Reinhaltung der Luft* , vol. 49, pp. 337-342.
- 38/ **Clement, R.E. et Koester, C.J., 1993,** dans *Analytical Chemistry* , vol. 65, pp. 85R-116R.
- 39/ **Elbers, G. et Lutz, S., 1993:** *VDI-Berichte*, rapport 1059, pp. 337-356 (Düsseldorf).
- 40/ **Ellermann, K., Borowiak, A. et Pfeffer, H.U., 1993:** LIMES-Jahresbericht , No. Series B (North-Rhine-Westphalia, State Environmental Office, Düsseldorf).
- 41/ **Fox, D.L., 1993:** «Air pollution», *Analytical Chemistry* , vol. 65, pp. 156R-170R.
- 42/ **Geiser, K., 1990:** «Toxics use reduction and pollution prevention», *New Solutions* (printemps).
- 43/ **Grant, W.B., Kagann, R.H. et McClenny, W.A., 1992,** dans *Journal of the Air and Waste Management Association*, vol. 42, pp. 18-30.
- 44/ **Grefen, K., 1991:**«Harmonisierung technischer Regeln im EG-Binnenmarkt.
- 45/ **Beitrag der Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN»,** *Staub-Reinhaltung der Luft* , vol. 51, pp. 199-205.

Références bibliographiques

- 46/ Cotta R.M., 1993**, Integral Transforms in Computational Heat and Fluid Flow, CRC Press, Boca Raton, Fl.
- 47/ Zanneti P. 1990**, Air pollution modeling theories, computational methods and available software, Computational Mechanics Publications, New York.
- 48/ Shamsijey M., 2004**, Simulation of Pollutant Emitted from Cement Factory Over the City of Shiraz, M.Sc. Thesis, Shiraz University, Shiraz, Iran.
- 49/ Silvester S.a., Iowndes i.s., Hargreaves D.m., 2009**, A computational study of particulate emissions from an open pit quarry under neutral atmospheric conditions, Atmospheric Environment, 1–10.
- 50/ Chauhya s.k., ahmad m., singh m.r.s., pal d., bandopadhyay l.k., bandopadhyay c., mondal g.c., 2002**, Validation of two air quality models for Indian mining condition, Environmental Monitoring and Assessment, 82 (1), 23–43.
- 51/ Chain R., 2006**, Influence des travaux de forage et de tir sur la stabilité des talus et des gradins des mines à ciel ouvert (cas: mine de fer de l'Ouenza), option; exploitation des mines, Thèse doctorat d'état, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 145 g.
- 52/ Holmes N.S., Morawska L., 2006**, A review of dispersion and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available, Atmospheric Environment, 40, 5902–5928.
- 53/ Holzbecher E., 2007**, Environmental Modeling using Matlab, R. Springer-Verlag, Heidelberg.
- 54/ Masters G.M., 1998**, Introduction to Environmental Engineering and Science, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- 55/ Reed R.W., 2005**, Significant dust dispersion models for mining operations, U.S. Dept. of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, Pittsburgh Research Laboratory.
- 56/ Osalu A.A., Kaynejad M.A., Fatehifar E., Elkamel A., 2009**, Developing a new air pollution dispersion model with chemical reactions based on multiple cell approach. In: Second International Conference on Environmental and Computer Science, IEEE Computer Society.
- 57/ Idres A., Abdelmalek C., Bouhedja A., Benselhoub A., Bounouala M., 2017**, Valorization of mining waste from Ouenza iron ore mine (eastern Algeria), REM – International Engineering Journal, 70(1), 85–92.46/ Klockow, D. et Fresenius, Z., 1987, dans *Analytical Chemistry*, vol. 326, pp. 5-24.
- 58/ Lahmann E., 1992**: Luftverunreinigung-Luftreinhaltung (Berlin, Verlag Paul rey). Determination and Evaluation of Ambient Air Quality-Manual of Ambient Air Quality Control in Germany (Berlin, Federal Minister for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety).
- 59/ McClenny, W., Pleil, J., Evans, G., Oliver, K., Holdren, M. et Weinbery, W., 1991**: «VDI-Richtlinie 3482 Bl. 3-6 Gaschromatographische Bestimmung organischer Verbindungen», Journal of the Air and Waste Management Association, vol. 41, pp. 1308-1318.
- 60/ Medrow, W., 1990**: Gerüche, Schriftenreihe der VDI-Kommission Reinhaltung Luft, vol.12 (Düsseldorf).
- 61/ Mohnen, V., Wilson, J. et Kadlecek J., 1982**, dans H.W. Georgii et W. Jaeschke (directeurs de publication): *Chemistry of the Unpolluted and Polluted Troposphere* (Boston, D. Reichel Publishing Co.).
- 62/ Petzold, A. et Niessner, R., 1993**: VDI-Berichte, rapport 1059 (Düsseldorf).
- 63/ Pfeffer, H.U. et Buck, M., 1988**: «Proceedings of the 11th Triennial World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO), Houston (Texas)», Acta Imeko, vol. 4, pp. 527-536.
- 64/ Pott, F., 1991**: VDI-Berichte, rapport 888 (Düsseldorf).
- 65/ Rabano, E.S., Castillo, N.T., Torre, K.J. et Solomon, P.A., 1989**: Journal of Air Pollution Control Association, vol. 39, pp. 76-80.
- 66/ Rossi M., Ellenbecker M. et Geiser K., 1991**: «Techniques in toxics use reduction: From concept to action», *New Solutions* (automne).

