

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE**  
**LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE**  
**FACULTE DES SCIENCES EXACTES**  
**DEPARTEMENT DE CHIMIE**

**SOUTENANCE DE MEMOIRE**

**PRESENTE EN VU DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE**  
**MAGISTER EN CHIMIE**

**MESURE DE LA POLLUTION PARTICULAIRE ET**  
**METALLIQUE DANS L'AIR AU NIVEAU DE TROIS**  
**SITES URBAINS DE LA VILLE DE CONSTANTINE**

**Option : Chimie Analytique, Physique et Environnement**

**PAR**

**M<sup>elle</sup> SERAGHNI Nassira**

**Devant le Jury :**

<b>Président :</b>	<b>C. MOUATS</b>	<b>Prof</b>	<b>Université de Constantine</b>
<b>Rapporteur :</b>	<b>H. ALI-KHODJA</b>	<b>Prof</b>	<b>Université de Constantine</b>
<b>Examineur :</b>	<b>A.F DERRADJI.</b>	<b>M.C</b>	<b>Université de Constantine</b>
<b>Examineur :</b>	<b>A. HAOUAM</b>	<b>Prof</b>	<b>Université de Constantine</b>

**La soutenance aura lieu Mardi le 17 Avril 2007 à 9h 30 au centre audio-  
visuel du Campus de Chaabat Ersas**

**Toute personne intéressée est cordialement invitée**

## *Dédicaces*

*Je dédie cette humble oeuvre qui est le fruit de mes longues nuits de travail.*

*A mes chers parents, les meilleurs au monde ; qui m'ont toujours apportés affection, soutint et encouragement et qui ont rempli ma vie d'amour et de bonheur.*

*A mes frères et mes soeurs.*

*A mes belles sœurs et beaux frères.*

*A mes neveux.*

*A toute ma famille ; SERAGHNI et CHIDEKHE*

*A Tous ceux que j'aime.*

# REMERCIEMENTS

Le travail qui a fait l'objet de ce mémoire a été réalisé au sein du Laboratoire Pollution et Traitement des Eaux LPTE de l'Université Mentouri de Constantine.

Que Monsieur H. Ali khodja, Professeur à l'Université de Constantine et directeur de mon mémoire accepte l'expression de ma respectueuse reconnaissance d'avoir accepté de diriger ce travail, qu'il soit assuré de mon entière gratitude pour son aide précieuse et sa disponibilité et qu'il trouve ici mon estime pour sa grande personne ainsi que mon profond respect.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Monsieur C. MOUATS, Professeur à l'Université de Constantine pour l'honneur qu'il me fait de présider le jury de ce mémoire.

Je tiens à témoigner ici ma respectueuse reconnaissance à Monsieur A.F DERRADJI Maître de Conférences à l'Université de Constantine, pour avoir bien voulu examiner ce travail, et pour la gentillesse et l'aide qu'il m'a toujours prodiguées.

Je remercie également Monsieur A. HAOUAM, Professeur à l'Université de Constantine pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail et d'avoir accepté de juger ce mémoire.

Merci du fond du cœur aux membres du Labo 14 (les ingénieurs en Ecologie option Pathologie des Ecosystèmes, 2006), ainsi que mes amies S. Belaidi, R. Tafer, N. Bouziane, S. Aliouche, D. belkharoucha, pour leur aide, leur amitié, leur gentillesse et leur soutien moral.

## **SOMMAIRE**

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I. LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE ET LE TRAFIC ROUTIER.....	3
I. DÉFINITION DES POLLUANTS .....	3
I.1. Polluants primaires.....	3
I.1.1. Composés carbonés.....	4
I.1.1.1. Anhydride carbonique CO <sub>2</sub> .....	4
I.1.1.2. Monoxyde de carbone CO .....	4
I.1.2. Composés azotés.....	5
I.1.2.1. Monoxyde et dioxyde d'azote.....	5
I.1.2.2. Le protoxyde d'azote (N <sub>2</sub> O).....	5
I.1.3. Composés organiques.....	6
I.1.3.1. Composés organiques volatils (COV).....	6
I.1.3.2. Composés organiques émis par le trafic routier.....	6
I.1.3.3. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).....	7
I.1.3.5. Polychlorobiphényles (PCB).....	9
I.1.3.6. Les Chloro-fluoro-carbones (CFC).....	9
I.1.3.7. 1,3-butadiène (hydrocarbure).....	9
I.1.4. Les composés soufrés.....	9
I.1.4.1. Le dioxyde de soufre.....	9
I.1.5. Les particules.....	10
I.1.5.1. Particules diesel.....	10
I.1.5.2. Particules minérales.....	11
I.1.5.3. Composés métalliques.....	11
I.2. Présence à l'état naturel des polluants liés à l'automobile.....	14
I.3. Effet de quelques polluant issues du trafic routier .....	15
I.3.1. Effet du CO .....	15
I.3.2. Effets des oxydes d'azote.....	16
I.3.3. Effet des composés soufrés .....	16
I.3.4. Effets de l'ozone et des oxydants .....	16
CHAPITRE II. LA POLLUTION PAR LES PARTICULES.....	18
II.1. Définition.....	18
II.2.2. Composition chimique des particules .....	21

II.2.3. Forme et surface spécifique des particules .....	21
II.2.4. Durée de la vie des aérosols dans l'atmosphère.....	21
II.2.5.2. Agglomération des particules atmosphériques .....	24
II.2.6. Les mécanismes d'élimination des particules.....	25
II.3. Origine des particules en milieu urbain .....	27
II.3.1. Sources naturelles .....	27
II.3.2. Sources anthropiques .....	28
II.4. Effets des poussières.....	28
II.4.1. Effets sur la santé.....	28
II.4.2. Effet sur les animaux .....	30
CHAPITRE III. LA POLLUTION MÉTALLIQUES.....	31
III.1. Généralités.....	31
III.2. Propriétés physico- chimiques des métaux lourds.....	32
III.3. Effet des métaux lourds dans les poussières en suspension et les retombées de poussières.....	33
III.3.1. Plomb.....	33
III.3.2. Cuivre .....	34
III.3.3. Cadmium .....	35
III.3.4. Zinc.....	36
III.3.5. Les autres métaux : manganèse, nickel, métaux précieux .....	37
III.4. Propriétés physico- chimiques des métaux alcalins et alcalinoterreux.....	37
III.5. Effet des métaux alcalins et alcalinoterreux .....	39
III.5.1. Sodium.....	39
III.5.2. Baryum .....	40
III.5.3. Potassium.....	41
III.5.4. Calcium.....	41
III.5.5. Lithium .....	42
CHAPITRE IV. DESCRIPTION DU MILIEU URBAIN A CONSTANTINE .....	43
IV.1. Présentation de la ville .....	43
IV.2. Constantine et la pollution urbaine.....	43
IV.2.1. Les rejets domestiques et les décharges .....	43
IV.2.2. Les industries.....	44
IV.2.3. La destruction des espaces verts.....	47
IV.2.4. La circulation automobile.....	47

CHAPITRE V. MATÉRIEL ET METHODES.....	50
V.1. Collecteur à grand volume.....	50
V.1.1. Appareillage.....	50
V.1.2. Emplacement .....	50
V.1.3. Durée de prélèvement.....	50
V.1.4. Calibrage de l'appareil.....	50
V.1.5. Analyse du filtre .....	50
V.2. Les collecteurs de précipitations.....	51
V.2.1. Principe.....	51
V.2.2. Appareillage.....	51
V.2.3. Emplacement .....	51
V.2.4. Durée de prélèvement.....	53
V.2.5. Transport des échantillons .....	53
V.2.6. Traitement des échantillons .....	53
V.2.6.1. Traitement de la fraction soluble .....	53
V.2.6.2. Traitement de la fraction insoluble.....	53
V.2.6.3. Analyses.....	54
CHAPITRE VI. RESULTATS ET DISCUSSION .....	55
VI.1. Logiciels Rammet view et WRPLOT view.....	55
VI.1.1. Traitement des données métrologiques .....	55
VI.1.2. Période d'échantillonnages.....	55
VI.2. Synthèse des résultats.....	77
VI.3. Les particules totales en suspension (PTS) .....	78
VI.3.1. L'évolution des concentrations métalliques dans l'air ambiant.....	81
VI.3.1.1. Concentrations des métaux en traces.....	81
VI.3.1.1.1. Le plomb .....	81
VI.3.1.1.2. Le cadmium.....	82
VI.3.1.1.3. Le cuivre.....	83
VI.3.1.2. Concentrations des métaux alcalins et alcalinoterreux dans l'air ambiant .....	84
VI.3.1.2.1. Le calcium .....	84
VI.3.1.2.2. Le baryum .....	85
VI.3.1.2.3. Le sodium .....	86
VI.3.1.2.4. Le potassium .....	87

VI.3.2. Résumé des corrélations.....	88
VI.4. Flux des retombées atmosphérique totales.....	89
VI.4.1. Influence des paramètres météorologiques.....	90
VI.4.1.1. Effet des précipitations et des vitesses et directions du vent.....	90
VI.4.1.2. Effet de la température.....	92
VI.4.1.3. Effet des bâtiments.....	92
VI.4.2. Les retombées métalliques.....	92
VI.4.2.1. Les métaux lourds.....	94
VI.4.2.1.1. Les retombées de cuivre.....	94
VI.4.2.1.2. Les retombées de cadmium.....	96
VI.4.2.1.3. Les retombées de plomb.....	99
VI.4.2.2. Les métaux alcalins et alcalinoterreux.....	103
VI.4.2.2.1. Les retombées de potassium.....	103
VI.4.2.2.2. Les retombées de calcium.....	105
VI.4.2.2.3. Les retombées de baryum.....	108
VI.4.2.2.4. Les retombées de sodium.....	110
VI.4. Variation du pH et de la conductivité des solutions.....	113
VI.5. Identification des sources de pollution particulaire et métallique.....	116
VI.5.1 Résumé des corrélations.....	116
VI.5.2. Contribution de la direction du vent aux retombées atmosphériques totales.....	117
VI.6. Simulation de l'impact sanitaire.....	122
VI.6.1. Paramètres d'entrée du logiciel.....	122
VI.6.2. Résultats de la modélisation.....	122
VI.7. Modélisation de la dispersion des polluants.....	126
VI.7.1. Introduction.....	126
VI.7.2. Paramètres de la modélisation.....	126
VI.7.2.1. Météorologie.....	126
VI.7.2.2. Vitesse et direction du vent.....	126
VI.7.2.3. Température.....	127
VI.7.2.6. Précipitations.....	127
VI.7.3. Présentation du logiciel.....	128
VI.7.4. Géographie urbaine de la zone d'étude.....	128
VI.7.5. Caractéristiques de l'avenue Belouizdad.....	129

VI.7.6. Paramètres d'entrée du logiciel .....	129
VI.7.6.1. Trafic automobile .....	130
VI.7.6.2. Facteur d'émission .....	130
VI.7.6.3. Concentrations de fond.....	132
VI.7.6.4. Paramètres topographiques .....	132
VI.7.7. Résultats de la modélisation.....	132
VI.7.7.1. Simulation des concentrations de poussières en suspension dans l'air .....	133
VI.7.6.2. Simulation des concentrations de monoxyde de carbone.....	133
CONCLUSION GENERALE .....	139



## **LISTE DES ABREVIATIONS**

N	Normalité
V	Volume
[C]	Concentration
COV	Composés organique volatils
NO <sub>x</sub>	Oxydes d'azote
NO <sub>2</sub>	Dioxyde d'azote
NO <sub>3</sub>	Trioxyde d'azote
CO	Monoxyde de carbone
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
SO <sub>x</sub>	Oxydes de soufre
SO <sub>2</sub>	Dioxyde de soufre
O <sub>3</sub>	Ozone
HCl	Acide chlorhydrique
HNO <sub>3</sub>	Acide nitrique
HAP	Hydrocarbure aromatique polycyclique
BaP	Benzo(a) pyrène
HAM	Hydrocarbures aromatiques monocycliques
PCB	Polychlorobiphényles
DDT	Dichlorodiphényl-trichloréthane
CFC	Chloro-fluoro-carbones
MMT	Methyl cyclopentadienyl manganèse tricarbonyl
Cd	Cadmium
Cr	Chrome
Cu	Cuivre
Pb	Plomb
Mn	Manganese
Co	Cobalt
Fe	Fer
Ca	Calcium
Ba	Baryum
Na	Sodium
K	Potassium

Li	Lithium
PTS	Particules totales en suspension
PM	Particulate matter
PM <sub>10</sub>	Particulate matter (<10 µm)
PM <sub>2,5</sub>	Particulate matter (<2,5 µm)
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
DDS	Direction De la Santé
CHUC	Centre Hospitalo-Universitaire de Constantine
APC	Daksi Abdeslem
AFNO R	Association Française de la Normalisation
MCE	Mixed cellulose ester
VFC	Volume Flow Controlled
ΔH <sub>2</sub> O	perte de charge à travers l'orifice de calibrage, in. H <sub>2</sub> O
Max	Maximum
Min	Minimum
Moy	Moyenne
X	Longitude
Y	Latitude
H	Hauteur
%	Pourcentage
r	Coefficient de corrélation
°C	Température en degrés Celsius
N	Nord
S	Sud
E	Est
W	Ouest
ppm	partie par million
Mt/an	mégatonne par une année
L	Litre
ml	Millilitre
m	Mètre
Km	Kilomètre
mm	Millimètre
µm	Micromètre

$m^2$	Mètre carré
$m^3$	Mètre cube
$\mu g$	Microgramme
$mg/m^3$	milligramme par mètre cube
$\mu g/m^3$	Microgramme par mètre cube
$\mu g/m^2.j$	Microgramme par mètre carré par jour
$ng/m^3$	Nanogramme par mètre cube
g	Gramme
SAA	Spectromètre a absorption atomique
mm/h	Millimètre par heure
Mbar	Millibar
g/km.v	Gramme par kilomètre par véhicule
$\mu g/l$	Microgramme par litre
ha	Hectare
mmHg	Millimètre de mercure

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau I.1.	Liste des 16 hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).....	8
Tableau I.2.	Proportion et classement des divers polluants automobiles .....	13
Tableau I.3.	Présence à l'état naturel des divers polluants .....	14
Tableau I.4.	Les valeurs guides proposées par l'OMS .....	15
Tableau II.1.	Surface spécifique de quelques particules.....	21
Tableau II.2.	Vitesses de chute finales pour différents diamètres de particules .....	23
Tableau III.1.	Propriétés physico-chimiques des métaux lourds.....	32
Tableau III.2.	Propriétés physico-chimiques des métaux alcalins .....	38
Tableau IV.1.	Flux moyens des retombées totales (mg/m <sup>2</sup> j) et des métaux lourds (µg/m <sup>2</sup> j) par poste durant toute la période d'échantillonnage (6/8/2002- 21/5/2003).....	46
Tableau IV.2.	Mode d'exploitation et âge du parc taxi .....	48
Tableau VI.1.	Concentrations moyennes des particules totales en suspension et des métaux lourds et alcalins au niveau de la Direction de la Santé (DDS)....	77
Tableau VI.2.	Flux des retombées au sol des poussières et des métaux au niveau des trois sites pour toute la période d'étude.....	78
Tableau VI.3.	Les paramètres météorologiques enregistrés durant la période d'étude .....	80
Tableau VI.4.	Les concentrations moyennes des différents métaux lourds dans l'air ambient.....	84
Tableau VI.5.	Les concentrations moyennes des métaux alcalins dans l'air ambient .....	88
Tableau VI.6.	Corrélations entre les poussières, métaux lourds, métaux alcalins et les différents facteurs météorologiques au niveau de DDS .....	88
Tableau VI.7.	Valeurs moyenne des retombées atmosphériques totales au niveau des trois sites durant la période d'échantillonnage totale (du 21/10/2004 au 21/06/2006).....	89
Tableau VI.8.	Paramètres météorologiques caractérisant les différentes périodes de prélèvement.....	90
Tableau VI.9.	Paramètres météorologiques caractérisant les différentes périodes de prélèvement .....	91
Tableau VI.10.	Valeurs moyenne des flux des retombées totales de cuivre au niveau des trois sites durant la période d'échantillonnage totale .....	94
Tableau VI.11.	Flux moyens des retombées totales de cadmium au niveau des trois sites	

durant la période d'échantillonnage totale .....	97
Tableau VI.12. Valeurs moyennes des retombées totales de plomb au niveau des trois sites durant la période d'échantillonnage totale .....	100
Tableau VI.13. Valeurs moyennes des retombées totales de potassium au niveau des trois sites durant la période d'échantillonnage totale .....	103
Tableau VI.14. Valeurs moyennes des retombées totales de calcium au niveau des trois sites durant la période d'échantillonnage totale (mg/m <sup>2</sup> j).....	106
Tableau VI.15. Valeurs moyennes des retombées totales de baryum au niveau des trois sites durant la période d'échantillonnage totale (mg/m <sup>2</sup> j) .....	108
Tableau VI.16. Valeurs moyennes des retombées totales de sodium au niveau des trois sites durant la période d'échantillonnage totale (mg/m <sup>2</sup> j).....	111
Tableau VI.17. Valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique pour les trois sites.....	113
Tableau VI.18. Corrélations entre le pH, la conductivité et les différents métaux alcalins aux niveaux des trois sites.....	114
Tableau VI.19. Corrélations entre les poussières, les métaux lourds, les métaux alcalins et les différents facteurs météorologiques au niveau de la DDS.....	116
Tableau VI.20. Corrélations entre les poussières, les métaux lourds, les métaux alcalins et les différents facteurs météorologiques au niveau de l'APC Daksi ...	116
Tableau VI.21. Corrélations entre les poussières, les métaux lourds, les métaux alcalins et les différents facteurs météorologiques au niveau du CHUC .....	117
Tableau VI.22. Contributions moyennes des secteurs de vent aux retombées totales et métalliques au niveau de la DDS.....	118
Tableau VI.23. Contributions moyennes des secteurs de vent aux retombées totales et métalliques au niveau du CHUC.....	118
Tableau VI.24. Contributions moyennes des secteurs de vent aux retombées totales et métalliques au niveau de l'APC .....	119
Tableau VI.25. Concentrations des polluants dans l'air et dans le sol .....	123
Tableau VI.26. La répartition du parc automobile selon le type et la source d'énergie ...	131
Tableau VI.27. Tableau VI.27. Facteurs d'émission de trafic urbain exprimés en g/km.v selon la catégorie des véhicules et leur motorisation .....	131
Tableau VI.28. Facteurs d'émission des véhicules exprimés selon leur catégorie.....	131
Tableau VI.29. Paramètres topographiques du site d'étude .....	132

## **LISTE DES FIGURES**

Figure I.1.	Schéma des particules diesel.....	11
Figure II.1.	Dimensions et caractéristiques des particules atmosphériques.....	20
Figure II.1.	La pénétration des particules dans l'appareil respiratoires.....	29
Carte IV.1.	Constantine et ses environs.....	44
Figure IV.1.	Secteurs de localisation des différents postes d'échantillonnage par rapport aux 16 secteurs de vent.....	45
FigureV.1.	Schéma représentatif du collecteur.....	49
FigureV.2.	La jauge de dépôt selon les normes AFNOR.....	52
Figure V.1.	Roses des vents.....	56
Figure VI.1.	Rose du vent général du 21/10/2004 au 21/05/2006.....	66
FigureVI.2.	Rose des précipitations.....	67
Figure VI.2.	Rose des précipitations générales (du 21/10/2004 au 21/05/2006).....	76
Figure VI.3.	Evolution des concentrations des PTS du 25/11/2004 au 26/06/2006.....	78
Figure VI.4.	Evolution des concentrations de plomb dans l'air ambiant.....	82
Figure VI.5.	Evolution des concentrations de cadmium dans l'air ambiant.....	83
Figure VI.6.	Evolution des concentrations de cuivre dans l'air ambiant.....	84
Figure VI.7.	Evolution des concentrations de calcium dans l'air ambiant.....	85
Figure VI.8.	Evolution des concentrations de baryum dans l'air ambiant.....	86
Figure VI.9.	Evolution des concentrations de sodium dans l'air ambiant.....	87
Figure VI.10.	Evolution des concentrations de potassium dans l'air ambiant.....	87
Figure VI.11.	Evolution des flux de retombées de poussières totales au niveau des trois sites.....	89
Figure VI.12.	Evolution des retombées totales de cuivre au niveau des trois sites.....	95
Figure VI.13.	Evolution des retombées solubles et insolubles de cuivre au niveau de l'APC.....	95
Figure VI.14.	Evolution des retombées solubles et insolubles de cuivre au niveau du CHUC.....	96
Figure VI.15.	Evolution des retombées solubles et insolubles de cuivre au niveau de la DDS.....	96
Figure VI.16.	Evolution des retombées totales de cadmium au niveau des trois sites.....	98
Figure VI.17.	Evolution des retombées solubles et insolubles de cadmium au niveau de l'APC.....	98

Figure VI.18. Evolution des retombées solubles et insolubles de cadmium au niveau du CHUC.....	99
Figure VI.19. Evolution des retombées solubles et insolubles de cadmium au niveau de la DDS.....	99
FigureVI.20. Evolution des retombées totales de plomb au niveau des trois sites.....	100
Figure VI.21. Evolution des retombées solubles et insolubles de plomb au niveau de l'APC.....	101
Figure VI.22. Evolution des retombées solubles et insolubles de plomb au niveau du CHUC.....	101
Figure VI.23. Evolution des retombées solubles et insolubles de plomb au niveau de la DDS.....	102
Figure VI.24. Evolution des retombées totales de potassium au niveau des trois sites.....	104
Figure VI.25. Evolution des retombées solubles et insolubles de potassium au niveau de l'APC.....	104
Figure VI.26. Evolution des retombées solubles et insolubles de potassium au niveau du CHUC.....	105
Figure VI.27. Evolution des retombées solubles et insolubles de potassium au niveau de la DDS.....	105
Figure VI.28. Evolution des retombées totales de calcium au niveau des trois sites	106
Figure VI.29. Evolution des retombées solubles et insolubles de potassium au niveau de l'APC.....	107
Figure VI.30. Evolution des retombées solubles et insolubles de calcium au niveau de la DDS.....	107
Figure VI.31. Evolution des retombées solubles et insolubles de calcium au niveau du CHUC.....	108
Figure VI.32. Evolution des retombées totales de baryum au niveau des trois sites.....	109
Figure VI.33. Evolution des retombées solubles et insolubles de baryum au niveau de l'APC.....	109
Figure VI.34. Evolution des retombées solubles et insolubles de baryum au niveau de la DDS.....	110
Figure VI.35. Evolution des retombées solubles et insolubles de baryum au niveau du CHUC.....	110
Figure VI.36. Evolution des retombées totales de sodium au niveau des trois sites .....	111

Figure VI.37. Evolution des retombées solubles et insolubles de sodium au niveau de l'APC .....	112
Figure VI.38. Evolution des retombées solubles et insolubles de sodium au niveau de la DDS.....	112
Figure VI.39. Evolution des retombées solubles et insolubles de sodium au niveau du CHUC.....	113
Figure VI.40. Variation du pH des solutions au niveau des trois sites.....	115
Figure VI.41. Variation de la conductivité électrique des solutions au niveau des trois sites.....	115
Figure VI.42. Les risques cancérigènes pour chaque récepteur.....	123
Figure VI.43. Risque cancérigène par voie d'exposition.....	123
Figure VI.44. Risque cancérigène selon les composés chimiques.....	124
Figure VI.45. Indice de risque pour chaque récepteur.....	124
Figure VI.46. Indice de risque par voie d'exposition.....	125
Figure VI.47. Indice de risque selon les composés chimiques.....	125
Figure VI.1 Morphologie du boulevard Belouizdad.....	129
Figure VI.48. Pollution par les particules (avenue Belouizdad).....	135
Figure VI.49. Pollution par les particules (avenue Belouizdad).....	136
Figure VI.50. Pollution par le monoxyde de carbone (avenue Belouizdad).....	137
Figure VI.51. Pollution par le monoxyde de carbone (avenue Belouizdad).....	138



# *Introduction Générale*

## **INTRODUCTION GENERALE**

Les activités humaines exercent sur l'environnement diverses formes de pollution qui peuvent conduire à des effets nuisibles sur la faune, la flore et l'homme lui-même. Tous les compartiments de l'environnement sont affectés l'air, l'eau et les sols. Les directives mondiales sur la réduction des rejets industriels et domestiques ont suscité la recherche de nouveaux produits et de nouveaux procédés plus respectueux pour l'écosystème. La pollution de l'air est peut être la plus dissimulée et la plus difficile à combattre.

En effet, la pollution de l'air est la résultante de multiples facteurs : croissance de la consommation d'énergie, développement des industries extractives, métallurgiques et chimiques, de l'incinération des ordures ménagères, des déchets industriels, du trafic arien et routier [1] [2] qui essentiellement peut être la source de différentes nuisances et pollutions. La construction, l'utilisation et l'entretien des infrastructures routières engendrent des perturbations susceptibles de porter atteinte aux ressources naturelles. Ce constat n'est pas nouveau, mais le fort développement de ce secteur durant ces dernières années fait à l'heure actuelle, l'une des principales sources des pollutions, malgré les progrès techniques réalisés sur les véhicules et les carburants pour les limiter [3]. L'ensemble de ces sources émet vers l'atmosphère des composés sous forme gazeuse ou particulaire avec des tailles et des compositions variables suivant leurs origines. Ainsi, les émissions gazeuses concernent principalement des composés sous forme d'oxydes tels que les oxydes de carbone, d'azote et de soufre mais également des composés organiques volatils. Les particules sont, quant à elles, principalement formées de composés minéraux tels que les métaux, les sels, les nitrates, les sulfates et de composés organiques. La nature dynamique de l'atmosphère favorise ensuite le transport de ces éléments et composés à différentes échelles spatiales et temporelles [4].

Durant le transport atmosphérique, la composition des éléments et composés devient alors complexe à déterminer puisqu'elle résulte de mélanges des substances et d'agrégats dont les origines, les tailles et les compositions chimiques varient en fonction des sources, du temps et de l'environnement [5], [6]. 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 [7]. Dans ces conditions, les spécialistes trouvent

beaucoup de difficultés à quantifier et identifier cette pollution et leurs sources d'émission, ce qui ralentit de surcroît les prises de décision.

Ainsi, afin d'estimer l'impact des composés atmosphériques sur l'environnement, il semble intéressant d'étudier les éléments et composés se déposant soit sous forme des retombées atmosphérique totales ou sous formes des particules totales en suspensions (PTS) sur le milieu urbain.

L'objectif de notre travail est d'étudier l'impact de la pollution particulaire et métallique dans des sites urbains au moyen de jauges de dépôt placées au niveau de trois sites à savoir : le Centre Hospitalo-universitaire de Constantine CHUC, l'APC de Daksi Abdeslem et la Direction de la Santé (DDS) sise au boulevard Belouizdad, et d'un collecteur de poussières totales en suspension (PTS) installé au niveau de la DDS. Une station météorologique sans fil installée au point le plus élevé du toit du CHUC a permis d'étudier l'influence des paramètres météorologiques sur la dispersion des polluants et de simuler la dispersion des particules, du monoxyde de carbone qui sont générées par le flux des véhicules en tenant compte de sa densité, de sa composition et de la géométrie de la route.

Ce mémoire se compose de trois parties :

- La première partie donne un aperçu sur le problème de la pollution atmosphérique engendré par le trafic routier, les particules et les métaux.
- La deuxième partie présente les matériels et les méthodes d'analyse utilisés.
- La dernière partie est consacrée à la présentation des résultats des mesures expérimentales et de la simulation ainsi qu'à leur interprétation.

# *Etude Bibliographique*

## **CHAPITRE I. LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE ET LE TRAFIC ROUTIER**

### I. Définition des polluants

On considère habituellement comme polluant toute substance ajoutée au milieu en concentration suffisante pour produire un effet mesurable sur l'homme, les animaux, la végétation ou les matériaux de construction [8].

Les polluants atmosphériques comprennent toutes les substances naturelles ou artificielles susceptibles d'être aéroportées : il s'agira de gaz, de particules solides, de gouttelettes liquides ou de différents mélanges de ces formes.

On peut considérer deux grandes classes de polluants :

**Les polluants primaires** : émis directement par les sources identifiables ;

- **Les polluants secondaires** : les polluants secondaires ne sont pas relâchés tels quels dans l'atmosphère. Ils sont produits par des réactions chimiques ou photochimiques (réactions produites ou initiées par la lumière du soleil). C'est le cas de l'ozone, par exemple. Ces réactions se produisent entre polluants primaires ou entre certains polluants primaires et certains composants naturels de l'atmosphère [9].

#### I.1. Polluants primaires

On peut proposer la liste suivante de substances pouvant constituer des polluants atmosphériques :

- les composés carbonés (CO et CO<sub>2</sub>) ;
- les composés azotés (NO<sub>x</sub>) ;
- les composés organiques, volatils (COV), irritants ou odorants ;
- les composés soufrés (SO<sub>2</sub>) ;
- les composés halogénés ;
- les composés métalliques ;
- les fines particules ( $d < 100\mu\text{m}$ ) ;
- les particules grossières ( $d > 100\mu\text{m}$ ) ;

- L'ozone troposphérique (si dans les hautes couches de l'atmosphère, au niveau de la stratosphère, la couche d'ozone fait écran à la partie nocive des UV et constitue donc un élément indispensable de l'écosystème terrestre, l'ozone dans les basse couches atmosphérique (troposphère) est un polluant nocif tant pour la santé humaine que pour la végétation) [10].

Nous ne considérons pas la vapeur d'eau, comme polluant, H<sub>2</sub>O étant un constituant majoritaire de l'écorce terrestre [9].

Les paragraphes suivants détaillent les différents polluants en insistant plus particulièrement sur ceux provenant de façon majoritaire des échappements de moteurs.

### I.1.1. Composés carbonés

Il s'agit ici des gaz à base de carbone, donc anhydride carbonique CO<sub>2</sub> et monoxyde de carbone CO.

#### I.1.1.1. Anhydride carbonique CO<sub>2</sub>

C'est un produit final de combustion de tout combustible carboné (biomasse, bois, et charbons etc.) et des métabolismes aérobie (respiration) [9].

Le dioxyde de carbone n'est pas considéré comme un polluant, mais contribue néanmoins à l'augmentation de l'effet de serre, donc au réchauffement de la planète.

#### I.1.1.2. Monoxyde de carbone CO

Le CO est produit lors de la combustion incomplète de composés contenant du carbone, il est incolore, non détectable par l'odeur, très toxique. La diffusion du CO est très rapide. Il disparaît rapidement dès que l'on s'éloigne d'une source d'émission [11]. Cela tient au fait que le CO a une densité voisine à celle de l'air [10].

Le CO est un poison qui peut entraîner une perte de vigilance, même à faible dose qui intervient essentiellement dans les conditions de trafic urbain. Les véhicules automobiles sont responsables de l'émission de plus de la moitié des émissions de CO et lorsque les moteurs à

essence tournent souvent au ralenti, les teneurs peuvent alors dépasser une centaine de  $\text{mg/m}^3$  [9].

## I.1.2. Composés azotés

### I.1.2.1. Monoxyde et dioxyde d'azote

L'azote (N) et l'oxygène (O) entrent en réaction dans les conditions de hautes températures et de pression des moteurs pour former du monoxyde d'azote (NO) [12]. Une fois rejeté dans l'atmosphère, NO s'oxyde pour former du dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ) [13]. L'azote et l'oxygène peuvent s'associer sous différentes formes :  $\text{N}_2\text{O}$  (protoxyde d'azote),  $\text{N}_2\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$ ,  $\text{HNO}_3$  (acide nitrique) [12], émis directement par les véhicules diesel [14].

NO et  $\text{NO}_2$  sont la plupart du temps étudiés simultanément et exprimés sous la forme de  $\text{NO}_x$  avec  $1 < x < 2$  [9]. Les oxydes d'azote très bien corrélés au trafic, la teneur en  $\text{NO}_x$  ( $r = 0,98$  pour NO et  $r = 0,93$  pour  $\text{NO}_2$ ) est un très bon indicateur de la pollution automobile, d'autant plus qu'il tient compte du parc des véhicules diesel [15]. Ils proviennent surtout des combustions émanant des centrales énergétiques et des véhicules. Le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ) font l'objet d'une surveillance attentive dans les centres urbains où leur concentration dans l'air présente une tendance à la hausse compte tenu de l'augmentation forte du parc automobile.

Le pot catalytique devrait cependant participer à une diminution des émissions. Les oxydes d'azote interviennent dans le processus de formation d'ozone dans la basse atmosphère. Ils contribuent également au phénomène des pluies acides [9].

Le monoxyde d'azote peut être considéré actuellement comme le meilleur indicateur de la pollution automobile. Il est le plus abondant des dérivés nitrés présents dans l'atmosphère : il représente environ 95 % des émissions  $\text{NO} + \text{NO}_2$ . Les apports artificiels d'oxydes d'azote dans l'atmosphère sont estimés mondialement à environ 66 Mt/an de  $\text{NO}_2$  [9].

### I.1.2.2. Le protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ )

Le  $\text{N}_2\text{O}$  est engendré par l'azote présent initialement dans les combustibles ; peu actif dans la troposphère, c'est un agent actif d'attaque de la couche d'ozone stratosphérique [13][16].

### I.1.3. Composés organiques

Il existe une très grande variété de composés organiques présents dans l'air. Ils peuvent provenir de sources naturelles (les forêts) ou d'activité humaines et notamment le trafic routier. Certains sont volatils dans les conditions ambiantes, d'autres ne le sont pas et subsistent dans l'air adsorbés sur les particules (comme composants majoritaires ou minoritaires de celles-ci).

#### I.1.3.1. Composés organiques volatils (COV)

Les COV regroupent tous les composés organiques (c'est-à-dire les composés constitués de carbone C, d'hydrogène H, d'oxygène O, et éventuellement d'azote N, de soufre S, de fluor F, de chlore Cl...) qui s'évaporent facilement dans l'atmosphère où ils participent à des réactions photochimiques ; parmi toutes les combinaisons à base de carbone, les hydrocarbures (composés binaires constitués de carbone et d'hydrogène) constituent le sous-groupe le plus important (pour la pollution automobile). Les composés qui s'évaporent rapidement aux températures ambiantes constituent la part principale des COV. La quasi-totalité des composés organiques qui peuvent être considérés comme des COV ont une tension de vapeur  $> 0,1$  mmHg dans des conditions normales (20°C et 1 atm) [16].

Les sources de composés volatils sont multiples. Il s'agit d'hydrocarbures (émis par évaporation des bacs de stockage pétroliers ou lors du remplissage des réservoirs automobiles), de composés organiques (provenant des procédés industriels des combustion), de solvants (peintures, encres, nettoyages), de composés organiques émis par l'agriculture et le milieu naturel et de composés organiques émis par le trafic routier [16].

#### I.1.3.2. Composés organiques émis par le trafic routier

Les COV sont émis :

- par évaporation à la pompe, au niveau du carburateur et du réservoir (provoquée par les variations de températures : marche/arrêt du moteur ou jour/nuit ; ce sont les pertes par «respiration») ;
- par perte (éclaboussures à la pompe ou au niveau du réservoir) ;
- dans les gaz d'échappement [16].



La composition spécifique des émissions de COV, qu'elles soient produites par combustion ou évaporation, varie très fortement en fonction des carburants et de leurs additifs. C'est pourquoi les véhicules à essence et diesel (ou autre carburant) donnent différents spectres d'émissions. Cependant, les émissions totales de COV sont équivalentes car, si les véhicules diesel émettent beaucoup moins de COV par kilomètre, leur rejets contiennent une forte concentration des COV les plus réactifs (composés aromatiques, aldéhydes et oléfines) qui fait que les moteurs diesel contribuent de manière beaucoup plus importante à la formation d'ozone [17].

Les concentrations de COV sous forme gazeuse sont généralement 10 à 100 fois supérieures aux concentrations de COV sous forme de particules [17].

De nombreux COV ne se dispersent que localement, c'est-à-dire à proximité de leurs sources ; d'autres sont persistants et largement dispersés dans l'atmosphère [17].

#### I.1.3.3. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Les HAP, dangereux pour la santé car cancérogènes, sont des hydrocarbures aromatiques constitués de plusieurs cycles benzéniques accolés selon diverses formes. La majorité des HAP proviennent des processus de pyrolyse et en particulier de la combustion incomplète de matière organique ou de composés carbonés [16] [18].

Les HAP sont la plupart du temps adsorbés sur des particules carbonées. Ils sont également détectés en phase gazeuse, en particulier dans les gaz d'échappement des moteurs à essence ; il s'agit dans ce cas des HAP de masse moléculaire la plus faible (jusqu'à 3 cycles\*), qu'on appelle HAP légers. Dans les émissions Diesel, une grande partie de ces HAP légers est adsorbée sur les particules en compagnie de HAP de masse beaucoup plus grande (4 cycle et plus) : les HAP lourds [16] [18] [19] [20].

Parmi les HAP, le **benzo(a)pyrène** (BaP) est le plus étudié des HAP car il est particulièrement dangereux pour la santé [10] ; il est émis pratiquement au même taux par un véhicule essence ou Diesel [16].

- si le poids moléculaire < 252, la récupération se fait essentiellement sous forme gazeuse ;

- si le poids moléculaire  $> 252$ , la récupération se fait essentiellement sous forme particulaire [21].

Le tableau I.1 propose un classement des principaux polluants. Seuls les HAP (Hydrocarbures aromatiques polycycliques) sont détaillés ci-dessous, en s'en tenant aux principaux, les 16 HAP généralement étudiés dans les analyses.

Tableau I.1 : Liste des 16 hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) [21].

HAP	Poids moléculaire
▪ Naphtalène	128
▪ Acenaphthylène	152
▪ Acenaphtène	154
▪ Fluorène	166
▪ Phénanthrène	178
▪ Anthracène	
▪ Fluoranthène	202
▪ Pyrène (P)	
▪ Chrysène	228
▪ Benzo(a)anthracène (BaA)	
▪ Benzo(a)pyrène (BaP)	252
▪ Benzo(b)fluoranthène (BbF)	
▪ Benzo(k)fluoranthène (BkF)	
▪ Dibenzo anthracène	276
▪ Indéno (1,2,3)pyrène (IP)	278
▪ Benzo(g,h,i)pérylène (EghiP)	

HAP légers : La récupération sous forme gazeuse est la plus importante [HAUTALA *et al*, 1993, p. 47]

HAP lourds : La récupération sous forme particulaire est la plus importante [HAUTALA *et al*, 1993, p. 47]

#### I.1.3.4. Hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM)

Les BTEX (ou BTX) : Benzène, Toluène, Ethylbenzène et Xylènes sont des HAM (hydrocarbures aromatiques monocycliques). Ce sont des hydrocarbures imbrûlés. Le benzène est produit par désalkylation des composés aromatiques [14], si bien que même si on limite sa teneur dans les carburants, la présence de composés aromatique entraîne sa formation [16].

Les BTX sont les principaux COV émis par la circulation automobile essence, surtout depuis l'introduction de nouveaux antidétonants : les aromatiques remplaçant le plomb tétraéthyle

Ils sont très dangereux pour la santé (atteinte du système nerveux central entre autres) [18].

#### I.1.3.5. Polychlorobiphényles (PCB)

Les PCB (polychlorobiphényles) sont des composés aromatiques organochlorés non biodégradables, comme le DDT (dichlorodiphényl-trichloréthane) [22][23]. Il s'agit de substances très toxiques. Les PCB sont probablement présents dans les huiles, l'essence et le gazole. Si le rapport entre les concentrations de PCB dans l'air et le trafic routier a été prouvé par Granier et Chereuil (1991), l'origine de cette pollution n'est pas démontrée. Les PCB sont présents sous forme gazeuse et particulaire. Dans le tunnel des Tuileries (Paris), les auteurs mesurent des concentrations de l'ordre de  $2,1 \text{ ng/m}^3$  de PCB sous forme gazeuse et  $5,2 \text{ ng/m}^3$  de PCB sous forme particulaire [10].

#### I.1.3.6. Les Chloro-fluoro-carbones (CFC)

Les CFC (Fréons dans le langage courant) sont utilisés dans les systèmes de climatisation des voitures, notamment les CFC-11 et CFC-12 [11] [17].

#### I.1.3.7. 1,3-butadiène (hydrocarbure)

C'est un élément très réactif. Le 1,3-butadiène se forme par combustion incomplète du carburant. Son émission augmente proportionnellement à celle des hydrocarbures, mais n'est pas émis par évaporation. 1,3-butadiène est un précurseur d'aldéhydes [18]. Il serait de loin, le polluant atmosphérique toxique le plus dangereux (en terme de risques de cancer) émis par les véhicules [10].

### I.1.4. Les composés soufrés

#### I.1.4.1. Le dioxyde de soufre

Il provient de la combustion de combustibles fossiles contenant du soufre (fioul lourd, charbon, gasoil...). Les concentrations ambiantes ont diminué de plus de 50 % au cours des 15 dernières années, en liaison notamment avec le développement de l'énergie nucléaire, de l'utilisation de combustibles moins chargés en soufre, des systèmes de dépollution des cheminées d'évacuation des fumées ainsi que de la délocalisation industrielle dans les zones périurbaines.

En présence d'humidité, il forme des composés sulfuriques qui contribuent aux pluies acides et à la dégradation de la pierre des constructions. Le  $\text{SO}_2$  est un bon indicateur d'un mélange complexe de pollution dite "pollution acido-particulaire"[10].

### I.1.5. Les particules

Les particules constituent un ensemble hétérogène dont les caractéristiques physico-chimiques et/ou biologiques sont influencées par les sources d'émissions ou par leur processus de formation dans l'atmosphère. Alors que dans le passé, les fumées des processus incomplets de combustion de charbon, notamment du fait des activités industrielles et du chauffage domestique, dominaient la composition de l'aérosol urbain, les particules en suspension dans l'air sont aujourd'hui principalement issues des véhicules automobiles (surtout de type diesel), des usines productrices d'énergie non nucléaire ainsi que des réactions chimiques entre gaz atmosphérique et l'humidité de l'air.

#### I.1.5.1. Particules diesel

Les particules diesel présentes dans l'atmosphère sont de très petite taille, inférieure au micron. Leur composition et leur granulométrie ne sont pas parfaitement connues. Leur composition peut être schématiquement décrite comme un squelette de carbone recouvert d'une phase organique composée principalement d'imbrûlés provenant du carburant et du lubrifiant. Cette phase imbrûlée comprend plusieurs centaines de composés avec, notamment, des HAP. Ces particules diesel, de très petite taille (diamètre aérodynamique moyen de  $0,5 \mu\text{m}$ ) constituent aujourd'hui la plus grande part des poussières en suspension en milieu urbain. C'est-à-dire que, par delà la diminution qui a pu être observée, depuis 20 ans, des valeurs d'émission (teneurs atmosphériques) des particules (mesurées alors par la technique des fumées noires), la nature des particules a aussi évolué. Tout laisse à penser que les particules présentes aujourd'hui dans l'air urbain présentent, par leur taille et leur composition chimique, une nocivité plus marquée que celles qui étaient historiquement associées aux processus de combustion industriels et du chauffage résidentiel traditionnel. [18]. Le temps de séjour pour les poussières de l'ordre de  $1 \mu\text{m}$  (particules diesel essentiellement) est proche de 10 jours [20].

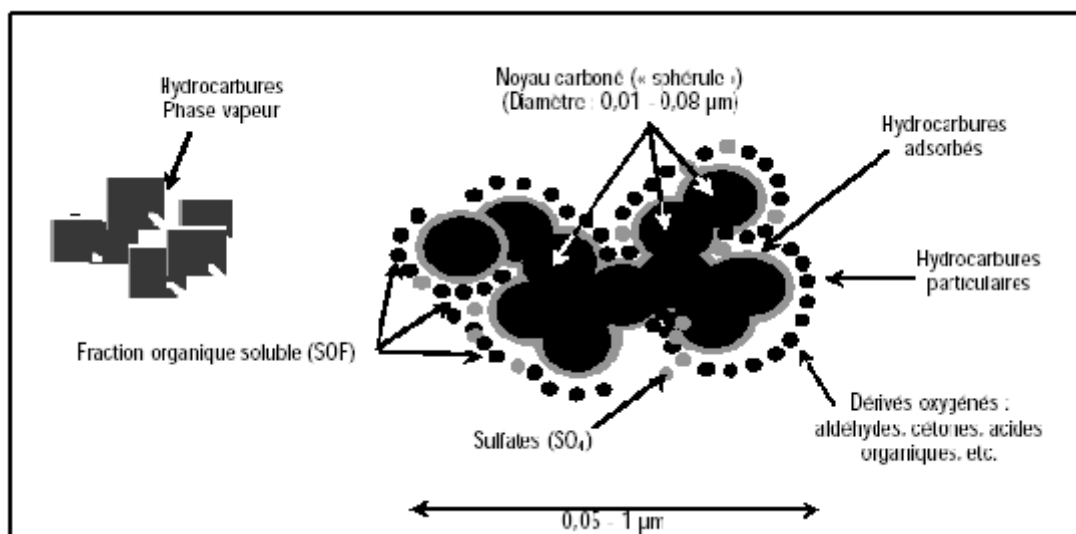


Figure I.1. Schéma des particules diesel [18]

#### I.1.5.2. Particules minérales

Le passage des véhicules sur la chaussée et met en suspension des particules de quartz (phénomène accru lors de l'utilisation de pneus cloutés) [16].

L'amiante était jusqu'à peu utilisé dans la fabrication des voitures, notamment pour les garnitures de friction (freins et embrayages) et des transmissions automatiques. L'usure de ces éléments provoque les rejets de particules d'amiante [14] [16]. Très toxique (danger de l'amiante contenu dans les locaux), dans l'état actuel des connaissances, seul un seuil de 0 est sécuritaire.

Des oxydes métalliques sont présents dans les gaz d'échappement mais ne sont pas liés à la combustion : ils proviennent de l'usure du moteur ou des systèmes de dépollution [24].

#### I.1.5.3. Composés métalliques

Les composés métalliques impliqués en pollution de l'air sont surtout des métaux lourds par suite de leur nocivité plus importante (à titre d'exemple le plomb, cadmium, zinc, et les métaux précieux...). Les divers métaux sont émis sous forme de particules.

**a) Le plomb** élément très toxique, est issu de la combustion des carburants contenant du plomb tétraéthyle et/ou du plomb tétraméthyle; il provient également, à un moindre degré, des substances anti-usure des lubrifiants [14]. Dans les villes, 90 % du plomb est émis par les

véhicules ; 10% du plomb retombe dans un rayon de 100 m autour de la route, le reste est largement dispersé [17].

**b) Le manganèse** est issu des carburants contenant du MMT (methyl cyclopentadienyl manganèse tricarbonyl), substitut antidétonant du plomb. Le manganèse est un polluant étudié essentiellement au Canada, un des seuls pays où il a été adopté comme antidétonant [25]. Ce composé entraîne des risques de bouchage des supports catalytiques [16].

**c) Le zinc et le cadmium** sont produits par l'usure des pièces mécaniques, galvanisées, des pneumatiques et des lubrifiants ; ils sont issus également de la dégradation des glissières de sécurité [14].

Une consommation d'huile de 0,12L/1000km entraînerait des émissions de Zn de 0,15mg/km, taux ayant été observé sur véhicule sans pot catalytique [9]. Le zinc et le cadmium sont souvent associés car le cadmium est l'impureté associée au zinc [16].

**d) Des poussières** sont émises par les pots catalytiques : des **métaux précieux** (platine, palladium, rhodium, cérium, etc.) [14], mais aussi du **nickel**, du **cuivre**, du **chrome** (faibles quantités) [26].

**Autres métaux:** magnésium, aluminium, fer, chrome (usure des roches et des sols); molybdène (lubrifiant); baryum, cobalt (huiles de graissage), sélénium (lubrifiant, plaquettes de frein); arsenic, chrome (garnitures de frein, disques d'embrayage, transmissions automatique, etc.) [26].

Le tableau I.2 montre quelques proportions et classement des divers polluants automobiles:

Tableau I.2. Proportion et classement des divers polluants automobiles [10]

Polluants gazeux	Polluants particulaires	Liquides										
<p>Les particules les plus fines (PM<sub>10</sub>) se concentrent comme il se voit (PM<sub>2.5</sub>)</p>	<p>Chlorure de sodium (NaCl) Chlorure de calcium (CaCl<sub>2</sub>) Quartz; Amiante; Oxyde de calcium; Oxydes métalliques Zinc (Zn); Cadmium (Cd); Magnésium (Mg); Aluminium (Al); Fer; Fer; Chrome (Cr); Molybdène (Mo); Phosphore (P); Baryum (Ba); Cobalt (Co); Sélénium (Se); Arsenic (As); Nickel (Ni); Cuivre (Cu); Platine (Pt); Palladium (Pd); Rhodium (Rh); Cérium (Ce)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Combustible;</li> <li>Huile;</li> <li>Lubrifiant;</li> <li>Arrêté;</li> <li>Liquide de frein.</li> </ul>										
<p>COV: non issus combustion particules précurseurs d'ozone polluants secondaires</p>	<p>Plomb (Pb) Manganèse (Mn) COV (surtout les HAP lourds)</p>	<p>Acide nitrique</p>										
<p>COV les plus légers (butanes, isoprènes, oléfines : butènes, pentènes, ...)</p>	<p>Les Composés Organiques Volatils (COV) sont constitués de tous les composés organiques gazeux de l'atmosphère. Ils comprennent des hydrocarbures, des aldéhydes, des composés nitrés et sulfurés, etc. [MOLYER, 1994, p. 114].</p>	<p>Méthane; Alènes; 1,3-butadiène; Chloro-hydro-carbones (CHC) Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) - Voir tableau 3</p> <table border="1" data-bbox="934 1358 1164 1692"> <tr> <td>Hydrocarbures Aromatiques</td> <td>1,2,4-triméthylbenzène, Etc.</td> </tr> <tr> <td>Marocycliques (les HAP)</td> <td>Benzène Toluène (ou méthylbenzène) Éthylbenzène Xylènes</td> </tr> <tr> <td>Alcaldes</td> <td>Formaldéhyde et acétoaldéhyde Acétoaldéhyde Acroléine</td> </tr> <tr> <td>Cétones</td> <td>PAN, PPN, PBN</td> </tr> <tr> <td>Polyhalocarbures</td> <td>Acides Ethers</td> </tr> </table>	Hydrocarbures Aromatiques	1,2,4-triméthylbenzène, Etc.	Marocycliques (les HAP)	Benzène Toluène (ou méthylbenzène) Éthylbenzène Xylènes	Alcaldes	Formaldéhyde et acétoaldéhyde Acétoaldéhyde Acroléine	Cétones	PAN, PPN, PBN	Polyhalocarbures	Acides Ethers
Hydrocarbures Aromatiques	1,2,4-triméthylbenzène, Etc.											
Marocycliques (les HAP)	Benzène Toluène (ou méthylbenzène) Éthylbenzène Xylènes											
Alcaldes	Formaldéhyde et acétoaldéhyde Acétoaldéhyde Acroléine											
Cétones	PAN, PPN, PBN											
Polyhalocarbures	Acides Ethers											
<p>Non précurseurs de polluants secondaires</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>CO<sub>2</sub>, Dioxyde de carbone</li> <li>SO<sub>2</sub>, Dioxyde de soufre</li> </ul>	<p>Précurseurs de polluants secondaires</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>CO, Monoxyde de carbone</li> <li>NO<sub>x</sub>, Oxydes d'azote :             <ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ NO, Monoxyde d'azote</li> <li>⇒ NO<sub>2</sub>, Dioxyde d'azote</li> <li>⇒ N<sub>2</sub>O, Protoxyde d'azote</li> <li>⇒ HNO<sub>3</sub>, Acide nitrique</li> <li>⇒ N<sub>2</sub>O<sub>5</sub></li> <li>⇒ N<sub>2</sub>O<sub>4</sub></li> <li>⇒ ...</li> </ul> </li> <li>COV les plus réactifs : les alcaldes, éthylène, styrène...</li> </ul>	<p>Les polluants secondaires</p> <p>Ozone (O<sub>3</sub>)</p> <p>Peroxyacétylnitrate (PAN)</p> <p>Peroxypropionynitrate (PPN)</p> <p>Peroxybutyrylnitrate (PBN)</p> <p>Acroléine, Radicaux d'hydroxyl</p> <p>COV issus de réactions entre HC imolés et NO<sub>x</sub></p>										
<p>Polluants primaires, émis par la combustion</p>	<p>Polluants primaires, émis par la combustion</p>	<p>Polluants primaires, émis par la combustion</p>										

Source: MELPAZ, 1993.

