

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة الفتيات
Ecole Nationale Polytechnique

*Département de Génie de l'Environnement
Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Environnement*

*Projet de fin d'études pour l'obtention du titre d'ingénieur d'état
En génie de l'environnement.*

THEME:

**ETUDE, PAR CLASSE GRANULOMETRIQUE, DE LA POLLUTION DE L'AIR
PAR LES PARTICULES FINES EN SITE SEMI URBAIN A ALGER.**

*Réalisé par:
Mr.S. SELHI*

*Proposé et Dirigé par :
Pr.R. KERBACHI*

Membres du Jury :

Président : H.Lounici

M.C Université Tizi-ouzou

*Examineurs : Y.Kerchich
F.Boumech-hour
A.Boukadoum*

*C.C Université Media
M.A Université Boumerdes
Directeur Sama safia (MATE)*

Promoteur : R.Kerbachi

Professeur ENP

*Promotion: 2006-2007
ENP:10,AvenueHacenBadi, El-Harrach, Alger.*

ملخص

مضمون هذا العمل هو دراسة التلوث الجوي في جنوب الجزائر العاصمة (دالي إبراهيم) عن طريق الجزيئات الدقيقة : PM-1, PM-2.5, PM-10 وقد سجلنا نسب ضعيفة من التلوث حيث كانت معدلات الجزيئات :
PM-1=14.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM-2.5=17.08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM-10=26.72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
الجزء الأصغر من المعادن الثقيلة لهذه الدقائق يتمثل في الرصاص بمعدل PM-10 في 2.9 ng/m^3

المفاتيح:

نوعية الهواء, الجزيئات الدقيقة, منطقة شبه معمارية, السخام, الجزائر العاصمة

Résumé

L'étude présente les niveaux de pollution de l'air par les PM-10 en un site semi urbain à Dely-Brahim au sud d'Alger. Le prélèvement des particules est effectué par un échantillonneur à haut débit, le HVS – PM-10, doté d'un cascadeur d'Andersen. En ce site, la teneur journalière moyenne en PM-10 s'élève à 26,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Toutefois, Il en résulte une pollution moyenne par les particules inhalables. Pour les PM-2,5 la teneur moyenne est de 17,08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et pour les PM-1 de 14,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Parmi les métaux lourds associés aux particules fines, le plomb accuse des valeurs relativement très faibles. On y mesure une teneur moyenne de 2,9 ng/m^3 , globalement les niveaux de pollution atteints en ce site semi-urbain sont très faibles comparés à ceux observés en milieux urbains à Alger.

Mots clés :

Qualité de l'air, Particules fines (PM-10; PM-2,5; PM-1), Suies, Métaux lourds, site semi-urbain, Alger.

Abstract

This study presents the levels of air pollution by the PM-10 in an urban semi site at Dely-brahim in the south of Algiers. The taking away of the particles is carried out by a sampler with high flow, the HVS - PM-10, is equipped with an Andersen cascader's. In this site, the content day average of PM-10 rises with 26,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. However, It results from it a rather appreciable pollution by the inhalable particles. For the PM-2,5, the average content is of 17,08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and for the PM-1 of 14,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Among the heavy metals associated to the fine particles, it is especially the lead which shows relatively low values. One measures there an average content of 2,9 ng/m^3 , this values are very low compared to the studies done before at Algiers in urban site.

Keywords:

Quality of the air, Fine Particles (PM-10; PM-2,5; PM-1), Soots, heavy metals, semiurban site, Algiers.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui me sont chères et proches au monde :

A mon père et à ma mère pour leurs conseils judicieux et leurs encouragements. Qu'ils puissent trouver dans ce travail, une bien méritée récompense ainsi que le témoignage de ma gratitude éternelle. Que Dieu les garde.

A mes frères et sœurs, pour leur soutien moral et leurs tendresses.

*A toutes les Familles SELHI et KHELIL et particulièrement à
Mon Grand-père.*

Sofiane

Remerciements

Je tiens à remercier mon encadreur le professeur R. Kerbachi pour ses conseils et son grand soutien.

Je remercie également l'ensemble des enseignants du Département du Génie environnement pour l'enseignement qu'ils m'ont prodigué et leur contribution à notre formation durant ces trois années de spécialité.

Je tiens à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont assisté dans ma tâche, particulièrement : Hakim, Salim, Walid, Nacer, Nasim, Ali, Yassin, Lyes, Okba, Karim siber, Hillel bellabes, Mehdi, Saddek, Samir, Chafik, Abdenour, Abdelmadjide et Sofiane siteyeb, Mouloud siagh, karim, idir, Sofiane chihe, et particulièrement Slimani Abdelkrim.

Je remercie également les membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

CHAPITRE I :

I- Généralités sur la pollution de l'air par les aérosols particulaires.....	3
I-1 Définition.....	3
I-2 Origine des Particules	4
I-2-1 Origine	4
I-2-2 Sources Naturelles.....	4
I-2-3 Sources Artificielles.....	6
I-3 Répartition des sources d'aérosols particulaires.....	8
I-4 Caractéristiques Physico-chimiques des particules	10
I-4-1 Caractéristiques Physiques.....	10
I-4-2 Modes de formation des particules.....	12
I-4-3 Caractéristiques chimiques.....	15
I-5 Structure Probable de l'Aérosol	19
I-6 Temps de séjour des Particules.....	18
I-6-1 Modes d' abatement de l'aérosol.....	19
I-6-2 Transport des Particules à Longue Distance	20
I-7 Distribution Verticale des Particules.....	20

CHAPITRE II :

II- Effets des Aérosol sur la Santé et L'environnement.....	21
II-I Introduction.....	21
II-2Caractéristiques du Système Respiratoire.....	21
II-3 Mécanismes de Défense de l'Appareil Respiratoire.....	22
II-4 Affections du Système Respiratoire.....	23
II-5 Effets des Particules Fines sur la Santé.....	25
II-6 Effets à court terme sur la santé.....	26
II-7 Effets à long terme sur la santé	27
II-8 Effets des Aérosols sur l'environnement.....	28

CHAPITRE III :

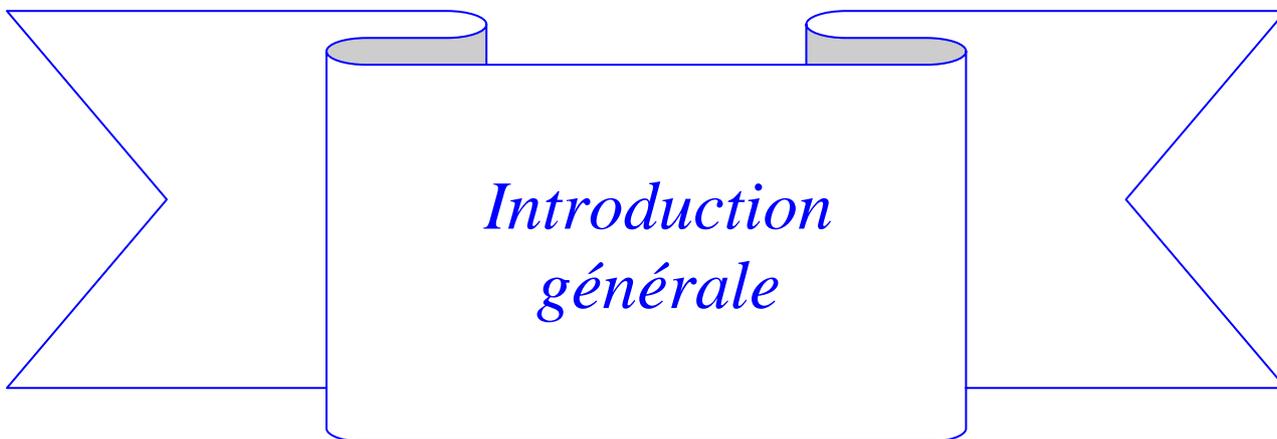
III- Les Méthodes de Mesure et d'Analyse des Aérosols.....	30
III-1 Introduction.....	30
III-2 Méthodes d'échantillonnage.....	30
III-3 Mesure des paramètres physiques des particules.....	33
III-3-1 Détermination de la masse des particules.....	33
III-3-2 Détermination du nombre de particules.....	34
III-4 Méthodes d'analyse chimique.....	35
III-4-1 Analyse de la matière organique.....	36
III-4-2 Analyse des éléments inorganiques et des métaux.....	37
III-4-3 Analyse des ions.....	38

CHAPITRE IV :

IV– Méthodologie.....	39
IV-1 Site de prélèvement.....	39
IV-2 Mode de prélèvement.....	39
IV-3 Traitement et analyse des particules prélevées.....	40

CHAPITRE V :

V-Résultats et discussion.....	48
V-1 L'évolution Temporelle Des Teneurs Atmosphériques en PM-i	48
V-2 Calcul du diamètre médian d_{50} et la teneur en PM-2.5.....	52
V-3 Comparaison inter sites à Alger.....	55
V-4 Corrélation entre les classes PM-i	57
V-5 Ampleur de la pollution.....	59
V-6 Etude Des Métaux Lourds Associés aux PM-i.....	64
VI-Conclusion.....	65
Références Bibliographiques.....	67



*Introduction
générale*

Introduction Générale

Ces dernières années, la pollution atmosphérique urbaine et son impact sur la santé humaine sont devenus un sujet de préoccupation pour les pouvoirs publics, les chercheurs et le grand public [1]. Un intérêt grandissant est porté à la composante particulaire de cette pollution et à son évolution du fait de l'augmentation de la contribution des sources mobiles (trafic routier) sur la concentration ambiante en particules fines.

Diverses études épidémiologiques ont montré que parmi les particules en suspension dans l'air, seules celles de diamètre inférieur à 10 μm et les classes de granulométrie plus faible ont une incidence réelle sur la santé [2].

L'aérosol atmosphérique est classiquement décrit selon son origine : naturelle ou anthropique. Les sources naturelles sont essentiellement constituées par les océans (embruns marins), l'érosion des sols, les volcans, les feux de forêts et de brousse. Les sources anthropiques sont très variées et sont constituées principalement par l'industrie (industries chimiques, cimenteries, industries extractives...), les transports (gaz d'échappement, usure des véhicules, usure de la chaussée...), les combustions (usines et chauffage domestique), l'incinération des déchets (ordures ménagères, déchets industriels et hospitaliers) [1 et 2].

Les particules atmosphériques sont également caractérisées par leur distribution en taille, leur morphologie et leur composition chimique, elle-même variable selon la taille et l'origine des particules. Leur taille peut varier de quelques nanomètres (nm) à plusieurs dizaines de micromètres (μm). En fait lorsqu'on étudie l'aérosol atmosphérique, on s'aperçoit qu'il y a une dichotomie physique entre les fines particules, dont le diamètre est inférieur à 2 μm , et les plus grosses [3].

Ces particules véhiculent principalement des imbrûlés et noyaux carbonés issus de processus de combustion, des particules acides issues de la conversion gaz / particules (pollution acide véhiculant les sulfates et nitrates), des éléments minéraux liés à l'érosion des sols, à la remise en suspension des particules déposées ainsi qu'à divers métaux lourds toxiques tels que le Pb, Cd, Ni, V, etc. qui jouent sans doute un rôle important dans la toxicité de l'aérosol.

Une grande partie des particules très fines (PM-2,5) provient du trafic routier (émissions des véhicules à essence, mais surtout des véhicules diesel). On estime ainsi qu'en milieu urbain, le trafic routier y contribue à plus de 50%. Dans ce contexte, il faut signaler qu'avec la diésélisation de plus en plus forte du parc automobile qu'on observe un peu partout en Europe, y compris en Algérie, on se focalise de plus en plus sur l'observation et la mesure des PM-1 (particules très fines de diamètre inférieur à $1\mu\text{m}$). Cette classe de véhicules émet en effet majoritairement des particules de très faible granulométrie. Il en résulte que l'étude, par classe granulométrique des particules véhiculées par les aérosols atmosphériques constitue un axe important dans l'évaluation globale de la pollution de l'air [2].

Aussi, et en continuité des travaux antérieurs effectués sur la pollution par les particules inhalables au sein du laboratoire Sciences et Techniques de l'Environnement de l'ENP, nous nous proposons dans ce travail d'étudier, par classe granulométrique, les niveaux de pollution de l'air par les particules fines atteints à Dely-Brahim au sud d'Alger en un site semi urbain à faible densité de population et qui n'est pas exposé directement aux émissions du trafic routier. L'étude de certains métaux lourds associés à ces particules sera également abordée.

D'un point de vue métrologique, il conviendra donc de disposer d'échantillonneurs spécifiques et adaptés aux paramètres recherchés (concentration massique, composition chimique, etc.). De type échantillonneur à fort débit, le HVS-PM-10 équipé d'un cascadeur Sierra-Andersen (marque Graseby, USA) à 4 étages a été utilisé pour les prélèvements [2].

Chapitre I:

Généralités sur la pollution de l'air par les aérosols de particules fines

Les particules fines participent à la pollution atmosphérique. Elles sont plus préoccupantes que les polluants gazeux car difficiles à maîtriser. Par ailleurs, elles véhiculent souvent des composés très cancérogènes comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), composés chimiques produits de façon générale par toutes les sources de combustion, comme, par exemple, les véhicules diesel. Les particules peuvent donc avoir un effet néfaste sur la santé. Elles sont par ailleurs le siège de réactions chimiques ou photochimiques modifiant le bilan des photo oxydants dans l'ozone troposphérique [1].

I-1 Définitions :

En générale, il existe quatre vocables qui sont presque équivalents pour désigner des entités solides dans l'atmosphère : particules, aérosols, poussières et fumées. Le premier terme est plutôt employé par les physiciens, le second par les chimistes, le troisième par les géologues et le dernier par les industriels. En fait ces termes ne correspondent pas exactement à la même chose [2 et 3].

Aussi, il est important de préciser la définition des termes utilisés dans l'étude des aérosols particuliers :

- **L'aérosol** : Ce mot désigne la suspension, dans un milieu gazeux, de particules solides ou liquides ou les deux, présentant une vitesse de chute négligeable. Ce qui, dans l'air et dans les conditions normales, correspond à des particules de dimensions inférieures à 100 μm , les plus fines ayant des dimensions de quelques angströms.
- **Les fumées** : Ce sont des particules carbonées de diamètre inférieur à 5 μm .
- **Les poussières** : On appelle ainsi les particules solides de diamètre inférieur à 75 μm , Les plus grosses retombent près de la source d'émission.
- **Les particules** : Appelées aussi poussières, poussières en suspension ou micro-particules sont un mélange de particules de poussières extrêmement petites, présentant un diamètre aérodynamique de moins de 10 micromètres, raison pour laquelle elles sont aussi dénommées PM-10 (Particulate Matter). Par analogie, les particules de moins de 2,5 micromètres de diamètre sont appelées PM-2,5. Le

terme particule englobe en fait l'ensemble des définitions précédentes indifféremment des propriétés physico-chimiques de chacune d'elles.

I-2 Origine des Particules :

I-2-1 Origine :

La pollution de l'air par les matières particulaires atmosphériques, comprend une gamme très variée de composantes biologiques (bactéries, virus, insectes) et autre non viables (minéraux, produit des combustion, etc). Il existe deux types d'aérosols mélangés dans toutes les atmosphères terrestres [4] :

- ❖ L'aérosol d'origine naturelle.
- ❖ L'aérosol de pollution d'origine artificielle.

La part de chacun des deux types d'aérosol dépend de l'éloignement des centres d'activités humaine et industrielle d'une part et de l'éloignement des zones désertiques et marines de l'autre. En zone marine, polaire ou désertique, l'aérosol est très majoritairement naturel. En revanche, en zone urbaine, l'aérosol de pollution est toujours mélangé avec l'aérosol naturel, car ce dernier peut être transporté à longue distance [1 et 3].

I-2-2 Sources Naturelles :

L'aérosol naturel comprend quatre sources principales [3] :

➤ **La source marine :**

L'aérosol marin est produit par le spray océanique. Sous l'action des vagues déferlantes, des gouttelettes d'eau de grosse taille sont projetées dans l'atmosphère. Après évaporation de l'eau de mer, les sels marins solides se retrouvent dans l'atmosphère et constituent des aérosols. Au niveau global ce type d'aérosol domine largement. Il est à l'origine de la formation des pluies sur les océans. La composition chimique de cet aérosol est proche de celle de l'eau de mer. On retrouve donc essentiellement du chlore et du sodium, mais aussi de grandes quantités de nitrates et de sulfates. Ce sulfate est formé par oxydation du SO_2 , qui provient lui-même de l'oxydation du diméthylsulfure émis par les algues. Il est appelé SS (sea sulfate). L'aérosol marin ne contient qu'une faible part de composés organiques [6].

➤ **La source terrigène :**

L'aérosol terrigène est généré par l'érosion éolienne des sols. Lorsque le vent dépasse trois mètres par seconde, les composés cristaux sont arrachés du sol. La quantité d'aérosol injectée dans l'atmosphère est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Cet aérosol est principalement constitué d'oxydes métalliques (fer, manganèse) et d'aluminosilicates (oxydes d'aluminium et de silicium). On trouve aussi des composés organiques provenant des débris de plantes et de l'humus. La Figure I-1 illustre la formation des aérosols terrigènes et marins.

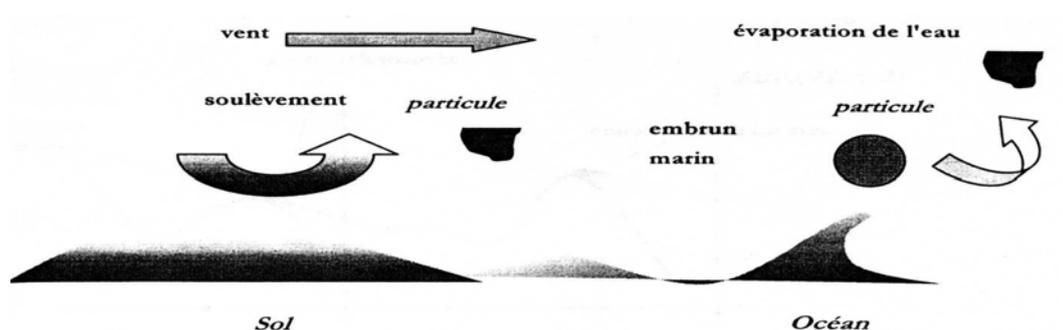


Figure I-1 : Formation d'aérosols terrigènes et marins [1].

➤ **La source biogénique :**

L'aérosol biogénique provient, d'une part de l'émission directe d'hydrocarbures lourds par les plantes, et les arbres et d'autre part de l'oxydation atmosphérique d'hydrocarbures biogéniques. On trouve aussi des esters à haut poids moléculaire. Cet aérosol est donc quasi exclusivement organique, même si on trouve aussi du potassium [7].

➤ **La source volcanique :**

L'aérosol volcanique est injecté dans l'atmosphère, non pas de façon continue comme les trois précédents, mais par bouffées. Il est constitué de métaux et de sulfates provenant de la conversion du SO_2 gazeux, émis en abondance par les volcans. Cet aérosol arrive jusqu'à la stratosphère, car la force de propulsion verticale est très forte [8].

I-2-3 Sources Artificielles :

Il existe deux types de particules émises par les activités humaines [1 et 3] :

- ❖ Les particules détritiques.
- ❖ Les particules formées par la conversion des gaz.

➤ **Aérosol détritique :**

Il contient des particules métalliques (plomb, fer, cuivre, cadmium, etc.) et du carbone élémentaire dit **carbone suie**. Cet aérosol est directement émis sous forme solide. C'est le cas des débris de pneus, des poussières de charbon, des poussières émises par les incinérateurs de déchets, etc. Cet aérosol est plus grossier et souvent de taille supérieure au micron.

Les aérosols transportent aussi de l'eau qui, lorsque le taux d'humidité augmente, se condense sur les particules. Celles-ci grossissent et forment des nuages ou des brouillards.

Par mouvement de convection, les particules quittent les basses couches de l'atmosphère, puis sont dispersées et transportées sur de longues distances. Ainsi on retrouve en Arctique et en Antarctique, des poussières provenant des régions industrielles. Cette faculté à se déplacer sur de longues distances est liée à la taille des particules. Plus elles sont fines, plus elles voyagent loin. Les particules inférieures à 0,1 μm peuvent faire le tour de la terre, tandis que les particules supérieures à 10 μm se déplacent rarement au-delà de 100 km, sauf lors de forts épisodes convectifs comme les vents de sable.

Enfin, le temps de résidence de l'aérosol dans l'atmosphère est court mais il dépend beaucoup de sa charge en eau.