Références bibliographiques

- 67/ **Schrecker, T., 1993**: Sustainable Development: Getting There From Here. A Handbook for Union Environment Committees and Joint Labour-Management Environment Committees (Ottawa, CLC/NRTEE).
- 68/ **Schwela, D.H. et Köth-Jahr, I., 1994**: *Leitfaden für die Aufstellung von Luftreinhalteplänen*, Landesumweltamt des Landes Nordrhein-Westfalen (Düsseldorf).
- 69/ **Shelef, G. et Azov, Y., 1994**: *Monitoring of the Third-Line* (en hébreu) (Haifa, Technion Research Center for Environmental Engineering and Water Resources).
- 70/ **Slanina, J., Wyers, G.P. et Fresenius, J., 1994**, dans *Analytical Chemistry*, vol. 350, pp. 467-473.
- 71/ **Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 1993**: Verwaltungsvorschrift des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landesentwicklung zur Feststellung und .
- 72/ **Beurteilung von Geruchsimmissionen – Geruchsimmissions-Richtlinie vom.1995a**: VDI 4280, Blatt 1 (E): *Planung von Immissionsmessungen. Allgemeine Regeln*, 5^e édition (Düsseldorf).
- 73/ **Weber, K., Klein, V. et Diehl, W., 1990**: «Optische Fernmessverfahren zur Bestimmung gasförmiger Luftschadstoffe in der Troposphäre», dans *VDI Berichte* (Düsseldorf).
- 74/ **Wight, G., 1994**: *Fundamentals of Air Sampling* (Boca Raton, Floride, Lewis).
- 75/ **Pierre Masclat, 2005**. Pollution Atmosphérique. TECHNOSUP, ellipses Edition 5. Paris cedex.
- 76/ **Emilian Koller, 2009**. Traitement des pollutions industrielles. 2^e édition l'usine nouvelle Dunod Paris.
- 77/ **J.C Couillet, et al, 2002** : **Dispersion atmosphérique INERIS-DRA-25427**
- 78/ **Zaher Al Barakeh, 2012**. Thèse de doctorat Suivi de pollution atmosphérique par système multi-capteurs – méthode mixte de classification et de détermination d'un indice de pollution. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- 79/ **Hamed Y., Awad S., Sâad A.B., 2013**, Nitrate contamination in groundwater in the Sidi Aïch – Gafsa oases region, Southern Tunisia, *Environmental Earth Sciences*, 70(5), 2335–2348.
- 80/ **Hamed Y., Dhahri F., 2013**, Hydro-geochemical and isotopic composition of groundwater, with emphasis on sources of salinity, in the aquifer system in Northwestern Tunisia, *Journal of African Earth Sciences*, 83, 10–24.
- 81/ **Daly A., Zannetti P., 2007**, Air Pollution Modeling. An Overview. Chapter 2 of ambient air pollution (P. Zannetti, D. Al-Ajmi, S. Al-Rashied (Eds.)). Published by The Arab School for Science and Technology (ASST), <http://www.arabschool.org.sy>, and The EnviroComp Institute,
- 82/ **El-harbawi M., mustapha S. Rashid Z.A., 2009**, Air Pollution Modelling, Simulation and Computational Methods: A Review. Paper presented at the ICERT 2008: International Conference on Environmental Research and Technology, Penang, Malaysia.
- 83/ **Pasquill F., Smith F.B. 1983**, Atmospheric Diffusion, Wiley, New York.
- 84/ **Turner D.B., 1970**, Workbook of atmospheric dispersion estimates, EPA, Research Triangle Park, NC, USA.
- 85/ **Cassol M., Wortmann S., Rizza U., 2009**, Analytic Modeling of Two- Dimensional Transient Atmospheric Pollutant Dispersion by Double GITT and Laplace Transform Techniques, *Environmental Modeling and Software*, 24, 144–151.
- 86/ **Alemeida G.L., Pimentel L.C.G., Cotta R.M., 2008**, Integral Transform Solutions for Atmospheric Pollutant Dispersion, *Environmental Modeling and Assessment*, 12, 1353–1365.
- 87/ **Naveira C.P., Lachi M., Cotta R.M., Padet. J., 2007**, Integral transform solution of transient forced convection in external flow, *International Communication in Heat and Mass Transfer*, 23, 703–712.
- 88/ **Costa C.P., Vilhena M.T., Moreira D.M., Tirabassi T., 2006**, Semi-analytical solution Of the steady three-dimensional advection-diffusion equation in the planetary boundary