1.2. Présence à l'état naturel des polluants liés à l'automobile

Au bord des routes, en milieu rural surtout, il semble assez aisé (en tout cas plus facile qu'en milieu urbain) de connaître les différentes sources de pollution des alentours. Par contre, il est un aspect qu'on pourrait vite oublier, c'est que la nature elle-même est source de polluants. Le tableau I.3 qui suit donne quelques indications [10].

Tableau I.3. Présence à l'état naturel des divers polluants [13]

Polluant	Présence à l'état naturel
CO	<ul style="list-style-type: none"> <li>CO issu de la combustion de la biomasse, de l'oxydation du méthane et des hydrocarbures émis par la végétation et les océans, et par l'activité biologique de la végétation terrestre et aquatique [CONSEIL SUPERIEUR D'HYGIENE PUBLIQUE DE FRANCE, 1996, p. 8].</li> <li>Normalement présent à l'état de traces dans l'atmosphère [SCHUTZ, 1995, p. 78].</li> </ul>
CO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rejeté par les plantes, les volcans [MOUMIER, 1994, p. 10].</li> </ul>
COV	<ul style="list-style-type: none"> <li>Les COV sont largement présents à l'état naturel : les COV émis par les végétaux sont très nombreux ; ils sont regroupés en 4 familles : isoprène, α-pinène, monoterpènes et autres composés inconnus [CITEPA, 1989, p. 2] ; les émissions sont essentiellement facteurs du type de végétaux, de l'intensité lumineuse et de la température ambiante [CITEPA, 1989, p. 5].</li> <li>La proportion de COV d'origine naturelle varie donc selon les pays : « En Finlande très boisée, les COV d'origine naturelle interviennent pour 71 % et le trafic pour 11 % ; ces chiffres sont au contraire respectivement de 5 % et de 42 % aux Pays-Bas » [DEGOBERT, 1992, p. 26].</li> <li>Les océans émettent du diméthyl sulfure [CONSEIL SUPERIEUR D'HYGIENE PUBLIQUE DE FRANCE, 1996, p. 8].</li> </ul>
Méthane	<ul style="list-style-type: none"> <li>Principales sources de méthane : marais et fermentation dans les zones tropicales, rumination du bétail ou des autres ruminants, déjections ; il est comptabilisé à part aux Etats-Unis du fait qu'il s'agit d'un hydrocarbure photochimiquement peu réactif et peu toxique [CONSEIL SUPERIEUR D'HYGIENE PUBLIQUE DE FRANCE, 1996, p. 8 ; ACADEMIE DES SCIENCES, 1996, p. 8] ; il ne participe pas à la formation d'ozone [BIRRAUX, 1995, p. 8]. On parle alors de COVNM (COV non méthaniques). En Europe, le méthane est comptabilisé avec les autres COV, ce qui apparaît moins pertinent [ACADEMIE DES SCIENCES, 1996, p. 8].</li> </ul>
NO <sub>x</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Issus des combustions (incendies), éclairs des orages, décomposition partielle des nitrates [MOUMIER, 1994, p. 12-13].</li> <li>NO est émis par l'activité bactérienne des sols [DEGOBERT, 1992, p. 23].</li> </ul>
Ozone	<div style="text-align: center;"> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">formation</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">destruction</div> </div>   <pre> graph TD     subgraph Formation         A[Arrivées stratosphériques] -- 20% --&gt; C[Ozone troposphérique]         B[Photochimie] -- 80% --&gt; C     end     subgraph Destruction         C -- 67% photochimie --&gt; D[ ]         C -- 33% dépôt sol, végétation --&gt; E[ ]     end     subgraph Sources         direction LR         subgraph COV             COV_N[Naturels 51%]             COV_A[Anthropiques 49%]         end         subgraph NOx             NOx_N[Naturels 10%]             NOx_A[Anthropiques 90%]         end     end     </pre> <p style="text-align: right; font-size: small;">Source : MOUMIER, 1994, p. 94</p> </div>
SO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le SO<sub>2</sub> est un rejet <b>exclusivement anthropique</b>, mais d'autres composés soufrés sont émis naturellement (hydrogène sulfuré, composés organo-soufrés, etc.) [MOUMIER, 1994, p. 114].</li> </ul>
Particules	<ul style="list-style-type: none"> <li>Volcans, érosion éolienne [ARGENTI, 1985, p. 24] ; feux de forêts [DEGOBERT, 1992, p. 45].</li> </ul>



### I.3. Effet de quelques polluant issues du trafic routier

#### I.3.1. Effet du CO

La toxicité du CO est relativement bien connue : mortel au-delà de 1000 ppm, il agit à des teneurs beaucoup plus basses, par son affinité pour l'hémoglobine du sang, 210 fois plus élevée que celle de l'oxygène [9].

Quand il est inhalé, le CO entre dans la circulation sanguine et peut provoquer des troubles dans l'oxygénation des tissus. Ces effets résultent principalement de sa capacité à déplacer l'oxygène fixé sur l'hémoglobine pour former de la carboxyhémoglobine (le rôle de l'hémoglobine est de transporter l'oxygène des poumons vers les autres tissus) avec pour conséquence une diminution de l'oxygénation des tissus. Le niveau naturel de carboxyhémoglobine varie entre 1.2 et 1.5%. A 5 % de carboxyhémoglobine (activité modérée pendant 8 heures à 35ppm), certains effets neurologiques peuvent être observés : diminution de l'apprentissage, réduction de la vigilance et de la dextérité manuelle, capacité moindre à accomplir des tâches complexes et troubles du sommeil. A des concentrations entre 2,9 et 4,5%, des troubles cardiovasculaires peuvent se développer chez les personnes à risque, les personnes âgées, les enfants et les fœtus.

Le CO peut aussi présenter une toxicité à long terme. L'intoxication chronique se traduit par des symptômes non spécifiques : maux de tête, vertiges, nausées quand il atteint 20 % de hémoglobine et même des pertes de conscience dangereuses quand ce taux atteint 50%, la mort survenant pour 70%. L'OMS recommande de ne pas excéder 2,5 à 3% de COHb chez les sujets non fumeurs (ce taux varie entre 5 et 15 % chez un fumeur) [10].

Tableau I.4. Les valeurs guides proposées par l'OMS

Périodes d'exposition	Valeurs guides
15 minutes	90ppm
30 minutes	50ppm
1heure	25ppm
8 heures	10ppm

### I.3.2. Effets des oxydes d'azote

Le monoxyde d'azote NO est lui-même peu toxique. Les effets soupçonnés concernent sa fixation sur l'hémoglobine (la liaison est 1000 fois plus forte que dans le cas du CO mais il est moins nocif). C'est surtout le dioxyde d'azote qui produit des effets nuisibles pour l'homme. Il est peu soluble et peut pénétrer profondément dans le système pulmonaire. Il agit au niveau des alvéoles pulmonaires et amène des altérations de leur structure, des inhibitions des défenses pulmonaires et un effet cytotoxique sur les macrophages alvéolaires ; il stimule leur activité à faible dose, puis affaiblit les défenses de l'organisme, favorisant ainsi d'autres effets. Le NO peut ainsi amener la mort de cellules spécifiques au sein du poumon et altérer la régulation des fonctions pulmonaires. Les symptômes de l'action toxique du NO<sub>2</sub> sont l'insomnie, la toux, la respiration haletante et une altération des muqueuses [9].

### I.3.3. Effet des composés soufrés

Le SO<sub>2</sub> est un irritant modéré fortement hydrophile et donc facilement dissous dans le mucus nasal, avec peu de risque d'atteinte des poumons. Dans les tissus, il se transforme en bisulfate et, après oxydation enzymatique, est éliminé par les reins sous forme de sulfate. Il agit par contre sur les mécanismes de défense et peut ainsi potentialiser les effets d'autres polluants (NO<sub>2</sub>, HAP, métaux). Le SO<sub>2</sub> peut également après oxydation en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> former des particules de sulfate d'ammonium qui pénètrent dans le poumon [9].

### I.3.4. Effets de l'ozone et des oxydants

L'ozone présente ainsi que le SO<sub>2</sub> des effets toxiques similaires à ceux du NO<sub>2</sub>, mais à des concentrations beaucoup plus faibles que dans le cas du NO<sub>2</sub> et du SO<sub>2</sub>. Sa plus faible stabilité et sa plus grande solubilité limitent la profondeur de sa pénétration. Le corps humain réagit par un rétrécissement des voies respiratoires dès que la concentration de O<sub>3</sub> dépasse 0,1ppm; par ailleurs l'activité physique diminue le seuil de la tolérance à ces polluants. Les autres symptômes sont des irritations des yeux et des muqueuses, des maux de tête avec toux et inhalation réflexe de l'inspiration ainsi qu'une réduction de la capacité pulmonaire [9]. Il provoque une oxydation des protéines et une peroxydation des acides gras, surtout insaturés. L'OMS demande de limiter l'ozone à 200 µg/m<sup>3</sup> (0,1ppm) sur 1heure et 65 µg/m<sup>3</sup> (0,03 ppm) sur 24 heures [9].

Il favorise, conjointement avec d'autres gaz irritants, les affections des voies respiratoires, les enfants étant les plus touchés. En outre, les oxydes d'azote sont des précurseurs de l'ozone troposphérique et des pluies acides.

## CHAPITRE II. LA POLLUTION PAR LES PARTICULES

### II.1. Définition

Les particules sont des entités solides ou liquides, en suspension dans l'air ; elles forment avec celui-ci un aérosol (poussières, fumées, suies, brumes, brouillards, smog). Elles peuvent avoir des compositions, densités, formes et dimensions très diverses, selon leur mode de formation. Elles sont principalement caractérisées par leur diamètre aérodynamique, variant de 0,02  $\mu\text{m}$  à 100  $\mu\text{m}$ , pour les particules atmosphériques. Ce diamètre est défini comme étant celui d'une hypothétique particule sphérique, de densité unitaire, qui aurait les mêmes caractéristiques aérodynamiques que la particule concernée.

Selon leurs modes de formation, on distingue :

*Les grosses particules:* d'origine naturelle, elles sont principalement émises par des processus mécaniques (érosion, embruns marins) et biologiques (spores, polluant).

*Les fines particules:* elles peuvent être émises en tant que telles par les procédés de combustion ou industriels. Elles peuvent aussi résulter de la condensation de gaz, encore de réactions chimiques entre gaz, donnant lieu à la formation d'un solide (formation de sulfates, d'ions ammonium). La distance de transport des particules dépend de leur taille et de leur densité. Les particules grosses et lourdes ont tendance à sédimenter rapidement, d'où leur nom de **particules sédimentables**. Les particules fines ont un comportement qui s'apparente à celui des gaz en ne sédimentent pratiquement pas. Elles sont appelées **particules en suspension**.

### II.2. Quelques propriétés des particules atmosphériques

#### II.2.1. La taille des particules

Les particules sont classées par taille selon leur nature ou leur origine. Le diamètre des particules peut varier de 0,005  $\mu\text{m}$  à 100  $\mu\text{m}$  environ. Les plus grosses particules étant suffisamment lourdes pour se déposer rapidement, on se préoccupe davantage des particules de diamètre inférieur à 40  $\mu\text{m}$ , qui restent en suspension dans l'air ambiant. Ces particules sont appelées particules totales en suspension (PTS). Par convention, on distingue :

**Les aérosols** qui sont formés de particules solides ou liquides de diamètre inférieur à 100 $\mu\text{m}$ .

**PM<sub>10</sub> (Particulate Matter)** : les particules de diamètre aérodynamique moyen inférieur à 10  $\mu\text{m}$ .

**PM<sub>2,5</sub>** : les particules fines inférieures à 2,5  $\mu\text{m}$ .

**Fumées noires** qui sont des particules carbonées de diamètre inférieur à 5  $\mu\text{m}$  jusqu'à 0,1  $\mu\text{m}$ .

Les particules les plus grosses sont produites principalement par des phénomènes mécaniques. De ce fait, on y trouve en quantité des éléments minéraux et organiques venant du sol et de la végétation ; quoiqu'en quantité beaucoup plus faible, les particules biologiques (spores, pollens, bactéries...) se retrouvent aussi dans cette gamme granulométrique. Les particules les plus fines (moins de 0,1  $\mu\text{m}$ ) résultent de transformations gaz-solide dans l'atmosphère. Les particules dans la gamme 0,1 à 2  $\mu\text{m}$  proviennent de la condensation de vapeurs peu volatiles et de phénomènes de coagulation. On y trouve en grande quantité des composés organiques ; c'est dans cette gamme que se trouvent les particules émises par les pots d'échappement des véhicules à moteur, une fois les effluents condensés et coagulés dans l'air. La figure ci-dessous illustre les caractéristiques des particules atmosphériques.

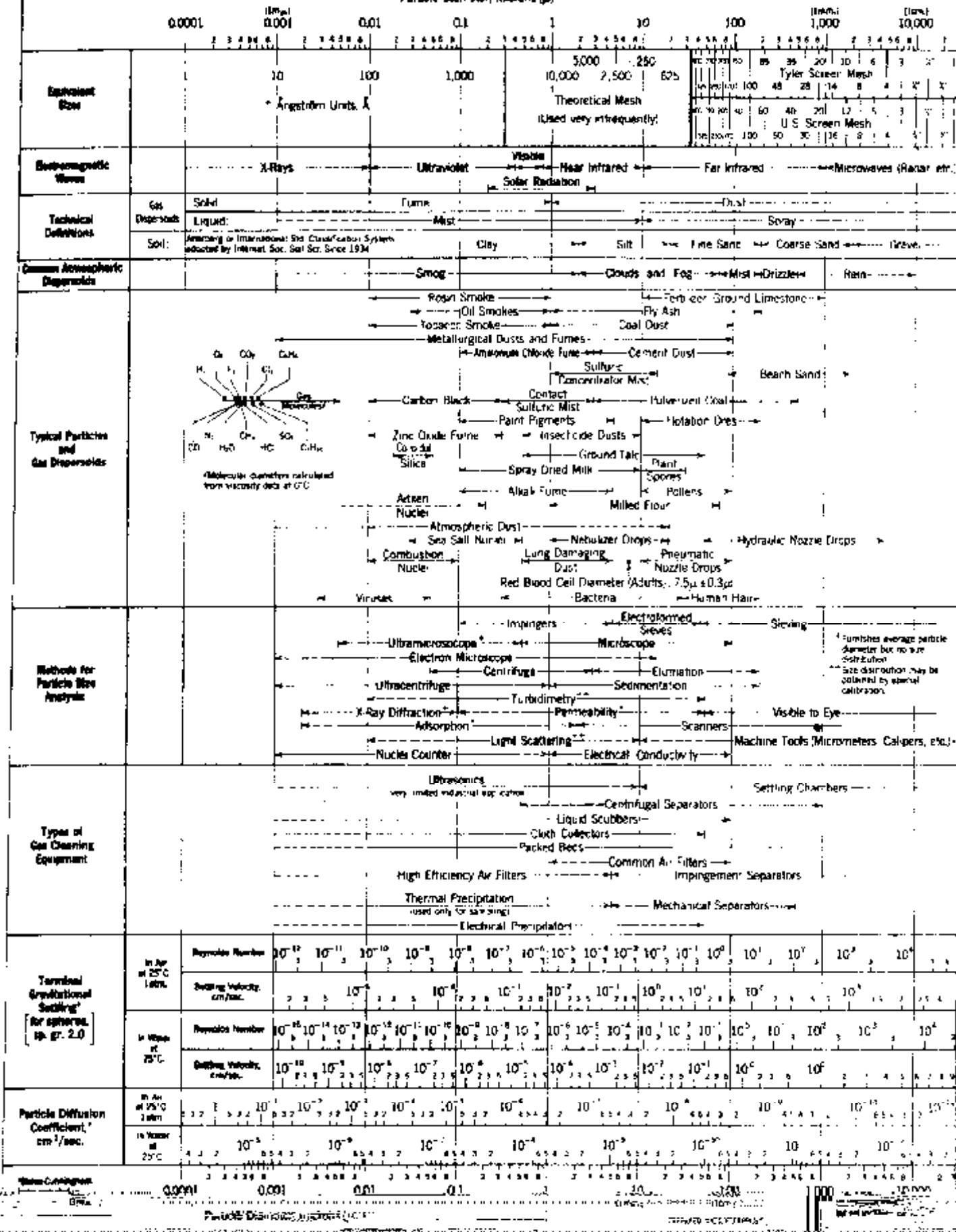


Figure II.1. Dimensions et caractéristiques des particules atmosphériques [27]

### II.2.2. Composition chimique des particules

Les particules sont principalement composées des substances suivantes : sulfate, nitrate, ammonium, chlorure de sodium, matières minérales et eau. Elles peuvent être primaires ou secondaires en fonction de leur mécanisme de formation. En effet, Les grosses particules contiennent des éléments abondants dans la couche terrestre et des sels marins tels que Al, Ca, Fe, K, Mn, Sr, Si, alors que les particules fines contiennent des sulfates, nitrates ou ammonium résultant de la transformation dans l'air des oxydes de soufre et d'azote, de l'ammoniac, ainsi que du carbone, des composés organiques et métaux, provenant, entre autres des combustibles fossiles.

### II.2.3. Forme et surface spécifique des particules

La forme des poussières est très variable et dépend de leur origine. Elles sont sphériques quand elles sont d'origine thermique mais du fait des possibilités d'agglomération, elles paraissent de forme très variable. Les poussières d'origine mécanique ont plus souvent des formes anguleuses et s'agglomèrent encore plus facilement. La surface spécifique des poussières peut être extrêmement développée, surtout pour les particules les plus fines, ce qui facilite les agglomérations, les échanges, l'absorption et les réactions (Tableau II.1). Il peut en résulter des dangers d'explosion, non seulement pour les poussières de charbon mais aussi pour les fines particules alimentaires lors de leur transport pneumatique [28].

Tableau II.1. Surface spécifique de quelques particules [28]

<b>Particules</b>	<b>Diamètre médiane <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Surface spécifique (<math>\text{m}^2/\text{g}</math>)</b>
Sable	500	0,003
Centre volante de centrale	5 – 25	0,15 – 0,65
Poussière de cimenterie	20	0,25
Alumine activée	25	50 -100
Fumée de tabac	0,5	20
Charbon	0,02	100

### II.2.4. Durée de la vie des aérosols dans l'atmosphère

Il s'agit d'un paramètre fondamental qui conditionne la fréquence d'apparition d'un aérosol de dimension donnée dans l'atmosphère. Selon Jaenicke [29]. Le temps de séjour  $T(s)$  d'une particule de rayon  $r$  ( $\mu\text{m}$ ) est donné par la relation :

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{C} \left[ \frac{r}{R} \right]^2 + \frac{1}{C} \left[ \frac{r}{R} \right]^{-2} + \frac{1}{T_{humide}} \quad (\text{II.1})$$

$R$  : est un rayon normalisé fixé à  $0,3 \mu\text{m}$

$C$  : est une constante  $C = 1,28 \cdot 10^8$

$T_{humide} = 6,91 \cdot 10^5$  est Le temps de séjour correspondant aux disparitions humides.

## II.2.5. Sédimentation des particules atmosphériques

### II.2.5.1 Vitesse d'une chute d'une particule

La vitesse de chute d'une particule dans un fluide porteur est une caractéristique très importante. Elle dépend de sa forme, sa dimension et sa masse volumique.

Dans le fluide supposé immobile, le mouvement de chute d'une particule dû à son propre poids est équilibré par la poussée d'Archimède et les forces de frottement. La vitesse de chute pour une particule supposée sphérique est calculée par une relation classique qui dépend de son diamètre et des différences de densité de la particule et du fluide.

Pour les grosses particules (diamètre  $< 500 \mu\text{m}$ ) la loi de Newton est applicable. La vitesse de chute finale de la particule est donnée par :

$$V_g = \left[ \frac{8gd_1(m_1 - m_2)}{3m_2} \right]^{1/2} \quad (\text{II.2})$$

$m_1$  : masse volumique des particules

$m_2$  : masse volumique du fluide porteur

$d_1$  : leur diamètre moyen

pour les fines particules : ( $1 \mu\text{m} < \text{diamètre} < 50 \mu\text{m}$ ), la loi de Stokes est applicable.

La vitesse de chute finale de la particule est donnée par :



$$V_f = \frac{d_1^2 g(m_1 - m_2)}{18\mu} \quad (\text{II.3})$$

$\mu$  : viscosité dynamique du gaz

Tableau II.2. Vitesses de chute finales pour différents diamètres de particules [30]

Diamètre des particules ( $\mu\text{m}$ )	Vitesse terminale de chute (cm/s)
0.05	$8,71 \cdot 10^{-5}$
0.1	$2,27 \cdot 10^{-4}$
0.2	$6,85 \cdot 10^{-4}$
0.5	$3,49 \cdot 10^{-3}$
1.0	$1,29 \cdot 10^{-2}$
5.0	$3,23 \cdot 10^{-1}$
10.0	$1,29 \cdot 10^{-1}$

Pour les particules de diamètre compris entre 50 et 500 $\mu\text{m}$ , on utilise la résistance à la chute et la relation générale en tenant compte du nombre de Reynolds  $Re$  et de la résistance à la chute  $Rc$  qui s'exprime en fonction de  $Re$ .

$$Rc = 3 \cdot \pi \cdot d_i \cdot \mu \cdot v \left( 1 + \frac{3 Re}{16} \right) \quad (\text{II.4})$$

Avec :  $d_i$  : diamètre de la particule

$v$  : vitesse du gaz (fluide)

$\mu$  : viscosité dynamique du gaz

Pour les très fines particules, la vitesse de chute est supérieure à la valeur donnée par la loi de Stokes. On utilise le facteur de correction de Cunningham ( $f_c$ ) qui est de la forme :

$$f_c = \left( 1 + 2 \frac{\lambda}{d_i} \right) \quad (\text{II.5})$$

Avec :  $\lambda$  : libre parcours moyen des molécules du gaz porteur [28].

### II.2.5.2. Agglomération des particules atmosphériques

Les fines particules dispersées dans l'atmosphère ont tendance à s'agglomérer pour former des particules plus grosses, selon plusieurs mécanismes dont les plus importants sont le mouvement Brownien, la coagulation, et l'impaction –interception. Les particules voient leur vitesse de sédimentation croître lorsque la taille des particules est inférieure à  $0,3 \mu\text{m}$  car la diffusion Brownienne augmente pour des particules de plus en plus fines[29].

#### a) Diffusion Brownienne

Le mouvement Brownien se manifeste pour les particules de faible diamètre inférieur à  $0,3\mu\text{m}$ . les particules comprises entre  $0,3$  et  $5\mu\text{m}$  sédimentent selon le mécanisme d'impaction-interception. Quand on considère la sédimentation des particules comme un flux continu suivant une trajectoire bien définie, c'est le phénomène d'interception. Lorsque la chute des particules est supposée discontinue, c'est le phénomène d'impaction [30].

#### b) Coagulation

Chaque particule d'une certaine taille crée autour d'elle une sphère d'influence. Si une petite particule y pénètre, elle est attirée par la plus grosse et il se forme une région vide de particules autour de la sphère d'influence. Un gradient de concentration est créé et les particules diffusent vers la sphère. Une faible humidité tend à diminuer le taux de coagulation; par contre, si l'humidité est très forte, le taux de coagulation croît avec l'humidité.

Pour deux particules de diamètres très différents, le taux de coagulation est proportionnel à  $\frac{(d + d')^2}{dd'}$  et est très élevé. Ainsi, la petite particule s'agglomère rapidement à la grande particule.

La rapidité de l'agglomération est fonction de probabilité de rencontre entre deux particules est s'exprime par la loi [28] :

$$-\frac{dn_t}{dt} = kn_t^2 \quad (\text{II.6})$$

D'ou

$$\frac{n}{n_0} = \frac{1}{1 + kn_0 t} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$n_0$  : nombre de particules par unité de volume ou concentration au temps zéro.

$n_t$  : concentration au temps  $t$

$k$  : coefficient de coagulation. L'ordre de grandeur de celle-ci étant entre  $10^{-10}$  et  $10^{-2}$   $\text{cm}^3/\text{s}$  ; généralement, elle décroît avec les particules de diamètre inférieur à  $0,1\mu\text{m}$  qui favorisent la coagulation.

$t$  : le temps de séjour des particules dans le milieu considéré

Après intégration on à :

$$\frac{1}{n_t} - \frac{1}{n_0} = kt \quad (\text{II.8})$$

## II.2.6. Les mécanismes d'élimination des particules

Les particules en suspension dans l'air sont éliminées par dépôt sec et/ou dépôt humide.

### a) Les dépôts secs

Le modèle le plus simple des retombées sèches suppose que le flux dirigé vers la surface est proportionnel à la concentration des particules dans l'air à une altitude donnée [31].

Une relation empirique exprime ce dépôt en fonction de ces deux variables [31]:

$$D_s = V_d \cdot X_z \quad (\text{II.9})$$

$D_s$ : flux de retombées des particules en  $\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$

$V_d$ : vitesse de dépôts secs en  $\text{m}/\text{s}$

$X_z$ : concentration des particules à une altitude  $Z$  en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

#### b) Les dépôts humides

Les particules sont entraînées vers le sol par les gouttelettes de pluies en période pluvieuse : c'est le phénomène de lavage des poussières en suspension dans l'air.

On considère ce phénomène de lavage comme un processus en déclin suivant une loi exponentielle donnée par la relation [31] :

$$X(t) = X(0)e^{-\Omega t} \quad (\text{II.10})$$

où :

$X(t)$  : concentration de particules au bout d'un temps  $t$  en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

$X(0)$  : concentration de particules avant précipitation en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

$\Omega$  : coefficient de lavage en  $\text{s}^{-1}$

$t$  : temps de précipitation en  $\text{s}$

Le dépôt humide est défini comme étant la masse de particules entraînées par la pluie et est donné par la relation [31] :

$$D_H = X_m \cdot H \cdot \Omega \cdot t \quad (\text{II.11})$$

avec :

$D_H$  : dépôt humide en  $\mu\text{g}/\text{m}^2$

$X_m$  : concentration moyenne de poussières dans la colonne de hauteur H (m) en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

### II.3. Origine des particules en milieu urbain

Les particules constituent un ensemble très hétérogène dont les caractéristiques physico-chimiques et/ou biologiques sont influencées par les sources d'émission ou par leur processus de formation dans l'atmosphère. Alors que dans le passé, les fumées des processus incomplets de combustion de charbon, notamment du fait des activités industrielles et du chauffage domestique, dominaient la composition de l'aérosol urbain, les particules en suspension dans l'air sont aujourd'hui principalement issues des véhicules automobiles (surtout de type diesel), des usines productrices d'énergie non nucléaire ainsi que des réactions chimiques entre gaz atmosphériques et l'humidité de l'air. Elles sont produites par divers processus comme :

- la transformation des gaz en particules,
- l'altération éolienne,
- la coalescence et croissance des particules,
- les émissions directes,
- les bris des vagues des océans : des sels marins sont injectés dans l'atmosphère sous l'effet d'un pétillage résultant de l'éclatement de bulles à la surface des mers,
- les météorites (matière extra-terrestre)

L'émission directe des particules dans l'atmosphère est le résultat de procédés anthropiques ou naturels.

#### II.3.1. Sources naturelles

Les origines naturelles des particules sont : volcanique, les sels de mer (cristaux salins : NaCl), feux de brousse,

- organique : formes vivantes microscopiques (bactéries, acariens, moisissures), graines aigrettées, pollen, fibres végétales (champignons) ou animales,
- tellurique: argiles, limons, sables fins,
- l'érosion par le vent (particule minérale).

### II.3.2. Sources anthropiques

- les transports (notamment routier) : celles-ci sont généralement constituées de : carbone (carbone si la combustion est incomplète), d'oxydes métalliques fer, aluminium, de silice, et de goudron;
- la combustion de gazole (diesel) et de l'essence des véhicules automobiles ;
- l'utilisation de combustibles domestiques solides : lignite et biomasse
- le chauffage;
- les activités industrielles : (secteur minier, cimenteries, fabrication de céramique, de briques, fonderie, l'électrolyse, la métallurgie et les industries des matériaux de construction);
- de la combustion industrielle (hauts fourneaux et fours) : combustion des produits pétroliers.

### II.4. Effets des poussières

#### II.4.1. Effets sur la santé

De nombreuses études ont été faites ces dernières années sur les effets des poussières en suspension sur le corps humain. Les PM10 et PM2,5, la fraction respirable et la fraction fine des poussières en suspension, se sont révélés être un bon indicateur de la charge polluante déterminante pour la santé. Plus les particules sont fines, plus elles peuvent pénétrer profondément dans les bronches, les bronchioles et les alvéoles, altérer la ventilation pulmonaire et provoquer des réactions inflammatoires. Les particules les plus fines peuvent également passer des poumons dans le système circulatoire. C'est pourquoi des immissions excessives de particules fines portent non seulement atteinte aux voies respiratoires, mais peuvent également influencer l'évolution des maladies cardiovasculaires. Lorsque les immissions de PM10 et de PM2,5 sont élevées, on constate un nombre accru de dyspnées, d'asthme, de bronchites, d'infections des voies respiratoires, de cancers des poumons ainsi que de douleurs et affections des voies respiratoires chez les enfants et les adultes. On note un accroissement des consultations d'urgence et des admissions à l'hôpital pour cause de problèmes respiratoires et cardiovasculaires. Le taux de mortalité prématurée ainsi que la mortalité à long terme (réduction de l'espérance de vie) augmentent également. D'une manière générale, la très grande fraction de

poussières en suspension (PM10 et PM2,5) est moins toxique que les particules très fines provenant des gaz d'échappement.

Les particules de suie du diesel, le benzène, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) font partie des polluants atmosphériques cancérogènes. Ils sont toxiques pour l'homme à partir de doses infimes. Une concentration seuil de non-toxicité n'existant pas. Selon un rapport d'experts publié en Allemagne, les particules de suie du diesel contribuent pour 60 à 70 %, les HAP pour 15 % et le benzène pour 10 % au risque de cancer provoqué par les polluants atmosphériques [9]. Une étude menée aux États-Unis a clairement démontré la relation entre la charge de PM 2,5 et la mortalité due au cancer des poumons.

Recommandations de l'OMS pour les PTS (1992) [32]

Périodes d'exposition	Valeurs moyennes ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
10-15 minutes	500
1 heure	350
24 heures	125
Année	50

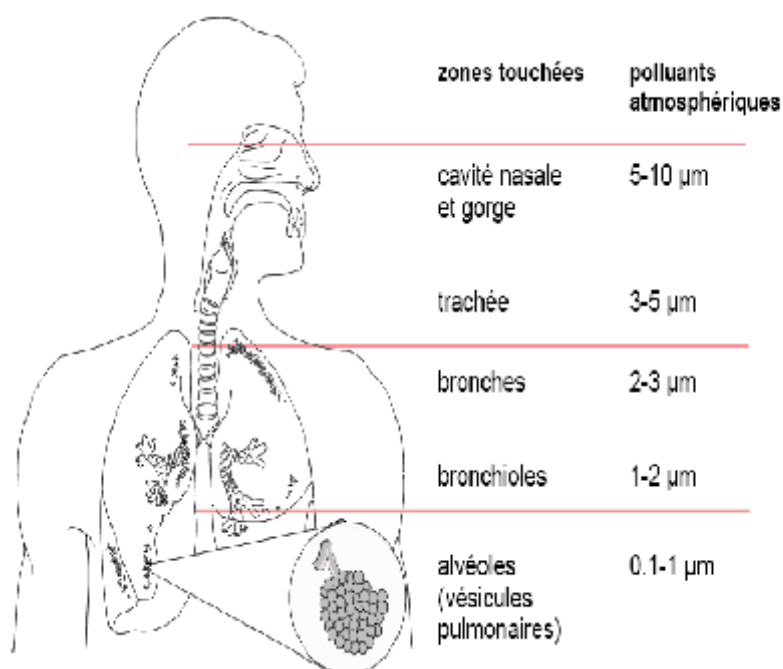


Figure II.1. La pénétration des particules dans l'appareil respiratoires [33]

#### II.4.2. Effets sur la végétation

La pollution de l'air peut créer des troubles graves dans les mécanismes régulateurs des fonctions qui régissent la vie d'une plante (nutrition, croissance, reproduction...). Les polluants pénètrent dans les végétaux par les stomates et les lenticelles des feuilles, ou indirectement par le sol. L'obstruction des stomates, par les fines particules, provoque un lent dépérissement des végétaux. Les polluants non dotés d'un tel pouvoir de pénétration, y compris les impuretés solides en suspension dans l'air (cendre, suies, poussières) et insolubles dans l'eau, sont entraînés par la pluie ou la neige et se déposent sur la végétation et le sol.

Les poussières de ciment, sont dans certains cas nocifs pour la végétation. On relève la présence de croûtes grisâtres sur les plantes situées autour des cimenteries, d'épaisseur variable selon l'importance des retombées. Les croûtes empêchent toute fonction métabolique des feuilles qui finira par la mort des plantes [34].

#### II.4.2. Effet sur les animaux

Actuellement, la pollution de l'air continue à faire des ravages aussi bien dans la faune sauvage que parmi les animaux domestiques. Ainsi, à proximité des usines de métaux non ferreux (fonderie de plomb, de zinc et d'argent et d'autres usines), on a constaté des intoxications de cerfs, de chèvres et d'abeilles. Certaines constatations constituent des phénomènes indicateurs du risque de nocivité pour les hommes, d'autres correspondent à des dommages économiques importants. On peut citer les vers à soie qui s'intoxiquent par l'ingestion des feuilles de mûrie sur lesquelles s'est déposé le fluor. Dans les zones polluées par les rejets des usines de métallurgie non-ferreux, le plomb se dépose sur la végétation et les animaux l'accumulent dans leur corps par l'intermédiaire du fourrage contaminé. La concentration du plomb dans le fourrage frais a atteint dans certains cas 25-45 ppm. Dans le voisinage des installations industrielles, on a signalé aussi des intoxications d'animaux avec le molybdène, le sélénium, l'arsenic et d'autres produits chimiques. Les poussières alcalines provenant des composés de calcaire traités dans une usine de ciment peuvent provoquer des troubles chez les animaux par les lésions du tube digestif. De telles indications se sont déjà produites en Allemagne [35].



## CHAPITRE III. LA POLLUTION MÉTALLIQUE

### III.1. Généralités

Les composés métalliques sont émis dans l'atmosphère par des sources naturelles dont les plus importantes sont les volcans, les embruns marins et l'érosion. Ils résultent également d'activités humaines, telles que la combustion de combustibles fossiles (industrie, chauffage, transport), la métallurgie, l'incinération des déchets, etc.

Ils se répartissent en deux grandes familles [4] :

- Les éléments traceurs : Il s'agit d'éléments dont la toxicité est nulle ou faible (Ca, Si, Fe, Mg,...).
- Les éléments toxiques : dans cette catégorie, on retrouve principalement les métaux lourds (Pb, Cd, Zn, Cu,...) ; ils sont caractérisés par une masse volumique élevée, supérieure à  $5 \text{ g/cm}^3$  ; contrairement à la première catégorie, ces éléments se trouvent à l'état de traces, mais doivent faire l'objet d'une surveillance particulière pour des raisons évidentes de santé publique. La frontière entre ces deux catégories peut parfois être floue. D'autres éléments font l'objet de mesures, alors que leur toxicité n'est pas clairement établie, le but étant simplement la connaissance maximale des poussières atmosphériques. Certains métaux peuvent se révéler être de bons indicateurs de la présence d'un autre métal plus toxique, mais plus difficilement mesurable. Certains métaux peuvent jouer un rôle de catalyseur dans les processus de transformation des polluants. Leur toxicité dépend de :
  - leur concentration,
  - leur nature,
  - la présence d'autres métaux,
  - le type d'organisme qu'ils affectent

## III.2. Propriétés physico- chimiques des métaux lourds

Les propriétés physico- chimiques des métaux lourds tel que le plomb, le cadmium et le cuivre et leurs sources d'émissions sont résumés dans le tableau ci -dessous.

Tableau III.1. Propriétés physico-chimiques des métaux lourds [36]

	cadmium	plomb	cuivre
Numéro atomique	48	82	29
Masse atomique	112,40 g	207,2 g	63,546 g
Masse volumique	8,64 g/cm <sup>3</sup>	11,34 g/cm <sup>3</sup>	8,9 g/cm <sup>3</sup>
Température de fusion	321 °C	328 °C	1080 °C
Température d'ébullition	765 °C	1740 °C	2565 °C
Symbole chimique	Cd	Pb	Cu
Sources et propriétés	<p>-Le cadmium est un élément métallique blanc brillant, malléable et ductile,</p> <p>- il brûle dans l'air avec une flamme vive, formant l'oxyde CdO, poudre brune,</p> <p>- A l'état naturel, on trouve le Cd sous forme de sulfure dans un minéral rare, dans les embruns marins et on le rencontre également avec le zinc dans les blendes et les calamines.</p> <p>- On obtient le cadmium comme sous-produit dans le raffinage des minerais de zinc, la fabrication de pigments, l'incinération des déchets, ainsi que les huiles à moteurs, les pneumatiques, les engrais phosphatés et de la cimenterie, la production d'énergie, le trafic automobile et de l'industrie des métaux non ferreux.</p> <p>Industriellement, on prépare le cadmium par précipitation par le zinc ou par électrolyse.</p>	<p>-Le Pb métallique est mou, malléable et ductile d'un gris bleuâtre : on le met facilement en forme lorsqu'il est chauffé à température modérée. Il présente une faible résistance à la traction, il est mauvais conducteur d'électricité.</p> <p>- il est soluble dans l'acide nitrique, et il est faiblement attaqué par les acides sulfurique (Lorsque le Pb est mis en présence d'acide sulfurique, il se forme une couche protectrice, qui stoppe l'attaque acide) et chlorhydrique. A température ambiante, dans l'air, il réagit lentement avec l'eau pour former l'hydroxyde de plomb.</p> <p>- L'eau ordinaire contient souvent des sels du plomb qui se déposent sur les conduites, empêchant ainsi la formation de l'hydroxyde de plomb soluble. On le trouve naturellement dans les érosions éoliennes, l'activité volcanique, les</p>	<p>- le cuivre est élément chimique métallique de couleur rouge-brun,</p> <p>- le cuivre pur est très malléable et ductile. C'est un excellent conducteur d'électricité,</p> <p>- Il n'est attaqué que par les acides oxydants, tels que l'acide sulfurique à chaud et l'acide nitrique et présente donc une résistance convenable à la corrosion.</p> <p>- Les sources naturelles de Cu sont les érosions éoliennes, l'activité volcanique, les embruns marins et les feux de biomasse [37].</p> <p>- Leurs sources anthropiques sont la production d'énergie, l'industrie des métaux non ferreux, l'incinération des ordures ménagères et industriels et le trafic automobile.</p>

		embruns marins et les feux des biomasses [37].  - Leurs sources anthropiques sont la production d'énergie, l'industrie des métaux non ferreux, l'incinération des ordures ménagères et industrielles et le trafic automobile.	
--	--	---	--

### III.3. Effets des métaux lourds dans les poussières en suspension et les retombées de poussières

A l'exception de quelques composés de métaux lourds, qui sont volatils, ces métaux ne se rencontrent guère dans l'atmosphère que liés à de fines particules de poussières transportées par l'air. Ces fines particules sont susceptibles de pénétrer dans les poumons. Emis sous forme de poussières ou d'aérosols, ces composés de métaux lourds sont soumis à divers processus de dépôt; selon la grosseur des particules, ils parviennent dans les sols et les eaux de surface situés dans les environs immédiats de la source ou sont transportés sur de grandes distances.

De fortes concentrations de métaux lourds représentent un risque pour l'homme et pour l'environnement. En effet, nombre de ces éléments sont toxiques, certains d'entre eux sont cancérogènes (par ex. le cadmium). D'ailleurs, les métaux lourds sont dangereux pour l'environnement à plusieurs égards [38]:

- les métaux lourds ne sont pas dégradables;
- ils sont enrichis au cours de processus minéraux et biologiques, puis s'accumulent dans la nature;
- ils peuvent être absorbés directement par le biais de la chaîne alimentaire, entraînant des effets aigus ou chroniques.

#### III.3.1. Plomb

Le plomb peut être absorbé par l'organisme par inhalation, ingestion, contact cutané (principalement lors d'une exposition professionnelle) ou par transmission à travers le placenta.

Chez l'adulte, environ 10% du plomb ingéré est absorbé dans l'organisme. Les jeunes enfants absorbent de 40 à 53 % du plomb ingéré avec leurs aliments. Les voies de pénétration du plomb dans l'organisme sont la respiration, sous forme de fines particules, d'origine essentiellement automobile (pour plus de 51%), qui atteignent les alvéoles et la voie digestive.

Le plomb issu de l'automobile se trouve en majeure partie sous forme de fines particules minérales (oxyde, sulfate ou halogénures) et en très faible proportion sous la forme organique, telle qu'ajoutée dans l'essence (<1%) [39].

Les plomb-tétraalkylés, additifs des carburants, sont lipophiles et donc facilement absorbés par la peau [40]. Ils sont également rapidement absorbés dans les alvéoles pulmonaires et, malgré une exhalation partielle, les 30 à 40% retenus passent dans le sang; ils seraient désalkylés dans le foie en composés trialkylés, dont la toxicité est liée à la perturbation des échanges ioniques au niveau du cerveau. Ils provoquent aussi l'inhibition des biosynthèses enzymatiques permettant la formation de l'hémoglobine du sang [41] ; il faut, pour cela, atteindre un certain seuil de plombémie. Le seuil dangereux de plombémie sanguine varierait entre 200 et 250 µg/l chez l'enfant [42].

Les composés minéraux du plomb agissent encore sur le système nerveux, provoquant des retards du développement psychique chez des enfants exposés au plomb. 94% du Pb ingéré se fixe sur les os, le reste se répartissant entre le cerveau, les muscles, le foie, les reins (2%) et le sang (4%) [42].

La contamination des aliments par le plomb est principalement due aux retombées de la pollution atmosphérique et à la contamination des sols qui touchent en priorité les végétaux. Les valeurs moyennes de plomb retrouvées dans les aliments ne dépassent généralement pas les valeurs limites admises. Néanmoins, l'alimentation représente la moitié des apports journaliers en plomb chez l'homme vivant dans un environnement peu exposé.

### III.3.2. Cuivre

Le cuivre est un oligoélément indispensable à la croissance des plantes et des animaux. Chez l'être humain, il favorise la production de l'hémoglobine [43]. Une absorption de 2mg serait donc nécessaire. Chez les plantes, il joue un rôle particulièrement important dans la production

de graines, la résistance aux maladies et la régularisation de l'eau. Il est très toxique pour les champignons et les algues. C'est d'ailleurs pourquoi des composés à base de cuivre sont largement utilisés comme agent de préservation du bois et comme fongicide. La plupart des composés du cuivre se déposent et se lient aux sédiments de l'eau ou aux particules du sol. Les composés solubles du cuivre forment la plus grande menace pour la santé humaine. En général, les composés solubles du cuivre se retrouvent dans l'environnement après y avoir été rejeté lors de son application dans l'agriculture. La concentration en cuivre de l'air est en général assez faible. L'exposition au cuivre par la respiration est donc négligeable.

Les animaux, dont l'être humain, ont besoin d'une certaine quantité de cuivre dans leur régime alimentaire, mais une concentration de cuivre très élevée peut être toxique et entraîner des effets délétères. La détérioration des globules rouges, des poumons, du foie et des fonctions pancréatiques est le symptôme le plus courant d'un empoisonnement par le cuivre. Une exposition au cuivre à long terme peut provoquer une irritation au nez, à la bouche et aux yeux et, peut provoquer des maux de tête, des maux d'estomac, des vertiges, des vomissements et des diarrhées, mais selon certains auteurs; l'intoxication chronique n'aurait pas été décrite chez l'être humain normal. De plus le cuivre ne serait ni cancérigène, ni tératogène [44].

### III.3.3. Cadmium

Le cadmium lui-même est un élément très toxique [45] mais heureusement pratiquement absent des effluents automobiles [9]. Le cadmium est d'abord transporté jusqu'au foie par le sang. Là, il se lie aux protéines pour former des complexes qui sont transportés jusqu'aux reins. Il s'accumule dans les reins, où il endommage les mécanismes de filtration. Cela entraîne l'excrétion de protéines essentielles et de sucre hors de l'organisme et d'autres dommages aux reins. Il faut beaucoup de temps pour que le cadmium qui s'est accumulé dans les reins soit excrété du corps. Les autres problèmes que le cadmium peut provoquer sont: diarrhée, douleurs d'estomac, vomissements importants, fracture des os, échec de reproduction et même, probablement, infertilité, problèmes au niveau du système nerveux central, problèmes au niveau du système immunitaire, désordre psychologique, probablement altération de l'ADN ou développement de cancer.

Les divers composés du cadmium présentent des effets toxiques variables selon leur solubilité et donc leur facilité d'assimilation par l'organisme. Ainsi, le chlorure de cadmium, soluble, apparaît plus toxique que le sulfure de cadmium très insoluble (La Commission des Communautés européennes a décidé de classer le sulfate et l'oxyde de cadmium comme cancérogènes "probables" par inhalation pour l'homme et le sulfure de cadmium comme cancérogène "possible" pour l'homme). Les sels de cadmium, très peu volatils, sont présents dans l'air sous forme de très fines particules solides (fumées ou poussières). L'absorption d'une faible quantité de ces substances est suivie de troubles gastro-intestinaux (nausées, vomissements, diarrhée). Ces troubles peuvent, dans les cas sévères, se compliquer d'une déshydratation grave de l'organisme ; Ainsi l'inhalation de fumées ou de poussières respirables (d'un diamètre inférieur à  $5 \mu\text{m}^3$ ) à des concentrations supérieures à  $200 \text{ mg/m}^3$  et de façon plus ou moins prolongée peut provoquer rapidement un trouble pulmonaire grave [9].

#### III.3.4. Zinc

Le zinc est une substance très commune qui est présente naturellement. Beaucoup d'aliments contiennent du zinc. L'eau potable contient aussi une certaine quantité de zinc, qui peut être plus élevée lorsque l'eau est stockée dans des réservoirs en métal. Il n'est généralement pas considéré comme un élément toxique aux concentrations couramment rencontrées dans l'air, il inhiberait même l'effet toxique de métaux comme le cadmium et le cuivre [46]. Il joue un rôle essentiel dans le métabolisme de l'être humain. Le zinc est par exemple vital pour le fonctionnement correct de plus de 200 enzymes, pour la stabilisation de l'ADN et l'expression des gènes, ainsi que pour la transmission des signaux du système nerveux. Le corps humain contient 2 à 3 g de zinc (pour 7 g de fer), que l'on retrouve partout dans le corps mais avec toutefois des concentrations plus élevées dans les muscles, le foie, les reins, les os et la prostate. La dose journalière de zinc recommandée est de 12 mg/jour pour une femme adulte et de 15 mg/jour pour un homme adulte. Les aliments présentent des teneurs diverses en zinc. Lorsqu'on absorbe trop peu de zinc on peut alors avoir une diminution des sensations de goût et d'odeur, les blessures cicatrisent lentement et on peut avoir des plaies [47]. Trop de zinc peut tout de même provoquer des problèmes de santé importants, comme des crampes d'estomac; des irritations de la peau, des vomissements, des nausées, de l'anémie, endommager le pancréas et perturber le

métabolisme des protéines. Une exposition intensive au chlorure de zinc peut provoquer des désordres respiratoires.

### III.3.5. Les autres métaux : manganèse, nickel, métaux précieux

Le manganèse, sous forme de l'élément ou de ses dérivés minéraux, est un des produits les moins toxiques pour les mammifères et les oiseaux [48]. A forte dose, comme dans les mines de Mg, il peut occasionner pneumonie et atteinte du système nerveux central [9].

Le nickel est considéré comme un élément carcinogène, jouant un rôle d'initiateur et de promoteur, provoquant des cancers des sinus, des fosses nasales et des bronches chez les sujets fortement exposés. Les autres phénomènes constatés concernent surtout les allergies cutanées et l'effet tératogène du nickel-carbonyle [9].

Le chrome présente quelques analogies avec le nickel : il agit sur le foie, les reins et est aussi un élément carcinogène [49].

Les autres métaux précieux utilisés dans les catalyseurs automobiles (Pt, Pd, Rh) ne sont généralement pas considérés comme toxiques à l'état métallique et le risque de méthylation par les microorganismes est infime, d'après la National Academy of Sciences [50]; seuls leurs sels, dont certains complexes chlorés pouvant provoquer des allergies [51], ont une action physiologique et sont peu employés en pharmacologie [52].

