

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Ecole Doctorale : Sciences de l'Eau et Développement Durable

Option : Sciences et techniques de l'Environnement
Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Environnement (LSTE)

MEMOIRE DE MAGISTERE

Présenté par :

BELHOUT Dalila

Ingénieur d'État en Génie de l'Environnement

Thème

*Evaluation de la pollution atmosphérique : Etude
des particules fines en site urbain à Alger*

Membre de jury :

Mr. KETTAB Ahmed	Président	Professeur à l'ENP
Mr. KERBACHI Rabah	Directeur	Professeur à l'ENP
Mr. AHMED ZAID Toudert	Examineur	Professeur à l'ENP
Mr. BOUGHEDAOUI Ménouér	Examineur	Professeur à Université de Blida
Mr. CHERGUI Abdelmalek	Examineur	Maitre de conférences à l'ENP

2010/2011

Sommaire

Sommaire.....	i
Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Liste des tableaux.....	v
Liste des figures.....	vi
Liste des abréviations.....	vii
Introduction.....	1
I Généralités sur la pollution de l'air par les aérosols particulaires.....	4
I. 1 Introduction	4
I. 2 Définition.....	4
I. 3 Caractérisation générale des particules dans l'atmosphère.....	6
I. 4 Origine des particules.....	6
I. 5 Composition chimique.....	8
I. 6 Granulométrie.....	11
I. 7 Rôle et processus.....	12
I.7.1 Répartition sur le globe.....	13
I.7.2 Distribution verticale.....	13
I.7.3 Dynamique d'une distribution d'aérosols.....	14
I. 8 Particules atmosphériques en milieu méditerranéen.....	15
II Effets nocifs des particules atmosphériques.....	17
II. 1 Effets nocifs des particules atmosphériques sur l'homme.....	17
II. 1. 1 Dépôts dans les voies respiratoires des particules ultrafines.....	18
II. 1. 2 Effets toxiques de certains métaux lourds supportés par les PM ₁₀	20
II. 2 Effets nocifs des particules atmosphériques sur l'environnement.....	21
II. 2. 1 Effet sur la visibilité.....	22
II. 2. 2 Effet sur le climat.....	23
II. 2. 3 Effet sur les matériaux.....	23
II. 2. 4 Effet sur les animaux.....	24
II. 2. 5 Effet sur végétaux.....	24
II. 3 Effet de la pollution par les particules fines dans l'agglomération d'Alger	25
III Méthodes de mesure, d'analyse et statistiques appliquées à l'étude.....	27
des particules atmosphériques	

III. 1 Méthodes de mesure et d'analyse des particules atmosphériques.....	27
III. 2 Statistiques appliquées à l'étude des particules atmosphériques	28
IV Méthodologie.....	32
IV. 1 Site de prélèvement.....	32
IV. 2 Echantillonnage et caractérisation chimique des particules.....	33
V Résultats et interprétations.....	36
V. 1 Teneurs atmosphériques en PM_i	37
V. 2 Etude des PM_{10}	38
V. 3 Influence des facteurs météorologiques sur les PM_{10}	39
V.4 Etude des différentes classes granulométriques PM_1 , $PM_{1,5}$, PM_3 , PM_7 et PM_{10} ..	42
V. 5 Loi de distribution des classes conventionnelles PM_i	45
V. 6 Exploitation des résultats expérimentaux pour la détermination du diamètre....	48
médian des particules et de la classe $PM_{2,5}$.	
V. 6. 1 Détermination du diamètre médian « d_{50} ».....	48
V. 6. 2 Détermination de la teneur atmosphérique en $PM_{2,5}$	51
V. 6. 3 Détermination de la distribution modale des particules et de leur.....	52
mode de formation.	
V. 7. Étude des corrélations entre les différentes classes granulométriques.....	54
(PM_1 , PM_{1-3} , PM_3 , PM_{3-10} et PM_{10}).	
V. 8 Ampleur de la pollution de l'air en particules fines au niveau du Bach-djerrah.....	56
V. 8. 1 Comparaison des niveaux de pollution mesurés aux normes.....	56
nationales et internationales.	
V. 8. 2 La pollution particulaire à Bach-Djerrah comparée à quelques sites.....	60
Algérois et étrangers.	
V. 9 Etude de quelques métaux lourds associés aux particules atmosphériques.....	62
V. 9. 1 Niveaux de pollution par les métaux lourds.....	62
V. 9. 2 Comparaison du niveau de pollution par les métaux lourds avec.....	67
quelques sites d'Alger et étrangers.	
V. 9. 3 Corrélation entre les différents couples de métaux lourds.....	69
V. 9. 4 Résultats de l'analyse des métaux lourds par EDX.....	71
Conclusion.....	74

Références bibliographique

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord les membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce travail.

Un grand merci à mon directeur de mémoire, le Professeur KERBACHI Rabah. Je le remercie bien évidemment pour la confiance qu'il m'a apportée et pour son encadrement scientifique. Merci aussi pour les moments qu'il a su m'accorder quand cela était nécessaire, et cela malgré un emploi du temps plutôt chargé.

Merci au Professeur KETTAB Ahmed coordinateur de l'école doctorale, qui s'est toujours intéressé à l'état d'avancement de mon travail, pour ces conseils et pour avoir accepté de présider les membres de jury de ma soutenance.

Je remercie le Professeur BOUGHEDAOUI Ménouér, pour avoir pris part à ce jury.

Je tiens à remercier le Professeur AHMED ZAID Toudert pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail et également pour avoir accepté de siéger dans ce jury.

Je tiens à remercier très sincèrement le Docteur CHARGUI Abdelmalek, pour avoir accepté d'analyser ce travail en tant que rapporteur.

Je souhaite remercier chaleureusement le Docteur KERCHICHE Yacine. Je pense qu'il ne sait pas à quel point il a pu m'aider durant ce travail. Merci pour sa (très grande) patience, sa disponibilité sans pareille et sa compréhension.

Plus largement, merci à toutes les personnes travaillant à l'assemblée populaire communal de BACH-DJERRAH qui m'ont permis de réaliser les expériences de prélèvement des particules atmosphériques.

Remerciement spécial à Monsieur DRIF Seif, qui a fortement contribué d'une manière directe et/ou indirecte à la rédaction de ce mémoire.

Un immense merci à mes amis sans qui je n'aurais jamais fini la rédaction de ce mémoire et pour être venus assister à ma soutenance.

Pour finir, je souhaite remercier ma famille qui m'a bien évidemment très fortement soutenu tout le long de ce travail, notamment lors des moments difficiles. Merci.

Merci à tous ceux qui m'ont aidé de quelque façon que ce soit, de près comme de loin.

ملخص :

تنص هذه الأطروحة على دراسة تلوث الهواء عن طريق الجزيئات الصغيرة (PM_{10} ، $PM_{2,5}$ ، PM_1) في منطقة حضرية شرق الجزائر العاصمة. باء جراح. تم جمع العينات باءعمال جهاز آخذ العينات من نوع $HVS-PM-10$ المزود بالآجزئة حسب الأقطار. بلغت معدلات التلوث في هذا المكان لكل من PM_{10} ، $PM_{2,5}$ ، PM_1 القيم الآتية 24.8، 49.6 و 102.3 ميكروغ/م³ على التوالي. حوالى نصف جزيئات الـ PM_{10} هي جزيئات بإمكانها الوصول إلى الجيوب الرئوية. أظهرت الدراسة أن الدقائق المدروسة تتبع توزيعا بيموديا وهي خاصة المناطق الحضرية. قيم أقطار الجزيئات تتمركز عند 1.6 و 8 ميكرومتر لكل من الجزيئات الصغيرة و الكبيرة نسبيا. من بين المعادن الثقيلة المتواجدة في الـ PM_{10} الحديد هو الأكثر تواجدا حيث يبلغ 392.4 نانوغ/م³، ما يمثل نسبة 42%. تقل نسبة الرصاص الناتج عن حركة المرور في الـ 0.21% عن PM_{10} بينما ترتفع هذه القيمة إلى أكثر من 0.28% في الجزيئات الصغيرة جدا (PM_1) ما يسمح لهذا المعدن الخطير بالتواجد في أعماق الرئتين. أظهر تحليل الجزيئات بالأشعة السينية تواجدا كبيرا للمعادن الثقيلة في تركيبة هذه الجزيئات. الكلمات المفاتيحية: PM_{10} ، $PM_{2,5}$ ، PM_1 ، التوزيع البعدي، جزيئات صغيرة، معادن ثقيلة، حركة المرور، موقع حضري، الجزائر العاصمة. نوعية الهواء

Résumé :

Cette étude présente les niveaux de pollution de l'air par les particules fines (PM_{10} ، $PM_{2,5}$ et PM_1) dans un site urbain à l'est d'Alger (Bach-Djerrah). Le prélèvement des particules est effectué avec un échantillonneur à fort débit, le HVS-PM-10. Les teneurs journalières moyennes en PM_{10} ، $PM_{2,5}$ et PM_1 s'élèvent à 102,3 ; 49,6 ; et 24,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivement. Environ 50% des particules PM_{10} sont essentiellement des particules respirables. L'étude montre, par ailleurs, que les particules étudiées suivent une distribution bimodale qui est caractéristique d'un milieu urbain. La distribution massique des particules se concentre autour de 1,6 et 8 μm pour les fines et les grosses particules, respectivement. Parmi les métaux lourds associés aux PM_{10} , le fer accuse les valeurs les plus élevées. On y mesure une teneur moyenne d'environ 392,4 ng/m^3 qui correspond à une fraction massique de l'ordre de 0,42%. Le plomb, issu du trafic routier, constitue moins de 0,21% de la masse des substances véhiculées par les PM_{10} . Toutefois, cette fraction s'élève à plus de 0,28% de la masse des particules très fines (PM_1) ce qui permet à cet élément de se retrouver dans les alvéoles pulmonaires. L'analyse des particules, par la dispersion d'énergie de rayons X, montre la prédominance des métaux lourds dans la composition des aérosols étudiés.

Mots-clefs : PM_{10} ، $PM_{2,5}$ ، PM_1 ، distribution granulométrique، particules fines، métaux lourds، trafic routier، site urbain، Alger، qualité de l'air.

Abstract:

This study presents the level of air pollution by the fine particles (PM_{10} ، $PM_{2,5}$ and PM_1) in an urban site in the east of Algiers (Bach-Djerrah). The taking away of the particles is carried out by a sampler with strong flow, HVS-PM-10. The average daily contents of PM_{10} ، $PM_{2,5}$ and PM_1 rise to 102.3، 49.6؛ and 24.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ، respectively. Approximately 50% of the PM_{10} particles consist of breathable particles. In addition, this work shows that the studied particles follow a bimodal distribution which is characteristic of urban airborne particles. The size distribution of the aerosols concentrates around 1.6 and 8 μm for fine and large particles, respectively. Among the heavy metals associated to the PM_{10} ، iron shows the highest values. The average daily content of iron is about 392.4 ng/m^3 which corresponds to a mass fraction of about 0.42%. The lead, resulting from the road traffic, constitutes less than 0.21% of the mass of the substances conveyed by the PM_{10} . However, this fraction rises to more than 0.28% of the mass of the very fine particles (PM_1) what allows to this element to be found in the pulmonary cells. The analysis of the particles, by the energy dispersion X-rays, shows the prevalence of the heavy metals compounds in the composition of the studied aerosols.

Keys words: PM_{10} ، $PM_{2,5}$ ، PM_1 ، size distribution، fine particles، heavy metals، road traffic، urban site، Algiers، air quality.

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : comparaison des particules fines et grosses (adapté de [EPA, 2004]).....	10
Tableau I. 2: Comportement radiatif des aérosols en fonction de leur composition.....	12
pour les rayonnements solaire et tellurique (infrarouge).	
Tableau II. 1 : Impacts des métaux sur la santé humaine.....	21
Tableau II. 2: Niveaux des indicateurs de pollution atmosphérique (PM ₁₀).....	26
et les données de consultations extrahospitaliers tous âges confondus du 01 octobre 2001 au 30 septembre 2002 à Alger.	
Tableau III. 1: Quelques techniques de mesure des particules atmosphériques.....	28
Tableau III. 2: Quelques techniques de mesure des particules atmosphériques (suite).....	29
Tableau V.1 : teneurs atmosphériques moyennes et extrêmes des teneurs en PM ₁₀	39
Tableau V.2 : Valeurs moyennes et extrêmes des teneurs en PM ₁₀ enregistrées sur.....	41
les quatre saisons de l'année 2009 à Bach-Djerrah.	
Tableau V. 3 : Description statistiques des teneurs atmosphériques dans.....	43
les différentes classes granulométriques de particules et rapports massiques.	
Tableau V. 4 : Exploitation des données recueillies par fractionnement granulométrique....	49
Tableau V.5 : Calcul de la distribution modale des particules atmosphériques.....	52
Tableau V. 6 : Coefficients de corrélations liant les différentes classes granulométriques...	54
Tableau V.7 : Normes et valeurs guides régissant les PM ₁₀ et les PM _{2,5}	58
Tableau V. 8 : Comparaison des teneurs en PM _i mesurées dans divers sites d'Alger.....	60
Tableau V.9: Comparaison des teneurs en PM _i mesurées dans certains sites urbain.....	61
étrangers.	
Tableau V.10 : Teneurs atmosphériques et principaux paramètres statistiques.....	64
des métaux lourds étudiés.	
Tableau V. 11 : Teneurs atmosphériques en métaux lourds et fractions massiques.....	64
correspondantes.	
Tableau V. 12 : Comparaison des teneurs en éléments traces métalliques contenus.....	68
dans les classes conventionnelles (PM ₁₀ , PM _{2,5} et PM ₁) relevées à Bach-Djerrah avec celles mesurées à Alger et dans d'autres villes du monde.	

Liste des figures

Figure I. 1 : Image au microscope électronique d'un aérosol constitué de particules de suies...	5
Figure I. 2 : Evolution des émissions de particules des véhicules diesel en Algérie.....	8
Figure I. 3 : composition chimique relative de l'aérosol représentative de milieux.....	9
a : bruit de fond naturel, b : zone périurbaine et c : proximité de rue.	
Figure I. 4 : Distribution granulométrique en nombre et en masse de l'aérosol moyen.....	11
sur Paris durant l'été 2000.	
Figure I. 5 : Processus pilotant la dynamique des aérosols.....	14
Figure II. 1 : Pénétration des particules fines dans le corps humain.....	17
Figure II. 2 : Prédiction du dépôt total et régional des particules dans les voies.....	18
respiratoires chez l'homme en fonction de la taille des particules.	
Figure II. 3 : Particules de suie déchiquetées(en vert) dans le poumon humain.....	19
Figure II. 4 : Les poussières fines pénètrent aussi dans le sang : vue au microscope.....	20
de particules (en jaune) dans les globules rouges.	
Figure IV. 1 : Image satellitaire du site de prélèvement à Bach Djerrah, Alger.....	33
Figure IV. 2 : Poste de prélèvement à Bach-Djerrah, Alger.....	33
Figure IV.3 : HVS- PM ₁₀ avec cascadeur Anderson pour la collecte des PM _i	34
Figure IV. 4 : Photos de l'échantillonneur HVS- PM ₁₀ et des étages de fractionnement.....	35
Figure V. 1 : Filtres sans fractionnement granulométrique.....	36
Figure V. 2 : Filtre avec fractionnement granulométrique.....	37
Figure V. 3 : Evolution temporelle des teneurs moyennes journalières des PM _i	37
Figure V. 4 : Evolution temporelle des teneurs moyennes quotidiennes des PM _i (suite).....	38
Figure V. 5 : Influence de la météorologie sur la pollution de l'air par les particules fines... PM ₁₀ en site urbain à Bach-Djarrah, Alger...	40
Figure V. 6 : Contribution massique (%) des différentes classes granulométriques.....	44
dans la pollution particulaire étudiée.	
Figure V. 7 : Distribution des fréquences des teneurs en particules fines.....	46
prélevées à Bach-Djerrah (Alger).	
Figure V. 8 : Loi de distribution des teneurs en particules fines prélevées.....	47
à Bach-Djerrah (Alger).	
Figure V. 9 : Diagramme Log-probabilité des diamètres des particules en fonction.....	50
des masses cumulées.	
Figure V.10 : Teneurs moyennes en PM _i et contribution (en % massique) aux PM ₁₀	51
Figure V. 11 : Distribution bimodale des particules atmosphériques.....	53

Figure V. 12 : Corrélations entre les différentes classes granulométriques.....	55
Figure V. 13 : Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en PM ₁₀ et comparaison par rapport aux normes.	59
Figure V. 14 : Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en Fer associé..... aux différentes classes granulométriques de particules.	62
Figure V. 15 : Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en Plomb associé..... aux différentes classes granulométriques de particules.	63
Figure V. 16 : Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en Cuivre associé..... aux différentes classes granulométriques de particules.	63
Figure V. 17 : Teneurs moyennes du Fer dans les PM _i	65
Figure V. 18 : Teneurs moyennes du Plomb dans les PM _i	65
Figure V. 19 : Teneurs moyennes du Cuivre dans les PM _i	65
Figure V. 20 : distribution des métaux lourds sur les différentes classes granulométriques..	66
Figure V. 21: Fractions massiques moyennes par classe granulométrique des différents..... métaux lourds.	67
Figure V. 22 : Corrélation linéaire entre les teneurs de métaux lourds dans les PM _i	70
Figure V. 23 : Spectre EDX des PM ₁₀ prélevées le 04/04/2009.	71
Figure V. 24 : Spectre EDX des PM ₁₀ prélevées le 21/04/2009.....	72
Figure V. 25 : Spectre EDX des PM ₃ prélevées le 14/08/2009.....	72
Figure V. 26 : Spectre EDX des PM ₁₀ prélevées le 28/07/2009.....	72

introduction

INTRODUCTION

La notion de pollution atmosphérique recouvre de nombreux phénomènes aux origines et conséquences diverses qui concernent principalement les deux premières couches de l'atmosphère. Leurs points communs étant d'être engendrés ou accentués par l'activité humaine et d'avoir un impact néfaste sur l'homme et son environnement. Tout comme les phénomènes météorologiques qui contrôlent la dispersion des polluants ou au contraire leur accumulation (situation perturbée ou anticyclonique), ils se caractérisent par des échelles de temps et d'espace très variables [1].

Les problèmes de pollution dans les atmosphères urbaines ne sont pas uniquement liés à des hautes teneurs en gaz comme l'ozone, les composés organiques volatils et les oxydes d'azote, mais sont aussi également provoqués par les concentrations élevées en particules d'aérosol. Celles-ci sont généralement produites par émission directe ou par condensation de gaz et leur nature est infiniment plus complexe que celles des polluants gazeux. La régulation des teneurs en particules d'aérosol nécessite donc une bonne connaissance des émissions gazeuses, des processus de transformation, ainsi que des mécanismes de lessivage de l'atmosphère [2].

Un aérosol est une particule solide ou liquide en suspension dans l'air ou dans un gaz. Pour la pollution de l'atmosphère, on exclut de cette définition les nuages et le brouillard. Les aérosols existent naturellement dans l'atmosphère. Ils sont issus, par exemple, de l'érosion des roches, des éruptions volcaniques, de l'entraînement de grains de sable par le vent, de l'éclatement des bulles créées par les vagues à la surface des océans, etc.

Ils peuvent aussi être d'origine anthropique. Le trafic routier est en milieu urbain l'une des principales sources mises en cause lorsque l'on parle de pollution atmosphérique particulaire. Certaines industries peuvent aussi émettre une grande quantité de particules, notamment dans le secteur de l'énergie (centrales à charbon) ou dans la fabrication des matériaux de construction.

La taille des aérosols peut varier de quelques nanomètres à une dizaine de micromètres. Les aérosols « grossiers » (de diamètre supérieur à $2,5\mu\text{m}$) sont essentiellement d'origine naturelle, l'homme étant responsable de l'ajout dans l'atmosphère de particules plus fines. Leur concentration en milieu rural est de l'ordre de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dans les grandes agglomérations, la moyenne est de l'ordre de $50\ \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les concentrations peuvent atteindre plusieurs centaines de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ près des sources anthropiques [3,4].

La connaissance des aérosols atmosphériques et des processus chimiques et physiques auxquels ils participent est encore très incomplète, contrairement à la phase gazeuse. En effet, la phase particulaire est bien plus complexe car elle nécessite une description de son état de surface (liquide ou solide), de son mélange (externe, interne), de sa composition chimique (primaire, organique et inorganique), de sa granulométrie (nombre, masse et taille) et de sa géométrie (sphérique ou autre). La granulométrie est un paramètre important car il conditionne le cheminement des particules dans le système respiratoire. Il est connu de nos jours que seules les particules fines de diamètre inférieur à 10 μm (PM_{10}) ont un impact sanitaire. Les particules respiratoires $\text{PM}_{2,5}$ et les particules très fines, les PM_1 peuvent engendrer de graves problèmes respiratoires et cardio-vasculaires. Ainsi, dans les atmosphères urbaines et périurbaines, les teneurs élevées de particules fines ont un impact sanitaire majeur sur la population et sont probablement responsables chaque année en Europe de centaines de milliers d'hospitalisation et d'environ 350 000 décès prématurés chaque année. De plus, Ces teneurs élevées sont, en outre, à l'origine de la détérioration de monuments historiques par l'action de leur acidité sur le calcaire, et sont également responsables des phénomènes de réduction de visibilité atmosphérique [5].

En Algérie, l'une des principales causes de la pollution atmosphérique en milieu urbain est la densité du trafic routier qui supporte un parc automobile qui est en croissance constante et dont l'âge moyen est très élevé. Le problème de la pollution atmosphérique en milieu urbain se pose à toutes agglomérations, mais il l'est encore plus pour le cas de l'agglomération d'Alger. La wilaya d'Alger, avec 3,5 millions d'habitants (10% de la population globale), abrite actuellement plus d'un million de véhicules, soit environ le 1/5 du parc automobile national. Ces activités de transport routier sont certainement à l'origine de fortes émissions particulières [6,7].

Aussi et afin d'avoir des données précises sur les niveaux et types de pollution particulaire dans l'agglomération d'Alger, et pour arriver à formuler une stratégie de prévention, le Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Environnement de l'Ecole Nationale Polytechnique a entamé ces dernières années, une vaste étude sur la pollution particulaire en différents types de sites dans l'agglomération d'Alger.

Dans la continuité de ces travaux, nous avons étudié la pollution de l'air par les PM_i au niveau d'un site urbain à l'est d'Alger, plus exactement à Bach-Djerrah. Ce site, qui est caractérisé par une forte densité de population n'est pas exposé directement aux émissions du trafic routier.

L'étude abordera principalement les niveaux de pollution en fonction des classes granulométriques PM_i des particules fines et présentera l'ampleur de certains métaux lourds associés à ces particules.

Chapitre I

Généralités sur la pollution de l'air par les aérosols particulaires

I GENERALITES SUR LA POLLUTION DE L'AIR PAR LES AEROSOLS PARTICULAIRES

I. 1 Introduction

D'après l'Agence de Protection de l'Environnement des Etats-Unis (EPA– Environmental Protection Agency) [EPA, 2004]. Les six principaux polluants de l'atmosphère sont : l'ozone, les particules, le monoxyde de carbone, les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre et le plomb. Parmi ces polluants, les particules (liquides ou solides) sont les plus complexes à caractériser [8]. Elles se retrouvent dans l'atmosphère sous des formes très variées de part leur composition chimique, leur morphologie et leurs propriétés physiques, ce qui conditionne leur impact sur l'environnement et la santé. En effet la granulométrie des particules émises présente un spectre très large, couvrant des tailles de quelques nanomètres à plusieurs dizaines de micromètres. Les plus fines sont susceptibles d'être les plus dangereuses pour les organismes car elles peuvent atteindre les alvéoles pulmonaires. Elles font l'objet d'une attention accrue alors que leur détection quantitative avec des dispositifs d'analyse commercialisés est encore délicate [9].

I. 2 Définition

On appelle aérosol atmosphérique toute particule en suspension dans l'air, c'est-à-dire la phase condensée sous forme liquide et solide, à l'exclusion de celle liée à l'eau ; c'est le seul polluant pour lequel aucune définition chimique n'est utilisée. Ce terme recouvre une vaste gamme de tailles et de compositions physico-chimiques différentes [10].

D'autres termes sont également d'usage courant, comme celui de «poussières» ou de« matière particulaire ». Le terme « fumée noire » ou « suie », qui fait référence à la noirceur des particules, a été longuement utilisé pour qualifier l'aérosol, mais il désormais tombé en désuétude, la distinction, quelque peu artificielle, entre particules et hydrométéores peut s'expliquer par le fait que l'on considère que la vitesse de chute d'une particule sous l'action de la gravité est faible au regard des temps de déplacement dus au transport dans les masses d'air [2].

De nombreuses classifications sont utilisées pour la description des aérosols : en fonction de leur origine (naturelle ou anthropique), de leur nature (inorganique ou organique), de leur histoire (aérosol primaire ou secondaire), de leur taille (distribution en nombre et en masse). La taille des particules varie sur un large spectre allant du nanomètre à quelques dizaines de

micromètres. Les particules de taille supérieure ne sont, en général, plus considérées comme des particules en suspension car ils peuvent sédimer sous l'effet de l'attraction terrestre. La limite inférieure correspond aux plus petits noyaux de condensation. Si plus de 90% des particules en suspension dans l'atmosphère sont de diamètre inférieur à $0.1 \mu\text{m}$, la majorité de la masse est concentrée sur les particules de diamètre supérieur. Les particules liquides sont généralement de forme sphérique. En revanche, les particules solides prennent une forme caractéristique de leurs composants (Figure I.1) [10].

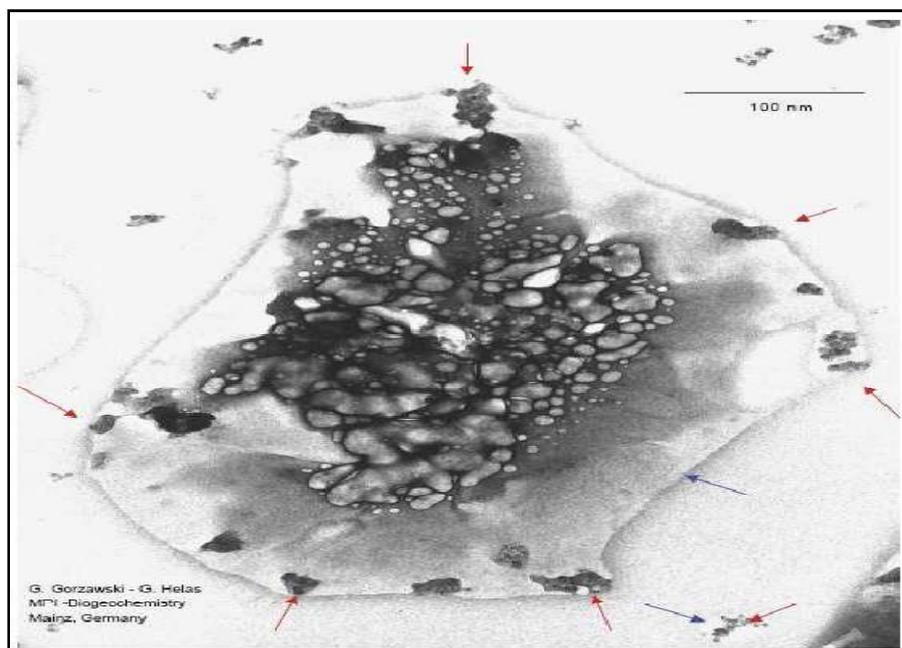


Figure I.1: Image au microscope électronique d'un aérosol constitué de particules de suies [10].

L'aérosol atmosphérique ne désigne donc pas une espèce précise, mais constitue un terme générique regroupant une diversité de constituants et de phases. En conséquence, nous pouvons imaginer que les sources d'émission de particules sont, elles aussi, nombreuses et variées. Cette diversité est d'autant plus accentuée qu'il existe dans la littérature à la fois des classifications des sources fondées sur leur origine (sources anthropiques, marines, biogéniques et volcaniques) et des classifications, certainement plus judicieuses, qui s'appuient sur le mode de formation des particules. Ces dernières permettent de définir deux grandes classes de particules d'aérosols: les aérosols primaires et les aérosols secondaires [2].

I. 3 Caractérisation générale des particules dans l'atmosphère

On peut répartir les particules en différentes catégories. Selon leur mode d'apparition, les particules peuvent être classées en *particules primaires*, directement émises par les sources et qui se retrouvent dans l'atmosphère avec la même composition que lors de leur émission et en *particules secondaires*, qui se forment dans l'atmosphère, par réactions chimiques entre les particules et composés qui y sont présents.

Un autre critère de classification concerne la taille des particules. Ainsi les particules ont été divisées en plusieurs classes, en fonction de leur dimension :

PM₁₀ (*grosses particules*) se réfère aux particules de diamètre inférieur à 10 µm.

PM_{2,5} (*particules fines*) se réfère aux particules de diamètre inférieur à 2,5 µm.

