

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

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 :

EVALUATION DE LA POLLUTION DE L'AIR PAR LES PARTICULES FINES EN SITE URBAIN A ALGER

Réalisé par:
BENDADA Ahmed Mehdi

Dirigé par :
Pr. R. KERBACHI
Mr N. BERKOUKI

Promotion 2006

10, Avenue Hacén Badi, El-Harrach, Alger.

ملخص:

مضمون هذا العمل هو دراسة التلوث الجوي للجزائر العاصمة وسط عن طريق الجزيئات الدقيقة

(PM-1, PM-2.5, PM-10)

وقد سجلنا نسبة عالية من التلوث حيث كانت معدلات الجزيئات مرتفعة:

PM-1=20,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM-2.5=32,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM-10=64,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

إن الجزء الأكبر من المعادن الثقيلة لهذه الدقائق يتمثل في الرصاص بمعدل $0,25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ و نسبة تفوق 0,4% في PM-10

المفاتيح:

نوعية الهواء، الجزيئات الدقيقة، الجزائر العاصمة، السخام.

Résumé:

L'étude présente les niveaux de pollution de l'air par les pm-10 en un site urbain au centre d'Alger. Le prélèvement des particules est effectué par un échantillonneur à fort débit, le HVS – PM-10, doté d'un cascadeur andersen. En ce site la teneur journalière moyenne en PM-10 s'élève à $64,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La limite de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ est dépassée. Toutefois, il en résulte une pollution assez élevée par les particules inhalables. Pour les PM-2,5 la teneur moyenne est de $32,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et pour les PM-1 de $20,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Parmi les métaux lourds associés aux particules fines, c'est surtout le plomb qui accuse des valeurs relativement élevées. On y mesure une teneur moyenne de $0,25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ correspondant à une fraction massique de l'ordre de 0,4 % dans les PM-10.

Mots - clefs :

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

Abstract:

This study presents the levels of air pollution by the PM-10 in a urban site in the centre of Algiers. The taking away of the particles is carried out by a sampler with strong flow, HVS – PM-10, equipped with an Andersen cascadeur. In this site the average daily content of PM-10 rises to $64,1 \mu\text{g} / \text{m}^3$. The limit of $30 \mu\text{g} / \text{m}^3$ is exceeded. However, it results from it a high pollution by the particles inhalables. For the PM-2,5 the average daily content was $32,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and for PM-1 was $20,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Among the heavy metals associated the PM-10, it is especially the lead which shows relatively high values. One measures there an average content of $0,25 \mu\text{g} / \text{m}^3$ correspondent with a mass fraction of about 0,4 % in the PM-10.

Keys – words:

Air quality, Particulate Matter (PM-10; PM-2,5 ; PM-1), soots, Algiers.

DEDICACES

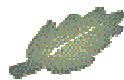
Je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères que je possède au monde :

A mon père qui, par ses conseils judicieux ses encouragements et sa tendresse m'a mené sur le chemin de la réussite. Qu'il trouve dans ce travail, une bien mince récompense ainsi que le témoignage de ma gratitude éternelle, pour tout ce qu'il a fait pour moi.

A ma mère qui, par sa douceur et son amour sans limite, a su m'inculquer le sens du devoir, de la persévérance et des responsabilités. Qu'elle trouve dans ce modeste ouvrage ma reconnaissance et mes vifs remerciements, pour sa compréhension, sa patience et sa confiance en moi. Que Dieu la garde.

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

*A toutes les Familles BENDADA et BELHAFFEF et particulièrement Mon grand Père
et ma Grande Mère*



A tous mes amis (es) de la promotion 2006

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier vivement mon encadreur Pr KERBACHI pour son dévouement, sa patience et surtout sa disponibilité pour la réalisation de mon projet et durant toute ma formation.

Je remercie encore Mr BERKOUKI, Mr KERCHICH et particulièrement Mr BITOUCHE pour leurs aides considérable et leurs brillants conseils.