Références bibliographiques

- layer, Atmospheric Environment, 40, 5659–5669.
- 89/ **Cotta R., Mikhaylov M., 1997**, Heat Conduction Lumped Analysis, Integral Transforms Symbolic Computation, Wiley, Baffins Lane, Chicester, England. Impact of air pollution with dust in the Ouenza iron mine – NE Algeria 45
- 90/ **Cotta R.M., 1993**, Integral Transforms in Computational Heat and Fluid Flow, CRC Press, Boca Raton, FL.
- 91/ **Zanneti P. 1990**, Air pollution modeling theories, computational methods and available software, Computational Mechanics Publications, New York.
- 92/ **Shamsijey M., 2004**, Simulation of Pollutant Emitted from Cement Factory Over the City of Shiraz, M.Sc. Thesis, Shiraz University, Shiraz, Iran.
- 93/ **Silvester S.A., Lowndes I.S., Hargreaves D.M., 2009**, *A computational study of particulate emissions from an open pit quarry under neutral atmospheric conditions*,
- 94/ **Khelaifi A. 2007**, Estimation des sources de pollution atmosphérique par modélisation Inverse. Thèse de doctorat de l'université de Paris XII-CERTES- EA3481.
- 95/ **Desmercieres M. 2010**, Etude de dangers, *Sonatrach aval complexe gllk*, bureau veritas Ingénieur Risques Industriels.
- 96/ **Zhuang Su Qing, Luo Yan Ling 2008**. Algeria condensat project Skikda , Procedure Engineering , Manuel d'operation.
- 97/ **André Oudis et Denis Hémon , Octobre 1985**. Evaluation des risques et des actions de préventions en milieu professionnel (Analyse et prospective). INSERM, La documentation Française, Paris.
- 98/ **Matlab Simulink, 7.7.0 (2008Rb), license number161051, september 17, 2008**.
- 99/ **Jacques Fontan, Novembre 2004**. Les pollutions de l'air. Edition VEUIBERT. Paris cedex 13. Atmospheric Environment, 1–10.

Annexe A

Contexte théorique sur les stations de mesure de la pollution

Plusieurs paramètres et critères spécifiques sont attribués aux stations de mesure de la pollution par les Directives Européennes (Mathé, 2010). La classification des stations correspond aux problèmes de pollution atmosphérique rencontrés en fonction de la zone géographique où elles sont implantées. Elles peuvent appartenir à des zones urbaines ou des zones rurales, les zones urbaines sont les unités bâties et telles que la somme des populations des communes qui les composent soit supérieure à 2000 habitants, les zones rurales sont les communes qui ne font pas partie de la zone urbaine (ADEME, 2002). L'implantation répond elle-même à des critères de classification bien spécifiques. Ces critères dépendent du nombre d'habitants dans une zone urbaine, de la position de la station, du trafic automobile quotidien, du rapport entre les différents polluants rencontrés, et enfin de la hauteur du point de prélèvement (Mathé, 2010). On distingue 2 groupes de stations : les stations de fond et les stations de proximité (Mathé, et al. 2009). Les stations de fond réalisent un suivi de l'exposition moyenne des personnes et de l'environnement à des phénomènes de pollution atmosphérique, c'est le cas des stations dites « urbaines » et « périurbaines ». Les stations de proximité telles que les stations dites « industrielles » et « trafic », fournissent des informations sur les niveaux maximaux des concentrations des polluants mesurés dans leurs zones représentatives, ainsi que les niveaux d'exposition de la population située à proximité des sources. A chaque type de station, est dédiée une liste de polluants spécifiques. Dans la littérature nous pouvons citer quelques types de stations (Station urbaine- périurbaine- rurale- régionale- rurale nationale- industrielle - station d'observation spécifique ...etc.).

I. Contexte d'installation de station de mesure de la qualité de l'air

Il apparaît que même si les mesures des stations de mesure de la qualité de l'air sont fiables et précises, elles comportent quelques inconvénients majeurs:

- **Manque de mobilité** : les mesures sont toujours effectuées au même point géographique, ce qui rend les mesures dynamiques et/ou le maillage d'un site difficile, voire impossible (Johnsons, et al., 1973) (Hunter, et al., 1992).
- **Coût d'installation et de fonctionnement élevé** : au coût associé à l'achat des différents analyseurs spécifiques, il convient d'ajouter le coût associé à la maintenance, ainsi que le besoin de personnels qualifiés pour répondre aux questions de complexité et difficultés de mise en œuvre des appareils.