➤ **Aérosol de conversion :**

Il est produit par la condensation des vapeurs polluantes émises par les véhicules et les industries lorsque la pression de vapeur du composé excède le point de saturation. Il est formé par un processus appelé "**conversion gaz/particule**". La combustion de la biomasse conduit aussi à ce type de particules mais il s'agit alors de particules naturelles ou de particules de pollution suivant qu'il s'agit de feux spontanés ou de feux provoqués par l'homme; La distinction entre les

deux étant évidemment difficile à établir. L'aérosol de conversion est constitué principalement de matière organique, de sulfates formés par la conversion du SO₂ gazeux en particules solides et des nitrates issus des NO_x

Les sulfates de conversion sont appelés « *non sea sulfates* » par opposition aux sulfates marins (« *sea sulfate* »). L'aérosol de conversion contient aussi des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), composés cancérigènes produits par la combustion incomplète des combustibles fossiles et de la biomasse. Cet aérosol de conversion est très fin, puisque sa taille est inférieure au micron. Les conversions se produisent dans la gaine des noyaux de **Aitken**.

La composition de ces particules est très vaste comme l'est celle des COV qui se convertissent en particules. Notons que les particules les plus toxiques sont fines, donc l'aérosol de pollution est souvent dangereux pour la santé humaine. Or la contamination de l'atmosphère par ce type d'aérosols devient générale [1].

❖ *Production photochimique d'aérosols [5] :*

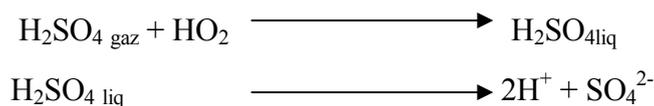
Les vitesses de formation des aérosols sont beaucoup plus lentes dans l'obscurité qu'à la lumière. Parce qu'il n'y a pas d'oxydation photochimique favorisant l'abaissement de la pression de vapeur saturante.

• *Exemple de Formation des sulfates :*

C'est le cas de la conversion du SO₂ gazeux en sulfates :



Après formation de l'acide sulfurique gazeux, celui-ci dissout dans l'eau atmosphérique



ces mécanismes se réalisent le plus souvent en phase hétérogène

Enfin, il y a neutralisation par les cations ammonium ou sodium pour donner des sulfates d'ammonium ou de sodium (NH₄)₂ SO₄ ou Na₂ SO₄. (Figure I-2).

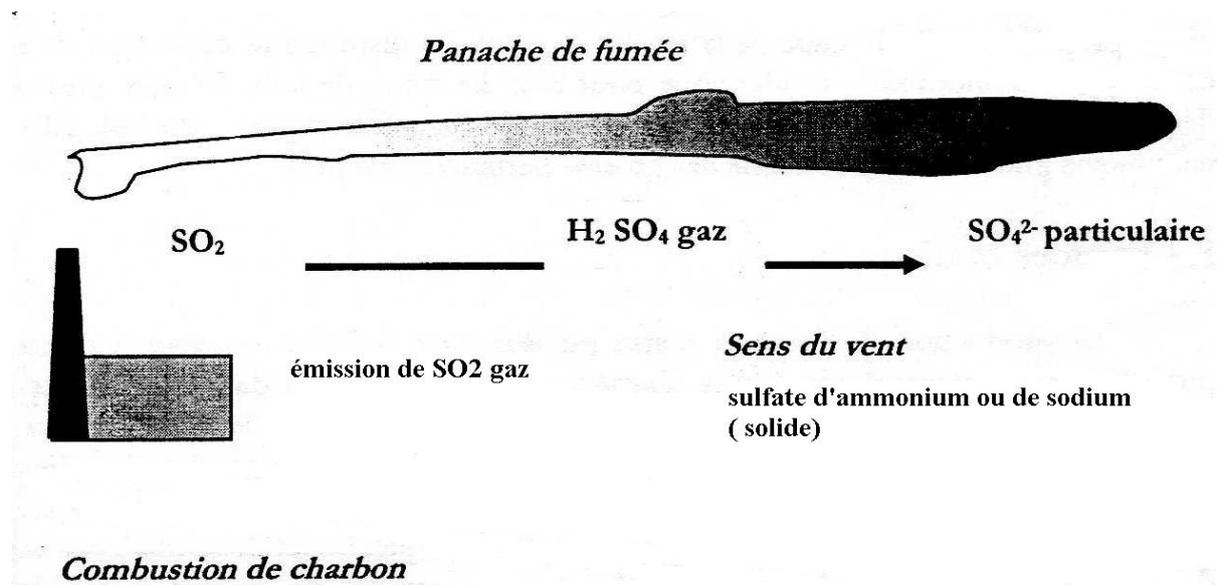


Figure I-2 : Formation des sulfates en milieu urbain [1].

- **Formation de la matière organique particulaire [3] :**

Il existe aussi la formation d'aérosols à partir de composés organiques tels que les alcènes, les diènes ou les cycloalcènes, possédant 5 ou 6 atomes de carbone. Les produits d'oxydation sont des diacides, ou des dialdéhydes.

Ainsi l'acide adipique et ses dérivés sont formés à partir des hydrocarbures en C_6 tel que l'hexane

Le cyclohexane donne aussi des aérosols avec l'ozone. Il se forme un acide aldéhydique aromatique particulaire. Les terpènes naturels donnent aussi des aérosols à l'issue de réactions complexes avec l'ozone. Il se forme une multitude de produits di et tri oxygénés.

Tous ces composés oxygénés particuliers de même que les sulfates et les nitrates s'accumulent dans l'atmosphère. Elles sont ensuite lessivées par les pluies et les neiges, passent dans les sols et les eaux de surface et modifient ainsi leurs cycles naturels.

I-3 Répartition des Sources d'Aérosols Particulaires [9]:

La masse totale d'aérosols sur la Planète est d'environ 2400 Tg dont 410 Tg sont anthropogéniques (pollution). Dans cette fraction, 20% des émissions sont directement particulières, tandis que 80% résultent de conversions gaz-particules, accompagnées souvent d'oxydation. C'est le cas des sulfates qui constituent la part prépondérante de l'aérosol.

La place des particules de combustion de biomasse « feux de forêts » est délicate car ces feux peuvent être naturels ou provoqués par l'homme.

Type d'aérosol	Masse dans l'atmosphère planétaire en Tg	Total
Aérosols naturels :		
sels de mer	1000	} 1950
érosion des roches	500	
volcans	50	
sulfates naturels	250	
nitrate naturels	75	
hydrocarbures	75	
Feux de forêts et savane	100	
Aérosols de pollution :		
sulfates de pollution	220	} 410
nitrate de pollution	40	
hydrocarbures de pollution	50	
processus industriels	100	

La Figure I-3 résume les différents émetteurs et diamètres des particules générées.

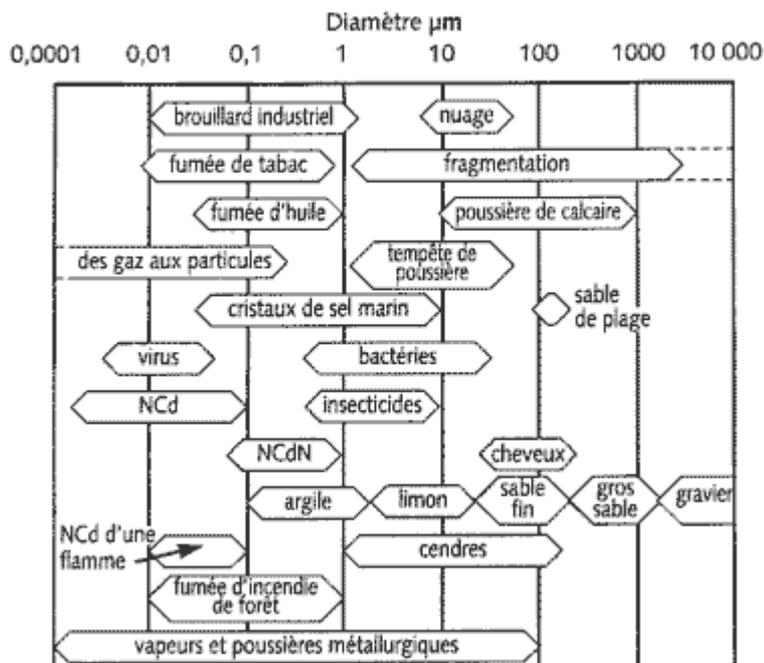


Figure I-3 : Les différents émetteurs et diamètres des particules générées [10].

Ndc = Noyaux de Condensation, NCdN = Noyaux de condensation des nuages

I-4 Caractéristiques Physico-chimiques des particules :

I-4-1 Caractéristiques Physiques :

Un aérosol est caractérisé par [11] :

- ❖ La masse par unité de volume ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$).
- ❖ Le nombre de particules par unité de volume ($\text{nombre} \cdot \text{cm}^{-3}$).
- ❖ La distribution en taille (μm).

➤ Données sur les aérosols [1]:

Type d'aérosol	Concentration en masse ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	Concentration en nombre.cm3
Urbain	100	10^5-10^6
Terrestre	40	5000
Maritime	10	500
Polaire	1	25

➤ Taille des aérosols :

On considère toutes les particules comme sphériques ou assimilées à des sphères. Leur taille est définie par le diamètre aérodynamique moyen appelé **D_p** . Cette approximation est correcte pour des particules humides qui sont sphériques. Elle ne l'est pas pour des cristaux de glace par exemple ou des particules de combustion fraîchement émises. La taille des particules s'étale sur plusieurs ordres de grandeur: de 0,001 à 100 μm .

On distingue trois classes de particules [1 et 12]:

- **$D_p < 0,1 \mu\text{m}$** : Fines particules ou noyaux de Aitken. Ces particules sont essentiellement dues à la conversion des gaz.
- **$0,1 < D_p < 2,0 \mu\text{m}$** : Les particules moyennes ou mode d'accumulation (les plus

importantes en chimie atmosphérique). Comme le nom l'indique, les particules formées par conversion grossissent et s'accumulent.

- $D_p > 2,0 \mu\text{m}$: Les grosses particules. il s'agit des particules détritiques, de sable.

➤ **Masse des aérosols :**

On utilise deux types de fonctions pour décrire la relation entre la masse et la taille des aérosols :

- Fonction $\Delta M / d \log D_p$ (1)

- Fonction $\log \Delta M / \Delta D_p$ (2)

Avec :

- ΔD_p : La fourchette entre deux tailles de particules.
- ΔM : Le nombre de particules entre deux tailles consécutives (exemple : nombre de Particules de taille comprise entre 0,4 et 0,5 μm).

La fonction $\log \Delta M / \Delta D_p$ qui représente la distribution granulométrique des particules est illustrée sur la Figure I-4, mais les deux types de courbe sont assez analogues.

La distribution en masse est souvent bimodale, c'est à dire qu'elle présente deux maximums:

- ❖ L'un pour les fines particules.
- ❖ L'autre pour les grosses particules.

L'importance relative des deux modes diffère beaucoup d'un site à l'autre.

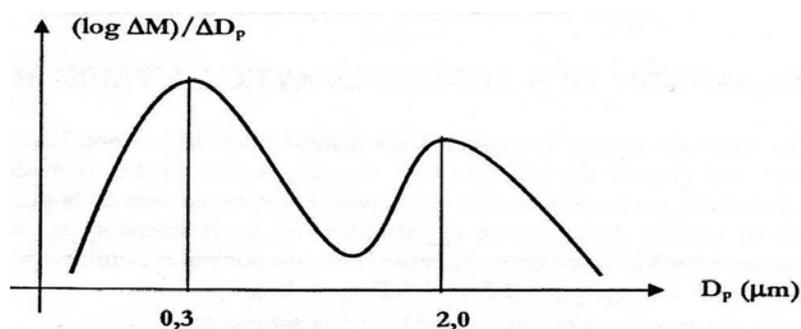


Figure I-4 : Distribution de la masse de l'aérosol en fonction de la taille [13].

➤ **Nombre des aérosols [1 et 3]:**

On utilise la fonction $(\log \Delta N) / \Delta D_p$, (Figure I-5) ou la fonction $\Delta N / d \log \Delta D_p$ (3)

La courbe du nombre d'aérosols est fortement décroissante car les très fines particules sont de loin les plus nombreuses. En revanche la masse est surtout due aux particules de masses élevées donc de grandes particules puisque la masse est proportionnelle au cube du diamètre D_p . On observe donc deux maximums pour cette courbe (distribution bimodale).

En première approximation la relation entre masse et nombre est la suivante :

$M = \rho \cdot V$ ou ρ est la densité moyenne de la particule,

Avec : $V = (\pi/8 \cdot D_p^3) \cdot 4/3$ (4)

En fait, les particules sont loin d'être toutes sphériques et on connaît mal la valeur de ρ . Donc le calcul de M à partir de V est rarement valable et, en pratique, on ne l'effectue pas.

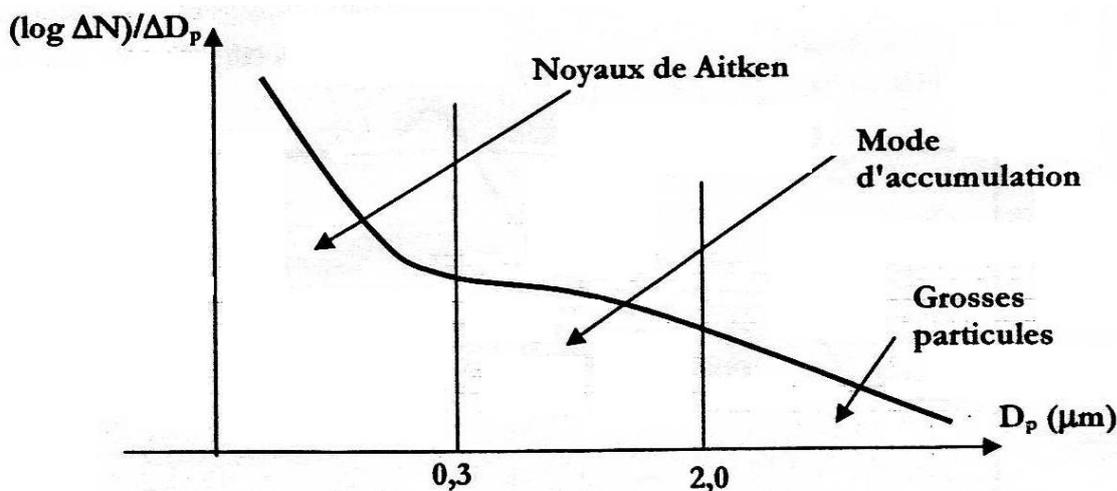


Figure I-5 Distribution du nombre d'aérosols en fonction de la taille [1].

I-4-2 Modes de formation des particules :

Il existe 3 modes de formation des particules [1]:

- ❖ Nucléation des gaz.
- ❖ Condensation des gaz à la surface de l'aérosol.
- ❖ Coagulation d'aérosols.

➤ Nucléation des gaz :

Le mode principal de formation des aérosols est la nucléation des molécules de gaz formant des amas qui se solidifient ensuite. Ce mécanisme a lieu lorsque la pression de vapeur s'abaisse suffisamment. L'abondance Γ_1 , d'un amas de particules est donnée par l'expression: $\Gamma_1 = k \exp [- G_i/(kT)]$. (5)

avec :

- G_i l'énergie libre de formation des amas.
- K la constante de Boltzmann.
- T la température en °K..

G_i comprend deux termes :

- L'un lié à la pression réelle (p) et à la pression à la saturation (p_s) du gaz
- L'autre à la tension superficielle δ .

$$\text{On a: } G_i = -kT \cdot N_i \cdot \text{Log}(p/p_i) + 4\delta\pi r_i^2 \quad (6)$$

avec:

- N_i le nombre de particules formées.
- r_i le rayon de lamas formé.

Si $p < p_s$ le premier terme est positif et G_i , augmente avec le nombre de particules N_i .

Si $p > p_s$, l'énergie libre passe par un maximum pour un diamètre de particule optimal. Il y a une « barrière de nucléation ». Après franchissement de cette barrière, la taille augmente à nouveau par les mécanismes décrits ci-dessous.

➤ **Condensation des gaz sur l'aérosol :**

La condensation est le dépôt, sous forme de vapeur, de matière gazeuse sur des particules déjà existantes, formées par le processus de nucléation. C'est un mode d'adsorption. Ce mécanisme est contrôlé par la loi cinétique des gaz pour les fines particules. Pour les grosses particules, c'est la diffusion qui contrôle le mécanisme. La charnière entre les deux mécanismes a lieu pour des particules voisines de $1\mu\text{m}$. La vitesse de formation Γ_2 de la particule est déterminée par le nombre de molécules de gaz condensables frappant l'aérosol préexistant.

$$\text{On a: } \Gamma_2 = (N_c - N_s) \cdot \xi(\text{Log } r_2) \cdot d(\text{Log } r_2) \quad (7)$$

Avec :

- N_c et N_s les nombres de molécules condensables et celui à la saturation (systèmes condensation/évaporation).
- $\xi(\text{Log } r_2)$ la distribution en taille des particules de taille r_2 .

L'indice 1 se réfère à la molécule de gaz assimilée à une particule et l'indice 2 à la particule préexistante. Après intégration on a:

$$\Gamma_2 = [\pi v_1 \cdot r_2] / [1 + r_1 \cdot v_1 / 4D_1] \cdot \Omega_1 \quad (8)$$

Avec :

- r_1 taille de la molécule de gaz.
- v_1 la vitesse de la molécule.
- Ω_1 le libre parcours moyen de cette molécule.

Le temps disponible pour une collision entre une molécule de gaz et la particule préexistante est donné par : $t = 4/v_1 \cdot S_{\text{eff}}$ où S_{eff} est la section efficace de rencontre (probabilité au sens de la statistique quantique). Plus la vitesse initiale de la molécule de gaz est grande, plus court sera le temps de collision et donc plus efficace sera cette collision.

➤ **Coagulation :**

Enfin, dans ce dernier processus, les particules se regroupent entre elles lors de collisions entre ces particules. Un choc entre deux particules conduit à la formation d'une particule plus grosse que les deux particules de départ. La fréquence des collisions Z entre deux particules 1 et 2 est donnée par :

$$Z = K(r_1, r_2) \cdot \zeta(r_1) \cdot \zeta(r_2) \cdot dr_1 \cdot dr_2 \quad (9)$$

Avec :

- $K(r_1, r_2)$ la fonction de coagulation
- $\zeta(r_1)$ et $\zeta(r_2)$ les fonctions de distribution de taille des particules 1 et 2.

si le rayon des particules est très inférieur au libre parcours moyen Ω dans l'atmosphère ($\Omega = 6,5 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}$) K est donné par la loi cinétique des gaz :

$$K(r_1, r_2) = 4 \cdot \pi \cdot (r_1 + r_2)^2 \cdot (v_1^2 + v_2^2)^{1/2} \quad (10)$$

Avec:

- $V_i = [8 (kT / \pi) \cdot m_i]^{1/2}$ (11)
- k = la constante de Boltzmann.
- m_i = la masse de la particule i de rayon r_i .

→ si le rayon est très supérieur au libre parcours moyen Ω , K est contrôlé par la diffusion des particules :

$$K(r_1, r_2) = 4 \cdot \pi \cdot (r_1 + r_2) \cdot (d_1 + d_2) \quad (12)$$

Avec :

d_1 et d_2 les constantes de diffusion.

En résumé, tout le long de son « histoire », la particule augmente de taille. L'ensemble des mécanismes est regroupé sur la Figure I-6 :

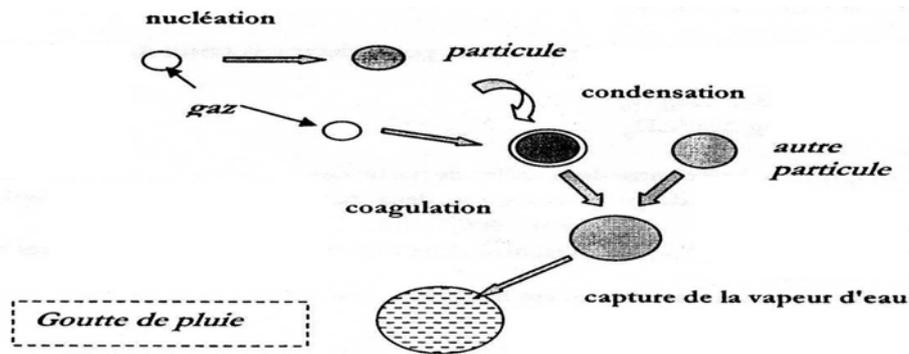


Figure I-6: Evolution d'un aérosol atmosphérique [11].