PM₁ et **PM_{0,1}** (*particules très fines ou ultrafines*) se réfère aux particules de diamètre inférieur à 1 et 0,1 µm respectivement [11].

Les particules de diamètre supérieur à 10 µm ne font pas l'objet de mesures en continu. Par ailleurs, elles n'ont qu'un faible impact sur la santé : elles se déposent très rapidement sur le sol ou encore elles sont arrêtées au niveau du nez et ne pénètrent pas dans l'organisme.

Les particules de diamètre inférieur à 10 µm sont appelées « poussières inhalables ». En effet, les (PM₁₀) et (PM_{2,5}) pénètrent plus ou moins profondément dans l'organisme selon leur taille. Les deux catégories (PM₁₀ et PM_{2,5}) sont responsables de l'irritation des voies respiratoires, de l'altération de la fonction respiratoire surtout chez l'enfant, de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des crises d'asthme chez des sujets asthmatiques.

Leur degré de toxicité sur l'homme et l'environnement dépend également de leur nature chimique et de leur éventuelle association à d'autres polluants. En effet, les poussières servent souvent de support à des substances toxiques, notamment des métaux lourds et des hydrocarbures [11, 12].

I. 4 Origine des particules

L'origine des particules en suspension dans l'atmosphère peut être naturelle (volcanisme, érosion éolienne, embruns marins, etc) ou anthropique. Dans ce dernier cas, les émissions de particules sont issues de différents types d'activités humaines :

Processus industriels : sidérurgie, calcination, concassage, production de ciment, etc ;

Transports : gaz d'échappements, usure de la chaussée et des pneumatiques, usure des pièces métalliques (ex. : freins), sels et sables de déneigement, etc ;

Chauffages domestiques ;

Particules de sol mises en suspension dans l'air lors des travaux agricoles ou lors du passage de véhicules.

Les $PM_{2,5}$ et PM_{10} se partagent entre :

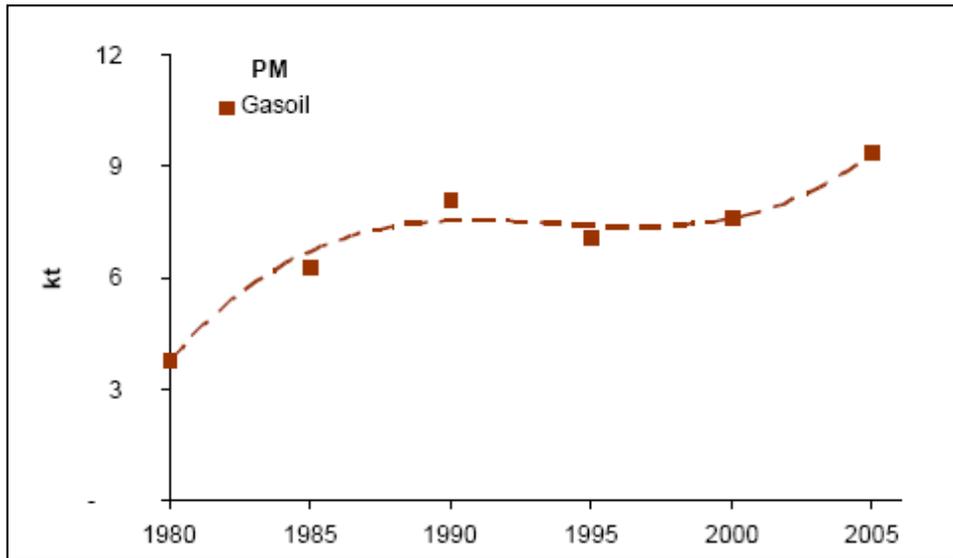
Les particules émises telles quelles (appelées *particules "primaires"*) ;

Les particules formées dans l'air à partir d'autres polluants atmosphériques (appelées *particules "secondaires"*) [13].

Les $PM_{2,5}$ primaires sont principalement des particules carbonées provenant de la combustion du bois, du charbon et des gaz d'échappement des véhicules diesel (condensation de vapeurs très chaudes pendant la combustion). Les $PM_{2,5}$ secondaires proviennent de réactions chimiques entre gaz émis dans l'atmosphère (SO_2 , NO_x , COV), de nucléation de molécules de gaz, de condensation de gaz et de réactions gazeuses dans des gouttelettes d'eau. Ces particules ont une durée de vie dans l'air relativement longue, qui se chiffre en jours ou en mois. Par temps sec, la concentration des $PM_{2,5}$ dépend de leur taux de formation et de leur transport, donc des conditions météorologiques (une particule fine peut être transportée sur des distances allant jusqu'à plus de 100 km).

Les PM_{10} sont essentiellement des particules primaires qui proviennent de l'abrasion mécanique de matières solides (frottement de surface, construction et démolition, traitement de sols, ...). Par temps sec, la concentration de PM_{10} dépend de l'équilibre entre leur dispersion dans l'air et de leur retombée par gravité. Ces particules ont une durée de vie de quelques minutes à quelques heures et ne sont transportées que sur des petites distances (maximum 10 km) [14].

Les émissions de particules dans l'atmosphère constituent un problème majeur en Algérie . Les émissions diesel issues du trafic routier ont été estimées à 9,4 kT (année 2005) avec un taux d'augmentation de 145% en 25 ans (Figure I.2) [6].



PM : particules fines

Figure I.2 : Evolution des émissions de particules des véhicules diesel en Algérie [6].

Cette croissance est due à l'augmentation du nombre de véhicules et à la part croissante des véhicules diesel dans le parc algérien, et en particulier les véhicules lourds de transport de voyageurs ou de marchandises, qui parcourent un kilométrage annuel élevé par rapport aux véhicules essence [6].

I. 5 Composition chimique

Les particules atmosphériques ont des compositions chimiques différentes selon la nature du processus qui a conduit à leur formation. Elles constituent un système physico-chimique complexe et comportent aussi bien des composants primaires émis que des composants secondaires formés.

L'aérosol de particules est constitué en général de quatre fractions majeures :

- Fraction minérale soluble dans l'eau.
- Fraction minérale insoluble.
- Fraction carbonée.
- Fraction organique.

La répartition des fractions diffère de façon importante suivant la taille des particules.

Ainsi, la fraction insoluble augmente régulièrement quand la taille augmente. La fraction soluble diminue quand le diamètre augmente [15].

La fraction minérale soluble contient principalement les aérosols secondaires, sulfates et nitrates provenant de la conversion du SO_2 et NO_2 ainsi que les ions chlorures et ammonium. La partie insoluble est riche en fer, aluminosilicates et métaux lourds.

La fraction carbonée est constituée de carbone élémentaire appelé aussi « carbone suie », ce carbone non fonctionnalisé et hautement polymérisé est non réactif. Il provient de toutes les combustions et des débris de matériaux organiques relargués par les activités humaines. [16].

Le carbone organique se retrouve sous forme d'alcanes lourds, d'alcools, d'esters et de composés aromatiques polycycliques (HAP). Il s'agit de composés organiques à chaînes longues de 4 à 30 atomes de carbones [17]. La figure I.3 illustre la composition chimique de particules représentative de différents milieux.

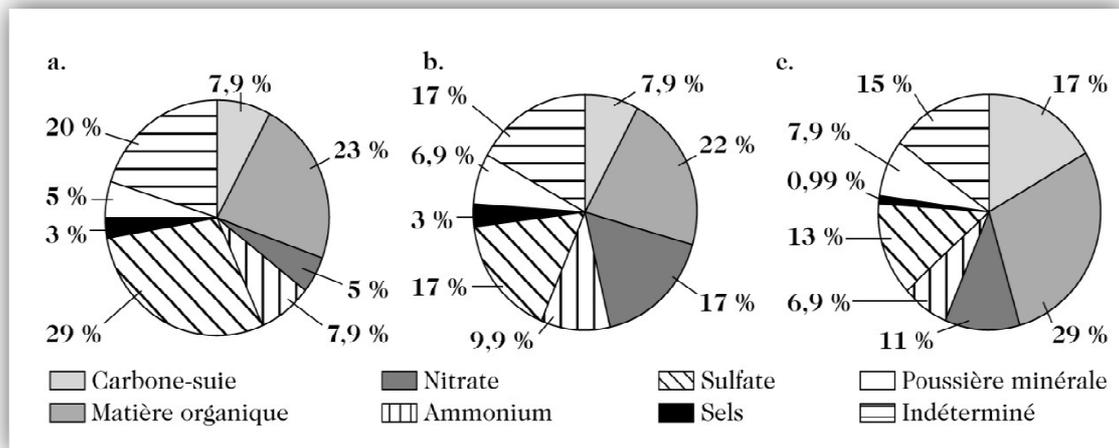


Figure I.3 : composition chimique relative de l'aérosol représentative de milieux **a** : bruit de fond naturel, **b** : zone périurbaine et **c** : proximité de rue [2].

On estime globalement que plus de 80% du carbone élémentaire et carbone organique et des aérosols secondaires se trouvent dans les $\text{PM}_{2,5}$. Les particules d'un diamètre compris entre 2,5 et $10 \mu\text{m}$ contiennent environ 50% de ces substances et un taux important de minéraux insolubles [17].

Selon leur taille, les particules ont généralement des compositions chimiques différentes et proviennent de sources différentes (tableau I.1).

Tableau I. 1 : comparaison des particules fines et grosses (adapté de [EPA, 2004]) [8].

	Particules fines	Grosses particules
Formation et sources	Combustion ; Processus à haute température (exemple métallurgie) ; Réactions atmosphériques (NO _x , SO ₂ , composés organiques).	Suspension de poussières ; Evaporation d'aérosols océaniques ; Processus d'érosion ; Construction, démolition ; Agriculture.
Composées de :	Sulfate, nitrates, sels d'ammonium ; Carbone élémentaire, suies ; Composés organiques ; Composés métalliques ; Eau.	Poussière ; Cendres volantes ; Produits de réactions avec HNO ₃ , HCl, SO ₂ ; Oxydes de Si, Al, Ti, Fe ; CaCO ₃ , CaSO ₄ , NaCl ; Résidus végétaux et animaux ; Particules formées par l'érosion des pneus, des freins, des routes....
Processus d'élimination	Lessivage ; Dépôt sec.	Dépôt sec.
Durée de vie dans l'atmosphère	Jours ou semaines.	De quelques minutes à quelques heures.
Distance parcourue	Jusqu'à 1000 km.	Jusqu'à des dizaines de km (centaines dans les tempêtes de poussière).

L'impact des particules atmosphériques sur l'environnement et sur les organismes vivants dépend de leur temps de séjour dans l'atmosphère. Les grosses particules se redéposent vite sous l'action de la gravité (sédimentation et précipitation) et ont un temps de séjour réduit. Les particules ultrafines ont aussi une durée de vie courte, du fait de leur coagulation rapide et de leur passage dans la classe de taille supérieure. Par contre, les particules fines (de diamètre < quelques µm), comme les particules formées lors de la combustion, ont une durée de vie de l'ordre de quelques jours. Elles peuvent être transportées sur des distances très longues (jusqu'à 1000 km), et ont donc une influence plus importante [8,18].

I. 6 Granulométrie

La taille des particules affecte à la fois leur temps de vie et leurs propriétés physiques et chimiques. C'est pourquoi on s'intéresse à la distribution en masse et en nombre sur le spectre en taille des aérosols. Ces deux distributions peuvent être différentes. En effet, un aérosol de 10 μm de diamètre pèse un million de fois plus qu'un aérosol de 10 nm.

La masse est donc concentrée sur les grosses particules, tandis que le nombre a tendance à être élevé pour des classes de petite taille.

Il existe plusieurs manières de décrire la distribution en taille des aérosols. On peut séparer le spectre de taille en intervalle fixes, et compter le nombre ou la masse des particules dont le diamètre est dans cet intervalle. On peut aussi remarquer, expérimentalement, qu'il existe plusieurs modes dans la distribution en taille (voir figure I.4). On a en général trois modes:

- le mode de **nucléation**, qui est constitué de particules ultrafines issues de la condensation de gaz autour d'un noyau de condensation ;
- le mode d'**accumulation**, qui résulte du grossissement des petites particules par condensation ou de l'évaporation des grosses particules ;
- et le mode **grossier**, qui est formé généralement des particules primaires et constitué de poussière minérale, de sel de mer et de nitrate [19].

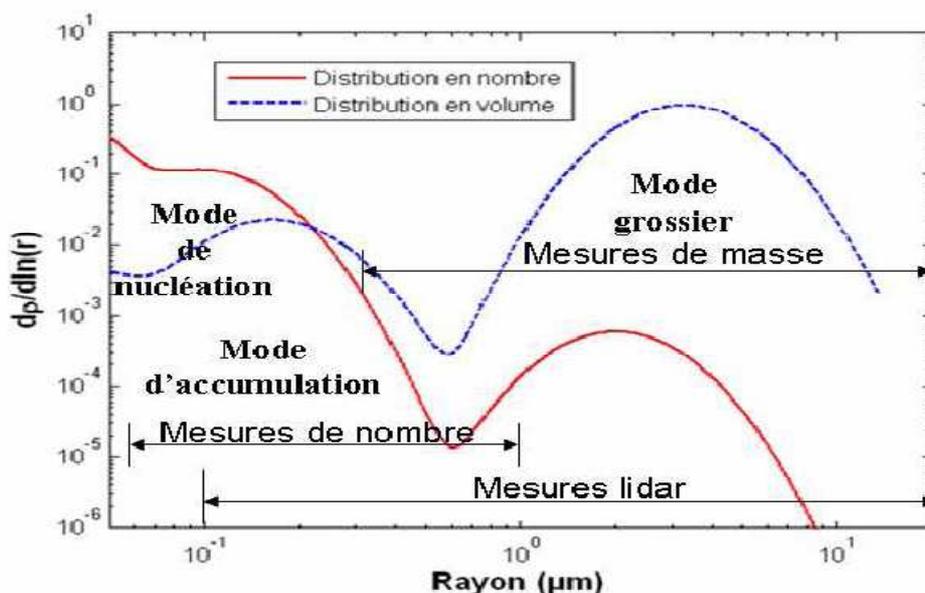


Figure I. 4 : Distribution granulométrique en nombre et en masse de l'aérosol moyen sur Paris durant l'été 2000 [19].

I. 7 Rôle et processus

Contrairement aux gaz, du fait de leur poids, les aérosols les plus grossiers (au delà de 10 μm de diamètre) sont sensibles à la gravité (sédimentation gravitationnelle).

Ils résident essentiellement dans la couche limite atmosphérique, ont un temps de résidence dans l'atmosphère de quelques jours, sont transportés sur de courtes distances (à l'échelle planétaire), et ont une hauteur d'échelle (la hauteur caractéristique de la décroissance exponentielle de leur profil vertical) de l'ordre de quelques kilomètres. On trouve donc les concentrations les plus importantes au sol, en contact avec les écosystèmes terrestres.

Les aérosols naturels et anthropiques émis dans l'atmosphère subissent des transformations, notamment la condensation des espèces gazeuses semi-volatiles. La condensation de l'acide sulfurique (H_2SO_4), de l'acide nitrique (HNO_3) et à moindre échelle, la dissolution du gaz carbonique (CO_2) dans les gouttes d'eau condensées sur les aérosols peuvent diminuer fortement le pH des aérosols. Ils sont alors lessivés sous forme de pluies acides, qui peuvent avoir des effets négatifs pour la flore et le bâti [20].

De plus, les aérosols réfléchissent ou absorbent la lumière selon leur taille, leur composition et la longueur d'onde du rayon incident. Ils vont donc modifier les propriétés radiatives de l'atmosphère et avoir un effet sur le bilan radiatif. D'après le tableau I. 2, un aérosol de sulfate va refroidir l'atmosphère en diffusant le rayonnement solaire, tandis que des aérosols carbonés vont au contraire la réchauffer en absorbant le rayonnement solaire de jour et le rayonnement infrarouge terrestre de jour et de nuit. Pour les aérosols désertiques, on ne peut pas conclure car ils diffusent de jour et absorbent la nuit [21].

Ces propriétés vont aussi avoir un effet dynamique. En effet, en changeant le profil de température sur la verticale, les aérosols peuvent modifier la circulation atmosphérique.

Tableau I. 2: Comportement radiatif des aérosols en fonction de leur composition pour les rayonnements solaire et tellurique (infrarouge) [21].

Aérosol	Rayonnement solaire	Rayonnement infrarouge
Sulfate	Diffusion	-
Suie	Absorption	Absorption
Désertique	Diffusion	Absorption

Un effet direct de l'extinction (absorption et diffusion) des rayons solaires incidents par les aérosols est la réduction de la visibilité. En grand nombre, les aérosols forment une sorte de brume particulaire, visible à l'œil nu [21].

Les aérosols, en donnant à la vapeur d'eau une surface pour condenser, pilotent également la formation des nuages. L'augmentation du nombre de petits aérosols peut avoir plusieurs effets sur la couverture nuageuse et donc sur le climat.

Plus les gouttelettes sont petites et nombreuses, plus elles réfléchissent le rayonnement solaire. Le rayonnement solaire incident à la surface est donc diminué, réduisant ainsi l'évaporation à la surface des océans et la vapeur d'eau disponible pour la formation des nuages ; des gouttelettes plus petites diminuent l'efficacité de précipitation et donc augmentent la durée de vie des nuages. Cet effet participe au questionnement sur les ressources en eau potable dans certaines régions du globe comme le Sahel ; l'absorption du rayonnement solaire par les suies peut causer l'évaporation de l'eau à la surface des particules. Ces effets sont parfois contradictoires et l'impact sur le bilan radiatif terrestre est difficile à quantifier [5].

1.7.1 Répartition sur le globe

La composition chimique des aérosols est évidemment différente d'une région du globe à une autre, de par ses sources d'émissions et son climat. Les poussières sont essentiellement émises dans les zones désertiques, le Sahara étant la source la plus importante, vient ensuite le désert de Gobi. Le sulfate se retrouve principalement dans les pays industrialisés de l'hémisphère nord. Les concentrations d'aérosols carbonés sont les plus élevées en Asie et en Europe de l'Est, tandis que la contribution des régions où les incidents de biomasse sont importants est visible en Amérique du Sud, en Afrique et en Asie du Sud [22].

1.7.2 Distribution verticale

Les lois simplifiées gouvernant la concentration totale de particules en fonction de l'altitude sont généralement des lois exponentielles. En considérant que la concentration d'aérosols a une composante de fond et une composante continentale, que celles-ci ont respectivement une concentration au sol de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et une échelle de hauteur de 1 et 8km, alors 90% de la masse totale de particules se trouve en deçà de 3km d'altitude.

La distribution verticale des aérosols dans la troposphère dépend aussi de la hauteur de la couche de mélange. En effet, les aérosols sont principalement émis au sol, la hauteur de mélange indique donc le volume dans lequel ceux-ci vont pouvoir être dilués.

Ensuite, la probabilité pour que les aérosols soient transportés plus haut est très faible, car la turbulence ne jouera plus (sauf dans les zones de forte convection). La hauteur de la couche limite varie au cours d'une journée. On voit que la nuit, en atmosphère stable, les polluants s'accumulent au sol, tandis qu'au cours de la journée, la température du sol crée un état turbulent, ce qui a pour effet de diluer les polluants [23, 24].

I.7.3 Dynamique d'une distribution d'aérosols

Plusieurs processus microphysiques font évoluer la granulométrie et la composition chimique des aérosols atmosphériques. La figure I.5 donne une idée de l'imbrication des processus et du spectre des ordres de grandeur de diamètre des particules d_p dont il faut tenir compte.

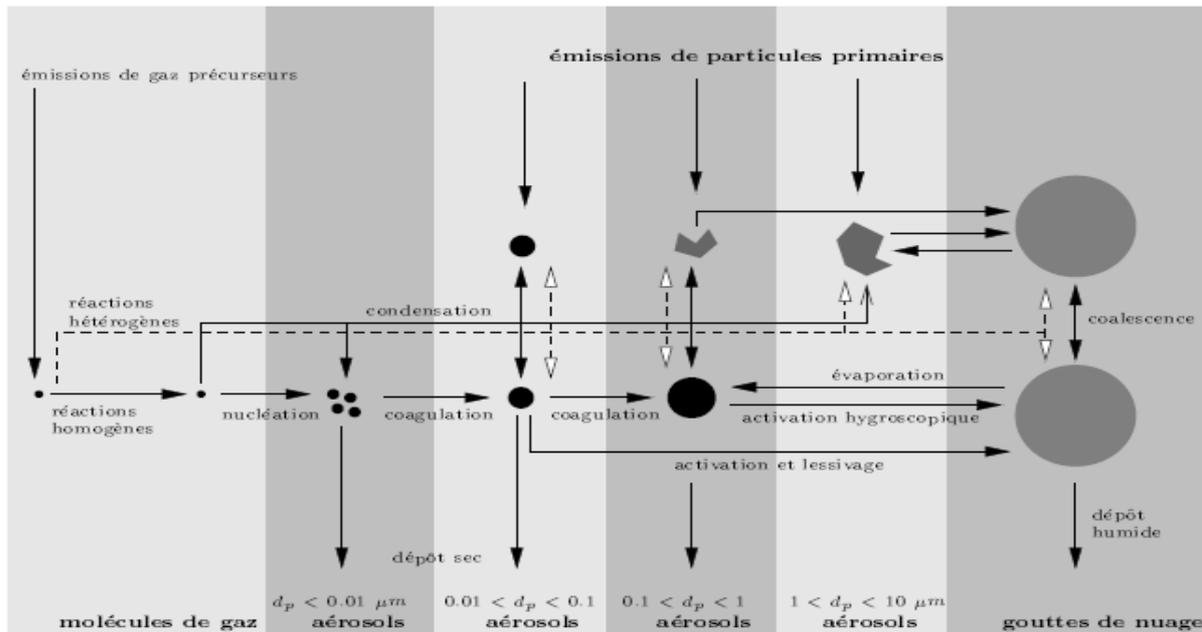


Figure I. 5 : Processus pilotant la dynamique des aérosols [25].

Les aérosols sont directement produits dans l'atmosphère soit par *émission*, soit par nucléation. Les aérosols fraîchement formés sont susceptibles de grossir par *condensation* ou *réactions hétérogènes* ou de *coaguler*, particulièrement les petits aérosols. A une taille donnée, ils peuvent trouver un équilibre avec la phase gaz ou être activés et devenir des noyaux. Enfin les aérosols sont éliminés de l'atmosphère soit par *dépôt sec*, soit par *dépôt humide* [25].

I. 8 Particules atmosphériques en zone méditerranéenne

Le bassin méditerranéen est particulièrement touché par les phénomènes de pollution par les particules. Un bassin océanique quasi-fermé, une orographie marquée sur son pourtour, un climat très contrasté, une forte urbanisation / anthropisation et des feux de forêts intenses sont des particularités qui donnent au domaine méditerranéen une complexité particulière et un intérêt unique. Reconnue comme « Hot Spot » au niveau européen, la Méditerranée est un lieu privilégié pour l'étude des particules atmosphériques. La forte anthropisation de cette région du globe engendre le développement de larges bassins de population associés à d'importants complexes industriels. Ce développement s'accompagne d'un transport maritime en constante augmentation. De plus, les conditions photo-oxydantes de l'atmosphère qui y sont particulièrement intenses et la circulation des masses d'air au dessus de la méditerranée font de cette région un réacteur photochimique très efficace pour la formation et la transformation des particules atmosphériques [26]. Une étude récente menée à Marseille (Centre ville, Juillet 2008) [27], a mis en évidence d'intenses épisodes de particules ultra fines (<50 nm) pouvant atteindre des concentrations de l'ordre 140 000 particules/cm³. Ce type d'évènement est caractéristique d'épisodes de nucléation (formation de particules *in situ* dans l'atmosphère) et leurs compositions chimiques laissent envisager une origine industrielle. La même étude a montré que la source automobile ne représente, au maximum, que 25% de la matière organique particulaire et que cette contribution chute jusqu'à environ 5-10% lors des épisodes précédemment cités. Ce faible pourcentage laisse donc entrevoir l'importance des processus secondaires de formation de particules ainsi que celle de sources dont l'empreinte chimique est encore méconnue. A cela il est important de noter que le bassin méditerranéen est le siège de transport à longue distance dont les épisodes sahariens sont les manifestations les plus visibles.

Parmi les sources encore méconnues et dont l'importance peut s'avérer significative en milieu méditerranéen, figurent la source océanique et les émissions des bateaux (marchandises et voyageurs). De récents articles ont décrit le rôle du film superficiel marin en tant que source de matière organique pour la fraction fine de l'aérosol (aérosols de tailles inférieurs à 100 nm) montrant plus spécifiquement que celle-ci est enrichie en matière organique insoluble) constituée de colloïdes et autres agrégats moléculaires tels que les lipo-polysaccharides issus du phytoplancton [27, 28]. D'autres travaux ont également mis en évidence que si la matière

organique insoluble était d'origine primaire, la fraction soluble du carbone organique semblait être d'origine secondaire [29].

Le transport maritime contribue de façon significative à la pollution de l'air. Ainsi une étude récente a montré qu'environ 15% des émissions globales en NO_x et entre 5 et 8% pour les SO_x peuvent être attribuées au transport maritime [30].

Cette étude estime que les émissions de particules par les bateaux sont responsables d'environ 60 000 morts par an par cancer du poumon et maladies cardiovasculaires. Dans ce contexte, la méditerranée est particulièrement touchée puisque que la contribution des émissions par le trafic maritime méditerranéen aux particules fines (PM_{2,5}) est l'une des plus forte au monde (estimée à 2 µg/m³) [30,31].

Chapitre II

Effets nocifs des particules atmosphériques

II EFFETS NOCIFS DES PARTICULES ATMOSPHERIQUES

II. 1 Effets nocifs des particules atmosphériques sur l'homme

Les particules fines sont dangereuses pour les organismes vivants. En effet, le lien entre la présence des particules atmosphériques et certains problèmes de santé est bien établi. La pollution de l'air due aux particules est responsable d'une série d'affections comme : les problèmes respiratoires (irritation des voies respiratoires, toux), diminution des capacités respiratoires, asthme aggravé, bronchite chronique, battement irrégulier du cœur, attaques cardiaques, mortalité prématurée pour les personnes avec affections pulmonaires et cardiaques. Ces effets dépendent des caractéristiques des particules, notamment de leur morphologie, ou de leur composition chimique [32]. La figure II.1 illustre la pénétration des particules dans le système respiratoire.

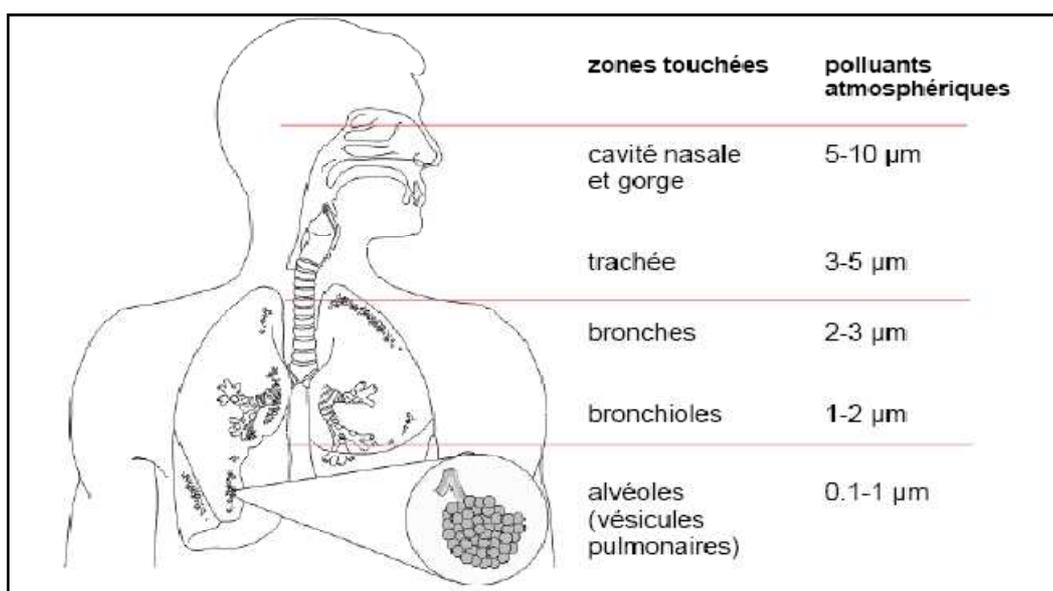


Figure II. 1 : Pénétration des particules fines dans le corps humain [33].

Plusieurs études ont montré qu'il existe un lien entre la taille des particules et leur nocivité. En effet, si les particules de dimensions relativement importantes ($>10 \mu\text{m}$) ont une probabilité plus grande d'être arrêtées dans les parties supérieures des voies respiratoires et éliminées rapidement, les particules de diamètre inférieur peuvent pénétrer plus profondément dans les poumons [33]. Diverses études montrent l'effet plus nocif des particules fines par l'observation d'une forte corrélation entre la concentration des $\text{PM}_{2,5}$ et les maladies cardio-pulmonaires et le cancer des poumons. Ainsi, une augmentation de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ en concentration des particules fines est associée à une augmentation de 4% de la

mortalité (6% pour les maladies cardio-pulmonaires et 8% pour le cancer des poumons) [34].