Lorsqu'une évaluation de la qualité de l'air est souhaitée sans que cette évaluation corresponde à une mesure réglementaire dans le cadre de la mesure de la qualité de l'air, des méthodes complémentaires, simples, mobiles, et peu coûteuses peuvent être envisagés quitte à perdre un peu de précision des mesures. Ces méthodes ne cherchent pas à remplacer les stations de mesures de la qualité de l'air, mais simplement à offrir des méthodes complémentaires plus simples pour répondre à des problématiques où la précision de mesures n'est pas un aspect prioritaire. Ainsi ces dernières années, le domaine des capteurs de gaz a connu un intérêt tout particulier dans le domaine de la qualité d'air.

II. Contexte d'application des capteurs de pollution

II.1. Les capteurs à gaz

Les méthodes normalisées de mesure de la pollution atmosphérique déjà citées nécessitent des instruments de mesure très sophistiqués et complexes, ce qui les rend généralement surdimensionnés dans des applications où la précision des mesures et la détermination sélective de toutes les espèces gazeuses présentes dans une atmosphère polluée n'est pas une priorité ; c'est le cas du suivi qualitatif de la qualité de l'air. Dans cette optique, les recherches relativement récentes en matière de métrologie de la qualité de l'air se sont intéressées à l'utilisation de capteurs de gaz basés sur des concepts physiques ou physicochimiques offrant des méthodes de mesure plus simples et une plus grande souplesse d'utilisation (Pijolat, 1997). Les progrès technologiques de la microélectronique et l'élaboration de nouveaux matériaux sensibles utilisés dans l'élaboration de ces capteurs de gaz (Lalauze, 1997) sont à l'origine des avancées majeures dans ce domaine. Ils sont généralement constitués d'un matériau dont l'une ou plusieurs de ses caractéristiques physiques sera sensible à la nature de l'environnement gazeux auquel il est soumis. Une modification de l'environnement sera alors généralement traduite en une variation de signal électrique aux bornes du matériau. Dans cette optique, ces capteurs doivent être capables de présenter une sensibilité, une fiabilité et une sélectivité acceptables selon les exigences des applications visées. Ces paramètres sont primordiaux dans des dispositifs contenant plusieurs capteurs de gaz comme les réseaux des capteurs de gaz et les nez électroniques. Dans cette partie, sont présentés les différents types des capteurs de gaz, en indiquant leurs avantages et inconvénients et en terminant sur leurs utilisations dans les réseaux de capteurs.

II.1.1. Les différents types de capteurs de gaz

Par définition, un capteur est un composant dont le fonctionnement est basé sur un phénomène physique, chimique ou biologique permettant de transformer une grandeur physico-chimique en un signal généralement électrique. Un capteur de gaz transforme la

concentration d'une espèce gazeuse dans un environnement gazeux en une variation de tension, de courant ou d'impédance électrique (Permuy, et al., 1994). Les capteurs de gaz chimiques, sont les capteurs les plus utilisés pour la reconnaissance des espèces gazeuses dans un environnement gazeux complexe. Ils sont constitués d'une couche sensible et d'un système de transduction (Permuy, et al., 1994).

a. Les capteurs à électrolyte solide

Les capteurs à électrolyte solide, encore appelés « conducteurs ioniques » (Menil, 2008) sont des capteurs chimiques qui se basent sur les transferts de charges électriques entre les espèces gazeuses dans l'air et les ions mobiles dans l'électrolyte solide séparé par une membrane conductrice assurant le transport des ions. Le transport de ces ions induit une différence de potentiel entre les deux électrodes plongées dans l'électrolyte. Cette différence de potentiel est fonction de la concentration des espèces gazeuses en contact avec les ions (Jaffrezic-Renault, et al., 1994). Capteurs capacitifs

L'absorption d'une substance chimique dans un matériau modifie ses propriétés diélectriques. Ce mécanisme a conduit à la réalisation des capteurs chimiques capacitifs dans les années 80, où la capacité du capteur change au contact des espèces à détecter (Menil, 2008). Ce type de capteurs est largement utilisé pour la mesure de l'humidité relative. La figure 21 montre la composition d'un capteur capacitif pour la mesure de l'humidité relative.