I-4-3 Caractéristiques chimiques [12 et 13]:

L'aérosol particulaire est constitué de trois fractions :

- Minérale soluble ;
- Minérale insoluble ;
- Carbonée (carbone suie et organique).

La répartition des trois fractions diffère de façon importante suivant la taille des particules. Ainsi la fraction insoluble dans l'eau augmente régulièrement en importance quand la taille de la particule augmente. La fraction soluble diminue quand la taille augmente. La fraction soluble dans les solvants organiques reste approximativement constante (20 à 25%). La Figure I-7 illustre la répartition des familles chimiques en fonction de la taille de l'aérosol.

I-4-3-1 Fraction inorganique ou minérale [1, 3 et 15] :

➤ Composition chimique :

Pour une concentration totale d'aérosol de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, une composition chimique typique est la suivante :

Espèce	Masse en $\mu\text{g}.\text{m}^3$
SO_4^{2-}	16.7
NO_3^-	9.7
$\text{Cl}^- + \text{Br}^-$	1.3
$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	4.0
$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	1.4
Al	6.4
Si	21.1
Fe	3.8

Ces éléments peuvent représenter jusqu'à 95% de la fraction minérale de l'aérosol. L'aérosol varie beaucoup en concentration suivant la proximité plus ou moins grande des sources, mais sa composition relative varie assez peu. On retrouve toujours :

- **Les espèces présentes dans les sels de mer** : Sodium, Ammonium, Sulfate et Chlore.
- **Les espèces crustales** : Fer et manganèse sous forme d'oxydes et aluminium et silicium sous forme d'aluminosilicates $\text{Al}_x, \text{Si}_y, \text{Mg}_z, \text{O}_k$.
- **Du carbone suie.**

Le reste est constitué d'aérosol de conversion gaz/particules (composante organique et inorganique) et de métaux. En termes de masse la composante de pollution n'est pas prépondérante. Mais en termes de toxicologie les composés issus de la conversion gaz/particules sont souvent toxiques et présentent un danger pour la santé, au contraire de l'aérosol naturel.

➤ pH acide des aérosols [1 et 3] :

L'anion principal de pollution est le sulfate dont la distribution granulométrie est dans le domaine cumulatif, centré sur $0,3 \mu\text{m}$. L'ammonium est le cation le plus souvent associé aux sulfates. La neutralisation des sulfates par NH_4^+ n'est que de 80% seulement (Figure I-8). Il reste donc 20% de la balance ionique en faveur des anions (excès de charges négatives). Comme un aérosol est toujours électriquement neutre, ce déficit est compensé par les ions H^+ . En conséquence, le pH des aérosols liquides

« donc des pluies » est toujours acide. Le pH des pluies est compris entre 4,5 et 6 et le pH des neiges est 4. en moyenne. Ceci renforce le caractère acide des pluies.

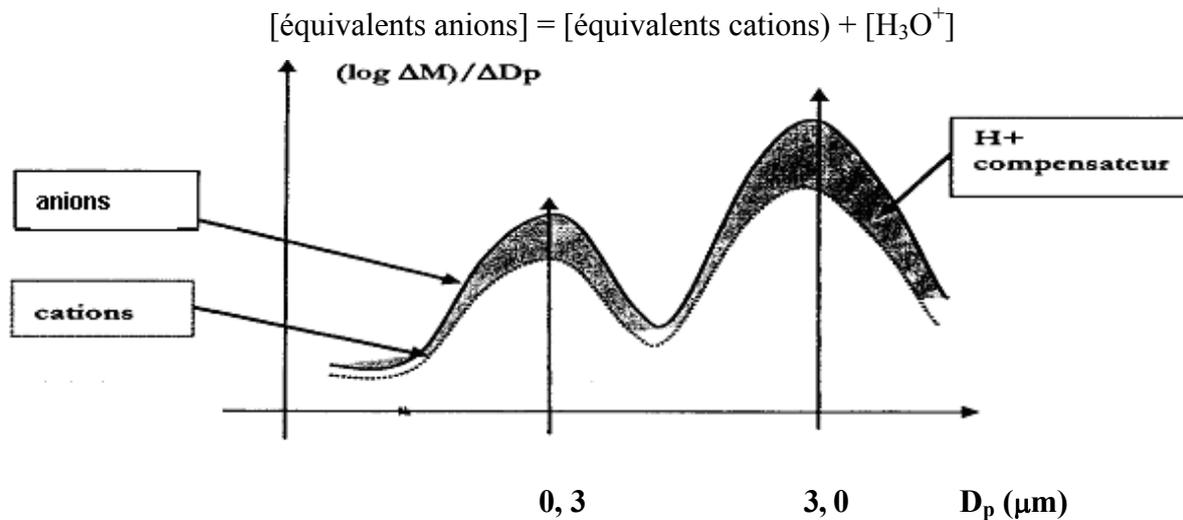


Figure I-8 : Excès d'anions par rapport aux cations dans les aérosols [1].

Exemples de composition chimique [1] :

▪ **Aérosol marin :**

- Anions: prédominance de SO_4^{2-} et de Cl^- ;
- Cations: prédominance de Na^+ ;
- Balance ionique quasi équilibrée → pH des pluies très peu acide (6,8).

▪ **Aérosol rural :**

- Prédominance d'éléments métalliques : Al et Si ;
- Anions : SO_4^{2-} , Cl^- et NO_3^- ;
- Cations: Ca^{2+} , K^+ , Fe^{3+} et NH_4^+ (provenant de NH_3) ;
- Balance ionique presque équilibrée → pH des pluies peu acide (6,2 à 6,5).

▪ **Aérosol urbain :**

- Anions: prédominance de SO_4^{2-} et NO_3^- ;
- Cations: plus faible présence d'ions X^+ et Y^{++} ;
- Balance ionique déséquilibrée → pH des pluies acide (5,5 pour le pluies et 4 pour les neiges).

➤ **Facteurs d'enrichissement :**

On détermine aussi un facteur d'enrichissement Φ , pour l'élément X, par rapport à un élément de référence R, dans deux aérosols :

- L'aérosol à mesurer.

- Une source pure telle que le sel de mer, le sable, le ciment, les mâchefers, etc.
- Le Φ est donc un ratio de deux ratios : $\Phi(X) = (X/R)_{\text{aérosol}} / (X/R)_{\text{source pure}}$ (13)

où X se rapporté à l'élément que l'on mesure, et R à l'élément pris comme référence

Les éléments de référence sont :

- Na^+ pour le sel de mer ;
- Al pour l'aérosol crustal ;
- Ca^{++} pour les matériaux de construction ;
- N (dans NH_4^+) pour les feux de biomasse ou K^+ ;
- Fe^{+++} ou Cu^{++} pour les industries métalliques ;
- V pour les industries du pétrole ;
- S pour la source anthropogénique prise globalement .

Ainsi, en prenant l'aluminium (Al) présent dans le sable comme référence R de source crustale, on cherche a déterminer l'origine du plomb dans un aérosol X.

On détermine:

- $(\text{Pb}/\text{Al})_X$ dans l'aérosol étudié.
- $(\text{Pb}/\text{Al})_R$ dans le sable de référence.

Et on calcule Φ

$$\Phi = [(\text{Pb}/\text{Al})_X] / [(\text{Pb}/\text{Al})_R]. \quad (14)$$

Plus Φ est élevé, plus la pollution par le plomb est importante.

○ **Exemple de Facteurs d'enrichissements:**

élément	Φ (en %)	Source de pollution probable
Al	100	reference crustale (argile)
Si	80	
Fe	140	apports de la métallurgie.
Ca	200	apports des cimenteries.
Mg	35	
Na	55	appauvrissements en apport marin.
K	120	apports des feux de végétation.
Ti	150	
Mn	200	apports des industries.
V	500	apports des fuels lourds (centrale électrique).

Les Φ importants pour le Fe, Mn ou Ca, montrent une signature anthropogénique due a des industries métallurgiques et à des cimenteries. Un Φ élevé du vanadium, signale l'importance des industries productrices d'énergie. En revanche le sodium à un Φ fortement abaissé en raison de l'éloignement de la mer. Les éléments crustaux comme le silicium

ont des Φ proches de 100, montrant que cet aérosol urbain est un mélange d'aérosol de pollution et d'aérosol provenant de l'érosion des sols. Le Φ de 120 pour le potassium montre, qu'en plus de la source crustale, l'aérosol collecté comporte une composante due aux feux de végétation ou à des engrais riches en potassium.

I-5 Structure Probable de l'Aérosol [1 et 16]:

L'aérosol serait (mais aucune preuve définitive n'existe) constitué d'un « cœur » formé de carbone suie (carbone type graphite), d'oxydes métalliques et d'aluminosilicates. Autour de ce cœur, Il y aurait une couche de composés organiques fonctionnalisés, plus ou moins mélangés à des électrolytes tels que les sulfates. Ces dépôts de surface seraient recouverts par de l'eau atmosphérique qui viendrait s'adsorber à la surface, conduisant ainsi à une augmentation de la taille de la particule (Figure I-9).

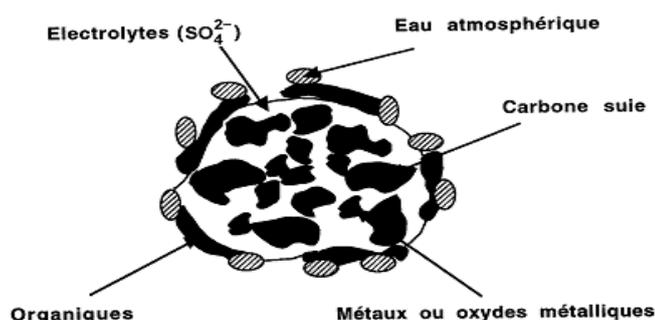


Figure I-9 : Structure probable de l'aérosol [16].

I-6 Temps de Séjour des Particules [1] :

La détermination du temps de résidence des particules nécessite la connaissance des modes d'abattement de celui-ci vers le sol et de la quantité totale G d'aérosol dans l'atmosphère, elle même déterminée par la distribution verticale des concentrations d'aérosols dans l'air.

I-6-1 Modes d'abattement de l'aérosol [1 et 3]:

Les aérosols ne restent pas longtemps dans l'atmosphère car ils se redéposent au sol par des phénomènes d'abattement. Il existe deux modes d'abattement des aérosols vers la surface de la terre [1]:

- Le dépôt sec par gravitation ;

- Le dépôt humide. Celui-ci a deux composantes.

1- Lessivages : Ce mode d'abattement est mécanique. La particule est entraînée vers le sol par les gouttes de pluie.

2-Dissolution : La matière chimique est dissoute dans la goutte de pluie, directement dans le nuage. Suivant les régions du globe, l'un ou l'autre de ces phénomènes prédomine:

- En Europe et en zone polaire, le dépôt humide prédomine
- En zone continentale Afrique, Asie et Amérique, le dépôt sec prédomine.

I-6-2 Transport des Particules à Longue Distance [14]:

Le transport des aérosols est peu fréquent entre les Amériques et l'Europe. En revanche, il est possible d'Europe vers l'Asie et d'Asie vers le pôle Nord. Ce dernier axe de transport est bien connu depuis « Tchernobyl ». En région montagneuse, le dépôt humide prédomine toujours. Ainsi, dans les Alpes, il permet l'apport de sels marins en provenance de l'Atlantique et l'apport d'aérosol désertique en provenance du Sahara. Ce dernier phénomène est connu depuis l'Antiquité: ce sont les « pluies rouges ». Ces divers apports sont bénéfiques car ils améliorent la qualité des sols.

I-7 Distribution Verticale des Particules [1 et 3]:

La distribution verticale de la concentration d'aérosols montre une décroissance régulière avec l'altitude puis à la base de la tropopause, elle présente un maximum suivi d'une légère augmentation dans la stratosphère (Figure I-10).

Ou un modèle simple de distribution de l'aérosol dans la troposphère est le suivant:

$$\text{Aérosol continental : } C_{\text{cont}} = C_1^\circ \exp(-z/h_1) + C_2^\circ \exp(-z/h_2) \text{ avec } h_1 = 1 \text{ km} \quad (15)$$

$$\text{Aérosol marin : } C_{\text{marin}} = C_2^\circ \exp(-z/h_2) + C_3^\circ \text{ avec } h_2 = 9 \text{ km} \quad (16)$$

$$\text{Les valeurs des } C_i^\circ \text{ sont : } C_1^\circ = 45 \mu\text{g.m}^{-3} \quad C_2^\circ = 1 \mu\text{g.m}^{-3} \quad C_3^\circ = 10 \mu\text{g.m}^{-3}$$

z est l'altitude dans la troposphère (comprise entre 0 et 12 km).

$$\text{Dans la colonne d'air, on a en moyenne : } C_{\text{aérosol}} = 5,2.10 \text{ kg/ m}^2$$

Le volume de la colonne d'air est défini par une surface de 1 m^2 au sol et par la hauteur de la couche de mélange. Pour l'ensemble de la planète, $G_{\text{aérosol}} = 2400 \text{ Tg}$. Le flux annuel de production d'aérosols est proche de: $F_{\text{aérosol}} = 40\,000 \text{ Tg}$

On peut donc évaluer le temps de séjour moyen de l'aérosol par l'expression habituelle :

$$T = G_{\text{aérosol}} / F_{\text{aérosol}} = 2400/40000 = 0,06 \text{ an soit } 22 \text{ jours.}$$

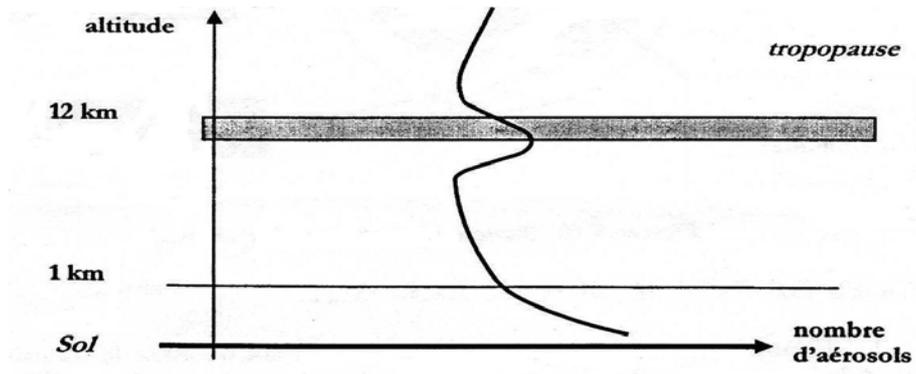


Figure I-10 : Profil des concentrations d'aérosols avec l'altitude [1].

Globalement on peut considérer que le temps de résidence moyen de l'aérosol est de l'ordre de deux semaines.

Chapitre II :
Effets des Aérosols sur la Santé et
L'Environnement

II-1 Introduction:

Prévenir la maladie au lieu de la traiter est souvent considéré comme le moyen le plus efficace d'améliorer la santé publique. La réduction de la pollution atmosphérique est un exemple de mesure proactive susceptible d'améliorer la santé [17].

En moyenne chaque jour plus de 12 m³ d'air (15kg) passent dans les poumons de chaque individu et la qualité des échanges respiratoires est la base du bon fonctionnement des métabolismes cellulaires, donc de la santé de l'homme.

Les maladies respiratoires sont actuellement la quatrième cause de mortalité chez l'homme ou la porte d'entrée des polluants atmosphériques dans le corps humain est essentiellement le système respiratoire. Cette porte d'entrée mène également à la circulation sanguine générale et peut entraîner de ce fait des affections d'autres fonctions physiologiques [1].

II-2 Caractéristiques du Système Respiratoire :

Il se compose des voies aériennes supérieures (nez, pharynx, larynx, trachée) et intra thoraciques (bronches, bronchioles) et des poumons renfermant les alvéoles pulmonaires qui permettent le contact entre l'air inspiré et la circulation sanguine à travers l'épithélium pulmonaire. Le système pulmonaire a pour fonction d'assurer les échanges gazeux : recharge du sang en oxygène pour alimenter les métabolismes cellulaires et évacuation du CO₂, produit de ce métabolisme [18].

Il satisfait les besoins en air de l'organisme : De 6 litres/min au repos à plus de 60 litres/min pendant l'effort. L'oxygène consommé passe dans le sang à travers l'épithélium alvéolaire, lames de cytoplasme épaisses d'environ 50 nm, tapissant les 50 m² des 300 millions d'alvéoles d'une taille de 0,1 à 0,3 mm, terminaisons aériennes du système pulmonaire. Ces alvéoles sont l'aboutissement d'environ 32 000 canaux de 0,5 mm de diamètre et d'une section totale d'ouverture de 113 cm². L'oxygène se fixe sur l'hémoglobine du sang (1,34 ml O₂/g), pour être transporté dans les tissus sous forme d'oxyhémoglobine; en retour le CO₂ est véhiculé vers le poumon par l'hémoglobine ou le plasma sanguin sous forme de HNaCO₃ [19]. La Figure II-1 résume le devenir des particules atmosphériques dans l'appareil respiratoire en Fonction de leur granulométrie.

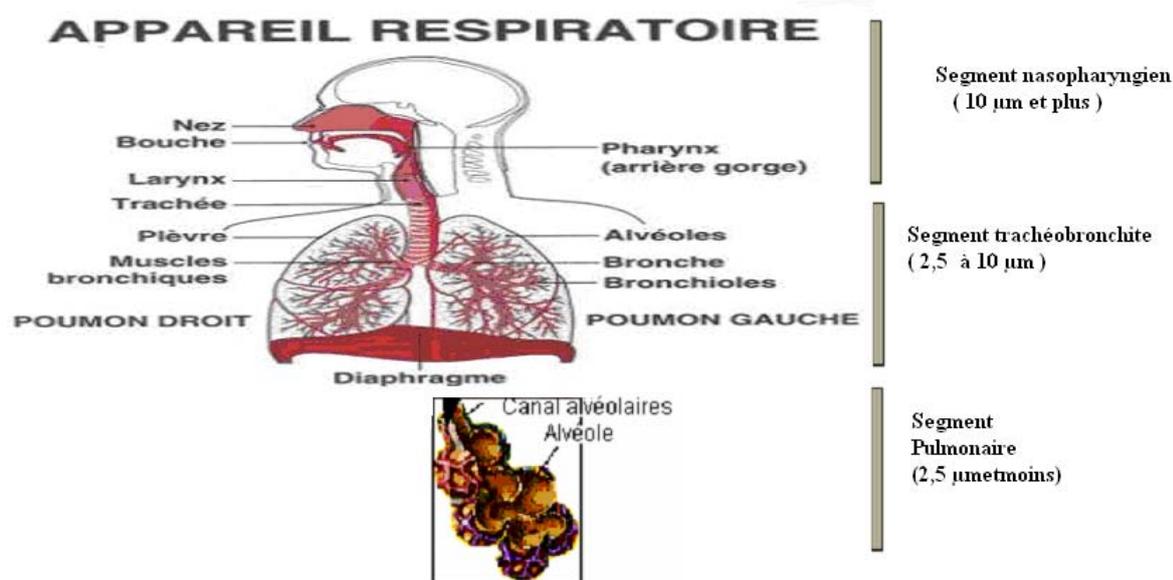


Figure II-1 : Devenir des particules atmosphériques dans l'appareil respiratoire en fonction de leur granulométrie [15].

II-3 Mécanismes de Défense de l'Appareil Respiratoire :

Ouvert sur l'extérieur, le système respiratoire est un des plus vulnérables ; il est menacé par toutes les agressions et pollutions : les gaz, les poussières et particules inertes, les corpuscules vivants (bactéries, virus, spores de champignons, grains de pollen) en suspension dans l'air inspiré [20].

Vis-à-vis des agressions, il dispose heureusement de systèmes de défense adaptés aux différents agents. Ces systèmes de défense sont mis en service et développés au contact d'un agresseur ; ils montrent alors leur pleine efficacité, mais en cas d'agression massive ou prolongée, ils peuvent être débordés et laisser agir l'agresseur. En outre un polluant particulier peut inhiber ces défenses naturelles et ouvrir ainsi la porte à d'autres agressions [3].