II. 1. 1 Dépôts dans les voies respiratoires des particules très fines

L'inhalation d'un aérosol, c'est-à-dire sa pénétration dans les voies respiratoires, puis le dépôt des particules dans différentes régions (voies aériennes supérieures, trachée, bronches, bronchioles respiratoires non ciliées et sacs alvéolaires), représentent potentiellement un risque pour la santé. Les particules ultrafines jouent un rôle particulier.

La probabilité de dépôt se réfère à la probabilité moyenne qu'a une particule inhalée d'un diamètre donné de se déposer à un endroit quelconque le long des voies respiratoires. Le dépôt total est la somme des probabilités de dépôt dans les trois différentes régions anatomiques distinctes (ou compartiments respiratoires) que sont généralement :

- La région extra-thoracique incluant la bouche, les fosses nasales, le larynx et le pharynx ;
- L'arbre trachéo-bronchique : zone où le mécanisme d'épuration par le tapis roulant muco-ciliaire est prépondérant (qui s'étend de la trachée aux bronches) ;
- La région alvéolaire qui comprend les bronchioles terminales et les alvéoles [35].

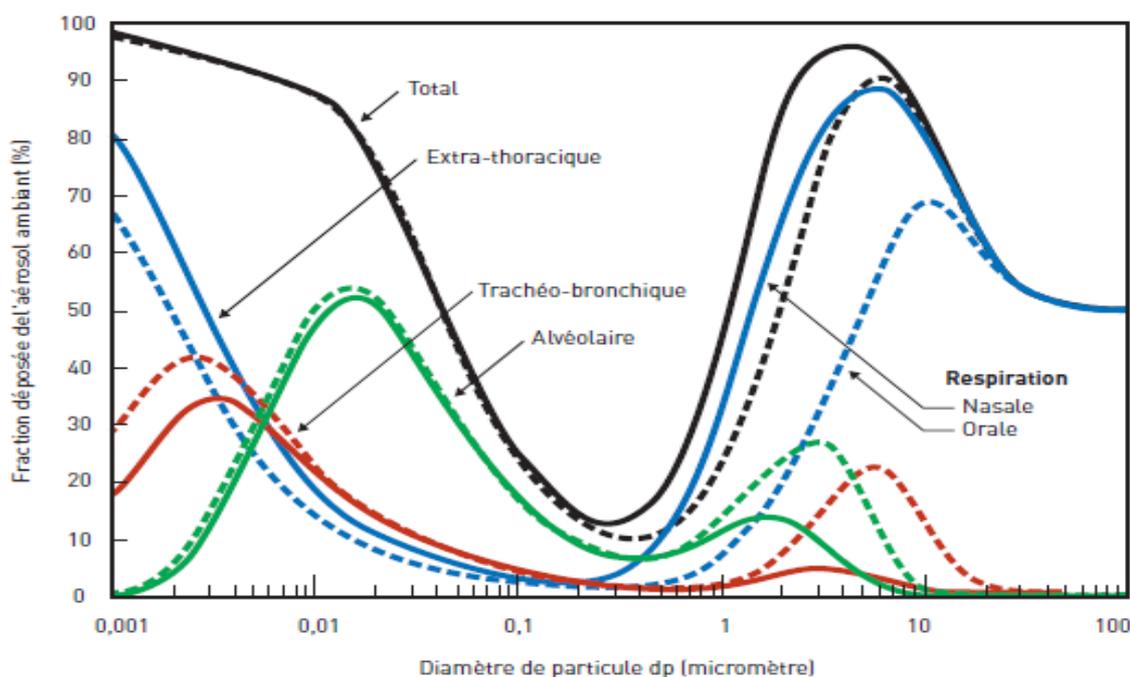


Figure II. 2 : Prédiction du dépôt total et régional des particules dans les voies respiratoires chez l'homme en fonction de la taille des particules [35].

Le dépôt des particules très fines de suies dans les poumons est illustré en figure N° II.3. Selon les preuves scientifiques et sanitaires les plus récentes, présentées dans la communication de la commission relative à la stratégie thématique sur la pollution atmosphérique [COM(2005) 446], la seule exposition aux particules fines présentes dans l'air ambiant est responsable d'une réduction de plus de 8 mois de l'espérance de vie statistique du citoyen moyen de l'Union Européenne [36].

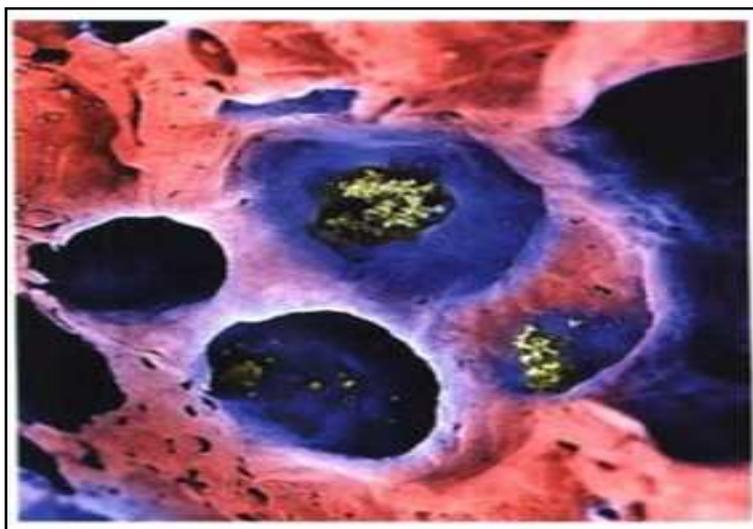


Figure II. 3 : Particules de suie déchiquetées(en vert) dans le poumon humain [37].

La composition chimique des particules est aussi un facteur déterminant. Les particules de dimensions plus importantes sont essentiellement des silicates provenant de l'érosion et n'ont pas d'influence très importante. Les particules fines contiennent des sulfates et des nitrates, plus dangereux pour la santé. Elles incluent aussi les particules très fines formées par la combustion et constituées majoritairement de suies, matières carbonées (carbone élémentaire et organique), avec une fraction importante d'hydrocarbures aromatiques polycycliques [38].

Des études récentes ont montré qu'un HAP modèle (benzo[a]pyrène) adsorbé à la surface de particules diesel inhalées passe à travers l'épithélium alvéolaire et est retrouvé rapidement dans le sang [37] (Fig. N° II.4). Une fois entrés dans l'organisme, les HAP sont métabolisés et forment des adduits avec l'ADN, responsables de l'apparition du cancer [39].

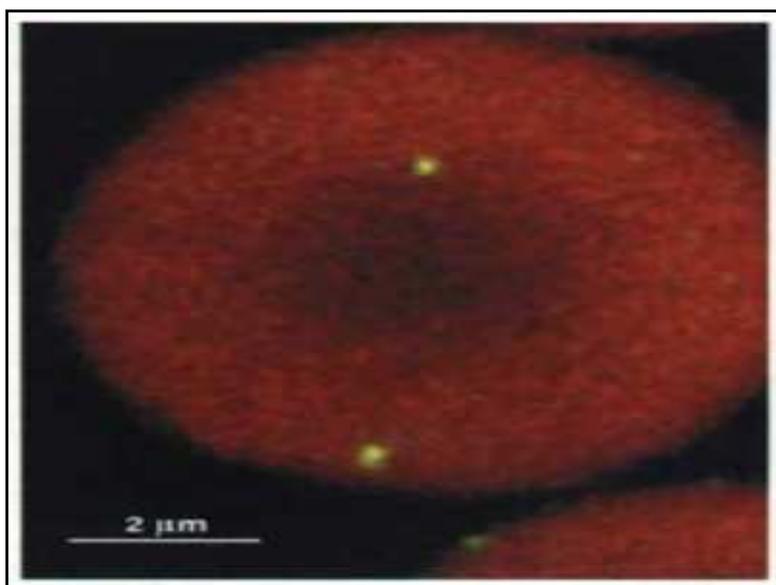


Figure II.4 : Les poussières fines pénètrent aussi dans le sang : vue au microscope de particules (en jaune) dans les globules rouges [37].

II. 1. 2 Effets toxiques de certains métaux lourds supportés par les PM_{10}

A court et à long terme, les métaux sont connus pour leurs effets sur la santé humaine. Parmi les voies de pénétration dans l'organisme (inhalation de l'air, ingestion de nourriture ou d'eau, contact dermique), l'inhalation est le principal mode de contamination. Les particules les plus fines chargées en métaux pouvant pénétrer plus profondément dans les voies respiratoires. Par ingestion, les métaux vont s'accumuler dans le corps humain (sang, foie, reins et os) ou certains d'entre eux ne sont que très lentement éliminés.

Les métaux ont des effets aigus sur la physiologie, ce qui entraîne notamment des perturbations des systèmes respiratoire, digestif et rénal, et provoque des troubles neurologiques graves ou des lésions de la peau. Une concentration en cadmium (poussières ou fumées) est irritante pour les cellules du système respiratoire et gastro-intestinal.

Une durée d'exposition à de faibles niveaux, si elle est chronique, peut aussi avoir de graves répercussions sur la santé. Le plomb, l'arsenic, le nickel et le cadmium ont des propriétés cancérigènes. Dans le cas du plomb, l'intoxication la plus courante est liée à une exposition chronique. Le plomb s'accumule alors dans le sang (plombémie) et bloque plusieurs enzymes nécessaires à la synthèse de l'hémoglobine, ce qui a pour effet une diminution du nombre de globules rouges et une anémie [40]. Le Tableau II.1 résume l'impact de certains métaux lourds sur la santé.

Tableau II. 1 : Impacts des métaux sur la santé humaine [40].

Eléments	Toxicité / forme la plus toxique	Effets	
		Chroniques Exposition peu intense de longue durée	Aigus Exposition intense de courte durée
Arsenic	Formes inorganiques	Cancérogène, lésions (moelle osseuse, sang, foie, système nerveux)	Irritations des muqueuses, troubles digestifs et circulatoires, lésions de la peau
Cadmium	Formes inorganiques (chlorure et oxyde de Cd)	Potentiellement cancérogène, ostéoporose, lésions du rein	Troubles digestifs, pulmonaires et rénaux
Chrome	Formes inorganiques (CrVI, trioxyde de Cr)	Effets cancérogènes (poumon), lésions du rein, troubles respiratoires	Irritations des muqueuses respiratoires
Cuivre	Toxicité rare sauf si exposition exponentielle		Lésions des muqueuses respiratoires
Fer	Toxicité rare sauf si exposition exponentielle (trichlorure de fer)		Troubles digestifs, lésions du rein, irritations (peau. Muqueuses)
Mercure	Méthylmercure	Troubles neurologiques et du comportement, tremblements	Troubles neurologiques et digestifs. Irritations des voies respiratoires, lésions du rein
Nickel	Toxicité assez rare Formes organiques (nickel titracarbonyle)	Cancérogène, asthme, rhinites chroniques	Troubles respiratoires, digestifs et cutanés
Plomb	Formes organiques	Potentiellement cancérogènes, plombémie, convulsions, troubles neurologiques et du comportement	Troubles neurologiques (enfants plus sensibles), digestifs et rénaux
Vanadium	Toxicité rare sauf si exposition exponentielle (pentoxyde de vanadium)	Bronchites chroniques, pneumonie, anémie, lésions du foie et des reins	Irritations (appareil respiratoire, peau, muqueuses)
Zinc	Toxicité rare sauf si exposition exponentielle (sels solubles, chlorure, phosphure et sulfate de zinc)		Irritations des muqueuses respiratoires, gastro-intestinales et cutanées, fatigue, frissons)

II. 2 Effets nocifs des particules atmosphériques sur l'environnement

D'une manière générale, les particules qui se trouvent dans l'atmosphère (surtout les particules carbonées) peuvent absorber la lumière, avec des conséquences sur la visibilité. En absorbant la lumière du soleil, ainsi que la radiation IR émise par la Terre, ces particules contribuent au réchauffement de l'atmosphère et donc à une augmentation de l'effet de serre.

Des simulations placent les particules de noir de charbon en deuxième position après le CO₂, comme cause du réchauffement planétaire [41].

Les particules émises par les avions dans les couches supérieures de l'atmosphère ont également un rôle important car elles constituent des nuclei de condensation, conduisant à la formation des nuages (cirrus). Une des hypothèses retenues est que le soufre contenu dans le kérosène se transforme en H₂SO₄ qui se retrouve ensuite sous forme de particules acides dans les gaz d'émission. Ces particules pourraient être tenues responsables de la formation des traînées de condensation (contrails) [42,43]. Une étude récente a également montré que ce rôle pourrait être tenu par les particules carbonées (suies), en l'absence de H₂SO₄ [44]. Les traînées de condensation peuvent avoir une influence sur le réchauffement de la Terre [45].

II. 2. 1 Effet sur la visibilité

La dégradation de la visibilité de l'atmosphère est sans doute le signe de la pollution atmosphérique que nous percevons le plus directement. Le terme de « visibilité » signifie en général « distance visible » et représente la plus grande distance à laquelle on peut voir un objet de grande dimension et de couleur noir sur l'horizon. Même si aucun objet n'est visible à distance, un jugement subjectif de la visibilité peut être fait à partir de la coloration et de l'intensité lumineuse du ciel et des objets proches. La visibilité est réduite si, par exemple, on ne peut distinguer une montagne lointaine que l'on distingue habituellement, si des objets proches semblent troubles ou peu contrastés, ou encore si le ciel est blanc, gris, jaune ou noir au lieu de bleu.

La visibilité atmosphérique est définie par le contraste entre un objet –source et la lumière de fond atmosphérique. Plusieurs facteurs déterminent la distance à laquelle on peut voir à travers l'atmosphère, en tenant compte des propriétés optiques atmosphériques, de la quantité de lumière disponible, des caractéristiques des objets observés et des propriétés de l'œil de l'observateur. La visibilité est réduite, d'une part, à cause de l'absorption de la

lumière par les gaz (responsables de la couleur bleue du ciel) et, d'autre part, en raison de la présence des particules.

En effet, les particules exposées à un rayonnement visible produisent une atténuation de la visibilité à la fois par diffusion et par absorption de ce rayonnement. La diffusion correspond à un changement de direction de la propagation des photons par rapport à la direction du rayonnement incident en d'autres formes d'énergie de réaction chimique ou le rayonnement. Selon leur taille et leur composition chimique, les particules contribuent différemment à la diffusion et à l'absorption des rayonnements lumineux.

Lorsque l'humidité augmente jusqu'à des valeurs proches de la saturation (100%), la visibilité diminue jusqu'à formation de la brume (visibilité <1 km) ou du brouillard (visibilité <500 m), la pollution par les particules a donc un effet important sur la visibilité, avec toutes les conséquences que cela comporte sur, par exemple, le trafic automobile ou l'aviation civile [2].

II. 2. 2 Effet sur le climat

Les aérosols modifient le climat en :

- Changeant les propriétés radiatives de l'aérosol (effet direct).
- Modifiant la capacité à fixer l'eau atmosphérique (effet indirect).

Les aérosols modifient l'Albédo terrestre, par leurs propriétés physicochimiques. Un aérosol carboné se comporte comme un « corps noir » au sens de la thermodynamique, alors que les poussières terrigènes sont plutôt blanches et réfléchissent la lumière solaire. Par ailleurs, les composés présents dans ou à la surface de l'aérosol peuvent être solubles. Certains sont très solubles comme les sulfates ou les nitrates (composés hydrosolubles). D'autres sont moyennement solubles comme les acides organiques (composés hydrophobes). Les premiers confèrent à l'aérosol un comportement de noyaux de condensation de nuages. En revanche les derniers, en ne captant pas l'eau atmosphérique, défavorisent la formation des nuages [2].

II. 2. 3 Effet sur les matériaux

Les matériaux sont essentiellement affectés par la pollution acide (surtout liée au SO₂) qui entraîne une dégradation des édifices, monuments ou façades d'immeubles. Il s'agit bien souvent de la décomposition de certaines pierres calcaires sous l'effet des acides. Les particules interviennent plutôt sur les aspects de salissures des bâtiments. La

pollution atmosphérique met en danger notre patrimoine culturel et occasionne d'onéreux travaux de ravalement de façades ou de restauration des monuments [46].

II. 2. 4 Effet sur les animaux

L'intoxication se traduit par l'introduction dans l'organisme animal de certaines substances toxiques supportées par des particules et après une exposition plus ou moins longue.

L'arsenic, le plomb et le sélénium sont toxiques pour les animaux. Ils se produisent certains symptômes au niveau du système nerveux, de l'appareil respiratoire et du tube digestif.

Les poussières alcalines provenant des composés du calcaire dans les cimenteries peuvent provoquer des troubles chez les animaux par des lésions du tube digestif et modification du pH [47].

II. 2. 5 Effet sur végétaux

Les végétaux sont exposés de manière permanente à la pollution atmosphérique. Dans certaines recherches, ils sont d'ailleurs utilisés comme bio-indicateurs (lichens par exemple). Ils peuvent être l'objet d'atteintes aiguës telles que nécroses et d'atteintes chroniques telles que troubles de croissance. A part les forêts, la pollution de l'air touche aussi les céréales et les plantes agricoles, comme les pois, les épinards et le trèfle. Certaines espèces d'arbres fruitiers sont également très sensibles ; c'est le cas par exemple des abricotiers. Les végétaux sont exposés à la fois à l'action des polluants en suspension dans l'atmosphère, aux retombées sèches de poussières et de métaux et aux dépôts acides. Ils sont atteints directement par le feuillage et aussi indirectement par l'intermédiaire du sol (lessivage d'éléments nutritifs). Bien que chaque polluant ait un effet spécifique, ce sont surtout les retombées acides qui sont dangereuses pour les végétaux. La couche protectrice des feuilles et des aiguilles peut subir des lésions visibles, telles que fentes et augmentation de la taille des pores. L'eau de pluie ruisselant à l'intérieur des forêts présente un pH inférieur à celui des pluies en terrain découvert. La base du tronc est ainsi fortement atteinte.

Pour ce qui est des particules contenant des nitrates ou sulfates, elles contribuent à la formation de pluies acides.

L'augmentation de l'acidité des sols peut entraîner des lésions aux racelles des arbres et se répercuter sur l'activité des micro-organismes, comme les bactéries de l'azote par exemple. En tant qu'oligo-éléments, les plantes ont besoin de composés métalliques à base de cuivre, fer, zincetc. mais une accumulation de ces métaux équivaut à un

empoisonnement. L'obstruction des stomates par les particules fines contribue aussi au dépérissement [48].

II. 3 Effet de la pollution par les particules fines dans l'agglomération d'Alger

Les pays à bas ou à moyen niveau socio-économique sont aujourd'hui confrontés, à une détérioration de la qualité de l'air en raison de nombreux facteurs dont les plus importants sont l'exode rural, l'industrialisation rapide et le développement du parc automobile. Dans ces pays, les données sanitaires mettent en évidence l'émergence de pathologies chroniques cardio-respiratoires reconnues sous la dépendance de facteurs de risque environnementaux.

L'Algérie est un modèle représentatif des situations observées actuellement dans les pays à moyen niveau socio-économique en raison d'une forte démographie, d'une forte urbanisation et d'une industrialisation rapide surtout dans la frange littorale et les hauts plateaux. La quasi-totalité du tissu industriel est implantée dans ces zones qui représentent 20% de la superficie du territoire national et où réside plus de 80% de la population. En effet, c'est là que sont localisées les villes les plus importantes et notamment la capitale Alger avec une densité de 3000 habitants/km².

Le trafic routier est particulièrement important à Alger. Le taux de motorisation a fortement augmenté ces dernières années, il s'y élève actuellement à environ 25 veh. / 100 hab.

D'après l'Institut National de Santé Publique (INSP) d'Algérie, on estime aujourd'hui qu'en Algérie, chaque année 10 à 12 millions d'habitants consultent pour des épisodes aigus de maladies respiratoires. On peut supposer qu'un certain nombre de ces épisodes sont directement en relation avec l'exposition à la pollution atmosphérique. Dans ce contexte, l'INSP a engagé en 2001 une première démarche d'évaluation du risque en rapport avec la pollution de l'air dans l'agglomération d'Alger. Deux indicateurs ont été retenus : les particules de diamètre inférieur à 10 µm pour la pollution urbaine et le recours aux soins ambulatoires pour la morbidité respiratoire non hospitalière comme indicateur sanitaire [49].

La morbidité respiratoire incluait d'une part la notification des maladies respiratoires connues et bien définies, pathologies des voies respiratoires supérieures (rhino-pharyngites aiguës, angine, sinusite, otite moyenne aiguë, laryngite aiguë) et inférieures (trachéites, bronchites aiguës, pneumonies aiguës) et d'autre part un relevé systématique des

consultations pour symptômes respiratoires et épisodes d'exacerbations de crises d'asthme et de bronchopathies chroniques obstructives. Le tableau II.2 résume les résultats de cette étude.

Tableau II. 2: Niveaux des indicateurs de pollution atmosphérique (PM₁₀) et les données de consultations extrahospitaliers tous âges confondus du 01 octobre 2001 au 30 septembre 2002 à Alger [49].

	PM ₁₀ (µg/m ³)			Consultations		
	Hivernale	Estivale	Période totale	Hivernale	Estivale	Période totale
Moyenne	74	48	61	34,01	24,57	29,28
DS	34,75	21,22	31,93	16,39	11,56	14,92
Percentile 5	47	26	28	7,35	5	5
Percentile 50	67	44	58	34	26	28
Percentile 95	114,85	80,9	107	60	42,6	57
Max	365	203	365	71	54	71
Min	38	15	15	2	3	2

DS : déviation standard.

Le nombre des consultations attribuables à l'exposition aux PM₁₀ s'élève à 439, ce qui représente un impact « total » de l'exposition aux PM₁₀ de 4,5% de l'ensemble des événements sanitaires observés. Les niveaux inférieurs à 80 µg/m³ (valeur limite) sont responsables de 71% de l'impact total, soit 314, représentant 3,2% de l'ensemble des consultations observées en soins ambulatoires sur la période.

Cette étude a permis pour la première fois en Algérie d'attribuer à la pollution par les PM₁₀ près de 4,5% des consultations annuelles pour affections aiguës respiratoires. De plus, quand les niveaux d'exposition sont inférieurs à 80 µg/m³ les cas attribuables à la pollution par les PM₁₀ représentent 71% de l'impact total, soit 3,2% de la prévalence annuelle de la morbidité respiratoire vue en consultation ambulatoire. Il ressort également qu'une réduction de 25% du niveau moyen annuel observé permettrait de réduire dans la même proportion le nombre des consultations attribuables à la pollution.

Elle offre également l'avantage de constituer pour les décideurs un outil d'aide à la décision en mettant à leur disposition une information compréhensible en termes de quantification du risque et d'évaluation du bénéfice à attendre des actions de prévention possibles [49].

Chapitre III

Méthodes de mesure et d'analyse des particules atmosphériques

III METHODES DE MESURE, D'ANALYSE ET STATISTIQUES APPLIQUEES A L'ETUDE DES PARTICULES ATMOSPHERIQUES

III. 1 Méthodes de mesure et d'analyse des particules atmosphériques

La collecte et la mesure des particules atmosphériques constituent des manipulations délicates car, au contraire des méthodes pour les gaz, il existe peu de méthodes non réglementées. Il importe néanmoins de connaître les méthodes existantes.

Comme l'impact des aérosols sur la santé humaine ou sur le climat dépend essentiellement de la taille des particules, l'accent est porté sur toutes les méthodes permettant de déterminer la granulométrie des aérosols et sur celles permettant de connaître les relations entre la composition chimique de la particule et sa la taille [2].

Il existe toute une série de méthodes de mesure pouvant servir à déterminer de manière sélective la taille des particules atmosphériques ou certains de leurs composants. Quelques techniques sont résumées dans le tableau III.1 [32,50].

La diversité des substances qui peuvent constituer les particules en suspension dans l'atmosphère rend difficile leur mise en évidence. Mais il existe des méthodes développées qui permettent de déterminer certains constituants ainsi que leur concentration, après une préparation préliminaire de l'échantillon.

La composante acide, c'est-à-dire les sulfates et les nitrates particuliers, est déterminée généralement par la chromatographie ionique ou la spectrométrie UV visible. Tandis que les éléments métalliques sont déterminés par diverses méthodes telles que la spectrométrie d'absorption atomique (S.A.A.), la fluorescence X, l'activation neutronique et la dispersion d'énergie de photons X (EDX).

L'analyse EDX (*energy dispersive x-ray analysis*) est dérivée de la fluorescence X, elle permet de connaître la composition élémentaire qualitative et/ou quantitative d'un échantillon à partir de la mesure des énergies des photons X émis par la région de l'échantillon bombardée par un faisceau d'électrons. Suite à l'excitation des atomes présents dans l'échantillon par interaction avec les électrons incidents, des photons X sont émis (processus de désexcitation). L'analyse chimique par EDX consiste en une détection de ces photons en utilisant un détecteur solide Si-Li. L'énergie de ces photons X est caractéristique des atomes dont ils sont issus, d'où la possibilité de réaliser des analyses

élémentaires. De plus, comme le signal sous chaque pic d'un élément A étant proportionnel au nombre d'atomes de type A, cette analyse peut être quantitative [51].

La détermination dans les particules de la composante organique contenant les HAP se fait généralement par des techniques chromatographiques telles la chromatographie liquide haute performance (C.L.H.P.) équipée d'une détection par émission de fluorescence ainsi que la chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectroscopie de masse (GC-MS) [32].

Tableau III. 1: Quelques techniques de mesure des particules atmosphériques [32,50].

Type de la méthode	Technique
<p>Méthodes gravimétriques et aérodynamiques (collection par filtration et impaction) :</p> <p>Les particules sont recueillies sur des filtres puis pesées.</p>	<p>« High Volume Sampler » avec différentes têtes d'échantillonnage fixant les particules du flux d'air selon leur grandeur avant le prélèvement d'échantillons. Ces appareils aspirent de grands volumes (env. 60 m³/h) à travers un filtre. Ils sont utilisés avec des têtes sélectives pour les PM10, les PM2.5 ou les PM1).</p> <p>«Low Volume Sampler » avec différentes têtes d'échantillonnage fixant les particules du flux d'air selon leur grandeur avant le prélèvement d'échantillons. Ces appareils aspirent de petits volumes (env. 1 -3 m³/h) à travers un filtre.</p> <p>Impacteurs en cascade : Ils permettent de recueillir séparément des particules de différentes classes de taille. Les appareils à plusieurs paliers sont constitués de plaques trouées, dont les trous deviennent de plus en plus petits et derrière lesquelles sont placées des plaques qui reçoivent les impacts, sur lesquelles les particules sont séparées selon leur taille (inertie).</p>
<p>Méthode optique :</p>	<p>Le compteur optique : Le compteur optique de particules est basé sur la mesure de l'intensité diffusée par une particule.</p> <p>Cette technique est utilisée pour la détermination des distributions granulométriques des particules.</p>

Tableau III. 2: Quelques techniques de mesure des particules atmosphériques (suite) [32,50].

Type de la méthode	Technique
<p>Méthode automatiques fonctionnant en (quasi) continu (moniteurs)</p> <p>Ils utilisent d'autres principes de mesure qui génèrent un signal (quasi) continu pour la concentration massique.</p> <p>Un problème fréquemment rencontré est la perte de composés volatils sur les filtres de collecte, qui sont légèrement chauffés pour éviter la condensation.</p>	<p>Jauges β : Elles aspirent de l'air à travers un filtre et mesurent de manière continue ou à brefs intervalles l'absorption des rayons β. La jauge β nécessite une source radioactive pour les rayons incidents</p> <p>TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance) : Ces microbalances mesurent la modification de la fréquence de résonance du filtre oscillant chargé de particules. Avec les appareils plus anciens (où la ligne d'échantillonnage est chauffée à 50 °C), on a des pertes de masse moyennes pouvant atteindre 30 %. Les nouveaux analyseurs équipés d'un système FDMS (Filter Dynamics Measurement System) semblent en revanche être en mesure de bien compenser ces pertes.</p> <p>Ces deux types d'analyseurs sont largement utilisés dans les réseaux de surveillance de la qualité de l'air</p>
<p>Méthode électrique :</p>	<p>Analyseurs de mobilité sont utilisés pour la mesure des ions ou des particules chargées</p> <p>Compteur de noyaux de condensation. Echantillonneur ELPI (Electrical Low Pressure Impactor) : a été développé sur la base des impacteurs en cascade déjà commercialisés.</p>

III. 2 Statistiques appliquées à l'étude des particules atmosphériques

Cette partie décrit les méthodes statistiques utilisées dans l'étude de la distribution massique des particules selon leur granulométrie.