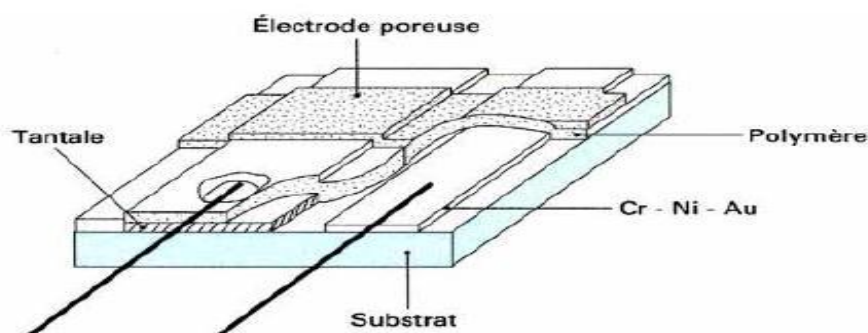


Figure 36 : Hygromètre capacitif à diélectrique polymère (Jaffrezic-Renault, et al., 1994)

b. Capteurs résistifs, capteurs à oxydes semi-conducteurs (SnO_2)

Ces capteurs sont caractérisés par une couche sensible à base d'un matériau semi-conducteur (souvent le dioxyde d'étain, SnO_2). Un matériau semi-conducteur possède une bande interdite suffisamment petite, par rapport à un isolant, pour que les électrons de la bande de valence puissent facilement rejoindre la bande de conduction.

c. Autres types de capteurs - capteurs physiques

Pour détecter un gaz, il existe également des capteurs dit « physiques » (Menil, 2008) tels que les capteurs à absorption optique, les capteurs à photo ionisation (PID) et les capteurs à conductivité thermique. Ces capteurs « physiques » possèdent une durée de vie supérieure à

celle des capteurs chimiques, mais en revanche ils présentent plusieurs inconvénients majeurs, rédhibitoires pour l'application visée dans le cadre de ce travail. Le principal inconvénient réside dans leur manque drastique de sensibilité, avec des limites de détection parfois supérieures à 1000 ppm. Par ailleurs, leurs conditions d'utilisation sont parfois délicates et ils sont souvent très peu sélectifs. Ces capteurs physiques ont donc été très vite écartés de notre choix pour la mise en place dans un réseau de caractérisation de la pollution atmosphérique, c'est pourquoi nous ne développons pas plus ici leur principe de fonctionnement.

II.2. Utilisation des capteurs dans la qualité de l'air

Comme chaque type de capteurs de gaz présente aussi bien des avantages que des inconvénients, il s'agira de trouver le meilleur compromis répondant aux contraintes imposées par le cadre du suivi de la qualité de l'air. Les capteurs parfaits doivent combiner facilité d'utilisation, bas coût, et temps de réponse rapide, tout en offrant une sensibilité et une sélectivité acceptables. Le tableau 14 répertorie les différents types de capteurs de gaz les plus utilisés, en rappelant brièvement leur principe de détection, leurs points forts et leurs faiblesses. Dans le cadre du suivi de la pollution de l'air et de la construction d'un système portable à base de réseaux de capteurs, nous cherchons des capteurs ayant une bonne sensibilité avec un temps de réponse rapide, miniatures et faciles à utiliser et à implémenter dans des systèmes multi-capteurs, et de faibles coût et consommation électrique. Une lecture approfondie de ce tableau montre que les capteurs de gaz à semi-conducteurs (s-c) combinent l'ensemble des performances ciblées, et présentent surtout les limites de détection les plus basses. Par conséquent, ils constituent le meilleur choix pour une utilisation dans un système multi-capteurs pour le suivi de la pollution atmosphérique.

Tableau 28: Classification de quelques types de capteurs de gaz selon leur principe de détection.

Type de Capteur	Grandeur mesurée	Avantages	Inconvénients	Limite de détection
Electrolyte solide	Tension ou courant	<ul style="list-style-type: none"> - Miniaturisation - Résistance aux chocs thermiques et pression - Variation linéaire du signal - Temps de réponse faible 	<ul style="list-style-type: none"> - Etalonnage nécessaire - Complexité d'utilisation - Durée de vie limitée (2 ans) - coût élevé (~100€) 	10-20 ppm
Capacitif	Capacité	<ul style="list-style-type: none"> - Simplicité d'implémentation - Faible coût (<10€) - Faible consommation électrique - Miniaturisation - Temps de réponse rapide - Longue durée de vie 	<ul style="list-style-type: none"> - Système de mesure complexe - Forte interférence avec l'eau - Manque de sélectivité 	~10 ppb
Résistif – semi-conducteur	Résistance ; Conductance	<ul style="list-style-type: none"> - Miniature - Faible coût (< 20€) - Faible consommation électrique - Facilité d'utilisation - Grande sensibilité - Temps de réponse faible - Large gamme de gaz détectables 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible sélectivité - Durée de vie limitée (~2 ans) - Dépendance à la température - Problèmes de dérive 	10 ppb à 1 ppm
PID	Charge électrique	<ul style="list-style-type: none"> - Longue durée de vie 	<ul style="list-style-type: none"> - Manque de sensibilité et de sélectivité - Difficulté d'utilisation - Dimensions - Gamme de gaz détectables limitée - coût élevé (>100€) 	~100 ppm
Optique	Pic d'absorption	<ul style="list-style-type: none"> - Longue durée de vie - Miniaturisation 	<ul style="list-style-type: none"> - Difficulté d'utilisation - Coût élevé - Gamme de gaz détectables limitée 	~100 ppm
Conductimétriques	Conductivité thermique	<ul style="list-style-type: none"> - Longue durée de vie 	<ul style="list-style-type: none"> - Difficulté de miniaturisation et d'utilisation - Difficulté d'utilisation, - Non sélectivité. - Coût élevé (>100€) 	