Différents mécanismes de défense pulmonaire sont mis en oeuvre ; ils sont de nature physique, immunologique et biochimique [3 et 21] :

- ***Les défenses mécaniques :*** Elles agissent différemment dans les deux secteurs de l'arbre respiratoire ; dans le tractus respiratoire supérieur, sont traitées les particules de forte granulométrie à temps de rétention court (filtration dans les

fosses nasales) tandis que le poumon profond agit sur les particules de faible dimension à temps de rétention prolongé ayant franchi le premier barrage. Les défenses sont assurées par un ensemble d'éléments cellulaires qui règlent les mouvements des fluides transportant les particules déposées : c'est le "tapis roulant" ascendant des cils vibratiles tapissant les parois des voies respiratoires et insérés sur des cellules spéciales qui leur impriment des battements ininterrompus de sens identique pour remonter le mucus chargé vers l'extérieur et assurer son expulsion par la toux et l'expectoration. Au niveau du poumon profond, le piégeage est réalisé sur le film tensioactif assurant la béance des alvéoles pulmonaires; La lenteur de l'épuration est dans ce cas beaucoup plus grande. La défense de l'appareil pulmonaire est également physiquement réalisée par dissolution des gaz hydrosolubles (O_3 et SO_2) dans les sécrétions imbibant les muqueuses.

- **Les défenses cellulaires** : De "grosses" cellules (macrophages alvéolaires) présentes dans les alvéoles et à grand pouvoir phagocytaire migrent ensuite, avec leur charge, pour être éliminées par déglutition ou passage dans le système lymphatique. Ces macrophages sont inclus dans le film tensioactif alvéolaire qui facilite ainsi leur mobilité.
- **Les défenses immunologiques** : Les macrophages alvéolaires possèdent un arsenal enzymatique très varié (par exemple antiprotéases agissant sur les oxydants, benzopyrène hydrolase, etc.) pouvant attaquer de nombreuses structures organiques et contribuer ainsi à leur détoxification.

II-4 Affections du Système Respiratoire [1 et 3] :

Nous insisterons ici sur les affections plus spécialement en relation avec la pollution de l'air par les particules. Il faut cependant garder à l'esprit que les polluants véhiculés par l'air inspiré peuvent aggraver les tissus et les rendre plus vulnérables aux pathologies microbiennes ou inhiber totalement ou partiellement les mécanismes de défense cités précédemment, facilitant ainsi ces affections. Les atteintes du système pulmonaire se caractérisent par une diminution des performances fonctionnelles pulmonaires : capacité respiratoire.

➤ **Bronchite chronique :**

Elle est caractérisée par une toux et une expectoration persistante, manifestations caractéristiques, en particulier, chez les fumeurs de cigarettes. Un excès de particules provoque une inhibition du processus mucociliaire; l'accumulation du mucus ralentit le rythme de nettoyage, et l'augmentation permanente ou intermittente du mucus bronchique entraîne son expectoration. On peut ainsi induire des réactions inflammatoires chroniques (trachéo-bronchites). La bronchite chronique peut être entretenue par des irritations chimiques causées principalement par la fumée de cigarette et certains polluants atmosphériques.

➤ **Pneumoconioses et fibrose pulmonaire :**

Les particules de l'air peuvent, en fonction de leur taille, pénétrer plus ou moins profondément dans l'arbre pulmonaire; Les plus fines parviennent jusqu'aux alvéoles où les macrophages cherchent à les phagocyter et les "métaboliser", en vain, s'il s'agit de composés minéraux. L'hypersécrétion correspondante des macrophages crée des fibroses. Les fibres de collagène assurent l'ossature des cellules pulmonaires ; un développement anormal de ces fibres dans les interstices alvéolaires réduit-leur capacité volumique et leur élasticité. Les fibroblastes engendrant le collagène produit en excès sont stimulés par des sécrétions des macrophages en réponse à des agressions extérieures comme celles dues à l'ozone.

Ces manifestations interviennent essentiellement en milieu fortement empoussiéré (silicose des mineurs); elles ne concernent donc pas la pollution ambiante.

➤ **Asthme :**

L'asthme se caractérise par des « crises d'essoufflement », crises spasmodiques plus ou moins intenses, séparées par des périodes de respiration normale. Cette obstruction passagère des voies respiratoires est heureusement réversible. Un des types d'asthme résulte de manifestations allergiques. Il n'est cependant pas toujours facile d'établir des relations directes entre les recrudescences de crises d'asthme et les épisodes de pollution atmosphérique.

l'augmentation rapide de 100 % de la concentration moyenne des PM10 a eu pour conséquence un accroissement de 10 % des crises d'asthme chez les enfants. C'est ce que montre une étude qui a suivi pendant deux ans tous les enfants amenés au service des urgences du plus grand hôpital de Belfast pour cause d'asthme. Une autre étude, réalisée à Toronto, démontre que l'accroissement des particules fines peut déclencher des crises d'asthme chez les enfants.

➤ ***Cancers des voies respiratoires :***

Le cancer se caractérise par un développement anarchique de certaines cellules ayant échappé aux mécanismes de contrôle de l'organisme. C'est un phénomène épi-génétique substitution d'éléments du code génétique, erreur de duplication de ces éléments, décalage des séquences de l'acide désoxyribonucléique, etc. Les cellules filles issues de la division des cellules transformées présentent alors les mêmes défauts que la cellule mère et contribuent à la formation de tumeurs malignes.

Le système respiratoire n'est pas le seul concerné par la cancérogenèse. Des études épidémiologiques récentes laisseraient également soupçonner des augmentations de cas de cancers de la vessie chez des sujets professionnellement en contact avec des émissions Diesel.

II-5 Effets des Particules Fines sur la Santé [18 et 22] :

Les particules de poussières en suspension de plus de 10 μ m de diamètre sont filtrées par le nez ou s'accumulent dans la gorge. Les particules plus petites parviennent dans la trachée-artère et les voies respiratoires, celles de moins de 2 μ m environ pénètrent jusque dans les plus petites bronchioles et les alvéoles pulmonaires. Actuellement, des études scientifiques mesurent et analysent séparément diverses fractions de poussières en suspension: elles font une distinction entre la fraction très fine (PM2.5) et la fraction plus grossière (entre les PM10 et les PM2.5).

La fraction plus grossière se dépose dans la trachée-artère et dans les bronches, et ne pénètre pas dans les alvéoles pulmonaires. Mais elle a néanmoins des effets sur la santé, par exemple chez les personnes asthmatiques, une réaction de défense (inflammation) se déclenche à l'endroit où ces particules se déposent. L'irritation entraîne un rétrécissement des voies respiratoires et, partant de fréquentes crises

d'insuffisance respiratoire. Les particules qui se déposent sur la muqueuse des voies respiratoires doivent être éliminées par les cils vibratiles. Les particules très fines, de moins de 2µm environ qui pénètrent jusque dans les bronchioles et les alvéoles, doivent également être éliminées ou détruites par les cils vibratiles dans les bronchioles et par des macrophages dans les alvéoles. Les particules les plus fines, dites ultra fines, sont mal neutralisées par ces mécanismes et peuvent pénétrer dans le sang. De nombreuses études établissent le rapport entre la concentration des particules fines et les maladies respiratoires et cardio-vasculaires, les cancers et les décès. Des indices montrent que les fractions plus grosses sont plutôt responsables des effets aigus sur les asthmatiques, tandis que les fractions fines agissent davantage à long terme, et que les particules produites par des processus de combustion ont des actions plus défavorables que celles qui proviennent de la croûte terrestre ou de phénomènes de frottement et d'usure. Le mouvement des particules dans le corps conduit certains types de particules vers des organes cibles, d'où la fréquence plus grande de certains cancers. Enfin, l'effet de synergie des particules est très fort puisque de nombreuses particules contiennent des produits organiques toxiques ou cancérigènes (particules diesel et HAP).

II-6 Effets à court terme sur la santé [3 et 20] :

Les risques que les particules fines en suspension dans l'air font courir à la santé ont été mis en évidence dans plusieurs études sur les effets à court terme. Ces études font apparaître une forte corrélation entre les pics de pollution atmosphérique et des augmentations du nombre d'hospitalisations et de la mortalité journaliers.

Des études réalisées lors de tempêtes de poussière, caractérisées par une très forte augmentation passagère de la concentration de PM-10, tendent à prouver que les effets de la poussière naturelle sur la santé sont beaucoup plus faibles que ceux des particules issues des processus de combustion. Les études les plus récentes montrent que les PM-2,5 sont généralement un meilleur indicateur des effets sanitaires des particules que les PM-10.

Les effets des pics de concentration de PM-2,5 et de PM-10 sur la santé ont été particulièrement étudiés aux Etats-Unis. Des études européennes se sont intéressées aux particules PM10. Les conclusions de ces différentes études sont d'une constance remarquable:

elles mettent toutes en évidence une augmentation de la mortalité journalière, des symptômes d'asthme, de la morbidité et du nombre d'hospitalisations).

II-7 Effets à long terme sur la santé [20]:

Les seuls résultats disponibles sur les effets d'une exposition de longue durée aux particules fines proviennent d'études réalisées aux Etats-Unis. Dans le cadre d'une étude prospective de cohorte, on a analysé les taux de mortalité dans une population de 8 111 adultes vivant dans six villes des Etats-Unis, suivie sur une période de 14 à 16 ans (1974-1991). Entre la ville la plus polluée et la ville la moins polluée, la mortalité accusait une augmentation annuelle ajustée de 26 %. C'est avec la pollution de l'air par les particules fines (concentration moyenne annuelle comprise entre 11 et 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) que l'augmentation de la mortalité était le plus nettement associée [17].

Dans une autre étude, les relations entre les données relatives à la pollution annuelle de l'air relevées en 1980 dans 51 agglomérations des Etats-Unis et les facteurs de risque individuels ont été analysés pour plus d'un demi-million d'adultes. Les décès survenus entre 1982 et 1989 ont été enregistrés. Entre les agglomérations les plus polluées et les moins polluées, l'augmentation annuelle ajustée de la mortalité a été de 17 %. Un lien a été mis en évidence entre la concentration moyenne annuelle de particules fines (comprise entre 9 et 34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et la mortalité due à des affections cardio-pulmonaires et à des cancers du poumon, mais pas à d'autres causes.

Une étude sur les effets à long terme de la pollution menée dans 86 agglomérations des Etats-Unis a porté sur près de quatre millions de bébés nés entre 1989 et 1991. Le taux de mortalité enregistré chez les enfants âgés de 1 à 12 mois a été mis en parallèle avec la pollution moyenne par les PM-10. Durant les deux premiers mois de la vie de chaque bébé, une augmentation ajustée de la mortalité de 10 % a été constatée entre le groupe le plus exposé et le groupe le moins exposé. Cette augmentation était associée à des affections d'origine respiratoire. Le nombre de cas de mort subite du nourrisson a augmenté de 24 %.

Les études épidémiologiques décrites ci-dessus ne permettent pas d'établir l'existence d'un niveau-seuil en dessous duquel l'exposition aux particules fines pourrait être considéré comme sans danger. Il est donc légitime de supposer que les effets préjudiciables à la santé

commencent à se manifester dès que la concentration des particules fines est supérieure à zéro et qu'ils augmentent proportionnellement à leur concentration moyenne annuelle [20].

II-8 Effets des Aérosols sur l'environnement :

➤ *Effets des particules sur les matériaux et la végétation :*

Les effets des particules sur les matériaux ont été sommairement étudiés dans le cas des métaux, du bois, de la pierre, des surfaces peintes, du matériel électronique et des tissus.

Le dépôt de particules sur ces éléments peut causer une salissure et une décoloration et réduire, par conséquent, leur attrait esthétique. L'exposition aux particules peut également causer une dégradation physique et chimique des matériaux; c'est notamment le cas des particules acides. A coté de la corrosion des matériaux, une autre forme d'impact de la pollution atmosphérique sur le cadre bâti est constituée par le phénomène de salissure de la surface des matériaux du fait des dépôts de particules. Les particules fines, et notamment les particules émises par les moteurs diesel, paraissent particulièrement efficaces et ils peuvent infiltrer à l'intérieur des habitations et provoquent la salissure des murs, plafonds, tapis,...etc. Cette dégradation du bâti (bâtiment, monuments historiques,...) est l'effet le plus visible. Des relations mathématiques entre la diminution du réfléchissement d'une peinture blanche et la teneur en particules suie ont été établies [6 et 15].

L'effet le plus évident des retombées de particules sur la végétation est l'étouffement physique de la surface foliaire. La plante reçoit ainsi moins de lumière, ce qui entraîne une diminution de la photosynthèse. Les stomates (orifices microscopiques à la surface des feuilles) peuvent également être obstrués par les particules. Par ailleurs, la composition chimique des particules peut également avoir son importance, en agissant sur la plante directement ou par l'intermédiaire du sol.

Enfin, l'accumulation de particules à la surface des feuilles peut accroître la sensibilité de la plante aux maladies [2].

➤ **Le principal effet des particules sur la réduction de la visibilité** : (impact esthétique sur l'atmosphère). Outre ces effets directs des particules sur l'environnement, on observe des effets indirects liés à l'acidité des particules. La plupart des gens tendent à associer la réduction de la visibilité à une mauvaise qualité de l'air, mais bon nombre ne savent pas que ce sont surtout les particules fines en suspension dans l'air qui sont responsables de la visibilité réduite.

Le principal effet de ces particules est de réduire la distance à laquelle on peut distinguer la couleur, la luminosité et la forme des objets distants. Cette visibilité réduite résulte du fait que les particules en suspension dans l'air diffusent et absorbent la lumière. Cet effet est le plus efficace dans le cas des particules dont le diamètre se situe entre 0,3 et 0,7 μm (PM-2,5), mais les particules grossières contribuent également à la réduction de la visibilité. Comme les particules les plus fines sont surtout d'origine anthropique, on peut conclure que la réduction de la visibilité découle surtout de l'activité humaine. La composition chimique et la taille des particules influent sur la capacité de ces dernières à disperser la lumière. Les sulfates et les nitrates, composantes importantes des particules PM-2,5, dispersent très efficacement la lumière et contribuent grandement à la réduction de la visibilité. Les composés organiques sont beaucoup moins efficaces à cet égard.

Enfin, l'humidité relative est un autre facteur important : Plus elle augmente, plus la capacité des particules à disperser la lumière augmente également. On peut donc s'attendre à ce que la visibilité affiche des variations saisonnières et géographiques dues aux conditions climatiques et aux fluctuations de la concentration et de la composition des particules[3, 6 et 15].

➤ **Impact des Aérosols sur le Climat[20]** :

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 leur couleur. 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 [15].

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 d'autres sont moyennement solubles comme les acides organiques (composés hydrophiles).

Enfin d'autres, comme les HAP, sont totalement insolubles (composés hydrophobes). Les premiers confèrent à l'aérosol un comportement de noyaux de condensation de nuages (CCN). En revanche les derniers, en ne captant pas l'eau atmosphérique, défavorisent la formation des nuages [15].

Chapitre III :
les Méthodes de Mesure et d'Analyse des
Aérosols

III-1 Introduction :

La collecte et la mesure des aérosols constituent des manipulations délicates car, au contraire des méthodes employées pour des gaz, il existe peu de méthodes définitivement homologuées pour les aérosols. Il est important néanmoins de connaître les méthodes existantes [1]. Comme l'impact des aérosols sur la santé humaine ou sur le climat dépend essentiellement de la taille des particules, où ces méthodes permettent de déterminer la granulométrie des aérosols et sur celles permettant de connaître les relations entre la taille et la composition chimique des particules [23].

III-2 Méthodes d'échantillonnage [1, 23 et 24] :

La collecte correcte d'un aérosol est toujours difficile, et elle est beaucoup plus délicate que la collecte des gaz. Il est nécessaire d'obtenir un échantillon représentatif quel que soit le mode de prélèvement. Pour cela, il faut éviter :

- **Le fractionnement des particules** (certaines particules risquent de n'être pas recueillies) ;
- **La présence de coudes dans les canalisations ;**
- **Les artefacts chimiques** : C'est à dire les réactions catalysées par la surface de collecte des aérosols.

Des pertes peuvent aussi se produire en raison des charges électrostatiques déposées sur le filtre ou du colmatage de celui-ci, si le prélèvement est trop long, etc. L'efficacité globale de l'échantillonnage est liée :

- **A la géométrie de l'appareil ;**
- **A la vitesse du vent ;**
- **A la charge du filtre ;**
- **Au débit de la pompe employée.**

Le protocole de prélèvement d'un aérosol doit être très précis et tenir compte de tous ces paramètres. A défaut d'un prélèvement strictement exact, on se contente souvent d'un prélèvement contrôlé et reproductible, afin de pouvoir comparer les résultats. En pratique, on prélève

- **La totalité des particules (TSP : Particules totales en suspension) ;**
- **La fraction de taille inférieure 10 μm , dite PM –10 ;**
- **La fraction de taille inférieure 2,5 μm dite PM- 2,5 ;**
- **La fraction de taille inférieure 1,0 μm dite PM –1.**

➤ **Systèmes de filtration totale :**

L'air traverse un filtre et les particules sont interceptées par ce filtre. Le pompage est assuré par des pompes dont le débit est très variable. Il est compris entre 1 l.mn⁻¹ et 100 m³h⁻¹

1. Filtres :

On emploie divers types de filtres dont l'efficacité diffère suivant leur nature et leur texture. L'efficacité est supérieure à 90% pour la plupart des filtres. Le choix du filtre est effectué en fonction des composés à analyser par la suite. Les filtres les plus couramment utilisés sont:

- **Les filtres en cellulose :** Utilisables lorsque l'on veut analyser la matière minérale.
- **Les filtres en fibre de verre ou en fibre de quartz :** pour tout type de composé, dont les composés organiques.
- **Des filtres en téflon ou en fibre de verre enrobée de téflon :** permettant d'analyser ensuite la matière organique. Les filtres en fibre de verre ou en téflon résistent à l'action des solvants organiques contrairement aux filtres en cellulose.

➤ **Appareils de filtration :**

Il existe deux types de systèmes de prélèvements (Figure III-2).

- **Les échantillonneurs à faible volume :** (Débit de 1 à 20 L.mn⁻¹) utilisés pour les mesures à l'émission ou en milieu pollué.
- **Les échantillonneurs à grand volume :** (HIVOL ou HVS; Débit d'environ 70 m³.h⁻¹). Ces appareils sont utilisés pour les mesures en ce site peu pollué ou pour effectuer des prélèvements courts. L'échantillonneur HIVOL est placé dans un abri afin de protéger le filtre de la pluie et de la lumière solaire directe.

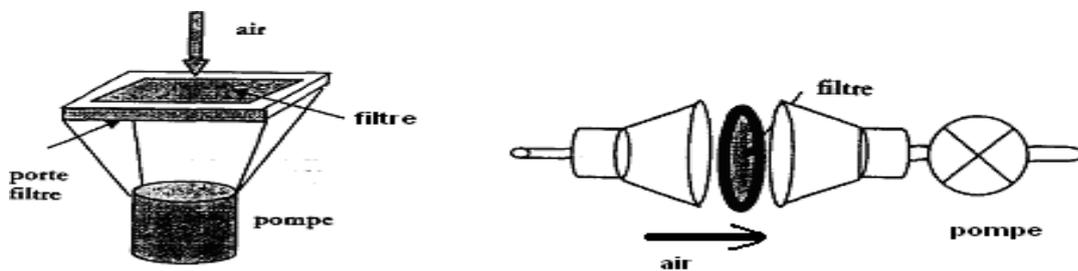


Figure III-2 : Système à grand volume (à gauche) et à petit volume (à droite) [3].

Le filtre peut être précédé d'un cycloséparateur destiné à éliminer les particules de grosses tailles qui ne présentent pas d'intérêt et qui surchargent inutilement le filtre. Les cyclones préséparateurs ont pour principe un vortex produit dans le tube d'entrée de l'air. L'air entre dans le tube perpendiculairement à l'axe de celui-ci et est entraîné par un tourbillon. Les particules les plus lourdes sont déposées au fond du cyclone, tandis que les plus fines ressortent en haut de l'appareil (Figure III-3).

On détermine un diamètre de coupure correspondant à l'élimination des particules de taille supérieure à une taille nominale. Le plus souvent on utilise des séparateurs PM-10 ou PM 2,5 qui sélectionnent les particules dont la taille est inférieure à 10 ou à 2,5 μm .

Rappelons que la majorité de la matière toxique, ou intervenant dans les réactions chimiques, est présente sur des particules de taille inférieure à 2,5 [23].