La détermination de la distribution des particules selon leur granulométrie, nous permet de mieux définir la qualité de l'air à un endroit donné, de connaître d'une manière exhaustive la contribution de chaque classe à la pollution particulaire et de déterminer d'une façon plus approfondie les sources et les modes de formation de ces particules.

Les principaux paramètres statistiques usuellement utilisés dans la description de la pollution particulaire sont :

La teneur de l'air en particules : elle indique la concentration des particules dans l'air. Son unité est le $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La teneur moyenne est égale à la moyenne arithmétique des teneurs enregistrées le long d'une période donnée.

Elle est représentée par « PM_i », i représente le diamètre limite maximal.

$$PM_{i \text{ annuelle}} = 1/n \sum_j^n PM_{i, \text{ journalière}}, \text{ avec } n : \text{ le nombre de mesures.}$$

La déviation standard : ce paramètre sert à l'évaluation de l'ampleur de la dispersion des valeurs enregistrées par rapport à la valeur moyenne.

Le Centile P_x : cette valeur représente la limite supérieure de $X\%$ des teneurs enregistrées c.à.d. $X\%$ des valeurs enregistrées sont inférieures à la valeur P_x .

Le médian : c'est la limite supérieure de la moitié d'une population donnée, dans notre cas la population est soit les teneurs en PM, soit le diamètre particulaire [50,52].

Détermination de la distribution massique selon la granulométrie des particules :

La distribution des particules par classe granulométrique permet d'estimer la probabilité de présence d'une particule dans une fraction granulométrique donnée.

Dans le domaine de la pollution particulaire, la caractérisation des aérosols atmosphériques se fait essentiellement par la détermination de leur masse (m) par unité de volume ou leur nombre (N) par unité de volume ou par leur distribution en fonction de leur diamètre (d_p).

Les relations les plus utilisées, pour la représentation graphique de la distribution granulométrique des particules sont $\frac{dm}{d \log(d_p)}$, $\frac{dN}{d \log(d_p)}$ en fonction de diamètre de particules (d_p) [52].

Dans ce travail, la distribution granulométrique des particules est représentée par la relation $\frac{dm}{d \log(d_p)} = f(d_p)$ sur un papier semi-logarithmique.

Chapitre IV

Méthodologie expérimentale

IV METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

Pour bien situer notre travail expérimental, nous présentons ci-après une description du site étudié, la méthode d'échantillonnage et les techniques d'analyse utilisées.

IV.1 Site de prélèvement

Pour l'étude de la pollution de l'air par les diverses classes granulométriques de particules PM_i ainsi que les métaux lourds qu'elles véhiculent dans l'agglomération d'Alger, nous avons retenu comme zone à étudier la commune de Bach-Djerrah qui située à l'est d'Alger à quelques kilomètres du centre ville d'Alger (figure IV.1). C'est une commune à forte densité de population résidente (30768 hab. /km²) [53], dont les quartiers de type « populaires » n'ont pas fait l'objet d'un aménagement adéquat. De part la présence de nombreux marchés (autorisés et informels), cette commune présente aussi une importante population de passage qui est également exposée à la pollution.

Le poste de mesure a été implanté au niveau du siège de l'Assemblée Populaire Communale (APC) qui est situé au milieu des cités de la commune. En ce site, le poste de prélèvement est implanté sur la terrasse de l'APC à environ 9 m d'altitude. Ce site qui se caractérise par l'absence d'obstacles et de sources locales de particules fines, subit une assez bonne ventilation naturelle (figure IV.2).

Les coordonnées géographiques du site sont :

Latitude : 36°43' 81°Nord ;

Longitude : 3°6'37.01°Est ;

Altitude par rapport à la mer : 55m [54].

Ce site est considéré comme étant de type urbain, il se trouve à plus de 100m des principaux axes routiers et est conforme aux critères et à la classification établis par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME – France) pour un site de mesure de type urbain [55].

L'étude de la pollution de l'air à Bach-Djerrah nous permet d'une part, d'avoir une idée sur l'ampleur de la pollution dans des zones urbaines à forte densité de population et d'autre part, de compléter les données obtenues dans les études antérieures relatives à d'autres zones de la grande agglomération d'Alger [56,57].



Figure IV.1 : Image satellitaire du site de prélèvement à Bach Djerrah, Alger [54].

IV. 2 Echantillonnage et caractérisation chimique des particules

Les prélèvements des particules atmosphériques ont été réalisés à l'aide d'un échantillonneur à fort débit, le HVS-PM₁₀ (High Volume sampler) de marque « Andersen » (figure IV.3). Cet appareil à seuil de coupure de 10 µm est en plus doté d'un système de fractionnement granulométrique à plusieurs étages d'impaction. Ce cascadeur à quatre étages permet d'accéder aux classes granulométriques suivante : < 1 ; 1 à 1,5 ; 1,5 à 3 ; 3 à 7 et 7 à 10 µm.



Figure IV.2 : Poste de prélèvement à Bach-Djerrah, Alger.

Le HVS représente le corps de cet échantillonneur, il contient principalement :

- Une turbine d'aspiration d'air.
- Un conduit d'aspiration.
- Des étages de sélection qui servent comme porte-filtres et qui permettent la séparation par impaction, des particules selon leur taille.
- Des étages de collection : c'est l'ensemble des filtres où sont piégées les particules sous l'effet de leur impaction sur la surface des filtres.
- Un contrôleur électronique de débit, le MFC (Mass Flow Controller), qui permet de maintenir, durant le prélèvement le flux d'air entrant à un débit constant. Il agit sur la puissance de moteur (turbine d'aspiration) par ajustage électronique du voltage. De cette façon, une éventuelle réduction du débit due au colmatage du média filtrant est automatiquement corrigée [58].

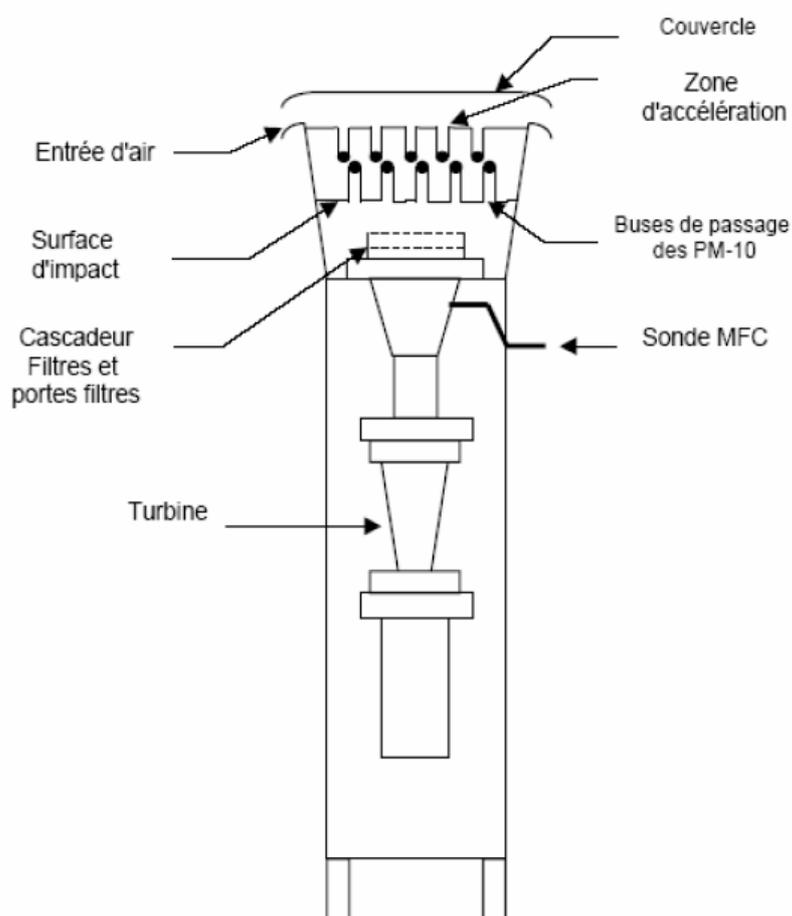


Figure IV.3 : HVS- PM₁₀ avec cascadeur Anderson pour la collecte des PM_i.

Tête sélective

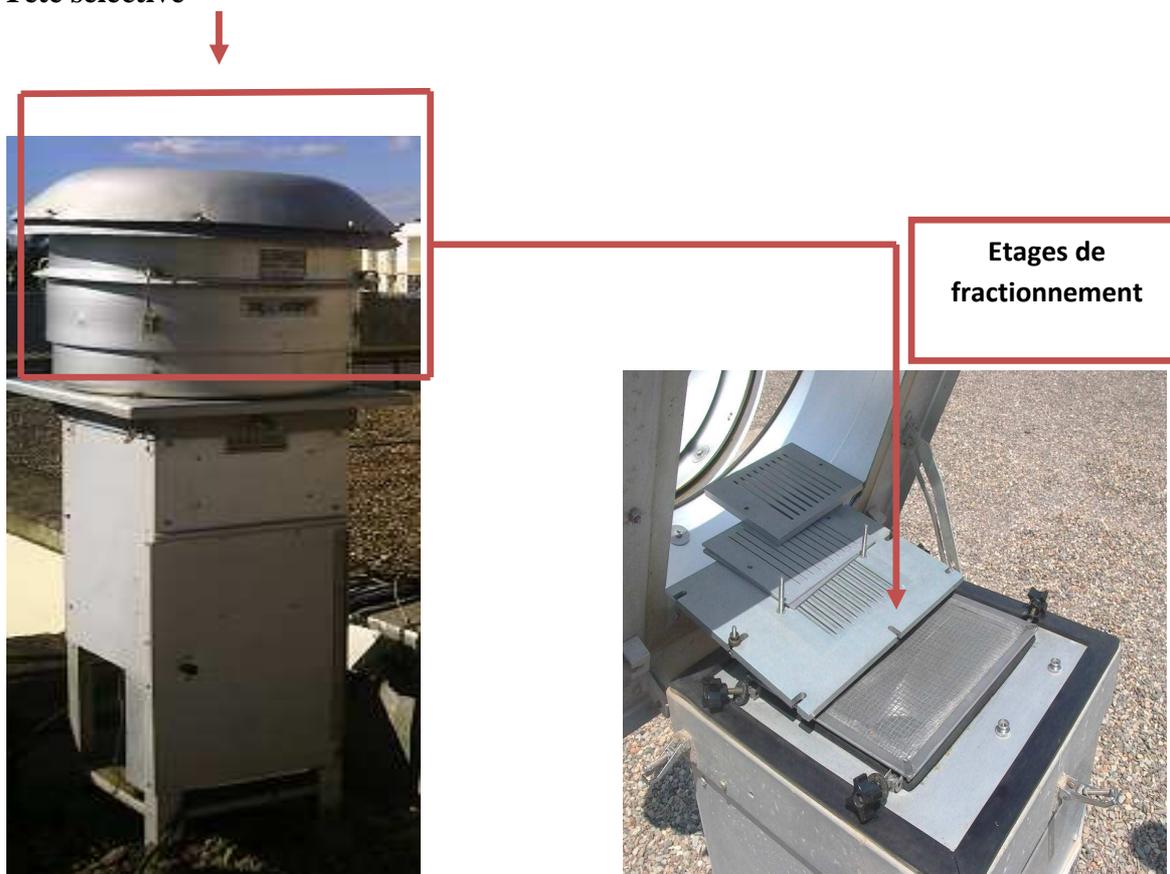


Figure IV. 4: Photos de l'échantillonneur HVS- PM₁₀ et des étages de fractionnement.

Le débit d'aspiration est de 1 m³/min, la durée de prélèvement est de 24h. Les filtres utilisés pour la rétention de particules sont en fibres de verre de type Whatman de dimensions 12 cm × 12 cm, le filtre de rétention final est de 20 cm × 25 cm. Pour déterminer les teneurs en particules fines, les filtres sont pesés avant et après collecte à 0,1 mg près. Le résultat donnant la teneur atmosphérique en particules est alors exprimé en « µg/m³ » [58].

Pour l'analyse des métaux lourds associés aux particules, on divise les filtres en petits morceaux puis on procède à une double minéralisation des échantillons des particules collectées. La minéralisation acide à lieu conformément à la norme ISO 9885 avec l'acide nitrique (dilution 1:8) [59]. Les métaux lourds, qui du point de vue sanitaire ont une incidence importante, sont analysés quantitativement par spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA) sur appareil Thermo Elemental Solaar (Solaar AA Spectrometer) avec une flamme air/acétylène, et qualitativement par dispersion d'énergie de rayons X (EDX, energy dispersive x ray analysis).

Chapitre V

Résultats et interprétations

V. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Le suivi des teneurs atmosphériques en particules inhalables PM_{10} a été effectué durant dix mois (mars à décembre 2009) à raison d'une moyenne de 5 prélèvements par mois. Cette campagne de mesure nous a permis de mesurer les teneurs sur 50 jours, dont 40 ont fait l'objet d'un prélèvement avec fractionnement granulométrique. Les fractions granulométriques recueillies sur les quatre étages du cascadeur d'Anderson sont : 10 à 7 μm , 7 à 3 μm , 3 à 1,5 μm , 1,5 à 1 μm et enfin la fraction terminale du filtre absolu (<1 μm). Au total 123 échantillons répartis entre les différentes classes granulométriques ont été étudiés. La caractérisation visuelle des particules collectées sur les filtres montre que les grosses particules (3 à 10 μm) sont nettement différenciables (taille et / ou couleur) des particules très fines (<1 μm), tandis que la couleur des classes intermodales (1-3 μm) varie en fonction des conditions météorologiques (stabilité, température, humidité) et du type des journées étudiées (week-end ou journées ouvrables). Les particules prélevées pendant les journées stables sont de couleur noire, ce qui indique la prédominance des particules issues de la combustion. Cependant, les aérosols collectés lors des journées instables (vents forts) sont souvent de couleur marron et/ou grise dénotant la présence de particules de resuspension et de la croûte terrestre. A titre illustratif, nous présentons en figures IV.1 et IV.2 des photos montrant la charge et la couleur des filtres après prélèvement des PM_{10} .



Classe « 0 – 3 μm » : 02/12/2009



Classe « 0 – 3 μm » : 28 /07/2009

Figure V.1 : Filtres sans fractionnement granulométrique.



Classe « 7 – 10 µm » : 28/07/2009.

Figure V.2 : Filtre avec fractionnement granulométrique.

V.1 Teneurs atmosphériques en PM_i

L'évolution temporelle des teneurs atmosphériques en différentes classes granulométriques PM_i étudiées dans ce travail est illustrée graphiquement en figure V.3 et V.4. Ces teneurs sont calculées à partir des masses des particules recueillies sur chaque filtre rapportées au débit et à la durée de prélèvement.

Les résultats montrent qu'il existe, comme c'est souvent le cas en pollution de l'air, une importante fluctuation temporelle et ce quelque soit la classe granulométrique considérée. Ces fluctuations dépendent certainement aussi bien des variations dans l'intensité les activités humaines, de celle du trafic routier que de l'influence des facteurs météorologiques (vent, pluie, température, etc.).

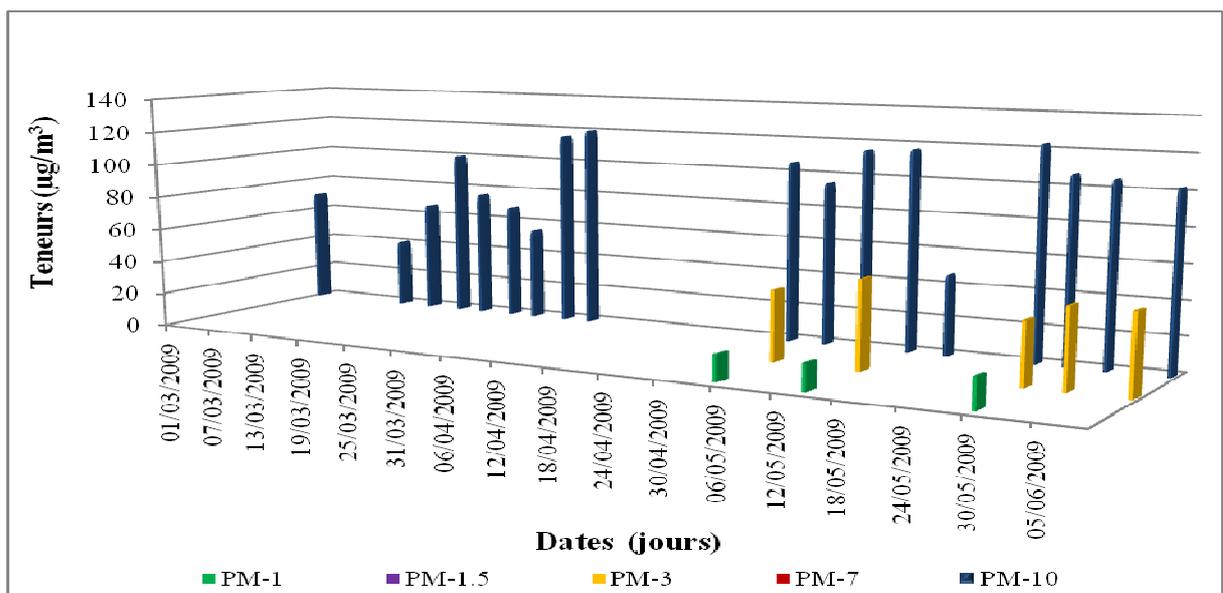


Figure V.3 : Evolution temporelle des teneurs moyennes journalières des PM_i.

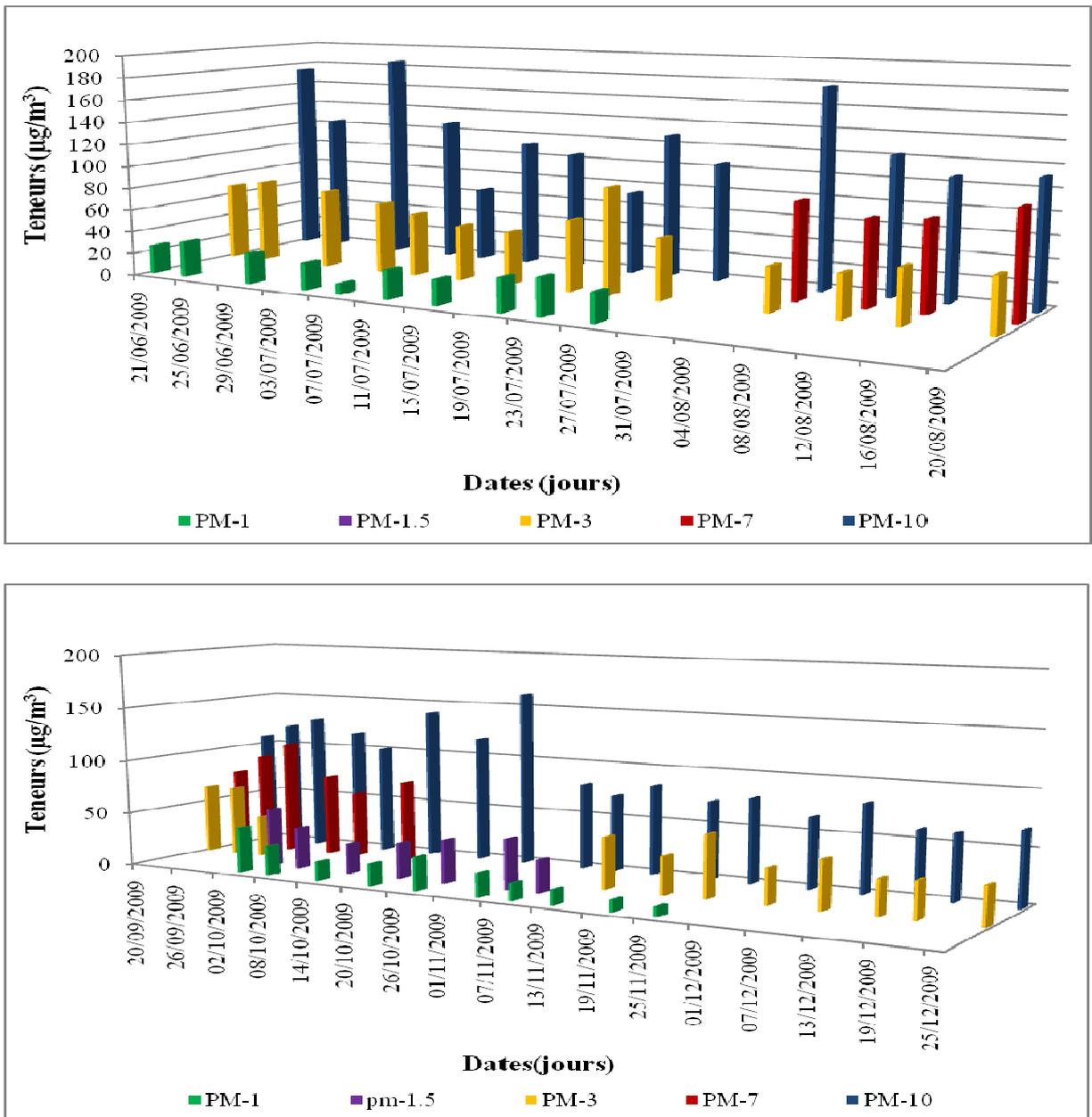


Figure V.4 : Evolution temporelle des teneurs moyennes quotidiennes des PM_i (suite)

V. 2 Etude des PM₁₀

Nous résumons en tableau V.1 les teneurs moyennes et les teneurs extrêmes en PM₁₀ ainsi que les écarts types mesurées au site urbain de Bach-Djerrah, Alger.

Tableau V.1 : teneurs atmosphériques moyennes et extrêmes des teneurs en PM₁₀.

PM ₁₀	Teneur (µg/m ³)
Maximum	185,6
Minimum	41,1
Moyenne	102,3
Ecart type	33

Il en résulte que les teneurs en PM₁₀ mesurées en ce site urbain oscillent entre environ 41 et 185 µg/m³. La teneur moyenne s'élève à 102,3 µg/m³. Le domaine de dispersion des concentrations des PM₁₀ dans l'air s'étale sur un rayon de 33 µg/m³ par rapport à la moyenne annuelle. Ces teneurs sont excessivement élevées et nous verrons plus tard qu'elles dépassent largement les normes internationales en vigueur dans plusieurs pays.

V. 3 Influence des facteurs météorologiques sur les PM₁₀

Comme le taux de pollution de l'air influencé en général des facteurs météorologiques, nous avons étudié l'évolution des teneurs en particules fines PM₁₀ en fonction de la vitesse des vents dominants, des précipitations et de la température. Ces facteurs météorologiques mesurés par l'Office National de Météorologie à la station de Dar el Beida devraient être très similaires à ceux régnant à Bach-Djarrah (à vol d'oiseau, une distance de moins de 10Km sépare Bach-Djarrah de Dar-El-Beida) [60].

La figure V.5 illustre l'influence des facteurs météorologiques, vitesse des vents dominants, précipitation et température sur les niveaux de pollution mesurés.

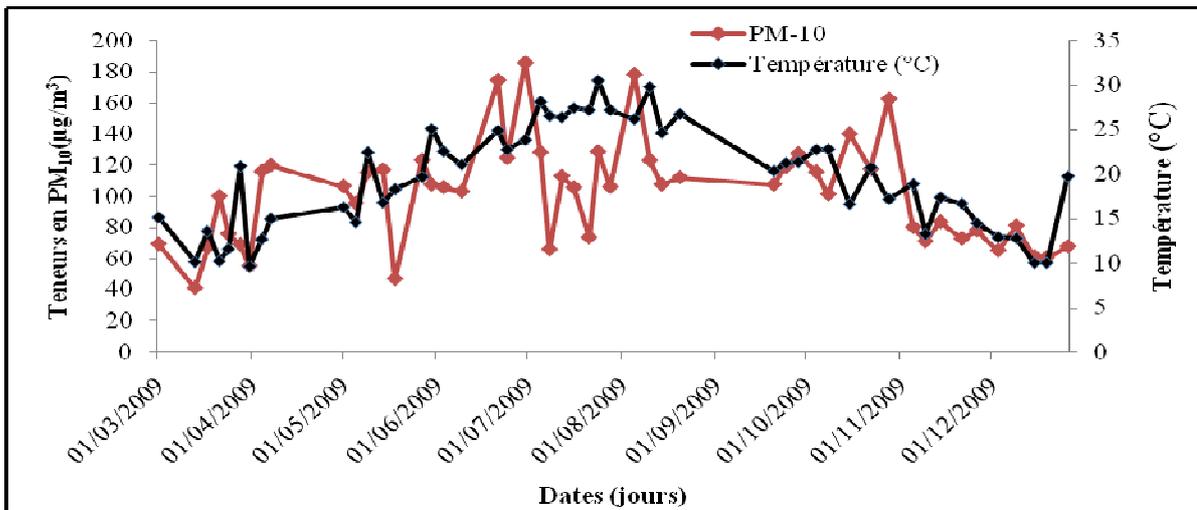
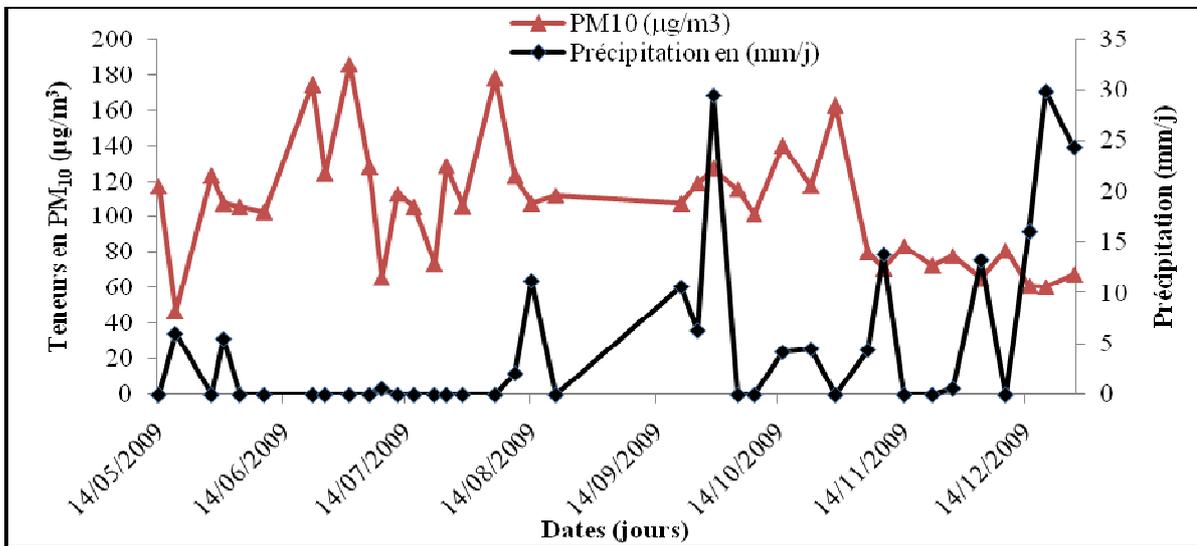
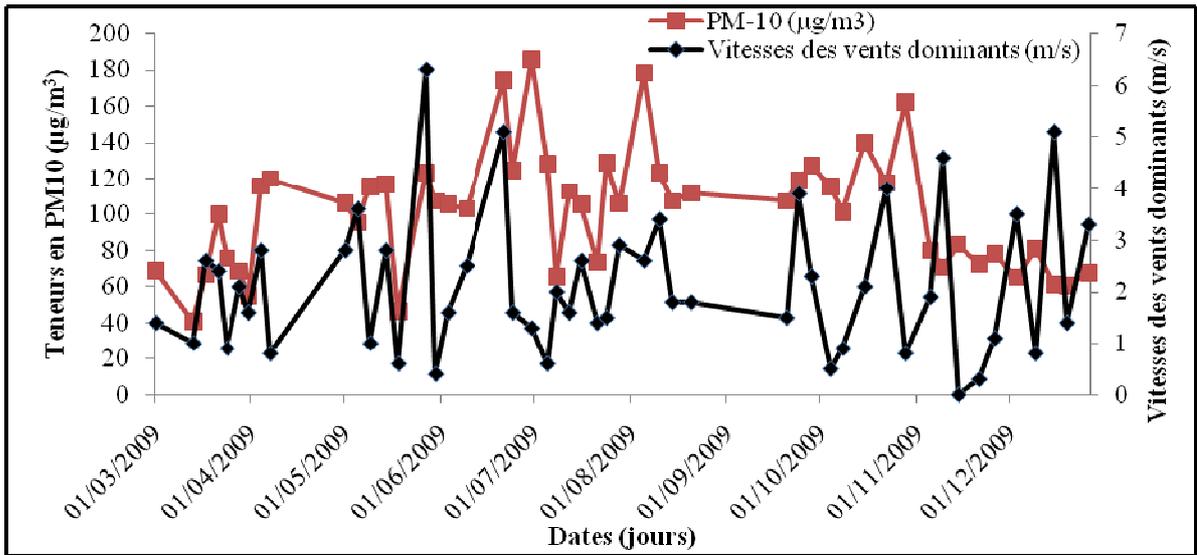


Figure V. 5 : Influence de la météorologie sur la pollution de l'air par les particules fines PM_{10} en site urbain à Bach-Djarrah, Alger.