II.3. Caractéristiques métrologiques d'un capteur de gaz à s-c

Comme nous avons décidé de travailler avec des capteurs de gaz à s-c, il est important de rappeler les caractéristiques principales de ces composants. Les 3 paramètres les plus importants constituent ce qui est couramment appelé les « 3S » (Pijolat, 1997) : sensibilité, sélectivité et stabilité.

- **Sensibilité :**

Par définition, il s'agit du rapport entre la variation élémentaire de la grandeur de sortie fournie par le capteur et la variation élémentaire de la grandeur à mesurer. Pour un capteur de gaz de type semi-conducteur, la sensibilité sera donc la variation de la conductance de sa partie sensible par rapport à la variation de la concentration de l'espèce gazeuse à laquelle il sera dédié. La sensibilité est exprimée en Siemens (ou Ohm⁻¹) par ppm comme montré sur la figure 21 (Kamionka, 2005). Si la réponse du capteur est linéaire, la sensibilité sera alors constante ce qui est rarement le cas pour les capteurs de gaz (Kamionka, 2005). Elle sera donc définie pour une concentration donnée.

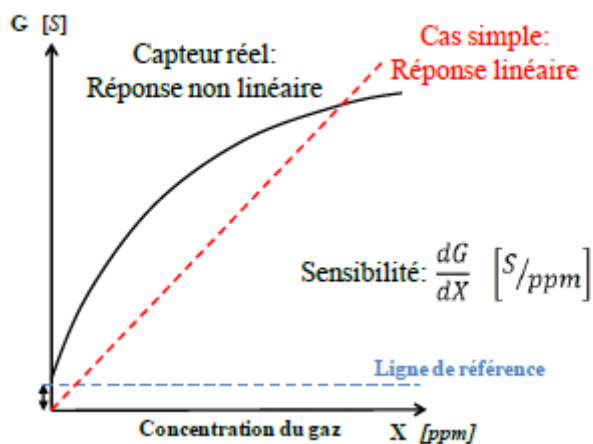


Figure 37 : réponse non linéaire d'un capteur à semi-conducteur

- **Sélectivité**

C'est l'une des caractéristiques les plus importantes des capteurs de gaz. Par définition, la sélectivité est l'aptitude d'un dispositif à détecter quantitativement la présence d'un gaz indépendamment des variations de concentrations des autres gaz susceptibles d'interférer. On parle d'une sélectivité absolue lorsqu'un capteur ne répond qu'à une seule espèce gazeuse, et que sa réponse n'est pas affectée par la présence d'une autre espèce. La sélectivité est dite relative si on dispose d'un capteur qui répond à différentes espèces susceptibles d'être présentes dans son environnement gazeux. Les capteurs de gaz à semi-conducteurs sont généralement peu sélectifs, ce qui est une des grandes limitations de l'utilisation de ces capteurs (Pijolat, 1997). Cependant, en utilisant plusieurs capteurs mesurant le même environnement, et en exploitant l'ensemble de leurs signaux par des méthodes mathématiques adaptées, il est possible d'extraire de cette sélectivité partielle, des informations pertinentes.

L'utilisation de plusieurs capteurs de gaz pour la détection des espèces gazeuses de l'air est considérée comme l'approche « multi-capteurs ». De la même façon, l'utilisation des

méthodes mathématiques pour le traitement des signaux des capteurs est considérée comme l'approche « multi-variables » (Kamionka, 2005).

- **Stabilité**

C'est un paramètre qui caractérise la dérive du signal des capteurs au cours d'une plus ou moins longue durée d'utilisation même si les conditions de mesures sont constantes. Ces dérives peuvent être corrigées dans certains cas en effectuant périodiquement un calibrage « de zéro » (Tsujita, et al., 2005), c'est à dire une mesure dans une atmosphère de référence (généralement sous un air de composition contrôlée, appelé « air zéro »). Mais cette démarche possède deux inconvénients. D'une part il est nécessaire de disposer d'une atmosphère de référence, par exemple une bouteille de gaz étalon, ou un dispositif de « purification » de l'air.