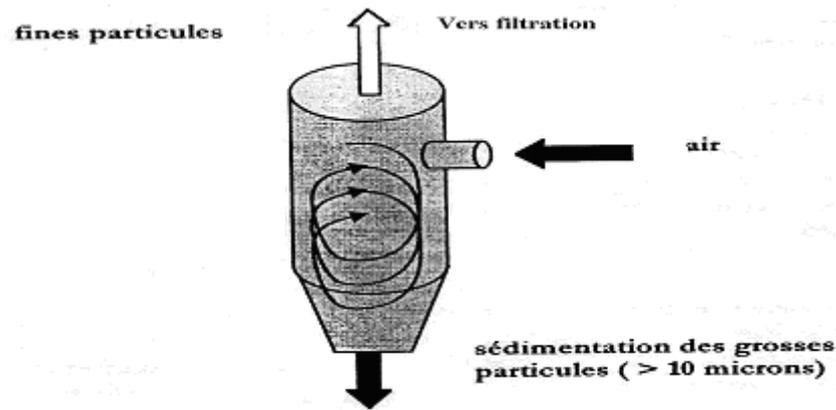


Figure III-3 : Cycloséparateur de taille de particules (tête PM-i) [3].

III-3 Mesure des paramètres physiques des particules [24] :

III-3-1 Détermination de la masse des particules :

➤ Pesée :

Après conditionnement du filtre, à température et à l'humidité constante, on pratique le plus souvent une pesée de façon à connaître la quantité de *TSP* déposée sur le filtre. Cette méthode est la moins coûteuse et la plus rapide, mais elle comporte beaucoup de risques. Entre le conditionnement au laboratoire, l'échantillonnage sur le terrain et la pesée de retour au laboratoire, les pertes peuvent être importantes. La principale difficulté réside dans la constance de l'humidité lors de pesées avant et après filtrations.

➤ Mesure par rayonnement [15]:

On interpose le filtre, chargé de particules, sur le trajet d'un rayonnement β émis par une source radioactive (**souvent du Krypton 85**). Le rayonnement est atténué en traversant le filtre et cette atténuation est proportionnelle à la quantité de matière traversée, donc à la masse de particules:

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu \cdot X) \quad (17)$$

Avec :

X l'épaisseur traversée et μ un coefficient d'atténuation proportionnel à la densité

des particules.

On mesure l'émission radioactive :

- En l'absence de filtre → blanc donnant la valeur I_0
- Avec le filtre → mesure donnant la valeur I .

La mesure exacte n'est possible que si le filtre est chargé uniformément et sans épaisseur exagérée

L'appareil jauge β travaille selon ce principe

➤ **Détermination de la forme des particules :**

On détermine la forme des particules par microscopie électronique à balayage (MEB), pour des particules de taille comprise entre 0,001 et 1,0 μm (Figure III-1). La couche sur le filtre doit être une quasi-mono couche. Ceci est donc possible si le filtre est peu chargé. En général on ne peut ensuite effectuer d'analyse chimique car le bombardement électronique produit des dégradations de matière organique et volatilise certains composés [2].

Aérosol carboné.



Forme variable

Aérosol de sulfate.



Forme sphérique

Figure III-6 : Formes de particule [2].

III-3-2 Détermination du nombre de particule :

Le nombre de particule est déterminé par diffusion d'une lumière incidente sur les particules. Le coefficient de diffusion b_p est lié au nombre de particule de façon linéaire.

Pour mesurer ce coefficient on utilise un compteur à diffusion qui mesure la lumière sous tous les angles.

On détermine le nombre de particules si on connaît le coefficient total de diffusion b_{tot} et le coefficient b_g du aux gaz seuls (pour l'air filtré, b_g est égal à $2,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ à 460 nm). Par différence on détermine le coefficient de diffusion b_p lié aux particules, soit :

$$b_p = b_{\text{tot}} - b_g. \quad (18)$$

Certains paramètres peuvent affecter le coefficient de diffusion tels que la composition chimique et l'humidité relative si celle-ci est supérieure à 70% [24].

➤ **Compteurs optiques :**

Les aérosols diffusent la lumière. La diffusion dépend de l'indice de réfraction et de la taille des particules. En admettant que les particules soient sphériques, on peut calculer - pour diverses longueurs d'onde et angles d'incidence - la lumière diffuse. Ceci est valable pour un indice de réfraction donné, donc pour un type de particules donné. Le calibrage nécessite l'emploi d'un aérosol de même indice de réfraction.

L'appareil couramment utiliser est le compteur dit GRIMM, du nom de son inventeur. Il permet de déterminer le nombre de particules par unité de volume d'air, pour 15 classes de particules de tailles comprises entre 0,3 et 20 μm .

➤ **Compteurs de noyaux de condensation :**

Ces compteurs très voisins des compteurs précédents par leur principe, sont dédiés à la mesure des fines particules (de 0,001 à 0,05 μm).

Le principe: on injecte de très fines particules dans un air sursaturé de vapeur d'eau ou d'alcool (butanol ou propanol). Les vapeurs se condensent pour former des gouttelettes. Par expansion adiabatique de la chambre de mesure, on crée un refroidissement brutal et donc une condensation. Les particules grossissent car elles sont enveloppées de liquide. Elles sont alors suffisamment grosses pour qu'une mesure soit possible.

III-4 Méthode d'analyse chimique [1, 3 et 24] :

Il n'existe pas, comme pour les gaz, des méthodes générales bien adaptées à l'analyse des aérosols. Les méthodes sont presque toujours des méthodes différées dans le temps, par rapport à la collecte. A l'heure actuelle, Il n'existe aucune mesure globale automatique. Les artifices de collecte sont toujours possibles et la non universalité des méthodes favorise

l'analyse de certains composés au détriment d'autres. Dans tous les cas les méthodes diffèrent pour l'analyse de la phase minérale et de la phase organique.

III-4-1 Analyse de la matière organique[1] :

➤ **Extraction de la matière organique :**

En général, on extrait la matière organique du filtre, par une extraction ultrasonique, à l'aide de solvants organiques polaires et/ou non polaires. L'extrait est concentré, soit par évaporation à l'évaporateur rotatif, soit par passage d'un débit d'azote sec, puis il est éventuellement purifié par passage sur une colonne chromatographique.

Les échantillons recueillis correspondent aux diverses fractions différentes par leur polarité. On trie ainsi l'échantillon par familles chimiques. On peut aussi procéder à une chromatographie d'exclusion sur gel de silice, destinée à trier les composés suivant leur masse moléculaire.

En fin, l'extrait est repris dans un autre solvant organique compatible avec l'analyse finale.

➤ **Analyse chromatographique [22 et 23] :**

L'analyse proprement dite des fractions organiques est effectuée par :

▪ **Chromatographie en phase gazeuse (CPG) :**

-On emploie le plus souvent un détecteur universel comme le FID (*flamme ionisation detector*).

- Pour les composés soufrés on emploie un détecteur spécifique FPD (*flame photometric detector*).

-Pour les composés halogénés et les pesticides on emploie un détecteur à capture d'électrons ECD (*electron capture detector*).

On couple souvent la GC à un spectromètre de masse.

▪ **chromatographie liquide (HPLC) :**

Couplée à un détecteur UV ou de préférence, fluorescence à l'HPLC est utilisée pour l'analyse des hydrocarbures aromatiques lourds (HAP).

Cette méthode peut être complétée par un dérivatisateur permettant à l'aide d'une réaction chimique appropriée. À la sortie de la colonne d'élution, afin de rendre le produit

fluorescent, donc de permettre une quantification des traces, puisque la fluorescence est une méthode ultra sensible. C'est le cas des nitro HAP non fluorescents qui sont réduits en amino HAP, très fluorescents, après passage de la solution extraite sur une colonne catalytique réductrice.

III-4-2 Analyse des éléments inorganiques et des métaux [23]:

➤ *Fluorescence X* :

Un faisceau, émis par une cathode spécifiquement pour choisir l'analyse d'un élément, est dirigé directement sur le filtre, sans traitement préalable. L'intensité du rayonnement émis est proportionnelle à la concentration de l'élément.

Cette mesure est rapide et permet l'analyse de nombreux échantillons, même peu chargés en matière particulaire.

Elle nécessite néanmoins un étalonnage fréquent avec des filtres sur lesquels on dépose des solutions de titre connu, contenant l'élément recherché en concentration variable.

La méthode est quantitative mais réservée aux éléments plus lourds que le magnésium.

➤ *PIXE et Activation Neutronique* [23]:

Ces méthodes sont proches de la fluorescence X. Seule l'agent excitateur change. L'échantillon est bombardé par des protons dans la spectroscopie PIXE (*photon induced X electron*) ou par des neutrons en activation neutronique. Les éléments sont excités, induisant un rayonnement X. On mesure la radioactivité induite par l'échantillon excité. Le rayonnement utilise les longueurs d'onde « discrètes » spécifiques de chaque élément.

Ces méthodes sont complémentaires de la fluorescence X, car les éléments ne pouvant pas être analysés par une méthode le sont correctement par une autre.

➤ *Absorption atomique* [23] :

Cette méthode est largement employée pour l'analyse des particules. Elle nécessite un traitement et une destruction préalable du filtre par attaque acide. L'échantillon en solution est vaporisé dans une flamme. Un faisceau lumineux produit par une lampe

spécifique, traverse la flamme et atténue proportionnellement à la concentration de l'élément présent dans la flamme, suivant la loi de Beer Lambert. On peut aussi utiliser un four à la place d'une flamme.

➤ **ICP :**

La méthode par torche à plasma - appelée ICP - permet de déterminer les concentrations de presque tous les éléments inorganiques et métaux. Les éléments sont ionisés par une torche à plasma.

III-4-3 Analyse des ions [1 et 23] :

➤ **Colorimétrie :**

La méthode colorimétrique donne des résultats valables pour des ions, tels que les sulfates, nitrates ou les ions ammonium. Ainsi les nitrates sont réduits en nitrites par l'hydrazine en présence de cuivre : Le dérivé azoïque formé est mesuré à 524 nm.

➤ **Chromatographie ionique (CI) :**

Cette méthode est maintenant très employée. Elle permet l'analyse rapide de tous les ions simultanément. Les ions sont détectés par la mesure de leur conductivité électrique. Les sulfates et nitrates sont séparés sur une colonne basique par élution avec une solution de carbonate de sodium. On utilise un suppresseur qui est constitué d'une colonne contenant une résine imprégnée d'acide fort, permettant la conversion des carbonates en CO_2 et H_2O et celles des nitrates et sulfates en acides de haute conductivité.

Les appareils se présentent comme des appareils de HPLC avec colonne et solvants. Ceux-ci sont aqueux et contiennent des tampons.

Chapitre IV:
Méthodologie

IV-1 Site de Prélèvement :

Pour étudier l'ampleur de la pollution de l'air par les diverses classes granulométriques des aérosols dans l'agglomération d'Alger, et afin de compléter les études antérieures [2, 6 et 25], nous avons retenu un site qui d'après la classification européenne constitue un site de type « semi urbain » [26], c'est-à-dire un site qui n'est pas directement influencé par les émissions issues du trafic routier.

Un tel site permet d'accéder aux teneurs maximales auxquelles peut être exposée une population en milieu semi-urbain. Le site de mesure choisi est situé à Dely-Brahim à l'intérieur du campus de l'ISMAL (Photo IV-1). En ce site, le poste de prélèvement est implanté à 2 m d'altitude et à environ 100 m du bord de la route (Photo IV-2 et IV-3). Ce site est entouré en partie par une forêt et par les cités universitaires et surplombe une cité résidentielle.

IV-2 Mode de prélèvement [2, 6 et 15] :

Pour les prélèvements par classe granulométrique, un échantillonneur à fort débit, le HVS-PM-10 équipé d'un cascadeur Sierra-Andersen (marque Graseby, USA) à 4 étages a été utilisé.

Ce dispositif illustré en (figure IV-1, IV-2) est composé essentiellement de trois parties :

- Le High Volume Sampler (HVS) qui représente le corps de l'échantillonneur ; il se compose principalement :
 - D'une turbine d'aspiration d'air ;
 - Des étages de sélection qui servent de porte filtres et qui permettent le tri par impaction des particules selon leur taille ;
 - D'un contrôleur électronique de débit, le MFC (Mass Flow Controller), qui permet de maintenir constant le débit d'aspiration d'air. En cas de colmatage du média filtrant, le MFC agit sur la puissance de moteur par ajustage électronique du voltage.

- La Tête sélective PM-10 qui constitue la zone où le fractionnement à 10 μm se fait par impaction directe. Cette impaction repose sur l'effet aérodynamique induit par la présence de 9 buses circulaires placées au-dessus d'une surface lisse d'impaction. Les particules inférieures au seuil de coupure de 10 μm sont entraînées par le flux de l'air dans les buses et sont collectées sur le filtre. Tandis que les particules plus

grosses s'écartant du flux et impactent sur la surface plane d'impaction en raison de leur inertie plus élevée.

Afin d'éviter le réentraînement des particules grosses, la surface d'impaction est graissée par l'huile de silicone et est nettoyée régulièrement.

- Le Cascadeur d'Anderson qui permet d'avoir un prélèvement de particules par fraction granulométrie, est équipé de quatre étages et permet d'accéder aux 5 classes granulométriques suivantes : 10 à 7 μm , 7 à 3 μm , 3 à 1,5 μm , 1,5 à 1 μm et la classe finale inférieure à 1 μm (Figure IV-2).

Nous présentons en (Figure IV-1) un schéma simplifié du mode d'échantillonnage. Le débit de prélèvement est fixé à 1 m^3/mn . La durée de prélèvement est de 24 heures. Les particules sont collectées sur des filtres membranes en fibre de verre de type whatman de dimension 20×25 cm pour le filtre final et 14×15 cm pour les filtres des étages du cascadeur. Les filtres sont pesés avant et après chaque prélèvement à 0.1 mg près et les teneurs atmosphériques en PM-i sont exprimés en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

IV-3 Traitement et analyse des particules prélevées :

Afin d'analyser les métaux lourds qui sont véhiculés par les PM-10, on procède à une minéralisation des échantillons des particules collectées.

La minéralisation acide a lieu conformément à la norme ISO 9885 [27]. Le filtre chargé de particules est introduit dans un ballon de 250 ml contenant 40 ml d'acide nitrique concentré et quelques 10 ml d'acide chlorhydrique.

La solution est alors portée à ébullition sous reflux pendant deux heures. Après évaporation partielle, une seconde minéralisation est effectuée dans les mêmes conditions. On évapore ensuite à sec et après refroidissement, le résidu est repris dans 20 ml d'eau distillée. Le minéralisât est ensuite filtré sur filtre Whatman pour retenir les impuretés insolubles (carbone noir, silicates) etc. Le filtrat est transféré dans une fiole jaugée, puis ajusté avec de l'eau distillée à un volume de 20 ml. Un filtre vierge va subir la même procédure pour servir de blanc.

Les métaux lourds Pb, Fe, Mn et Cd, sont alors analysés par spectrophotométrie d'absorption atomique. Sur un appareil de type SOLAAR.



Photo IV-1: Image satellitaire du poste de mesure à l'institut ISMAL de Dely-Brahim (Alger).



Photo IV-2 : Vue générale du poste de mesure à l'institut ISMAL de Dely-Brahim (Alger).



Photo IV-3 : Vue générale du poste de mesure à l'institut ISMAL de Dely-Brahim (Alger).

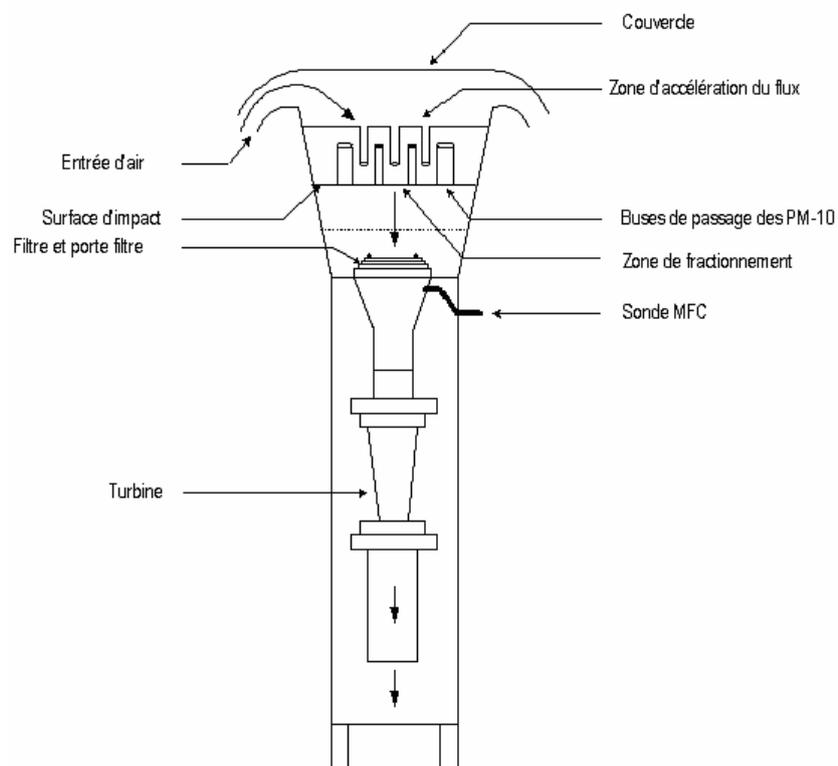


Figure IV-1 : Schéma du principe de collecte des PM –10 par l'échantillonneur HVS–PM–10[15].

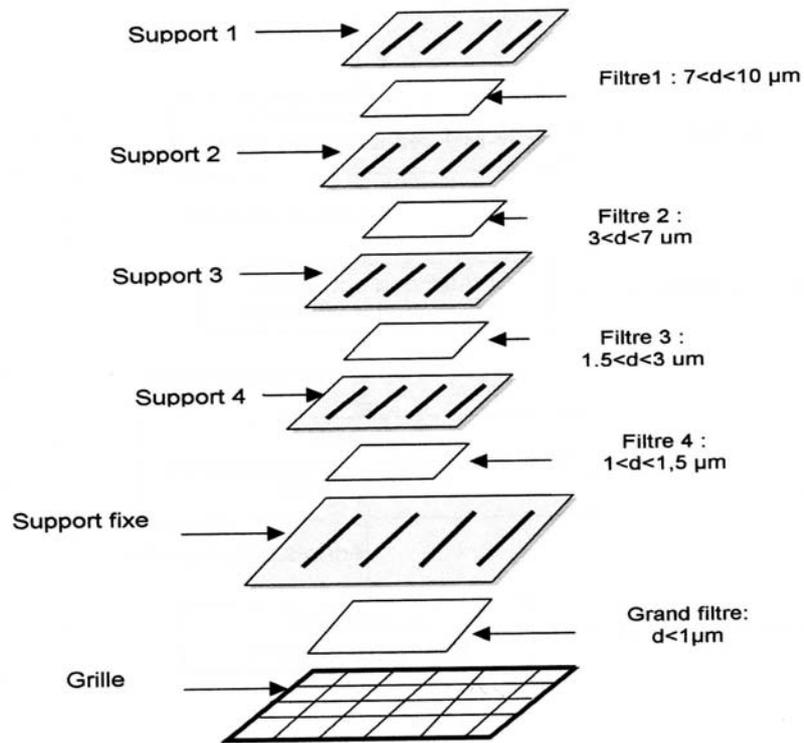


Figure IV-2 : Etage du cascadeur d'Anderson et classes granulométrie [3].

Chapitre V :
Résultats et discussions

L'étude de la pollution de l'air par les particules fines PM-i (i = 1, 3, 10) à Dely-Brahim au Sud d'Alger a été effectuée durant la période allant du 28 Avril à 19 Juin 2007, à raison de deux à trois prélèvements journaliers par semaine. Ce suivi nous a permis de collecter 43 fractions granulométriques.

Qualitativement on constate que les filtres recueillis sont peu chargés et ne présentent pas une couleur très foncée comme c'était le cas lors des études antérieures en site urbain. Ceci signifie que les suies et d'imbrûlées issues de la combustion ne sont pas abondantes en ce site.

V-1 L'évolution temporelle des teneurs atmosphériques en PM-i :

L'évolution temporelle des teneurs en PM-i (i = 1, 3, 10) est illustrée en Figure V-1 et V-2. Le tableau V-1 résume les teneurs extrêmes, les valeurs moyennes et les écarts types ainsi que les rapports PM-i/PM-10 observés en ce site semi urbain.

La teneur minimale enregistrée pour les PM-10 est de 13,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, tandis que le maximum s'élève à 38,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La teneur moyenne calculée sur l'ensemble des observations est de 26,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les teneurs moyennes, pour PM-1 et PM-3 s'élèvent respectivement à 14,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 18,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tableau V-1: Teneurs moyennes et extrêmes en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ des PM-i mesurées à Dely-Brahim (Alger).