Cette étude montre que les teneurs journalières les plus élevées en PM₁₀ enregistrées le 21 et le 30 juin, et 05 Août 2009, correspondent à une période qui se caractérisait par une stabilité de l'atmosphère, due :

- A l'absence de pluie, qui ne donne pas lieu au phénomène de lessivage de l'atmosphère,
- A des vitesses de vent faibles (moins de 2m/s), favorisant l'accumulation des particules dans l'atmosphère.
- Et à des températures estivales (28-32°C), qui favorisent la formation photochimique des particules secondaires.

Les teneurs les plus faibles apparaissent en mars-avril et novembre-décembre où le vent est moyen à fort favorisant la dispersion et l'entraînement des particules vers des sites éloignés. Les fréquents épisodes de pluies et les basses températures enregistrées durant cette période contribuent également à la réduction du niveau de pollution.

Cette comparaison avec les facteurs météorologiques nous amène à étudier l'influence des saisons sur les taux moyen de pollution par les PM₁₀. Le tableau V.2 représente les variations saisonnières des teneurs atmosphériques en particules.

Tableau V.2 : Valeurs moyennes et extrêmes des teneurs en PM₁₀ enregistrées sur les quatre saisons de l'année 2009 à Bach-Djerrah.

	Eté	Automne	Hiver	Printemps
Nombre de prélèvements	15	15	5	15
Maximum ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	185,6	162,4	69,4	174,4
Minimum ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	65	46,9	41,1	55,3
Moyenne ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	123,7	92,8	61,1	101,2
Ecart type ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	31,4	31,2	22,5	24,2

L'examen des variations saisonnières de 2009 montre, comme constaté plus haut, que les teneurs les plus élevées sont généralement observées en été, les teneurs les plus basses se manifestent en hiver. Le rapport des teneurs moyennes été/hiver est de l'ordre de 2. Les teneurs moyennes intermédiaires observées en automne et au printemps sont pratiquement du même ordre de grandeur.

Ainsi, c'est en été que les dépassements les plus importants et les plus fréquents des normes et seuils limites auront lieu.

La même évolution saisonnière est observée dans les deux études menées en sites urbains à Alger, plus exactement à Bab Ezzouar en 2005 [56], et à la Place de la Concorde (ex place 1^{er} Mai) durant l'année 2006 [57], ainsi que dans d'autres études réalisées au Pakistan durant la même période [61].

En Europe, on constate un comportement inverse en ce sens que c'est la moyenne hivernale en particules PM₁₀ qui est la plus élevée de l'année [62,63]. Ceci s'explique par le fait qu'en Europe, le chauffage au fioul pratiqué sur plusieurs mois et à grande échelle en hiver est une intense source de pollution par les particules. Ce qui est ne pas le cas dans notre pays où les températures hivernales sont plus douces et où la généralisation de l'utilisation du gaz naturel génère moins de pollution.

Par contre, en Algérie, les terrains nus, la longue saison de sécheresse, la resuspension et les travaux de construction génèrent particulièrement en été des niveaux de pollution plus élevés. A cela, vient s'ajouter les particules de nitrates et sulfates formées par la photochimie estivale à partir des polluants gazeux NO_x et SO₂.

A Bach-Djarrah, en plus de l'impact des facteurs météorologiques, un autre facteur a certainement joué un rôle important dans le taux de pollution observé en saison estivale. Il s'agit des travaux d'extension de la ligne de métro qui ont été entamés au mois de mai 2009 et qui se sont étalés sur plusieurs mois dans le voisinage de notre site de prélèvement. Ce sont les émissions de ces travaux qui ont fait que le rapport des teneurs été/hiver est très élevé.

V. 4 Etude des différentes classes granulométriques PM₁, PM_{1,5}, PM₃, PM₇ et PM₁₀

Le tableau V.3 donne pour la période d'étude, un aperçu sur les paramètres statistiques caractérisant l'évolution temporelle des teneurs dans l'air ambiant des différentes classes granulométriques PM_i et leur rapport massique correspondant. En figure V.6, nous illustrons La contribution, en pourcentage massique des différentes classes granulométriques à l'ensemble des particules PM₁₀ étudiées

A partir de ce tableau, on relève que les particules respirables PM₃ varient de 36,3 à 93,9 µg/m³ et atteignent un niveau moyen de 53,4 µg/m³. La teneur moyenne en particules très fines, les PM₁ est de 24,8 µg/m³.

Tableau V. 3 : Description statistiques des teneurs atmosphériques dans les différentes classes granulométriques de particules et rapports massiques.

Classe	Teneur moyenne	Ecart type	Médiane	P₉₅
PM₁ (µg/m³)	24,8	8,4	22,3	33
PM_{1,5} (µg/m³)	38,3	9,3	–	–
PM₃ (µg/m³)	53,4	14,7	47,7	74
PM₇ (µg/m³)	88,7	31,9	-	–
PM₁₀ (µg/m³)	102,3	33	105,8	162
PM₁₋₃ (µg/m³)	28,6	7	–	–
PM₃₋₁₀ (µg/m³)	48,8	18,6	–	–
PM₁/ PM₁₀	0,24	0,07	–	–
PM_{1,5}/ PM₁₀	0,37	0,06	–	–
PM₃/ PM₁₀	0,52	0,07	–	–
PM₇/ PM₁₀	0,86	0,03	–	–
PM₁₋₃/ PM₁₀	0,28	0,06	–	–
PM₁/ PM₃	0,46	0,10	–	–
PM_{1,5}/ PM₃	0,71	0,08	–	–
PM₁₋₃/ PM₃	0,53	0,04	–	–

L'étude de la répartition massique des différentes classes granulométriques montre que près de la moitié des PM₁₀ sont des particules alvéolaires (PM₃/PM₁₀ = 0,52), et près du quart des PM₁₀ sont des particules très fines (PM₁/PM₁₀ = 0,24) Tandis que la classe intermodale PM₁₋₃ ne représente que 28% des particules inhalables, et environ 53% des particules alvéolaires (Figure V.6). On observe en outre que la classe des particules très fines PM₁ constitue presque la moitié des particules respirables (PM₁/ PM₃ = 0,46).

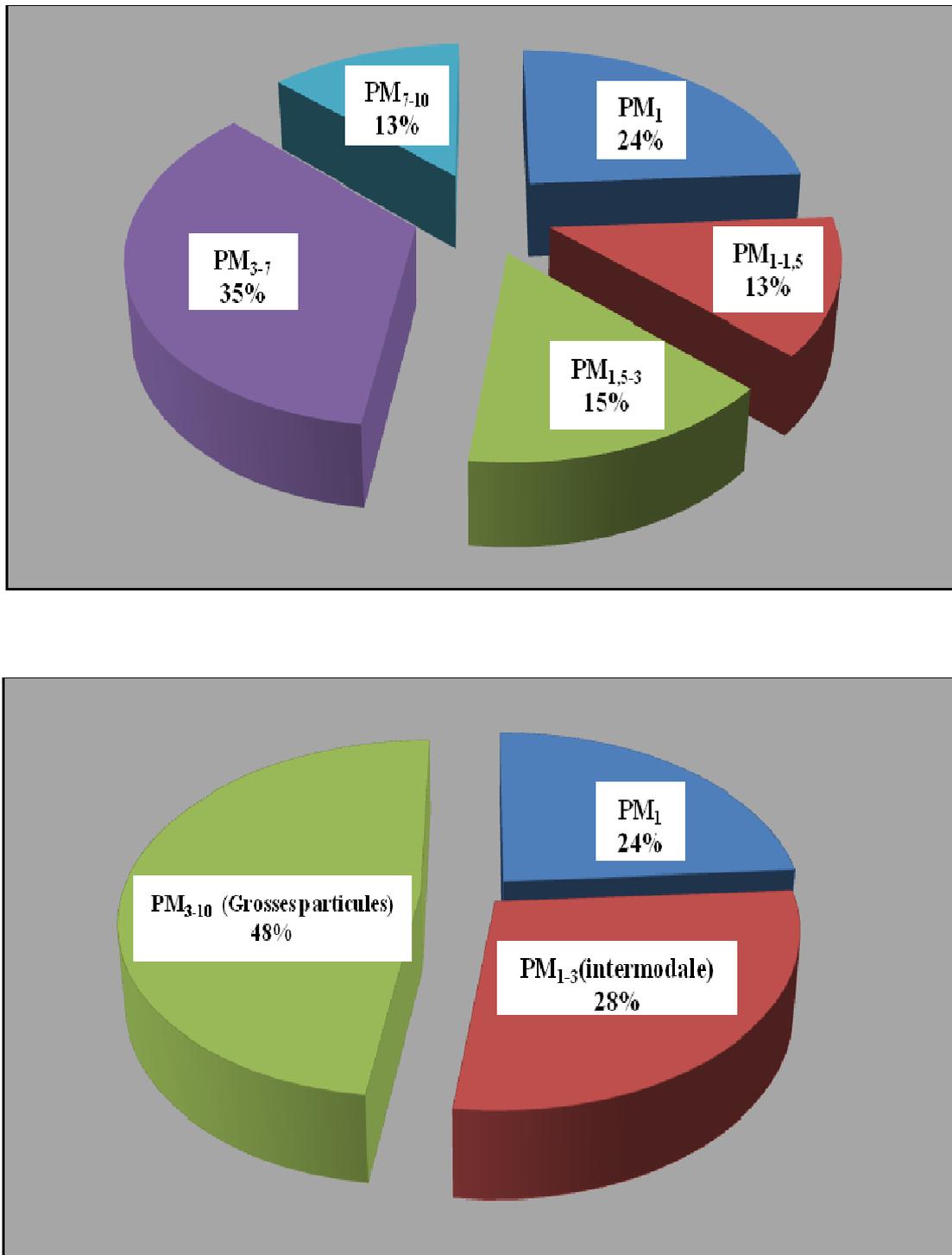


Figure V. 6 : Contribution massique (%) des différentes classes granulométriques dans la pollution particulaire étudiée.

Les ratios PM_1/PM_{10} et PM_3/PM_{10} mesurés dans cette étude, sont inférieurs à ceux calculés pour des sites urbains européens [62,64]. Ainsi, à Alger-Bach Djerrah, les PM_{10} sont moins riches en particules très fines. Ce constat met en évidence l'importance du facteur aménagement urbain (bitumage des routes, des trottoirs, couvert végétal, etc.) dans la réduction des émissions de quelques sources de particules. En comparaison avec les données des études effectuées en sites urbains à Bab Ezzouar en 2005 et la place du 1^{er} mai à Alger en 2006, on constate qu'à Bach-Djerrah, les PM_{10} sont légèrement moins riches en particules très fines et alvéolaires, ($PM_1/PM_{10} = 0,31$ pour le 1^{er} site, le même ratio est égale à 0,36 pour le deuxième site) et ($PM_3/PM_{10} = 0,50$ pour le 1^{er} site et 0,57 pour le second) [56,57]. En d'autres termes la contribution du trafic routier et de l'industrie émetteurs de particules très fines est ici moindre.

V. 5 Loi de distribution des classes conventionnelles PM_i

Dans le but de déterminer la tendance la plus représentative de l'évolution temporelle de la pollution particulaire au niveau de Bach-Djerrah, nous avons étudié les distributions des fréquences des teneurs journalières en particules fines. Ces distributions sont présentées pour les classes PM_1 , PM_3 et PM_{10} en figures V.7. En figure V. 8, nous présentons la loi de distribution obtenue.

Les teneurs journalières moyennes en PM_1 , PM_3 et PM_{10} , tendent respectivement vers les valeurs centrées $20 \mu g/m^3$, $40 \mu g/m^3$ et $100 \mu g/m^3$.

L'étude de la loi de distribution montre que nous sommes pratiquement en présence d'une distribution gaussienne des teneurs journalières des trois classes conventionnelles de particules. Les courbes théoriques et expérimentales (figure V.8) se recouvrent avec un très bon facteur de corrélation.

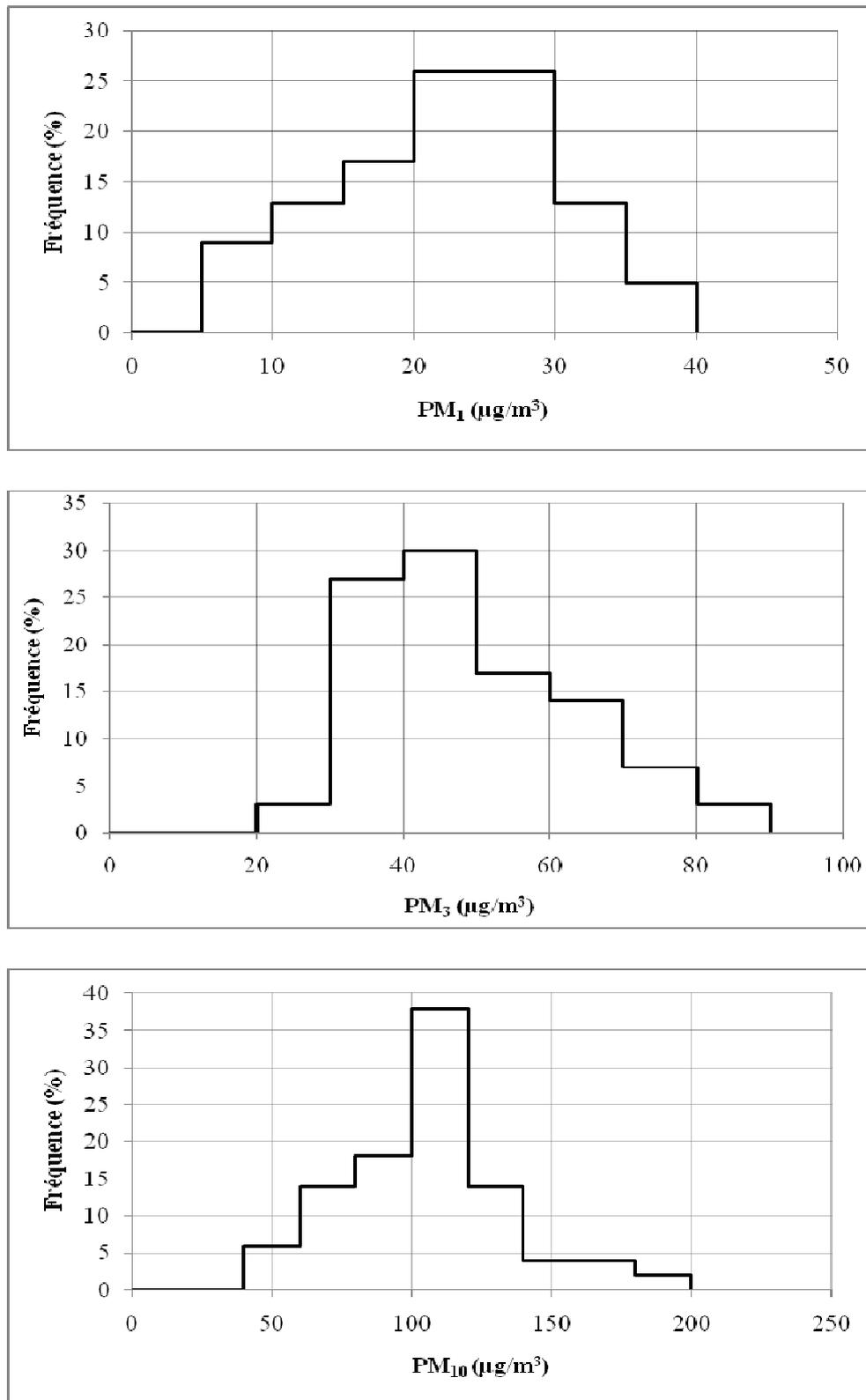
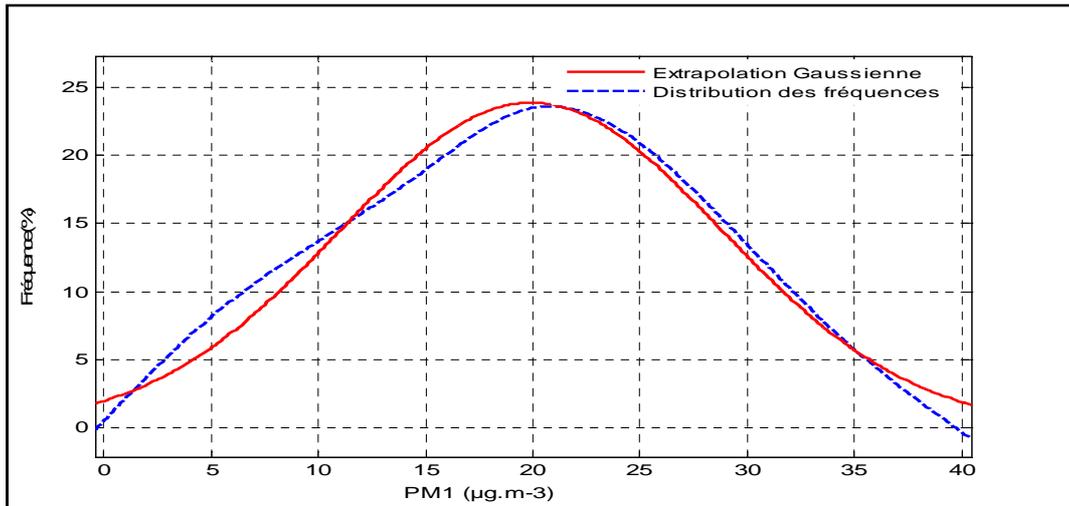
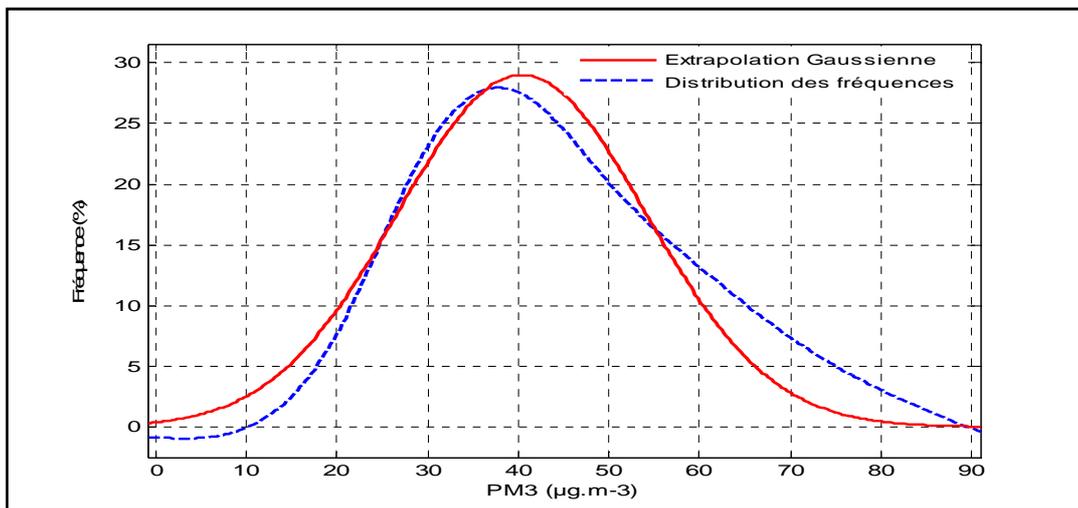


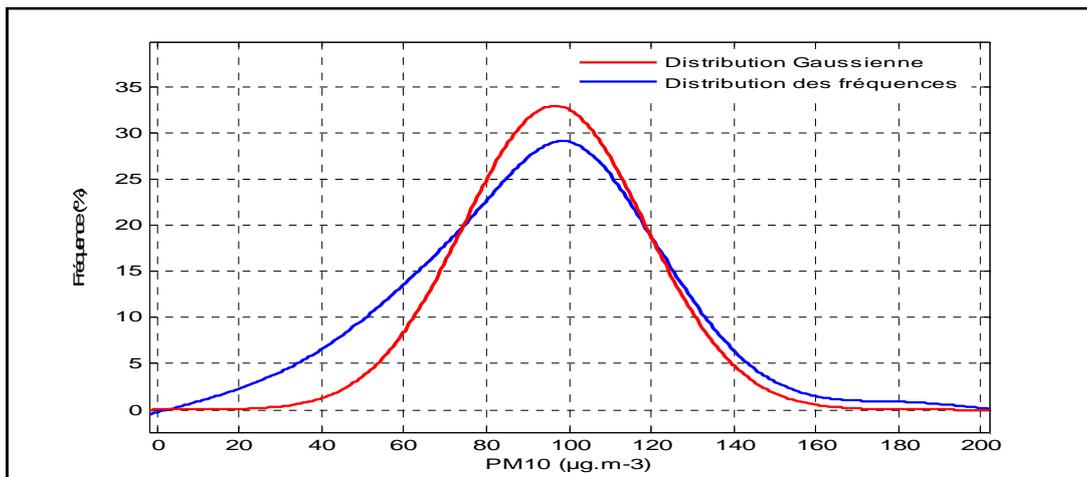
Figure V. 7 : Distribution des fréquences des teneurs en particules fines prélevées à Bach-Djerrah (Alger).



Coefficient de corrélation $R^2=0.94$



Coefficient de corrélation $R^2=0.97$



Coefficient de corrélation $R^2=0.90$

Figure V. 8 : Loi de distribution des teneurs en particules fines prélevées à Bach-Djerrah (Alger).

V. 6 Exploitation des résultats expérimentaux pour la détermination du diamètre médian des particules et de la classe PM_{2,5} :

La granulométrie des particules qui est indexée par un diamètre « équivalent » est un paramètre important dans la détermination des propriétés, des origines et des effets des particules fines sur la santé et sur l'environnement.

L'étude de la distribution granulométrique permet de déterminer certains paramètres et caractéristiques qui caractérisent les particules du site étudié [52].

A partir des données expérimentales, il est possible de déterminer :

- Le diamètre médian d_{50} de la masse médiane qui correspond au diamètre de la fraction granulométrique ayant 50% de la masse des PM₁₀. Ce diamètre est important dans la caractérisation des particules inhalables et permet parfois, par comparaison avec les données recueillies en divers sites de retrouver le type de source émettrice de particules.
- La teneur atmosphérique en particule respirables, les PM_{2,5}. Dans le cas de notre échantillonneur (HVS-PM₁₀), cette classe conventionnelle n'est pas accessible expérimentalement, puisque le cascadeur ne donne que la fraction PM₃ qui est naturellement très proche de la fraction PM_{2,5}. Cette fraction est importante à déterminer car elle permet d'effectuer des études comparatives et d'avoir exactement le niveau de la pollution qui atteint les sites alvéolaires du système respiratoire.

V. 6. 1. Détermination du diamètre médian « d_{50} »

La détermination du diamètre médian d_{50} peut se faire graphiquement en portant sur un diagramme log-probabilité le diamètre des particules (axe des ordonnées à échelle logarithmique) et le pourcentage de la masse cumulée des particules ayant un diamètre $\leq d_i$ (axe des abscisses à échelle probabilité). Cette représentation résulte de l'interprétation mathématique du fractionnement des particules par dimension. On montre, en effet que la densité de probabilité, est une distribution log-normale entre le diamètre des particules et la distribution de leur masse [52].

Le tableau V.4 résume les données des paramètres nécessaires pour la détermination du diamètre médian. Ces données sont obtenues en exploitant les résultats expérimentaux du fractionnement granulométrique. La figure V. 9 illustre le graphe log-probabilité (100 - masse cumulée en % en fonction du diamètre de l'étage) que nous avons ainsi obtenu.

Tableau V. 4 : Exploitation des données recueillies par fractionnement granulométrique.

Etage Andersen	Masse collectée par étage (mg)	Masse cumulée* (mg)	% massique cumulé	100-% massique	Diamètre de l'étage (μm)
1	21,5	21,5	13,3	86,7	7,00
2	55,8	77,3	47,9	52,3	3,00
3	24	101,3	62,3	37,7	1,50
4	21,3	122,6	75,8	24,2	1
5	39,2	161,8	100	0	0,01

(*) Masse des particules de diamètre supérieur au diamètre de l'étage.

Le diamètre aérodynamique moyen d_{50} tiré à partir de la droite du graphe s'élève à 2,6 μm .

En d'autres termes 50 % de la masse des particules PM_{10} ont un diamètre inférieur à 2,6 μm . Ce diamètre est caractéristique des particules urbaines mesurées en différents sites d'Alger. [56,57]. Dans plusieurs villes européennes, le d_{50} est en général en dessous de la valeur de 2 [52]. Ce résultat rejoint les conclusions tirées précédemment, c'est à dire qu'en milieu urbain en Algérie, les particules atmosphériques ne sont pas aussi enrichies en particules très fines comme c'est le cas en Europe. En effet en Europe, la forte industrialisation (Incinérateurs, etc.) et le fort taux de diésélisation du parc automobile (environ 50% du parc) sont à l'origine d'émissions particulièrement fines. A Alger par contre, le taux du parc diesel reste, d'après les dernières publications de l'Office National des Statistiques (ONS) inférieur à 35% et en l'absence de grandes installations industrielles, les émissions industrielles ne seraient pas importantes [65].

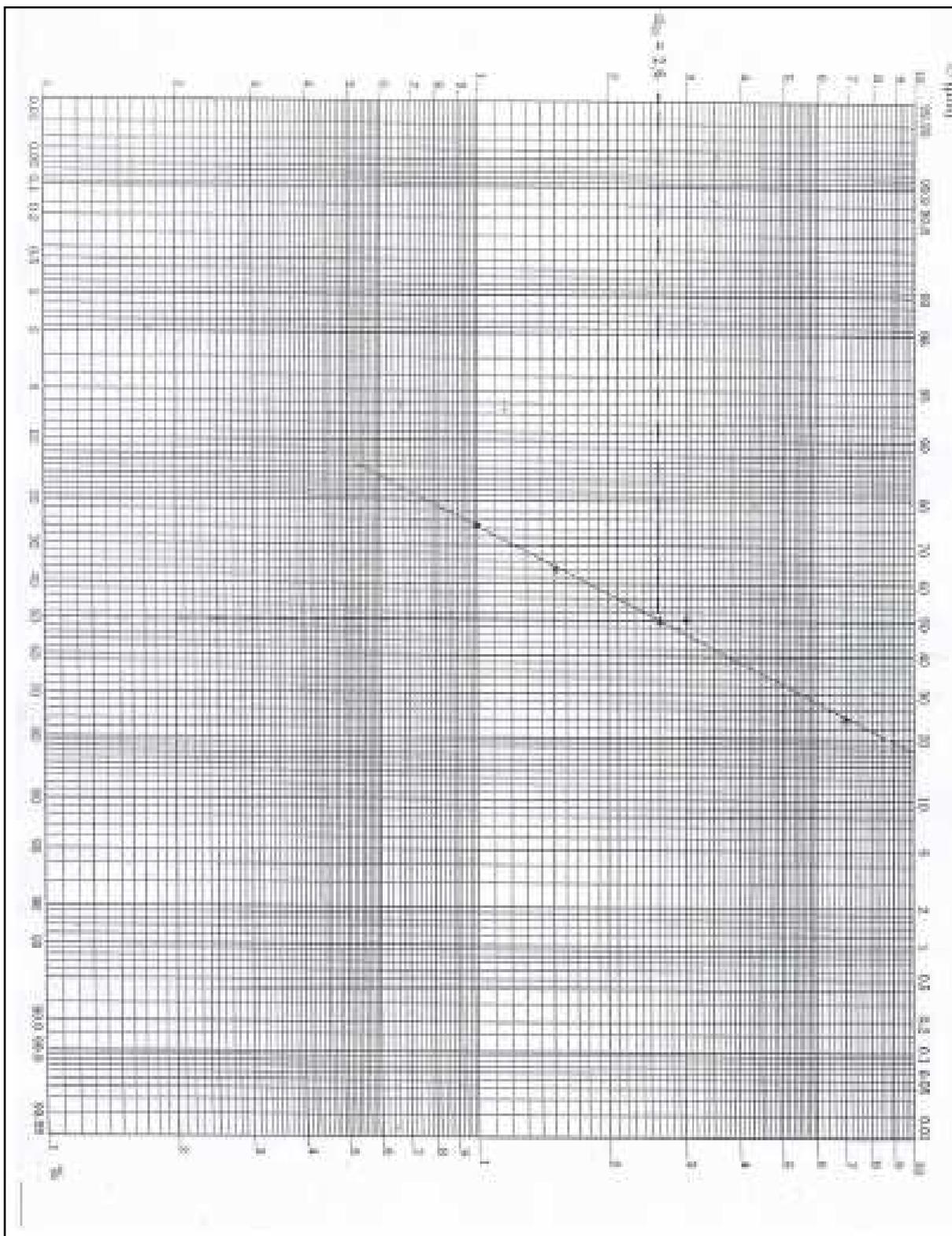


Figure V. 9 : Diagramme Log-probabilité des diamètres des particules en fonction des masses cumulées.