D'autre part, on suppose alors que seule la grandeur de référence $X(0)$ dérive, or souvent, c'est la sensibilité elle-même qui varie également. D'autres méthodes cherchent à modéliser cette dérive (Romain, et al., 2010) (Tomic, et al., 2002), mais elles nécessitent de grosses ressources de calcul, et leur implémentation à un système temps réel s'ajoute à la complexité de l'outil de mesure (De Vito, et al., 2009). Les capteurs de gaz à semi conducteurs sont particulièrement concernés par cette faiblesse (Menil, 2008) (Kamionka, 2005) (Korotcenkov, et al., 2011). La facilité d'utilisation de ces capteurs avec leur faible coût rend ces capteurs assez populaires. Leur implémentation ainsi que leur utilisation dans différents systèmes de mesure des gaz est facile ce qui permet aussi la multiplication de ce type de capteurs dans un même système et permet donc l'obtention de la « signature » ou « empreinte » d'échantillons gazeux complexes, sans pouvoir en préciser la composition exacte (Menil, 2008). On parle alors de réseau de capteurs de gaz.

II.4 Réseau des capteurs de gaz - Nez électroniques

Des auteurs ont proposé de combiner l'utilisation de plusieurs capteurs pour la détection d'environnements gazeux complexes. Le premier essai expérimental utilisant plusieurs capteurs a été publié par Hartman et al en 1954 et 1964 en se basant sur plusieurs capteurs de type ampérométrique (Hartman, 1954) (Wilken, et al., 1964) (Gardner, et al., 1999). Un système multi-capteur combinant 8 de ces différentes cellules électrochimiques a été développé. Les réponses observées pour différents échantillons d'odeurs donnent différentes formes encore appelées « signatures ». Dans le laboratoire MICC à l'Ecole des Mines de Saint Etienne, l'utilisation des capteurs pour la détection des espèces gazeuses a débuté avec C.Pijolat durant sa thèse (Pijolat, 1986). Il a pu détecter la présence conjointe de benzène et d'éthanol en utilisant deux capteurs identiques à base de SnO₂ chauffés à des températures différentes. Ces essais ont ensuite été poursuivis par des études sur le

développement des capteurs de gaz (Breuil, 1989) (Bruno, 1994) (Sauvan, 1999) (Montméat, 2002) (Rivière, 2004) (Perdreau, 2000) (Kamionka, 2005).

Les systèmes multi-capteurs de gaz ont été créés dans le but de détecter différentes espèces gazeuses spécifiques dans une atmosphère gazeuse artificielle (Gardner, et al., 1992) (Shurmer, et al., 1993) ou pour le suivi d'une pollution atmosphérique (Tsujita, et al., 2005). L'appellation de systèmes multi capteurs de gaz varie entre « réseaux de capteurs de gaz » et « nez électroniques » selon l'application ciblée. Les nez électroniques sont dédiés à la reconnaissance des odeurs, tandis que les réseaux de capteurs sont dédiés à la reconnaissance des espèces gazeuses au sens large, sans connotation olfactive. Il s'agit donc d'un système de capteurs à application spécifique (ASSS14) (Menil, 2008) composé de plusieurs capteurs chimiques possédant une sélectivité partielle, dite aussi relative. Insistons ici sur le fait que l'appellation « réseau de capteur » (différents capteurs implémentés dans un même ensemble) couramment utilisée, notamment dans ce manuscrit, peut prêter à confusion car il n'y a pas de répartition géographique des capteurs.

II.4.1. Approches de mesures quantitatives ou qualitatives

Si l'on dispose de plusieurs capteurs qui répondent à tous les gaz susceptibles d'être présents dans un environnement gazeux, avec des proportions différentes, un système de reconnaissance de formes peut alors être apte à discriminer plusieurs espèces ou groupe d'espèces gazeuses dans ce mélange. Ces systèmes peuvent donc être utilisés pour effectuer des mesures quantitatives dans des applications simples (Negri, et al., 2001), par contre pour des applications complexes comportant un grand nombre de gaz, ces systèmes seront limités à des mesures qualitatives ou semi-quantitatives (Helli, et al., 2004). On distingue trois grands types d'applications suivant la finalité qualitative et/ou quantitative de l'analyse (Menil, 2008):

- **Sécurité et santé** : contrôle de qualité d'air intérieur, pollution, détection de gaz explosifs, toxiques ou dangereux. Dans ce cas on cherche à acquérir des informations les plus précises possibles. Il s'agit donc d'une approche quantitative (Tsujita, et al., 2005) (Zampolli, et al., 2004) (De Vito, et al., 2009) (Kamionak, et al., 2006).
- **Caractérisation d'une odeur ou d'un arôme et toutes les recherches agroalimentaires**. Dans ce cas, on s'intéresse à la présence ou non d'une espèce ou d'un groupe d'espèces sans avoir besoin de connaître leurs concentrations. Il s'agit d'une approche purement qualitative (cas des nez électroniques) (Mielle, et al., 2001) (Capone, et al., 2000) (Ampuero, et al., 2003) (Cevoli, et al., 2011) (Lozano, et al., 2008) (Garcia, et al., 2006).