PM-i	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart type	Rapport PM-i/PM-10
PM-1	14.8	6.1	19.6	3.81	0.58
PM-3	18.1	5.0	27.9	6.63	0.72
PM-10	26.7	13.6	38.1	7.75	1

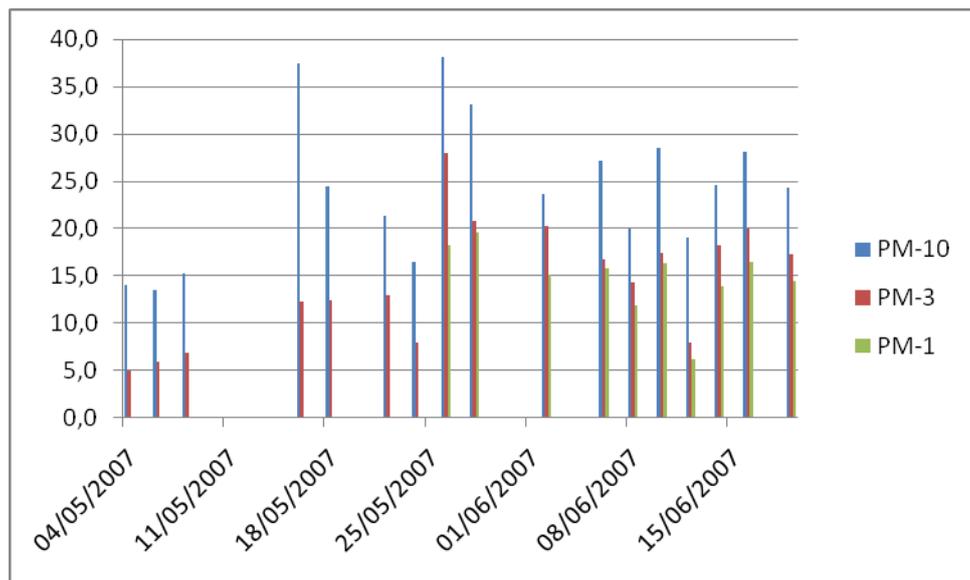


Figure V-1 : Évolution des teneurs atmosphériques en PM-i mesurées à Dely-Brahim (Alger).

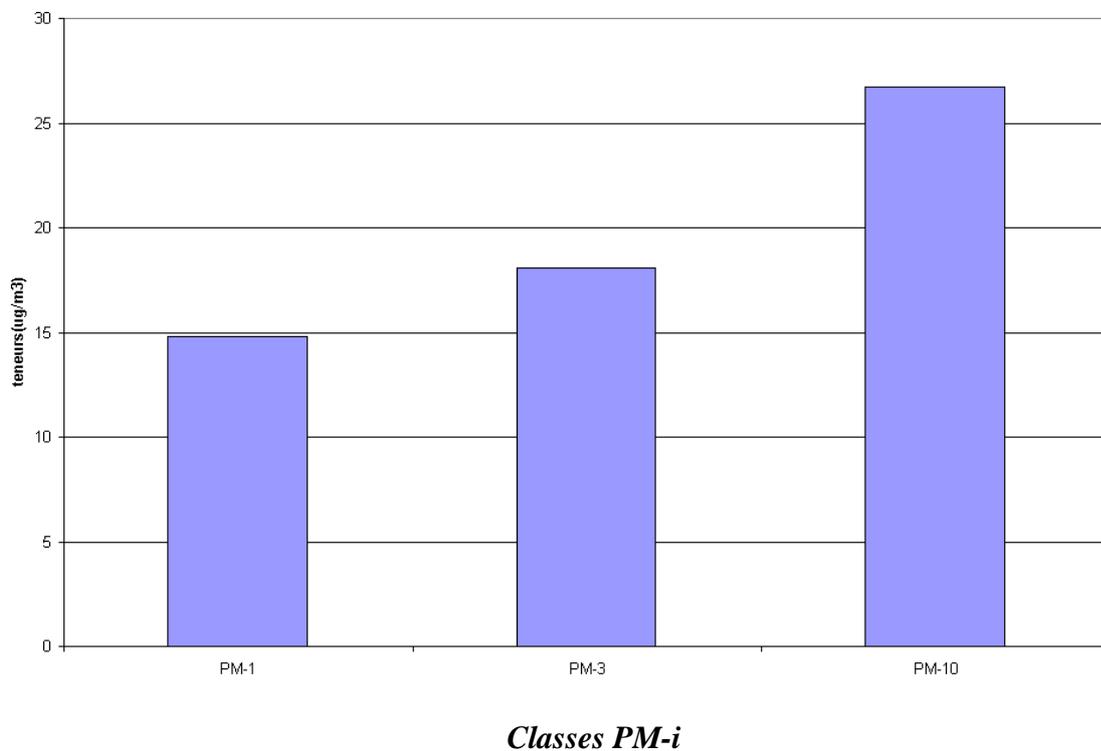


Figure V-2: Teneur moyenne des PM-i selon leur taille.

L'importance de la fourchette de variation des teneurs en PM-i est certainement due aux variations dans l'intensité du trafic routier, à l'influence des facteurs météorologiques (précipitations, vitesse et direction de vents) qui conditionnent la dispersion des particules. La vitesse du vent est un paramètre important dans l'étude des particules en suspension, car elle est en relation avec la turbulence de l'atmosphère et donc avec la dispersion de poussières. C'est ainsi que les fortes concentrations en particules coïncident le plus souvent avec les faibles vitesses de vent, la dispersion étant alors minimale [6 et 15].

Les teneurs diminuent quand la vitesse du vent augmente (meilleure dispersion des particules atmosphériques). Ceci explique en partie les faibles teneurs mesurées le 06 et 08 mai, où un vent fort balayait la région, et ce juste une journée avant l'enregistrement d'une valeur proche du maximum à $37,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cette évolution illustre la complexité du phénomène lié à plusieurs facteurs en même temps.

La pluie peut aussi contribuer à réduire les concentrations des particules dans l'air, d'une part par le lavage de l'atmosphère, mais également par le lavage des sols en diminuant la remise en suspension des particules [15].

Il est clair que le nombre de mesures effectuées est insuffisant pour mettre clairement en évidence l'ensemble de facteurs qui interagissent sur les teneurs en PM-i. Si on compare la teneur moyenne en PM-10 enregistrée durant cette étude à celle mesurée en 2006, pour la même saison de printemps au niveau d'un site urbain à Alger centre et par rapport à l'étude effectuée sur un site de proximité à l'ENP pour la période 2005-2006 [2, 15], on relève une certaine diminution de l'ordre de 58 % et 64,5 % respectivement, pour les teneurs moyennes des PM-10.

La contribution en pourcentage massique des différentes classes granulométriques à l'ensemble des particules inhalables PM-10 est illustrée en Figure V-3. Cette répartition montre que c'est surtout la fraction des particules très fines $d < 1\mu\text{m}$ qui a une fraction massique la plus élevée. On relève par ailleurs que 67% des PM-10 sont des particules alvéolaires d'un diamètre inférieur à $3 \mu\text{m}$ qui pénètrent profondément dans le système respiratoire. La fraction thoracique (PM-3 à $10 \mu\text{m}$) qui est constituée généralement de particules terrigènes ne constitue que le tiers des PM-10.

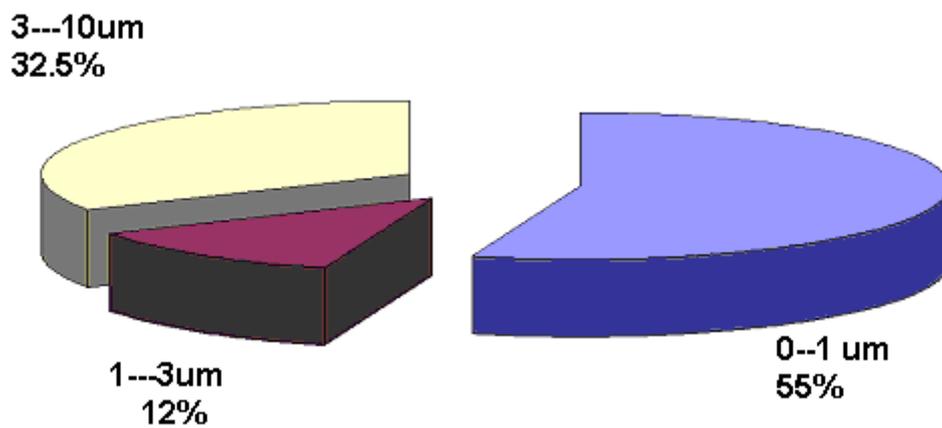


Figure V-3 : Répartition Massique des particules collectées selon leur classe granulométrique.

V-2 Calcul du diamètre médian d_{50} et la teneur en PM-2.5 :

A partir des données expérimentales, il est possible de déterminer [2] :

- Le diamètre d_{50} de la masse médiane qui correspond au diamètre de la fraction granulométrique ayant 50% de la masse des PM-10. Ce paramètre 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 particules respirables, les PM-2.5. Dans le cas de notre échantillonneur, cette fraction n'est pas accessible directement par voie expérimentale puisque le cascadeur ne donne que la fraction PM-3 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.

➤ ***Diamètre médian « d_{50} » :***

La détermination du diamètre d_{50} peut se faire graphiquement en portant sur un diagramme log-probabilité, le diamètre d_i 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 de la

distribution granulométrique des particules. On montre en effet que la densité de probabilité est une distribution log-normale entre le diamètre des articles et la distribution de leur masse[15].

Pour construire le graphe log-probabilité, nous résumons en Tableau V-2 les données recueillies par fractionnement granulométrique.

Tableau V-2: Exploitation de données recueillies par fractionnement granulométrique.

Etage Andersen	Masse des particules collectées par étage(mg)	Masse Cumulée* en (mg)	Masse Cumulée en %	100-masse Cumulée en %	Diamètre de l'étage en (μm)
1	14.21	14.21	34.70	65.21	3
2	4.8	19.01	46.43	53.56	1
3	21.93	40.94	100	0	0.01

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

En représentant sur un diagramme log-probabilité les valeurs (100 - masse cumulée en %) en fonction du diamètre de l'étage, on obtient la droite illustrée en Figure V-4

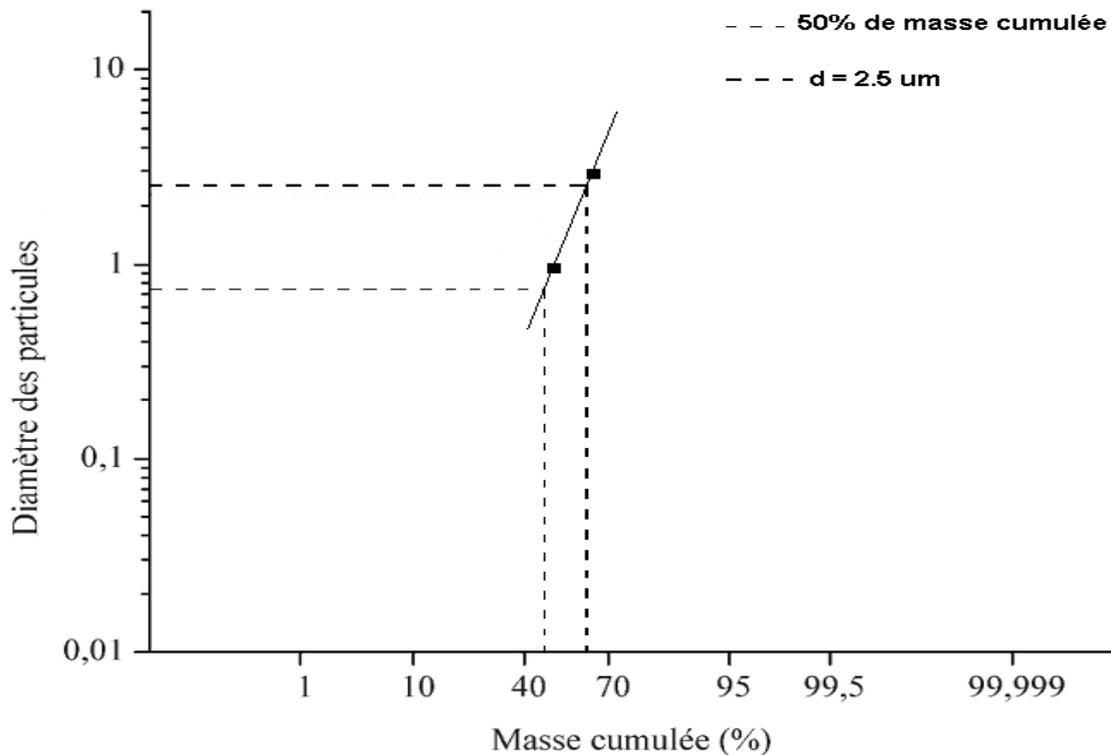


Figure V-4 : Diagramme log-probabilité de la masse cumulée des particules en fonction du diamètre.

A partir de ce graphe on tire le diamètre aérodynamique moyen d_{50} de la masse médiane:

$$D_{50} = 0,76 \mu\text{m}$$

En d'autres termes, 50% de la masse des particules PM-10 a un diamètre $\leq 0,76 \mu\text{m}$.

➤ **Teneur Atmosphérique en PM-2,5 :**

A partir du diagramme log-probabilité, on obtient pour le diamètre $2,5 \mu\text{m}$:

100–masse cumulée = 64 % → Masse cumulée = 36%.

$$\text{PM-2,5} = 0.64.\text{PM10} = 17,08 \mu\text{g}/\text{m}^3 .$$

Ainsi la teneur en PM- 2,5 s'élève à environ 94,02 % de la teneur en PM-3 mesurée expérimentalement. La mesure expérimentale des PM-3 constitue alors une bonne approximation de la teneur en PM-2.5.

En résumé les niveaux de pollution atteints durant la période étudiée sont:

- Particule inhalables PM-10 = $26,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Particules respirables PM-2,5 = $17,08 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Particules très fines PM-1 = $14.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$

La figure V-5 résume les teneurs moyennes des PM-i

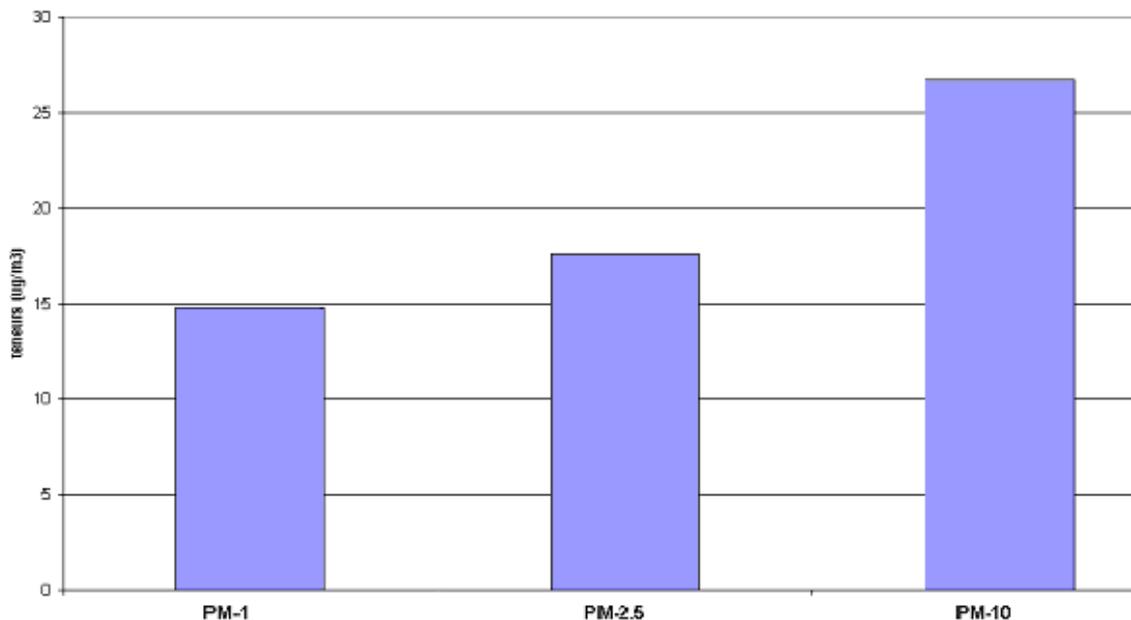


Figure V-5 : Teneurs moyennes des PM-1, PM-2.5, PM-10.

Cette figure montre qu'environ 64 % des particules inhalables peuvent atteindre les alvéoles pulmonaires et qu'environ un tiers se dépose et se fixe de manière irréversible sur les tissus alvéolaires, en provoquant l'apparition de plusieurs nuisances et où on retrouve les composés les plus toxiques tels que les métaux lourds, les HAP, les nitrates et les sulfates.

V-3 Comparaison inter sites à Alger :

Une comparaison des teneurs atmosphériques en particules fines mesurées en ce site semi-urbain avec les résultats obtenus en site urbain [15, 28] et site « station trafic » [2, 6, 25] dans l'agglomération d'Alger est illustrée en Figure V-6 à V-8.

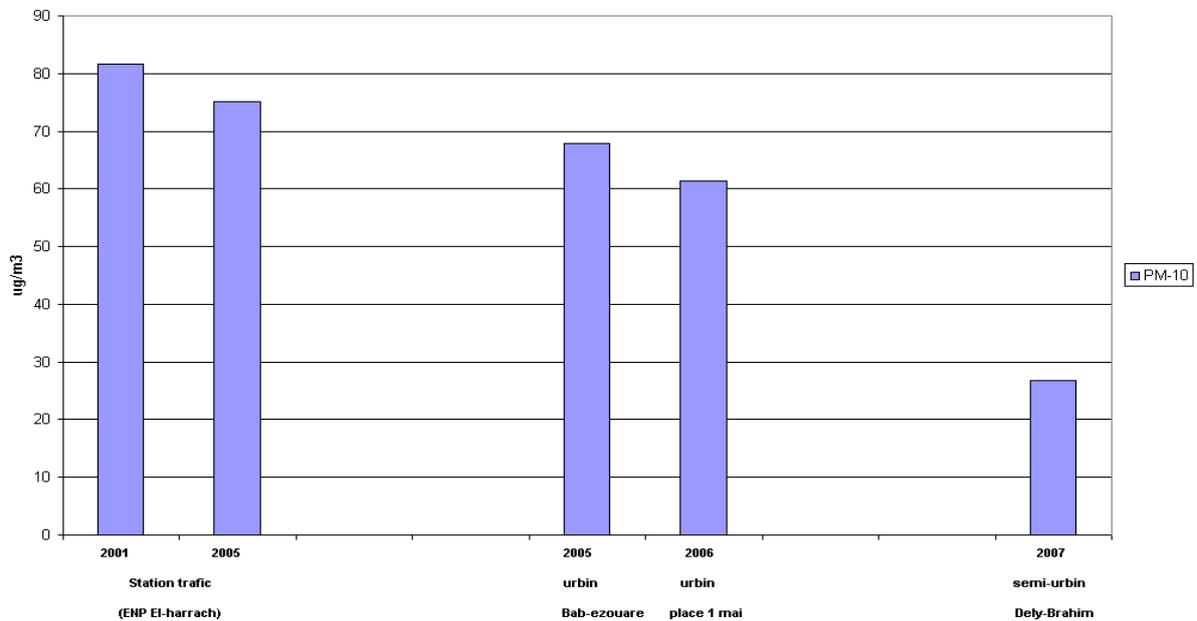


Figure V-6 : Teneurs moyennes en PM-10 mesurées en différents sites.