V. 6. 2. Détermination de la teneur atmosphérique en $PM_{2,5}$

A partir du diagramme log-probabilité de la figure V. 9, on obtient pour les $PM_{2,5}$ une teneur atmosphérique de $49.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, donc les $PM_{2,5}$ constituent 92.9% des PM_{3} .

Ainsi, l'erreur commise en assimilant les teneurs en PM_3 à celles des $PM_{2,5}$ n'est pas grande et il est de ce fait possible de considérer la fraction PM_3 comme étant représentative de la fraction de particules respirables.

Les niveaux de pollution atteints et les ratios entre les classes conventionnelles enregistrées durant la période d'étude sont donc (figure V.10):

$$PM_{10} = 102,3 \mu\text{g}/\text{m}^3;$$

$$PM_{2,5} = 49,6 \mu\text{g}/\text{m}^3;$$

$$PM_1 = 24,8 \mu\text{g}/\text{m}^3;$$

$$PM_1/PM_{10} = 24\%, \quad PM_{2,5}/PM_{10} = 48,5\%, \quad PM_1/PM_{2,5} = 50\%.$$

Ainsi 48,5% de particules atteignent les alvéoles pulmonaires et moins d'un tiers qui véhiculent les composés les plus toxiques (HAP, métaux lourds, nitrates,) se fixent de manière irréversible dans les alvéoles.

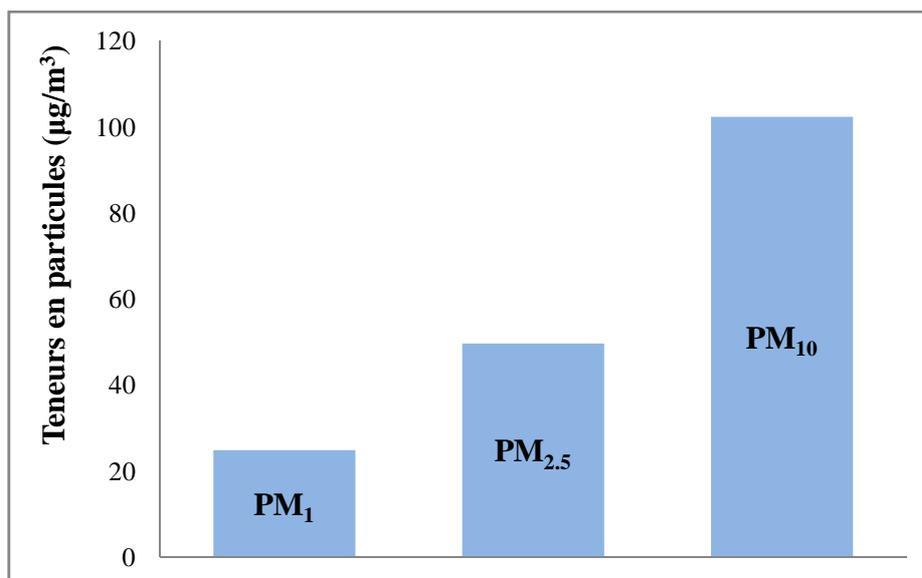


Figure V.10 : Teneurs moyennes des Trois classes granulométriques PM_1 , $PM_{2,5}$ et PM_{10} .

V. 6. 3 Détermination de la distribution modale des particules et de leur mode de formation

Les fines et les grosses particules sont différenciées par leur source d'émission et leur mode de formation qui influent aussi sur leur granulométrie. On peut accéder à des données intéressantes sur ces particules en étudiant leur distribution granulométrique.

Plusieurs études ont montré que les aérosols atmosphériques étudiés par classes granulométriques présentent une courbe de distribution bimodale, voire trimodale [52].

Le type de distribution au sein de notre site, apparaît lorsqu'on construit le graphe de la variation massique en fonction du diamètre des particules d_p , la fonction de distribution étant donnée par la relation:

$$\frac{dm}{d \log(d_p)} = f(d_p)$$

Avec :

Δm : la masse des particules retenues entre deux étages successifs de l'échantillonneur.

$$\Delta \log(d_p) = \log(d_p)_{\text{Etage } i+1} - \log(d_p)_{\text{Etage } i} \quad [52].$$

L'exploitation des résultats obtenus dans notre étude est résumée dans le tableau V.5.

Tableau V.5 : Calcul de la distribution modale des particules atmosphériques.

I	Classe (μm)	$\Delta \log(d_p)$	Δm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$\Delta m / \Delta \log(d_p)$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	7-10	0,36	13,59	37,75
2	3-7	0,85	35,3	41,52
3	1,5-3	0,69	15,1	22,02
4	1-1,5	0,41	13,5	32,92
5	0,01-1	4,61	24,8	5,37

A partir de ces données, on obtient le graphe de distribution illustré en figure V. 11. Il en résulte ainsi une courbe de distribution bimodale des particules fines étudiées à Bach-Djerrah. Ces deux modes sont situés dans l'intervalle 0.1-10 μm .



Figure V. 11 : Distribution bimodale des particules atmosphériques.

Le mode 1 qui regroupe les très fines particules respirables est centré autour de 1,6μm.

Le mode 2 se compose des particules moins fines de diamètre compris entre 3 et 10μm C'est vers 7,5 μm que ce mode est centré.

L'interprétation de ces résultats nous conduit à dire que la formation des particules, au sein de notre site d'échantillonnage, suit deux modes différents et ce suivant leur diamètre.

Le premier mode qui est centré autour de 1,6 μm, correspond aux particules issues essentiellement de la combustion et de la conversion de gaz en particules, les particules primaires ont pour origines les sources de combustion et les particules secondaires sont générées par condensation de substances chimiques volatiles [66].

Dans le deuxième mode la formation des grosses particules est générée souvent par des procédés mécaniques, ces particules contiennent généralement des embruns marins, des nitrates et des composés minéraux de l'écorce terrestre [66].

Ce type de distribution bimodale des particules est souvent rencontré en milieu urbain. Dans certains travaux qui ont étudiés un grand nombre de classes granulométriques, en particulier dans le domaine compris entre 0 et 1 μm, on aboutit à une distribution trimodale où le troisième mode apparaît vers 0,1 μm [52,67]. Il est clair que plus on dispose d'étages dans le cascadeur, plus on a de détails sur la distribution.

V. 7 Étude des corrélations entre les différentes classes granulométriques (PM₁, PM₁₋₃, PM₃, PM₃₋₁₀ et PM₁₀)

L'étude des corrélations entre les PM_i nous permettra de comprendre davantage l'origine et les mécanismes de formation des particules dans ce site urbain de Bach-Djerrah. Nous illustrons en figure V.12 les corrélations obtenues entre certains couples de PM_i. Les coefficients de corrélation qui en découlent sont donnés dans le tableau V.6

On constate qu'il existe de très bonnes à bonnes corrélations entre les PM₃₋₁₀/PM₁₀ ($R^2=0,908$) et les PM₁/PM₃ ($R^2=0,88$) et de faibles corrélations entre PM₁/PM₁₀ ($R^2=0,55$) et PM₃/PM₁₀ ($R^2=0,81$). Il en résulte que l'évolution temporelle des teneurs en PM₃₋₁₀ est étroitement liée à celle des teneurs en PM₁₀. Le même constat est valable dans le cas du couple PM₁/PM₃ ($R^2 = 0,88$). Ce résultat suggère que les particules très fines PM₁ et PM₃ ont les mêmes sources de pollution qui sont en générale les sources de combustion comme le trafic routier et les particules secondaires. On retrouve ici le fait qu'en moyenne 46% des PM₃ sont des PM₁. Ces particules présenteront aussi le même comportement dynamique. Dans le cas des fractions grossières PM₃₋₁₀ et PM₁₀, une partie importante est constituée de particules provenant de l'érosion des sols et qui de ce fait n'a pas de lien avec les émissions du trafic routier ou autres sources de combustion. En effet, il n'existe pas de corrélation entre les très fines PM₁ et les PM₁₀ (Figure V.12)

Tableau V. 6 : Coefficients de corrélations liant les différentes classes granulométriques.

R ²	PM ₁	PM ₁₋₃	PM ₃	PM ₃₋₁₀	PM ₁₀
PM ₁	1	0,664	0,880		0,553
PM ₁₋₃	0,664	1	0,802	0,728	0,709
PM ₃	0,880	0,802	1	0,750	0,812
PM ₃₋₁₀		0,728	0,750	1	0,908
PM ₁₀	0,553	0,709	0,812	0,908	1

En outre, on relève que la corrélation PM₃₋₁₀-PM₁₀ est meilleure que celles de PM₁-PM₁₀, PM₁₋₃-PM₁₀, et PM₃-PM₁₀. Ceci s'explique par le fait qu'une partie importante des PM₁₀ est constituée de particules grossières qui proviennent de l'érosion des sols et qui de ce fait n'a pas de lien avec les émissions de fines particules du trafic routier. Il est par ailleurs intéressant de noter que dans les particules respirables, la corrélation entre les PM₁ et PM₁₋₃ est faible ($R^2 = 0,66$), ce qui signifie que les PM₁ qui représentent surtout les très fines

« particules diesel » se distinguent des autres particules très fines comme les particules secondaires et autres particules industrielles qu'on retrouve globalement dans les PM₃. Ce résultat montre tout l'intérêt de l'étude de la classe PM₁.

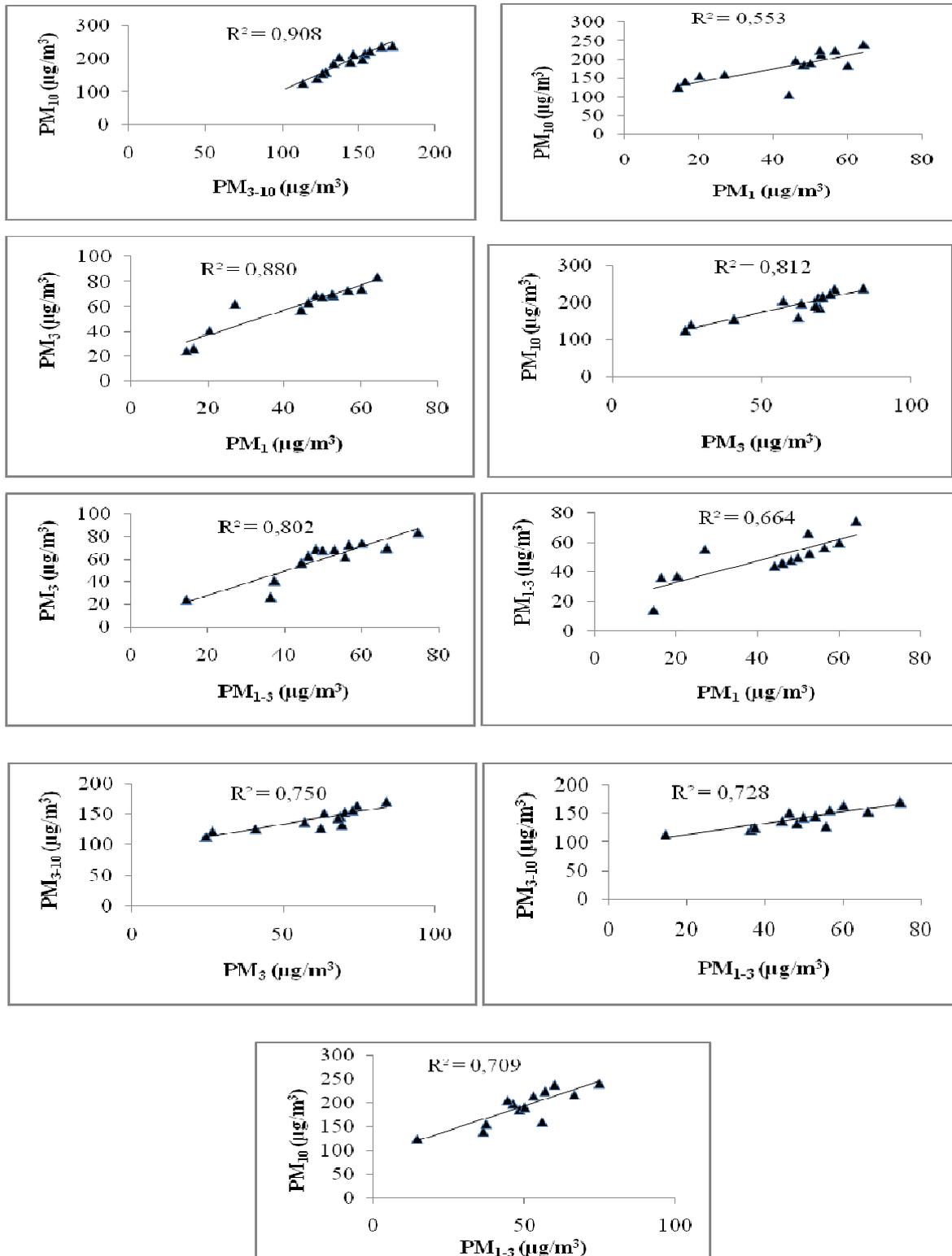


Figure V. 12 : Corrélations entre les différentes classes granulométriques.

V. 8 Ampleur de la pollution de l'air en particules fines au niveau du Bach-djerrah

Pour mieux évaluer l'ampleur de la pollution particulaire au niveau du site de Bach-djerrah, il est nécessaire de comparer les niveaux de pollution enregistrés aux exigences réglementaires nationales et internationales et aux teneurs enregistrées en d'autres sites et dans d'autres villes du monde.

V.8.1 Comparaison des niveaux de pollution mesurés aux normes nationales et internationales

Pour estimer l'ampleur de la pollution de l'air par les particules fines mesurée à Bach-Djerrah, il est utile de comparer les niveaux observés dans cette étude aux normes et valeurs guides internationales. En effet, si on veut adopter des mesures de restriction contre la pollution de l'air dans notre pays, il est souhaitable de se référer aux expériences des autres pays pionniers dans ce domaine.

La réglementation pour les PM_{10} est assez récente et n'existe que dans un certain nombre de pays, surtout les pays développés.

Actuellement pour les Etats membres de l'Union Européenne, l'émission de particules est réglementée par la « Directive 1999/30/CE du Conseil Européen de 22 avril 1999 qui fixe une limite journalière de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{10} , limite à ne pas dépasser plus de 7 jours par an, et à $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ la concentration limite annuelle (limites à respecter à partir de 2010) [68].

Il a notamment été décidé d'adopter, dès 2010, des seuils de référence pour la présence de particules $PM_{2,5}$ dans l'air ambiant. Ces mesures sont plus ambitieuses que celles de la nouvelle directive européenne relative à la qualité de l'air ambiant adoptée le 11 juin 2008 et applicable en juin 2010 [69].

Une réglementation similaire des émissions de particules selon leur taille existe aussi aux Etats-Unis. Depuis les premières réglementations (1971) qui concernait la totalité des particules (TSP) – « total suspended particulate », les standards sont de plus en plus focalisés sur des particules plus petites. Ainsi, les dernières réglementations imposent la réduction de $PM_{2,5}$ de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (standards établis en juillet 1997) à $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (21 septembre 2006, [EPA, 2006]) [70]. Notons que l'Organisation Mondiale de la Santé recommande un seuil annuel de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et un seuil journalier de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [71]. Tandis

que la France devrait dans le cadre de la loi issue du Grenelle de l'environnement fixer un objectif de qualité de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [69].

En Algérie, en adoptant le décret exécutif n° 06-02 du 7 janvier 2006 qui définit des valeurs limites pour les particules fines, le législateur utilise le terme vague de particules fines en suspension sans préciser s'il s'agit des particules totales en suspension (TSP de diamètre $< 30\mu\text{m}$) ou de PM_{10} . Dans ce décret on retrouve un objectif de qualité de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et une valeur limite de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle [72].

L'insuffisance des normes algériennes reste apparente dans :

- La non spécification de la classe granulométrique à laquelle ces valeurs se réfèrent (PM_{10} ou particules en suspension).
- L'absence de valeur limite concernant la fraction des particules respirables $\text{PM}_{2,5}$.
- Les valeurs désignées ne sont pas clarifiées si elles sont des limites annuelles ou journalières.

Le tableau V.7 donne les différentes normes relatives aux concentrations moyennes annuelles ou journalières des PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$.

Tableau V.7 : Normes et valeurs guides régissant les PM₁₀ et les PM_{2,5}.

Pays	PM ₁₀	PM _{2,5}	Réf.
Union Européenne -jusqu'a 2010	50µg/m ³ limite journalière à ne pas dépasser plus de 20 fois par an. 30µg/m ³ moyenne annuelle.	25µg/m ³ moyenne annuelle.	[68]
- à partir de 2010	50 µg/m ³ limite journalière à ne pas dépasser plus de 7 fois par an. 20 µg/m ³ moyenne annuelle.	10µg/m ³ moyenne annuelle. 25µg/m ³ moyenne sur 24h.	
Etats-Unis d'Amérique	50 µg/m ³ moyenne annuelle. 150 µg/m ³ moyenne sur 24h.	15µg/m ³ moyenne annuelle. 35µg/m ³ moyenne sur 24h.	[70]
OMS	20 µg/m ³ moyenne annuelle. 50 µg/m ³ moyenne sur 24h.	10µg/m ³ moyenne annuelle. 25µg/m ³ moyenne sur 24h.	[71]
Suisse	50 µg/m ³ moyenne sur 24h.	20 µg/m ³ moyenne annuelle.	[73]
Japon	100 µg/m ³ moyenne sur 24h.		[74]
Suède	100 P ₉₈ de moyennes sur 24h.		[74]
Californie	20 µg/m ³ moyenne annuelle. 50 µg/m ³ moyenne sur 24h.	12 µg/m ³ moyenne annuelle.	[70]
France		15 µg/m ³ objectif de qualité.	[42]
Algérie	80 µg/m ³ moyenne annuelle. 50 µg/m ³ objectif de qualité.		[72]

La figure V. 13 retrace graphiquement l'évolution temporelle des teneurs atmosphériques en PM_{10} et comparaison par rapport aux normes.

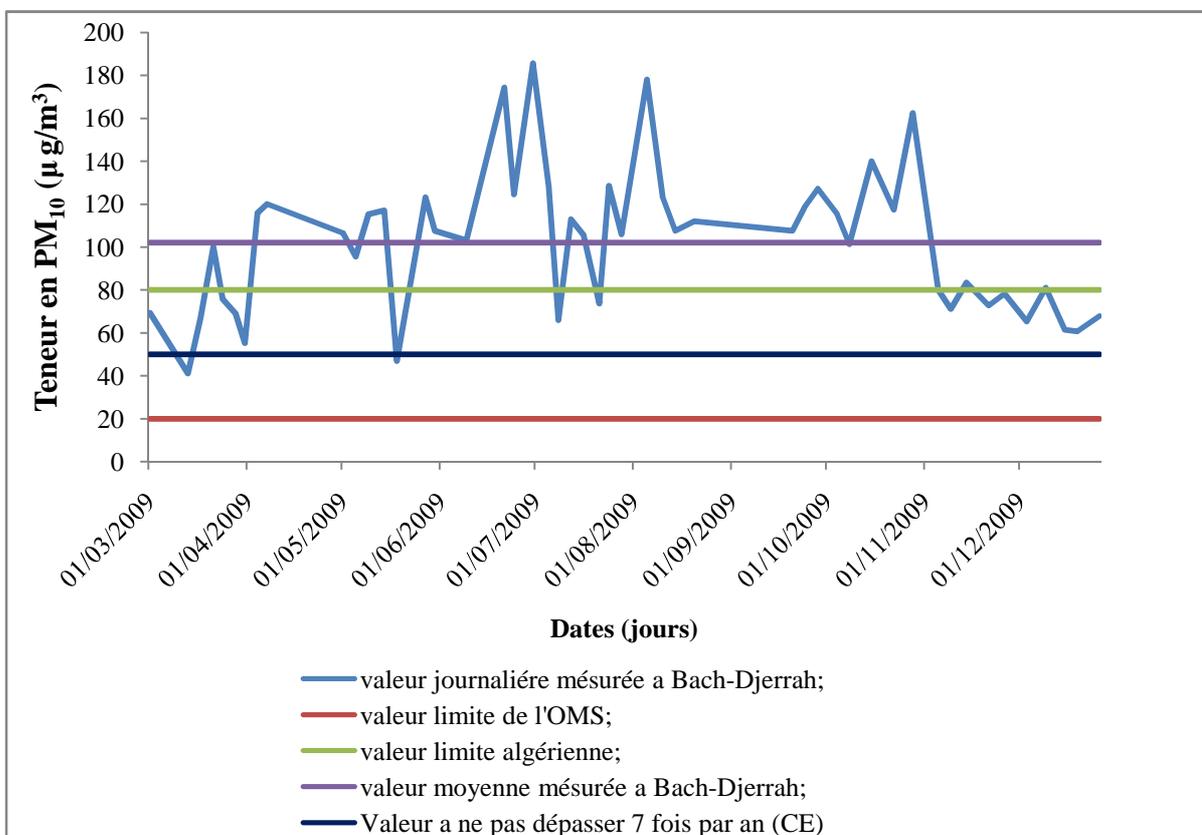


Figure V. 13 : Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en PM_{10} et comparaison par rapport aux normes.

La teneur moyenne en PM_{10} enregistrée dans cette étude dépasse largement les valeurs limites annuelles pour la protection de la santé humaine ($30 \mu g/m^3$ pour 2010) établies dans le cadre de la Directive Européenne 1999/30/CE pour la qualité de l'air ambiant. En plus, 49 valeurs sur les 50 mesurées, dépassent la limite journalière ($50 \mu g/m^3$) à ne pas dépasser plus de 7 fois par an, fixée par l'Union Européenne. En outre, 34 valeurs, soit 68%, des jours étudiés sont supérieures à la valeur limite fixée par la réglementation algérienne ($80 \mu g/m^3$) qui est vraiment très souple.

Les recommandations de l'OMS sont largement dépassées. La moyenne annuelle à Bach-Djerrah est cinq fois plus élevée que celle fixée par cette instance internationale.

La même situation prévaut pour les particules fines $PM_{2,5}$ où tous les seuils-limites sont largement dépassés. Cette comparaison montre ainsi clairement que les quartiers urbains de Bach-Djerrah font l'objet d'une très intense pollution par les particules et ce quelque soit la classe granulométrique considérée.

V.8. 2 La pollution particulaire à Bach-Djerrah comparée à quelques sites algérois et étrangers

Pour avoir un aperçu global sur l'évolution spatiale des taux de pollution par les particules à dans l'agglomération d'Alger, il est utile de comparer nos résultats avec ceux obtenus en d'autres sites d'Alger.

Le tableau V. 8 présente une comparaison intersites (urbain, trafic ou semi-urbain) des teneurs moyennes en PM_{10} , $PM_{2,5}$, et PM_1 mesurées à Alger.

Tableau V. 8 : Comparaison des teneurs en PM_i mesurées dans divers sites d'Alger.

Sites à Alger	Période	PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$PM_{2,5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM_1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Réf
ENP, (proximité)	2001	84,1	-	-	[75]
ENP, (proximité)	2003	75,2	36,1	25,9	[76]
Bab-Ezzouar, (urbain)	2005	70,4	30,3	22,0	[56]
Place 1 ^{er} mai, (urbain)	2006	64,1	28,1	15,1	[57]
DelyBrahim,(semi urbain)	2007	27,0	17,1	14,8	[77]
Bouzareah, (semi urbain)	2008	33,5	-	10,2	[78]
Bach-Djerrah, (urbain) Présente étude	2009	102,3	49,6	24,8	

Cette étude comparative montre que : La pollution par les PM_{10} enregistrée dans cette étude à Bach-Djerrah dépasse de manière significative celle mesurée dans les autres sites urbains (Bab Ezzouar et la place 1^{er} Mai), et même le site de type station trafic. Elle est environ trois fois supérieure à celle rencontrée en sites semi urbains d'Alger. Cette inquiétante pollution s'explique par la dégradation du cadre de vie dans les cités de Bach-Djerrah : les trottoirs empoussiérés, terrain nus, absence de végétation et naturellement de permanents embouteillages du trafic routier. Le moindre vent entraîne la mise en resuspension de particules issues du trafic routier et des émissions naturelles. Il y a aussi certainement l'apport des poussières provenant grands chantiers et travaux d'aménagement (particulièrement les travaux de métro d'Alger) qui ont coïncidé avec nos prélèvements. Il

reste aussi à vérifier si les émissions de l'usine des pneus Michelin ont une incidence sur ce taux de pollution.

Dans le tableau V. 9, sont rapportées les teneurs atmosphériques en PM₁₀, PM_{2,5} et PM₁ relevées dans certaines villes du monde.

Tableau V.9: Comparaison des teneurs en PM_i mesurées dans certains sites urbain étrangers.

Site	Période	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2,5} (µg/m ³)	PM ₁ (µg/m ³)	Réf.
Tito Scalo (Italie)	2006-2007	-	-	8	[79]
Rio de Janeiro (Brésil)	2008	169	-	-	[80]
Calkutta (Inde)	2007	480	-	-	[80]
Denver.CO.USA	2004	36	-	-	[80]
Lahore (Pakistan)	2007	174	-	-	[80]
Islamabad (Pakistan)	2005-2006	168	-	-	[81]
Cartagena (Espagne)	2000	84,4	-	-	[81]
Beyrouth (Liban)	2004-2005	84	31	-	[82]
Kyoto (Japon)	2003	23,2	-	-	[83]
Kwun Tong (Hong Kong)	2000-2001	73,11	57,4	-	[84]
Lausanne (Suisse)	2003	27	-	-	[73]
Le Caire (Egypte)	Eté 2002	142	48	-	[85]
Pékin (Chine)	2005	200	-	-	[86]
Québec (Canada)	2005	9	-	-	[87]
Marketa Domasova (Czechestan)	2003	78	-	-	[80]
Paris (France)	2000-2001	18.6	-	-	[88]
Alger (Bach-Djerrah)	2009	102,3	49,6	24,8	
Présente étude					

Cette comparaison montre que par rapport aux villes des pays développés (Europe de l'Ouest, Canada, Etats Unis, Japon....), Alger accuse, en site urbain, des niveaux de pollution très élevés en particules inhalables PM_{10} , alvéolaires $PM_{2,5}$ et très fines PM_1 . Les pays émergents (Chine, Egypte, Pakistan, Inde...) où, pour diverses raisons, les aspects environnementaux ne sont pas toujours prioritaires et où les normes sont inexistantes ou non respectées, enregistrent comme Alger des teneurs très élevées en particules. Les particules grossières sont plus importantes dans nos villes où l'absence de bitumage et de balayage des rues, la nudité des sols et l'aridité favorisent l'abrasion et l'érosion des sols et la resuspension des poussières.

Ainsi le taux de pollution par les particules fines à Bach-Djerrah est inquiétant et risque de créer des nuisances auprès de la population résidente.

V.9 Etude de quelques métaux lourds associés aux particules atmosphériques

V. 9. 1 Niveaux de pollution par les métaux lourds

Dans le cadre de la caractérisation chimique des particules fines, nous avons déterminé les fractions de certains métaux lourds associés aux différentes classes granulométriques de particules prélevées au niveau de Bach-Djerrah. Cette étude a pour objectif la spécification des sources émettrices de pollution dans notre site et ceci à travers les corrélations existantes entre les teneurs des différents métaux d'une part et d'autre par la distribution massique de ces différents métaux dans chacune des fractions des particules. En fonction des contraintes liées aux moyens d'analyses disponibles, nous avons étudié seulement les métaux lourds suivants (Fe, Pb et Cu), véhiculés par les différentes classes granulométriques des particules prélevées durant la période mars-juin 2009 et qui a porté sur 20 prélèvements journaliers, soit 29 fractions granulométriques.

Les figures V.14, V.15 et V.16 représentent l'évolution des teneurs atmosphériques mesurées pour chaque métal dans les fractions PM_1 , PM_3 , PM_{10} .

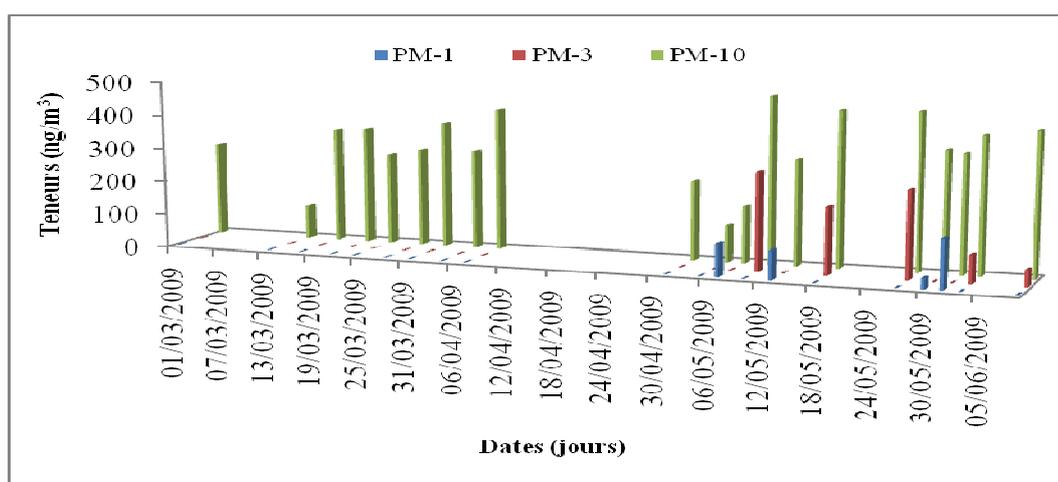


Figure V. 14 : Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en Fer associé aux différentes classes granulométriques de particules.