### III.4. Propriétés physico-chimiques des métaux alcalins et alcalinoterreux

Le tableau III.2 présente quelques propriétés physico-chimiques du calcium, du baryum, du lithium, du sodium, et du potassium et leurs principales sources d'émission

Tableau III.2. Propriétés physico-chimiques des métaux alcalins [36]

	<b>Baryum</b>	<b>Calcium</b>	<b>Potassium</b>	<b>Lithium</b>	<b>Sodium</b>
Numéro atomique	56	20	29	3	11
Masse atomique	137,34 g	40,078 g	63,546 g	6,941 g	22,9898 g
Masse volumique	3,5 g/cm <sup>3</sup>	1,55 g/cm <sup>3</sup>	8,9 g/	0,53 g/cm <sup>3</sup>	0,97 g/cm <sup>3</sup>
Température de fusion	725 °C	842 °C	1080 °C	180 °C	98 °C
Température d'ébullition	1 640 °C	1484 °C	2565 °C	1 342 °C	883°C
Symbole chimique	Ba	Ca	K	Li	Na
Sources et Propriétés	<p>- le baryum est un élément chimique mou, argenté très réactif. Il est le 14<sup>ème</sup> élément le plus abondant dans la croûte terrestre ; Il réagit violemment avec l'eau et se corrode rapidement à l'air humide.</p> <p>- Ses composés les plus importants sont les minéraux sulfate de baryum et BaCO<sub>3</sub>.</p> <p>- Les niveaux de Ba naturellement présent dans l'environnement sont très faibles. On ne peut trouver de grandes quantités de</p>	<p>- Le calcium est un métal alcalinoterreux gris mou. C'est le cinquième élément le plus abondant dans la croûte de la terre.</p> <p>Le calcium n'est pas naturellement trouvé dans son état élémentaire; on le trouve la plupart du temps dans des systèmes de sol comme pierre à chaux, gypse etc.</p> <p>-il peut être extrait par électrolyse à partir du fluorure de calcium. Il brûle avec une flamme jaune-rouge et forme un enduit blanc de nitride une fois exposé à l'air. Il réagit avec de l'eau,</p>	<p>Le potassium est un métal alcalin métallique argenté-blanc mou; il est très électropositif; il se produit naturellement et est lié à d'autres éléments en eau de mer, dans les feux de biomasse [53] et beaucoup de minerais.</p> <p>-Il s'oxyde rapidement dans l'air et est très réactif, particulièrement dans l'eau produisant l'hydrogène.</p> <p>Le K compose environ 2.4% du poids de la croûte de terre, on ne le trouve jamais libre en nature, on le trouve dans la</p>	<p>- Le lithium, élément métallique blanc argenté,</p> <p>- À l'état naturel, le lithium est un mélange des isotopes 6Li (12 p. 100) et 7Li. Il cristallise dans le système cubique centré.</p> <p>- C'est le plus léger des solides et le plus dur des métaux alcalins</p> <p>- C'est un métal mou : il est rayé par le plomb.</p> <p>- il forme essentiellement des composés ioniques. Comme les autres métaux alcalins, il s'allie à l'hydrogène pour former</p>	<p>- le baryum est un élément chimique mou, argenté très réactif. Il est le 14<sup>ème</sup> élément le plus abondant dans la croûte terrestre ; Il réagit violemment avec l'eau et se corrode rapidement à l'air humide.</p> <p>- Ses composés les plus importants sont les minéraux sulfate de baryum et BaCO<sub>3</sub>.</p> <p>- Les niveaux de Ba naturellement présent dans l'environnement sont très faibles. On ne peut trouver de grandes quantités de</p>



	<p>baryum que dans les sols et les aliments tels que les noix, les algues, les poissons et certaines plantes. La quantité de baryum qui est détectée dans la nourriture ou l'eau n'est en général pas assez élevée pour devenir un souci pour la santé.</p> <p>- Les composés du baryum sont utilisés par les industries du pétrole, du gaz, dans les boues de forage, des peintures, des briques, des tuiles, le trafic routier, la combustion du charbon, du verre et du caoutchouc.</p>	<p>déplaçant l'hydrogène et formant l'hydroxyde de calcium.</p> <p>-on le trouve dans la fabrication de ciment, la production d'énergie.</p>	<p>plupart des types de sol.</p> <p>-Il est employé en engrais, la fabrication de verre.</p>	<p>LiH, résistant aux températures élevées.</p> <p>- Il réduit de nombreux oxydes. En présence de fluor, il s'enflamme à température ambiante.</p>	<p>baryum que dans les sols et les aliments tels que les noix, les algues, les poissons et certaines plantes. La quantité de baryum qui est détectée dans la nourriture ou l'eau n'est en général pas assez élevée pour devenir un souci pour la santé.</p> <p>- Les composés du baryum sont utilisés par les industries du pétrole, du gaz, dans les boues de forage, des peintures, des briques, des tuiles, le trafic routier, la combustion du charbon, du verre et du caoutchouc.</p>
--	--	--	--	--	--

III.5. Effet des métaux alcalins et alcalinoterreux

III.5.1. Sodium

Le sodium est nécessaire à l'homme pour maintenir l'équilibre hydrique de l'organisme. Il est aussi nécessaire pour le fonctionnement des muscles et des nerfs. Trop de sodium peut endommager nos reins et augmenter les risques d'hypertension artérielle.

Le contact du sodium avec de l'eau, y compris la transpiration cause la formation des vapeurs d'hydroxyde de sodium, qui sont fortement irritantes pour la peau, les yeux, le nez et la gorge. Ceci peut causer l'éternuement et la toux. Les expositions très graves peuvent occasionner une respiration difficile, une toux ou une bronchite. Le contact avec la peau peut donner des

démangeaisons, des picotements, des brûlures et des dommages permanents. Le contact avec les yeux peut avoir comme conséquence des dommages permanents voire la perte de vue.

Cet élément est essentiel pour la vie des plantes et des animaux, puisqu'il est dans le squelette des animaux, dans les dents, dans la coquille des œufs, dans le corail et dans de nombreux sols [54].

### III.5.2. Baryum

Les conséquences du baryum sur la santé dépendent de la solubilité dans l'eau des composés. Les composés du baryum qui se dissolvent dans l'eau peuvent être nocifs pour la santé. L'absorption d'une quantité importante de ces composés peut provoquer des paralysies et, dans certains cas, la mort. De petites quantités de ces composés peuvent provoquer des difficultés respiratoires, une augmentation de la pression artérielle, des modifications du rythme cardiaque, une irritation de l'estomac, une faiblesse musculaire, des modifications des réflexes nerveux, une inflammation du cerveau et du foie, des dommages aux reins et au cœur. On n'a pas démontré que le baryum pouvait provoquer des cancers chez l'homme. Il n'y a pas de preuve que le baryum puisse provoquer l'infertilité ou des problèmes à la naissance. La plupart des ennuis de santé sont provoqués par le fait de respirer de l'air qui contient du sulfate de baryum ou du carbonate de calcium [55].

Certains composés du baryum qui sont libérés lors des procédés industriels se dissolvent facilement dans l'eau et on peut les trouver dans les lacs, les fleuves et les rivières. Comme ils sont solubles dans l'eau, ces composés peuvent parcourir de longues distances. Lorsque les poissons et autres organismes aquatiques absorbent les composés de baryum, ce dernier s'accumule dans leur corps. Les composés de baryum qui sont persistants restent en général à la surface des sols ou dans les sédiments au fond des eaux. En général, on trouve des niveaux faibles de baryum dans les sols, ces niveaux peuvent être plus élevés dans les sites de déchets dangereux.

### III.5.3. Potassium

Le potassium joue un rôle important dans le système hydrique de l'homme et il intervient dans les fonctions nerveuses. Quand nos reins fonctionnent mal, il y a une accumulation de potassium ce qui peut entraîner une perturbation des battements du cœur. Il peut avoir des effets quand vous inspirez. L'inhalation de la poussière peut irriter les yeux, le nez, la gorge, les poumons avec l'éternuement, la toux et la gorge endolorie. Des expositions plus élevées peuvent causer une accumulation de liquide dans les poumons, ceci pouvant causer la mort. Le contact avec la peau et l'œil peut causer des brûlures graves menant à des dommages permanents [56].

En même temps que l'azote et le phosphore, le potassium est un des macro minéraux essentiels pour la survie des plantes. Sa présence est de grande importance pour l'état du sol, la croissance des plantes et l'alimentation animale. Sa principale fonction dans la plante est d'entretenir la pression osmotique et la taille de cellules, influençant de ce fait la photosynthèse et la production énergétique aussi bien dans l'ouverture des stomates que dans l'alimentation d'anhydride carbonique, la turgescence de la plante et la translocation des aliments. En tant que tel, l'élément est exigé dans des proportions relativement grandes pour la croissance de la plante.

Si le niveau de potassium est trop bas, on peut mettre évidence ces différents symptômes: la croissance des plantes est restreinte, la floraison réduite et on observe un abaissement des rendements [55]. Les niveaux hydrosolubles élevés de potassium peuvent gêner la germination des jeunes plantes, empêcher la prise d'autres minerais et réduire la qualité de la récolte [55].

### III.5.4. Calcium

Le calcium est un composant essentiel pour les os du corps humain et pour les dents. Il aide aussi le fonctionnement des nerfs et des muscles du corps humain. Mais la consommation abusive de calcium (plus de 2,5 g de Ca pur par jour) sans avis médical peut conduire au développement de caillots rénaux, de scléroses rénales et à des problèmes au niveau des vaisseaux sanguins. L'expérience a prouvé que nous avons besoin d'un apport quotidien de 1000 mg de calcium afin de préserver la masse osseuse. Ceci est vrai aussi bien pour les hommes que pour les femmes après leur ménopause. Après la ménopause, il est recommandé d'avoir un apport journalier de 1500 mg [57].

## III.5.5. Lithium

Le lithium peut être absorbé par l'organisme par:

- inhalation: (sensation de brûlures, toux, respiration difficile)
- ingestion: (crampes et douleurs abdominales, sensation de brûlures, nausées, vomissements).
- contact cutané: (rougeurs, brûlures, douleurs).

Il est corrosif pour les yeux, la peau et le système respiratoire. L'inhalation de la substance peut causer un œdème pulmonaire. Les symptômes de l'œdème pulmonaire ne se manifestent souvent qu'après quelques heures et ils sont aggravés par un effort physique. Le repos et les observations médicales sont cependant essentiels [58].

## **CHAPITRE IV. DESCRIPTION DU MILIEU URBAIN A CONSTANTINE**

### IV.1. Présentation de la ville

Constantine est la capitale du nord-est de l'Algérie et le chef-lieu de wilaya situé dans les monts de Constantine. La ville s'étend sur un plateau rocailleux à plus de 640 m au-dessus du niveau de la mer et est entourée par les gorges profondes du Rummel. L'oued est enjambé par un viaduc et par de nombreux ponts qui permettent de le franchir au nord et au nord-est. Nid d'aigle perché sur un étroit plateau rocheux, limité par des escarpements vertigineux, le site de Constantine est impressionnant. Que l'on arrive par le sud ou par le nord, on découvre avec étonnement cette brèche qui s'enfoncé brutalement au cœur de la ville : les gorges du Rummel. Constantine apparaît alors comme perchée au-dessus du sol [36].

### IV.2. Constantine et la pollution urbaine

L'antique «Cirta» est, aujourd'hui, une grande agglomération de 762 000 habitants qui s'étend sur 5500 ha. Comme de nombreuses métropoles, Constantine a connu une extension de son tissu urbain est une industrialisation aux dépens des terres agricoles.

Cependant, cet attrait est accompagné d'effets négatifs sur son atmosphère, notamment la forte densité du trafic automobile et ses polluants, les industries du bâtiment et leurs poussières (cimenterie, carrières) et les grandes amplitudes thermiques causant, ainsi, de sérieux problèmes de santé à ses habitants.

Les principales sources fixes de pollution se situent entre 4 et 10 km environ autour du centre ville de Constantine.

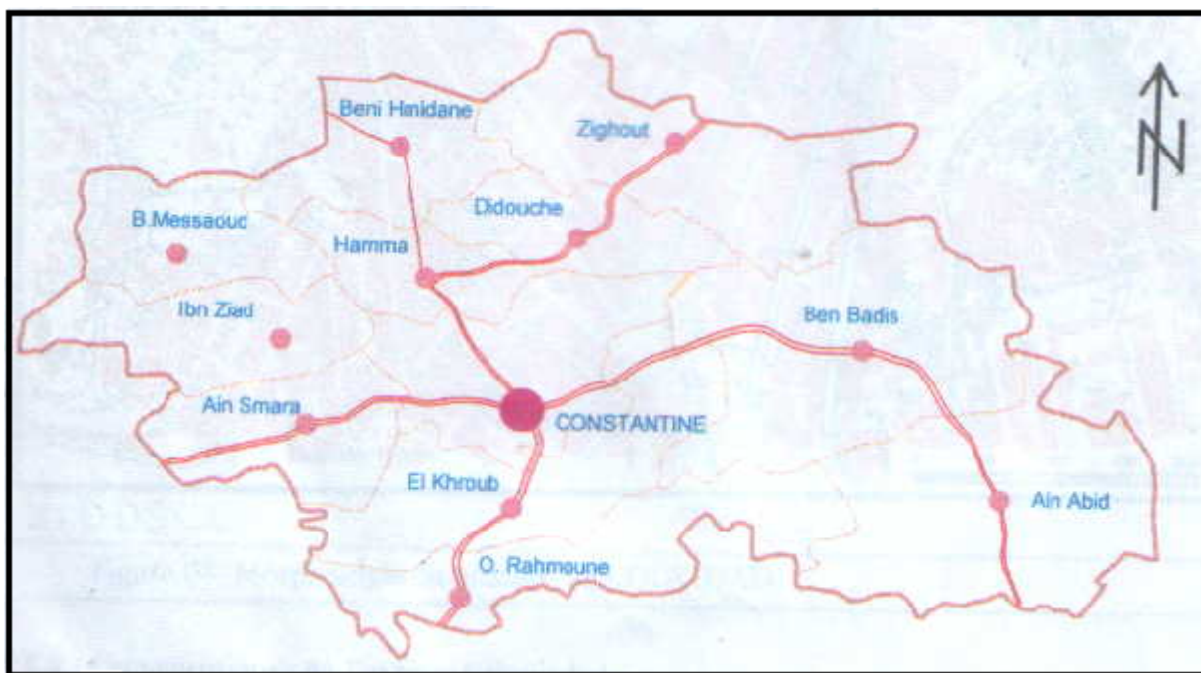
#### IV.2.1. Les rejets domestiques et les décharges

Un des aspects de la dégradation de l'environnement dont souffre Constantine est celui des décharges sauvages le long des routes (4<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> Km) à proximité des forêts, sur les bords des oueds et dans certains quartiers de la ville.

La décharge publique de Constantine située à une dizaine de kilomètre de l'ouest au sud de la ville, sur la RN n° 5, est opérationnelle depuis 1987 où plus de 500 tonnes d'ordures y sont déposées quotidiennement [59].

#### IV.2.2. Les industries

L'industrie est un facteur de croissance économique, mais, aussi de dégradation de l'environnement pour la ville de constantine. Les principales industries sont, de l'ouest au sud, la zone industrielle de palma (74 ha), le Rummel (agroalimentaires ; matériaux de construction), les carrières et les décharges publiques;, du sud à l'est, on y trouve les zones industrielles de Boumerzoug (41 ha) et Oued Hamimime (métallurgie et mécanique), les industries de matériaux de constructions d'El Khroub (carrières) et les dépôts de carburants de Bounouara. Enfin au nord, se trouvent les carrières et la cimenterie de Hamma-Bouziane.

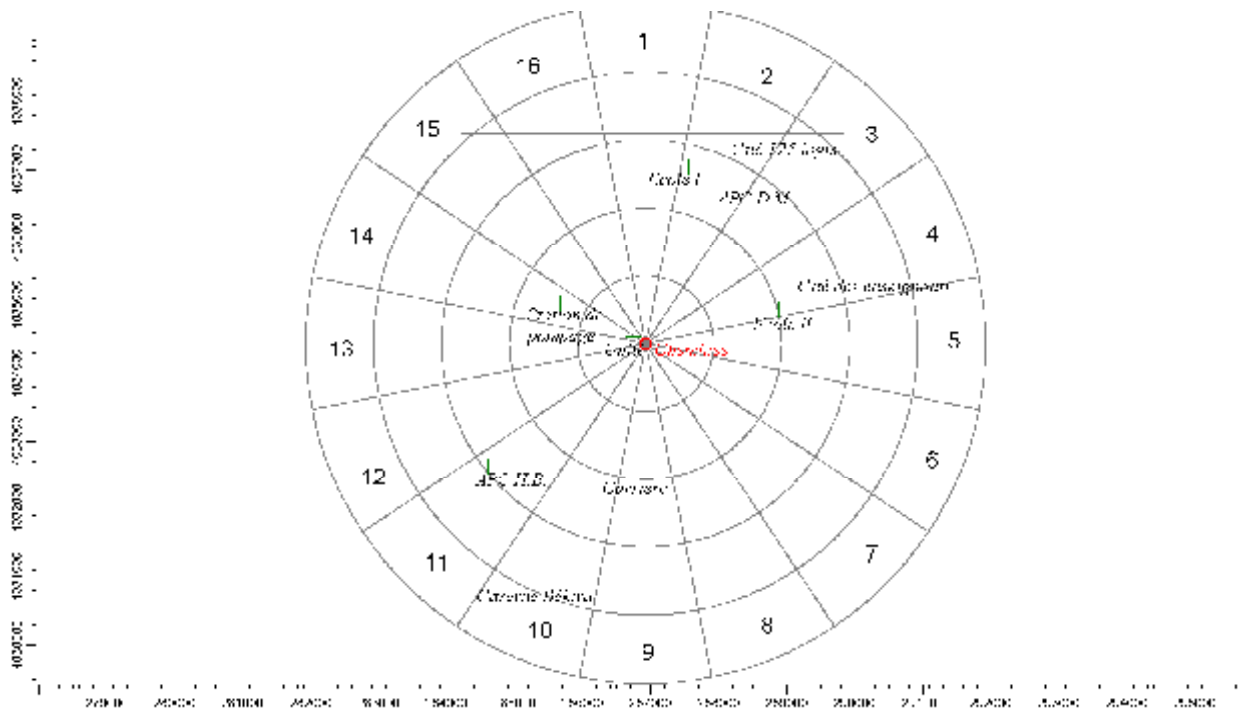


Carte IV.1 Constantine et ses environs

Parmi les sources industrielles se trouvant dans le voisinage de la ville de Constantine, on citera l'exemple de la cimenterie de Hamma Bouziane, située à moins de 12 km de Constantine et à 7 km de Hamma Bouziane. Elle s'étale sur une superficie de 129 ha et renferme différents ateliers de production et de stockage. Elle se trouve sur la route nationale N°5 ; sa position est 36°25'53,34" Nord, 006°37'45,78" Est, à une altitude de 550 mètres, où la fabrication d'une tonne

de ciment nécessite 1600 kg de matière première, 80 à 85 tonnes d'équivalent pétrole (TEP) et 90 à 110 kilowatts/heure d'énergie électrique. Des projets de fin de cycle traitant de la pollution particulaire et métallique au voisinage de la cimenterie ont été réalisés récemment (2001-2003) par des ingénieurs en Ecologie et Environnement [60].

Un réseau de jauges de dépôt, comprenant 10 sites, a été installé dans la région de Constantine autour de la cimenterie de Hamma Bouziane. La Figure (IV.1) illustre l'emplacement des dix postes de prélèvement. Les collecteurs sont installés sur des toits, ou terrasses inaccessibles, et loin des cheminées afin d'éviter de fausser les résultats de l'étude par une source ponctuelle proche du poste.



FigureIV.1. Secteurs de localisation des différents postes d'échantillonnage par rapport aux 16 secteurs de vent [60]

Dans l'industrie du ciment, les principaux rejets dans l'air sont constitués de gaz de combustion des fours de cuisson ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ) et, surtout, d'émissions de poussières à tous les stades de production du ciment; de l'extraction de matière jusqu'à l'ensachage en passant par le broyage des matière (calcaire, pierre à chaux et argile).

Les gaz et les fines particules qui sont rejetés par la cimenterie causent des dégâts à Hamma Bouziane et ses environs; les particules se déposent sur les cultures (arboriculture et

maraîchage) et les gaz étouffent la région et provoquent des maladies respiratoires et de peau. Ces émanations arrivent jusqu'à la ville de Constantine. Le tableau IV.1 permis de mettre en évidence l'importance des retombées atmosphériques totales qui traduit une pollution excessive.

Tableau IV.1. Flux moyens des retombées totales ( $\text{mg}/\text{m}^2\text{j}$ ) et des métaux lourds ( $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{j}$ ) par poste durant toute la période d'échantillonnage (6/8/2002-21/5/2003) [60]

Station	Poussières	Cd	Cr	Ni	Pb	Mg	Co	Cu
Cimenterie DJ, T (unité) HB	720,70	16,88	78,03	116,51	629,19	296,03	222,21	958,10
Cimenterie DJ, T (carrière) HB	701,83	24,58	70,39	127,19	520,25	288,19	348,25	660,34
APC Didouche Mourad	634,43	14,35	82,56	120,50	663,05	282,90	357,51	898,69
APC Hamma Bouziane	823,04	15,13	85,35	137,04	543,52	340,53	407,32	681,72
Bekira	1053,63	19,15	95,48	130,53	620,19	299,70	292,42	781,73
Station de pompage, HB	562,80	14,44	79,97	112,74	497,45	246,94	344,62	677,15
école primaire B, Ab DM	1343,89	16,79	89,11	128,54	710,17	343,67	362,43	772,43
Ecole secondaire BB, DM	517,82	14,37	78,30	127,50	704,66	272,56	357,24	817,73
Cité universitaire, DM	686,21	7,99	76,35	136,49	801,85	239,95	310,13	738,65
Cité 125 logts, DM	1320,06	6,07	54,90	103,94	430,08	214,10	97,44	749,37

Les retombées au niveau d'un site seront d'autant plus élevées que ce dernier est soumis à la fois à l'influence d'un sol nu et à celle de la cimenterie (cheminée et carrière). En terme de



retombées métalliques, six parmi les sept métaux étudiés possèdent des normes, dont cinq présentent des risques pour le sol car leurs flux de dépôt dépassent les niveaux acceptables. Ce sont, par ordre décroissant de dépassement des normes : le cadmium, le plomb, le nickel, le cuivre et le manganèse.

#### IV.2.3. La destruction des espaces verts

La croissance démographique a engendré de manière directe l'extension des tissus urbains. Programmées ou illicites, de standing ou précaires, les cités à la périphérie de la ville ont toutes conduit à soustraire des terres à l'agriculture et aux forêts.

Sous cette pression, les banlieues se sont multipliées et la ville s'est densifiée pour satisfaire les besoins en logements collectifs et individuels.

Ce processus a accéléré la création des villes périphériques du Khroub, de Ain S'mara, de Didouche Mourad et de Hamma Bouziane. Ces extensions urbaines, souvent anarchiques, sont un facteur de désordre et de dégradation de l'environnement. Toutes ces opérations et actions d'occupation du sol se font au détriment du couvert végétal, si nécessaire à la vie et à la qualité de l'air.

Dans le domaine des espaces verts, la situation est préoccupante dans les grands ensembles d'habitations. Dans certaines cités, certains ont privatisé anarchiquement et fragmenté les espaces publics extérieurs qui auraient dû être des éléments de confort et d'embellissement de ces cités béton.

#### IV.2.4. La circulation automobile

Constantine, ville accidentée par excellence et enclavée dans certains quartiers, est réputée très difficile en matière de circulation routière. La pollution d'origine automobile est très forte eu égard à la densité du tissu urbain et à la étroitesse de sa voirie. Ce sont des facteurs aggravants d'une mauvaise aération.

En effet, la saturation du site, la topographie tourmentée de la ville et l'accroissement du trafic automobile sont les premières causes de la croissance des gaz émis par les voitures.

L'important parc automobile de la ville de Constantine, évalué à 110 000 véhicules risque de connaître un fort accroissement à l'avenir (en raison des facilités d'acquisition de véhicules). Conjugué à l'absence de volonté à rouler propre dans une ville qui étouffe par les gaz des bus et des voitures, il laisse planer un avenir plutôt incertain quand à la qualité de l'air que respire les Constantinois [61].

Le parc automobile avec quelque 3900 taxis et 1200 bus (tous gabarits) qui dégagent des fumées, nettement au dessus du tolérable, pose non seulement le problème de l'encombrement des artères de la ville mais rend l'accès à celle-ci problématique voire impossible [61].

Tableau IV.2. Mode d'exploitation et âge du parc taxi [62]

Mode d'exploitation		Taxis individuels	Taxis collectifs urbains	Taxis collectifs inter-urbains	Taxis collectifs fourgons	Taxis collectifs inter-wilaya	Total
Nombre de taxis		1012	1857	736	04	600	4209
Age du Parc taxis	-de 5 ans	304	281	202	01	00	788
	5-10ans	242	352	152	01	103	850
	10-15ans	346	362	109	02	301	1102
+de15ans		120	862	273	00	196	1451

Cette question semble avoir été prise en considération par les autorités locales comme en témoignent les projets de désengorgement du centre ville et de ses environs immédiats (échangeurs, projet du tramway, du pont....).

# *Matériels et Méthodes*

**CHAPITRE V. MATERIEL ET METHODES**

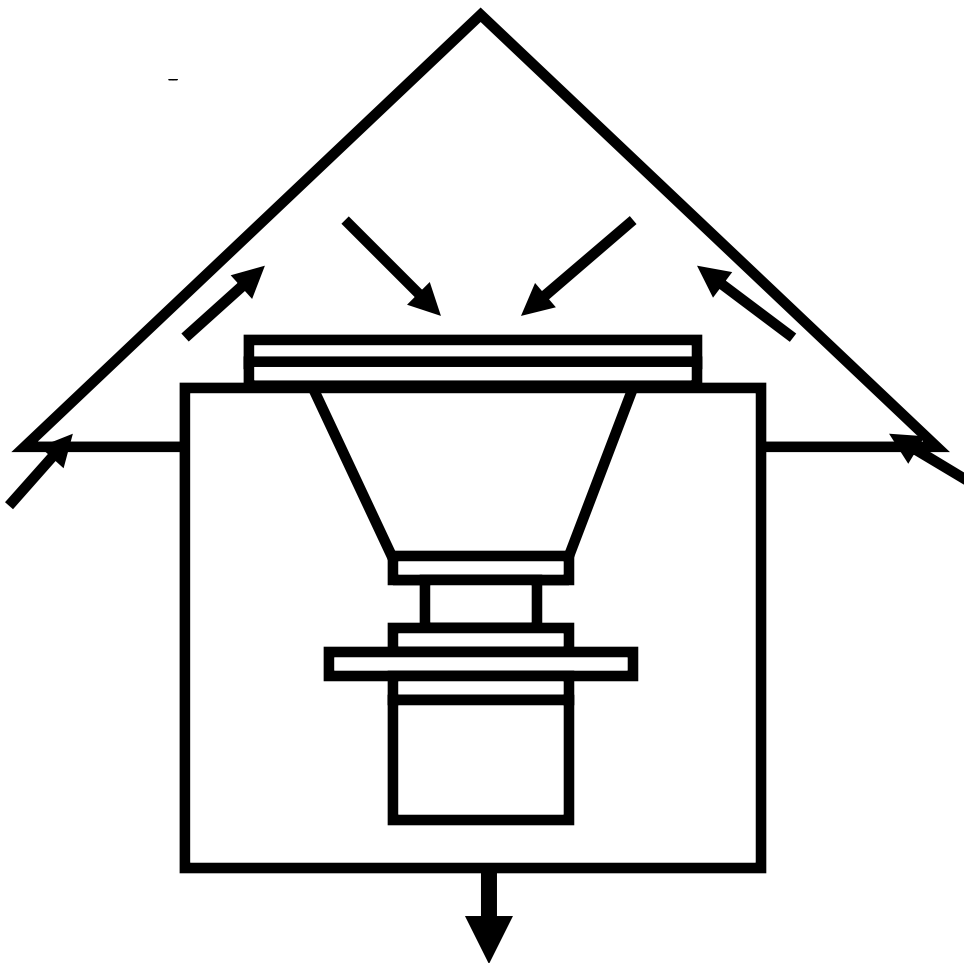
## V.1. Collecteur à grand volume

## V.1.1. Appareillage

Le collecteur à grand volume est une unité compacte qui consiste principalement en :

- ❖ Un logement protecteur,
- ❖ Un moteur électrique,
- ❖ Un ventilateur de grand volume,
- ❖ Un détendeur de filtre capable de supporter un filtre de 20 cm x 25 cm,
- ❖ Un contrôleur de débit à travers l'instrument devant varier entre 1,1 et 1,7 m<sup>3</sup>/min

Lors de l'opération, les poussières totales en suspension (PTS) aspirées pénètrent à travers un intervalle situé entre l'abri et l'échantillon (figure V.1).



FigureV.1. Schéma représentatif du collecteur

L'entrée de l'air dans le collecteur est uniforme sur tous ses côtés. La vitesse de l'air nécessaire à un captage efficace des PTS est comprise entre 20 et 35 cm/s.

La forme du toit du collecteur permet à l'air aspiré d'être bien distribué sur la surface d'un filtre où les PTS sont piégées.

#### V.1.2. Emplacement

Le collecteur est installé en contrebas du Coudiat sur une terrasse à une altitude de 12 m. Cette avenue est bordée par des sièges d'institutions publiques dont celui de la direction de la santé (DDS). Ce site, sécurisé et situé au milieu du tissu urbain et loin de toute source directe de pollution, offre toutes les garanties, quant à la qualité des mesures.

#### V.1.3. Durée de prélèvement

Le prélèvement du filtre est effectué pendant 24 heures  $\pm$  1 heure, tous les 6 jours. Il est emmené à la fin du prélèvement au laboratoire pour subir des analyses chimiques. La période du prélèvement s'étale sur deux périodes : la première période allant du 25-26/11/2004 au 06-07/10/2005 et la deuxième période allant de 07-08/05/2006 au 26-27/06/2006.

#### V.1.4. Calibrage de l'appareil

L'intérêt de ce calibrage est la détermination du débit de fonctionnement qu'on utilise dans les calculs des concentrations de particules totales en suspension (PTS) (voir annexe 1).

#### V.1.5. Analyse du filtre

- a) Découper 3 bandes de 2,5 cm x 25cm
- b) Ajouter à l'aide d'une pipette en verre un volume de 30 ml de la solution acide HCl/HNO<sub>3</sub>
- c) Mettre les 3 bandes dans un bêcher de 150 ml, en s'assurant de bien les immerger dans la solution acide

**Note :** la solution acide : 70% HCl

37% HNO<sub>3</sub>,

- d) Placer le bêcher sur une plaque chauffante à l'intérieur d'une haute aspirante, agiter doucement en couvrant le bêcher par un verre de montre pendant 30 min
- e) Enlever le bêcher et laisser refroidir
- f) Rincer les parois du bêcher avec un volume de 30 ml d'eau distillée
- g) Laisser reposer pendant 30 min pour permettre une diffusion des acides des résidus du filtre vers l'eau
- h) Filtrer la solution
- i) Compléter à 60 ml avec de l'eau distillée et bien agiter. La solution est prête pour l'analyse [63].

## V.2. Les collecteurs de précipitations

### V.2.1. Principe

Les collecteurs de précipitation (Norme NF X 43-006) permettent de recueillir les retombées liquides ou solides, en suspension ou en solution. Ils permettent de connaître les taux globaux de poussières (g/m<sup>2</sup>.j), les taux de poussières solubles et insolubles, le pH et la conductivité de la solution, les quantités de métaux et le volume des précipitations sur le site d'étude.

### V.2.2. Appareillage

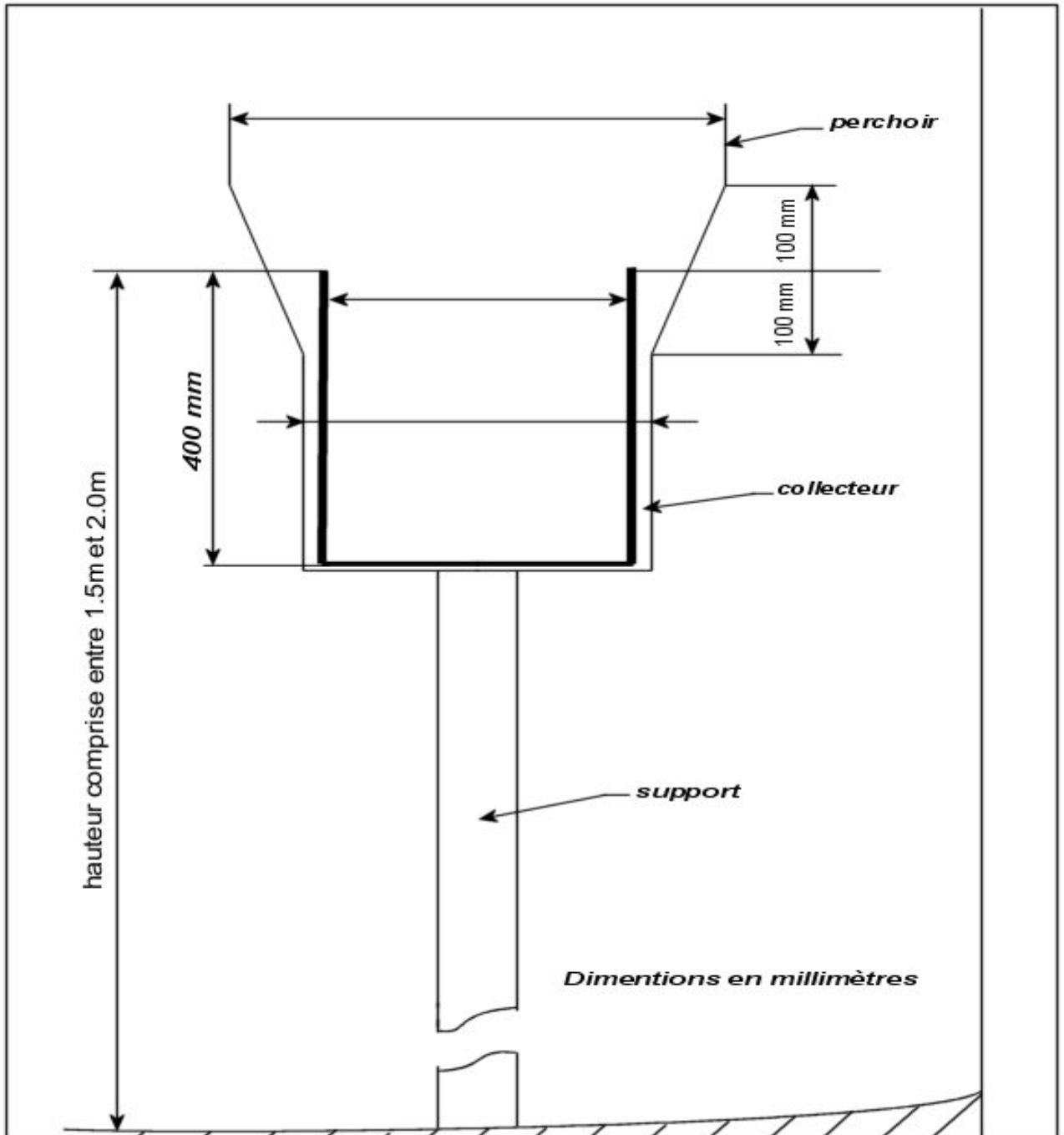
Les collecteurs sont des récipients cylindriques à fond plat, communément appelés jauge OWEN de 20 cm de diamètre intérieur en bas et 40 cm de hauteur, le bord supérieur étant chanfreiné à 45° vers l'extérieur (voir figure V.4) ; avec une surface réceptrice de 314 cm<sup>2</sup>.

### V.2.3. Emplacement

Les collecteurs sont fixés sur des supports rigides qui doivent être placés de manière parfaitement horizontale. Le haut du support doit être entre 1,5 et 2 m du sol. Aucune protection contre le vent ne doit être installée [64] [65].

Les jauges de dépôt sont installées au niveau des terrasses de trois sites (le Centre Hospitalier Universitaire de Constantine CHUC, l'APC de Daksi Abdesslem et la Direction

de la Santé (DDS) du boulevard Belouizdad. La période du prélèvement s'étale du 21/10/2004 au 21/06/2006.



FigureV.2. La jauge de dépôt selon la norme AFNOR [66]

#### V.2.4. Durée de prélèvement

La jauge contenant un volume de 10 l d'eau distillée est exposée à l'air libre pendant 1 mois (30 jours  $\pm$  1 jour). Les eaux de pluies et les poussières sédimentables sont recueillies dans la jauge.

#### V.2.5. Transport des échantillons

La solution obtenue est transvasée dans un récipient en polyéthylène propre et sec et transportée au laboratoire pour les différentes analyses.

#### V.2.6. Traitement des échantillons

Le contenu est passé à travers un tamis de 1 mm d'ouverture de maille afin d'éliminer les éléments étrangers (feuilles, insectes). Les parties solubles et insolubles sont séparées par filtration sur papier filtre (MCE 0,4  $\mu$ m, millipore en ester de cellulose) et séchées à l'étuve à une température comprise entre 100 et 110°C. Le filtrat est supposé contenir seulement la partie soluble des retombées. La partie insoluble est soumise à une digestion acide.

**Note :** il faut laver le collecteur afin d'enlever toutes les particules.

##### V.2.6.1. Traitement de la fraction soluble

Dans un bêcher de 400 ml, un volume de 200 ml du filtrat est évaporé à sec dans l'étuve, à une température de 105°C pendant 24 heures. Le dépôt soluble recueilli au fond du bêcher est solubilisé dans 20 ml d'acide nitrique (2N). La solution obtenue est filtrée puis complétée à 50 ml avec de l'eau distillée. Elle est ainsi prête pour l'analyse [67].

##### V.2.6.2. Traitement de la fraction insoluble

Tous les filtres sont pesés, afin de déterminer la masse des dépôts, mis dans un bêcher de 500 ml, contenant 50 ml de l' $\text{HNO}_3$  (2N) et 50 ml de  $\text{HCl}$ (2N), pour solubiliser les métaux insolubles dans l'eau pendant 48 heures. Le contenu du bêcher est filtré et le volume est réduit à 40 ml dans l'étuve à une température de 80°C. La solution obtenue est complétée à 50 ml avec de l'eau distillé. La fraction insoluble est prête pour l'analyse [67].



### V.2.6.3. Analyses

Les solutions obtenues après chaque traitement sont soumises à une analyse au photomètre à flamme pour les métaux alcalins, une analyse au spectromètre d'absorption atomique pour les métaux lourds (voir annexe 4 et 5).

## *Résultats et Discussion*

## **CHAPITRE VI. RESULTATS ET DISCUSSION**

### VI.1. Logiciels Rammet view et WRPLOT view

Rammet est un logiciel qui traite les données météorologiques. Il calcule les moyennes horaires des paramètres relevés selon le format choisi et les périodes définies par l'utilisateur.

Les moyennes résultantes sont intégrées par WRPLOT pour générer les roses des vents et les précipitations correspondantes, traduisant la fréquence d'apparition des vents dans les seize secteurs de la rose (secteur de 22,5°), 6 classes de vitesse réparties entre 0,5 et 11 m/s et 6 classes de précipitation réparties entre 1 et 22 mm/h.

Il affiche, aussi, la vitesse moyenne du vent, les précipitations moyennes durant la période considérée et le volume horaire des vents calmes en pourcentage.

#### VI.1.1. Traitement des données météorologiques

Les paramètres météorologiques horaires recueillis par la station sont saisis dans le logiciel Rammet, sous le format Samson.

Après traitement des données météorologiques par Rammet, WRPLOT nous a permis de générer les différentes roses des vents ainsi que les roses de précipitations de la période d'étude.

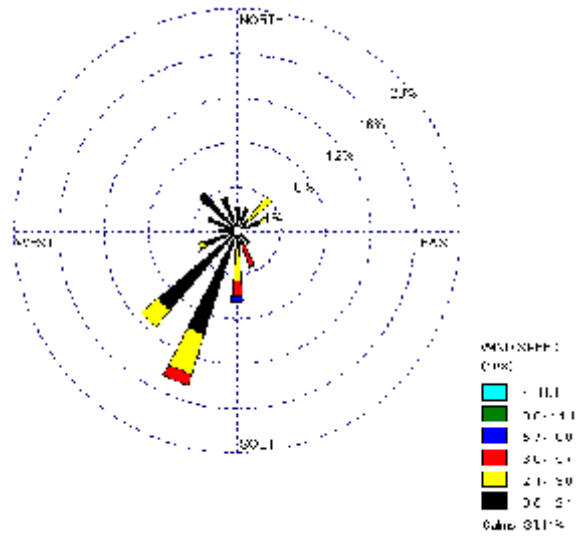
Les paramètres météorologiques qu'on a utilisés sont :

- Vitesse des vents (m/s)
- Direction des vents (degrés)
- Température (°C)
- Précipitation (mm)
- Pression atmosphérique (mbar)
- Humidité relative (%)
- Plafond des nuages

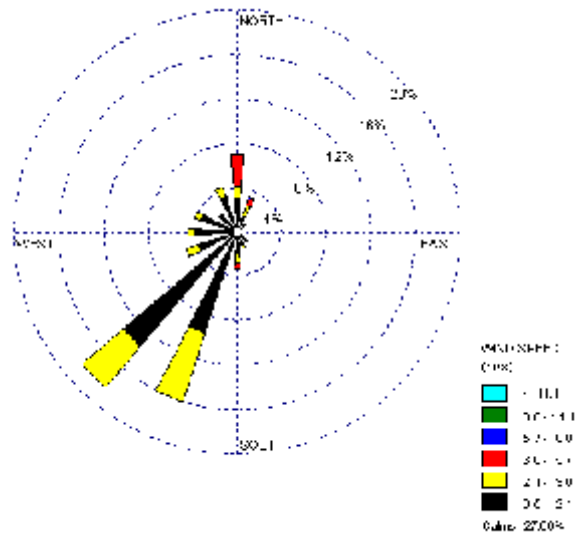
#### VI.1.2. Période d'échantillonnage

La période d'échantillonnage s'étale du 21/10/2004 au 21/06/2006.

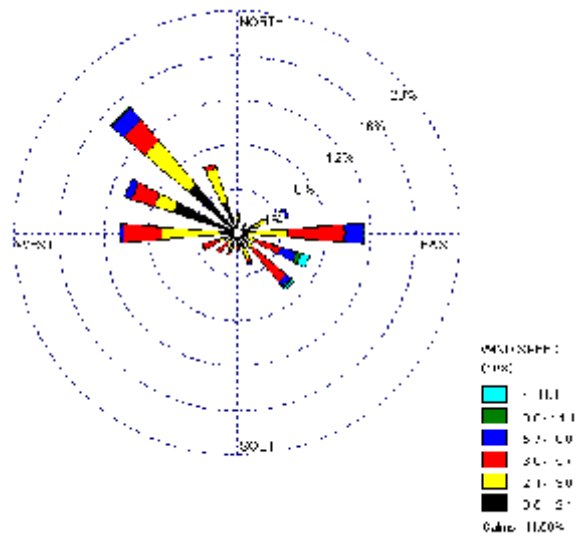
Les roses des vents de la période d'échantillonnage totale et des vingt échantillonnages sont illustrées dans les figures VI.1 et VI.1 (a) à VI.1 x (t) respectivement.



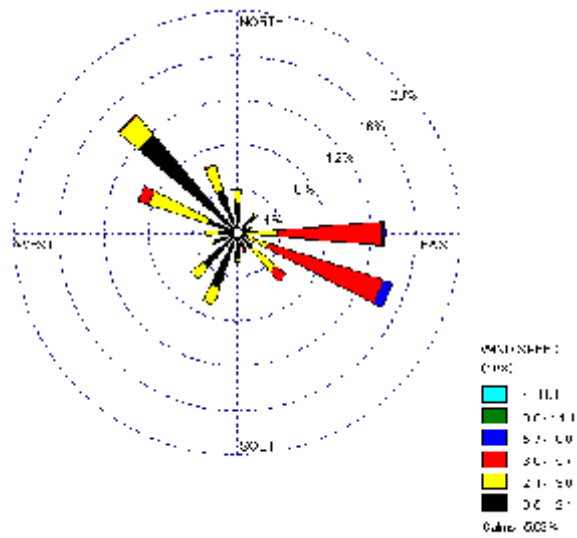
(a)



(b)



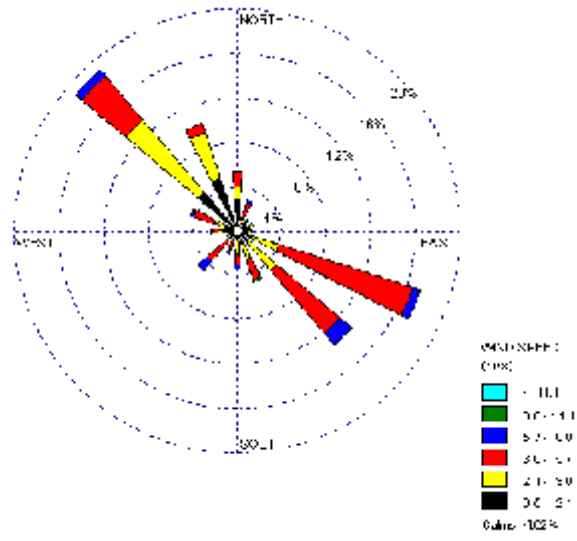
(c)



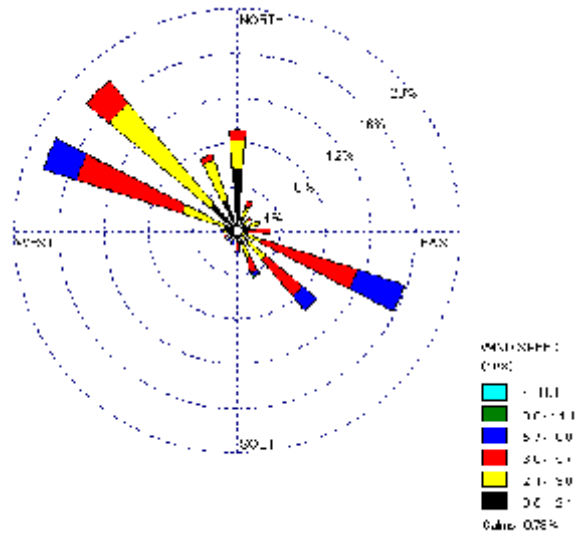
(d)

Figure V.1. Rose des vents

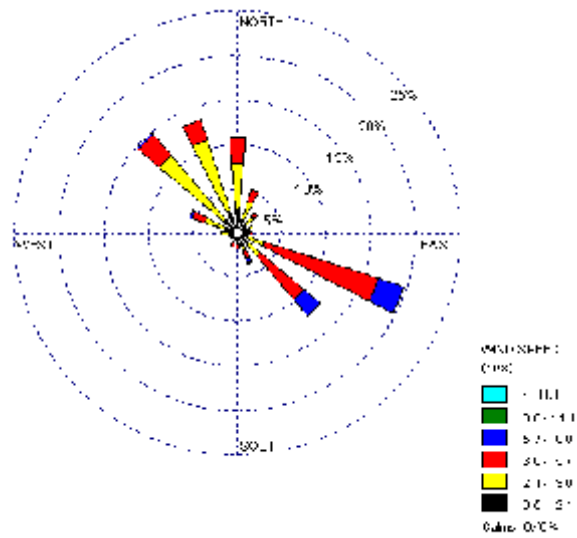
- (a) : 1<sup>ère</sup> prélèvement du 21/10/2004 au 21/11/2004
- (b) : 2<sup>ème</sup> prélèvement du 21/11/2004 au 21/12/2004
- (c) : 3<sup>ème</sup> prélèvement du 21/12/2004 au 22/01/2005
- (d) : 4<sup>ème</sup> prélèvement du 22/01/2004 au 21/02/2005



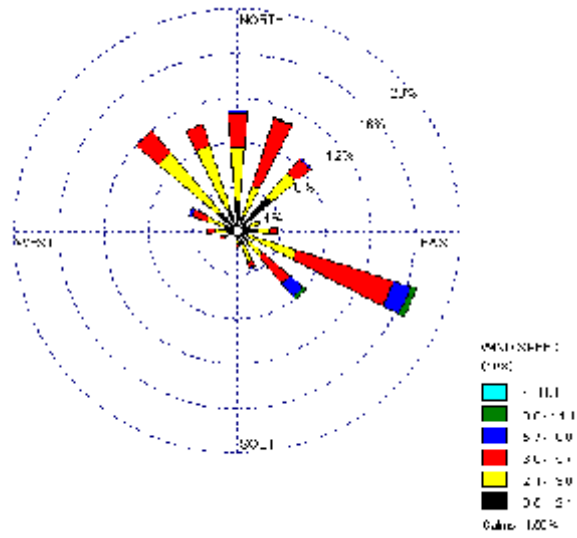
(e)



(f)



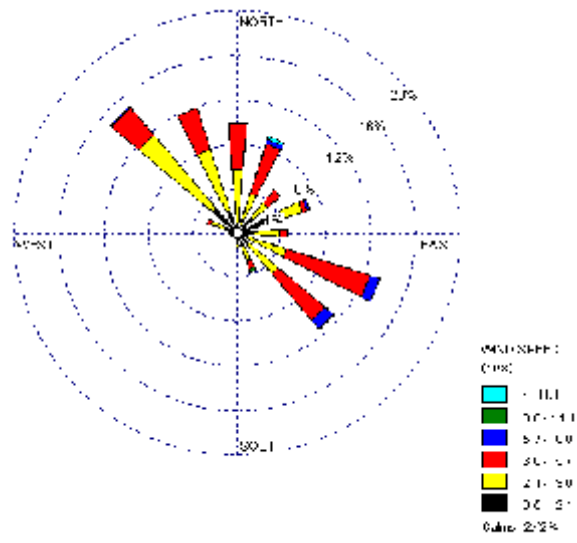
(g)



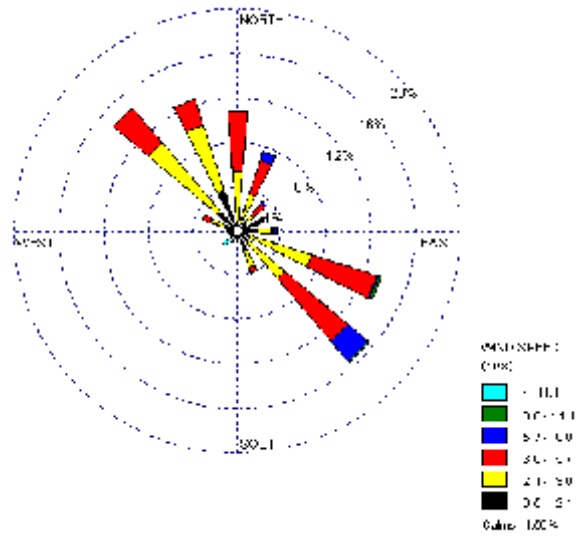
(h)

Figure V.1. Rose des vents

- (e) : 5<sup>ème</sup> prélèvement du 21/02/2004 au 21/03/2005
- (f) : 6<sup>ème</sup> prélèvement du 21/03/2005 au 21/04/2005
- (g) : 7<sup>ème</sup> prélèvement du 21/04/2005 au 21/05/2005
- (h) : 8<sup>ème</sup> prélèvement du 21/05/2005 au 21/06/2005

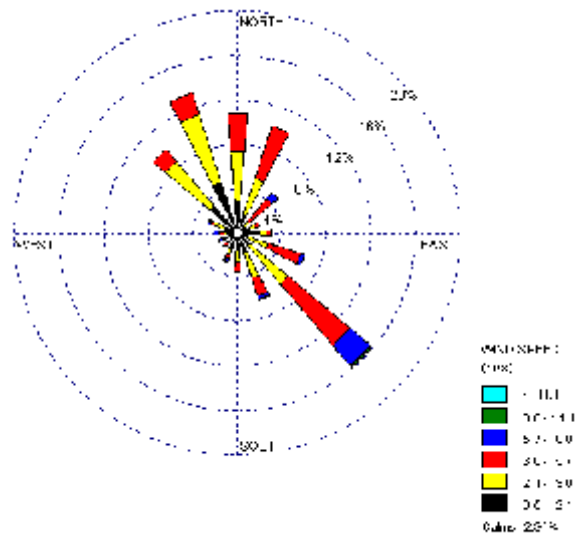


(i)

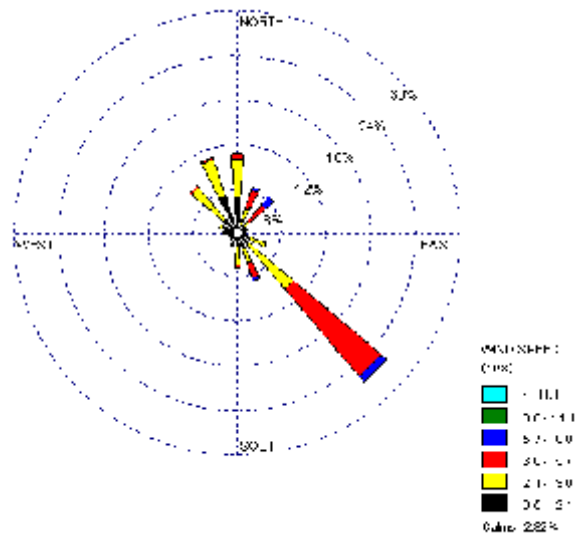


(j)