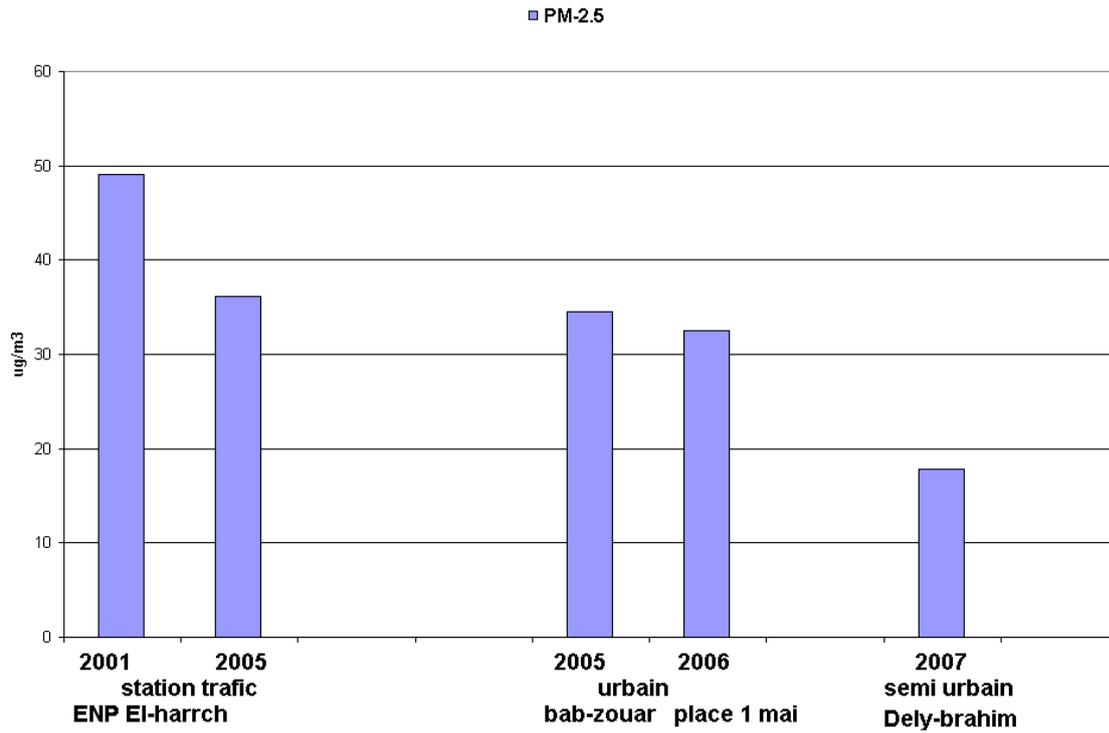


Figure V-7 : Teneurs moyennes en PM-2.5 mesurées en différents sites.

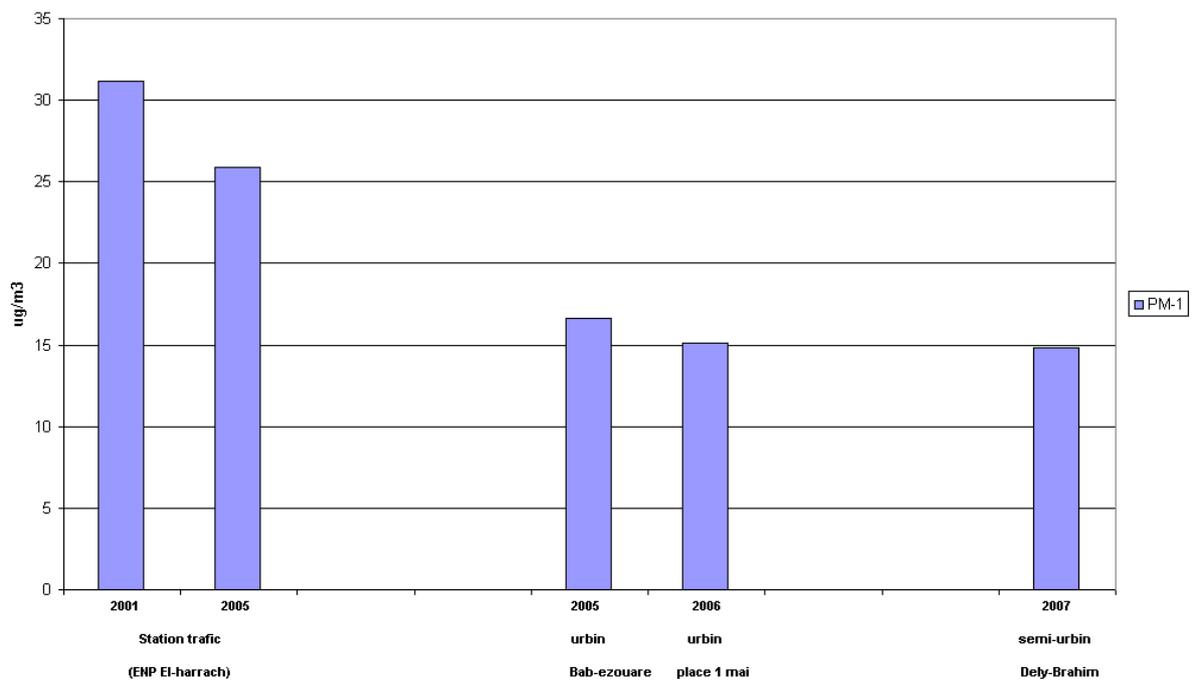


Figure V-8 : Teneurs moyennes en PM-1 mesurées en différents sites.

Il en résulte qu'en site semi-urbain, la pollution pour les PM-i est fortement réduite, les PM-10 ne constituent qu'environ le tiers des revenus mesurés sur les autres types de sites. Ceci montre clairement que l'impact de la pollution issue du trafic routier diminue lorsqu'on s'éloigne des grands centres urbains.

On note toutefois que la part des particules alvéolaires très fines est importante (60% des PM-10) quelque soit le type de site étudié.

V-4 Corrélation entre les classes PM-i :

Afin de cerner l'origine des particules collectées, il est utile d'étudier les corrélations entre les différentes classes granulométrique. Une bonne corrélation signifie qu'on est probablement en présence de la même source émettrice.

Nous illustrons en Figure V-9 à V-11 respectivement les corrélations obtenues entre les couples :

- PM-1 / particules thoraciques PM-(3-10).
- PM-3 / particules inhalables PM-10.
- PM-1 / PM-3.

On relève qu'il n'existe pas de corrélation entre les particules fines PM-1 et les particules grossières de diamètre compris entre 3 et 10 μm . Les premiers ont pour origine le trafic routier et les seconds proviennent surtout de la croûte terrestre.

Par contre, on observe une assez bonne corrélation ($R^2 = 0,743$) entre les PM-1 et PM-3. ce résultat suggère que ces deux classes de particules fines proviennent de la même source, probablement le trafic routier.

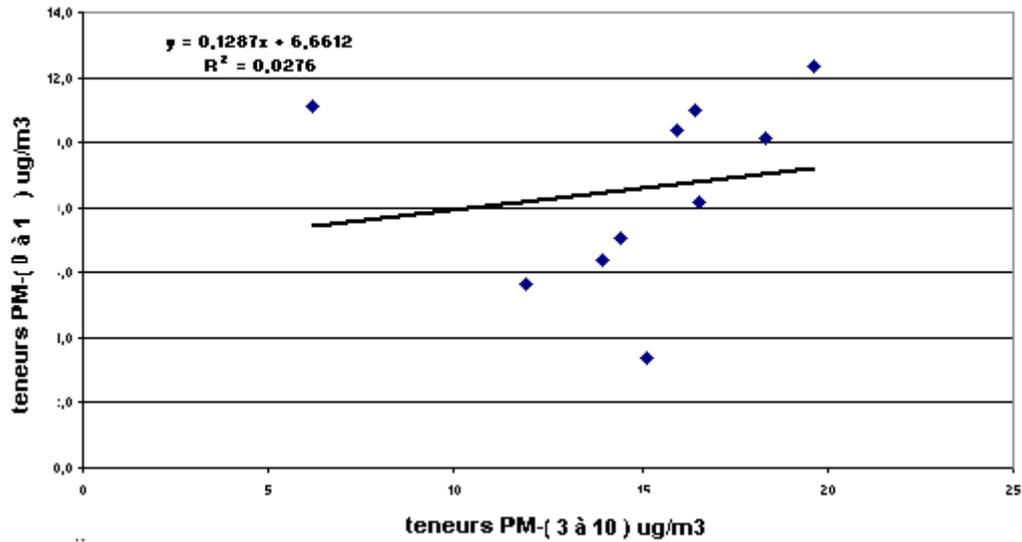


Figure V-9: Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-1 et PM-(3 à 10).

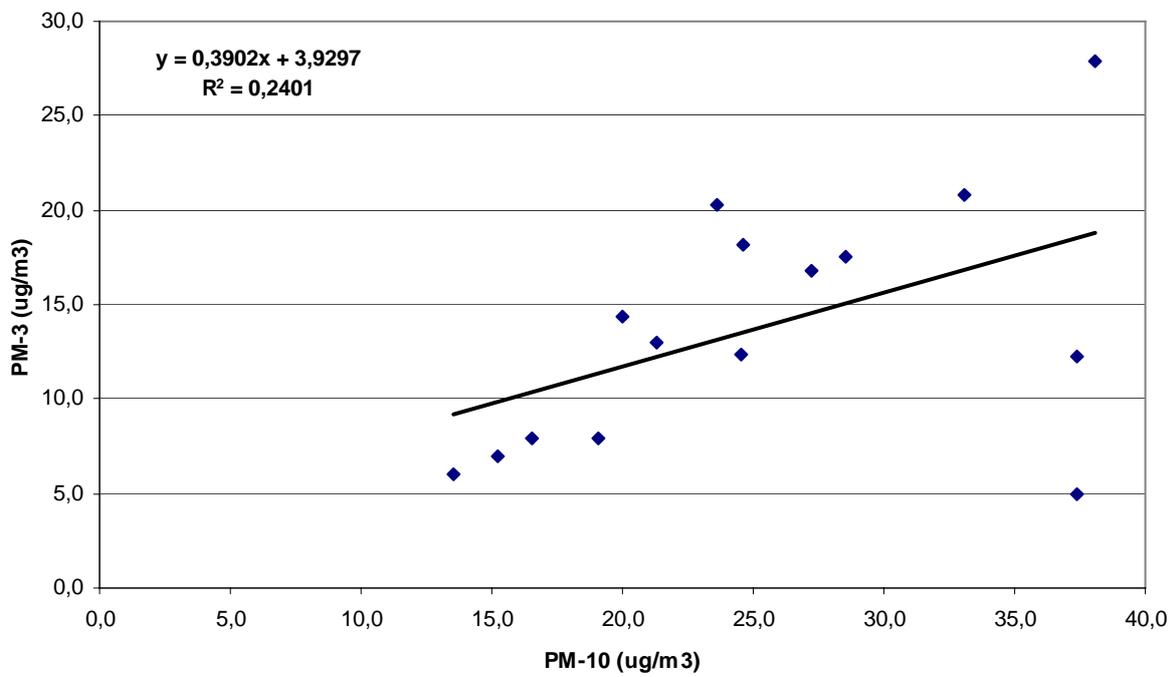


Figure V-10 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-3 et PM-10.

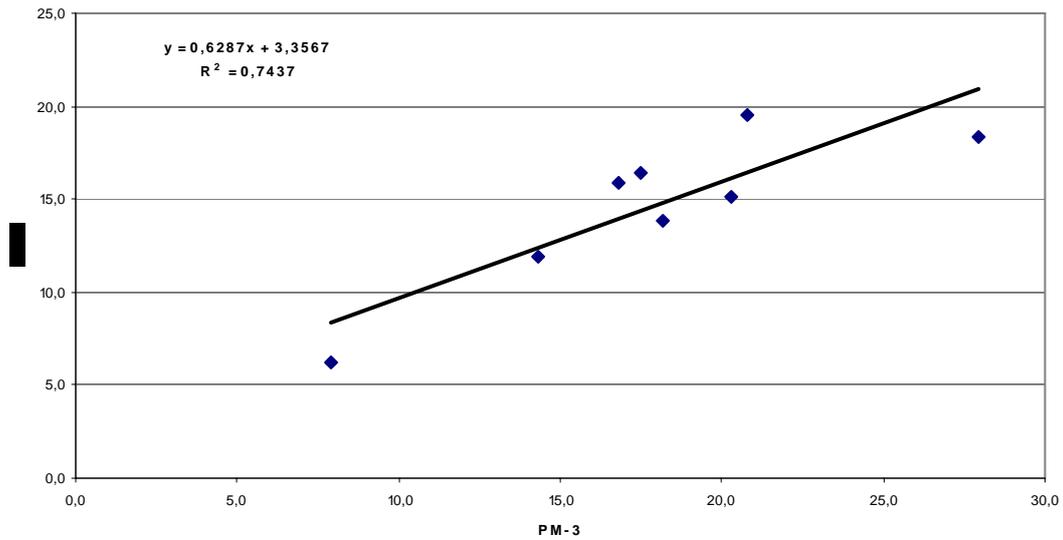


Figure V-11 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-1 et PM-3.

V-5 Ampleur de la pollution :

Afin d’estimer l’ampleur de la pollution de l’air par la fraction inhalable des particules en suspension à Dely-Brahim au sud d’Alger, il est nécessaire de comparer les niveaux mesurés aux normes et valeurs guides internationales réglementant cette forme de pollution et de les situer par rapport aux teneurs mesurées dans d’autres villes et régions du monde. Nous résumons dans le tableau V-3 les normes et les valeurs limites des PM-10 en vigueur ou en projet dans certains pays.

Tableau V-3 : Valeurs limites pour les PM-10 [2].

Pays	Valeur Limite ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Références
USA	150 maximum journalier(P99 sur3ans)	[29]
Union Européenne : -jusqu’à 2005	50 limite journalière à ne pas dépasser plus de 25 fois par an. 30 moyenne annuelle	[30]
-jusqu’à 2010	50 limite journalière à ne pas dépasser plus de 7 fois par an. 20 moyenne annuelle	[30]

Suisse	50 moyenne sur 24 heures 20 moyenne annuelle	[17]
OMS :		[31]
-PM10	50 moyenne sur 24 heures 20 moyenne annuelle	
-PM2.5	25 moyenne sur 24 heures 10 moyenne annuelle	[31]
Algérie	80 valeur limite (moyenne annuelle) 50 objectif de qualité	[32]

On constate ces dernières années qu'avec la récente prise de conscience du danger exercé par les PM-10, les anciennes normes régissant les particules en suspension ou les fumées noires sont progressivement remplacées par celles des PM-10. La norme USA a été revue vers la baisse, tandis que d'autres normes sont encore au stade de projet. Sur la base de ces normes, on constate qu'à Dely-Brahim, la pollution par les PM-10 est tolérable. Elle est à la limite des normes européennes et de celles de l'OMS. La norme algérienne est respectée.

La comparaison entre les teneurs en PM-10 mesurées à Dely-Ibrahim et celles relevées dans certaines villes de plus ou moins grandes envergures présentée en Tableau V-4 [2], montre que Dely-Brahim accuse, en site semi urbain non influencé par le trafic routier un taux de pollution en PM-10 acceptable.

Tableau V-4 :Teneurs en PM-10 mesurées dans quelques villes.

Villes	Teneur Moyenne Annuelle ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Teneur max. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Année	Remarques	Références
Paris - Champs de Mars - Créteil	39 28	117 133	1995	Sites urbains	[33]
Zurick Berlin	28 97	- -	1993	Site urbain Site urbain	[17]
Edmonton (Canada)	27	86	1996	Site urbain	[30]
Arnhem (Pays bas)	74.4	99	1996	Site de proximité Mesure sur 3 mois	[34]
Prague	105	198.7	1996	Site de proximité intersection (mesure sur 5 mois)	[35]
Mexico	96.4	-	1990	Teneur relative au PM 2,5.Site de proximité Mesure sur 2 mois)	[36]
Barcelone	49.8	118	1996	Site urbain	[37]
Marseille	29	-	1999	Site urbain	[37]
Rennes	24	-	1999	Teneur relative Au PM-10 site de proximité	[38]
Alger(région EST)	84.1	151	2003	Site de proximité Site urbain	[25]
Alger(Banlieue urbaine)	67.8	158.8	2005	(mesure sur 3 mois)	[28]
Alger(région Centre)	64.1	82.5	2006	Site urbain (mesure Sur 3 mois)	[15]

V-6 Etude Des Métaux Lourds Associés aux PM-10 et PM-3 :

Formées par voie naturelle ou lors d'un processus de combustion, de taille, de poids et de composition très variables, les particules fines peuvent véhiculer des métaux lourds présents à l'état de traces qui doivent être surveillés, car toxiques et pénétrants jusqu'aux alvéoles

pulmonaires. L'étude des métaux lourds Pb, Fe, Mn et Cd associés aux particules fines a porté sur une trentaine de fractions granulométriques.

Les résultats obtenus sont présentés dans les Figures V-12 à V-14

Ces figures illustrent graphiquement l'évolution temporelle des teneurs atmosphériques en métaux lourds véhiculés par les PM-3 et PM-10.

Le tableau V-5 et les Figures de V-15 et V-16 résumant les teneurs atmosphériques moyennes. Tout comme dans le cas de l'étude des particules, on relève pour l'ensemble des éléments une large fourchette de variation des concentrations.

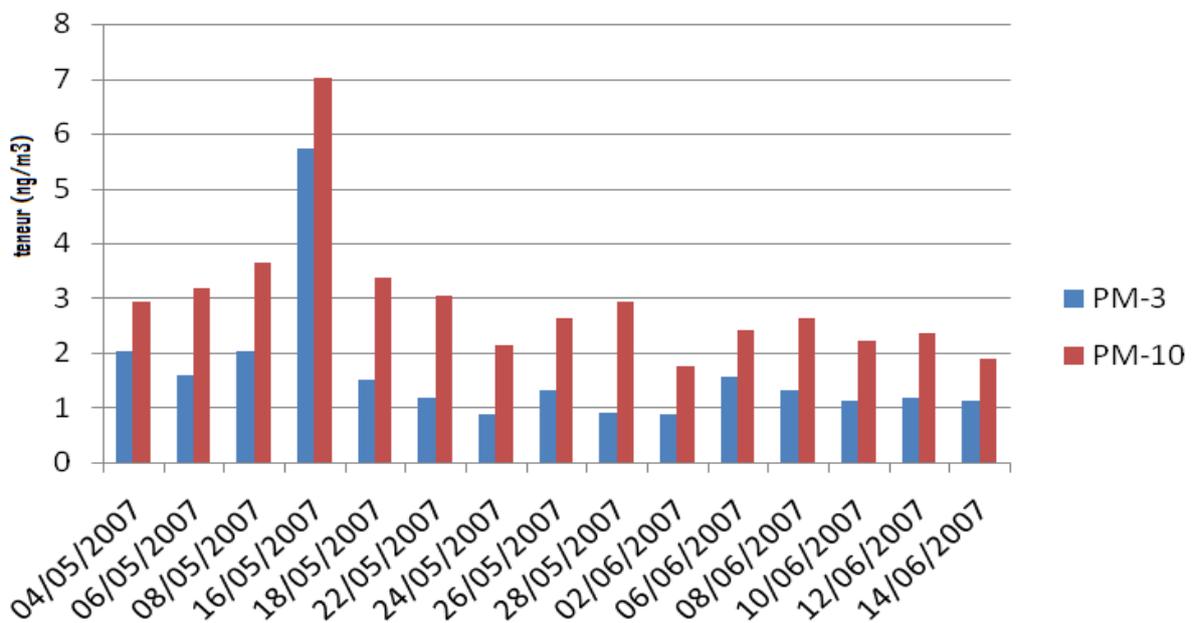


Figure V-12: Évolution temporelle des teneurs atmosphériques en Pb .

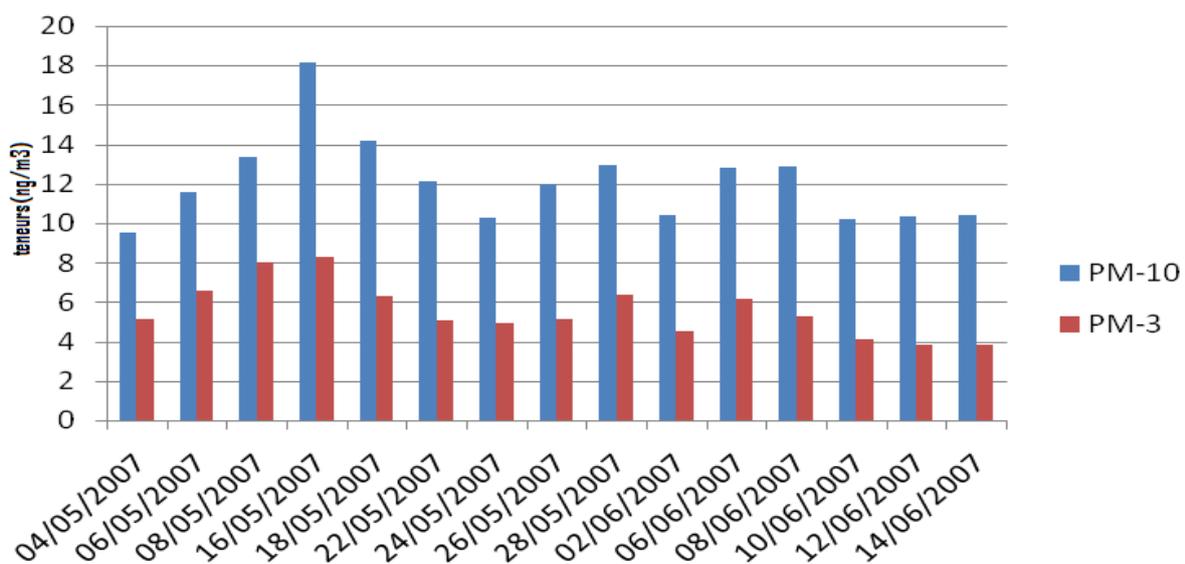


Figure V-13: Évolution temporelle des teneurs atmosphériques en Mn .