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 assistée dans ma tâche, particulièrement : Adel, Walid, Fodil, Nacer, Okba.

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

SOMMAIRE

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

CHAPITRE I

I – Généralités sur la pollution de l’atmosphère par les particules	5
I.1- Nature et Origine des particules en suspension	5
I.1.1- Définition	5
I.1.2- La fraction thoracique et alvéolaire	6
I.1.3- Origine de la pollution par les particules en suspension	7
I.1.3.1– Les émissions naturelles	8
I.1.3.2– Les émissions anthropogéniques	10
I.2- Propriétés des particules	16
I.2.1- Dimensions et granulométrie des particules	16
I.2.2- Formation des particules	19
I.3 – Composition chimique des particules fines	21

CHAPITRE II

II – Effets des particules en suspensions	24
II.1- Effets des particules sur la santé humaine	24
II.1.1- Le cheminement des particules dans l’appareil respiratoire	24
II.1.2 – Evaluation des effets des particules polluantes sur la santé	26
II.2 – Effets sur les animaux	28
II.3 – Effets sur les végétaux	28
II.4 – Effets des particules solides sur les matériaux	29
II.5 – Effet sur la visibilité	29

CHAPITRE III

III – Aperçu sur les principales techniques et méthodes de mesure et d’analyse des particules en suspension	31
III.1 – Echantillonnage de l’air	31
III.1.1 – Les prélèvements sans coupure granulométrique spécifique	32
III.1.2 – Prélèvement avec coupure granulométrique	33
III.1.3 – Les prélèvements avec fractionnement granulométrique	35

III.2 – Les filtres et membranes de rétention.....	36
III.2.1 – Les filtres en fibre en de verre	36
III.2.2 – Les filtres membranes	37
III.3 – Analyse des particules en suspension	37
<u>CHAPITRE IV</u>	
IV – Méthodologie.....	39
IV.1– Site de prélèvement	39
IV.2 – Mode de prélèvement.....	40
IV.3 – Traitement et analyse des PM-10	42
<u>CHAPITRE V</u>	
V- RESULTATS ET DISCUSSION.....	43
V.1- Etude de la répartition granulométrique des particules fines.....	46
V.2- Etude des particules fines et leur relation avec les PM-10	52
V.3 – Ampleur de la pollution : étude comparative	55
V.4 – Etude des métaux lourds associés aux PM-10 et PM-3	57
Conclusion.....	66
Références Bibliographiques.....	68

Introduction

Introduction générale

L'atmosphère joue un rôle majeur vis-à-vis de la régulation des climats et le maintien des conditions de vie de la biosphère. Cependant, la qualité de l'air n'a rien d'immuable dans le temps et dans l'espace car sa composition résulte d'équilibres complexes entre d'une part des apports permanents de matière provenant de sources naturelles ou liés aux activités humaines et d'autre part, l'élimination et le recyclage continu de cette matière par divers mécanismes physico-chimiques (dépôts secs et humides de gaz et particules, transformations dans l'atmosphère, assimilation par la végétation, les océans...). Que le bilan de ces échanges soit perturbé – notamment sous l'effet de l'activité humaine – et la composition de l'air s'en ressent, avec pour risques des effets indésirables sur la santé et l'environnement.

L'atmosphère terrestre concernée par les problèmes de pollution s'étend jusqu'à 50 km d'altitude environ. Elle est classiquement sub-divisée en deux grands domaines [1] : la troposphère d'une part (du sol à 10 km d'altitude environ) et la stratosphère d'autre part (entre 10 et 50 km d'altitude environ).

Ces deux couches atmosphériques se distinguent notamment par leur taux de variation de la température de l'air avec l'altitude (la température moyenne de l'air diminue avec l'altitude dans la troposphère, mais tend à augmenter dans la stratosphère).