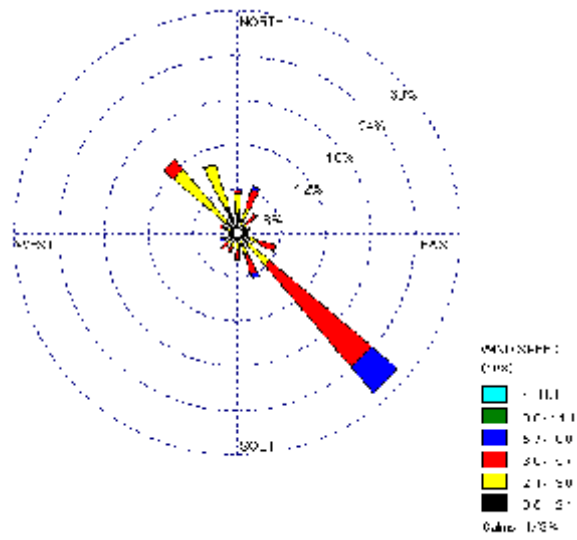
(k)



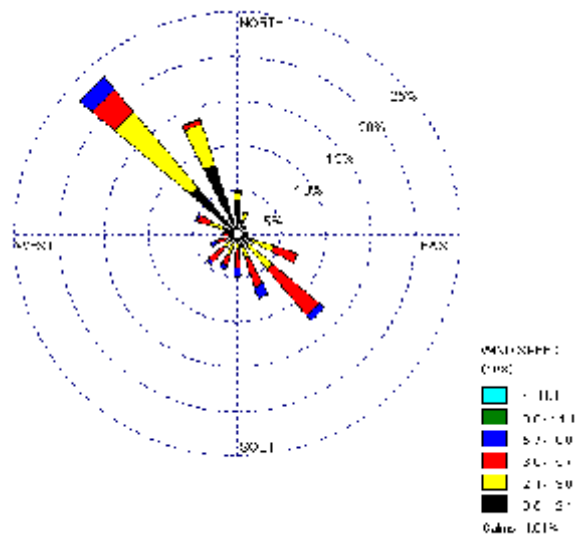
(l)

Figure V.1. Rose des vents

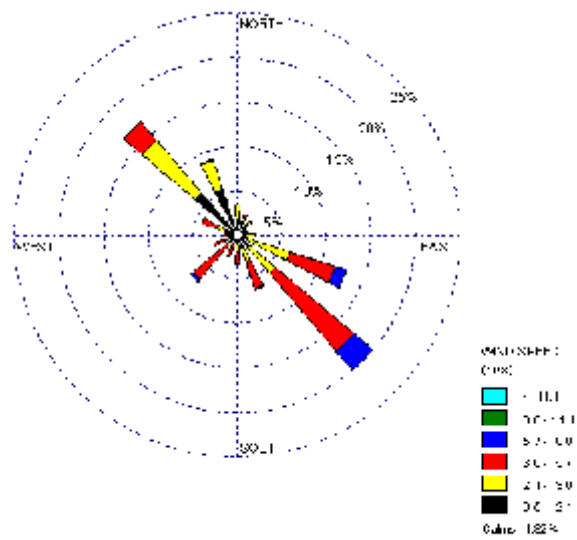
- (i) : 9<sup>eme</sup> prélèvement du 21/06/2005 au 21/07/2005
- (i) : 10<sup>eme</sup> prélèvement du 21/07/2005 au 21/08/2005
- (j) : 11<sup>eme</sup> prélèvement du 21/08/2005 au 21/09/2005
- (k) : 12<sup>eme</sup> prélèvement du 21/09/2005 au 21/10/2005



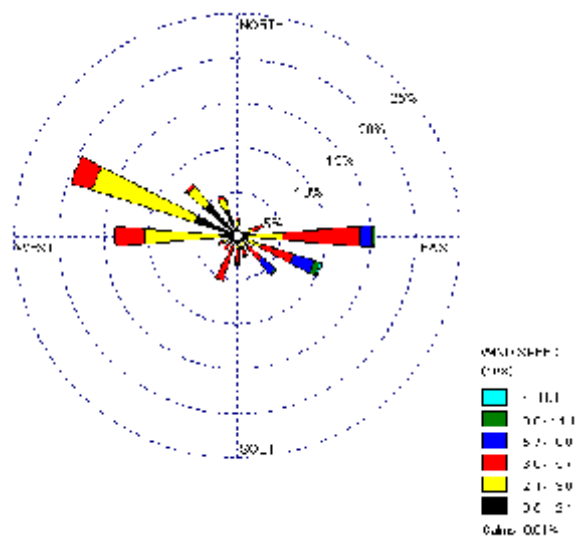
(m)



(n)



(o)



(p)

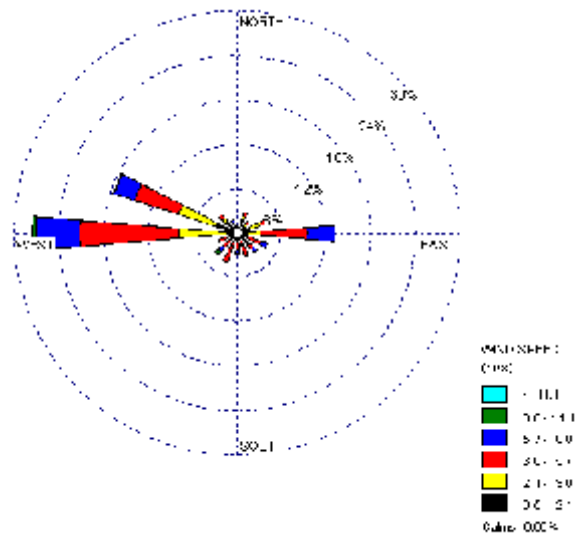
Figure V.1. Rose des vents

(l) : 13<sup>ème</sup> prélèvement du 21/10/2005 au 21/11/2005

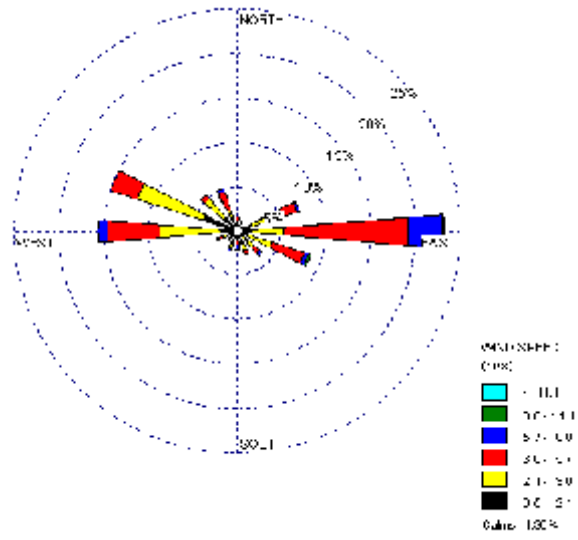
(m) : 14<sup>ème</sup> prélèvement du 21/11/2005 au 21/12/2005

(n) : 15<sup>ème</sup> prélèvement du 21/12/2005 au 21/01/2006

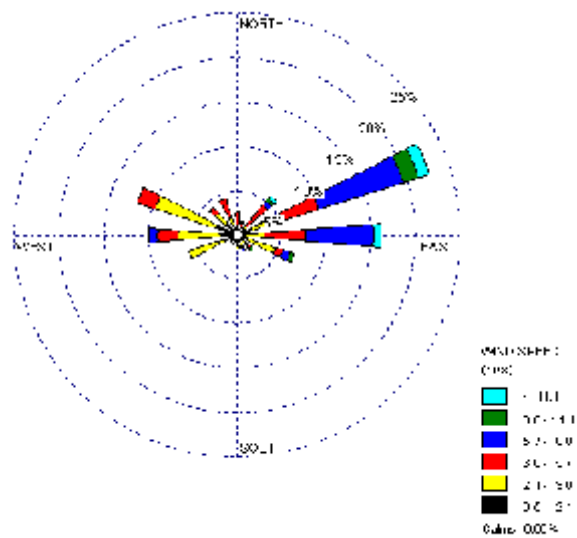
(o) : 16<sup>ème</sup> prélèvement du 21/01/2006 au 21/02/2006



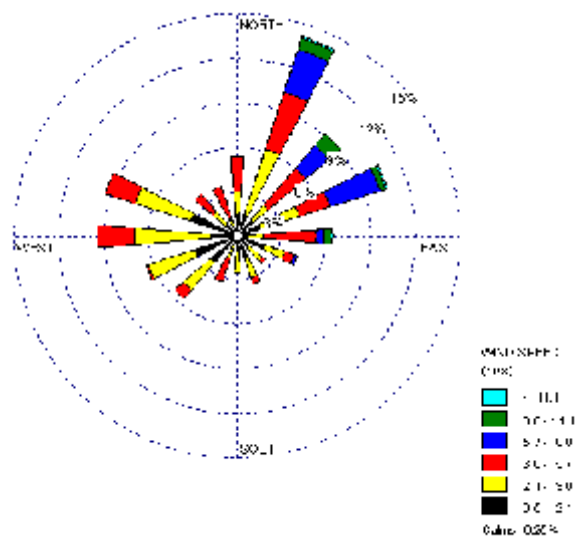
(q)



(r)



(s)



(t)

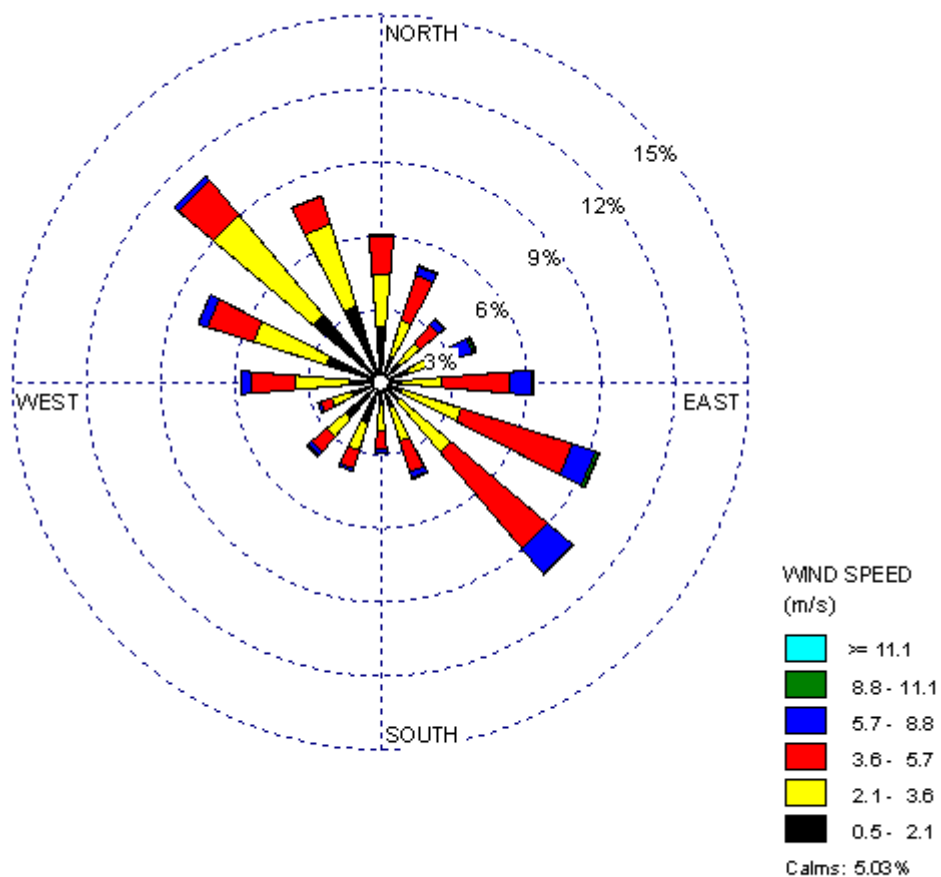
Figure V.1. Rose des vents

(p) : 16<sup>eme</sup> prélèvement du 21/02/2006 au 21/03/2006

(q) : 17<sup>eme</sup> prélèvement du 21/03/2006 au 22/04/2006

(r) : 18<sup>eme</sup> prélèvement du 22/04/2006 au 20/05/2006

(s) : 19<sup>eme</sup> prélèvement du 20/05/2006 au 21/06/2006



Nombre d'heure: 14832 h

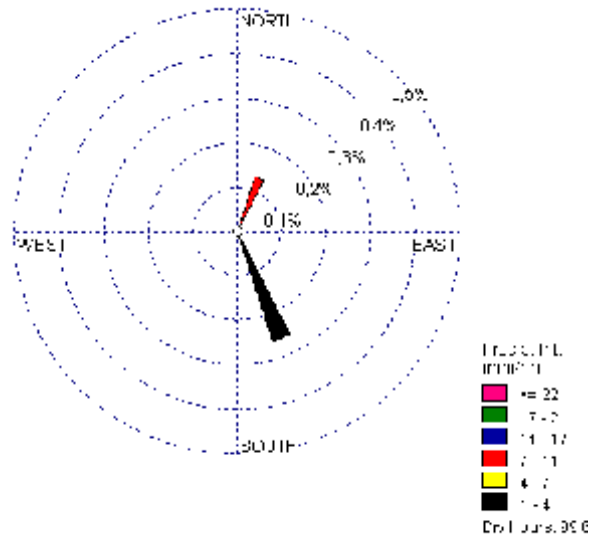
Temps calme: 746 h

Temps calme: 5,03%

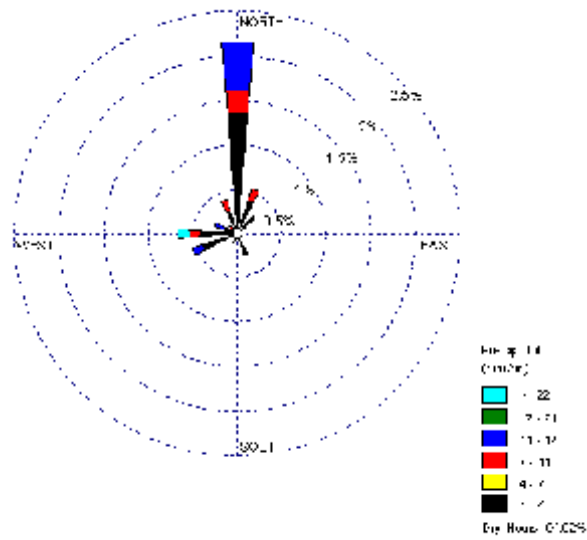
Vitesse moyenne: 3,27 m/s

Figure VI.1. Rose des vents du 21/10/2004 au 21/05/2006

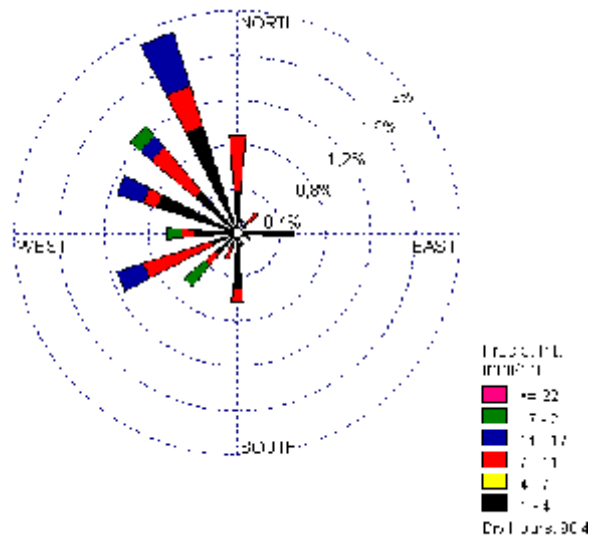
Les roses des précipitations de la période d'échantillonnage totale et des et des vingt échantillonnages sont illustrées dans les figures VI.2 et VI.2 (a) à VI.2 (t) respectivement.



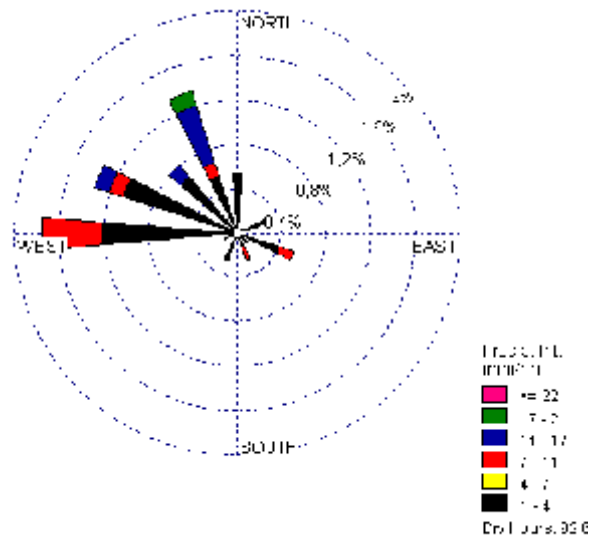
(a)



(b)



(c)

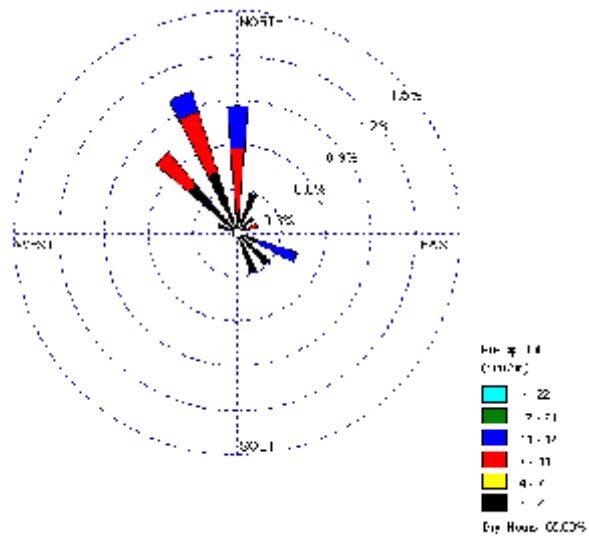


(d)

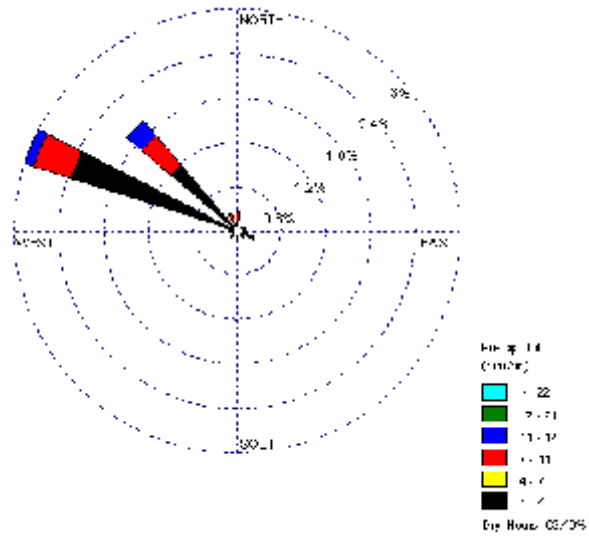
## VI.2. Rose des précipitations

- (a) : 1<sup>ère</sup> prélèvement du 21/10/2004 au 21/11/2004
- (b) : 2<sup>ème</sup> prélèvement du 21/11/2004 au 21/12/2004
- (c) : 3<sup>ème</sup> prélèvement du 21/12/2004 au 22/01/2005
- (d) : 4<sup>ème</sup> prélèvement du 22/01/2004 au 21/02/2005

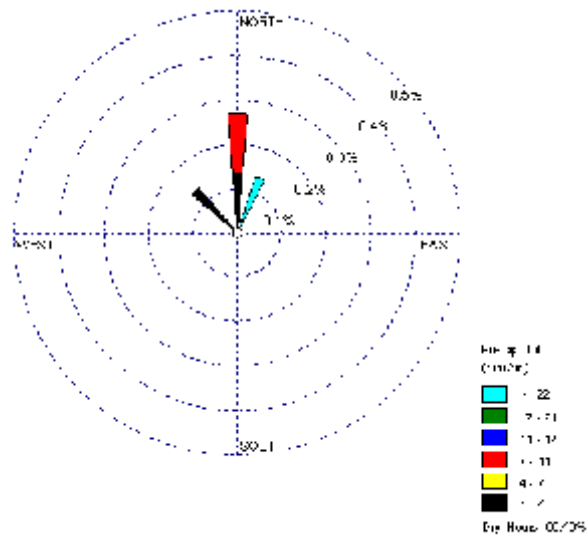




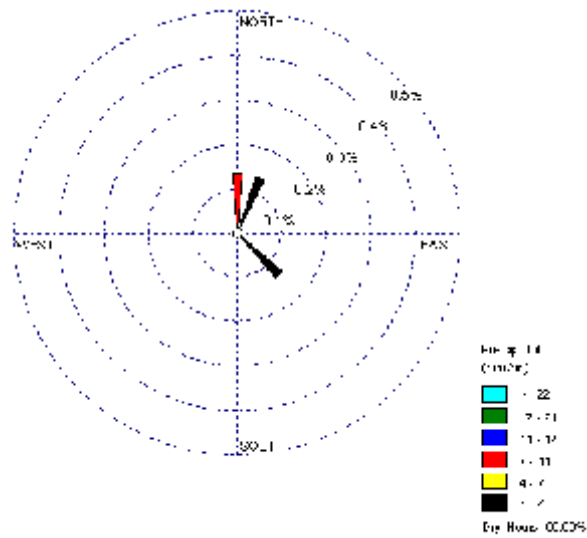
(e)



(f)



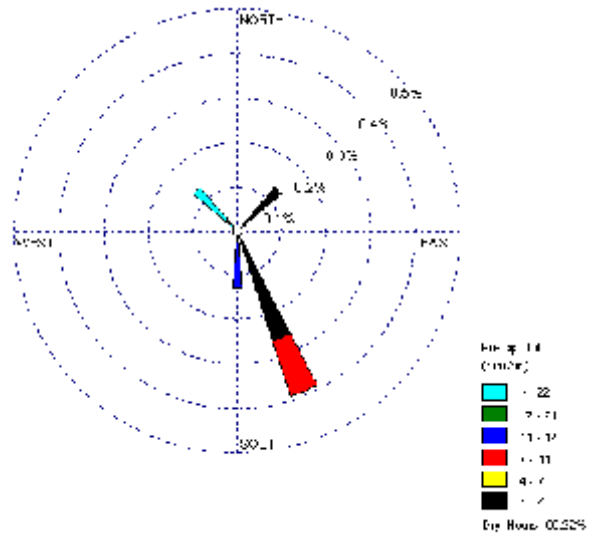
(g)



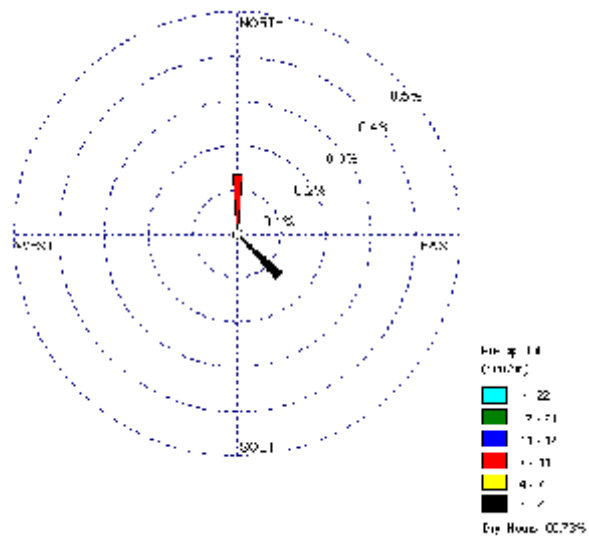
(h)

### VI.2. Rose des précipitations

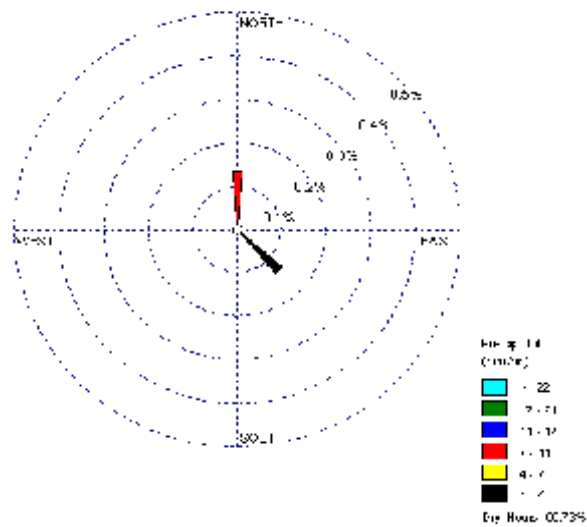
- (e) : 5<sup>ème</sup> prélèvement du 21/02/2004 au 21/03/2005
- (f) : 6<sup>ème</sup> prélèvement du 21/03/2005 au 21/04/2005
- (g) : 7<sup>ème</sup> prélèvement du 21/04/2005 au 21/05/2005
- (h) : 9<sup>ème</sup> prélèvement du 21/06/2005 au 21/07/2005



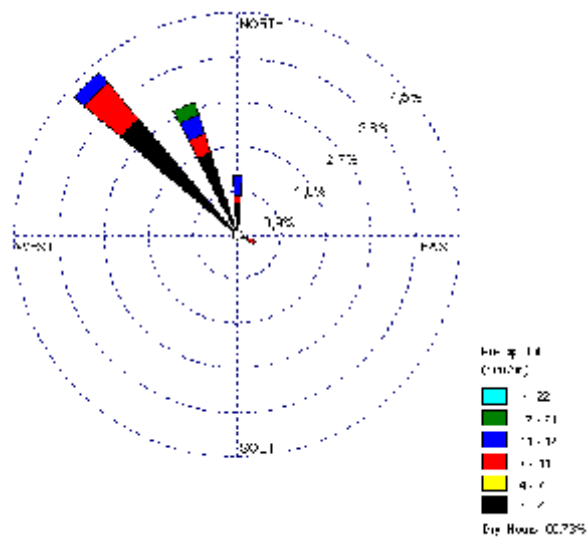
(i)



(j)



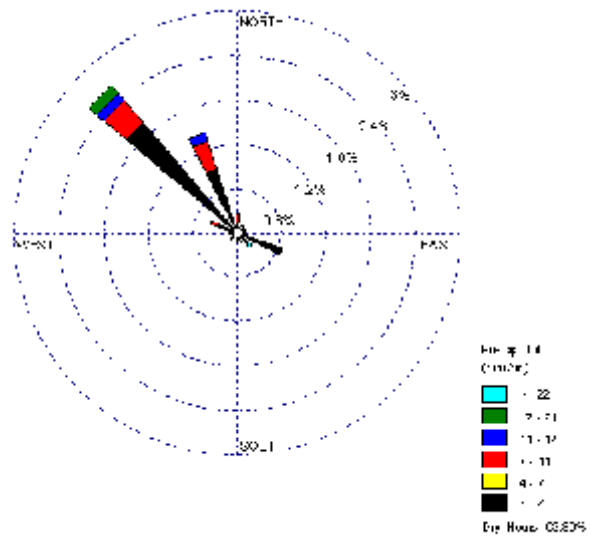
(k)



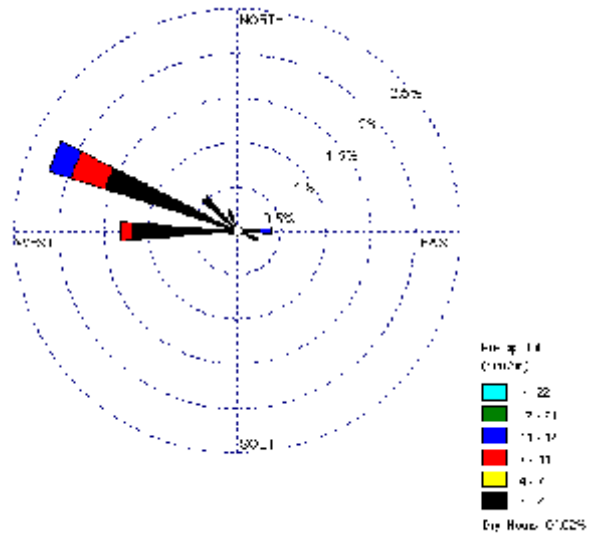
(l)

### VI.2. Rose des précipitations

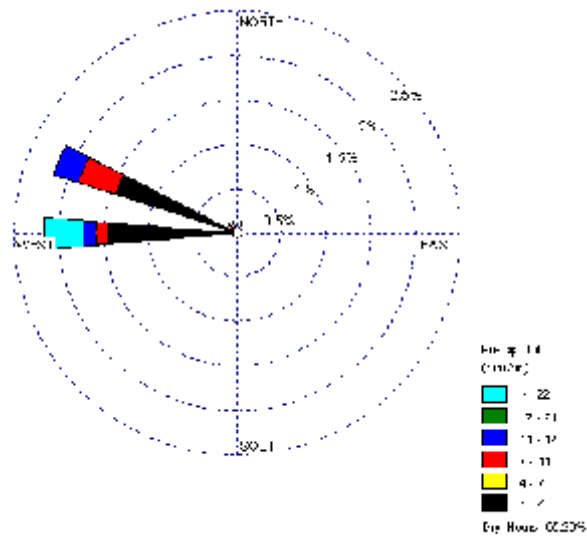
- (i) : 11<sup>eme</sup> prélèvement du 21/08/2005 au 21/09/2005
- (j) : 12<sup>eme</sup> prélèvement du 21/09/2005 au 21/10/2005
- (k) : 13<sup>eme</sup> prélèvement du 21/10/2005 au 21/11/2005
- (l) : 14<sup>eme</sup> prélèvement du 21/11/2005 au 21/12/2005



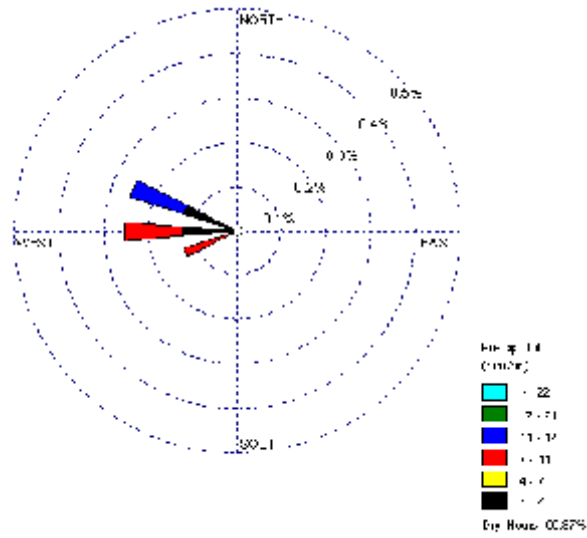
(m)



(n)



(o)



(p)

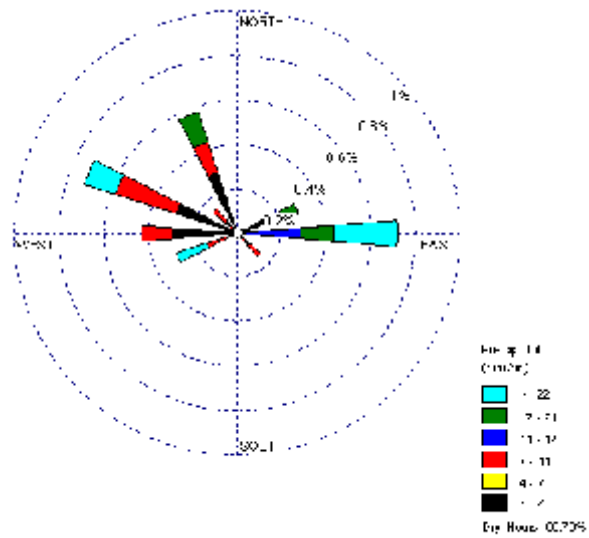
VI.2. Rose des précipitations

(m): 15<sup>ème</sup> prélèvement du 21/12/2005 au 21/01/2006

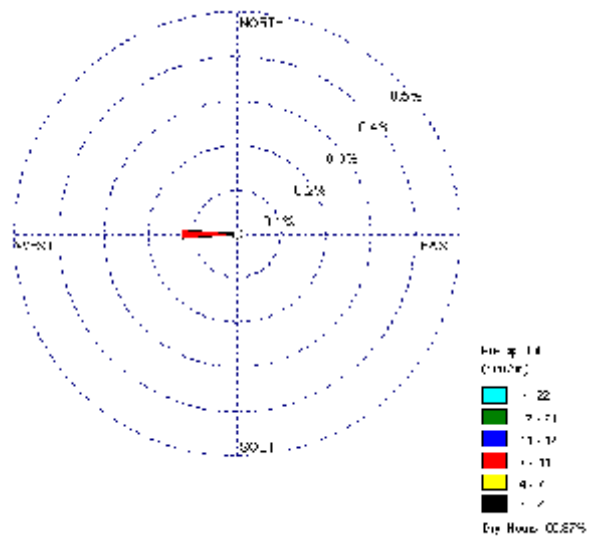
(n) : 16<sup>ème</sup> prélèvement du 21/01/2006 au 21/02/2006

(o) : 17<sup>ème</sup> prélèvement du 21/02/2006 au 21/03/2006

(p) : 18<sup>ème</sup> prélèvement du 21/03/2006 au 22/04/2006



(q)

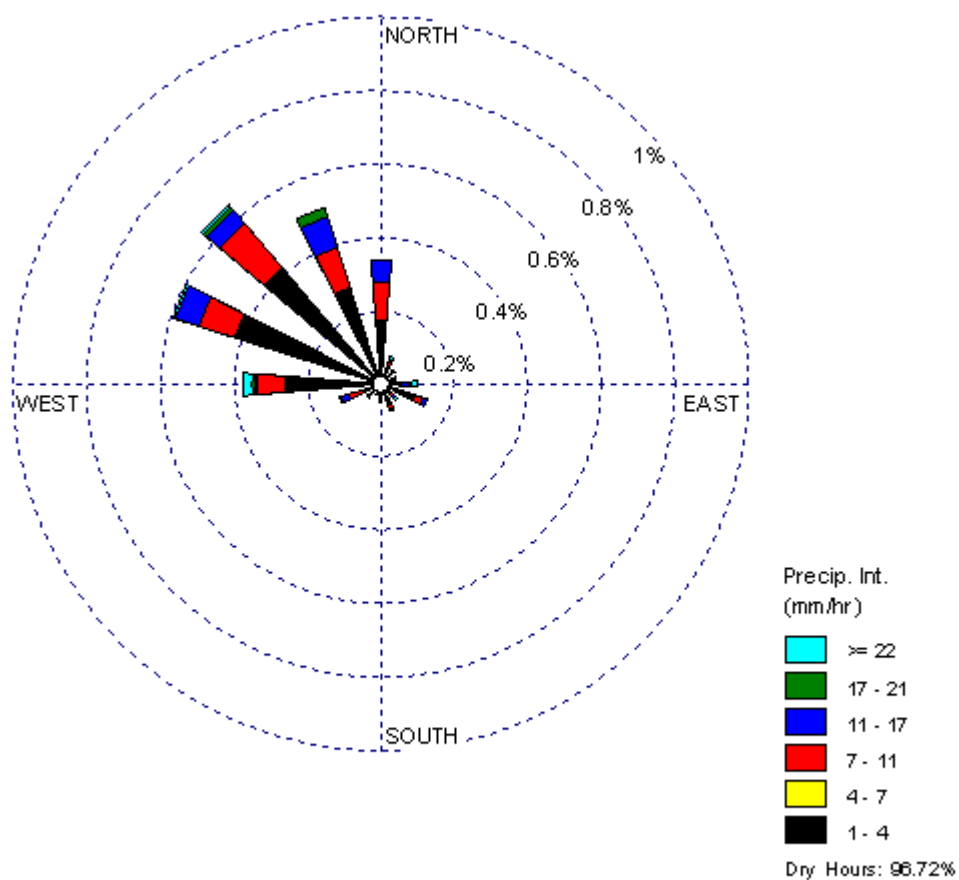


(r)

VI.2. Rose des précipitations

(q) : 19<sup>ème</sup> prélèvement du 22/04/2006 au 20/05/2006

(r) : 20<sup>ème</sup> prélèvement du 20/05/2006 au 21/06/2006



Nombre d'heures de temps sec: 14346 h

Précipitations moyennes: 0,11 mm/h

Figure VI.2. Rose des précipitations du 21/10/2004 au 21/05/2006



## VI.2. Synthèse des résultats

Deux aspects ont été abordés dans cette étude: la pollution par les poussières totales en suspension, d'une part, et les retombées de poussières, d'autre part. En ce qui concerne le premier volet, des analyses gravimétriques et de métaux ont été effectuées sur 51 échantillons. Les prélèvements ont été effectués sur deux périodes distinctes. La première période est comprise entre le 25-26/11/2004 et le 06-07/10/2005 (échantillons 1 à 43) et de la deuxième période est comprise entre le 07-08/05/2006 et le 26-27/06/2006(échantillons 44 à 51). Les prélèvements sont effectués tous les six jours.

En ce qui concerne le deuxième volet, les flux des retombées totales et métalliques ont été déterminés durant toute la période d'étude allant du 21/10/2004 au 21/06/2006 au niveau des trois sites.

Le tableau VI.1 reprend les moyennes des concentrations des particules totales en suspension et des métaux lourds et alcalins au niveau de la Direction de la Santé (DDS) pour les deux périodes d'étude.

Tableau VI.1. Concentrations moyennes des particules totales en suspension et des métaux lourds et alcalins au niveau de la Direction de la Santé (DDS)

	Concentrations moyennes des métaux lourds en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
	Première période du 25-26/11/2004 au 06- 07/10/2005	Deuxième période du 07-08/05/2006 au 26- 27/06/2006
Cuivre	49,40	66,26
Cadmium	3,64	2,45
Plomb	100	NA
Baryum	2,35	6,43
Calcium	7,46	7,65
Potassium	1,17	6,22
Sodium	4,57	11,21

Le tableau VI.2 reprend les moyennes des concentrations des poussières et des métaux au niveau des trois sites pour toute la période d'étude.

Tableau VI.2. Flux des retombées au sol des poussières et des métaux au niveau des trois sites pour toute la période d'étude

Lieu	Retombées moyennes (mg/m <sup>2</sup> .j)	Cd (µg/m <sup>2</sup> .j)	Cu (µg/m <sup>2</sup> .j)	Pb (µg/m <sup>2</sup> .j)	Ba (µg/m <sup>2</sup> .j)	Ca (µg/m <sup>2</sup> .j)	Na (µg/m <sup>2</sup> .j)	K (µg/m <sup>2</sup> .j)
DDS	557,70	0,19	60,39	279,19	7288,15	45889,95	8618,14	14348,13
CHUC	1105,11	42,98	87,25	216,96	12771,00	54705,48	35439,87	4823,93
APC	486,46	3,23	46,13	143,82	8683,64	52902,03	20861,24	38317,78

### VI.3. Les particules totales en suspension (PTS)

Les concentrations des particules totales en suspension (PTS) sont données dans le graphe suivant.

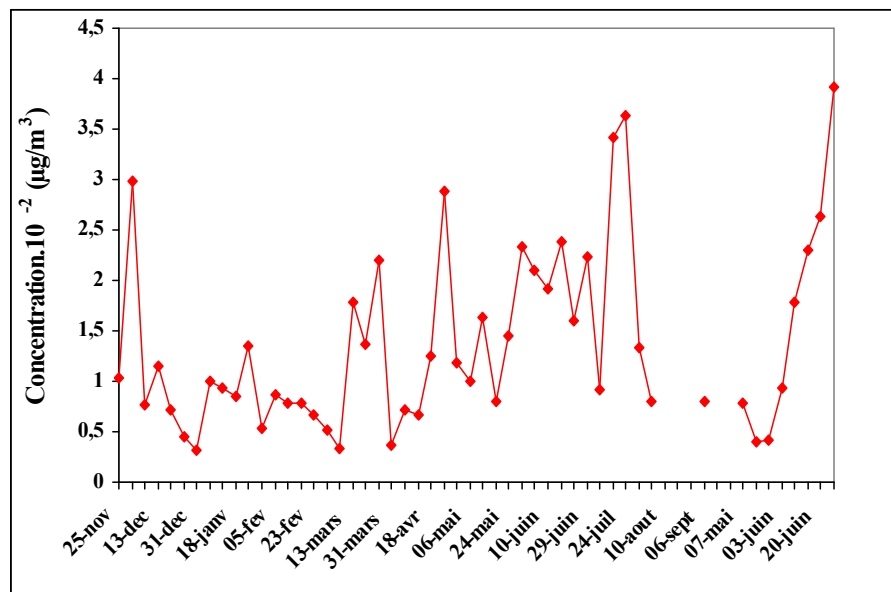


Figure VI.3. Evolution des concentrations des PTS du 25/11/2004 au 26/06/2006

La figure VI.3 illustre les concentrations des particules totales en suspension (PTS) enregistrées pendant les deux périodes d'échantillonnage. Cette figure indique des pics compris entre 363,45 µg/m<sup>3</sup> et 32,11 µg/m<sup>3</sup> pour la première période (du 25-26/11/2004 au 06-07/10/2005) et 392µg/m<sup>3</sup> et 40,12 µg/m<sup>3</sup> pour la deuxième période (du 07-08/05/2006 au 26-27/06/2006). Les concentrations moyennes des PTS enregistrées au cours des deux périodes de prélèvement sont de 131,85 µg/m<sup>3</sup> et 164,52 µg/m<sup>3</sup> respectivement. Ces deux moyennes sont de l'ordre de 1,6 à 2 fois la norme annuelle recommandée par la banque mondiale aux pays en voie de développement, à savoir 80 µg/m<sup>3</sup> [68].

Un examen de la figure VI.3 permet de constater que les niveaux de PTS sont les plus élevés lors des prélèvements des filtres N° 51, 40, 39, 2, 26, et 50 avec  $392 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $363,45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $342,35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $297,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $277,985 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et  $263,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivement. Les fortes concentrations enregistrées sont à mettre au compte d'une vitesse de vent moyenne élevée et de l'absence de la précipitation (voir tableau VI.3). Les faibles concentrations ont été enregistrées pendant les sept premiers prélèvements. Cela peut s'expliquer par l'existence d'un vent faible dont la vitesse moyenne ne dépasse pas  $1,97 \text{ m/s}$ , l'effet de lessivage de l'atmosphère par les précipitations et la mouillabilité du sol empêchant la resuspension des poussières. La concentration minimale a été observée lors du septième prélèvement pendant la journée du 30-31/12/2004. Cela peut être dû aux fortes précipitations (26 mm) et à l'existence d'un vent faible (vitesse moyenne de  $1,03 \text{ m/s}$ ).

Il existe de bonnes corrélations entre les poussières totales en suspension et la température ( $r=0,74$ ), le calcium ( $r=0,75$ ), le plomb ( $r=0,61$ ) et le baryum ( $r=0,51$ ) (voir tableau VI.6). Cela nous conduit à penser que le trafic routier intense (place des martyrs, la station de bus Boumezou, etc.) représentent les principales sources d'influence sur le centre-ville de Constantine.

La pluie peut contribuer à réduire les concentrations de particules en suspension dans l'air, d'une part par lavage de l'atmosphère, mais également par le lavage des sols, diminuant ainsi la remise en suspension de particules déposées.

Le tableau VI.3 résume les paramètres météorologiques tels que la température, la vitesse du vent, la pression, ainsi que la quantité de pluie pour chaque jour de prélèvement au cours de deux périodes d'échantillonnages. On remarque que les concentrations en poussières diminuent chaque fois qu'il pleut. A côté de l'effet de lavage de l'atmosphère et des sols, il ne faut pas oublier que les conditions météorologiques particulièrement défavorables à la dispersion des polluants (inversion de températures) se rencontrent le plus souvent par temps sec. Les fortes concentrations en particules se rencontrent principalement quand la vitesse du vent est élevée (voir figure VI.3).

Tableau VI.3. Les paramètres météorologiques enregistrés durant la période d'étude

Date du prélèvement	Vitesse du vent moyenne (m/s)	Température périodique moyenne (°C)	Pression atmosphérique moyenne (mbars)	Niveau des précipitations (mm)
25-26/11/2004	1,97	10	943	13
01-02/12/2004	1,49	10	943	0
07/08/12/2004	0,64	10	943	2
13-14/12/2004	0,82	10	943	0
19-20/12/2004	1,00	10	943	9
25-26/12/2004	1,05	10	943	0
30-31/12/2004	1,03	10	943	26
06-07/01/2005	2,92	10	943	0
12-13/01/2005	2,46	10	943	1
18-19/01/2005	2,75	10	937	5
24-25/01/2005	3,00	7,5	929	4
30-31/01/2005	1,95	1,8	933	3
05-06/02/2005	4,32	5,8	939	0
11-12/02/2005	3,55	6	952	0
17-18/02/2005	0,99	4,6	929	0
23-24/02/2005	3,83	8,6	929	0
01-02/03/2005	1,96	8,6	916	3
07-08/03/2005	2,7	4,4	933	2
13-14/03/2005	3,97	12,2	931	0
19-20/03/2005	3,38	15,8	940	0
25-26/03/2005	3,75	19,5	932	0
31-01/03/2005	2,85	6,5	930	0
06-07/04/2005	4,45	12,6	943	0
12-13/04/2005	3,60	9,5	933	1
18-19/04/2005	2,84	14,08	928	0
24-25/04/2005	3,28	23,1	931	0
30-01/04/2005	4,28	10,8	935	0

Date du prélèvement	Vitesse du vent moyenne (m/s)	Température périodique moyenne (°C)	Pression atmosphérique moyenne (mbars)	Niveau des précipitations (mm)
06-07/05/2005	3,48	13,1	937	0
12-13/05/2005	3,30	22,6	931	6
18-19/05/2005	3,03	16,1	938	0
24-25/05/2005	2,80	19	941	0
30-31/05/2005	2,79	22,9	936	0
04-05/06/2005	2,41	23,3	937	0
10-11/06/2005	3,39	19,2	936	0
16-17/06/2005	3,87	19,1	940	0
23-24/06/2005	3,08	26,3	939	0
29-30/06/2005	3,86	29,7	934	0
11-12/07/2005	2,60	20,8	940	0
17-18/07/2005	3,64	33	938	0
24-25/07/2005	3,02	38,2	931	0
29-30/07/2005	3,45	26,8	935	0
04-05/08/2005	3,05	20,14	941	0
06-07/10/2005	2,44	15,9	936	0
07-08/05/2006	4,84	20,33	936	0
13-14/05/2006	2,91	20,5	938	5
28-29/05/2006	3,36	16,52	932	0
03-04/06/2006	2,66	13,06	939,3	0
08-09/06/2006	3,49	19,25	939	0
14-15/06/2006	3,44	27,3	936,6	0
20-21/06/2006	3,88	29,91	936,91	0
26-27/06/2006	3,42	31,66	935,76	0

## VI.3.1. VI.3.1. L'évolution des concentrations métalliques dans l'air ambiant

## VI.3.1.1. Concentrations des métaux en traces

## VI.3.1.1.1. Le plomb

La figure VI.4 illustre l'évolution des concentrations de plomb durant la période qui s'étale du 25-26/11/2004 au 06-07/10/2005. Celles-ci varient entre 0,01 et 0,43  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Elles ont connu une baisse significative entre le prélèvement N° 2 et le prélèvement N° 24 (01/12/2004 au 13/04/2005). Cela peut s'expliquer par les précipitations enregistrées durant la plupart de ces prélèvements d'où l'effet de lessivage et la baisse de température. Des concentrations plus élevées ont été observées lors des prélèvements N° 25 (18-19/04/2005) et N° 35 (16-17/06/2005) avec des valeurs 0,339  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et 0,430  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivement en raison de l'absence de précipitation, l'augmentation de la température et des vents qui sont orientés N et NW. Cela laisse supposer que cette pollution provient de la cimenterie de Hamma Bouziane et sa carrière (voir tableau VI.3). En matière de pollution par les éléments en trace métalliques, la concentration moyenne de plomb durant la période d'étude est de 100  $\text{ng}/\text{m}^3$  (tableau VI.4). Cette valeur est 5 fois inférieure à la norme annuelle préconisée par l'OMS qui est de 500  $\text{ng}/\text{m}^3$  [69].

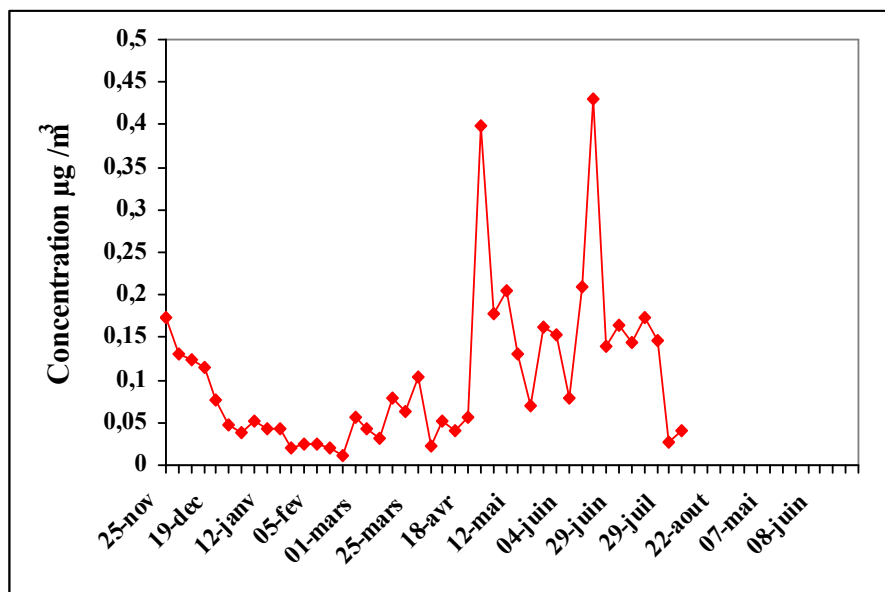


Figure VI.4. Evolution des concentrations de plomb dans l'air ambiant

## VI.3.1.1.2. Le cadmium

Les concentrations de cadmium dans l'air ambiant sont comprises entre  $1,31 \text{ ng/m}^3$  et  $8,43 \text{ ng/m}^3$ . Des concentrations élevées ont été enregistrées lors des prélèvements N° 31, 26 et 35 avec des concentrations de  $8,42 \text{ ng/m}^3$ ,  $8,20 \text{ ng/m}^3$  et  $8,03 \text{ ng/m}^3$  respectivement (voir figure VI.5).

Les moyennes des concentrations de cadmium dans l'air sont de  $3,64 \text{ ng/m}^3$  pour la première période et de  $2,45 \text{ ng/m}^3$  pour la deuxième période (voir tableau VI.4). Ces deux valeurs sont inférieures de 1,37 et 2 fois respectivement à la norme annuelle édictée par l'OMS qui est de  $5 \text{ ng/m}^3$  [70].