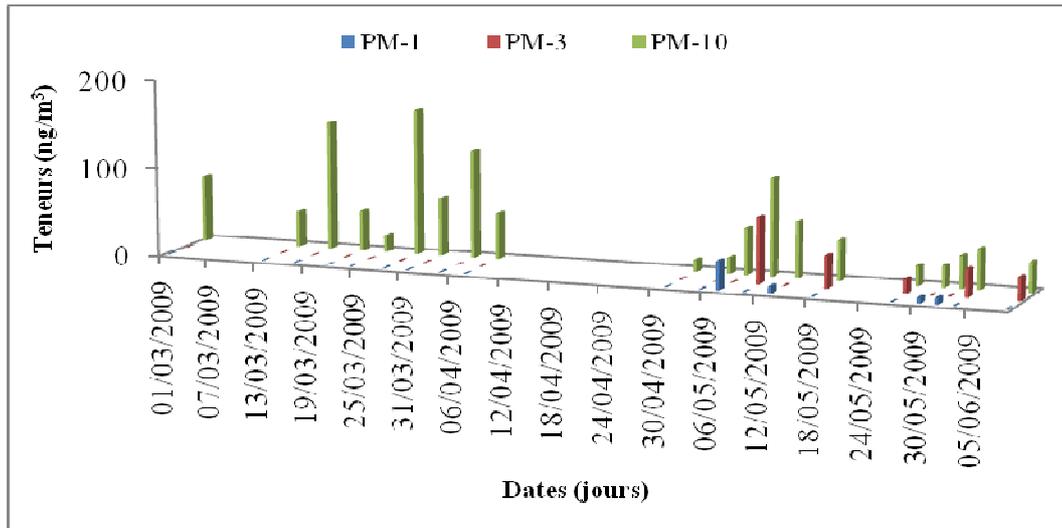


Figure V. 15 : Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en Plomb associé aux différentes classes granulométriques de particules.

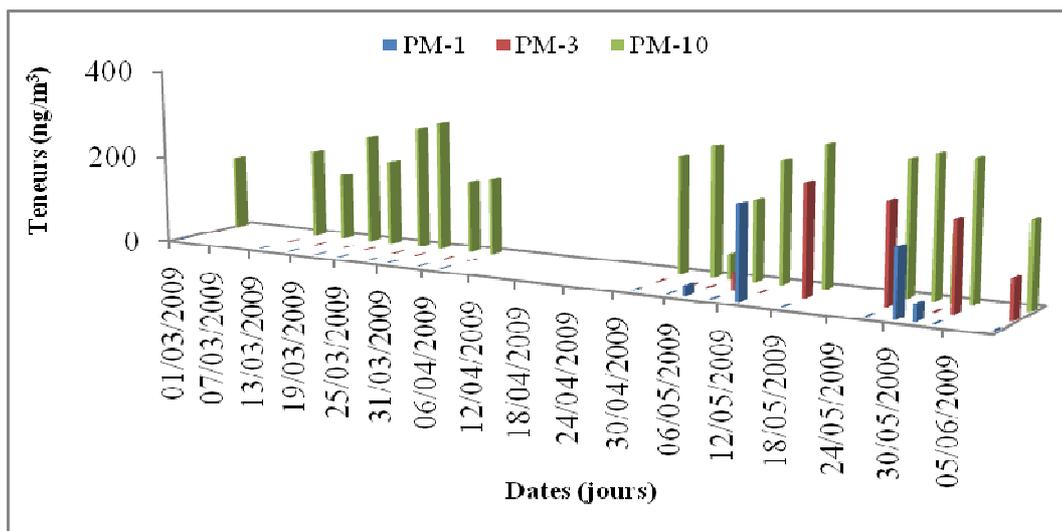


Figure V. 16 : Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en Cuivre associé aux différentes classes granulométriques de particules.

On constate que dans leur évolution les teneurs subissent des fluctuations dues à plusieurs facteurs tels que la nature et l'ampleur des émissions et la météorologie.

Le tableau V.10 résume les teneurs atmosphériques et les principaux paramètres statistiques des métaux lourds étudiés.

Les fractions massiques sont résumées en tableau V.10. Les figures V.17, V.18 et V.19 représentent les teneurs moyennes des différents métaux selon les classes granulométriques de particules.

Tableau V.10 : Teneurs atmosphériques et principaux paramètres statistiques des métaux lourds étudiés

Elément	Classe	Moyenne (ng/m ³)	Ecart type	Médian (ng/m ³)	P ₉₅ * (ng/m ³)	Max (ng/m ³)	Min (ng/m ³)
Pb	PM ₁	13,2	9	12	16	22	6
	PM ₃	19,8	10,8	17	15,8	34,3	11
	PM ₁₀	25,5	21,6	24	21,8	64	12
Fe	PM ₁	87,7	54	83,4	94,9	142,8	31
	PM ₃	173,0	145	166,9	194	286,3	81,3
	PM ₁₀	392,4	295	383	455,3	493,8	99,3
Cu	PM ₁	100,7	57	92,8	143	201,5	21,4
	PM ₃	152,4	134	149,6	188	237,3	37,3
	PM ₁₀	201,7	184,9	198,4	298	303,7	54,8

Les résultats montrent que selon leur abondance dans les différentes classes granulométriques des particules, les teneurs des métaux étudiés suivent cette ordre : Fe > Pb > Cu. Avec une teneur moyenne dans les PM₁₀ de 392,4 ng/m³, le fer est, parmi les éléments étudiés, l'élément le plus abondant. Il est suivi par le cuivre qui atteint un niveau moyen de 201,5 ng/m³.

Tableau V. 11 : Teneurs atmosphériques en métaux lourds et fractions massiques correspondant

Elément	Teneurs des métaux lourds (ng/m ³) et fractions massiques correspondantes en %		
	PM ₁	PM ₃	PM ₁₀
Cu	100,75	152,40	201,70
	0,28%	0,34%	0,21%
Fe	87,75	173,00	392,40
	0,24%	0,39%	0,42%
Pb	13,51	19,86	25,47
	0,04%	0,07%	0,06%

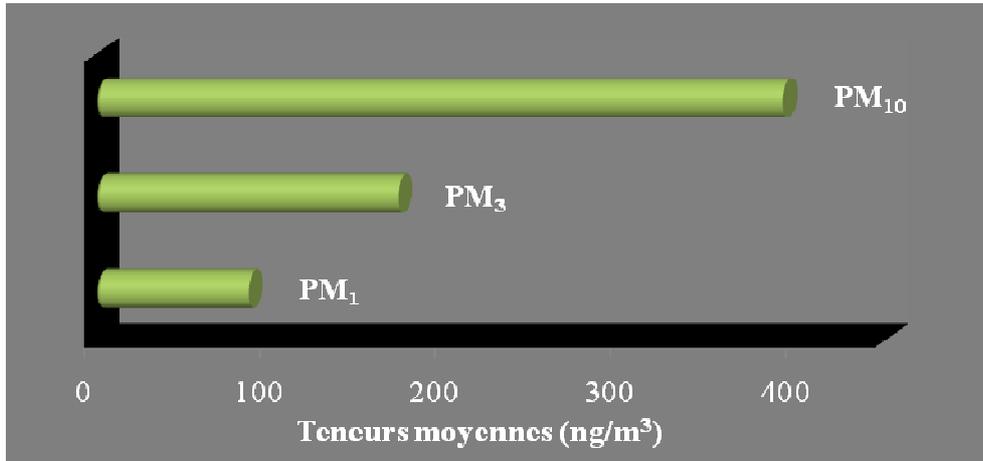


Figure V. 17 : Teneurs moyennes du Fer dans les PM_i

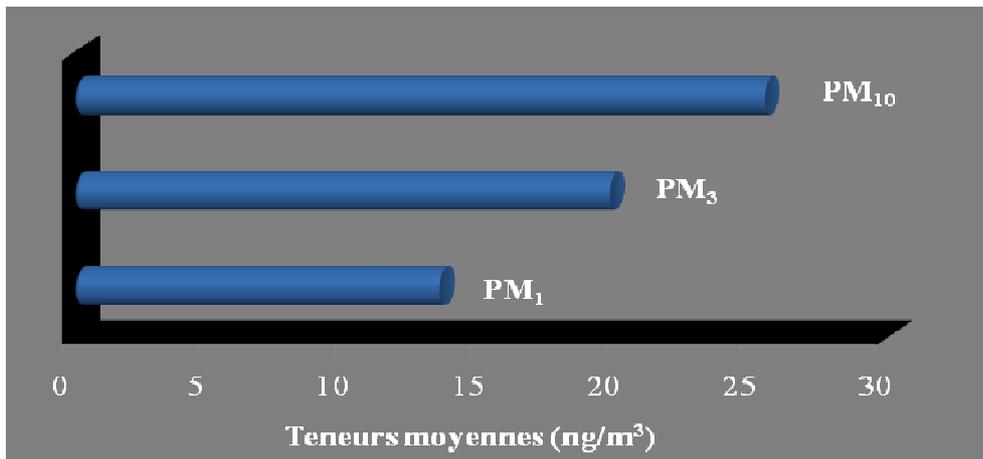


Figure V. 18 : Teneurs moyennes du Plomb dans les PM_i.

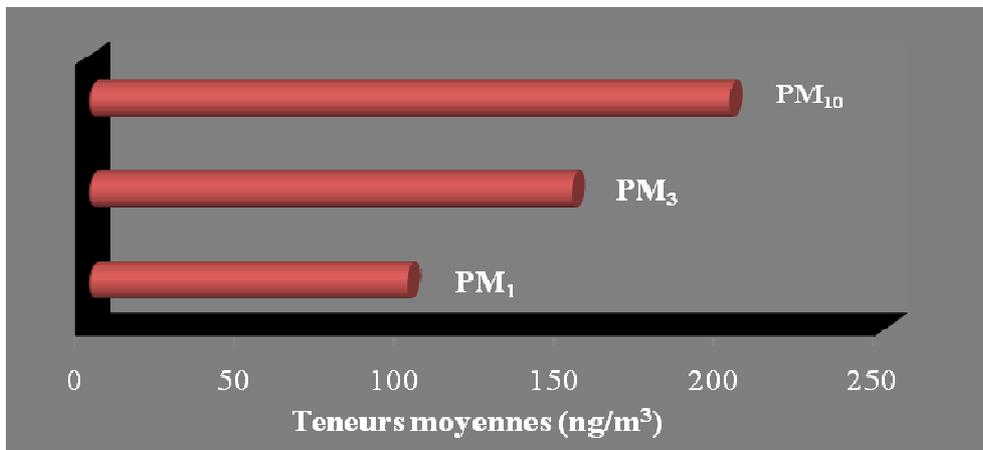


Figure V. 19 : Teneurs moyennes du Cuivre dans les PM_i.

On relève que le fer présente présente la plus forte contribution massique aux particules, elle est de l'ordre de 0,42% dans les PM_{10} , celle du plomb n'est que de 0,06.

Comme le site de mesure est assez éloigné des grands axes routiers, la pollution plombée n'est pas excessive. Les taux de pollution atteints par le fer et le cuivre restent à un niveau acceptable et sont caractéristiques d'un milieu urbain peu industrialisé.

La pollution par le fer et à un moindre degré celle du cuivre provient majoritairement des émissions naturelles (érosion du sol), des chantiers de construction ainsi que des petites PME de la région. En ce site, l'influence du trafic routier est assez réduite.

La figure V. 20 illustre les distributions massiques du Pb, du Cu et du Fe sur les différentes classes granulométriques des particules.

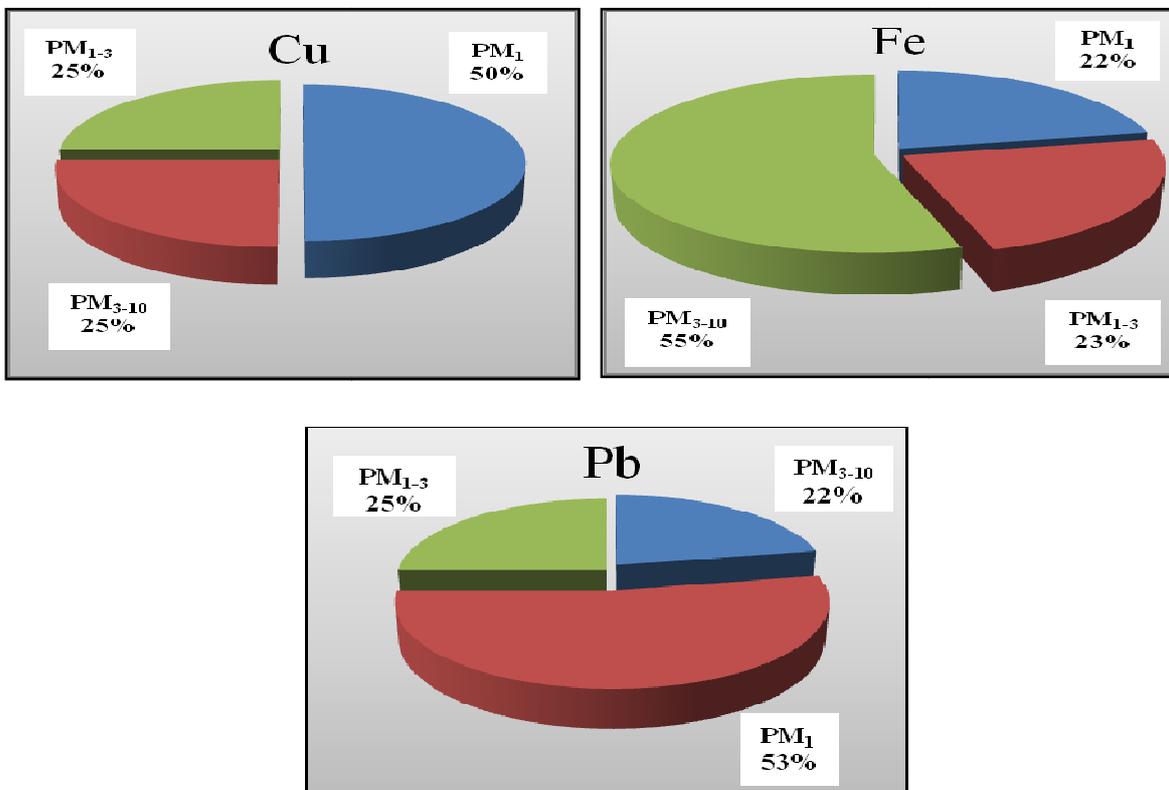


Figure V. 20 : distribution des métaux lourds sur les différentes classes granulométriques.

Cette figure montre que 53 % et 50 % respectivement des masses globales de Pb et du Cu sont contenus dans les très fines particules PM_1 . Le potentiel de nuisances de cette classe de particules est ainsi accentué par l'accumulation en son sein de ces métaux lourds toxiques. Rappelons que cette fraction de particules peut se retrouver dans les profondeurs des appareils respiratoires des personnes exposées.

Les moins fines particules (classe PM_{3-10}) contiennent 55 % de fer global. Ceci signifie que le fer qui est principalement d'origine terrestre se retrouve le plus dans les grosses particules.

Les fractions massiques moyennes de métaux lourds véhiculés par les particules atmosphériques PM_i sont illustrées en figure V. 21.

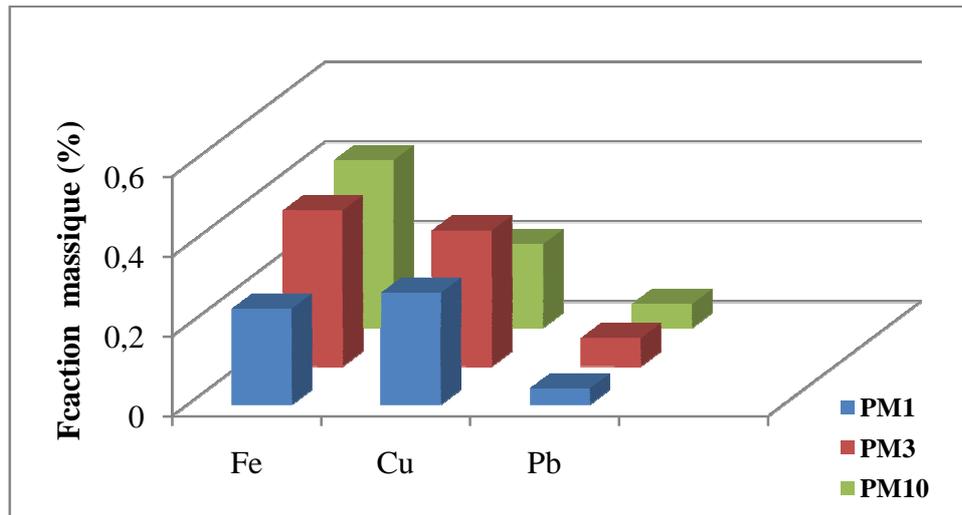


Figure V. 21: Fractions massiques moyennes par classe granulométrique des différents métaux lourds.

L'examen de ces distributions massiques montre que les métaux lourds étudiés se répartissent de manière différente sur les fractions de particules. La fraction massique du fer augmente en passant des PM_1 aux PM_{10} . Ce qui montre que ce métal enrichit la fraction des grosses particules qui englobe les particules de l'écorce terrestre et des matériaux de construction.

Le plomb et le cuivre quant à eux lui diminue en passant des PM_3 aux PM_{10} . Ayant une granulométrie plus fine, ils sont plus enrichis dans les particules très fines (PM_1 et PM_3) que dans les PM_{10} .

Il en résulte aussi, que quelque soit la fraction étudiée, la contribution des trois métaux lourds étudiés à la composition des particules reste inférieure à 0,5 % en masse. En ce site urbain, les métaux lourds sont moins abondants qu'en site de proximité où l'ensemble des métaux lourds étudiés constituait environ 1,3 % de la masse des particules [2].

V.9 .2 Comparaison du niveau de pollution par les métaux lourds avec quelques sites d'Alger et villes étrangères

La comparaison des teneurs en métaux lourds étudiés à Bach-Djerrah avec celles enregistrées dans d'autres sites à Alger ainsi que différentes villes du monde est résumé en tableau V.12.

Tableau V. 12 : Comparaison des teneurs en éléments traces métalliques contenus dans les classes conventionnelles (PM₁₀, PM_{2,5} et PM₁) relevées à Bach-Djerrah avec celles mesurées à Alger et dans d'autres villes du monde.

Site	Période	PM ₁₀ (ng/m ³)			PM _{2,5} (ng/m ³)			PM ₁ (ng/m ³)			Réf
		Fe	Pb	Cu	Fe	Pb	Cu	Fe	Pb	Cu	
Lahore (Pakistan)	2007 2008	8200	4400	73	1700	3600	45	-	-	-	[80]
Rio de Janeiro (Brésil)	2008	-	15,9	-	-	-	-	-	-	-	[80]
Calcutta (Inde)	2007	-	40,4	-	-	-	-	-	-	-	[81]
Denver, CO (USA)	2004	-	5,8	-	-	-	-	-	-	-	[80]
Tito Scalo (Italie)	2006	-	-	-	-	-	-	115	12	4	[79]
Islamabad (Pakistan)	2005/2006	2685	108	184	-	-	-	-	-	-	[80]
Qingdao (Chine)	2007	2801	161	26	-	-	-	-	-	-	[80]
Won Ju City (Corée du Sud)	2002	1970	150	470	-	-	-	-	-	-	[80]
Madrid (Espagne)	2003	-	160	50	-	-	-	-	-	-	[80]
Cartagena (Espagne)	2000	-	255	32	-	-	-	-	-	-	[80]
Chillan (Chili)	2004	2110	20	180	-	-	-	-	-	-	[80]
Bursa (Turquie)	2003	22395	66	457	-	-	-	-	-	-	[80]
Al Hashimya (Jordanie)	2005	1623	89	21	-	-	-	-	-	-	[80]
Finokalia (Grèce)	2003	-	-	-	-	-	-	80	10	1	[79]
Bab Ezzouar (Alger)	2005	136	98	87	80	65	57	47	39	30	[56]
Place 1 ^{er} mai (Alger)	2002	199,4	220,3	108	102	181	78	47,6	110,6	31,2	[57]
Bach-Djerrah (Alger)	2009	392,4	62,3	201	-	-	-	87,7	13,2	100,7	

Cette comparaison des teneurs en métaux lourds étudiés à Bach-Djerrah avec celles enregistrées dans d'autres villes du monde, montre qu'à Alger la pollution par les métaux lourds n'est pas alarmante. Dans les pays où l'utilisation de l'essence plombée est bannie, les teneurs en plomb sont naturellement très faibles par rapport à celles mesurées en Algérie.

Certaines villes de pays émergents (Chine, Pakistan, Turquie, Iran, ...) présentent une pollution métallique plus importante qu'à Alger.

La comparaison inter-sites en milieu urbain à Alger, montre que Bach-Djerrah accuse les teneurs les plus élevées en fer et en cuivre. Les teneurs en plomb sont similaires à ceux prélevées à Bab-Ezzouar. Ainsi l'impact du trafic routier est équivalent en ces sites urbains, mais l'impact de la pollution naturelle et éventuellement la source industrielle y est plus grand à Bach-Djerrah.

Cette comparaison montre ainsi que l'ampleur de la pollution est fonction de la nature du site, sa topographie et son aménagement urbain. A Bach-Djerrah les rues sont très poussiéreuses et cela se reflète sur les niveaux des PM_{10} , du fer et du cuivre.

En ce site, la pollution par le plomb n'est pas importante, elle reste inférieure à la nouvelle norme européenne de 200 ng/m^3 et largement inférieure à celle préconisée par l'OMS qui s'élève à 500 ng/m^3 [89].

V. 8. 3. Corrélation entre les différents couples de métaux lourds

Dans cette partie, nous essayons d'évaluer les corrélations entre d'une part, la teneur en métaux lourds et celle en PM_{10} , et d'autre part les teneurs de certains couples de métaux lourds et ceci pour la classe des PM_{10} (pour les autres classes granulométriques, nous n'avons pas un grand nombre d'analyse pour faire une étude des corrélations).

Les corrélations obtenues sont présentées en figure N° V.22

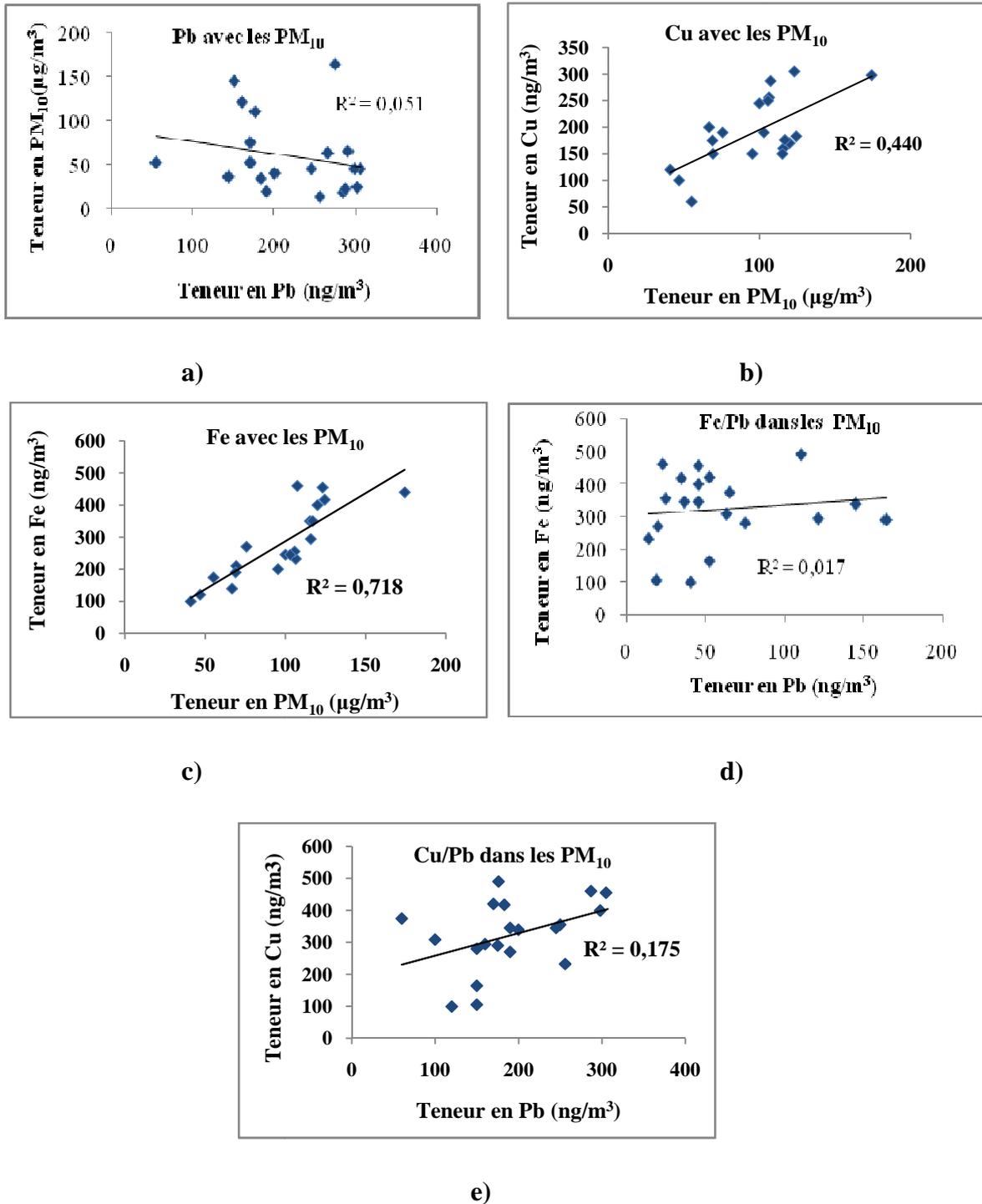


Figure V. 22 : Corrélation linéaire entre les teneurs de métaux lourds dans les PM_{10} .

Il en résulte que le plomb qui se trouve plus dans les particules alvéolaires et très fines (PM_3 et PM_1) ne présente pas de corrélation avec les particules PM_{10} ($R^2 = 0,051$). En d'autres termes, des teneurs élevées en PM_{10} n'impliquent pas automatiquement des teneurs élevées en plomb. Ainsi, si on considère qu'en Algérie le plomb est un bon indicateur de la pollution automobile, on peut en déduire que les fortes teneurs en PM_{10}

mesurées en ce site certaines journées, ne sont pas dues à une intensification du trafic routier, mais à d'autres sources de pollution. A l'inverse du plomb, le fer présente une bonne corrélation avec les PM_{10} ($R^2 = 0,718$) ce qui confirme que le fer appartient aux particules grossières qui sont d'origine naturelle. En ce qui concerne le cuivre, et comme il apparaît aussi bien dans les fines particules que dans les grossières, sa corrélation avec les PM_{10} ($R^2 = 0,44$) est bonne que dans le cas du fer.

La corrélation Fe/Pb dans les PM_{10} (figure V.22 d) montre, que le fer ne suit pas l'évolution du plomb. Ce résultat rejoint les constats faits dans les paragraphes précédents selon lesquels, le fer qui provient majoritairement de l'écorce terrestre est plus enrichi dans les PM_{10} , le plomb par contre est plus enrichi dans les PM_3 et les PM_1 , il est essentiellement d'origine anthropogénique. Le cuivre se retrouve dans les différentes fractions granulométriques, il est donc d'origine mixte (anthropogénique et naturelle) et comme, il n'est pas lié aux émissions du trafic routier, sa corrélation avec le plomb est très faible (figure V.22 e)

V. 9. 4 Résultats de l'analyse des métaux lourds par EDX

Dans l'objectif de donner une caractérisation chimique plus globale des particules prélevées au niveau de Bach-Djerrah, nous avons procédé à l'analyse de nos échantillons par le système de microanalyse EDX (analyse par dispersion d'énergie de photons X) de quatre échantillons des deux classes granulométriques PM_{10} et PM_3 .

Les figures V.23 à V.26 illustrent les spectres EDX des différentes classes granulométriques analysées.