La pollution de l'air peut être définie comme l'introduction par l'activité humaine, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances présentant des risques pour la santé, les écosystèmes, d'influer sur le climat, de détériorer les biens matériels, de provoquer des nuisances olfactives. [1]

Elle peut résulter de l'introduction de substances nouvelles dans l'air, ou plus fréquemment du rejet de composés déjà émis par la nature (volcanisme, activité biologique des sols, des océans, des végétaux, etc.).

Ces composés d'origines anthropogéniques résultent d'un grand nombre d'activités regroupées en deux catégories : les sources fixes de pollutions (chaudières et foyers de combustion, activités industrielles, domestiques, agricoles...) et les sources mobiles (trafic automobile, avions...).

Les polluants émis par les activités humaines sont éminemment variables tant en nature qu'en proportions.

Parmi les polluants directement émis dans l'air, ou polluants primaires, on trouve des composés du soufre et de l'azote (oxydes de soufre, oxydes d'azote...), des oxydes de carbone et des composés organiques volatils, (solvants, hydrocarbures...), des particules et des métaux (plomb, mercure, cadmium, arsenic...). Certains de ces polluants peuvent évoluer chimiquement dans l'atmosphère pour former des polluants secondaires, qui sont à l'origine de la pollution photochimique et des pluies acides [1].

Une des formes de la pollution atmosphérique qui de nos jours fait l'objet d'une attention particulière de la part de la communauté scientifique et des responsables de la qualité de l'air consiste en la contamination de l'atmosphère par les fines particules solides. En effet, plusieurs travaux effectués en Europe et aux USA ont montré que du point de vue sanitaire, les particules en suspension dans l'air (aérosols particuliers) représentent un indicateur majeur de la qualité de l'air [2,3,4]. De nombreuses et cohérentes études leur attribuent une forte responsabilité dans la survenue d'une vaste gamme d'effets biologiques et sanitaires [5,6]. Leur impact sur l'environnement et les nuisances qu'elles engendrent dépend toutefois de leur granulométrie et de leur composition chimique, elle-même liée à leurs sources d'émission [7].

En vertu du cheminement des particules dans le système respiratoire et de leur rétention dans le corps humain, ce sont surtout les particules fines ou inhalables de diamètre inférieur à 10 μm (les PM-10 ou fraction thoracique) qui sont les plus incriminées et donc aussi les plus étudiées. Les particules PM-10 ne sont pas arrêtées par le système naso-pharyngien et aboutissent dans les voies respiratoires terminales [7].

Comme par ailleurs, l'essentiel des effets associés aux particules est le fait de particules très fines qui se déposent dans les alvéoles du segment pulmonaire, la communauté scientifique

accorde de plus en plus d'importance à l'étude de la fraction alvéolaire ou fraction respirable, les PM-2,5 (particules de diamètre inférieur à 2,5 μm). L'importance et le rôle que jouent ces aérosols en tant que vecteurs essentiels de la pollution atmosphérique (maladies obstructives des voies aériennes, bronchites chroniques, aggravation des cas asthmatiques, mortalité cardio-vasculaire, allergie etc.) a fait que de nombreux pays ont récemment révisé les normes existantes ou proposés de nouvelles réglementations.

Ces particules véhiculent principalement des imbrûlés et noyaux carbonés issus des processus de combustion, des particules acides issues de la conversion gaz / particules (pollution acide véhiculant des 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 dans le monde, 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 μ). Cette classe de véhicules émet en effet majoritairement des particules très fines de faible granulométrie. On rappelle que l'I.A.R.C. (Agence Internationale de la Recherche sur le Cancer) et US-EPA (agence Américaine de Protection de l'Environnement) ont classé les émissions diesel comme étant probablement cancérigènes pour l'homme (classe 2A) et les émissions des véhicules à essence dans le groupe 2B c'est à dire potentiellement cancérigènes pour l'homme [2].