Il existe une assez bonne corrélation entre le cadmium et le plomb ( $r=0,62$ ). Ces deux métaux pourraient provenir de la même source. En effet leurs sources principales sont l'incinération des déchets (un incinérateur se trouve au niveau de l'hôpital CHUC derrière la maternité et la décharge publique située à proximité de l'hôpital militaire de Didouche Mourad ainsi que le trafic routier).

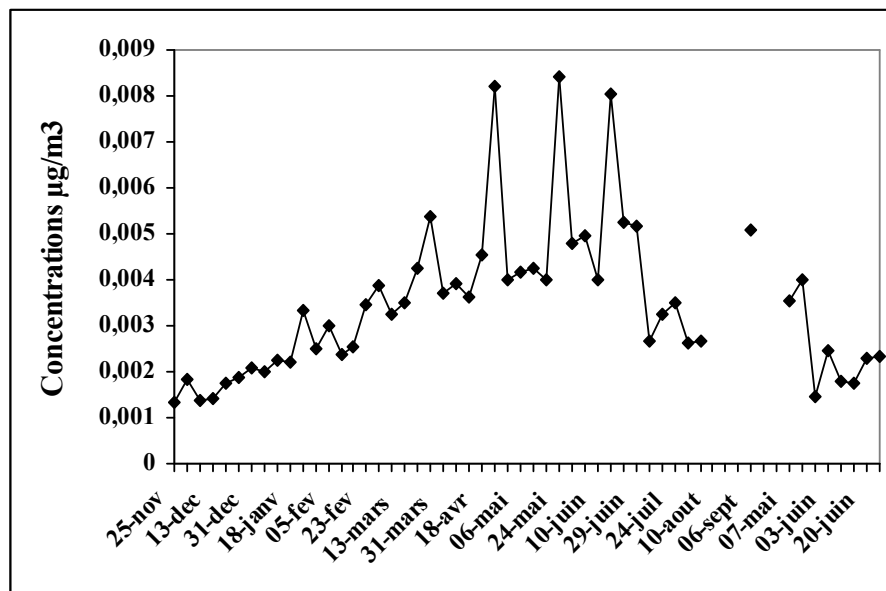


Figure VI.5. Evolution des concentrations de cadmium dans l'air ambiant

VI.3.1.1.3. Le cuivre

La figure VI.6 illustre l'évolution des concentrations de cuivre dans l'air. Celles-ci varient entre 2,66 ng/m<sup>3</sup> et 341,48 ng/m<sup>3</sup>. La concentration maximale a été enregistrée lors du prélèvement N° 42 (04-05/08/2005). Cela peut s'expliquer, entre autres, par l'augmentation de la température (20,14 °C), l'absence des précipitations et des vents forts (vitesse moyenne de 3,05 m/s). Les moyennes des concentrations sont égales à 49,40 ng/m<sup>3</sup> pour la première période et de 66,26 ng/m<sup>3</sup> pour la deuxième période (voir tableau VI.4). Ces deux valeurs sont largement supérieures à la norme en vigueur aux USA qui est de 20 ng/m<sup>3</sup> [71]. Les facteurs de dépassement sont de l'ordre de 2,47 et 3,31 fois cette norme.

Il n'y a aucune corrélation entre le cuivre et les facteurs météorologiques et les autres métaux.

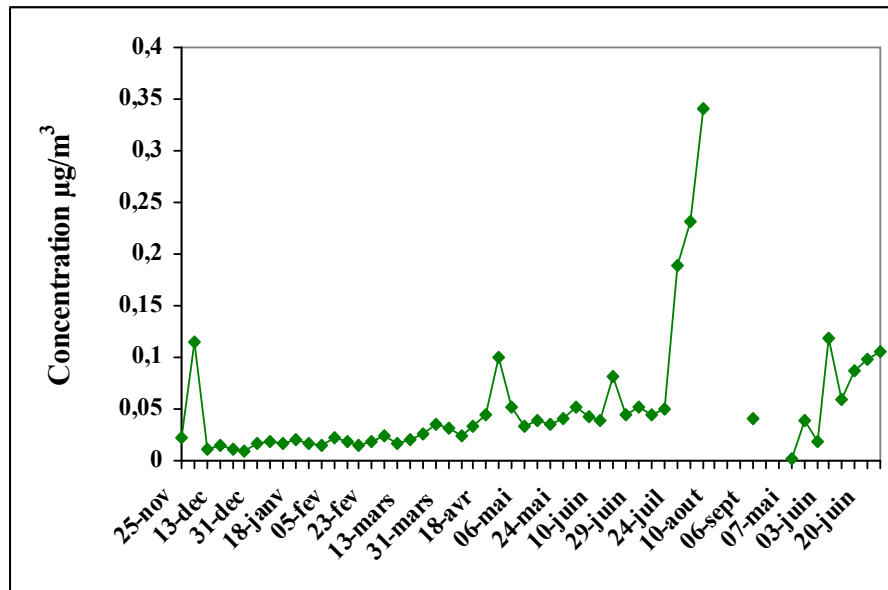


Figure VI.6. Evolution des concentrations de cuivre dans l'air ambiant

Tableau VI.4. Les concentrations moyennes des différents métaux lourds dans l'air ambiant

	Concentrations moyennes des métaux lourds en ng/m <sup>3</sup>		
	Première période du 25/11/2004 au 07/10/2005	Deuxième période du 07/05/2006 au 26/06/2006	Ecart type
Cuivre	49,40	66,26	59,49
Cadmium	3,64	2,45	1,86
Plomb	100	NA	91,01

Note : NA (non analysé).



## VI.3.1.2. Concentrations des métaux alcalins et alcalinoterreux dans l'air ambiant

## VI.3.1.2.1. Le calcium

L'examen de la figure VI.7 permet de constater que les concentrations de calcium dans les PTS varient entre 0,32 et 24,77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Les concentrations moyennes sont de 7,46  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour la première période et de 7,65  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour la deuxième période (Tableau VI.5). Les plus fortes concentrations sont observées, par ordre décroissant, pendant les prélèvements N° 26, 35, 42 et 2 avec les valeurs 24,77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 23,30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 16,69  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et 14,12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivement.

Le calcium est bien corrélé avec les poussières dans l'air ( $r=0,75$ ), le plomb ( $r=0,80$ ), le cadmium ( $r= 0,64$ ) et la température ( $r= 0,56$ ) (Tableau VI.6). La principale source de calcium est la cimenterie de Hamma Bouziane.

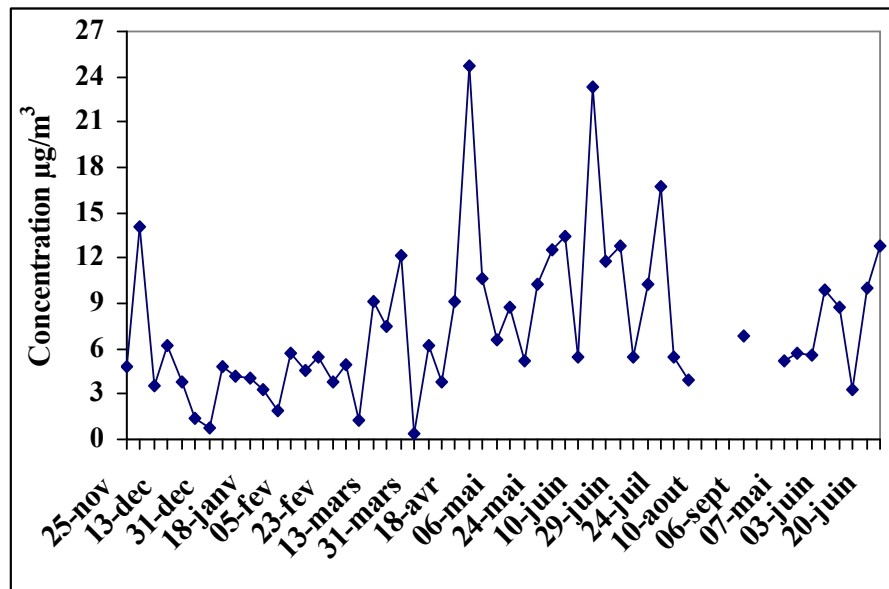


Figure VI.7. Evolution des concentrations de calcium dans l'air ambiant

## VI.3.1.2.2. Le baryum

La figure VI.8 illustre l'évolution des concentrations de baryum dans l'air ambiant. Elles oscillent entre 0,18  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et 14,21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Des pics de concentration ont été observés aux dates suivantes: 29-30 juin 2005, 20-21 juin 2006, 17-18 juillet 2005, 7-8 mai 2006, 4-5 août 2005 et 24-25 avril 2005 avec les concentrations respectives de 14,20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 12,76  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 8,52  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,

7,97  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 7,62  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et 6,30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Les moyennes enregistrées pendant les deux périodes de mesure sont de 2,35 et 6,43  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Le baryum est assez bien corrélé avec la température ( $r=0,74$ ).

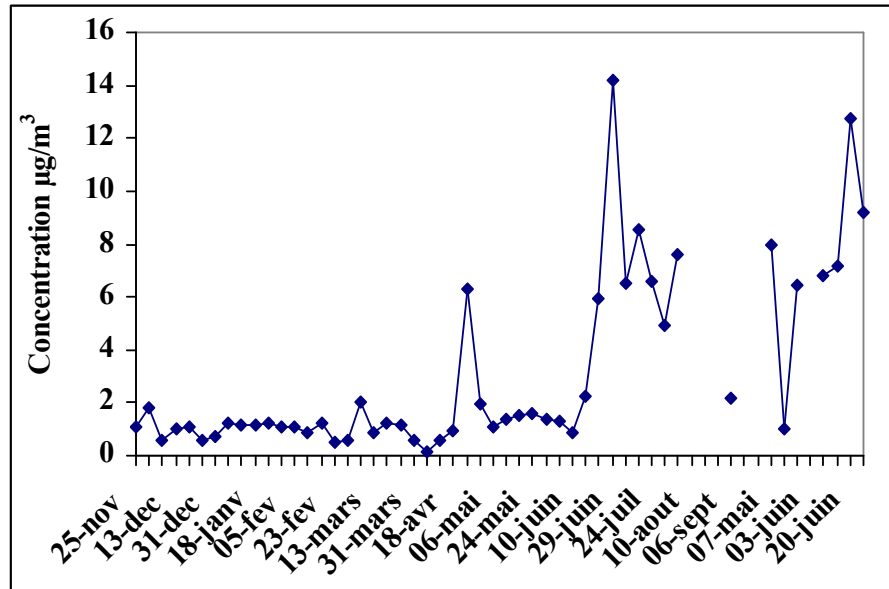


Figure VI.8. Evolution des concentrations de baryum dans l'air ambiant

### VI.3.1.2.3. Le sodium

Les concentrations de sodium sont comprises entre 0,24  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et 19,57  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (figure VI.9). Les concentrations moyennes enregistrées pendant les deux périodes de mesure sont de 4,55  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et 11,21  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivement. Les embruns marins contenant du sel sous forme de NaCl constituent leur principale source. Les concentrations les plus élevées ont été observées pendant les prélèvements des filtres N° 47, 37, 26 (19,57  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 16,92  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et 11,51  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivement).

Le sodium est bien corrélé avec le baryum ( $r=0,80$ ) et la température ( $r=0,69$ ). Le plomb, le baryum et le sodium seraient issus d'une source commune.

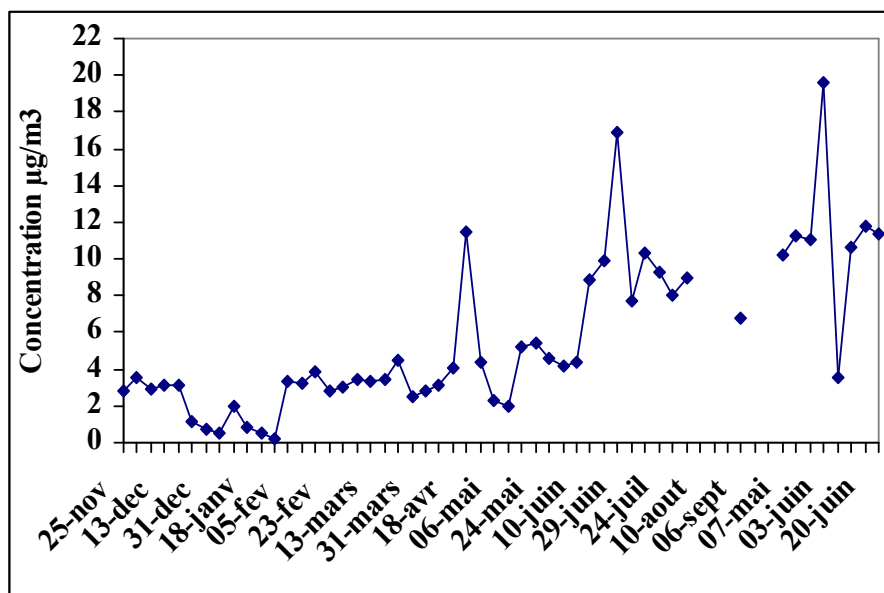


Figure VI.9. Evolution des concentrations de sodium dans l’air ambiant

VI.3.1.2.4. Le potassium

On remarque que la courbe d'évolution des concentrations de potassium a la même allure que celle du sodium et du baryum. Cela peut s'expliquer par les bonnes corrélations liant le potassium au sodium ( $r=0,80$ ) et au baryum ( $r=0,94$ ). Ces trois métaux proviendraient de la même source (embruns marins entre autres).

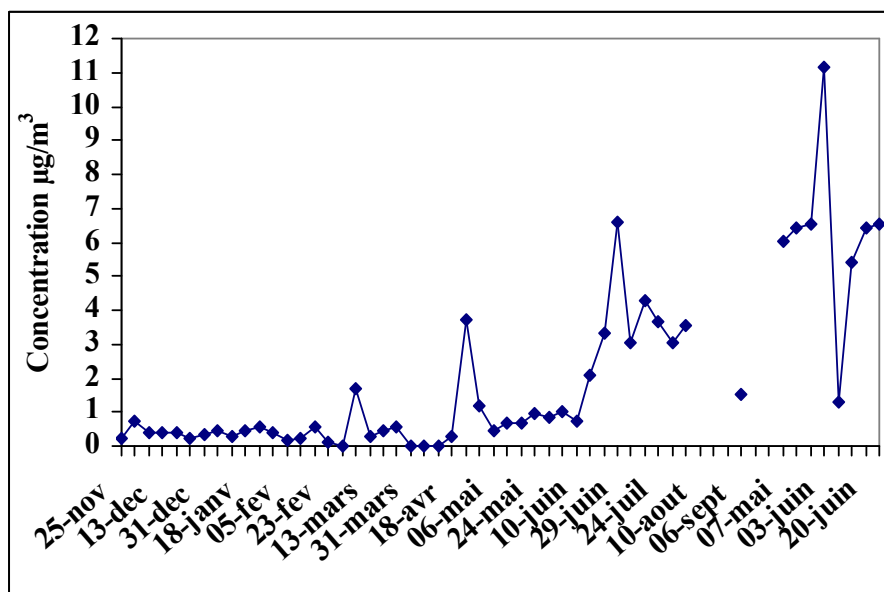


Figure VI.10. Evolution des concentrations de potassium dans l’air ambiant

- Note : On remarque que le lithium est absent dans les particules totales en suspension.

Tableau VI.5. Les concentrations moyennes des métaux alcalins dans l'air ambiant

	Concentrations moyennes des métaux en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
	Première période	Deuxième période
Baryum	2,35	6,43
Calcium	7,46	7,65
Potassium	1,17	6,22
Sodium	4,57	11,21

Rappelons que notre travail a été scindé en deux périodes de prélèvement (25/11/2004 au 07/10/2005 et 07/05/2006 au 26/06/2006). L'augmentation de la concentration moyenne de poussières dans l'air ambiant au courant de la deuxième période est due à la différence entre les durées de prélèvement. En effet, la première période s'étale sur près de onze mois, donc la concentration obtenue peut être correctement comparée à la norme annuelle. Elle illustre l'influence des saisons sur les concentrations des poussières dans l'air. Par contre, la deuxième période de prélèvement s'étale sur un peu moins de deux mois de la saison estivale. Cette dernière est, de plus, connue pour sa sécheresse qui favorise l'accumulation des particules dans l'air ambiant.

### VI.3.2. Résumé des corrélations

Les corrélations entre les poussières, les métaux lourds et alcalins et les paramètres météorologiques au niveau de la DDS sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Tableau VI.6. Corrélations entre les poussières, métaux lourds, métaux alcalins et les différents facteurs météorologiques au niveau de DDS

	PTS	Pb	Cd	Cu	Ca	Ba	Na	K	Li
Pb	<b>0,61</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
Cd	0,26	<b>0,62</b>	-	-	-	-	-	-	-
Cu	0,37	0,13	-	-	-	-	-	-	-
Ca	<b>0,75</b>	<b>0,80</b>	<b>0,64</b>	0,29	-	-	-	-	-
Ba	<b>0,51</b>	0,32	-	0,46	0,34	-	-	-	-
Na	0,41	<b>0,54</b>	0,20	0,45	0,47	<b>0,81</b>	-	-	-
K	0,31	0,42	-	0,39	0,28	<b>0,94</b>	<b>0,80</b>	-	-
Li	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vents	0,26	0,21	0,37	0,14	0,28	0,36	0,34	0,28	-
Pression	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pluviométrie	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Température	<b>0,74</b>	0,47	0,28	0,49	<b>0,56</b>	<b>0,74</b>	<b>0,69</b>	<b>0,58</b>	-

VI.4. Flux des retombées atmosphérique totales

L'analyse des échantillons recueillis au niveau de trois sites au cours de la période d'étude a permis d'établir l'évolution des flux des retombées atmosphériques totales qui sont illustrées par la figure VI.11.

Les niveaux des retombées varient entre 2,32 et 3902,47 mg/m<sup>2</sup>.j. Les moyennes par poste sont reprises au tableauVI.7.

Tableau VI.7. Valeurs moyennes des retombées atmosphériques totales au niveau des trois sites d'étude durant la période d'échantillonnage totale (du 21/10/2004 au 21/06/2006)

Lieu	Retombées moyennes (mg/m <sup>2</sup> .j)	Minimum	Maximum	Ecart type
DDS	557,70	28,96	2976,83	668,21
CHUC	1105,11	32,05	3902,47	1167,56
APC	486,46	2,32	2373,93	535,12

Les valeurs rapportées dans ce tableau dépassent la moyenne annuelle de 350 mg/m<sup>2</sup>.j autorisée en Allemagne et la norme annuelle moyenne de 200 mg/m<sup>2</sup>.j en vigueur en Suisse et au Canada [72]. Les facteurs de dépassement de la norme sont de 1,59, 3,15 et 1,39 fois la norme allemande au niveau de la DDS, du CHUC et de l'APC fois respectivement et de 2,78, 5,52 et 2,43 fois les normes Suisse et Canadienne au niveau des sites précités respectivement.

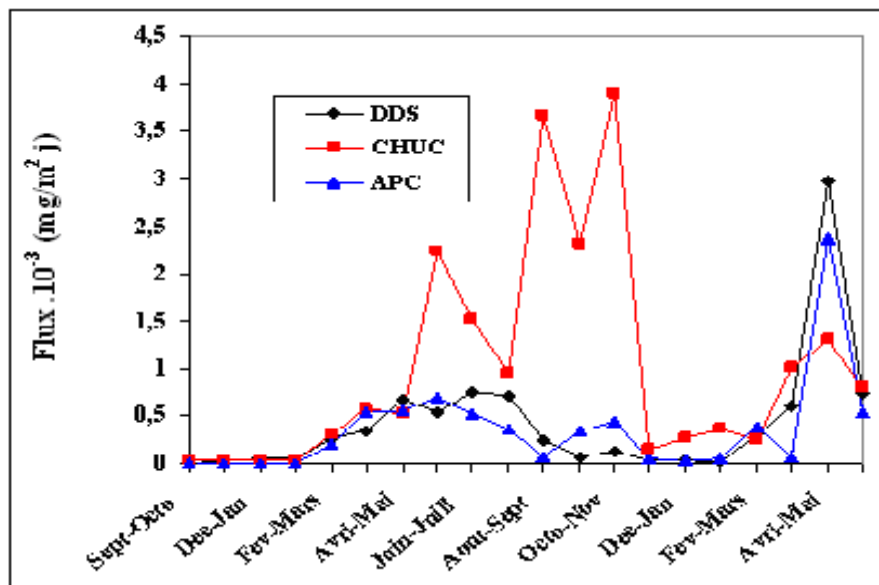


Figure VI.11. Evolution des flux de retombées de poussières totales au niveau des trois sites

## VI.4.1. Influence des paramètres météorologiques

## VI.4.1.1. Effet des précipitations et des vitesses et directions du vent

Les tableaux VI.8 et VI.9 résument les paramètres météorologiques qui ont une influence sur les flux des retombées enregistrés pendant toute la période d'échantillonnage. On remarque que les flux des retombées diminuent chaque fois qu'il pleut. Cela peut s'expliquer par l'effet de lavage de l'atmosphère et des sols d'une part et la vitesse du vent d'autre part ; on n'observe pas de très faibles teneurs en poussières quand la vitesse du vent est élevée, ce qui pourrait s'expliquer par une remise en suspension de particules déposées sur le sol. A côté de ces deux paramètres, il ne faut pas oublier que l'élévation de la température induit de fortes instabilités atmosphériques qui favorisent l'entraînement des particules au sol donc une augmentation du flux des retombées (figure VI.11).

Les directions des vents prédominants sont ESE, SW et NW (figure VI.1).

Tableau VI.8. Paramètres météorologiques caractérisant les différentes périodes de prélèvement

Numéro de prélèvement	Date du prélèvement	Précipitation moyenne (mm/h)	Vitesse du vent moyenne (m/s)	Directions dominantes des vents
1	(21/10-21/11) 2004	0,01	1,20	SSW-SW
2	(21/11-21/12) 2004	0,19	1,34	SSW-SW
3	(21/12-22/01) 2004/2005	0,37	2,45	ESE+NW-WNW
4	(22/01-21/02) 2005	0,23	2,96	E+W-NW
5	(21/02-21/03) 2005	0,14	3,28	NW-NNW+ESE
6	(21/03-21/04) 2005	0,19	3,58	N+ESE+SE+WNW-W
7	(21/04-21/05) 2005	0,03	3,44	ESE-SE+NW-N
8	(21/05-21/06) 2005	0,00	3,28	ESE+NW-NNE
9	(21/06-21/07) 2005	0,01	4,33	N-NNW + ESE-SE
10	(21/07-21/08) 2005	0,00	4,57	ESE-SE+W+NW-N
11	(21/08-21/09) 2005	0,04	3,10	SE+NW-NNE
12	(21/09-21/10) 2005	0,01	2,91	N-NNW+SE
13	(21/10-21/11) 2005	0	3,35	SE+NW-NNW
14	(21/11-21/12) 2005	0,30	3,07	SE+NW-NNW
15	(21/12-21/01) 2005/2006	0,23	3,25	ESE-SE+NW
16	(21/01-21/02) 2006	0,13	3,41	E-ESE+W-WNW
17	(21/02-21/03) 2006	0,19	4,15	W-WNW+E
18	(21/03-22/04) 2006	0,03	3,45	W-WNW+E
19	(22/04-20/05) 2006	0,21	4,37	ENE-E+W-WNW
20	(20/05-21/06) 2006	0,01	3,56	NNE-ENE+W-WNW

Tableau VI.9. Paramètres météorologiques caractérisant les différentes périodes de prélèvement

Prélèvement	Température périodique moyenne (°C)	Pression atmosphérique moyenne (mbar)	Niveau des précipitations (mm)
1	15,23	952	4
2	10,89	952	69
3	9,51	940	139
4	5	934	82
5	9,67	932	49
6	13,88	934	69
7	19,5	935	10
8	22,4	936	0
9	26,8	937	4
10	26,27	949	0
11	21,97	936	16
12	18,06	937	3
13	15,89	937	0
14	7,98	933	105
15	7,63	835	84
16	9,7	600	49
17	10,6	919	64
18	16,67	934	10
19	20,12	933	73
20	22,35	936,26	0

La Figure VI.11 illustre les flux de retombées atmosphériques totales enregistrées entre le 21/11/2004 et le 21/06/2006. En effet, les flux de retombées atmosphériques totales sont bien corrélés au niveau de la DDS et de l'APC ( $r=0,94$ ). Aucune corrélation n'a été observée au niveau du CHUC.

Les retombées fluctuent avec le temps. Les fortes charges sont enregistrées au niveau du CHUC. Elles décroissent selon l'ordre suivant: échantillons 13, 11 au niveau du CHUC, 19 au niveau de l'APC, 12, 8, 9, 19, 18 et 10 au niveau du CHUC. La charge la plus élevée a eu lieu lors du 13<sup>ème</sup> prélèvement au niveau du CHUC entre le 21/10/2005 et 21/11/2005. Sa valeur est de 3902,47 mg/m<sup>2</sup>j en raison d'un vent fort qui a eu lieu dans les directions SE, NW à NNW avec des fréquences de 28,25 et 22,92 % respectivement, une vitesse du vent de 3,35 m/s et l'absence de précipitations (voir tableau VI.8 et figure VI.1 (m)). Les fortes retombées enregistrées aux prélèvements 13, 11, 19 et 12 sont à mettre au compte d'une vitesse de vent moyenne élevée (voir tableau VI.8 et figures VI.1 (m), VI.1 (k), VI.1(s) et VI.1 (t) respectivement). En effet, il

existe un coefficient de corrélation entre les retombées et les vitesses du vent périodiques moyennes de 0,55 pour la DDS et de 0,51 au niveau du l'APC (voir Tableau VI.21., VI.22. et VI.23.). Aucune corrélation n'a pas pu être trouvée entre les retombées et les vitesses du vent périodiques au niveau de CHUC.

On note que les quatre premiers prélèvements sont relativement stables et les flux correspondants sont dans la gamme 46,74 – 66,57 mg/m<sup>2</sup>j au niveau de la DDS, 23,05 – 41,20 mg/m<sup>2</sup>j au niveau du CHUC et 5,47- 2,57 mg/m<sup>2</sup>j au niveau de l'APC.

#### VI.4.1.2. Effet de la température

Des coefficients de corrélation de 0,48, 0,42 et 0,54 au niveau de la DDS, de l'APC et du CHUC respectivement ont été observés entre les variations temporelles des retombées périodiques moyennes et la température périodique moyenne.

#### VI.4.1.3. Effet des bâtiments

L'effet des bâtiments sur les retombées est certain. En effet, la position des jauges au niveau de la DDS et de l'APC laissait présager un impact plus important que ce qui a été observé. La seule raison justifiant ces niveaux relativement faibles est la présence d'obstacles (bâtiments, végétation, etc.) autour des jauges. La jauge au niveau de la DDS a été placée en dessous du mur du lycée EL Houria, empêchant une bonne partie des poussières d'atteindre ce récepteur. Par ailleurs les fortes charges enregistrées au niveau du CHUC s'expliquent par l'apport des poussières soulevées par le vent au niveau des terres agricoles et des sols nus auxquels est exposé l'hôpital, ainsi que l'influence des poussières issues de la cimenterie Hamma Bouziane et de sa carrière.

#### VI.4.2. Les retombées métalliques

Cette partie ne traite que des éléments inorganiques. En effet, les échantillons de retombées atmosphériques collectés pour l'analyse de ces éléments subissent un traitement permettant leur quantification. Ce protocole de traitement est décrit en détail au chapitre V. Une acidification des éléments inorganiques à pH <1 permet de mesurer les espèces acido-solubles contenues dans les fraction soluble et insoluble.



- **La fraction acido-soluble**

Cette fraction s'obtient en laissant les échantillons en contact avec de l'acide nitrique ou chlorhydrique [73, 74]. Elle contient la majorité des éléments traces métalliques (ETM) provenant des sources anthropiques.

Ainsi, la fraction soluble à des pH faibles (de l'ordre de 1) est majoritairement engendrée par des particules provenant des sources anthropiques. En effet, ces types de sources émettent des aérosols fins ( $< 2 \mu\text{m}$ ) qui possèdent des surfaces d'échange plus grandes que les grosses particules. Cette propriété physique, induisant un rapport surface - volume plus grand, permet aux éléments métalliques d'être plus proches de la surface des particules et donc, d'être plus facilement disponibles durant l'étape de solubilisation [75]. Sandroni et *al.* (2002) ont quantifié cette fraction acido-soluble pour les métaux lourds les plus couramment étudiés. Il apparaît ainsi que les éléments tels que Cd, Cu, Ni, Pb et Zn d'origine majoritairement anthropique sont solubles respectivement à 91, 83, 84, 97 et 98 % à un pH de 2. Une étude des fractions acido-solubles peut donc permettre une bonne estimation des flux d'éléments d'origine anthropique mais, induit une sous-évaluation des éléments d'origines terrigènes [76].

- **La fraction insoluble**

Cette fraction est généralement constituée de particules silicatées. Les métaux contenus dans ce type de particules sont liés par des liaisons covalentes fortes. La solubilité de tels aérosols, provenant principalement d'actions mécaniques (particulièrement de l'érosion des roches) reste faible du fait de la taille des particules ( $> 2 \mu\text{m}$ ). Par exemple, l'Al, le Fe et le Si ont une solubilité inférieure à 10 % dans des échantillons de sol saharien à des pH de 2 [77]. Ainsi, afin de solubiliser cette fraction, il est nécessaire de procéder à une étape de minéralisation des échantillons par différents procédés utilisant des acides tels l'acide perchlorique ou l'acide fluorhydrique [78] [79] [80] [81] [82] et [83].

L'étude des fractions acido-solubles et insolubles semble permettre une distinction des éléments provenant des sources naturelles et anthropiques. Pour les éléments ayant ces deux types de sources, la part anthropique sera sous forme acido-soluble alors que la part naturelle sera contenue dans la fraction insoluble.

Dans la suite de notre travail, nous avons orienté notre étude sur la fraction acido-soluble qui provient généralement d'une source anthropique.

## VI.4.2.1. Les métaux lourds

## VI.4.2.1.1. Les retombées de cuivre

Les valeurs des retombées de cuivre reportées dans la figure VI.12 indiquent des pics compris entre 0 et 250,67  $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{j}$ . La gamme des moyennes observées dans les trois sites de mesure est comprise entre 46,13 et 87,25  $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{j}$ . Le tableau VI.10 illustre l'ensemble des moyennes des retombées totales de cuivre pour les trois sites.

Tableau VI.10. Valeurs moyennes des flux des retombées totales de cuivre au niveau des trois sites durant la période d'échantillonnage totale

Site	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
APC	0	160,06	46,13	48,88
CHUC	0,05	228,97	87,25	67,57
DDS	8,48	250,67	60,39	66,50

Les retombées de cuivre ne dépassent pas la valeur guide. Elles sont de l'ordre de 0,24 (DDS), 0,35 (CHUC) et 0,18 (APC) fois la norme internationale et qui est égale à 250  $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{j}$  [72]. Les retombées de cuivre sont bien corrélées au niveau de la DDS et de l'APC ( $r=0,84$ ).

Il existe une corrélation entre les retombées de cuivre et la pluviométrie ( $r=0,71$ ) au niveau de la DDS. Aucune correspondance n'existe entre les données météorologiques au niveau du CHUC et de l'APC.

A partir des figures VI.13, VI.14 et VI.15 on peut remarquer que les pics des fractions solubles observés sont de 142,6  $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{j}$  et 250,67  $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{j}$  (Nov-Dec 2005) au niveau de l'APC et la DDS respectivement et de 180,95  $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{j}$  (Dec-Jan 2004-2005) au niveau du CHUC. Cela peut s'expliquer par les fortes charges des poussières enregistrées durant ces périodes qui contiennent des particules de cuivre ainsi que la direction des vents dominants (ES, ESE, NW à NNW) (voir tableau VI.10).

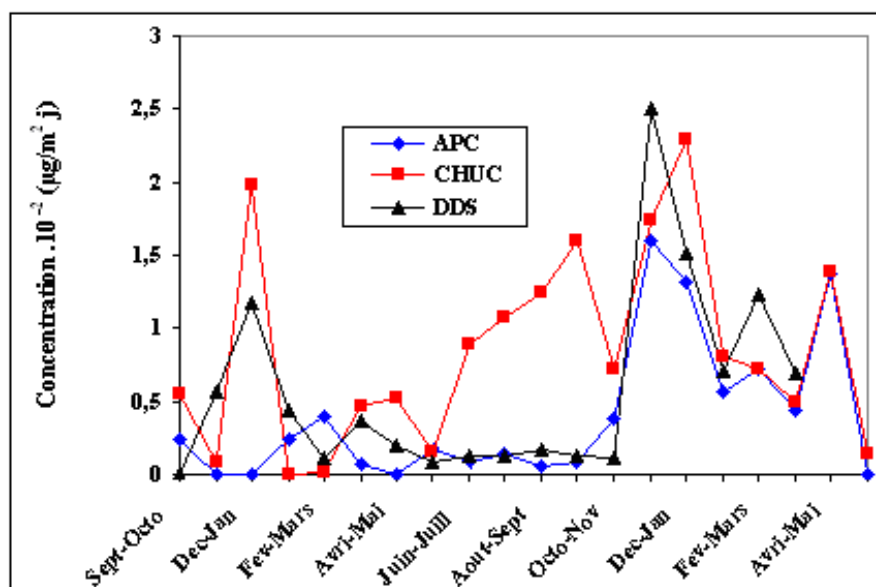


Figure VI.12. Evolution des retombées totales de cuivre au niveau des trois sites

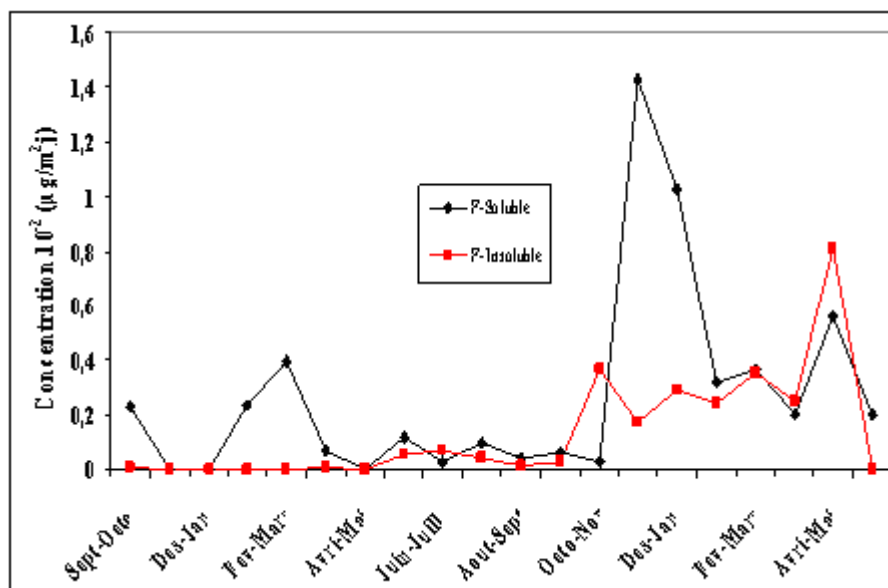


Figure VI.13. Evolution des retombées solubles et insolubles de cuivre au niveau de l'APC

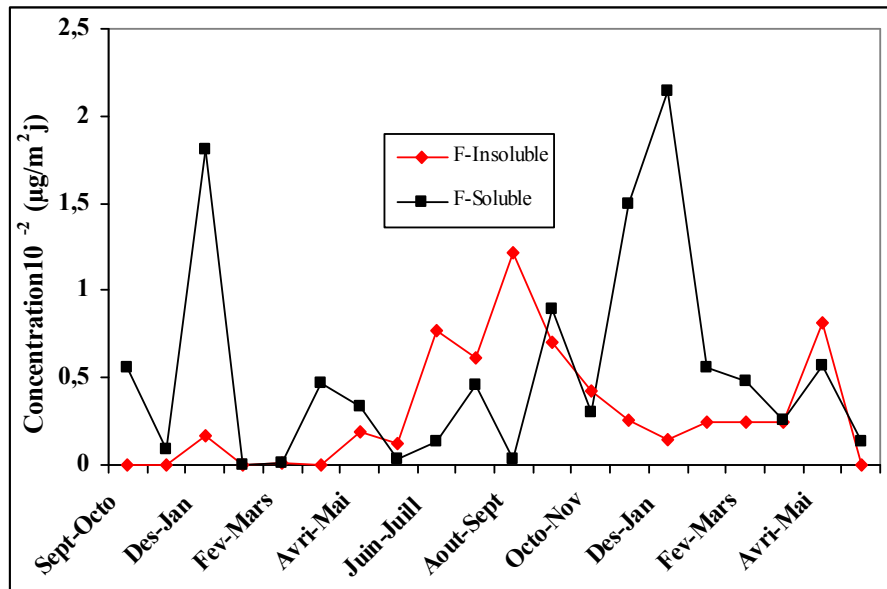


Figure VI.14. Evolution des retombées solubles et insolubles de cuivre au niveau du CHUC

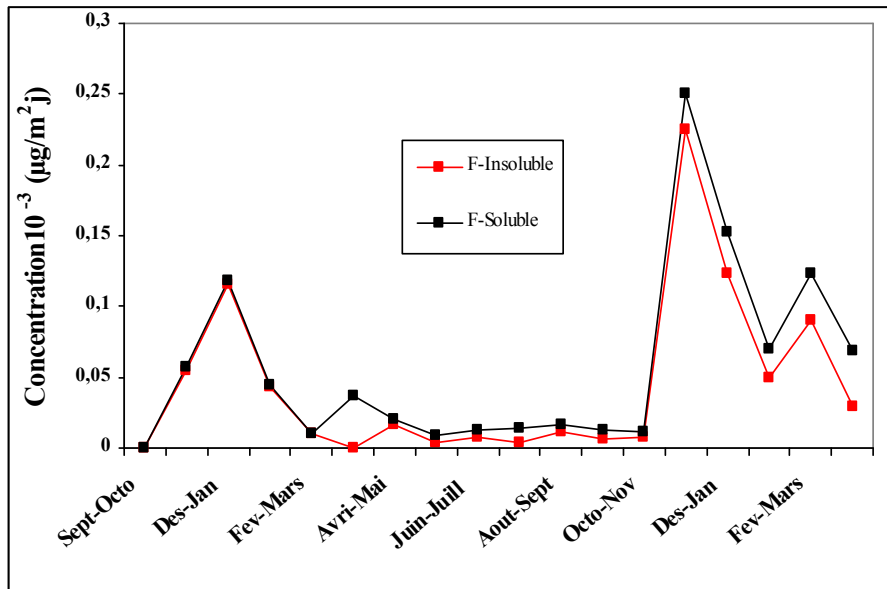


Figure VI.15. Evolution des retombées solubles et insolubles de cuivre au niveau de la DDS

VI.4.2.1.2. Les retombées de cadmium

Les valeurs des retombées de cadmium reportées dans la figure VI.16 sont comprises entre 0 et 103,11µg/m<sup>2</sup>.j. Les moyennes observées dans les trois sites de mesure sont comprises entre 0,19 et 42,98 µg/m<sup>2</sup>.j. Le tableau VI.11 reprend les moyennes des retombées totales de cadmium pour les trois sites.

Tableau VI.11. Flux moyens des retombées totales de cadmium au niveau des trois sites durant la période d'échantillonnage totale

Site	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
APC	0	19,55	3,23	5,55
CHUC	2,20	103,11	42,98	26,49
DDS	0	0,75	0,19	2,03

Il apparaît que les charges de cadmium sont de l'ordre de 0,32 (DDS), 20,85 (CHUC) et 1,18 (APC) fois la norme préconisée par l'OMS et qui est égale à  $2 \mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{j}$  et de 0,13 (DDS), 8,34 (CHUC) et 0,47 (APC) fois la norme allemande de  $5 \mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{j}$  [72]. Cette figure permet de constater que les niveaux les plus élevés des retombées de cadmium sont observés au niveau du CHUC.

En effet, les retombées de cadmium sont bien corrélées au niveau de la DDS et l'APC ( $r=0,72$ ), leur principale source étant le trafic routier. Selon Delatraz et Paul (1998), le cadmium est produit par l'usure des pièces mécaniques, des pneumatiques et des lubrifiants.

Aucune corrélation n'a pas pu être trouvée avec les conditions météorologiques et les autres éléments. Il est donc possible que l'intensité des retombées de cadmium soit surtout influencée par le trafic routier, l'incinérateur qui se trouve au niveau de l'hôpital CHUC ainsi que des engrais largement utilisés en agriculture dans la région se trouvant à l'Ouest de la ville de Didouche Mourad.

Au niveau de l'APC, les retombées de cadmium ont connu une forte augmentation lors du 7<sup>ème</sup> et du 19<sup>ème</sup> prélèvements (avril-mai 2005 et avril-mai 2006 respectivement), voire une disparition totale pendant la période comprise entre le 21/11/2005 et le 21/03/2006 (figure VI.16). Il existe une bonne corrélation entre le cadmium et les poussières ( $r=0,83$ ) au niveau de l'APC Daksi (tableau VI.22.).

Au niveau de la DDS, le cadmium présente une bonne corrélation avec les retombées totales ( $r=0,92$ ) (tableau VI.21).

L'examen des figures VI.17, VI.18 et VI.19 (cadmium soluble et insoluble) permet de constater que la fraction soluble de cadmium au niveau du CHUC et de l'APC est plus importante que la fraction insoluble. Par contre, au niveau de la DDS, on remarque que la fraction insoluble est plus importante que la fraction soluble. Cela pourrait signifier que la

majorité du cadmium d'origine anthropique au niveau de ces sites se trouverait sous forme de fines particules dans les deux fractions.

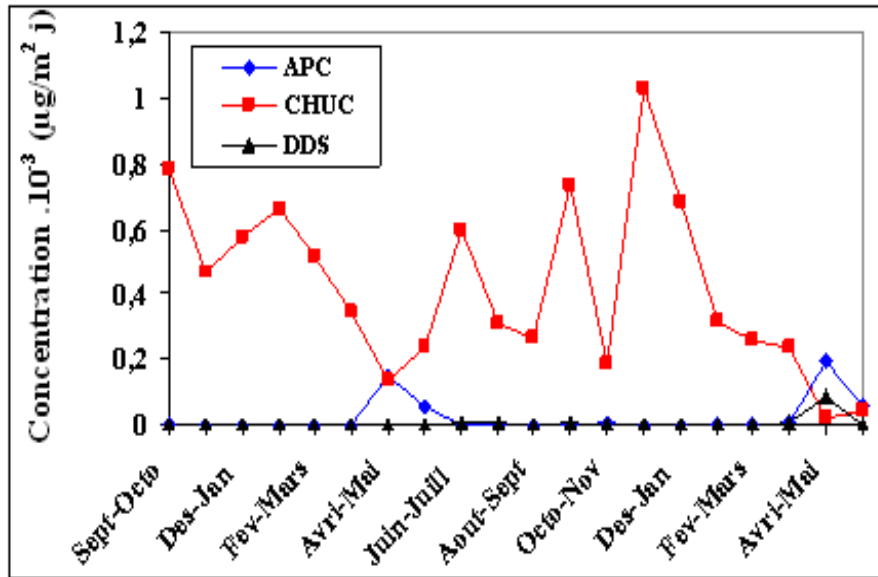


Figure VI.16. Evolution des retombées totales de cadmium au niveau des trois sites

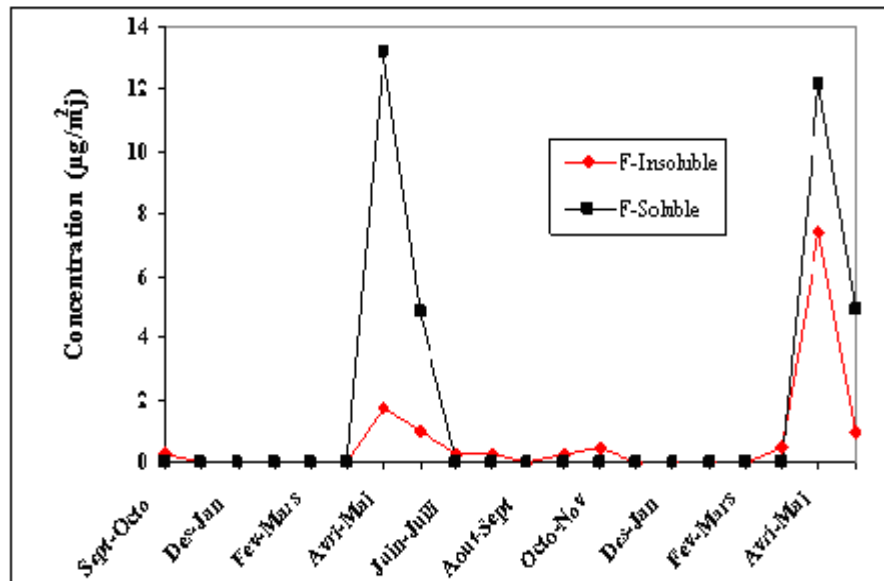


Figure VI.17. Evolution des retombées solubles et insolubles de cadmium au niveau de l'APC

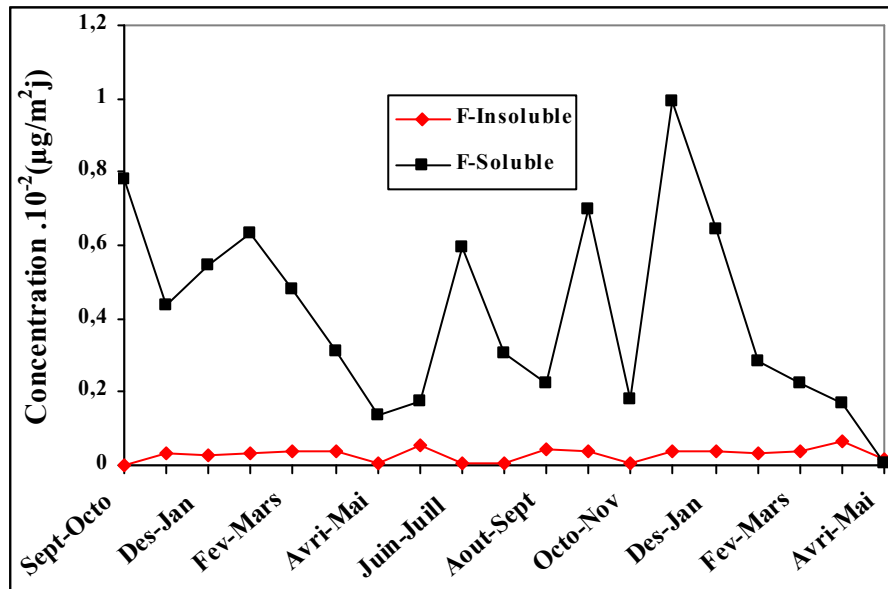


Figure VI.18. Evolution des retombées solubles et insolubles de cadmium au niveau du CHUC

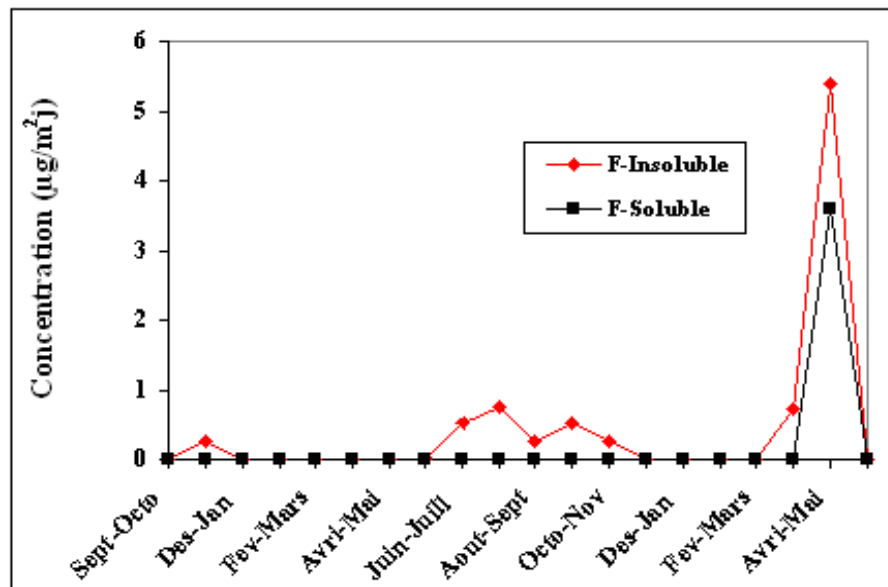


Figure VI.19. Evolution des retombées solubles et insolubles de cadmium au niveau de la DDS

VI.4.2.1.3. Les retombées de plomb

Les valeurs des retombées de plomb reportées dans la figure VI.20 sont comprises entre 0 et 1178,32 µg/m<sup>2</sup>.j. Les moyennes enregistrées dans les trois sites de mesure oscillent entre 143,82 et 279,19 µg/m<sup>2</sup>.j. Le tableau VI.12 reprend l'ensemble des moyennes des retombées totales de plomb pour les trois sites.

Tableau VI.12. Valeurs moyennes des retombées totales de plomb au niveau des trois sites durant la période d'échantillonnage totale

Site	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
APC	0	660	143,82	158,68
CHUC	0	1178,32	216,96	284,14
DDS	93,66	774,98	279,19	199,15

Il apparaît que les moyennes des retombées de plomb sont de l'ordre de 2,79 (DDS), 2,17 (CHUC) et 1,44 (APC) fois la valeur guide de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{j}$  proposée par la TA-Luft Allemande [72].

De bonnes corrélations lient le plomb à la température ( $r=0,65$ ), au potassium ( $r=0,62$ ) et au calcium ( $r=0,57$ ) au niveau de l'APC. Aucune corrélation n'a pas pu être trouvée avec les conditions météorologiques ou autres éléments au niveau de la DDS et du CHUC.