- **Applications hybrides**, pour lesquelles une évaluation des odeurs et plus largement d'espèces gazeuses sans quantification exacte est recherchée : usines, sites industriels, sites de compostages, bassins de décantation, épandages, eaux d'égout... (Nake, et al., 2005) (Romain, et al., 2005) (Romain, et al., 2000) (Bitter, et al., 2010). C'est le cas d'un nez électronique et il s'agit généralement d'une approche semi-quantitative (Haddi, et al., 2011).

II.4.2. Architecture d'un système multi-capteur

En général, les capteurs utilisés dans ces systèmes sont des capteurs à semi-conducteurs, soit d'origine commerciale (Negri, et al., 2001), soit réalisés par leurs concepteurs pour une application spécifique (Kamionka, 2005) (Althainz, et al., 1996) (Yamazoe, et al., 2009) (Sarry, et al., 1999). Ces systèmes sont exploités à l'aide de méthodes de reconnaissance de formes et d'analyse numérique (Chaiboun, et al., 2007). En utilisant un groupe de capteurs, dont la réponse individuelle est différente en fonction de la nature des gaz susceptibles d'être présents, on constitue une empreinte qui peut être unique et spécifique à chaque mélange gazeux, sous réserve d'appliquer un traitement des signaux adéquat. La recherche de cette empreinte est l'approche multi-variable. Cet aspect est fortement exploité dans toutes les études sur les réseaux des capteurs et nez électronique (Tsujiata, et al., 2005) (Thery-Merland, et al., 2006) (Getino, et al., 1999). La figure 1-19 présente, l'architecture de base d'un système multi-capteurs associée à un traitement de signal. Les signaux de plusieurs capteurs de gaz exposés ensemble au même environnement gazeux sont exploités afin d'obtenir une information adéquate sur les espèces gazeuses présentes.

L'utilisation d'une approche multi-variable est une nécessité dans un réseau de capteurs non sélectifs (Shaffer, et al., 1999) (Sommer, et al., 1995). Les méthodes principalement utilisées comme les méthodes de reconnaissance de formes (Fu, et al., 2007) ont comme objectif de trouver une corrélation entre les signaux de sortie de ces capteurs et la composition chimique de leur environnement gazeux (Brudzewski, et al., 2007). Elles peuvent être divisées en deux groupes : les méthodes supervisées et les méthodes non supervisées. La technique supervisée consiste à repérer les espèces gazeuses par comparaison aux espèces connues pendant l'étalonnage du système. Dans ce cas, une démarche d'étalonnage des capteurs sous différentes espèces gazeuses à mesurer sera nécessaire. Plus ces espèces sont nombreuses plus la démarche d'étalonnage sera longue et complexe. Cet étalonnage permettra de construire un modèle de comportement qui sera utilisé par un algorithme mathématique désigné. Ceci est décrit dans la partie désignée par « modèle d'apprentissage » présentée dans cette architecture sur la figure 16. Par contre, l'objectif de la technique non supervisée est de

détecter et de discriminer les espèces inconnues en amplifiant les différences entre leurs vecteurs d'entrées associés (Gardner, et al., 1999).

II.5. Analyse multi-variable

L'analyse multi-variable est un outil mathématique utilisé en l'instrumentation dès les années 70 (World, 1995), en l'analyse chimique, pour interpréter les résultats des méthodes spectroscopiques et est souvent appelée pour cela « chimiométrie » (Breuil, 1997) (Otto, 2007). Aujourd'hui son utilisation touche presque tous les domaines scientifiques où la modélisation d'un nombre croissant de variables exige l'utilisation d'outils mathématiques adéquats. L'analyse multi-variable consiste à trouver des corrélations entre différentes données, ce qui est particulièrement adapté à la reconnaissance de signatures de la pollution atmosphérique issues des données fournies par les réseaux de capteurs.

III.5.1 Principes de modélisation multi-variables

La modélisation multi-variable consiste à modéliser les variations d'un certain nombre de variables dites difficilement mesurables appelées variables Y en fonctions d'autres variables dites facilement mesurables appelées variables X. Une modélisation mathématique suffisamment élaborée peut en théorie modéliser n'importe quel système réel complexe à partir de données expérimentales (Munz, et al., 2009). Cependant, plus une méthode de modélisation est complexe, plus elle coûtera cher en terme de poids de calcul, et surtout moins elle aura de chances d'être extrapolable à d'autres données. De plus, la rapidité et la linéarité de la modélisation dépendent du type de méthodes choisis. En général, toutes les méthodes de modélisation possèdent des principes communs (Breuil, 1997). Par exemple, la recherche par approches algébriques ou itératives d'un modèle mathématique cherche à établir la fonction vectorielle $Y=f(X)$ reproduisant au mieux des variables Y (sorties), par exemple des concentrations gazeuses, à partir de variables X (entrées), par exemple des signaux de capteurs.