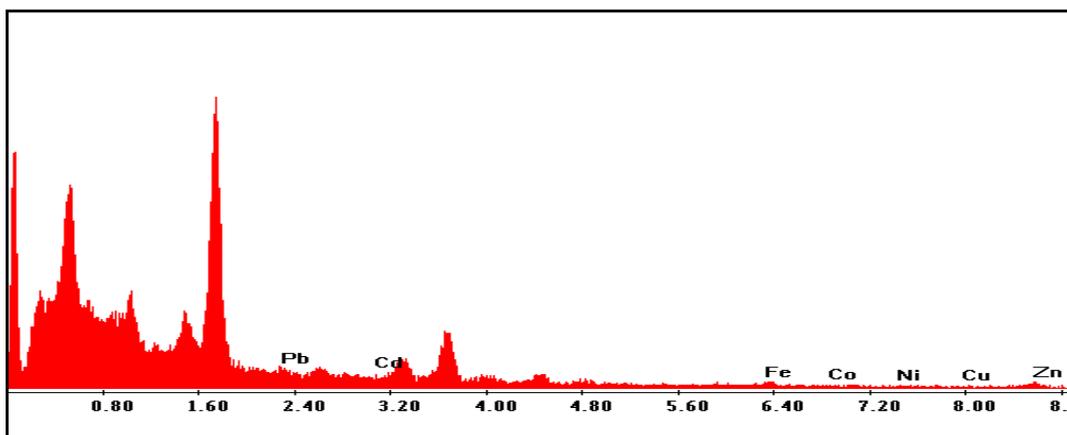


Figure V. 23 : Spectre EDX des PM_{10} prélevées le 04/04/2009.

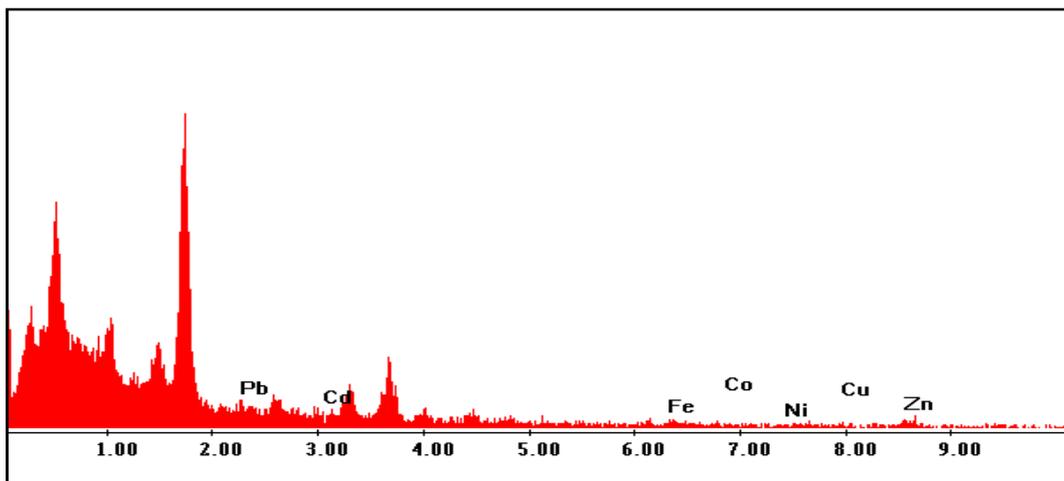


Figure V. 24 : Spectre EDX des PM₁₀ prélevées le 21/04/2009.

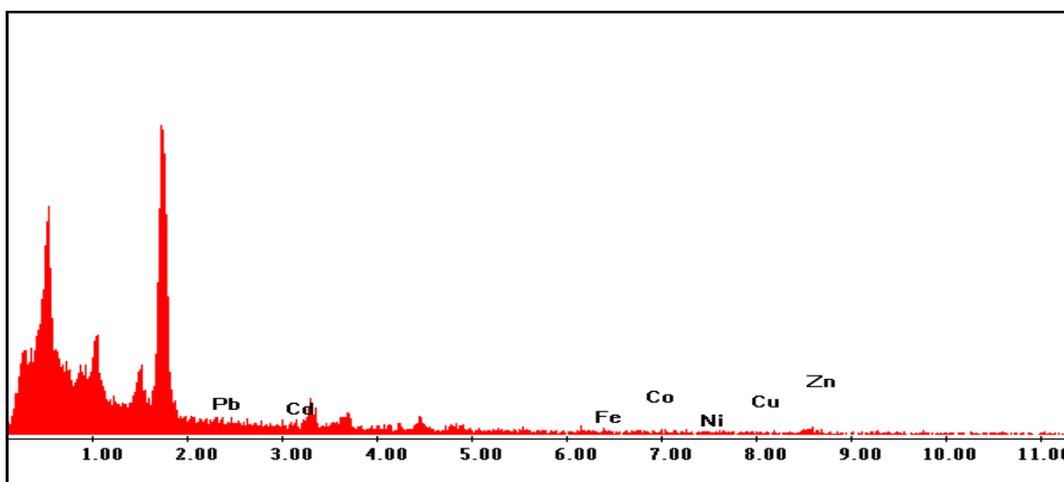


Figure V. 25 : Spectre EDX des PM₃ prélevées le 14/08/2009.

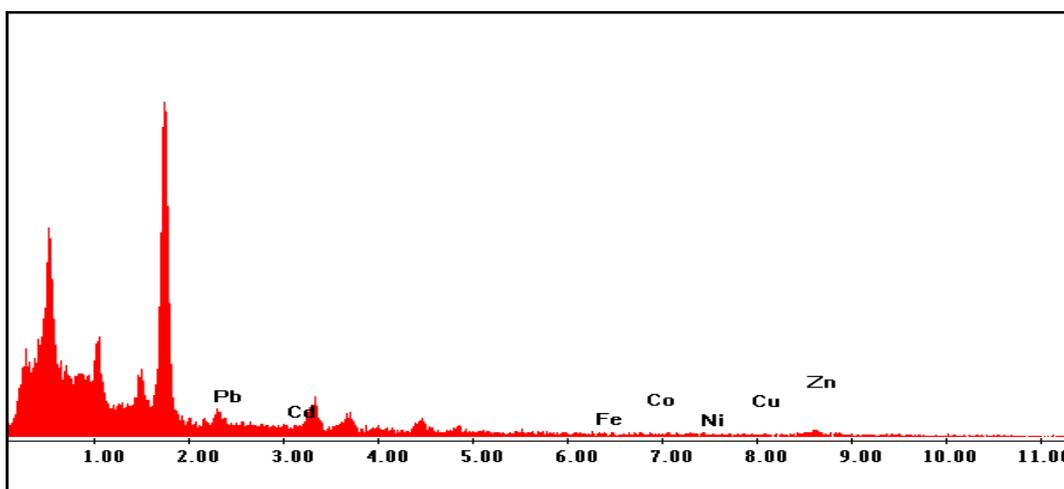


Figure V. 26 : Spectre EDX des PM₁₀ prélevées le 28/07/2009.

L'Analyse EDX a détecté la présence de sept métaux: Fe, Ni, Cu, Zn, Co, Cd et Pb

Qui apparaissent aussi bien dans les échantillons des particules respirables (PM₃) que dans les particules inhalables (PM₁₀).

Les trois métaux lourds analysés par la SAA (Fe, Cu et Pb) ont été aussi détectés par analyse EDX. Il est intéressant de noter que l'analyse EDX a détecté le cadmium qui d'habitude, en raison de ces faibles teneurs, n'était pas accessible par la SAA. L'EDX est ainsi, comme signalé souvent en bibliographie, une bonne méthode pour l'analyse de traces dans les particules atmosphériques.

Il reste que des études complémentaires sont nécessaires pour pouvoir réaliser une étude quantitative.

Conclusion

CONCLUSION

La qualité de l'air est aujourd'hui reconnue comme étant un enjeu de santé publique tant au niveau international qu'en Algérie. Elle est en effet suspectée de jouer un rôle significatif dans l'accroissement de diverses pathologies chroniques et d'allergies respiratoires. Parmi les nombreux polluants surveillés, les particules fines font l'objet de toutes les attentions.

Dans ce contexte, la présente étude avait pour objectif principal, la caractérisation de la pollution atmosphérique par les particules fines PM_{10} et ses fractions, au niveau d'un site urbain de la ville d'Alger (commune de Bach-Djerrah), l'estimation du niveau de cette pollution, l'identification de certains facteurs qui l'influent notamment la météorologie et enfin à l'évaluation de taux des métaux lourds (Pb, Fe et Cu) existants dans les différentes fractions granulométriques de ces particules.

L'ensemble des résultats obtenus permet de formuler les conclusions suivantes :

Les teneurs atmosphériques en PM_{10} , $PM_{2,5}$ et PM_1 , qui s'élèvent respectivement à **102,3** , **49,6** et **24,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** sont excessives comparativement aux normes (nationales et internationales) et aux valeurs trouvées dans d'autres études. Toutes les recommandations internationales sont constamment et largement dépassées et si rien n'est fait, les objectifs de qualité de l'air ne seront jamais atteints.

Cette pollution par les particules se caractérise par une fraction élevée de particules fines. Les PM_1 , $PM_{2,5}$ constituent respectivement environ 24 et 48,5% des PM_{10} .

L'évolution fluctuante des niveaux journaliers et saisonniers, dépendent souvent aussi bien des variations dans les activités humaines que de l'influence des facteurs météorologiques. Dans ce contexte on montre que c'est la saison d'été qui accuse les taux de pollution les plus élevés.

La distribution massique des particules selon leur granulométrie est **bimodale**, c'est-à-dire qu'elle présente deux maxima : l'un est centré vers $7,5 \mu\text{m}$ et correspond principalement aux particules primaires issues de la resuspension des poussières et des sources naturelles. L'autre est centré sur $1,6 \mu\text{m}$ et correspond aux particules secondaires (condensation des gaz) et aux particules primaires issues des processus de combustion (trafic routier).

L'étude des métaux lourds Pb, Fe et Cu associés aux différentes classes granulométriques a montré, que les particules atmosphériques ne véhiculent pas une forte pollution par les métaux lourds. Le plomb et le fer sont émis par des sources différentes. Le plomb est surtout enrichi dans les particules très fines, alors que le fer appartient plus aux particules grossières.

Le plomb, avec une moyenne de 25,5 ng/m³, n'atteint pas des niveaux excessifs et reste en deçà des normes.

Ainsi, ce site urbain subit en plus de l'influence des émissions du trafic routier qui n'est pas dense, d'autres émissions industrielles et naturelles. Ces émissions proviennent non seulement des grands axes routiers de la ville mais aussi certainement des chantiers et travaux en cours dans la commune de Bach-Djerrah.

L'étude montre que la nudité et le non revêtement des sols, l'absence de lavage des rues et la présence de chantiers non protégés du vent sont à l'origine d'une forte exposition de la population à la pollution par les fines particules.

Pour diminuer la concentration des particules dans l'air, on conseille de :

- Contrôler régulièrement les émissions industrielles.
- Encourager la bicarburant Essence / GPL ou GNC.
- Multiplier les campagnes de plantation d'arbres et d'aménagement des espaces verts afin de réduire les aires nues et donc la pollution par érosion éolienne.

Enfin les citoyens sont appelés à s'informer sur les risques sanitaires auxquels ils s'exposent quotidiennement et faire ressentir les implications de l'ampleur de ce type de pollution, afin de préserver la qualité de l'air dans tout les milieux.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. Boutahar, S. Lacour, V. Mallet, D. Quélo, Y. Roustan et B. Sportisse, « Development and validation of a fully modular platform for numerical modelling of air pollution », *POLAIR. Int. J. Environment and Pollution*, 22(1/2), (17-28), 2004.
- [2] R. Delmas, G. Mégie, V. H. Peuch, « Physique et chimie de l'atmosphère », Edition Belin, Paris, 2005.
- [3] C. Ségala, D. Poizeau, M. Mesbah, S. Willems, M. Maidenberg, « Winter air pollution and infant bronchiolitis in Paris », *Environmental Research* 106, (96–100), 2008.
- [4] M. A. Gomez, « Reducing urban and natural risks in Mexico City », *Managing Natural Disasters and the Environment*, pp. 56-57. World Bank. Washington DC, 2007.
- [5] U. Lohmann, et J. Feichter, « Global indirect aerosol effects » a review. *Atmos. Chem. Phys* 5, (715-737), 2005.
- [6] M. Boughedaoui, « Étude des émissions polluantes issues du trafic routier en Algérie », Thèse de Doctorat d'Etat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2008.
- [7] R. Kerbachi, N. Oucher, A. Bitouche, N. Berkouki, B. Demri, M. Boughedaoui et R. Joumard, « Pollution par les particules fines dans l'agglomération d'Alger ». Colloque International « Pollution de l'air et transport dans des contextes différents », Ghardaïa, 15 au 17 février 2009.
- [8] U.S.EPA, « Air quality Criteria for Particulate Matter », United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, 2004.
- [9] J. Gao, T. Wang, X. Zhou, W. Wu, W. Wang, « Measurement of aerosol number size distributions in the Yangtze River delta in China: Formation and growth of particles under polluted conditions », *Atmospheric Environment* 43, (5829–836), 2009.
- [10] M. Brauer, C. Avila-Casado, T. Fortoul, S. Vedal, B. Stevens, et A. Churg, « Air pollution and retained particles in the lung », *Environmental Health Perspectives*, 109(10) , (1039-1043), 2001.
- [11] Y.S. Chung, S.H. Kim, J.H. Moon, Y.J. Kim, J.M. Lim, J. H. Lee, « Source identification and long-term monitoring of airborne particulate matter (PM2.5/PM10) in an urban region of Korea », *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 267, No, (1 35–48), 2006.
- [12] R. Oussama, A. Chakra, M. Joyeux, E. Nerrière, M. P. Strub, D. Zmirou-Navier, « Genotoxicity of organic extracts of urban airborne particulate matter: An assessment within a personal exposure study », *Chemosphere* 66, (1375–1381), 2007.
- [13] P. Masclat, « Pollution atmosphérique : causes, conséquences, solutions, perspectives », Edition Ellipse, Paris, 2005.
- [14] A. Renoux, D. Borland, « Les aérosols: physique et méthodologie, Technique et Documentation », Paris, 1998.

- [15] E. Rotha, D. Kehrlib, K. Bonnot, « Size distributions of fine and ultrafine particles in the city of Strasbourg: Correlation between number of particles and concentrations of NO_x and SO₂ gases and some soluble ions concentration determination » *Journal of Environmental Management* 86, (282–290), 2008.
- [16] S. Bicocchi, « Les polluants et les techniques d'épuration des fumés », Lavoisier et Technique et documentation, Paris, 1998.
- [17] S.O. Baek, R.A. Field, M.E. Goldstone, P.W. Kirk, J. N. Lester, R. Perry, « A Review of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons », *Sources, Fate and Behaviour Water Air and Soil Pollution* 60, (279-300), 1991.
- [18] P. Chazette, H. Randriamiarisoa, J. Sanak, P. Couvert, et C. Flamant, « Optical properties of urban aerosol from airborne and ground-based in situ measurements performed during the ESQUIF program », *J. Geophys. Res.*, 110(D02206): doi: 10.1029/2004. JD004810, 2005.
- [19] W. Mihalopoulos, N. Muller, K. Querol, X.S. Rodriguez, J. S. Spindler, G. ten Brink, et A. Wiedensohler, « A European aerosol phenomenology - 2 : Chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe », *Atmospheric Environment*, 38, (2579-2595), 2004.
- [20] A. Benedetti, et M. Fisher, « Background error statistics for aerosols », *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 133, (391-405), 2007.
- [21] P. Ginoux, L. Horowitz, I.V. Geogdzhayev, B. N. Holben, G. Stenchikov, et X. Tie, « Evaluation of aerosol distribution and optical depth in the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory coupled model CM2.1 for present climate », *J. Geophys. Res.*, 111 : doi :10.1029/2005JD006707, 2006.
- [22] J. H. Seinfeld, et S. N. Pandis, « Atmospheric chemistry and physics », Wiley- Interscience, 1998.
- [23] P. Warneck, « Chemistry of the natural atmosphere ». Academic Press, New York, 1988.
- [24] F. Raes, R.V. Dingeren, E. Vignati, J. Wilson, J.P. Putaud, J.H. Seinfeld, and P.Adams, «Formation and cycling of aerosols in the global troposphere » *Atmospheric Environment* 34, (4215-4240), 2000.
- [25] F. Cavalli, M.C. Facchini, S. Decesari, M. Mircea, L. Emblico, S. Fuzzi, D. Ceburnis, Y.J. Yoon, C.D. O'Dowd, J.P. Putaud, J and A.J. Dell'Acqua, « Advances in characterization of size-resolved organic matter in marine aerosol over the North Atlantic », *J. Geophys. Res.*, 109, (D24215, doi: 10.1029/2004JD005137.), 2004.
- [26] E. Marmer, F. Dentener, J.V. Aardenne, F. Cavalli, E. Vignati, K. Velchev, J. Hjorth, F. Boersma, G. Vinken, N. Mihalopoulos, and F. Raes, « What can we learn about ship emission inventories from measurements of air pollutants over the Mediterranean Sea? », *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 9, (7155-7211), 2009.

- [27] M.C.Facchini, M. Rinaldi, S. Decesari, C. Carbone, E. Finessi, M. Mircea, S. Fuzzi, D. Ceburnis, R. Flanagan, E.D. Nilsson, G. Leeuw, M. Martino, J. Woeltjen, C.D. O' Dowd, « Primary submicron marine aerosol dominated by insoluble organic colloids and aggregates », *Geophysical Research Letters*, submitted, 2009.
- [28] D. Ceburnis, C. D. O'Dowd, G. S. Jennings, M. C. Facchini, L. Emblico, S. Decesari, S. Fuzzi, and J. Sakalys, « Marine aerosol chemistry gradients: Elucidating primary and secondary processes and fluxes », *Geophys. Res. Lett.*, 35, L07804, doi: 10.1029/2008GL033462, 2008.
- [29] V. Eyring, H.W. Köhler, J. van Aardenne, A. Lauer, « Emissions from international shipping: The last 50 years », *J. Geophys. Res., D: Atmos.*, 110 (D17), D17305, 2005.
- [30] J. J. Corbett, J.J. Winebrake, E.H. Green, P. Kasibhatla, V. Eyring, A. Lauer, « Mortality from Ship Emissions »: A Global Assessment. *Environmental Science and Technology*, 41 (24), (8512-8518), 2007.
- [31] J. Colosio, « Définition et explication des phénomènes liés à la pollution atmosphérique », www.ademe.fr, 2002.
- [32] Office fédérale de l'environnement, des forêts et du paysage, « Poussières fines PM10 : Questions et réponses concernant les propriétés, les émissions, les immissions, les effets sur la santé et les mesures », Etat au 1er décembre, 2005.
- [33] [Pope, 2002] C. A. Pope, P. T. Burnett, M. J. Thun, E. E. Calle, D. Krewski, K. Ito, « Thurston Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortal and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution », *The Journal of the American Medical Association*, 287, (1132-1141), 2002.
- [34] C.C Daigle, D.C. Chalupa, F.R. Gibb, P.E. Morrow, G. Oberdorster, M.J. Utell, M.W. Frampton, « Ultrafine particle deposition in humans during rest and exercise », *Inhal Toxicol*, 15(6), pp. (539-552), 2003.
- [35] R.B. Mosley, D.J Greenwell, L.E Sparks Z. Guo, W.G Tucker, R. Fortmann. C. Whitfield, « Penetration of ambient fine particles into the indoor environment », *Aerosol Sci Technol*, 34, pp. (127-136), 2001.
- [36] Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, « Poussières fines : Un fléau », Berne, 2005.
- [37] G. Brinkman, J. Milford, J. Schauer, M. Shafer, M. Hannigan, « Source identification of personal exposure to fine particulate matter using organic tracers », *Atmospheric Environment* 43 (1972–1981), 2009.
- [38] P. Gerde, B. A. Muggenbourg, M. Lundborg, A. R. Dahl, « The Rapid Alveolar Absorption of Diesel soot-adsorbed benzo[a]pyrene : bioavailability, metabolism and dosimetry of an inhaled particle-borne carcinogen Carcinogenesis », 22, (741-749), 2001.
- [39] E. C. Miller, J. A. Miller, « Mechanisms of Chemical Carcinogenesis » *Cancer*, 41, (1055-1064), 1981.

- [40] S. Gombert et al, « pollution atmosphérique par les métaux : Biosurveillance des retombées », Edition ADEME, France, 2005.
- [41] M. Z. Jacobson, « Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols », *Nature*, 409, (695-697), 2001.
- [42] B. Kercher, Th. Peter, U. M. Biermann, U. Schumann, « The Initial Composition of Jet Condensation Trails » *Journal of the Atmospheric Science*, 53, (3066-3083), 1996.
- [43] O. B. Popocitcheva, M. E. Trukhin, N. M. Persiantseva, N. K. Shonija, « Water adsorption on aircraft-combustor soot under young plume conditions », *Atmospheric Environment*. 35, (1673-1976), 2001.
- [44] V. Williams, R. B. Noland, « Variability of contrail formation conditions and the implications for policies to reduce the climate impacts of aviation » *Transportation Research Part D Transport and Environment*, 10, (269-280), 2005.
- [45] S. Larssen, R. Sluyter, C. Helmis, « Criteria for EUROAIRNET The EEA Air Quality Monitoring and Information Network », European Environment Agency, 1999.
- [46] F. P. Courieux, A. Person, Y. Le Moullec, « Connaissance atmosphérique en milieu urbain : représentativité biologique et difficultés météorologiques », *Pollution Atmosphérique*, pp (21-30), 1990.
- [47] J. Martin, L. Y. Mayster, « Santé et pollution de l'air », Presse polytechniques Romandes, Suisse, 1998.
- [48] J. Fiala, « Qualité de l'air en milieu urbain », *Naturoipa*, N°94, pp. 10, 2000.
- [49] Y. Laïd, M. Atek, R. Oudjehane, L. Filleul, L. Baough, N. Zidouni, M. Boughedaoui, et J.F. Tessier, « Health effects of PM10 air pollution in a low-income country: the case of Algiers », *Int.J.Tuberc.Lung.Dis* 10(12), pp (1406–1411), 2006.
- [50] K. T. Whitby et D. Cantrell, « Fine particles », *International Conference on Environmental Sensing and Assessment*, Las Vegas, NV, Institute of Electrical and Electronic Engineers, 1976.
- [51] F. W. Fifield, D. Kealey, « Principles and Practice of Analytical Chemistry », black-well science, London, 2000.
- [52] J. D. Butler, « Air pollution chemistry », Academic Press, London, 1979.
- [53] Données de la commune de Bach-Djerrah, 2008.
- [54] www.googlearth.dz, 2009.
- [55] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), « Classification et critères d'implantation des stations de surveillance de la qualité de l'air », Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), pp 10 – 50, www.ademe.fr, France, 2006.
- [56] A. Bitouche, « Evaluation de la pollution atmosphérique par les particules fines en site urbain à Alger », *Mémoire de Magistère*, ENP, 2008.
- [57] N. Berkouki, « Caractérisation de la pollution de l'air par les particules fines et des métaux associés, en milieu urbain à Alger centre », *Mémoire de magistère*, ENP, 2007.

- [58] J.P. Quisefit, A. Gaudichet, « Prélèvement des aérosols atmosphériques et analyses inorganiques », ANALYSIS MAGAZINE, Vol 26, N° 9, 1998.
- [59] Norme ISO 9855, « Air ambiant, dosage du plomb dans les particules d'aérosols collectés sur des filtres », 1993.
- [60] Office National Météorologique de Dar El Beida : Rapport interne, Alger, 2009.
- [61] H. Munir, S. Nazia, « Seasonal behaviours in elemental composition of atmospheric aerosols collected in Islamabad, Pakistan », Islamabad 45320, Pakistan Atmospheric Research 95 (210–223), 2010.
- [62] B. Gomiscek, H. Hauck et al., « spatial and temporal variations of PM1, PM2,5, PM10 and particle number concentration during the AUPHEP- project », Atmospheric Environment, 38, (3917-3934), 2004.
- [63] M. Branis, M. Domasova, « PM10 and black smoke in a small settlement: case study from the Czech Republic », Atmospheric Environment, 37, (93-92), 2003.
- [64] M. Vallius, « Characteristics and sources of fine particulate matter in urban air », National Public Health Institute, Department of Environmental Health, Kuopio, Finland, 2005.
- [65] Office national des statistiques (ONS), Données statistiques du parc automobile, Alger, 2006.
- [66] R. Kerbachi, F. Boumechhour, J. Arrar, M. Boughedaoui, « Pollution de l'air par les particules acides à Alger et influence de l'aérosol marin », Pollution Atmosphérique, N°204, (453-459), 2010
- [67] Y. Linda and M. Hooper « Size-resolved airborne particles and their morphology in central Jakarta, Atm. Env., Vol. 31, pp. (1167-1172), 1997.
- [68] [1999/30/CE] Directive 1999/30/CE Du Conseil du 22 avril 1999 relative à la fixation de valeurs limites pour l'anhydride sulfureux, le dioxyde d'azote et les oxydes d'azote, les particules et le plomb dans l'air ambiant, Journal officiel des Communautés européennes, L 163/41, 1999.
- [69] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, « Bilan de l'épisode de pollution (PM10, NO₂, SO₂) observé en France début janvier 2009 », Editions ADEME, Paris, (2009).
- [70] [EPA, 2006] <http://epa.gov/air/criteria.html>.
- [71] Organisation Mondiale de la Santé, « Update and revision of air quality guidellines for Europe », WHO regional publications, Copenhagen, 1997.
- [72] Décret executive n° 06-02 du 7 Dhou El Hidja 1426 Correspondant au 7 janvier 2006, définissant les valeurs limites, les seuils d'alerte et les objectifs de qualité de l'air en cas de pollution atmosphérique, 2006.
- [73] Office Fédérale de l'Environnement, des Forêts et du paysage (OFEFP), division Air, RNI et Sécurité, « Poussières fines PM10 : Questions et réponses concernant les propriétés, les émissions, les immissions, les effets sur la santé et les mesures, état au 1er décembre 2005 », Office Fédérale de l'Environnement, des Forêts et du paysage; www.ofefp.ch, Suisse, 2005.
- [74] K. O. Ikawa, « Trace analysis atmospheric », John Wiley et Sons, London, 1997.

- [75] Y. Kerchiche, « Etude de la pollution de l'air par les particules fines (Les PM-10) et les métaux lourds qui leurs sont associés à Alger », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2003.
- [76] N. Oucher, « Contribution à l'étude, par classe granulométrique, des aérosols particulaire sur un site de proximité à l'ENP », Mémoire de Magistère, 2006.
- [77] S. Selhi, « évaluation de la pollution atmosphérique par les particules fines en site urbain À alger », PFE, ENP, Alger, 2007.
- [78] S. Drif, « Pollution atmosphérique par les particules fines », Mémoire de fin d'étude, ENP, Juin 2008.
- [79] R. Caggiano, M. Macchiato, S. Trippetta, «Levels, chemical composition and sources of fine aerosol particles (PM1) in an area of the Mediterranean basin», Via Cintia, 80126 Napoli, Italy, Science of the Total Environment 408, (884–895), 2010.
- [80] E. Schneidmesser, E. A. Stone, T. A. Quraishi, M. M. Shafer, J. J. Schauer, «Toxic metals in the atmosphere in Lahore, Pakistan», Lahore 54890, Pakistan, Science of the Total Environment 408, (1640,1648), 2010.
- [81] H. Munir, N. Shah, «Seasonal behaviours in elemental composition of atmospheric aerosols collected in Islamabad, Pakistan», Pakistan Atmospheric Research 95, (210–223), 2010.
- [82] H. Kouyoumdjian, N.A. Saliba, «Mass concentration and ion composition of coarse and fine particles in an urban area in Beirut», Atmospheric Chemistry and Physics, 6, pp (1965- 1977), 2004.
- [83] E. Yamada, S. Funoki et al., «Size distribution and characteristics of chemical components in ambient particulate matter », Analytical Science, vol.21, pp (89-94), février 2005.
- [84] K. F. Ho, S. C. Lee et al., «Characterisation of chemical species in PM2,5 and PM10 aerosols in Hong kong », Atmospheric Environment 37, pp (31 – 39), 2003.
- [85] A. W. Gerther, M. Abu-allaban and D. H. Lowenthal, «The mobile source contribution to observed PM-10, PM-2,5 and VOCs in the greater Cairo area », 2nd Conf. Environment an transport, Proceedings N°107, Vol.1, Inrets Ed., France, pp. (263-269), 12-14 juin 2006.
- [86] Yu J., Guinot B., Yu T. et al., «Seasonal variations of number size distributions and mass concentrations of atmospheric particles in Beijing », Advances in atmospheric sciences, vol. 22, N° 3, pp (401–407), 2005.
- [87] Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement - Rapport complet de 2007, <http://www.ec.gc.ca/>.
- [88] C. Ségala, D. Poizeau, M. Mesbah, S. Willemsa, M. Maidenber, «Winter air pollution and infant bronchiolitis in Paris», Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, 2008.
- [89] Organisation Mondiale de la Santé, «Update and revision of air quality guidellines for Europe », WHO regional publications, Copenhegen, 1997.