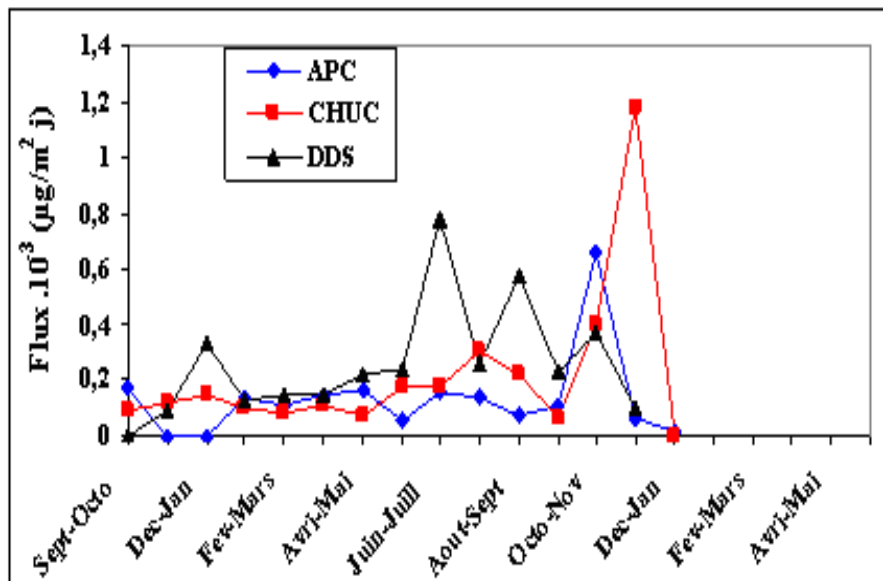


Figure VI.20. Evolution des retombées totales de plomb au niveau des trois sites



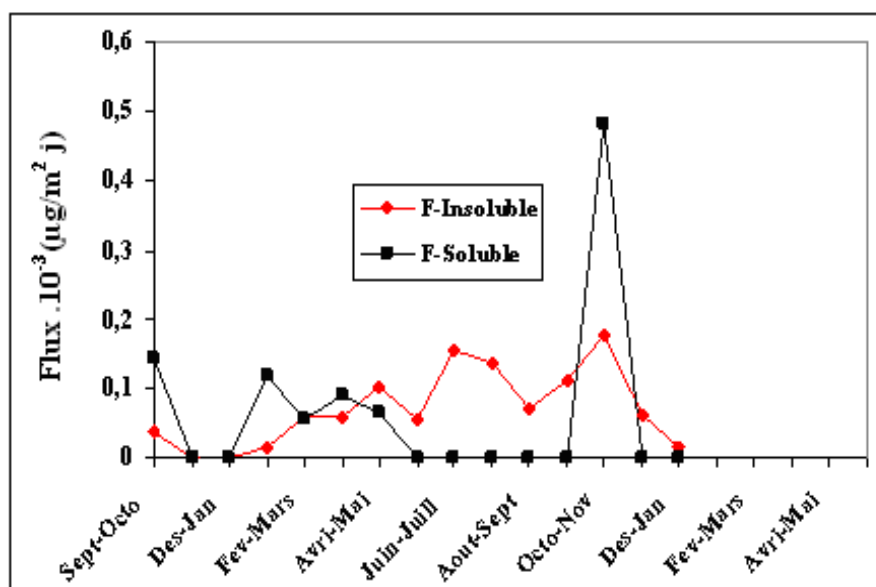


Figure VI.21. Evolution des retombées solubles et insolubles de plomb au niveau de l'APC

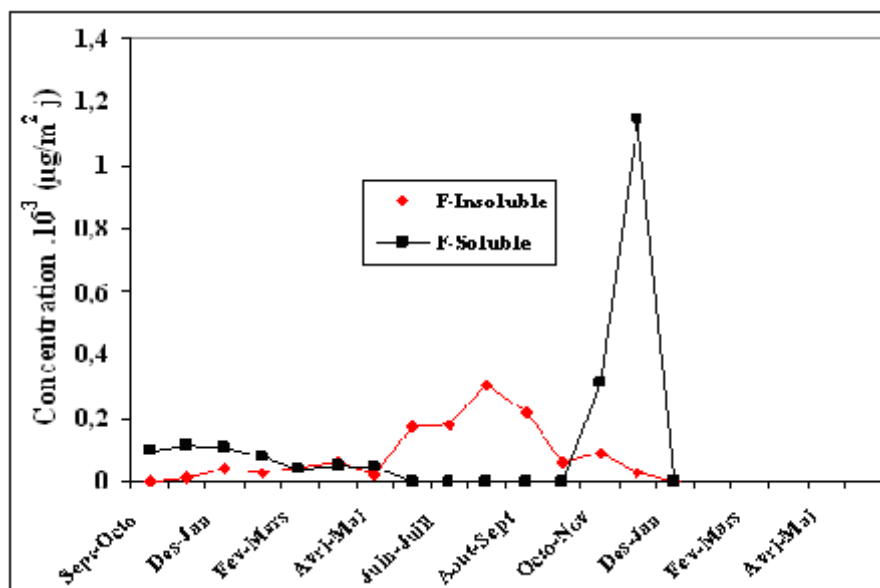


Figure VI.22. Evolution des retombées solubles et insolubles de plomb au niveau du CHUC

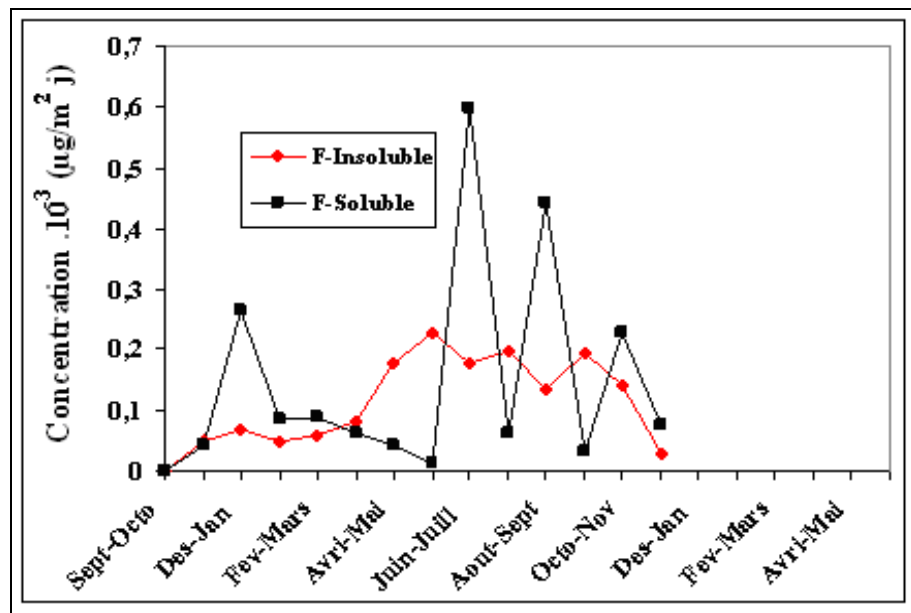


Figure VI.23. Evolution des retombées solubles et insolubles de plomb au niveau de la DDS

Les figures VI.21, VI.22 et VI.23 (plomb soluble et insoluble) permettent de constater que :

- Au niveau de la DDS : les fractions solubles atteignent des pics plus importants que les fractions insolubles durant les prélèvements de Jan- Fév 2005, Juin- Août 2005, Sept-Oct 2005 et Nov-Déc 2005. Cela peut être dû à la présence de particules très fines d'origine anthropique issues de la circulation routière intense dans le centre ville, de la zone industrielle, de la cimenterie de Hamma-Bouziane (NW, N et WNW et NNW), des zones industrielles Boumerzoug et Oued Hamimine (métallurgie et mécanique), (ESE, SE) (voir figure VI.1. (d, j, m et n))

Les prélèvements d'Avril-Mai à Juin-Août 2005 sont caractérisés par une fraction insoluble plus élevée que la fraction soluble reflétant la présence de la majorité des particules sous forme de fines particules d'origine entropique dans cette fraction. .

- Au niveau de l'APC et du CHUC : on remarque une augmentation significative de la fraction soluble (Nov-Déc) 2005 dans les retombées totales. Cela laisse supposer que cette pollution provient de la cimenterie de Hamma Bouziane et sa carrière (NW à NNW).

## VI.4.2.2. Les métaux alcalins et alcalinoterreux

## VI.4.2.2.1. Les retombées de potassium

Les valeurs des retombées de potassium sont comprises entre 0,00 et 194,16 mg/m<sup>2</sup>.j (figure VI.24). Les moyennes enregistrées dans les trois sites de mesure varient entre 4,82 mg/m<sup>2</sup>.j et 38,32 mg/m<sup>2</sup>.j. Le tableau VI.13 illustre les moyennes des retombées totales de potassium au niveau des trois sites.

Tableau VI.13. Valeurs moyennes des retombées totales de potassium au niveau des trois sites durant la période d'échantillonnage totale

Site	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
APC	6,17	194,16	38,32	43,33
CHUC	0,00	10,58	4,82	3,73
DDS	1,28	50,99	14,35	13,85

La figure VI.24 illustre l'évolution des retombées de potassium pour les trois sites d'étude. On constate que les retombées de potassium au niveau de l'APC sont plus élevées qu'au niveau des deux autres sites. Cela peut s'expliquer par l'existence d'une corrélation qui lie ce métal au niveau de deux autres sites ( $r=0,65$ ).

Les retombées de potassium sont maximales au niveau de l'APC au cours des prélèvements de Mai-Juin, Juil-Août et Nov-Dec 2005 et pendant les prélèvements de Mar-Avril, Mai-Juin, Juil-Aout et Sep-oct 2005 au niveau du CHUC (figure VI.24). Cela peut s'expliquer par le vent qui souffle dans les directions N à NNW (voir tableau VI.10) pendant ces prélèvements, sachant que les principales sources du potassium sont les engrais et les embruns marins. Pour la DDS, le flux des retombées de potassium est stable pendant toute la période d'étude.

Les figures VI.25, VI.26 et VI.27 confirment que le potassium se trouve la plupart du temps sous forme de particules très fines. Ils proviendraient essentiellement de sources anthropiques.

Au niveau de la DDS il existe des corrélations entre le potassium et les retombées de poussières ( $r=0,51$ ), la vitesse du vent ( $r=0,51$ ), le plomb ( $r=0,62$ ). Le potassium et le plomb auraient une origine commune. Leurs principales sources sont les embruns marins et

l'incinération des déchets (ex: l'incinérateur qui se trouve au niveau de l'hôpital CHUC, la décharge publique située à Ain Smara).

Il n'y a aucune corrélation entre le potassium et les autres métaux. au niveau des deux autres sites.

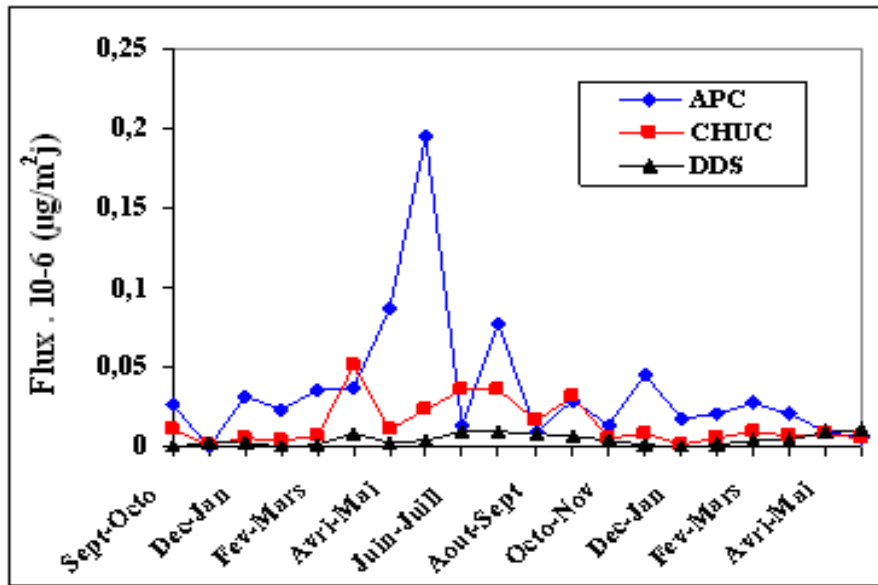


Figure VI.24. Evolution des retombées totales de potassium au niveau des trois sites

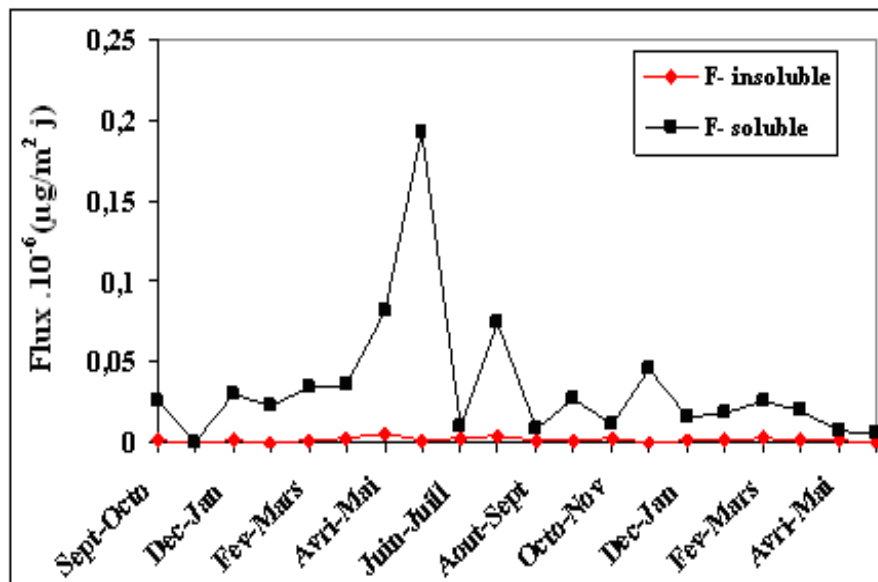


Figure VI.25. Evolution des retombées solubles et insolubles de potassium au niveau de l'APC

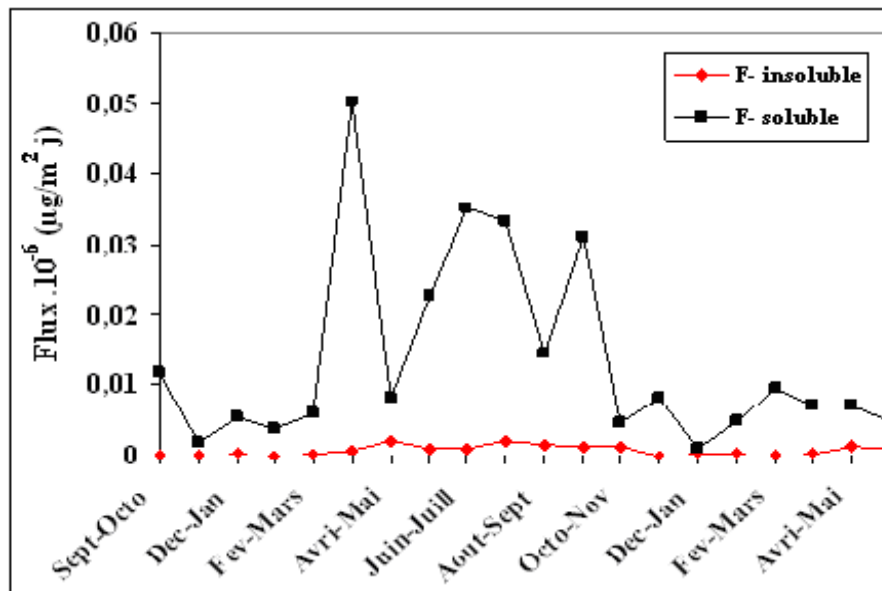


Figure VI.26. Evolution des retombées solubles et insolubles de potassium au niveau du CHUC

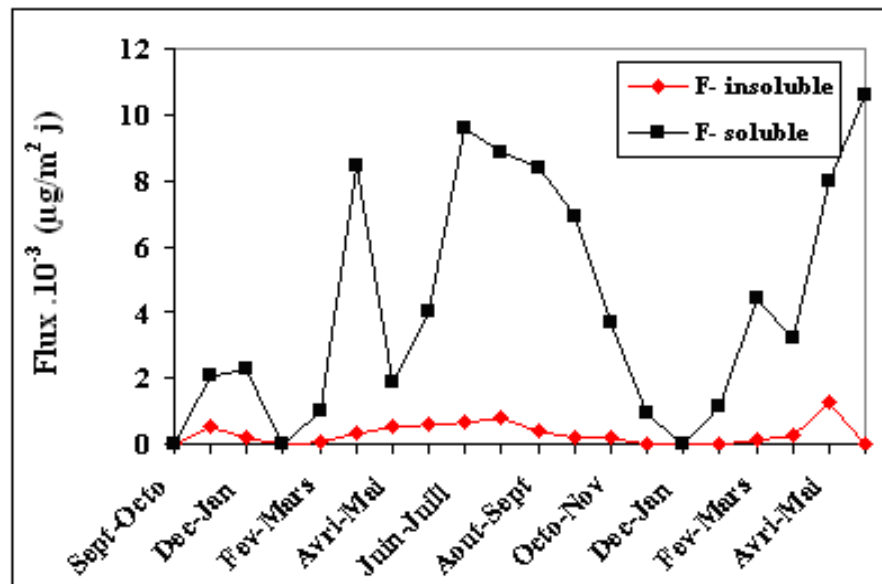


Figure VI.27. Evolution des retombées solubles et insolubles de potassium au niveau de la DDS

VI.4.2.2.2. Les retombées de calcium

Les valeurs des retombées de calcium sont comprises entre 0,13  $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{j}$  et 197,34  $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{j}$  (figure VI.28). Les moyennes enregistrées dans les trois sites de mesure oscillent entre 45,89  $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{j}$  et 54,71  $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{j}$ . Le tableau VI.14 reprend les moyennes des retombées totales de calcium pour les trois sites.

Tableau VI.14. Valeurs moyennes des retombées totales de calcium au niveau des trois sites durant la période d'échantillonnage totale ( $\text{mg}/\text{m}^2\text{j}$ )

Site	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
APC	8,48	197,34	52,90	45,99
CHUC	14,33	158,54	54,71	37,52
DDS	0,13	131,39	45,89	34,41

Les retombées de calcium sont très élevées puisqu'elles proviennent de plusieurs sources anthropiques. Elles sont corrélées ( $r=0,60$ ) au niveau de deux sites (l'APC et le CHUC).

Au niveau de la DDS : le calcium, le potassium, le plomb et le cadmium seraient issus d'une source commune. Cela est reflété par l'existence de corrélations qui lient le calcium aux autres métaux (voir Tableau VI.21). Cette pollution proviendrait principalement de la cimenterie de Hamma Bouzianne et sa carrière.

Au niveau de l'APC, le calcium est assez bien corrélé avec le potassium ( $r= 0,70$ ). Par contre au niveau du CHUC il n'y a aucune corrélation qui lie ce métal avec les autres métaux.

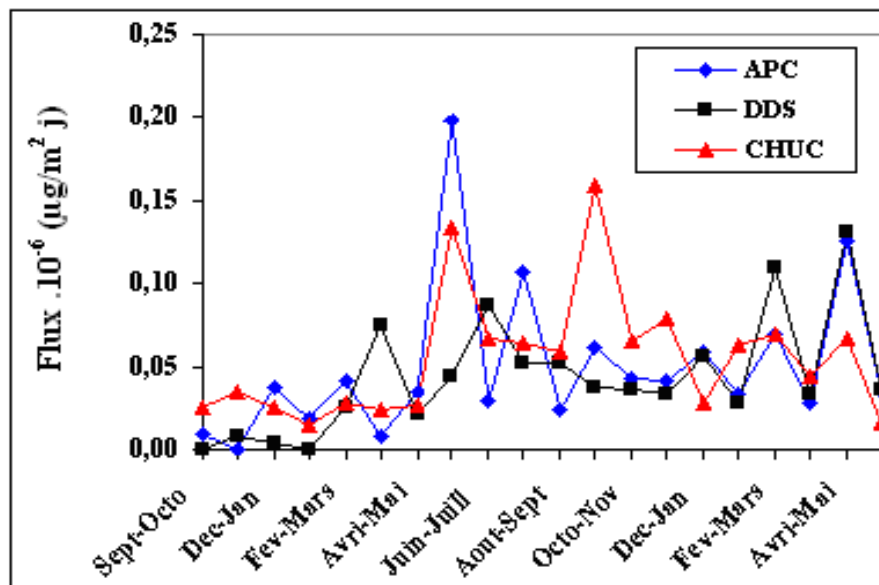


Figure VI.28. Evolution des retombées totales de calcium au niveau des trois sites

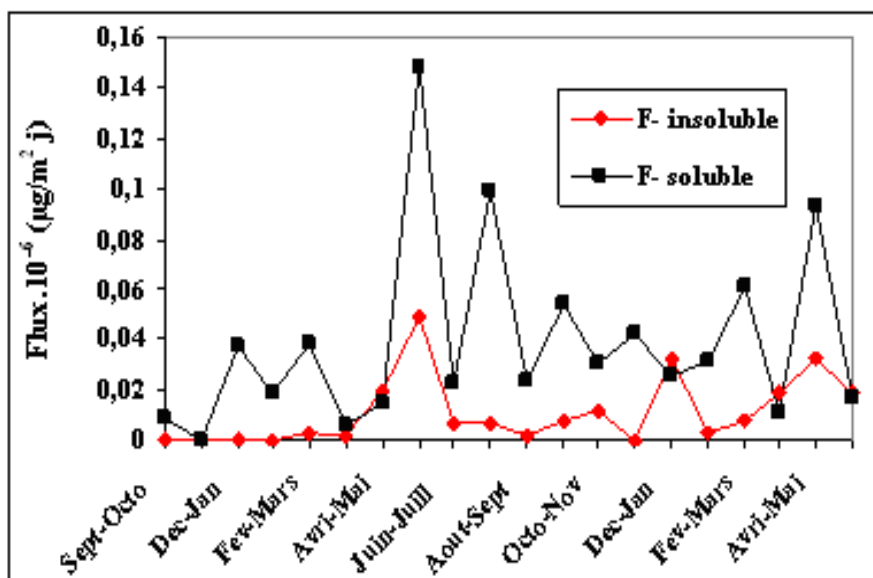


Figure VI.29. Evolution des retombées solubles et insolubles de potassium au niveau de l'APC

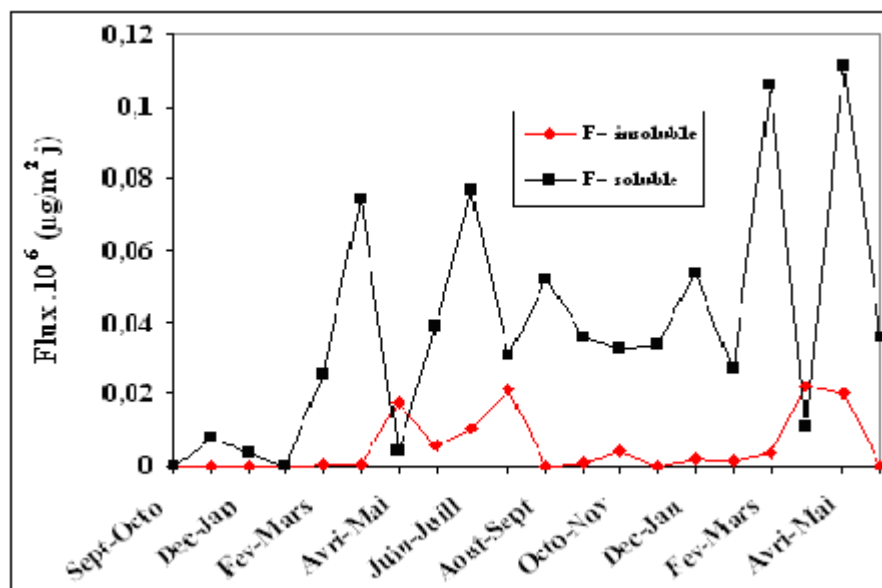


Figure VI.30. Evolution des retombées solubles et insolubles de calcium au niveau de la DDS

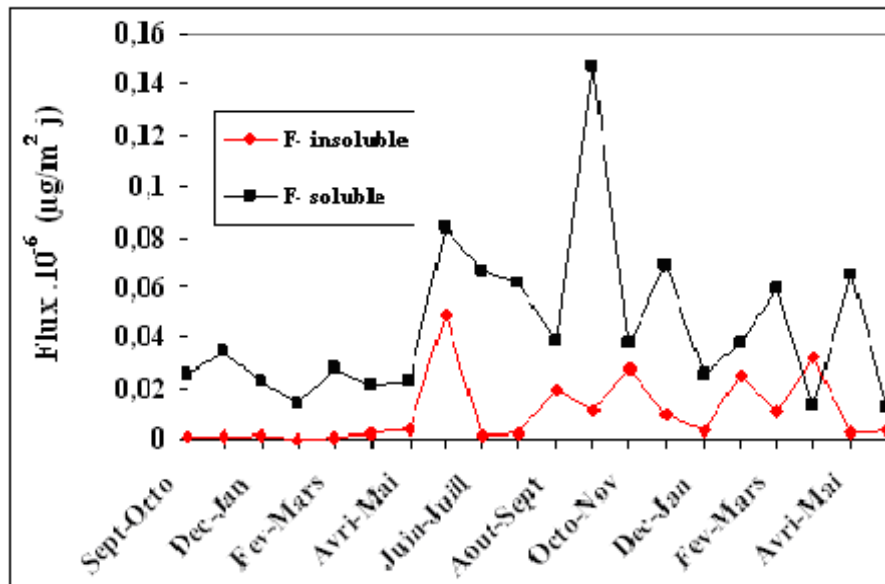


Figure VI.31 Evolution des retombées solubles et insolubles de calcium au niveau duCHUC

VI.4.2.2.3. Les retombées de baryum

Les niveaux des retombées de baryum sont rapportés dans la figure VI.32 qui indique des pics compris entre 0,28 mg/m<sup>2</sup>.j et 42,11 mg/m<sup>2</sup>.j. Les moyennes enregistrées dans les trois sites de mesure varient entre 42,11 mg/m<sup>2</sup>.j et 0,28 mg/m<sup>2</sup>.j. Le tableau VI.15 reprend les moyennes des retombées totales de baryum pour les trois sites.

Tableau VI.15. Valeurs moyennes des retombées totales de baryum au niveau des trois sites durant la période d'échantillonnage totale (mg/m<sup>2</sup>.j)

Site	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
APC	0,72	25,64	8,68	6,17
CHUC	0,28	42,11	12,77	13,69
DDS	2,81	15,76	7,29	3,39

A partir du graphe VI.32 on peut remarquer que le flux de baryum au niveau du CHUC est le plus élevé par rapport aux deux autres sites. Cela peut être expliqué par la présence d'un incinérateur au niveau de ce site. Une bonne corrélation lie les retombées de baryum et de potassium (r=0,81) au même site.

Les figures VI.33, VI.34 et VI.35 (baryum soluble et insoluble) permettent de constater que les fractions solubles de baryum sont plus grandes que les fractions insolubles pour les trois sites de prélèvement. Cela signifie que le baryum se trouve dans la plupart du temps sous forme de particules très fines, suggérant ainsi une action anthropique à son origine. Les principales sources de baryum sont le calcaire et l'incinération des déchets (voir tableau III.2 (chapitre III)).



En ce qui concerne la DDS il existe des corrélations entre les retombées de baryum et la pluviométrie ( $r=0,56$ ), le cuivre ( $r=0,59$ ), le calcium ( $r=0,53$ ). Ces trois métaux proviendraient de source(s) communes.

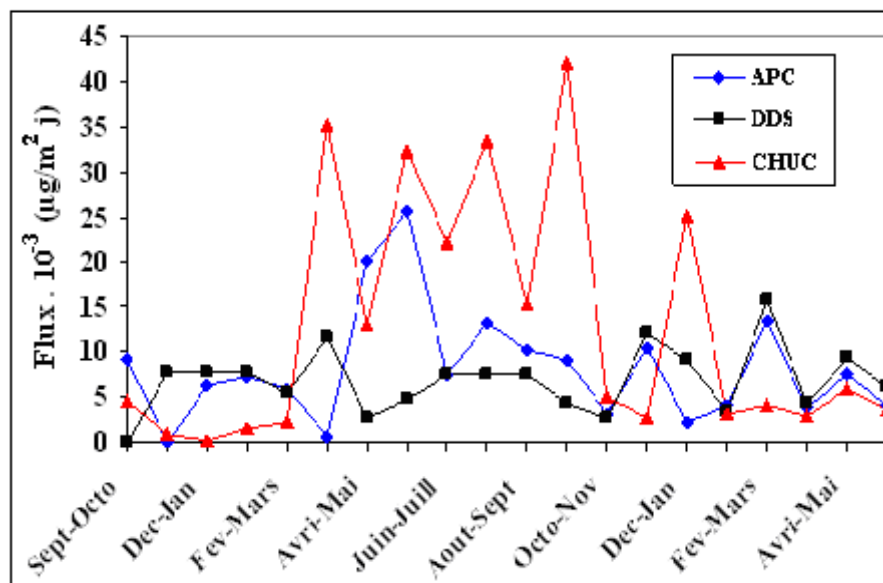


Figure VI.32. Evolution des retombées totales de baryum au niveau des trois sites

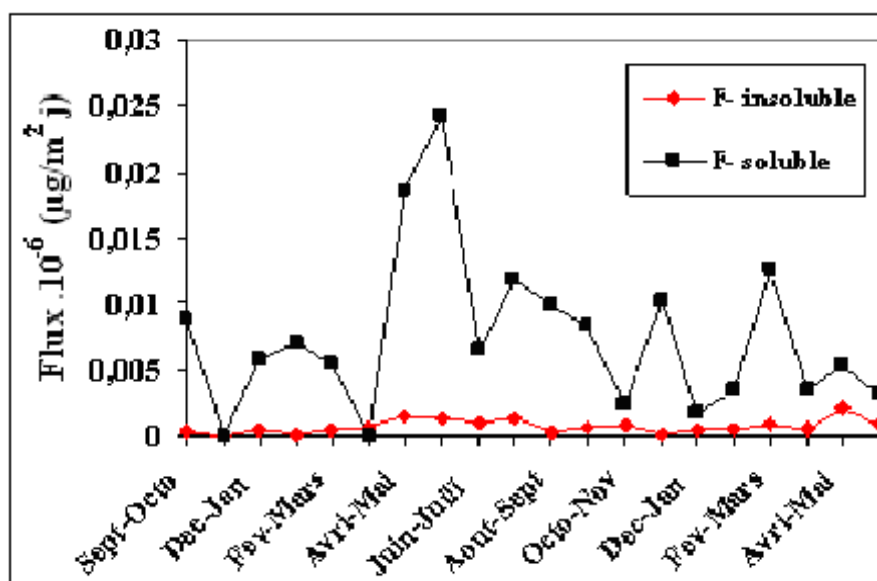


Figure VI.33. Evolution des retombées solubles et insolubles de baryum au niveau de l'APC

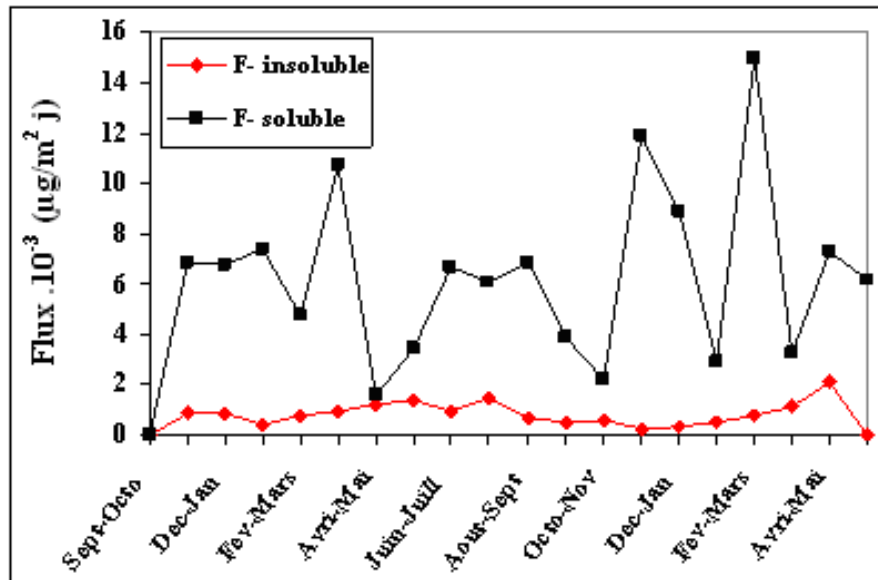


Figure VI.34. Evolution des retombées solubles et insolubles de baryum au niveau de la DDS

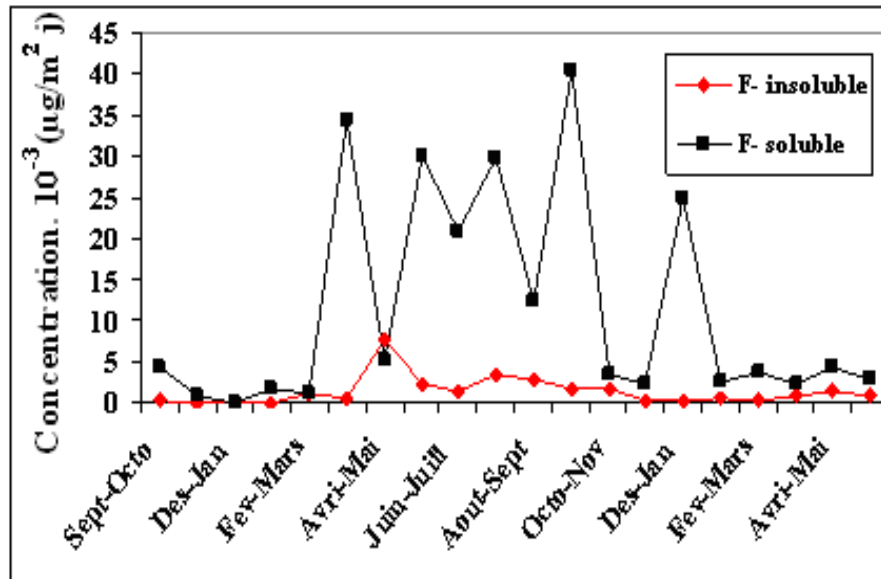


Figure VI.35. Evolution des retombées solubles et insolubles de baryum au niveau du CHUC

VI.4.2.2.4. Les retombées de sodium.

Les valeurs des retombées de sodium sont comprises entre 0,00 mg/m<sup>2</sup>.j et 373,91 mg/m<sup>2</sup>.j (figure VI.36). Les moyennes enregistrées dans les trois sites de mesure oscillent entre 8,62 mg/m<sup>2</sup>.j et 35,44 mg/m<sup>2</sup>.j. Le tableau VI.16 reprend les moyennes des retombées totales de sodium pour les trois sites.

Tableau VI.16. Valeurs moyennes des retombées totales de sodium au niveau des trois sites durant la période d'échantillonnage totale ( $\text{mg}/\text{m}^2\text{j}$ )

lieu	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
APC	3,73	373,91	20,86	83,14
CHUC	1,25	119,89	35,44	33,45
DDS	0,00	43,18	8,62	11,22

La figure VI.36 permet de constater que les flux de retombées du sodium au niveau des trois sites d'étude sont stables et ont la même allure. On remarque l'existence de pics remarquables durant les périodes (Mai-Jui 2005) pour l'APC, (Juin-Juil 2005) et (Sep-Oct 2005) pour le CHUC. En effet, au niveau de la DDS, il existe des corrélations liant les retombées de sodium à celles de calcium ( $r=0,79$ ) et de baryum ( $r=0,67$ ). Pour l'APC le sodium est assez bien corrélé avec le baryum ( $r=0,70$ ), le calcium ( $r=0,80$ ) et le potassium ( $r=0,88$ ). Par contre il n'existe aucune corrélation au niveau du CHUC avec les autres métaux.

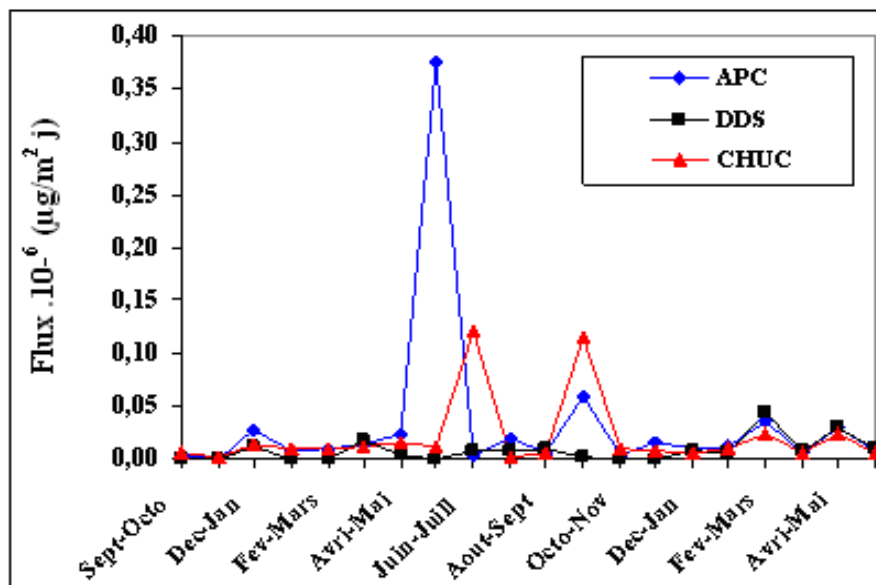


Figure VI.36. Evolution des retombées totales de sodium au niveau des trois sites

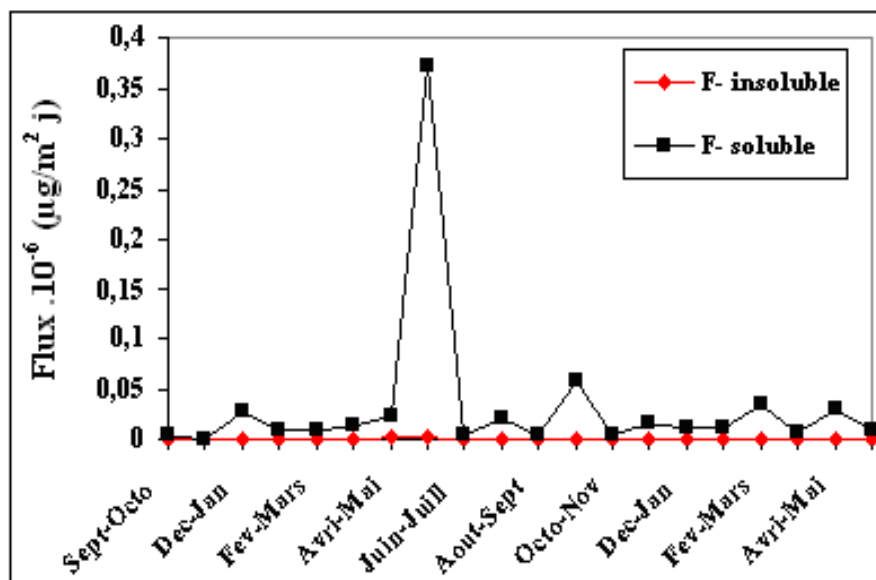


Figure VI.37. Evolution des retombées solubles et insolubles de sodium au niveau de l'APC

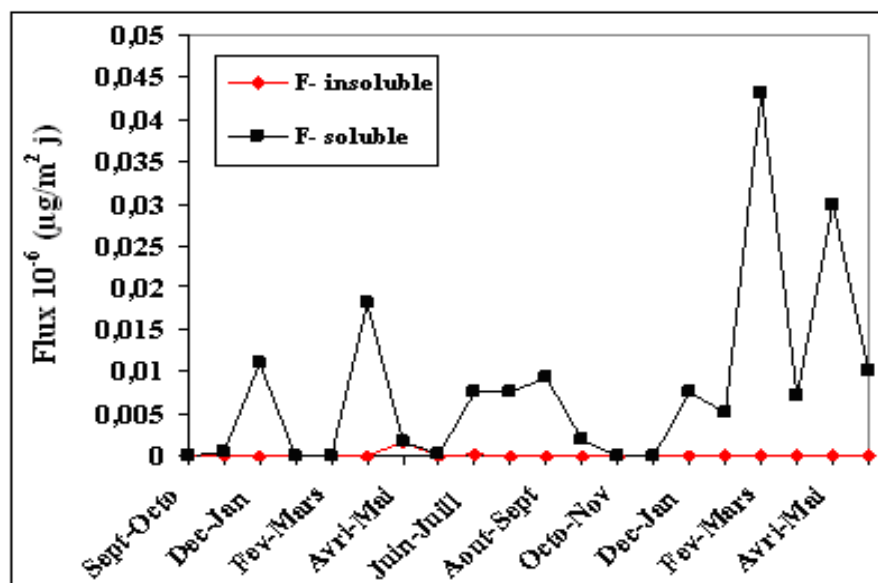


Figure VI.38. Evolution des retombées solubles et insolubles de sodium au niveau de la DDS

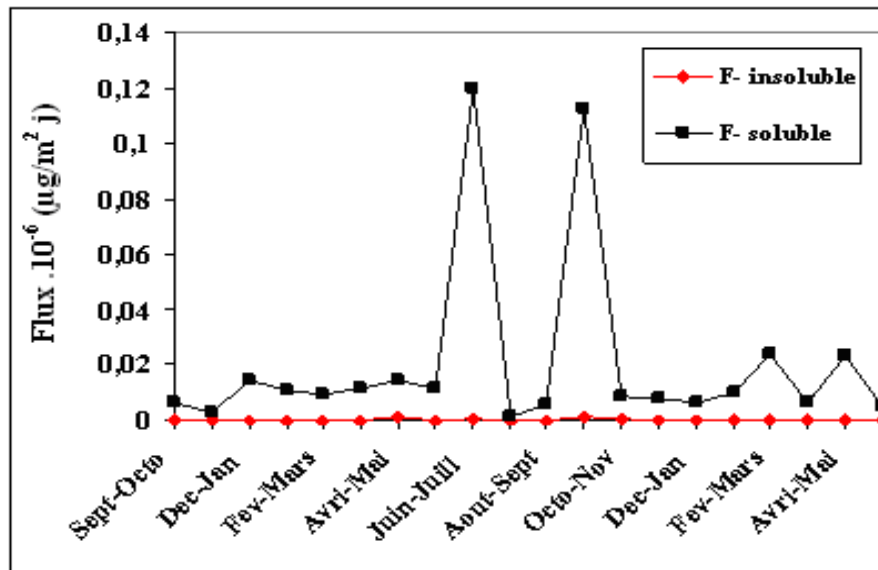


Figure VI.39. Evolution des retombées solubles et insolubles de sodium au niveau du CHUC

NB : pour le lithium est absent aux niveaux des trois sites des prélèvements.

#### VI.4. Variation du pH et de la conductivité des solutions

Le pH a une grande influence sur la toxicité des métaux car il exerce un rôle sur leur équilibre ionique ; ainsi il détermine leur solubilité, leur transport et leur accumulation dans divers écosystèmes. La figure VI.40 indique des fluctuations du pH autour de 7 pendant la période d'étude. En général, on peut dire que le pH est plus ou moins neutre pendant toute la durée de l'étude car il est compris entre 6,25 et 8,71.

Tableau VI.17. Valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique pour les trois sites

	APC		CHUC		DDS	
	pH	conductivité	pH		pH	conductivité
Maximum	8,71	6560	8,30	Maximum	8,71	6560
Minimum	6,52	65,54	6,67	Minimum	6,52	65,54
Moyenne	7,68	619,65	7,53	Moyenne	7,68	619,65

Bien que les volumes de solutions recueillis en fin des périodes de prélèvement soient différents, on peut tenter de corrélérer les valeurs du pH aux concentrations des métaux alcalins mesurées dans les fractions solubles.

Les corrélations entre le pH, la conductivité et les différents métaux alcalins au niveau des trois sites d'étude sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Tableau VI.18. Corrélations entre le pH, la conductivité et les différents métaux alcalins au niveau des trois sites

	APC		CHUC		DDS	
	pH	conductivité	pH	conductivité	pH	conductivité
Ca	-	0,60	-	-	-	-
Ba	-	0,71	-	-	-	-
Na	-	0,87	-	0,44	0,76	-
K	-	0,89	-	-	0,47	-

L'examen du tableau VI.18 permet de constater qu'il existe une bonne corrélation entre le pH des solutions et la concentration de sodium ( $\text{Na}^+$ ) au niveau de la DDS ( $r=0,76$ ). Par contre, aucune corrélation n'a été observée au niveau du CHUC et de l'APC. Une bonne corrélation entre la conductivité des solutions et la concentration de calcium ( $r=0,60$ ), de baryum ( $r=0,71$ ), de sodium ( $r=0,87$ ) et de potassium ( $r=0,89$ ) ont été observés au niveau de l'APC.

L'examen des figures VI.38 et VI.40 (Na dissous) au niveau de la DDS confirme que la concentration élevée de sodium ( $\text{Na}^+$ ) ( $43,18 \text{ mg/m}^2\text{j}$ ) durant la période Fév-Mars s'accompagne d'un pH maximal égal à 8,38.

La conductivité et la pluviométrie varient en sens inverse durant la période d'étude (21/11/2004 au 21/06/2006). Le maximum de la pluviométrie correspond au minimum de la conductivité et vice versa. Ceci peut être expliqué par les phénomènes de concentration ou de dilution.

La figure VI.41 montre l'évolution de la conductivité électrique des solutions de jauges pour les trois postes de prélèvement à travers la période d'échantillonnage. Celle-ci est comprise entre  $58,21 \mu\text{S/cm}$  et  $6560 \mu\text{S/cm}$ .

L'existence d'un pic important durant le prélèvement Mai-Juin peut s'expliquer par les fortes concentrations des retombées enregistrées pendant cette période.

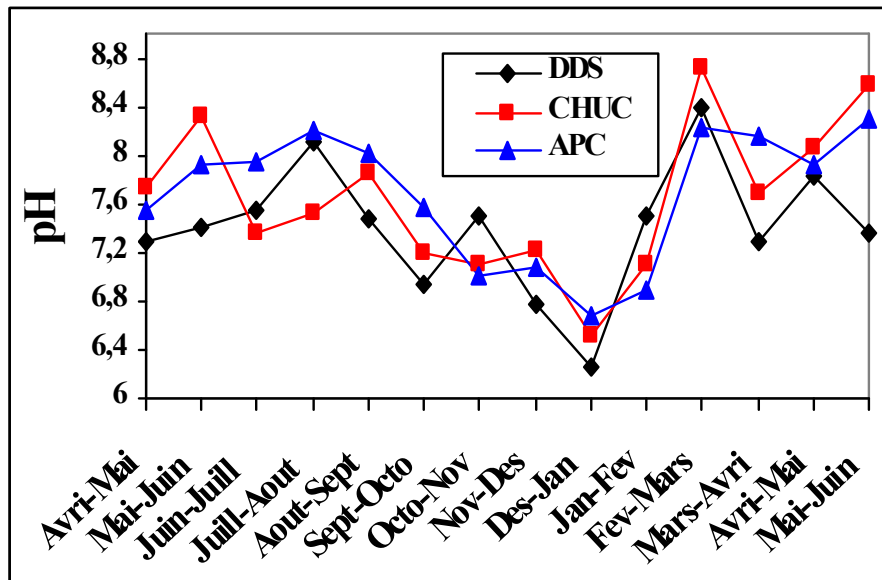


Figure VI.40. Variation du pH des solutions au niveau des trois sites

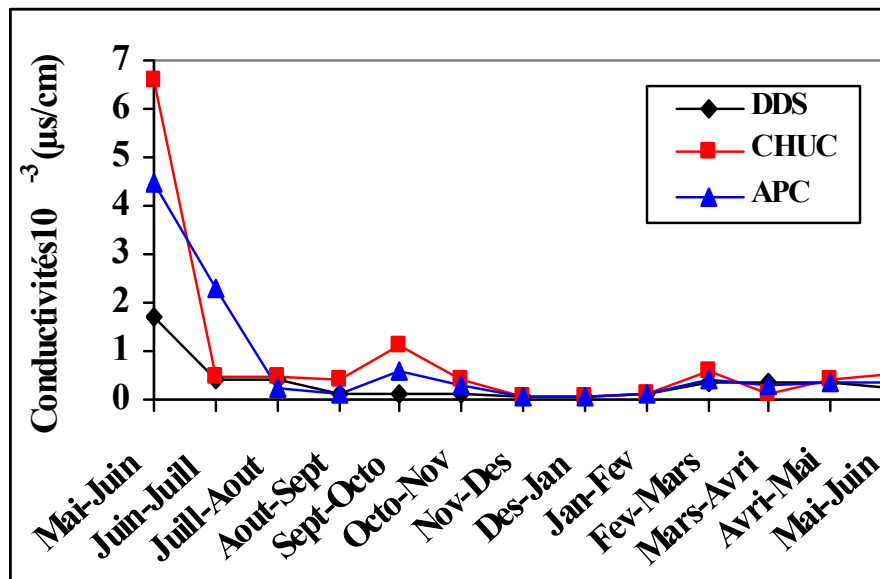


Figure VI.41. Variation de la conductivité électrique des solutions au niveau des trois sites

VI.5. Identification des sources de pollution particulaire et métallique

VI.5.1 Résumé des corrélations

Les corrélations des retombées totales et métalliques et des paramètres météorologiques au niveau des trois sites sont résumées dans les tableaux VI.21, VI.22 et VI.23.

Tableau VI.19. Corrélations entre les poussières, les métaux lourds, les métaux alcalins et les différents facteurs météorologiques au niveau de la DDS

	poussières	Pb	Cd	Cu	Ca	Ba	Na	K	Li
Pb	0,42	-	-	-	-	-	-	-	-
Cd	<b>0,92</b>	0,44	-	-	-	-	-	-	-
Cu	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca	<b>0,66</b>	<b>0,57</b>	<b>0,61</b>	-	-	-	-	-	-
Ba	-	-	0,12	<b>0,59</b>	<b>0,53</b>	-	-	-	-
Na	0,47	0,31	0,44	0,21	<b>0,79</b>	<b>0,67</b>	-	-	-
K	<b>0,51</b>	<b>0,62</b>	0,34	-	<b>0,57</b>	0,10	0,36	-	-
Li	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vents	<b>0,55</b>	0,43	0,36	-	<b>0,72</b>	0,18	0,49	<b>0,52</b>	-
Pression	0,19	-	-	-	-	0,20	-	0,33	-
Pluviométrie	-	-	0,10	<b>0,72</b>	-	<b>0,56</b>	0,22	-	-
Température	0,48	<b>0,65</b>	0,24	-	0,37	-	-	<b>0,83</b>	-

Tableau VI.20. Corrélations entre les poussières, les métaux lourds, les métaux alcalins et les différents facteurs météorologiques au niveau de l'APC Daksi

	poussières	Pb	Cd	Cu	Ca	Ba	Na	K	Li
Pb	0,31	-	-	-	-	-	-	-	-
Cd	<b>0,83</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
Cu	0,27	-	0,18	-	-	-	-	-	-
Ca	<b>0,53</b>	-	0,41	0,19	-	-	-	-	-
Ba	0,17	-	0,35	-	<b>0,63</b>	-	-	-	-
Na	0,19	-	0,18	0,21	<b>0,80</b>	<b>0,70</b>	-	-	-
K	-	-	0,20	-	<b>0,70</b>	<b>0,83</b>	<b>0,88</b>	-	-
Li	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vents	<b>0,51</b>	-	0,29	0,16	0,37	0,12	-	-	-
Pression	0,18	0,24	-	-	-	-	0,21	0,12	-
Pluviométrie	-	-	-	0,48	-	-	-	0,14	-
Température	0,42	0,13	0,34	-	0,35	0,36	0,24	0,25	-



Tableau VI.21. Corrélations entre les poussières, les métaux lourds, les métaux alcalins et les différents facteurs météorologiques au niveau du CHUC

	poussières	Pb	Cd	Cu	Ca	Ba	Na	K	Li
Pb	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cd	-	0,38	-	-	-	-	-	-	-
Cu	-	0,26	0,36	-	-	-	-	-	-
Ca	<b>0,52</b>	0,21	-	0,23	-	-	-	-	-
Ba	0,34	-	-	0,22	-	-	-	-	-
Na	0,24	-	0,26	0,21	<b>0,53</b>	0,45	-	-	-
K	0,24	-	-	-	0,36	<b>0,81</b>	0,48	-	-
Li	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vents	0,22	0,12	-	0,11	0,20	0,30	0,21	0,35	-
Pression	0,16	0,24	-	-	-	0,21	-	0,12	-
Pluviométrie	-	0,16	0,38	-	-	0,11	-	0,22	-
Température	<b>0,54</b>	-	-	-	0,34	0,47	0,34	<b>0,54</b>	-

## VI.5.2. Contribution de la direction du vent aux retombées atmosphériques totales

Une recherche de l'effet de la direction du vent sur les retombées de poussières et une analyse des résultats obtenus dans cette étude permettraient d'identifier la direction des sources possibles. Qin et Oduyemi (2003) ont identifié la direction des sources principales responsables des concentrations de PM10 à Dundee en comparant les contributions moyennes de chaque secteur de vent ( $M_i \times P_{ij}$ ) aux retombées totales ( $\sum M_i$ ) avec les fréquences moyennes du vent. Si la contribution moyenne d'un secteur de vent donné est plus élevée que la fréquence moyenne du vent dans ce secteur, il s'ensuit que les sources se trouvant dans ce secteur exercent une forte influence dans cette direction. A l'inverse, ces sources exercent une faible influence dans cette direction.