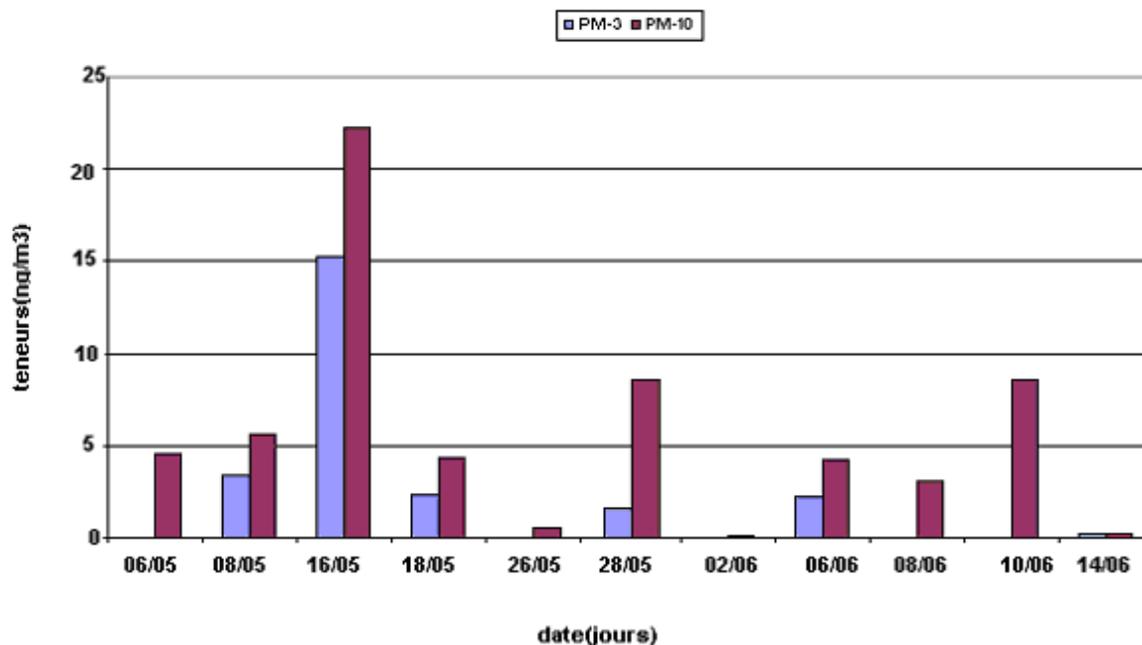


Figure V-14: Évolution temporelle des teneurs atmosphériques en Fe.

Tableau V-5 : Teneurs Atmosphériques des Métaux Lourds étudiés.

Paramètres	Teneurs	Pb (ng/m ³)	Mn (ng/m ³)	Fe (ng/m ³)	Cd (ng/m ³)
PM-10	Teneur Maximale	7.00	18.18	22.23	ND*
	Teneur Moyenne	2.94	12.07	5.64	ND*
PM-3	Teneur Maximale	5.73	8.22	15.28	ND*
	Teneur Moyenne	1.62	5.57	4.97	ND*

(*) Non Décelables.

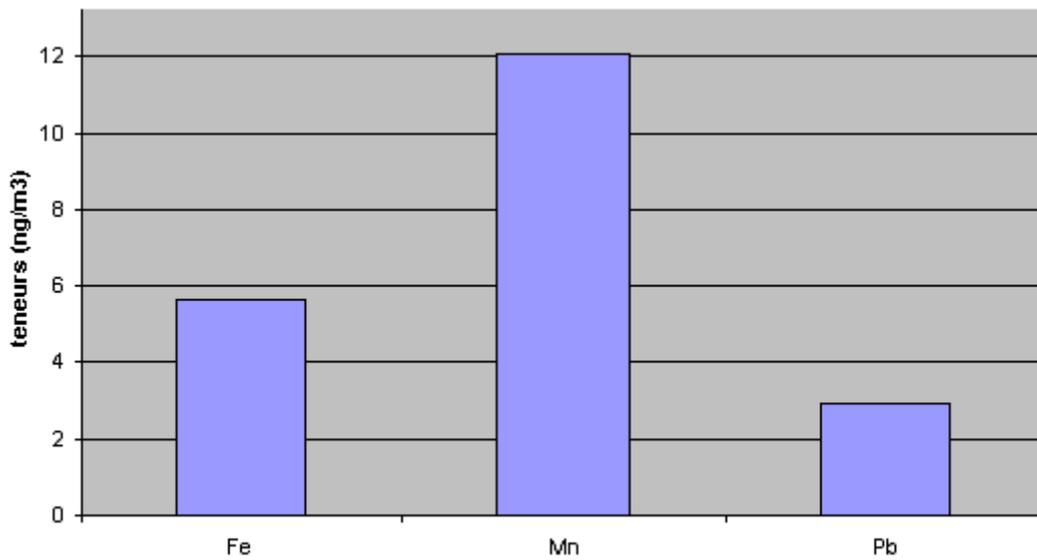


Figure V-15 : Teneurs moyennes des métaux lourds dans les PM-10.

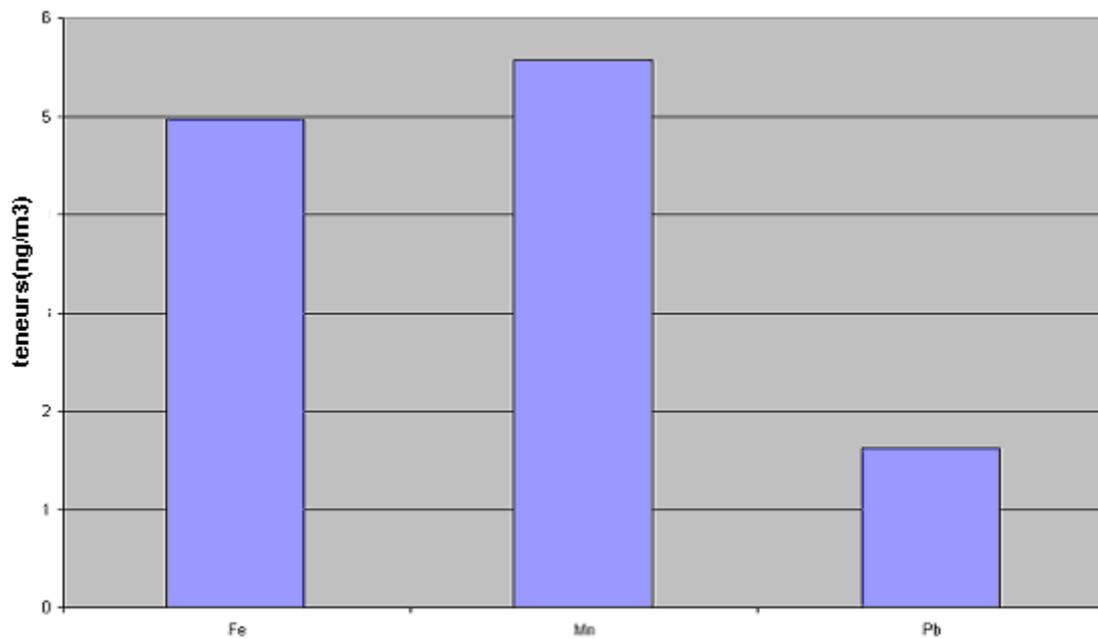


Figure V-16 : Teneurs moyennes des métaux lourds dans les PM-3.

Les résultats montrent que le plomb varie de 1.76 à 7.00 ng/m³ et la teneur moyenne est de l'ordre de 2.9 ng/m³. Les éléments Fe et Mn sont les plus abondants et dans plusieurs échantillons ils sont à des teneurs qui varient entre 0.11 et 9.51 à 8.18 et 22.23 ng/m

respectivement. Par contre le Cd n'a pas été détecté par la technique analytique utilisée. La Figure V-17 montre, qu'il n'y a pas de corrélation entre les teneurs en PM-10 et celles de Pb. Cela signifie qu'une forte pollution en PM-10 n'entraîne pas systématiquement une forte pollution par le plomb. Ceci peut s'expliquer entre autres par la présence importante de suies issues des émissions du diesel qui augmentent les taux en PM-10 sans pour autant affecter les émissions de plomb.

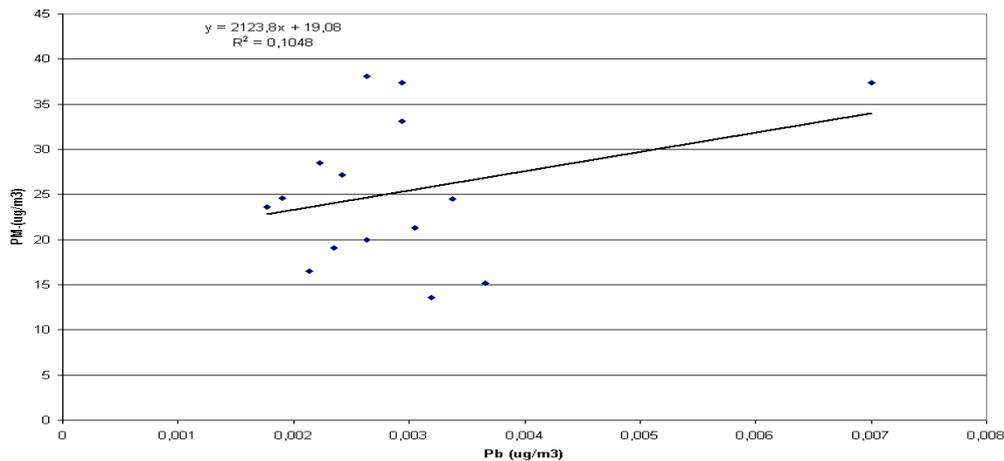
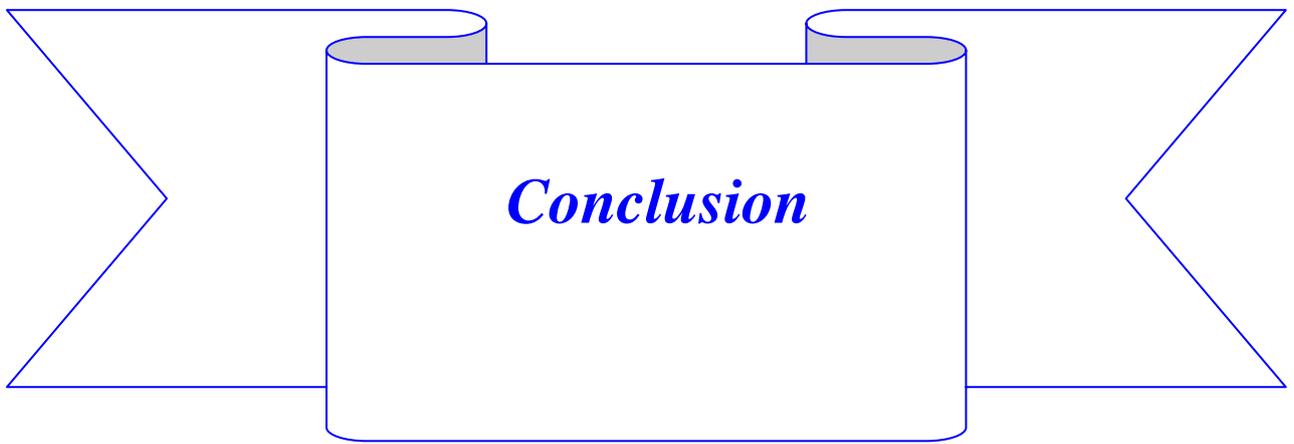


Figure V-17: Évolution des teneurs en plomb en fonction des teneurs en PM-10.

On constate que la pollution par le plomb est très faible. Les teneurs mesurées en ce site très aéré demeurent en général très en dessous des valeurs guides de l'OMS et des normes de l'Union Européenne (norme de $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Rappelons qu'en site urbain ou station trafic à Alger, les teneurs en plomb s'élevaient à environ $0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [2, 15].



Conclusion

Au cours de cette étude, nous avons évalué les niveaux de pollution de l'air ambiant par les particules fines : PM-1, PM-3 et PM-10.

L'étude montre qu'en ce site semi-urbain, la pollution de l'air par les PM-10 atteint des niveaux relativement faibles, qui sont à la limite des normes en vigueur dans les pays occidentaux et celles de l'OMS.

La teneur journalière moyenne s'élève à $26,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la teneur maximale et de l'ordre de $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Et comparé aux teneurs mesurées en sites urbaines d'Alger, les niveaux de pollution relevés à Dely-Brahim ne sont pas inquiétants.

Ces particules se distinguent toutefois par le fait que plus de 60% des PM-10 sont constitués de particules respirables (PM-2,5) très nocives.

Ces fines particules résulte sans doute de la mauvaise combustion automobile qui se diésélise de jour en jour, mais aussi, d'un parc automobile âgé, mal entretenu et dépourvu de systèmes d'épuration.

L'étude de certains métaux lourds, (Pb, Cd, Mn et Fe) associés aux particules fines montre, les PM-10 ne véhiculent pas une pollution élevée par les métaux lourds à caractère toxique.

Les teneurs en plomb restent limités. Le Fer et le Manganèse issus de la croûte terrestre sont les métaux les plus abondants.

Il faut rappeler que ces résultats concernent un site semi-urbain qui de part sa topographie et son éloignement des grands centres urbains n'est pas influencé par les émissions anthropiques.

Conclusion.

A la lumière de ces résultats et afin d'améliorer graduellement la situation ou au moins éviter son aggravation, nous présentons les recommandations suivantes :

- ✓ Instaurer, efficacement le contrôle technique et la maintenance des véhicules.
- ✓ Sensibiliser les gens sur les risques d'une pollution particulière sur leur santé.
- ✓ Améliorer la gestion des modes de transport.
- ✓ Mise en place d'une réglementation imposant la présence d'un catalyseur sur tout véhicule nouvellement importé.
- ✓ Encouragement de la bicarburant Essence / GPL ou GNC.
- ✓ Amélioration de la gestion du transport avec réduction des points de congestion et multiplication des transports en commun.

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 notre air pour les générations futures.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- 1 : Masclat P.: Pollution atmosphérique causes, conséquences, solution, perspective, Ellipses, Paris, pp. 79-195, 2005.
- 2 : Oucher. N, Thèse de magister « Contribution à l'étude par classe granulométrique des aérosols sur un site de proximité de l'ENP. », ENP, El-Harrach, 2007.
- 3 : Degobert P. : Automobile et pollution, Technip, pp. 66-153,1992.
- 4 : Renoux. A, « Ce qu'il faut savoir sur l'aérosol atmosphérique » Poll. Atmo., Janvier Mars, pp. 10-16, 1990.
- 5 : Detrie J.P. : La pollution atmosphérique, Edition Dunod, Paris, 1990.
- 6 : Bitouche A. : Etude de la pollution de l'air à Alger par les particules fines (PM-10, PM-2,5, PM-1 , Projet de fin d'études, ENP, El-Harrach, 2002.
- 7 : Ramade. F. : Eléments d'écologie, action de l'homme sur la biosphère, Mc Grawtill, Paris, 1982.
- 8 : Dang.C, Fontelle.T.P, Leygonie.R, Les émissions de poussières et généralités sur leur mesure à l'émission, pollution atmosphérique, Janvier-Mars, pp. 38-46,1990.
- 9 : Petit Courieux.F, Person.A, Le moulec.Y, « Connaissance atmosphérique en milieu urbain : représentativité biologique et difficultés météorologiques », Pollution atmosphérique, Janvier-mars, pp. 21-30, 1990.
- 10 : Brunner.P.H, « Approche globale des problèmes d'environnement liés à l'incinération d'ordures ménagères ». Pollution atmosphérique, Janvier-Septembre, pp 301-308, 1988.
- 11 : Degobert P. : Pollution atmosphérique, origine et réduction des émissions au niveau du moteur, Techniques de l'Ingénieur, pp. 01-16, 1994.
- 12 : Chirou M., P. Quenel et D. Zmivan : La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique, Pollution atmosphérique, Janvier-Mars, pp. 41-52, 1997.
- 13 : Arthur.C., Stern: Air pollution, air pollutants, their transformation and transport, Academic Press, New york, 1976.
- 14 : Detrie J. P., «La pollution atmosphérique», Ed. Dunod, Paris, 1969.
- 15 : Bendada A.M. : Evaluation de la pollution de l'air par les particules fines en site urbain à Alger, Projet de fin d'études, ENP, El-harrach, 2006.

- 16: Chovin.P, Roussel.A, Physicochimie et physiopathologie de polluants atmosphériques, Masson, Paris, 1973.
- 17 : OFEFP, Cahier de l'environnement « Particule en suspension : mesures et évaluations des effets sur la santé », Berne, 1996.
- 18 : Brochard.D, Pairon.J.C, Bignon.J, « Aérosol et santé : Déposition et épuration des particules inhalées », Pollution atmosphérique, Avril-Juin, pp. 178-182, 1999.
- 19 : Lazaradis M. et al., « Integrated exposure and dose modelling and analysis system, deposition of inhaled particles in the respiratory tract. » Env.Sc. Tech. Vol.35 N°3727-3734, 2001.
- 20 : Environnement Canada, Les particules de l'air ambiant -Vue d'ensemble, Québec, Février, 1998.
- 21 : Martin J. et L. Y. Mayster, « Santé et pollution de l'air », Presse Polytechniques Romandes, Suisse, 1998.
- 22 : Ikawa K. O., « Trace analysis atmospheric », Edition John Wiley and Sons, London, 1997.
- 23 : Techniques de l'ingénieur, « Traité d'analyse chimique, caractérisation, spectrométrie d'émission des rayons X, Fluorescence X ».
- 24 : Renoux A., D. Borland, « Les aérosols: physique et méthodologie; Technique et Documentation », Paris, 1998.
- 25 : Kerchich Y., Thèse de magister « Etude de la pollution de l'air par les particules fines et les métaux lourds qui leur sont associés. », ENP, El-Harrach, janvier 2003.
- 26 : ADEM : classification et critères d'implantation des stations de surveillance de la qualité de l'air, ADEM Edition, Paris, 2002.
- 27 : Norme ISO 9885, « Air ambiant, dosage du plomb dans les particules d'aérosols collectées sur des filtres », France 1993.
- 28 : Badj S. : Evaluation de la pollution atmosphérique par les particules fines en sites urbains à Alger, Projet de fin d'études, ENP, El-harrach, 2005.
- 29 : US-EPA, « National ambient air quality standards (NAAQS) for particulate matter », Federal register vol.62, N°138, 1997.
- 30 : Journal officiel des communautés européennes, L 163/41, Directive 1999/ 30/CE du 27 avril 1999, Bruxelles.
- 31 « OMS: Update and revision of air quality guidelines for Europe », WHO regional publications, European, Serien, Copenhagen, 1997.

- 32: Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire, Décret exécutif N° 06-02 du 7 janvier 2006 définissant les valeurs limites, qualité de l'air en cas de pollution atmosphériques, J.O., N°1, 2006.
- 33 : La qualité de l'air en France (95-96), Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), Editions ADEME, Paris, 1998.
- 34 : Janssen N. A. H., D. F.M. Van Mansom, K. Van Der Jagd, H. Harsema and G. Hoek: Mass concentration and elemental composition of airborne particulate matter at street and background locations. *Atm. Env.*, vol. 31, N°8, p. 1185-1193, 1997.
- 35 : Hovorka J. Et M. Donkelaar, « Elemental composition and stable lead isotope ratios of wintertime PM-10 aerosols in Prague-centre cross-roads », 8th international symposium transport and pollution, 31 Mai-02 Juin 1999, Graz, Autriche.
- 36 : Vega E., I. Garcia et al., «Application of a chemicalmass balance receptormodel to respirable particulate matter in Mexico-cities », *J. A. W. M. A.*, vol.47, pp. 524-529, 1997.
- 37 : La contaminatio atmosférica a Barcelona, « Rapport annuel de ajuntament de Barcelona », Directiondesservicesde surveillancedel'airambiant,Avril1997.
- 38 : Rapport du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (France), Bilan chiffré de la qualité de l'air dans les grandes agglomérations, 1991-1999, Paris, 2000.