Les contributions moyennes des secteurs de vent aux retombées totales peuvent être calculées comme suit [72] :

$$E_j = \sum M_i P_{ij} / \sum M_i$$

Où  $E_j$  (%) est la contribution moyenne du secteur de vent  $j$  (1 à 16) à la masse des retombées

$M_i$  est la masse de poussières ou d'élément en traces de l'échantillon  $i$  (1 à 10)

$P_{ij}$  (%) est la fréquence du secteur de vent  $j$  durant la période de prélèvement  $i$

Tableau VI.22. Contributions moyennes des secteurs de vent aux retombées totales et métalliques au niveau de la DDS

Secteur	Contributions du vent (%)								
	FMV*	Poussières	Cu	Cd	Pb	Ba	Ca	Na	K
N	6,08	5,91	4,34	3,95	<b>8,58</b>	5,78	6,11	4,68	<b>7,52</b>
NNE	5,04	<b>5,25</b>	2,69	2,94	<b>6,72</b>	4,48	5,17	4,17	<b>6,75</b>
NE	3,47	<b>4,87</b>	1,86	<b>5,21</b>	<b>4,16</b>	3,23	<b>3,96</b>	3,54	<b>4,66</b>
ENE	4,11	<b>11,02</b>	2,35	<b>18,11</b>	3,09	4,56	<b>6,63</b>	<b>7,73</b>	<b>6,13</b>
E	6,27	<b>9,59</b>	<b>7,21</b>	<b>13,46</b>	4,18	<b>6,76</b>	<b>7,41</b>	<b>10,18</b>	6,32
ESE	9,38	<b>10,06</b>	9,21	7,37	<b>11,12</b>	9,42	<b>9,74</b>	8,86	9,49
SE	10,29	7,34	10,19	5,42	<b>14,01</b>	9,78	10,30	7,01	<b>10,73</b>
SSE	4,18	3,31	<b>4,73</b>	2,69	<b>4,60</b>	4,22	4,19	3,54	4,13
S	2,95	1,93	<b>3,31</b>	1,79	2,57	2,73	2,51	2,39	2,43
SSW	3,84	1,80	<b>4,49</b>	1,69	2,59	3,50	2,39	2,94	2,50
SW	4,01	1,91	<b>4,82</b>	1,57	2,43	3,86	2,57	2,88	2,61
WSW	2,74	<b>3,34</b>	2,73	<b>4,55</b>	1,67	2,68	2,62	<b>2,99</b>	2,60
W	5,74	<b>7,89</b>	<b>7,29</b>	<b>9,07</b>	2,78	<b>7,45</b>	<b>7,92</b>	<b>11,91</b>	<b>6,38</b>
WNW	7,83	<b>9,02</b>	<b>9,03</b>	<b>10,16</b>	4,73	<b>8,80</b>	<b>9,03</b>	<b>12,10</b>	7,77
NW	11,03	8,93	<b>13,79</b>	5,76	<b>13,38</b>	<b>11,72</b>	10,63	8,45	10,27
NNW	8,01	7,42	<b>8,33</b>	5,73	<b>10,77</b>	7,97	7,93	5,90	<b>8,49</b>

Tableau VI.23. Contributions moyennes des secteurs de vent aux retombées totales et métalliques au niveau du CHUC

Secteur	Contributions du vent (%)								
	FMV*	Poussières	Cu	Cd	Pb	Ba	Ca	Na	K
N	6,08	<b>7,96</b>	5,95	5,78	<b>6,83</b>	<b>7,76</b>	<b>6,98</b>	<b>7,96</b>	<b>8,26</b>
NNE	5,04	<b>7,22</b>	4,25	3,92	4,93	3,19	<b>5,54</b>	<b>6,06</b>	<b>5,92</b>
NE	3,47	<b>4,82</b>	3,37	3,04	2,91	<b>3,80</b>	<b>4,21</b>	<b>4,73</b>	<b>4,11</b>
ENE	4,11	<b>4,43</b>	4,18	2,68	1,86	2,98	4,12	<b>4,89</b>	3,89
E	6,27	5,00	<b>6,35</b>	4,93	2,87	3,07	5,84	5,24	4,69
ESE	9,38	8,93	<b>9,61</b>	8,93	9,00	<b>9,79</b>	9,18	9,40	<b>11,09</b>
SE	10,29	<b>15,53</b>	<b>12,70</b>	<b>11,23</b>	<b>13,70</b>	<b>15,81</b>	<b>12,45</b>	<b>14,17</b>	<b>12,06</b>
SSE	4,18	<b>5,02</b>	<b>4,70</b>	<b>4,57</b>	<b>5,63</b>	<b>5,25</b>	<b>4,56</b>	<b>4,60</b>	<b>4,42</b>
S	2,95	2,88	<b>3,13</b>	<b>3,37</b>	<b>3,47</b>	2,93	2,99	2,90	2,58
SSW	3,84	2,16	3,52	<b>4,69</b>	3,85	2,63	3,12	2,22	2,44
SW	4,01	2,01	3,57	<b>4,75</b>	3,92	3,13	2,94	1,99	2,26
WSW	2,74	2,22	2,48	2,45	2,43	1,96	2,31	1,81	1,81
W	5,74	4,28	5,19	4,65	2,93	2,64	<b>6,06</b>	4,42	4,78
WNW	7,83	5,45	7,06	6,58	4,85	5,11	6,94	5,89	7,66
NW	11,03	10,86	<b>12,37</b>	<b>12,84</b>	<b>16,37</b>	<b>13,46</b>	10,95	<b>11,26</b>	<b>12,54</b>
NNW	8,01	<b>9,86</b>	<b>8,93</b>	<b>8,64</b>	<b>11,23</b>	<b>10,44</b>	<b>8,90</b>	<b>9,48</b>	<b>9,34</b>

Tableau VI.24. Contributions moyennes des secteurs de vent aux retombées totales et métalliques au niveau de l'APC

Secteur	Contributions du vent (%)								
	FMV*	Poussières	Cu	Cd	Pb	Ba	Ca	Na	K
N	6,08	<b>6,31</b>	3,89	<b>6,59</b>	<b>7,03</b>	<b>7,23</b>	<b>6,72</b>	<b>8,83</b>	<b>8,06</b>
NNE	5,04	<b>5,46</b>	3,20	<b>5,61</b>	<b>5,61</b>	<b>5,91</b>	<b>5,77</b>	<b>7,87</b>	<b>6,22</b>
NE	3,47	<b>5,12</b>	2,95	<b>5,63</b>	<b>3,62</b>	<b>4,35</b>	<b>4,70</b>	<b>6,50</b>	<b>4,57</b>
ENE	4,11	<b>10,11</b>	<b>6,21</b>	<b>11,73</b>	2,66	4,08	<b>5,63</b>	3,47	3,00
E	6,27	<b>8,05</b>	<b>7,66</b>	<b>8,43</b>	2,71	5,38	<b>6,76</b>	5,17	4,58
ESE	9,38	<b>10,13</b>	8,62	<b>11,77</b>	9,30	<b>10,76</b>	<b>10,90</b>	<b>13,44</b>	<b>12,90</b>
SE	10,29	9,02	<b>10,48</b>	6,66	<b>17,06</b>	<b>10,65</b>	<b>10,79</b>	9,87	<b>10,92</b>
SSE	4,18	3,63	<b>4,75</b>	3,06	<b>5,13</b>	<b>4,30</b>	4,12	3,97	<b>4,27</b>
S	2,95	2,13	<b>3,18</b>	1,83	<b>3,16</b>	2,70	2,46	2,21	2,45
SSW	3,84	1,73	3,30	1,62	3,24	2,84	2,29	1,63	2,28
SW	4,01	1,83	3,79	1,59	3,10	2,61	2,45	1,48	2,21
WSW	2,74	<b>3,21</b>	<b>3,20</b>	<b>3,70</b>	2,04	2,23	2,51	2,02	1,90
W	5,74	<b>6,95</b>	<b>7,54</b>	<b>6,25</b>	2,78	<b>6,46</b>	<b>6,90</b>	4,92	5,24
WNW	7,83	<b>8,81</b>	<b>8,73</b>	<b>8,46</b>	4,82	6,70	7,29	6,34	6,66
NW	11,03	9,44	<b>12,36</b>	8,59	<b>13,41</b>	<b>11,55</b>	<b>11,13</b>	<b>11,35</b>	<b>12,97</b>
NNW	8,01	7,59	7,87	7,93	<b>9,81</b>	<b>9,30</b>	<b>8,60</b>	<b>9,27</b>	<b>9,81</b>

Les vents prédominants à Constantine durant la période allant du 21/10/2004 au 21/06/2006 sont de tendance ESE, SW et NW, avec des fréquences de 9,38, 10,29 et 10,03 % respectivement (figure VI.1).

Les précipitations, elles, proviennent des secteurs WNW, WN, NWN, avec, respectivement des fréquences de 0,59, 0,62 et 0,55% respectivement (figure VI.2).

#### • *La DDS*

Globalement, on constate que la contribution des vents au niveau de la DDS venant des secteurs NNE à ESE et WSW à WNW est supérieure à la fréquence moyenne du vent dans ces mêmes secteurs pour les retombées totales.

En ce qui concerne le cuivre, ce sont les secteurs SSE à SW et W à NNW qui contribuent à ses retombées. L'origine de ces dépôts est liée probablement au trafic routier et aux engrais utilisés en agriculture. Pour le plomb, ce sont les secteurs NW à NE et ESE à SSE qui contribuent à ses retombées. Ces secteurs reflètent l'influence de la zone industrielle de Didouche Mourad, d'une part et, du trafic routier aux abords de la cité Loucif jouxtant l'hôpital (CHUC). Pour le cadmium, ce sont les secteurs NE à E et WSW à WNW qui contribuent à ses retombées.

Leur origine est presque commune à celle des retombées totales. Elles seraient liées au soulèvement des poussières dans ces directions et qui seraient riches en engrais contaminés par du cadmium.

Pour le potassium, ce sont les secteurs NNE à ENE qui contribuent essentiellement à son dépôt. Le potassium proviendrait des embruns marins.

Quand aux retombées de calcium, de baryum et de sodium, ce sont les secteurs W et WNW qui contribuent à leurs dépôts. On conclut que ces métaux ont des sources d'émission communes. Cela peut s'expliquer par l'influence de la cimenterie et de l'incinérateur de l'hôpital

- ***Le CHUC***

En ce qui concerne les retombées de poussières, les secteurs qui contribuent le plus à leur dépôt sont les directions NNW à NE qui englobent la cimenterie de Hamma Bouziane et sa carrière, d'une part, et les secteurs SE et SSE où se concentre le trafic routier à proximité de l'hôpital.

Pour les métaux lourds, les secteurs qui contribuent nettement à leurs dépôts sont de SE et SSE tout comme pour les retombées totales et reflètent l'impact du trafic routier ; dans les secteurs NW et NNW se trouvent la zone industrielle de Didouche Mourad et l'incinérateur de l'hôpital.

En ce qui concerne le calcium, le baryum, le sodium et le potassium, ce sont les secteurs NNW à NE et SE qui contribuent à leurs dépôts reflétant l'influence de la cimenterie, de la zone industrielle de Didouche Mourad, de l'incinérateur de l'hôpital et des embruns marins.

- ***L'APC***

Les secteurs N à ESE et WSW à WNW contribuent aux retombées des poussières. Dans le secteur Nord, se situent la cimenterie de Hamma Bouziane et sa carrière ; dans le secteur NNE à ESE se trouvent des terres agricoles. Le secteur ESE est caractérisé par un trafic routier intense.

En ce qui concerne le plomb et le cadmium, ce sont les secteurs déjà mentionnés dans le cas de la DDS qui contribuent à leurs dépôts. On pourrait en conclure que ces sources sont plutôt

distantes de la ville de Constantine. On peut ainsi invoquer la cimenterie de Hamma Bouziane et de sa carrière située au nord de la ville. La contribution des vents au plomb dans le secteur SE est tout particulièrement intéressante car elle dépasse de loin la fréquence moyenne des vents dans cette direction (17,06 vs 10,29). On pourrait justifier cet écart par la survenue d'un incendie ayant pris naissance dans le bois de Djebel El Ouahch qui se situe dans ce même secteur. L'origine des retombées de cadmium peut être liée, tout comme dans le cas de la DDS, au soulèvement de poussières contenant des particules de cadmium issues des engrais.

Pour le cuivre, ce sont surtout les secteurs ENE à E, WSW à NW qui contribuent fortement à ses retombées. L'origine de ces dépôts est liée probablement au trafic routier, d'une part, et les engrais utilisés en agriculture, d'autre part.

Quand aux retombées de calcium, de baryum, de potassium et de sodium ce sont les secteurs NW à SE qui contribuent à leurs dépôts. On conclut que ces métaux ont des sources d'émission communes (en l'occurrence, la cimenterie et les embruns marins).

## VI.6. Simulation de l'impact sanitaire

RISC Work bench est un logiciel qui reproduit les procédures standard décrites par l'US EPA pour l'évaluation des risques sanitaires cancérigènes et non cancérigènes (US EPA, 1989) pour les différentes voies d'exposition (contact dermique, voie pulmonaire, ingestion de sol etc.), pour différentes catégories de récepteurs (adultes ou enfants), en fonction de la composition chimique de polluant, de l'âge et du poids du récepteur et des concentrations des polluants.

### VI.6.1. Paramètres d'entrée du logiciel

Les concentrations des polluants dans l'air et dans le sol sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Tableau VI.25. Concentrations des polluants dans l'air et dans le sol

Elément métallique	Concentration dans l'air ambiant (mg/m <sup>3</sup> )	Concentration dans la surface de sol (mg/kg)
Baryum	$2,35 \cdot 10^{-3}$	13068,22
Cadmium	$3,60 \cdot 10^{-5}$	0,34
Cuivre	$4,94 \cdot 10^{-4}$	108,28
Plomb	$10^{-4}$	500,6

### VI.6.2. Résultats de la modélisation

Les résultats de la simulation sont présentés dans les figures suivantes (voir annexe VI).

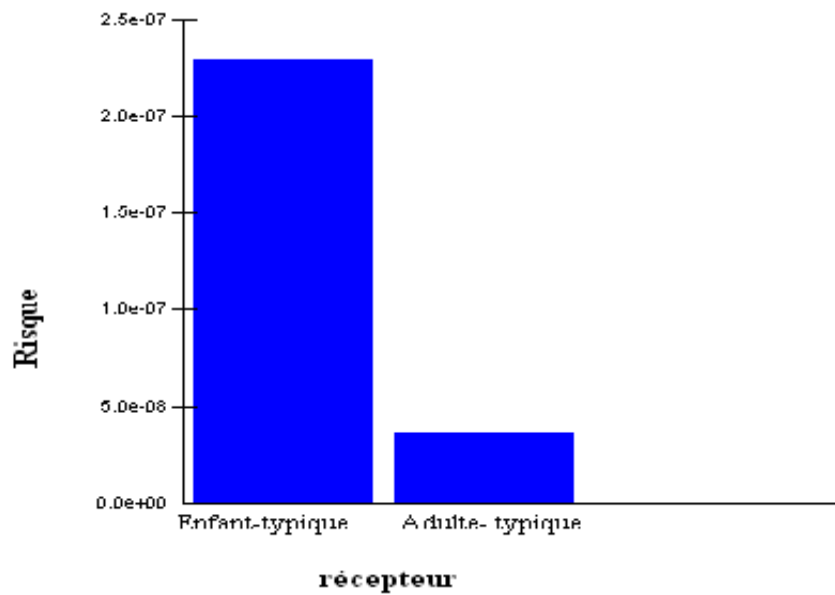


Figure VI.42. Les risques cancérogènes pour chaque récepteur

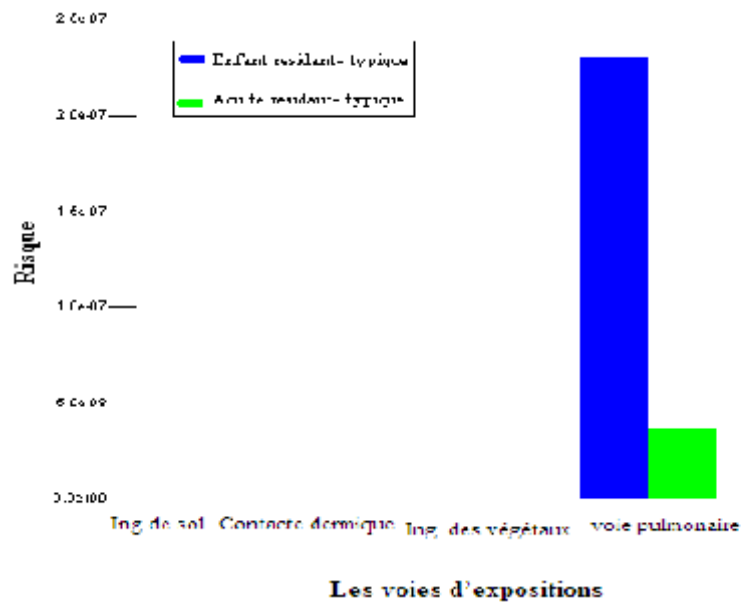


Figure VI.43. Risque cancérogène par voie d'exposition

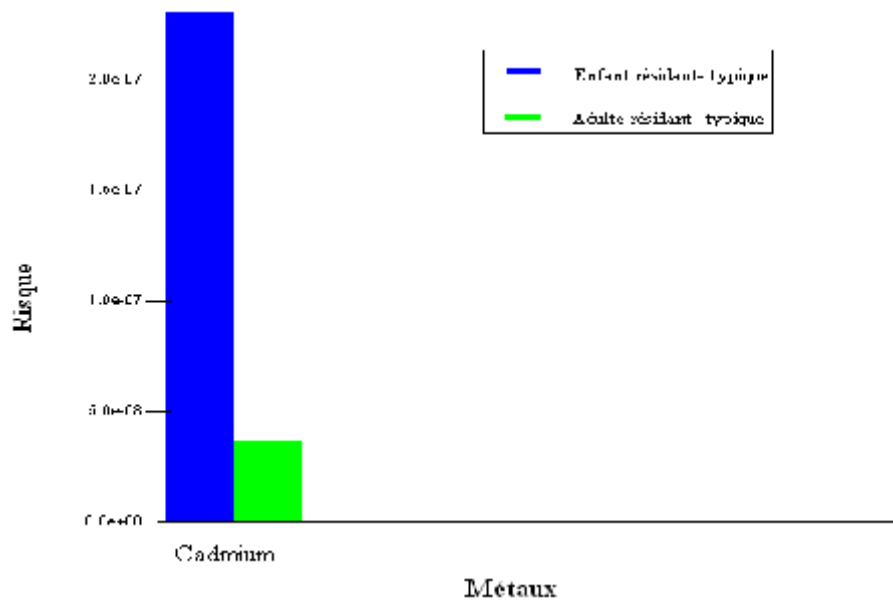


Figure VI.44. Risque cancérigène selon les composés chimiques

D’après les figures VI.42 VI.43 et VI.44 on peut remarquer que la seule voie d’exposition présentant des risques est la voie pulmonaire et que les risques cancérigènes sont plus élevés chez les enfants que les adultes, avec un facteur de dépassement de l’ordre de 6,22 fois. Parmi les métaux étudiés, l’absorption du cadmium présente un risque cancérigène négligeable ( $2,310^{-7}$  et  $3,710^{-8}$  mg/m<sup>3</sup> chez les enfants et les adultes respectivement) car largement inférieur au risque acceptable de  $10^{-6}$ .

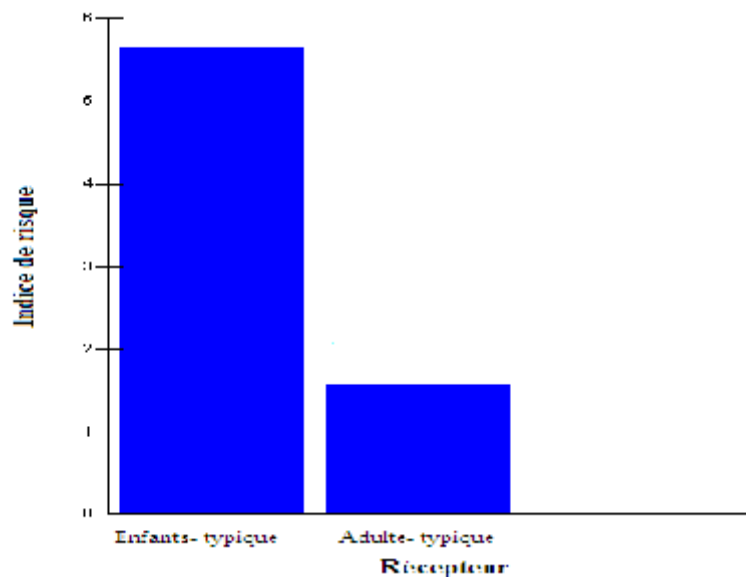


Figure VI.45. Indice de risque pour chaque récepteur



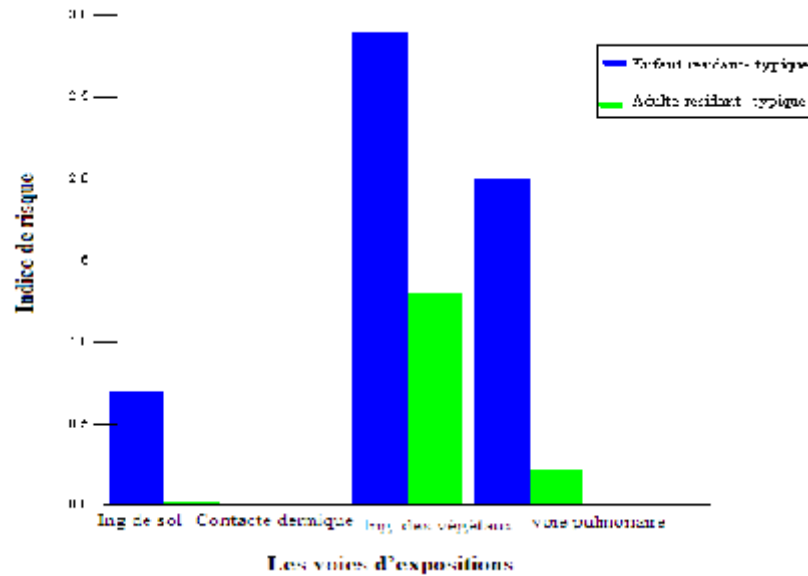


Figure VI.46. Indice de risque par voie d'exposition

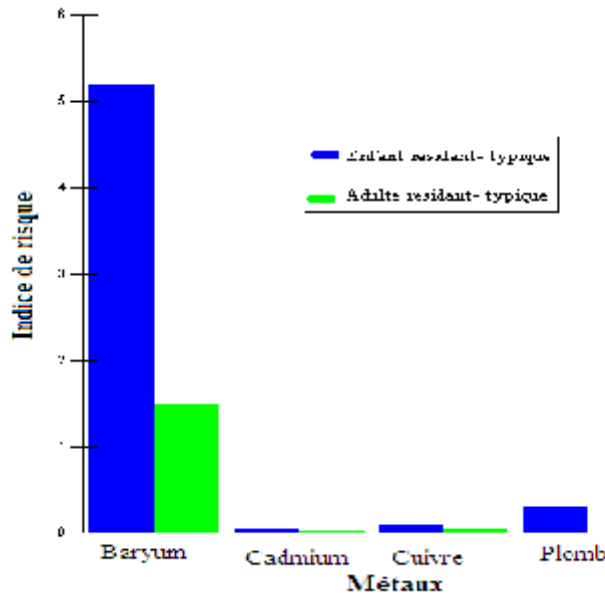


Figure VI.47. Indice de risque selon les composés chimiques

D'après les figures VI.45, VI.46 et VI.47, on peut constater que l'indice de risque est plus élevé chez les enfants que les adultes (5,7 et 1,6 respectivement). Ces indices sont supérieurs à l'unité. On peut donc conclure qu'il y a un risque d'apparition de maladie non cancérogène.

Les voies d'exposition sont par ordre d'importance décroissante: l'ingestion des végétaux, la voie pulmonaire, l'ingestion de sol et finalement le contact dermique.

L'indice de risque selon la nature des composés chimiques est lié par ordre d'importance décroissant au Ba, Pb, Cu et Cd.

## VI.7. Modélisation de la dispersion des polluants

### VI.7.1. Introduction

Modéliser la diffusion des polluants dans l'atmosphère a plusieurs intérêts. En permettant la simulation puis la prévision d'épisodes de pollution forte, des mesures peuvent être prises pour limiter la pollution, ou pour protéger les populations exposées. La dispersion des polluants renvoie aux principes de la circulation atmosphérique. En effet, les paramètres importants à prendre en compte dans la modélisation de la dispersion sont les facteurs météorologiques (vent, température, pression atmosphérique, etc.), mais aussi la topographie du site et les éléments d'aménagement autour du site.

### VI.7.2. Paramètres de la modélisation

#### VI.7.2.1. Météorologie

La météorologie est un élément essentiel dans l'appréhension des phénomènes de dispersion de la pollution. Des paramètres météorologiques, on tire deux informations : les types de temps favorables ou défavorables à la dispersion des polluants d'une part, et les types de temps favorables ou défavorables à la transformation physico-chimique des polluants. Les paramètres météorologiques importants pour l'étude de la dispersion des polluants sont décrits ci-dessous.

#### VI.7.2.2. Vitesse et direction du vent

Les directions et les vitesses du vent sont la manifestation du mouvement général de la masse d'air. Mais au sein de celle-ci règne une certaine turbulence qui est un facteur difficile à appréhender.

Le vent est l'un des paramètres météorologiques les plus importants pour le transport et la dispersion des polluants. En effet, un flux de polluants va subir, dès son entrée dans l'atmosphère, un transport dont la direction et la vitesse seront fonction de celles du vent à l'instant considéré. La pollution sera emportée, en même temps que la masse d'air où elle pénètre, d'autant plus vite que la force du vent sera importante, et ce, dans la direction imposée par celui – ci [10].

### VI.7.2.3. Température

Elle influe de plusieurs façons. Une faible température entraîne un changement de comportement des gens en favorisant une hausse du chauffage urbain et de l'utilisation des véhicules, ce qui augmente les émissions. Mais elle agit aussi dans la formation de polluants secondaires tels que l'ozone.

Dans l'étude de la dispersion de la pollution atmosphérique, certains épisodes sont plus intéressants que d'autres. Il s'agit des temps stables d'hiver avec couche d'inversion\* qui entraîne une stagnation des particules; ou des temps chauds d'été, avec une température supérieure à 25°C et un fort ensoleillement qui favorisent la production d'ozone [10].

### VI.7.2.4. Nébulosité

Elle est responsable de la formation d'un "couvercle" au dessus d'une zone polluée. Elle réduit également l'apport radiatif du soleil, ce qui tend à diminuer les transformations physico-chimiques des polluants primaires [10].

### VI.7.2.5. Humidité

Elle joue un rôle dans le captage des particules polluantes. Les gouttelettes d'eau en suspension retiennent les polluants, ce qui accroît leur stagnation [10].

### VI.7.2.6. Précipitations

Elles jouent aussi un rôle important, en plaquant au sol des particules polluantes et en les emportant dans les eaux d'écoulement. Cela ne relève cependant pas de l'étude de la diffusion des polluants dans l'atmosphère. Elle doit être prise en compte pour le calcul des immissions de polluant (dépôts au sol) [10].

---

Le phénomène de l'inversion thermique consiste en la présence d'une masse d'air à proximité du sol, recouverte par une masse d'air chaud provoquant la stagnation de la masse la plus lourde, c'est-à-dire la masse d'air froid. La manifestation visible d'une inversion thermique est la présence de brouillards matinaux relativement épais, l'évaporation ne pouvant se faire normalement [11].

### VI.7.3. Présentation du logiciel

CARoads view est un produit de Lakes Environnemental Software. C'est un logiciel qui modélise la dispersion des polluants de l'air autour des routes, en fonction de la densité du trafic et de la nature du composé étudié. Il permet, ainsi, de décrire la propagation et la migration des contaminants dans l'environnement, pour représenter les niveaux de pollution d'un site donné dans toutes les directions. Il contient trois modèles : CALINE4, CAL3QHC et CAL3QHCR

- CALINE4 permet d'étudier la dispersion dans l'air du CO, du NO<sub>2</sub> et des PS (particules en suspension) autour des voies routières, quelque soit leur configuration. Il permet l'insertion dans la modélisation de 20 routes, 20 récepteurs et jusqu'à 500 mètres de distance de part et d'autre de la route.
- CAL3QHC permet d'estimer la concentration du CO, du NO<sub>2</sub> ou des particules de part et d'autre des routes, et permet d'estimer la longueur des files d'attente formées par les véhicules roulant au ralenti au niveau des intersections.
- CAL3QHCR est une version améliorée du modèle précédent. Il peut traiter jusqu'à une année de données météorologiques horaires, les taux d'émission de polluants par les véhicules, le volume du trafic et les signalisations pour chaque heure de la semaine.

### VI.7.4. Géographie urbaine de la zone d'étude

Le centre-ville de Constantine est caractérisé par des voies de desserte relativement étroites et de type radial dans presque tous les quartiers. Le tracé de routes sur les flancs de collines et bordées de bâtiment en est une caractéristique commune. Cette géométrie favorise, par nature, la convergence du trafic vers le centre-ville et engendre une forte densité de la circulation automobile.

C'est sur la base de ces similitudes que nous avons choisi le quartier Belouizdad (ex-St Jean) comme site d'étude. Traversé par l'avenue de même nom, il est représentatif de la densité du trafic dans le centre-ville (voir figure VI.1).

## VI.7.5. Caractéristiques de l'avenue Belouizdad

Le segment d'étude de cette importante artère s'étale sur environ 400 mètres d'Est en Ouest. Il prend naissance au rond-point de la place des martyrs, il est plat et peu sinueux. Il est adossé au promontoire du Coudiat au sud et s'ouvre au nord sur la vallée du Hamma et sur sa cimenterie à peine masquée.

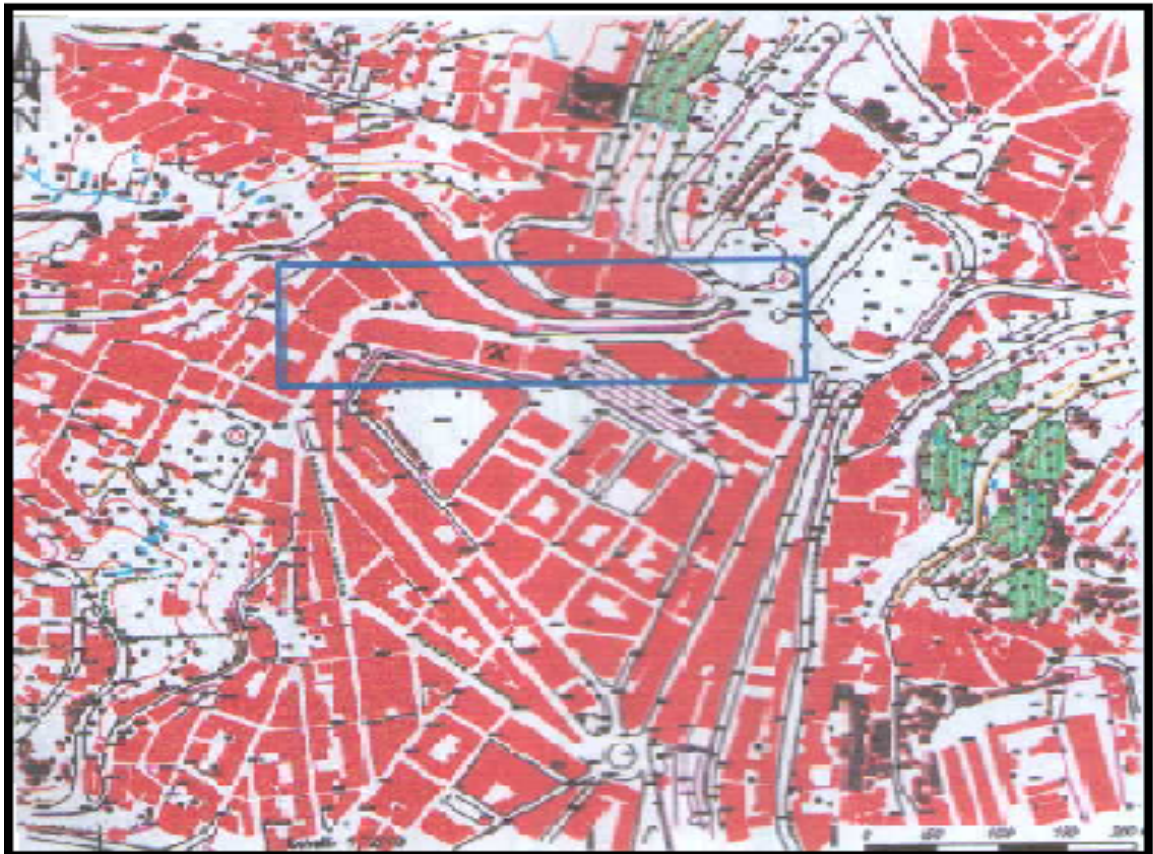


Figure.VI.1 Morphologie du boulevard Belouizdad

## VI.7.6. Paramètres d'entrée du logiciel

La modélisation du logiciel CARoads requiert des informations relatives aux différents paramètres météorologiques, à la densité du trafic automobile, aux facteurs d'émission des gaz à mesurer, à la configuration géométrique du site et à la localisation des récepteurs.

## VI.7.6.1. Trafic automobile

La densité du trafic automobile sur le site a été appréciée par sondage. Cela consiste à compter le nombre de véhicules par tranches horaires quotidiennes de tous les jours de la semaine, en vue d'obtenir un échantillon représentatif du trafic automobile sur le site [84].

A l'issue de cette opération, on relève un trafic moyen de 1500 véhicules par heure. Ce débit coïncide avec la valeur avancée par la Direction des Transports de Wilaya.

## VI.7.6.2. Facteur d'émission

Les facteurs d'émission des polluants d'origine anthropique ou naturelle, particulaires et gazeux (CO, NO<sub>2</sub>, PM), sont calculés selon la méthode explicitée ci-dessous.

D'après les tableaux VI.27 et VI.28, on peut calculer les facteurs d'émission suivant le type et la source d'énergie par l'équation suivante :

$$\text{Facteur d'émission (g/km.véhicule)} = [\sum V_{\text{diesel}} \cdot F_{\text{diesel}} + \sum V_{\text{essence}} \cdot F_{\text{essence}}] / \sum V_{\text{totales}}$$

Où :

$\sum V_{\text{diesel}}$  : nombre de véhicules diesel pour chaque type de moyen de transport

$F_{\text{diesel}}$  : Facteur d'émission des véhicules diesel pour chaque type de moyen de transport exprimé en g/km.véhicule

$\sum V_{\text{essence}}$  nombre de véhicules essence pour chaque type de moyen de transport

$F_{\text{essence}}$  : Facteur d'émission des véhicules essence pour chaque type de moyen de transport exprimé en g/km.véhicule

Les résultats des calculs sont résumés dans le tableau VI.28.

Tableau VI.26. La répartition du parc automobile selon le type et la source d'énergie [85]

<b>SOURCE D'ENERGIE</b>					
Genre	Essence		Gasoil		TOTAL
	nombre	%	nombre	%	
Véhicules Tourisme	60020	94,46	3522	5,54	63542
Camionnettes	17738	86,54	2760	13,46	20498
Autocars et Autobus	33	1,94	1666	98,06	1699
Motos	844	99,53	4	0,47	848
<b>TOTAL</b>	-	-	-	-	<b>86587</b>

Tableau VI.27. Facteurs d'émission de trafic urbain exprimés en g/km.v selon la catégorie des véhicules et leur motorisation [86].

Véhicules	CO		COV		NO <sub>2</sub>		Particules	
	Essence	Diesel	Essence	Diesel	Essence	Diesel	Essence	Diesel
Véhicules particuliers	17	3,5	3,2	1,1	1,58	1,2	0,06	1,0
Camionnettes	28	-	4,5	-	2,8	-	0,11	-
Autocars et autobus	-	14	-	10	-	15	-	5
Camions (3,5- 5,5t)	-	4	-	2	-	6	-	1,5
Motocyclettes	20	-	2	-	0,2	-	0,05	-

Tableau VI.28. Facteurs d'émission des véhicules exprimés en g/km.v selon leur catégorie

<b>Facteurs d'émission (g/km.véhicule)</b>			
Polluant →	CO	NO <sub>2</sub>	Particules
Véhicules particuliers	16,25	1,56	0,11
Camionnettes	28	2,8	0,11
Autocars et autobus	14	15	5
Motocyclettes	20	0,2	0,05
<b>TOTAL</b>	<b>78,25</b>	<b>19,56</b>	<b>5,27</b>

Facteur d'émission du CO =  $78,25 \text{ g/km.v} \times 1,609 \text{ km/mil} = 125,90 \text{ (g/mil.v)}$

Facteur d'émission de NO<sub>2</sub> =  $19,56 \text{ g/km.v} \times 1,609 \text{ km/mil} = 31,47 \text{ (g/mil.v)}$

Facteur d'émission de Particules =  $5,27 \text{ g/km.v} \times 1,609 \text{ km/mil} = 08,48 \text{ (g/mil.v)}$

#### VI.7.6.3. Concentrations de fond

Dans notre étude on a supposé que les concentrations de fond sont nulles.

#### VI.7.6.4. Paramètres topographiques

Les différents paramètres topographiques caractérisant notre site d'étude sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau VI.29. Paramètres topographiques du site d'étude

Désignation du lieu	Longitude (X)	Latitude (Y)	Hauteur (Z)
La Brèche (Origine)	285555	4027168	2076
Rond point	285406	4026994	2008
Virage tribunal	285262	4026982	2024
DDS	285201	4026996	12 m hors sol
Virage marché	285101	4027034	2054
Virage centre sanitaire	285038	4026952	2050
Virage poste	285059	4026753	2067
Pyramide	285232	4026590	2115

#### VI.7.7. Résultats de la modélisation

Après introduction des paramètres de base et des paramètres spécifiques au quartier Belouizdad, nécessaires à l'exploitation du logiciel CALRoad View, les modèles de dispersion des polluants sont exécutés. Ainsi, les résultats des niveaux de pollution seront comparés aux normes internationales afin d'en évaluer le risque sanitaire.



### VI.7.7.1. Simulation des concentrations de poussières en suspension dans l'air

La figure VI.48 illustre les moyennes des concentrations quotidiennes simulées sur la période du 01/01/2005 au 31/12/2005 en l'absence de concentration de fond.

Sur cette figure, on remarque une diffusion des particules le long de l'avenue, avec des concentrations quotidiennes variant entre 166,89 et 553,12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Des pics sont prédits au niveau de la place des Martyrs (rond-point), la DDS et au virage (poste de Boudjeriou). Elles sont largement au-dessus de la moyenne journalière recommandée par l'OMS et qui est de 70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Elles dépassent également la norme journalière établie par l'Union Européenne et qui est comprise entre 100 et 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La concentration maximale est observée au niveau du DDS; sa valeur est de 553,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ces pics sont dus au ralentissement des véhicules au niveau des virages formant un bouchon puisque le taux d'émission d'un véhicule est quatre fois plus important au ralenti qu'en circulation normale [87] et aussi à la circulation intense du trafic routier.

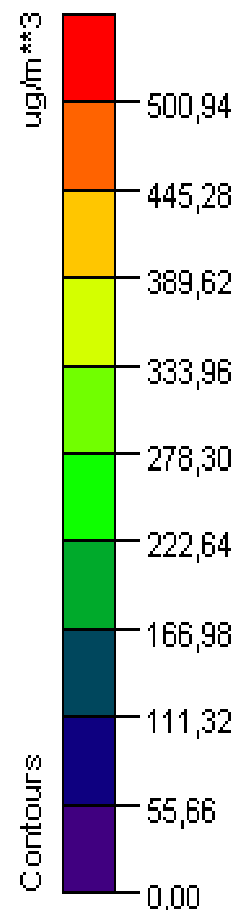
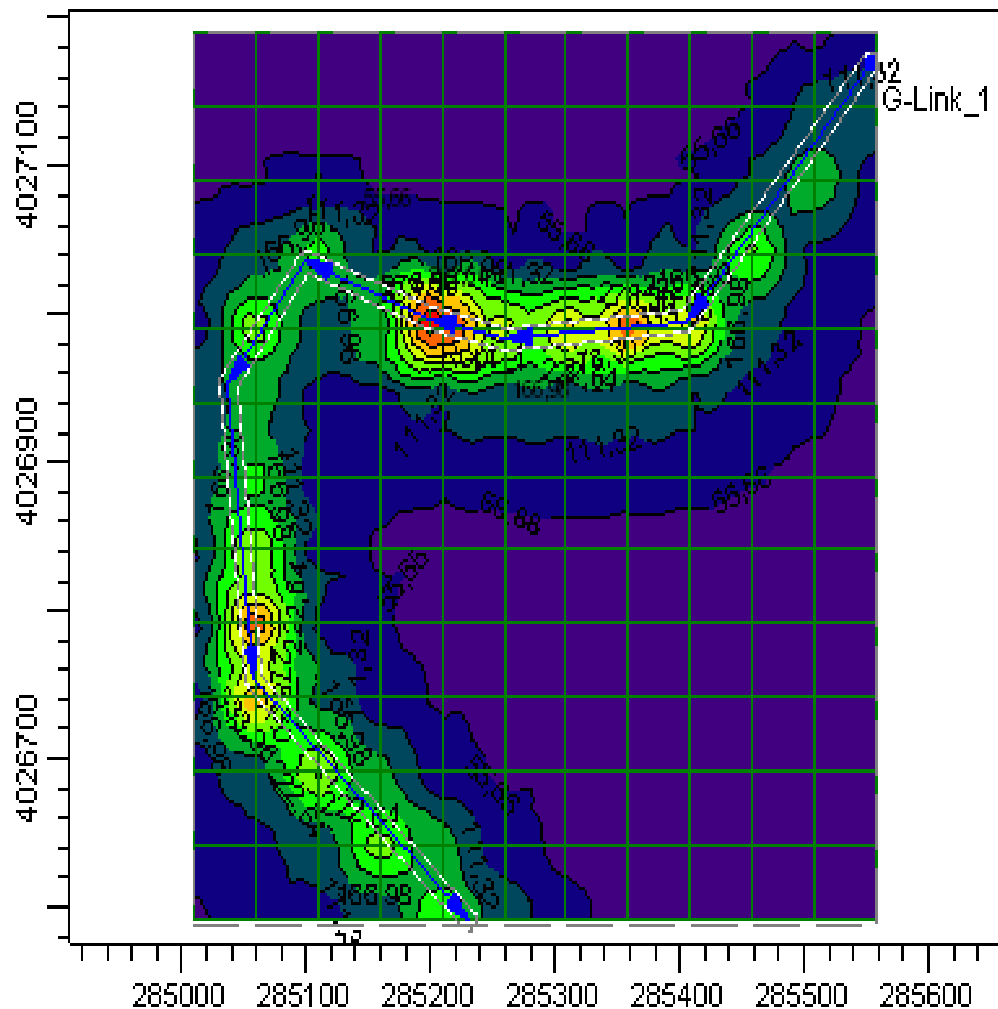
La figure VI.49 illustre les moyennes des concentrations annuelles simulées pendant l'année 2005 en l'absence d'une concentration de fond. Ces concentrations varient entre 55,66 et 219,60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La norme Européenne en moyenne annuelle est de 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  [32]. Cette norme est largement dépassée. Les fortes concentrations ont été observées au niveau de deux virages: la DDS et la poste de Boudjeriou. La valeur maximale est toujours observée au niveau du virage de la DDS (219,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

### VI.7.6.2. Simulation des concentrations de monoxyde de carbone

La figure VI.50 illustre les moyennes des concentrations horaires simulées pendant l'année 2005 en l'absence d'une concentration de fond. On remarque une propagation du monoxyde de carbone le long de l'avenue, avec des concentrations variant entre 3,77 et 14,90 ppm. Elles sont largement au-dessous de la moyenne horaire recommandée par l'OMS et qui est de 25 ppm pour 1 heure [10]. Un pic de 14,90 ppm apparaît au niveau du virage jouxtant la DDS. Ce pic est dû au ralentissement des véhicules formant ainsi des bouchons. On note que sur les tronçons rectilignes, le niveau de la pollution diminue considérablement. Cela confirme que lorsque le trafic est fluide, les émissions des gaz décroissent rapidement [87].

La figure VI.51 représente les moyennes des concentrations toutes les huit heures de CO toujours en l'absence d'une concentration de fond. Elle présente des concentrations allant de 3,32 à 13,27 ppm, cette dernière étant simulée au niveau de la DDS. Cette valeur est supérieure à la norme recommandée par l'OMS qui est de 10 ppm [10].

Figure VI.48. Pollution par les particules (avenue Belouizdad)



Moyenne quotidienne (24h) de la pollution

MODELE :  
CAL3QHCR

POLLUANT :  
PM

MAX :  
553,12

UNITE :  
µg/m<sup>3</sup>

LINKS :

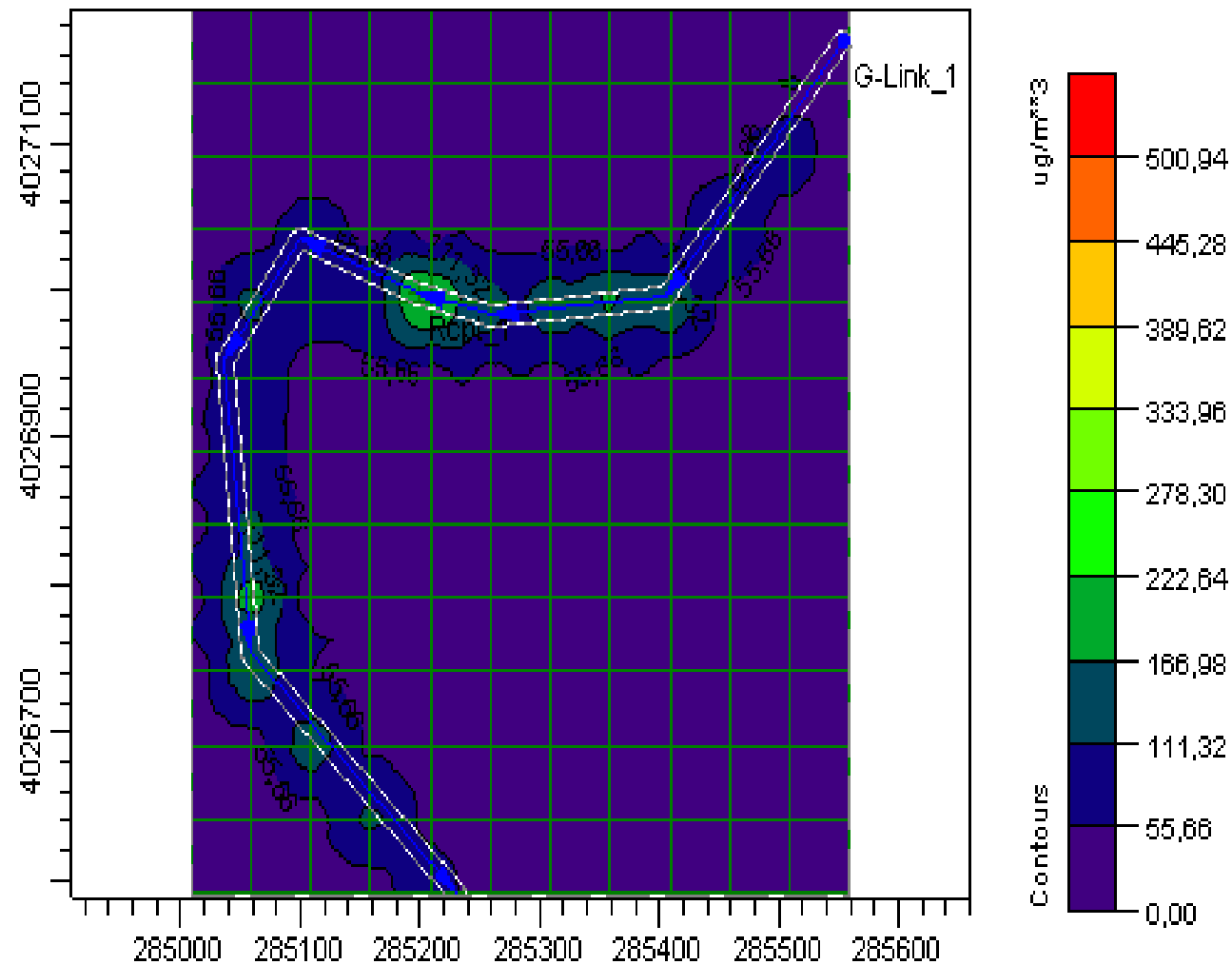
RECEPTEUR :

Les coordonnées de la valeur maximale  
(X= 285201, y= 4026996)

DATE :

du 01/01/2005 au 31/12/2005

Figure VI.49. Pollution par les particules (avenue Belouizdad)



Moyenne annuelle de la pollution

MODELE :  
CAL3QHCR

POLLUANT :  
PM

MAX :  
219,60

UNITE :  
 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

LINKS :

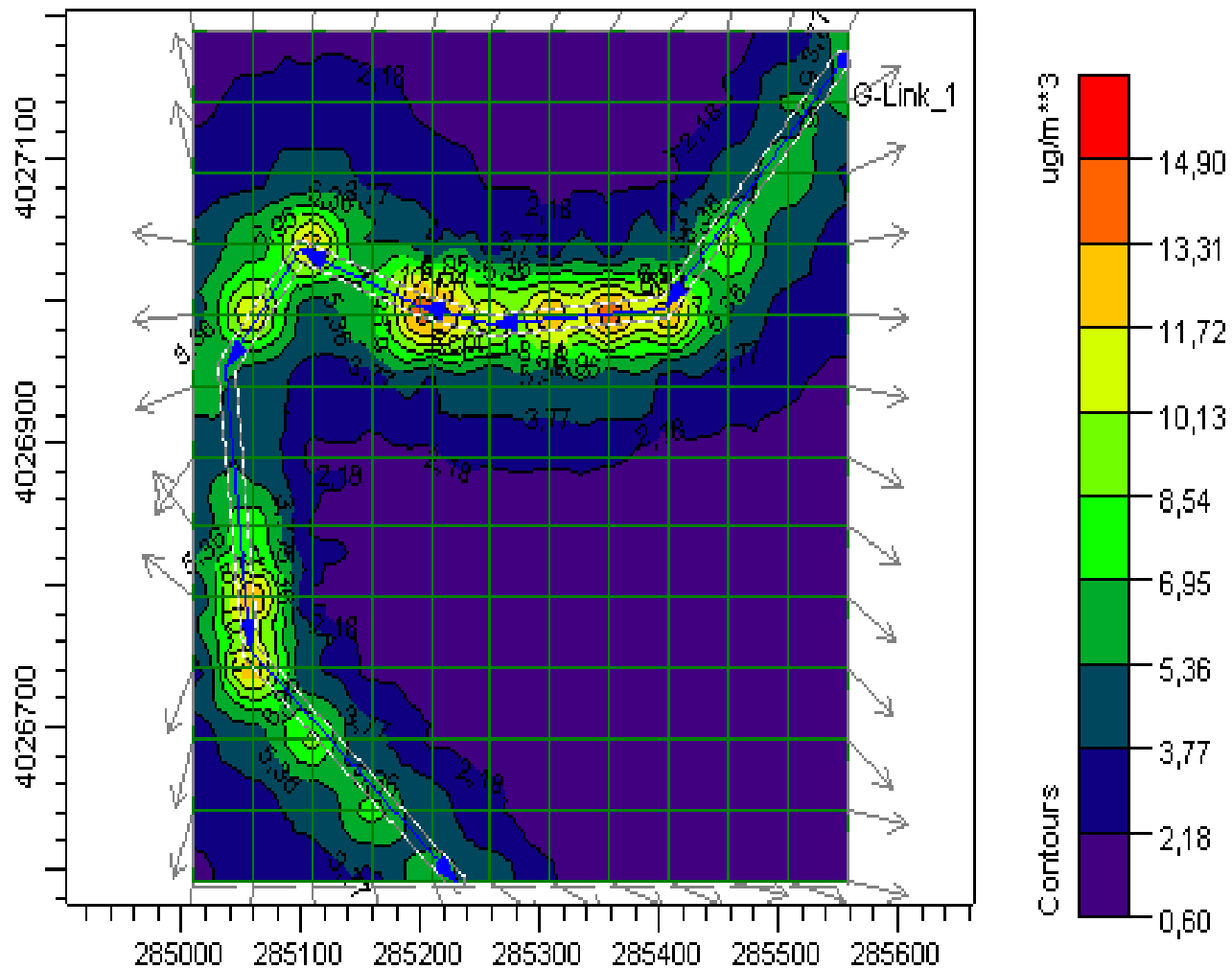
RECEPTEUR :

Les coordonnées de la valeur maximale  
(X= 285201, y= 4026990)

DATE :

du 01/01/2005 au 31/12/2005

Figure VI.50. Pollution par le monoxyde de carbone (avenue Belouizdad)



Concentration horaire moyenne de CO

MODELE :  
CAL3QHCR

POLLUANT :  
CO

MAX :  
14,90

UNITE :  
ppm

LINKS :

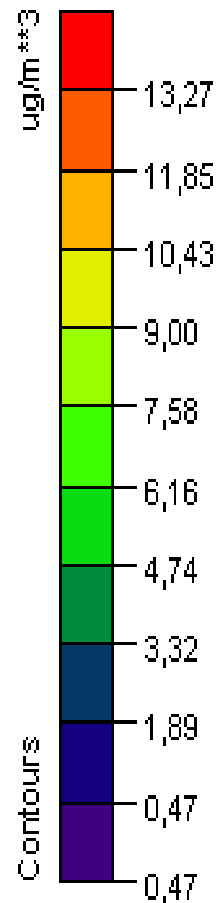
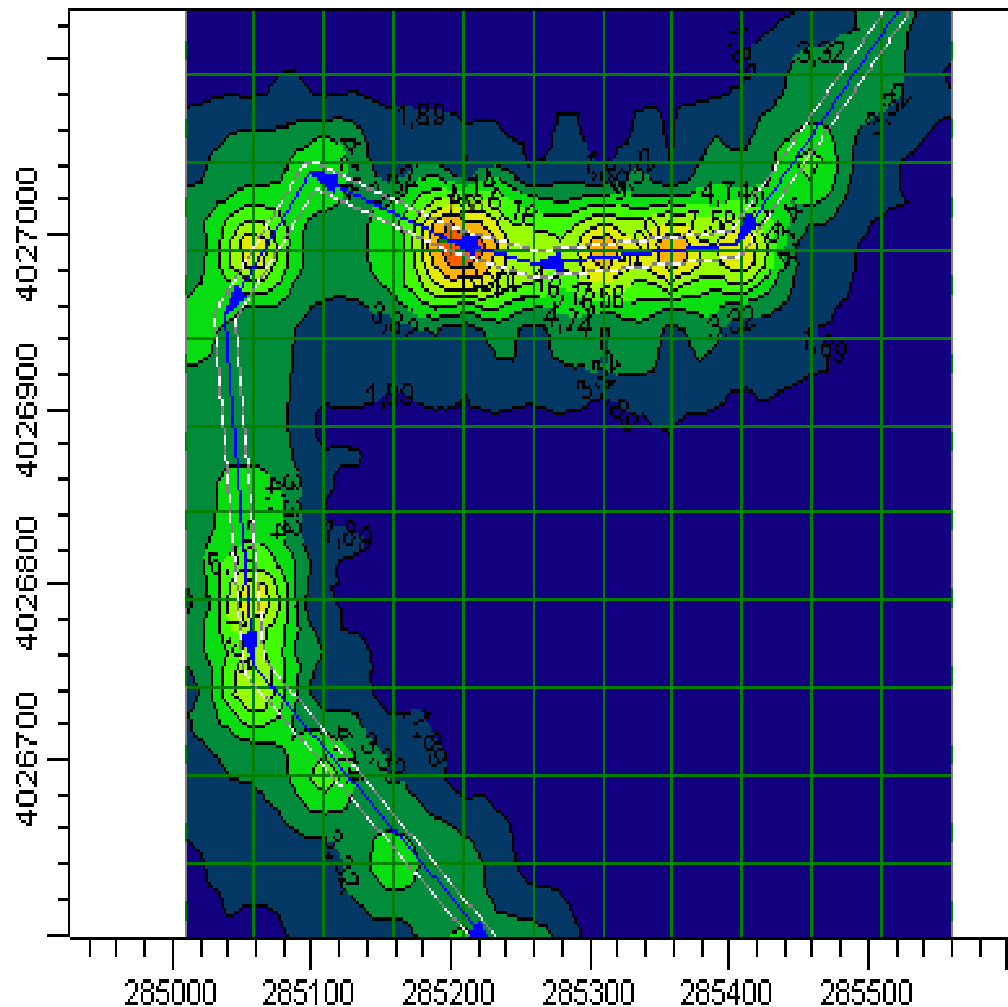
RECEPTEUR :

Les cordonnées de la valeur maximale  
(X= 285201, y= 4026990)

DATE :

du 01/01/2005 au 31/12/2005

Figure VI.51. Pollution par le monoxyde de carbone (avenue Belouizdad)



Concentration moyenne de CO sur 8 heures

MODELE :  
CAL3QHCR

POLLUANT :  
CO

MAX :  
13,27

UNITE :  
ppm

LINKS :

RECEPTEUR :

Les coordonnées de la valeur maximale  
(X= 285210, y= 4026990)

DATE :

du 01/01/2005 au 31/12/2005

# *Conclusion Générale*

## **CONCLUSION GENERALE**

Cette étude nous a permis de nous renseigner sur les niveaux de pollution particulaire et métallique au niveau de l'agglomération de Constantine. Les mesures effectuées ont permis de quantifier les concentrations des particules totales en suspension et les niveaux des retombées atmosphériques totales au niveau de trois sites urbains dont certains sont très élevés.

En effet, la situation géographique des sites et leur morphologie rendent les facteurs météorologiques très influents par rapport à la concentration des polluants tant en ce qui concerne les précipitations et la sécheresse que la distribution des vents (vitesse et direction).

On note que les flux des retombées totales et métalliques au niveau du CHUC sont plus élevés que ceux observés au niveau de l'APC et la DDS. Les valeurs moyennes des retombées totales au niveau des trois sites dépassent la valeur guide édictée par la TA-Luft Allemande.

En ce qui concerne les retombées métalliques, les flux de plomb dépassent la valeur guide Allemande au niveau des trois sites contrairement à celles du cuivre qui sont toutes inférieures à la valeur guide correspondante. En ce qui concerne le cadmium, les retombées sont de 21 fois la norme au niveau du CHUC mais sont largement inférieures au niveau de l'APC et de la DDS.

Par ailleurs, les concentrations des poussières totales en suspension (PTS) enregistrées au niveau de l'avenue Belouizdad dépassent de deux fois la norme admise par l'OMS. Les éléments en traces métalliques présentent des niveaux très disparates. C'est ainsi que les concentrations annuelles de plomb et de cadmium sont cinq fois et deux fois respectivement inférieures aux normes annuelles édictées par l'OMS. La concentration moyenne de cuivre observée durant la durée totale de l'étude est, quant à elle, excessivement supérieure à la norme recommandée aux USA. Le facteur de dépassement est de l'ordre de trois fois cette dernière.

Cependant, les concentrations des métaux alcalins ainsi que leurs flux au sol sont très importantes.

Il faut noter aussi que les niveaux de pollution enregistrés et leur nature sont caractéristiques des activités qui se déroulent dans la ville ou à sa périphérie. On a tenté de mettre en évidence les principales sources d'émission de ces polluants: la cimenterie de Hamma



Bouziane et sa carrière, la zone industrielle de Didouche Mourad, l'incinérateur du CHUC, le trafic urbain et les activités agricoles.

La modélisation de l'impact sanitaire nous a permis d'évaluer la contribution des différentes voies d'exposition aux apports des métaux dans l'organisme.

Nombre de ces éléments sont toxiques. L'indice de risque est plus élevé chez les enfants que les adultes. Le risque toxique diminue dans l'ordre suivant: baryum, plomb, cuivre et cadmium. Tous ces métaux peuvent provoquer des maladies non cancérogènes à l'exception du cadmium qui est considéré comme un élément cancérogène.

Une simulation de la dispersion des polluants issus de la circulation automobile a été effectuée afin de mettre en évidence l'influence des paramètres météorologiques sur la propagation des particules et du monoxyde du carbone. De fortes concentrations de ces deux polluants sont prédites au niveau de la DDS.

Il faut noter que la circulation automobile au niveau de l'avenue n'est pas seule responsable des dépôts. Néanmoins, la pollution au centre-ville de Constantine est une réalité qu'on ne peut ignorer.

# *Références Bibliographiques*

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] Pacyna J.M. Estimation of the atmospheric emissions of trace elements from anthropogenic sources in Europe, *Atmospheric environment*, **18**, 41-50 (1984).
- [2] Pacyna J. M. et Graedel T.E. Atmospheric emissions inventories: status and prospects, *Annual review of energy and the environment*, **20**, 265-300 (1995).
- [3] Pagotto C. Etude sur l'émission et le transfert des éléments métalliques et des hydrocarbures en domaine routier, Mémoire de thèse présenté pour l'obtention du titre de docteur de l'école des mines de Nantes, Université De Poitiers (1999).
- [4] Azimi S. Sources, flux et bilan des retombées atmosphériques de métaux en Ile-de-France, Mémoire de thèse présenté pour l'obtention du titre de docteur de l'école nationale des ponts et chaussées (2004).
- [5] Desboeufs K.V., Losno R. et Colin J.-L. Factors influencing aerosol solubility during cloud processes, *Atmospheric environment*, **35**, 3529-3537 (2001).
- [6] Desboeufs K.V., Losno R., Vimeux F. et Cholbi S. pH dependent dissolution of wind transported saharan dust, *Journal of geophysical research*, **104**, 21287-21299 (1999).
- [7] Thibaut G. La pollution atmosphérique en milieu urbain (l'exemple de la région parisienne). Mairie de Paris : Direction de la Protection de l'Environnement, service des pollutions atmosphériques - air et silence (1998).
- [8] Chambers L. A. Classification and extent of air pollution problems. In A.C. Stern: Air pollution, Academic press, New York (1968).
- [9] Dagobert P. Automobile et pollution atmosphérique, Editions Technip, Paris (1992).
- [10] Deletraz, G. et Paul E. «Etat de L'art pour L'étude des impacts des transports routiers à proximité des routes et autoroutes», Contrat ADEME n°9793022, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Université Joseph-Fourier (Grenoble I) (1998).
- [11] Escourrou G. Transports, contraintes climatiques et pollutions, coll. Mobilité Spatiale, SEDES, Paris, 172 (1996).

[12] Schütz M. Environnement et pollution - Comment mesurer ? Comment réagir ? Publitrionic, Nieppe, 253 (1995).

[13] Parmentier C. et Garrec J. P. Impact de la pollution atmosphérique le long des routes et autoroutes sur la végétation environnante - Utilisation de la bio-indication végétale - Synthèse bibliographique, INRA - Centre de recherches forestières de Nancy-Laboratoire d'étude de la pollution atmosphérique, 84 (1994).

[14] Malbreil N. La pollution en bordure d'autoroute et son impact sur la végétation, DESS ressources naturelles et environnement, Université de Metz, CETE de l'est (1997).

[15] Alary R., Donati J. et Viellard H. La pollution automobile à Paris – Influence du trafic et des conditions météorologiques, *Pollution Atmosphérique*, Janvier-Mars, 55-65 (1994).

[16] Déruelle S. La fiabilité des lichens comme bioindicateurs de la pollution plombique, *Ecologie*, **27** (4), 285-290 (1996).

[17] OCDE. La pollution des véhicules à moteur - Stratégies de réduction au-delà de 2010. Les Editions de l'OCDE, Paris, 148 (1995).

[18] Société française de santé publique (SFSP). La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique - Bilan de 15 ans de recherche internationale, Collection Santé et société, 4, SFSP, Vandoeuvre-lès-Nancy (1996).

[19] Cuny D. Evaluation de l'impact du trafic routier de l'autoroute de nord sur l'environnement par l'étude des lichens et des champignons supérieurs, DEA de toxicologie de l'environnement, université de Metz, université de Lille. Droit et santé. Laboratoire de botanique et de cryptogamie (1995).

[20] Setra-Mazoue S. Impact du trafic routier sur l'environnement - la contamination du sol par voie aérienne, DESS pollution chimiques et environnement, rapport SETRA - CSTR, B 9411, 67 (1994).

[21] Hautala E.L., Rekilä R., Tarhanen J. et Ruuskanen J. Deposition of motor vehicle emissions and winter maintenance along roadside assessed by snow analyses, *environmental pollution*, **87**, 45-49 (1995).

- [22] Encyclopædia universalis ©, Encyclopædia universalis France S.A. Cédérom (1995).
- [23] Bibliorom Larousse – Version office 1.0 ©, Microsoft Corporation et liris interactive, Cédérom (1996).
- [24] Ademe. Bio-Indicateurs végétaux de la qualité de l'air - Paris, Collection rencontres et journées techniques, Ademe editions, Angers, 153 (1996).
- [25] Lytle C.M., Smith B.N. et Mckinnon C.Z. Manganese accumulation along Utah roadways: a possible indication of motor vehicle exhausts pollution, *The science of the total environment*, **162**, 105-109 (1995).
- [26] Markert B., Wtorowa W. Inorganic chemical investigations in the forest biosphere reserve near Kalinin,USSR, *Vegetation*, **98**, 43-58 (1992).
- [27] John H, Seinfeld, Atmospheric chemistry and physics of air pollution. John Wiley (1994).
- [28] Dumon R, Joffre, Propriétés des poussières, dépoussiéreurs industriels, Masson, Paris (1984).
- [29] Renoux A. Ce qu'il faut savoir sur l'aérosol atmosphérique, *Pollution Atmosphérique*, 125 (1990).
- [30] Corn M. Aerosols and the primary air pollutants non-viable particles, in: Stern A.C, air pollution, Academic press (1976).
- [31] Stern A. Fundamentals of air pollution, Academic Press (1984).
- [32] Magdelaine, C. Pollution atmosphérique.  
<http://www.notre-planète.info/polluauto.php>.
- [33] Division air, RNI et sécurité ; Poussières fines PM10 questions et réponses concernant les propriétés, les émissions, les effets sur la santé et les mesures (Etat Au 1<sup>ère</sup> Décembre 2005).
- [34] OMS. Directive de qualité pour l'eau de boisson, Volume 2, critères d'hygiène et documentation à l'appui (1986).

[35] USEPA. Integrated sampling of suspended particulate matter (SPM). Method IO-2.1; Sampling of ambient air for total suspended particulate matter (SPM) and PM<sub>10</sub> using high volume (HV) sampler. Report N° 625/R-96/010a (1999).

[36] Encyclopédie: Encarta. Collection (2006).

[37] Nriagu J.O. et Pacyna J.M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Nature*, **333**, 134-139 (1988).

[38] OMS. La pollution atmosphérique par les particules en suspension : ses effets nuisibles sur la santé, Berlin. Copenhague, Rome (2005).

[39] Henderson. Sellers B. Pollution of our atmosphere. Bristol: *Adam Hilger Ltd.*, 210 (1984).

[40] Joumard R. Le dossier du plomb. Additif des carburants automobiles. Note d'information IRT, 29 (1983).

[41] Boudene C. Récentes acquisitions sur la toxicité du plomb. *Pollution atmosphérique*, **85** (1980).

[42] Roussel A. Impact médical des pollutions d'origine automobile, *Pollution atmosphérique*, Supplément 99 (Juil-Sep). 1-30 (1983).

[43] Ministère de l'Environnement d'Ontario (Canada), Recommandations canadiennes pour la qualité des sols: Cuivre dans l'environnement, Septembre (2001).

[44] Vaila A. Eléments de toxicologie, Edition Lavoisier (1998).

[45] Viala A. et Gouzo F. Action sur la santé de l'homme des métaux lourds (Pb, Cd, V, Hg) en suspension aérienne aux faibles concentrations, *Pollution atmosphérique*, **120**, 135-142 (1988).

[46] Joumard R. Effets des pollutions atmosphériques sur la santé. Rapport INREST, **23**, 114 (1982).

[47] [www.iza.com/zwo\\_org/Publications/PDFs/Environment-Fr.pdf](http://www.iza.com/zwo_org/Publications/PDFs/Environment-Fr.pdf)

[48] Moore W. Toxicological evaluations of fuel additive, Methylclopentadienyl manganese tricarbonyl (MMT), SAE Paper 750927 (1975).

[49] Di Ferrante E. Trace metals. Exposure and health effects, Pergamon press, Oxford, 262 (1978).

[50] Carey P.M. Air toxics emissions from motor vehicles. Rapport EPA- AA- TSS-PA-86-5 (PB88-115001) (1988).

[51] Cleare M. J. Immunological studies on platinum complexes and their possible relevance to autocatalysts, SAE paper 770061, 12 (1977).

[52] Plunkett E.R. Handbook of industrial toxicology. Chemical publ. Co. New York, (1976).

[53] Watson J.G. et Chow J.C. Source characterization of major emission sources in the imperial and mexicali valleys along the US/Mexico Border, *The science of the total environment*, **276**, 33-47 (2001).

[54] <http://www.lenntech.com/fran%C3%A7ais/data-perio/Na.htm>.

[55] <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc107.htm>.

[56] <http://www.lenntech.com/fran%E7ais/data-perio/K.htm>

[57] Centre interprofessionnel et technique d'étude de la pollution atmosphérique (**CITEPA**). [www.citepa.org](http://www.citepa.org)

[58] <http://www.lenntech.com/fran%C3%A7ais/data-perio/Li.htm>

[59] Rapport de la direction de l'environnement sur la décharge à Constantine (1995).

[60] Boumegoura N. Habbas B. Evaluation des retombées atmosphériques et leur modélisation autour de la cimenterie de Hamma Bouziane. Mémoire de fin de cycle d'ingénieurs en Ecologie, option Pathologie des Ecosystèmes, Université Mentouri Constantine (2003).

[61] Ahmed M. Rapport de la direction des transports sur le projet tramway. Le quotidien d'Oran du 05/12/2004.

- [62] Rapport de la direction des transports (2006). Wilaya de Constantine.
- [63] U.S. Environmental Protection Agency. Compendium of methods (IO-3.1) for the determination of inorganic compounds in ambient air, Cincinnati, OH 45268 (1999).
- [64] Muller G. Etude des répercussions de l'axe autoroutier à Mulhouse - Belfort sur l'environnement dans la vallée de la Doller. Journées thématiques sur la pollution de l'air, Rapport CETE de l'est & CERE-Pha (Centre d'essais et de recherche en environnement et en pharmacologie), Metz (1994).
- [65] Setra-Mazoue S. Impact du trafic routier sur l'environnement - La contamination du sol par voie aérienne, DESS pollution chimique et environnement, Rapport SETRA - CSTR, B 9411, 67 (1999).
- [66] AFNOR Recueil des normes françaises. Tome 2. Environnement (1991).
- [67] Bastarache E. Le chrome et ses composées. In : Substitution des matériaux céramiques complexes .Smart Conseil (2003).
- [68] World Bank Group. Airborne particulate matter. In: Pollution prevention and abatement handbook. World Bank Group (1998).
- [69] OMS. Rapport de la 30<sup>ème</sup> réunion du comité mixte FAO/OMS d'experts des additifs alimentaires, Rome (1987).
- [70] World Health Organization. Air quality guidelines for Europe (Second edition). Copenhagen: WHO regional publications, European series n° 91 (2000).
- [71] California Environmental Protection Agency (CalEPA). Determination of chronic toxicity reference exposure levels (1996).
- [72] Ronneau J. Valeurs guides de l'OMS pour l'exposition à diverses substances. Université Catholique de Louvain. Louvain-La-Neuve; Belgique (1996).
- [73] Church T.M., Tramontano J. M., Scudlark J.R., Jickells T.D., Tokos J.J., Knap A.H. et Galloway J.N. The wet deposition of trace metals to the Western Atlantic Ocean at the Mid-Atlantic Coast and on Bermuda. *Atmospheric environment*, **18**, 2657-2664 (1984).



- [74] Garnaud S., Mouchel J.M., Chebbo G. et Thevenot D.R. Heavy metal concentrations in dry and wet atmospheric deposits in Paris district: Comparison with urban runoff, *The science of the total environment*, **235**, 235-245 (1999).
- [75] Sweet C.W., Weiss A. et Vermette S.J. Atmospheric deposition of trace metals at three sites near the great lakes, *Water, air and soil pollution*, **103**, 423-439 (1998).
- [76] Sandroni V. et Migon C. Atmospheric deposition of metallic pollutants over the Ligurian sea: Labile and residual inputs. *Chemosphere*, **47**, 753-764 (2002).
- [77] Guerzoni S., Molinaroli E., Rossini P., Rampazzo G., Quarantotto G., DE falco G. et Cristini S. Role of desert aerosol in metal fluxes in the Mediterranean area. *Chemosphere*, **39**, 229-246 (1999).
- [78] Ducceschi L., Bellandi S., Becattini L., Legittimo P.C. et pantani F. Wet and dry deposition in the urban area of Florence: A further survey (1996-97) with a different sampling method. *Annali di chimica*, **89**, 559-567 (1999).
- [79] Hovmand M.F. et Kemp K. Heavy metal bulk deposition and aerosol concentrations in rural Denmark 1992-1996. Environmental research institute final report, Roskilde, Denmark, 11 (1998).
- [80] Migon C., Journel B. et Nicolas E. Measurement of trace metals wet, dry and total atmospheric fluxes over the Ligurian sea. *Atmospheric environment*, **31**, 889-896 (1997).
- [81] Sweet C.W. deposition of mercury in the U.S. and Canada. Air and waste management association (1999).
- [82] Thoni L., Krieg F. et Siewers U. Testing the bergerhoff method to determine the bulk deposition loads of 49 elements. *Atmospheric environment*, **33**, 337-344 (1999).
- [83] Yi S M., Holsen T.M. et Noll K.E. Comparison of dry deposition predicted from models and measured with a water surface sampler. *Environmental Science and technology*, **31**, 272-278 (1997).

[84] Bencherif L. Pollution particulaire et métallique au centre ville de Constantine. Mémoire de fin de cycle d'ingénieurs en Ecologie, option Pathologie des Ecosystèmes, Université Mentouri Constantine (2005).

[85] Office national des statistiques. Collections statistiques N° 101. Parc national automobile (2000).

[86] Weisburger E.K. Natural carcinogenic products, *Environmental Science and technology*, **13**, 278-281 (1979).

[87] Ademe. JK. Bulletin quotidien, Les enjeux du transport et de l'aménagement, *Enerpresse*, **5959**, 1-7 (1993).

# *Annexes*

Calibrage du collecteur de poussières VFC

1. Equipement de calibrage

Il comprend les accessoires suivants :

- un orifice de calibrage étalonné par le constructeur
- deux manomètres à eau possédant une gamme de mesure de 0 à 400 mmHg et une graduation correspondant à 2,5 mm (0.1 pouce) et accompagnant l'orifice.

**Note :** Les manomètres utilisés pour le calibrage à l'extérieur peuvent être sujets à une détérioration ou un dysfonctionnement et doivent donc être contrôlés fréquemment.

- un thermomètre capable de mesurer dans la gamme 0 à 50°C avec une précision de  $\pm 1^\circ\text{C}$
- un baromètre portable capable de mesurer la pression barométrique ambiante dans la gamme 50 à 800 mmHg avec une précision de  $\pm 5$  mmHg.
- des documents divers : feuilles de route et feuilles de calibrage.
- Un filtre propre (type Air Monitoring Media; référence: P/N-810) toujours à l'abri avant usage (dans une pochette plastique).

Les filtres sont mis dans un dessiccateur pendant 24 heures avant et après le prélèvement afin de supprimer l'effet de l'humidité de l'air.

2. Procédure de calibrage

La procédure de calibrage du collecteur à grand volume (VFC) présentée dans cette section associe des débits connus ( $Q_a$  tels que déterminés par un orifice de calibrage) au ratio de la pression de stagnation à la pression barométrique ambiante ( $P_l/P_a$ ). La pression de stagnation ( $P_l$ ) est la pression d'air à l'intérieur du collecteur juste en dessous du filtre. La pression de stagnation est mesurée à l'aide d'un manomètre à eau mesurant dans la gamme 0 à 1000 mmHg. Le manomètre est muni d'un port de mesure de la pression de stagnation. Le collecteur possède un orifice à la sortie du moteur (situé à sa base). Dans ce cas, le débit du collecteur peut être mesuré et calibré en utilisant en général la pression de sortie. Cependant, l'utilisation de la pression de stagnation fournit en général une indication plus précise du débit du collecteur. Par ailleurs, un sélecteur de débit est connecté au moteur pour faire varier le débit si nécessaire et enregistrer le temps d'échantillonnage.

Le système de contrôle de débit du collecteur est basé sur un système venturi. La pression barométrique et la température ambiante doivent être déterminées ou estimées pendant la période d'échantillonnage pour le calcul ultérieur du volume échantillonné en unités standard.

La procédure de calibrage est basée sur les principes suivants :

- Le collecteur de PTS utilise un système à venturi pour contrôler le débit volumique actuel.
- Le débit du collecteur est déterminé en mesurant le ratio de la pression de stagnation et le collecteur n'est pas équipé d'un enregistreur de débit en continu.
- L'entrée du collecteur est conçue pour fonctionner à un débit volumique actuel constant de  $1,13 \text{ m}^3/\text{min}$ .
- L'orifice de calibrage est équipé d'une série de disques et sa perte de charge est mesurée à l'aide d'un manomètre à eau.

**Note :** Il faut éviter de calibrer le collecteur en présence de vent important. Les fluctuations de la vitesse du vent de courte durée donnent lieu à des lectures variables de la pression lues sur le manomètre de l'orifice de calibrage. Le calibrage sera moins précis en raison des variations de pression.

### 3. Procédure de calibrage du débit (multipoints)

Elle est réalisée comme suit:

- a) Installer le système de calibrage selon les recommandations du fabricant. Le collecteur est calibré en absence d'un filtre.
- b) Installer l'orifice de calibrage et son dispositif de serrage au-dessus du collecteur. Inspecter d'abord tous les joints et procéder à leur remplacement en cas de doute pour s'assurer de l'étanchéité du système. Il faut serrer les écrous uniformément aux quatre coins de façon à aligner correctement et uniformément les joints.
- c) Sélectionner un débit de calibrage et installer le disque correspondant (ou aucun disque). Au moins quatre débits sont requis pour définir une droite de calibrage. Au moins trois débits devraient se situer dans une gamme acceptable ( $1,1-1,7 \text{ m}^3/\text{min}$ ) à l'entrée du collecteur.
- d) Contrôler les fuites du système en bloquant l'orifice à l'aide d'un bouchon en caoutchouc de grand diamètre, de scotch assez large ou d'un autre dispositif. Bloquer

le port de mesure de la pression à l'aide d'un bouchon en caoutchouc ou autre. Mettre en marche le collecteur. Bouger doucement l'orifice et détecter si possible un sifflement indiquant une fuite dans le système. Les fuites sont généralement provoquées soit par des joints endommagés ou absents entre l'orifice et le support de filtre soit par un mauvais positionnement de l'orifice par rapport au dispositif de serrage. Toutes les fuites doivent être éliminées avant de procéder au calibrage. Il faut éviter de laisser le collecteur en marche pendant plus de 30 s avec l'orifice bouché. Cela permettra de réduire les risques de surchauffe résultant d'une absence de refroidissement. Une telle surchauffe risque de réduire la durée de vie du moteur. Elle peut même endommager la protection électrique entraînant un incendie ou une électrocution.

- e) Inspecter les tuyaux de connexion des manomètres pour détecter d'éventuelles fissures. Ouvrir les valves des manomètres et souffler dans les tuyaux pour vérifier l'écoulement libre de l'air. Positionner les réglettes coulissantes de telle manière que leurs lignes zéro se trouvent en bas des ménisques. Connecter un manomètre à l'orifice de calibrage et l'autre manomètre au port de mesure de la pression de stagnation. S'assurer qu'une extrémité de chaque manomètre reste ouverte pour être exposée à la pression atmosphérique. S'assurer que les tuyaux sont fixés correctement aux ports de mesure de la pression et aux manomètres.
- f) Lire et enregistrer les paramètres suivants sur la feuille de route du collecteur. Un exemple de feuille de route est illustré (voir figure .2). La cohérence des unités de température et de pression est essentielle. Toutes les températures doivent être exprimées en "K" et les pressions en "mmHg". Eviter de calibrer le collecteur en utilisant un ensemble d'unités et d'effectuer les calculs d'échantillonnage avec d'autres.
- g) Mettre en marche le collecteur et le laisser chauffer à la température de fonctionnement (3 à 5 min). Lire et noter la mesure indiquée par le manomètre de l'orifice de calibrage et la valeur de la pression de stagnation correspondante ( $P_{stg}$ ) sur la feuille de route. (La pression de stagnation relative est une pression négative par rapport à la pression atmosphérique lorsqu'elle est mesurée par un manomètre dont on a ouvert une extrémité). Ne pas oublier de convertir la valeur indiquée par le manomètre en mm Hg en utilisant l'équation suivante avant de la reporter sur la feuille de route :

$$\text{mmHg} = 25.4 \text{ (in. H}_2\text{O/13.6)} \quad (1)$$

- h) Installer les autres disques pour obtenir tous les débits de calibrage et répéter les étapes de la section précédente pour chacun d'eux. Quatre points de calibrage sont nécessaires avec parmi eux trois points au moins se situant dans la gamme des débits acceptables. Il est parfois difficile d'obtenir des débits dans cette gamme. On peut ne pas obtenir ces points même en présence d'un filtre. Des points de calibrage représentant des débits plus faibles peuvent être utilisés par extrapolation dans la gamme acceptable en l'absence d'un filtre.
- i) Reporter les données de calibrage sur un graphe comme indiqué précédemment. Refaire les mêmes étapes pour toutes les données incertaines du graphe. L'obtention de nouveaux points de calibrage à différents débits et/ou la répétition du calibrage aux mêmes débits est encouragée pour améliorer la précision du calibrage.

**Note :** Les données doivent être reportées sur le terrain lors de la procédure de calibrage et non pas au laboratoire afin de s'assurer de la validité du calibrage.

- j) Arrêter le collecteur et enlever l'orifice de calibrage.
- k) Installer un filtre propre dans le collecteur. Mettre en marche le collecteur et le laisser se réchauffer jusqu'à la température de fonctionnement.
- l) Lire la pression de stagnation relative comme indiquée précédemment et la reporter dans la feuille de route dans la ligne concernant les débits de fonctionnement.
- m) Effectuer les calculs de calibrage comme indiqué dans les sections suivantes.

#### 4. Calculs de calibrage

Rassembler toutes les données de calibrage, y compris les données de calibrage de l'orifice et la feuille de route du collecteur.

**Note :** Ces calculs devraient être effectués durant le calibrage. Cette démarche permettra d'obtenir des points de calibrage supplémentaires en cas de doute sur les données existantes. Il faut calculer le débit  $Q_a$  à l'orifice à partir des données de calibrage de ce dernier et de l'équation suivante :

$$Q_a \text{ (orifice)} = \{[\Delta H_2O \text{ (Ta/Pa)}]^{1/2} - b\} [1/m] \quad (2)$$

Où :

$Q_a$ (orifice) = débit volumique actuel à l'orifice de calibrage,  $m^3/min$

$\Delta H_2O$  = perte de charge à travers l'orifice de calibrage, in.  $H_2O$

$T_a$  = température ambiante durant l'opération, K

$P_a$  = pression barométrique durant l'opération, mm Hg

**b** = ordonnée à l'origine de la droite d'étalonnage

**m** = pente de la droite d'étalonnage

- a) Calcul et report de la valeur de la pression de stagnation absolue  $P_1$  pour chaque point de calibrage :

$$P_1 = P_a - \Delta P_{stg} \quad (3)$$

Où :

$P_1$  = pression de stagnation absolue, mm Hg

$P_a$  = pression barométrique ambiante, mm Hg

$\Delta P_{stg}$  = pression de stagnation relative

- b) Calculer et reporter le ratio de pression de stagnation :

$$\text{Ratio de pression de stagnation} = P_1/P_a \quad (4)$$

- c) Tracer un graphe des ratios de la pression de stagnation  $P_1/P_a$  en fonction des débits calculés de l'orifice  $Q_a/T_a^{1/2}$ . Dessiner une courbe reliant les points et si nécessaire extrapoler (prolonger) la courbe pour englober la gamme des débits acceptables.
- d) Comparer  $Q_a$  (orifice) en absence de disque et de filtre avec  $Q_a$  (collecteur obtenu en absence de filtre). Si la différence est  $< 7\%$ , le calibrage peut être validé et utilisé pour les échantillonnages ultérieurs
- e) Si la différence est plus importante, contrôler la précision de l'orifice et la procédure de calibrage. Contrôler les fuites, les erreurs de lecture du manomètre, les données de température et de pression ou autres. Contrôler également la tension de courant (basse tension) du site, et la présence du joint se trouvant entre le moteur et le venturi à débit critique. Un écart de plusieurs pourcents est probablement le résultat d'un problème avec le collecteur ou la procédure de calibrage.

## 5. Etablissement de la courbe étalon du collecteur de poussières en suspension

- a) Calculer et reporter pour chaque point de calibrage la valeur de :

$$[(P_1/P_a)T_a]^{1/2} \quad (5)$$

Où :

$P_1/P_a$  = ratio de pression de stagnation

$T_a$  = température ambiante durant l'opération, K

- b) En utilisant le modèle de régression linéaire  $Y = mX + b$ , et en admettant que :  $Y = [(P_1/P_a) T_a]^{1/2}$  et  $X = Q_a$  (orifice), on peut écrire :



$$P_1/P_a = [mQ_a (\text{orifice}) + b] / T_a^{1/2} \quad (6)$$

Calculer la pente de la droite de régression (m), l'ordonnée à l'origine (b) et le coefficient de corrélation (r).

c) Lors de campagnes d'échantillonnage ultérieures, le débit de fonctionnement actuel moyen du collecteur,  $Q_a$  est calculé à partir de la pente et de l'ordonnée à l'origine en utilisant l'équation suivante :

$$Q_a (\text{collecteur})_{\text{moyenne}} = \{[(P_{\text{lmoy}}/P_{\text{moy}})T_{\text{moy}}]^{1/2} - b\} \{1/m\} \quad (7)$$

Où :

**$Q_a (\text{collecteur})_{\text{moyenne}}$**  = débit actuel moyen du collecteur, m<sup>3</sup>/min

**$P_{\text{lmoy}}/P_{\text{moy}}$**  = ratio moyen de la pression de stagnation pour la période d'échantillonnage

**$T_{\text{moy}}$**  = température ambiante moyenne pour la période d'échantillonnage, K

**$b$**  = ordonnée à l'origine

**$m$**  = pente de la courbe d'étalonnage

d) Remplir les données de la feuille de calibrage, comme indiqué dans la figure 1.

### FEUILLE DE CALIBRAGE DU COLLECTEUR VFC

Remarque: ne pas oublier de déconnecter l'indicateur de temps et d'enlever le filtre

Station : ..... Date : ..... Heure : .....  
 Modèle du Collecteur : ..... Opérateur : .....  
 Pa = .....mb = .....mmHg; Ta : .....°C = .....°K

Conditions inhabituelles : .....

Date de calibrage de l'orifice : .....

Droite de calibrage de l'orifice : m = 1,1985; b = -0,021684; r = 0,999780

N° de disque	Δ H <sub>2</sub> O (in.)	ΔPstg (in.)	ΔPstg (mmHg)	PI = Pa- ΔPstg (mmHg)	PI/Pa (mmHg)	Qa(orifice) (m <sup>3</sup> /min)	Qa(orifice) / [Ta] <sup>1/2</sup>

**mmHg =25,4(in.H<sub>2</sub>O/13,6)**

Qa(orifice)	Qa(collecteur)	%Différence

**Qa (orifice) = 1/m {[(Δ H<sub>2</sub>O) (Ta/Pa)]<sup>1/2</sup>-b}**

Relation de calibrage du collecteur:  $X = \frac{Qa (orifice)}{[Ta]^{1/2}}$  Y= (PI/Pa)

m=..... b =..... r =.....

Pour le calcul ultérieur du débit du collecteur **Qa = {[PI/Pa-b][Ta<sup>1/2</sup>]}{1/m}**

Débit de fonctionnement = .....m<sup>3</sup> / min

Figure .1. Feuille de calibrage du collecteur VFC

## 6. L'échantillonnage

### A/ But

Il permet de calculer une concentration journalière des PTS et de récupérer les poussières sur un filtre destinées à être analysées au laboratoire.

## 7. Préparation du filtre

Les précautions à prendre sont les suivantes :

- a) Porter des gants lors de la manipulation des filtres pour éviter de les contaminer avec de la graisse et/ou l'humidité
- b) Préserver les filtres dans des chemises en plastique,
- c) Ne jamais plier les filtres vierges
- d) Identifier les filtres
- e) Peser les filtres avant leur utilisation (tare)

## 8. Procédure d'échantillonnage

- e) Après avoir calibré le collecteur comme décrit précédemment, il ne faut effectuer aucun changement ou ajustement sur le sélecteur de débit après le calibrage
- f) Enlever l'orifice du calibrage
- g) Placer le collecteur dans la position et l'endroit prévus sur un plant horizontal
- h) Mettre en marche le moteur du collecteur
- i) Remplir les données de la feuille de route, avant et après 24h ( $\pm$  1h) de marche, comme indiqué ci-dessous (figure .2).

## FEUILLE DE ROUTE DU COLLECTEUR VFC

**Station :**

Lieu : ..... Date : ..... Heure : .....

Modèle du collecteur : ..... N/S : .....

N° du filtre : .....

Pav=.....mb=.....mmHg;

Ta<sub>min</sub>=.....°C=.....K ; Ta<sub>max</sub>=.....°C=.....K ; Tav=.....°C=.....K

RH<sub>i</sub>=.....% ; RH<sub>f</sub>=.....%;

Precipitations, i =.....mm, Precipitation, f =.....mm; Total=.....mm

Vent : U<sub>i</sub>=.....m/s ; Ø<sub>i</sub>=.....° ; Direction, i : .....

U<sub>f</sub>=.....m/s ; Ø<sub>f</sub>=.....° ; Direction, f : .....

**Pression de stagnation relative :**

ΔPstg initiale =.....in.=.....mmHg

ΔPstg finale =.....in.=.....mmHg

ΔPstg moyenne =.....in.=.....mmHg

**Pression de stagnation absolue :**

**Ratio de la moyenne de la pression de**

**stagnation :**

P<sub>1</sub>=.....mmHg

P<sub>1</sub>/Pav=.....

P<sub>1</sub>= Pav- ΔPstg, moyenne

m=.....; b=.....; r=.....

Temps affiché initial (indicateur de temps)=.....

Temps affiché final (indicateur de temps)=.....

Temps écoulé :.....h.....min

Débit moyen (Qa) :.....m<sup>3</sup>/min Qa (collecteur) = 1/m (P<sub>1</sub>/P<sub>a</sub> - b) (Ta)<sup>1/2</sup>

**Opérateur :** .....

**Commentaire :** .....

**calcul au laboratoire :** Ta (labo)=.....K ; Pa (labo)=.....mmHg

Qstd= Qa(Pav/Pstd) (Tstd/Tav)= Qa (0.392) (Pav/Tav)=.....Std m<sup>3</sup>/min

Vstd=.....Stdm<sup>3</sup>

Vstd= (Qstd) (Temps écoulé)

Poids brut =.....g

Tare =.....g

Poids net =.....g

C(μg/m<sup>3</sup>) = Poids net (g) × 10<sup>6</sup>/Vstd (m<sup>3</sup>) =.....μg/m<sup>3</sup>

Figure 2. Feuille de route du collecteur VFC.

- j) Retirer le filtre soigneusement, maintenir autant que possible le filtre en position horizontale afin de prévenir toute perte de particules
- k) Emmener le filtre au laboratoire, pour l'analyse.

## *ANNEXE II.*

### *Mesures des retombées par la méthode des collecteurs de précipitation (jauge Owen) selon la norme Française NFX43-006*

#### 1. Objectif et domaine d'application

La présente norme a pour objet de décrire un dispositif destiné à recueillir les retombées atmosphériques. L'utilisation d'un certain nombre d'appareils installés en réseau permet d'indiquer la distribution des retombées dans une région déterminée et pendant une période de temps donnée.

#### 2. Principe

Recueillir et conserver les retombées liquides ou solides, en suspension ou en solution, dans un récipient d'une capacité suffisante pour les y maintenir pendant une période spécifiée.

#### 3. Appareillage

Le collecteur de précipitation est un récipient cylindrique, à fond plat, de 200 mm de diamètre intérieur et de 400 mm de hauteur. Le matériau du collecteur ne doit pas réagir avec les retombées prélevées et doit être suffisamment résistant pour qu'il n'y ait aucune modification de la forme du collecteur et pour permettre le transport du collecteur plein.

Le collecteur doit être placé sur un support de diamètre inférieur à 240 mm. Le haut du support doit être situé à au moins 100 mm de la surface de prélèvement. Le support doit être assez rigide pour ne pas fléchir et pour maintenir la surface de prélèvement exactement horizontale. Une protection contre le vent n'est pas recommandée.

#### 4. Mode opératoire

##### Choix du site

Deux types de sites sont recommandés :

1) En terrain découvert, le site doit être horizontal et tel que l'angle formé par le plan horizontal de la surface de prélèvement et la droite joignant le centre de cette surface au sommet de l'objet le plus proche doit être inférieur à 30°. L'objet le plus proche ne doit pas être à moins de 3 m du collecteur.

2) En zone urbaine, les conditions requises en 1) ne sont alors pas possibles. Un toit horizontal et plat d'immeuble, de hauteur et de taille moyenne pour la ville, doit être choisi. Le collecteur doit être placé aussi près que possible du centre du toit. Dans les deux cas, le site doit être aussi loin que possible des sources spécifiques telles que cheminées, voie de circulation, arbres, sols poussiéreux.

Les résultats obtenus sur ces deux sortes de sites ne sont pas directement comparables, et les mesures sur un site en terrain découvert et sur un site voisin en zone urbaine ne doivent pas être rapprochées sans précaution spéciale.

### Additifs

De l'eau doit être placée dans le collecteur en quantité suffisante, comprise entre 0,5 L et 5 L suivant le climat, afin qu'il ne s'assèche ni ne déborde. On peut ajouter, en quantité correspondant à 5% de la concentration initiale, du méthoxyéthanol qui est un bactéricide et un algicide qui prévient les dégâts provoqués par le gel. Il est non toxique et peut s'évaporer complètement (température d'ébullition: 120°).

La méthode par filtration est recommandée en général afin de permettre une exploitation simple et courante des résultats aux fins de comparaison des quantités totales de retombées.

Pour les laboratoires plus spécialisés, la méthode par centrifugation est recommandée parce qu'elle donne la possibilité d'effectuer des analyses physico-chimiques détaillées. Sécher la partie recueillie à une température comprise entre 100 °C et 110 °C jusqu'à obtenir une masse constante.

5. Les blancs analytiques et de filtration ont été utilisés pour estimer les retombées métalliques pour tenir compte des contaminations dues à la filtration et la préparation des solutions.

### ANNEXE III

#### Méthode de calcul et de conversion des résultats

1) Méthode de calcul pour la fraction soluble:

$$\text{Résultats en } \mu\text{g/m}^2 \cdot \text{mois} = [\text{C}] (\text{ppm}) * 0,05 (\text{l}) * \text{V} / 0,2(\text{l}) * 10^4 (\text{cm}^2 \text{ m}^{-2}) / 314 (\text{cm}^2).$$

[C] (ppm) : concentration en mg/l.

0,05 : volume de l'échantillon = 50 ml (conversion en litre).

V : volume d'eau distillée récupérée des échantillons (du 1<sup>er</sup> au 20<sup>ème</sup> échantillon)

0,2: 200ml (volume de la prise d'essai pour la fraction soluble)

$10^4$  :  $1\text{m}^2 = 10^4 \text{cm}^2$ .

$314 \text{cm}^2$  : surface de la jauge.

2) Méthode de calcul pour la fraction insoluble :

$$\text{Résultats en } \text{mg/m}^2 \cdot \text{mois} = [\text{C}] (\text{ppm}) * 0,05 (\text{l}) * 10^4 (\text{cm}^2 \text{ m}^{-2}) / 314 (\text{cm}^2)$$

3) Méthode de calcul pour les filtres du collecteur à grand débit :

$$\text{Résultats en } \mu\text{g/m}^3 = [\text{C}] (\text{ppm}) * 0,06 (\text{l}) * 18,5(\text{cm}) / 7,5(\text{cm}) * 10^6 / \text{V}_{\text{std}}$$

[C] (ppm) : concentration en mg/l.

0,06 : volume de l'échantillon 60 ml (conversion en litre)

18,5 : longueur du filtre

7,5 : largeur des bandes

$\text{V}_{\text{std}}$  : volume standard

## *ANNEXE IV*

### *Dosage des alcalins par photométrie à flamme*

Appareil photométrie à flamme model (*Flame Photometer JENWAY PFP 7*)

Les atomes alcalins et alcalinoterreux s'excitent facilement et à température relativement basse en émettant des raies intenses (doublées) situées dans la zone visible du spectre. C'est la raison pour laquelle l'analyse spectrographique a été appliquée aux alcalins d'une manière générale et que la photométrie de flamme par émission est d'emploi constant dans les laboratoires d'analyse.

Dosage des éléments : calcium, baryum, lithium, sodium et potassium.

Les solutions d'étalonnage sont préparées à partir des solutions mères à 1 g/l et couvrent la gamme de concentrations du métal analysé.



## ANNEXE V

### Dosage des métaux lourds par spectrométrie d'absorption atomique.

Appareil spectromètre d'absorption atomique modèle (*Varian, Spectro. AA-20 Plus*).

L'élément à doser est dissocié, le plus souvent dans une flamme et placé dans un état «Fondamental». On mesure alors son absorption sur des longueurs d'onde caractéristiques.

Pratiquement, les composés détectables sont tous les métaux et métalloïdes, à l'exception du soufre, du carbone, des halogènes et des gaz. Dans notre cas, il s'agit donc essentiellement du métaux lourds tels que : le plomb, le cuivre et le cadmium.

Les solutions d'étalonnage sont préparées à partir des solutions mères à 1 g/l et couvrent la gamme de concentrations du métal analysé.

Les longueurs d'ondes d'absorption des éléments sont :

Elément	Langueur d'onde (nm)
Cadmium (Cd)	228,8
Cuivre (Cu)	324,7
Plomb (Pb)	217,0

ANNEXE VI

Summary of hazard quotients for surface soil (résumé des indices de risqué pour la poussière de sol)

CASE 1:

Child Resident - Typical

	Ingestion of Soil	Dermal Contact Soil	Ingestion of Vegetables	TOTAL
Barium	4.0E-01	7.8E-03	2.8E+00	3.2E+00
Cadmium	1.5E-03	2.9E-06	3.7E-02	3.9E-02
Copper	5.8E-03	1.1E-04	1.1E-01	1.1E-01
Lead	3.0E-01	5.8E-03	0.0E+00	3.0E-01
TOTAL	7.0E-01	1.4E-02	2.9E+00	3.7E+00

CASE 2:

Adult Resident - Typical

	Ingestion of Soil	Dermal Contact Soil	Ingestion of Vegetables	TOTAL
Barium	1.2E-02	1.2E-03	1.2E+00	1.2E+00
Cadmium	4.3E-05	4.3E-07	1.6E-02	1.7E-02
Copper	1.7E-04	1.7E-05	4.8E-02	4.8E-02
Lead	8.7E-03	8.8E-04	0.0E+00	9.6E-03
TOTAL	2.1E-02	2.1E-03	1.3E+00	1.3E+00

SUMMARY OF HAZARD QUOTIENTS FOR OUTDOOR AIR (Résumé des indices de risqué pour l'air extérieur)

CASE 1:

Child Resident - Typical

	Inhalation of Outdoor Air	TOTAL
Barium	2.0E-01	2.0E-01
Cadmium	0.0E+00	0.0E+00
Copper	0.0E+00	0.0E+00
Lead	0.0E+00	0.0E+00
TOTAL	2.0E-01	2.0E-01

CASE 2:

Adult Resident - Typical

Inhalation  
of  
Outdoor Air TOTAL

Barium	2.1E-02	2.1E-02
Cadmium	0.0E+00	0.0E+00
Copper	0.0E+00	0.0E+00
Lead	0.0E+00	0.0E+00
TOTAL	2.1E-02	2.1E-02

NOTE: A zero hazard index may indicate that a RfD was not entered for that chemical

SUMMARY OF CARCINOGENIC RISK FOR SURFACE SOIL (résumé du risqué  
cancérigène pour la poussière de sol)

CASE 1:

Child Resident - Typical

Ingestion Dermal Ingestion  
of Contact of  
Soil Soil Vegetables TOTAL

Cadmium	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
TOTAL	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00

CASE 2:

Adult Resident - Typical

Ingestion Dermal Ingestion  
of Contact of  
Soil Soil Vegetables TOTAL

Cadmium	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
TOTAL	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00

Summary of carcinogenic risk for outdoor air (résumé du risqué cancérogène pour l'air  
extérieur)

CASE 1:

Child Resident - Typical

Inhalation

of  
Outdoor Air TOTAL

Cadmium	<hr/>	2.3E-07	2.3E-07
---------	-------	---------	---------

TOTAL	<hr/>	2.3E-07	2.3E-07
-------	-------	---------	---------

CASE 2:  
Adult Resident - Typical

Inhalation  
of  
Outdoor Air TOTAL

Cadmium	<hr/>	3.7E-08	3.7E-08
---------	-------	---------	---------

TOTAL	<hr/>	3.7E-08	3.7E-08
-------	-------	---------	---------