Toutes ces indications font que de nos jours, l'étude des fractions thoracique et alvéolaire des particules véhiculées par les aérosols atmosphériques constitue un axe important dans l'évaluation globale de la pollution de l'air.

En Algérie, le manque de données relatives à la qualité de l'air fait que l'impact de cette forme de pollution sur l'environnement est très mal connu. Les sources de pollution sont

nombreuses et les nuisances sont déjà perçues, mais leur relation directe ou indirecte avec la dégradation de l'environnement n'est pas établie. A Alger par exemple, on estime le taux des asthmatiques à plus de 8% et certaines données de l'Institut National de la Santé Publique estime à plus de 20% les consultations hospitalières ayant pour motif des problèmes d'insuffisances respiratoires.

Des études récentes ont montré que le Grand Alger est, comme toute grande agglomération urbaine, confronté à une intense pollution atmosphérique [8,9]. La principale source d'émission est le trafic routier. Aussi et en continuité des travaux antérieurs sur la pollution atmosphérique effectués par le Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Environnement de l'ENP sur les aérosols particuliers [10,11], nous nous proposons d'étudier dans ce travail, la pollution de l'air par les particules fines par classe granulométrique et d'évaluer les niveaux de pollution par les PM-10, PM-2,5 et PM-1, atteints en site urbain à Alger. Nous nous proposons également d'étudier quelques métaux lourds qui sont associés aux différentes fractions granulométriques collectés.

Notre travail se fera en deux grandes parties ; Théorique et expérimentale, et chacune d'elles se fera en plusieurs chapitres. Dans le premier on abordera des généralités sur la pollution (définitions et caractéristiques), ensuite vient les effets de la pollution sur l'environnement et ses conséquences sur la santé des humains, animaux et de végétaux...etc. Les troisième et quatrième chapitres porteront sur la présentation des différentes méthodes utilisées pour le prélèvement et l'extraction des métaux lourds. Enfin un chapitre qui portera sur les méthodes d'analyse pour sa caractérisation.

La partie expérimentale portera sur la présentation du site de prélèvement, et les différentes étapes de notre travail (du prélèvement jusqu'à l'analyse) et enfin les résultats et leurs interprétation.

Chapitre I:

Généralité sur la pollution de
l'atmosphère par les
particules.

I – Généralités sur la pollution de l'atmosphère par les particules

I.1- Nature et Origine des particules en suspension

I.1.1- Définition

Les particules sont des entités solides ou liquides en suspension dans l'air où elles forment avec celui-ci un aérosol (gaz + particules en suspension). Elles peuvent avoir des compositions, densités, formes et dimensions très diverses selon leur mode de formation. Elles sont principalement caractérisées par leur diamètre aérodynamique, variant de $0,02\mu\text{m}$ à $100\mu\text{m}$ pour les particules dites atmosphériques, de densité unitaire, qui aurait les mêmes caractéristiques aérodynamiques que la particule concernée [12].

Les particules qu'on rencontre généralement dans l'atmosphère se divisent en deux classes :

- **Les particules sédimentables ou dépôts atmosphériques**
- **Les TSP (Total suspended particles) ou particules totales en suspension.**

Les particules sédimentables concernent les poussières de granulométrie élevée ($30\mu\text{m}$ et plus) qui ont une grande vitesse de chute et qui se déposent rapidement, non loin de la source émettrice.

Les particules en suspension sont par contre, des particules plus ou moins fines (granulométrie $< 30\mu\text{m}$) qui séjournent longtemps dans l'atmosphère et peuvent être emportées loin de la source émettrice par le vent. On les désigne par « particules totales en suspension » pour les différencier des (PM-10) qui eux sont les particules en suspension dont le diamètre est inférieur à $10\mu\text{m}$. Ce seuil granulométrique correspond aux particules fines qui pénètrent profondément dans les poumons [13].

La variété des termes employés dans le domaine traduit sa diversité : aérosol, fumées noires, poussières, brumes, suies, cendre volantes, particules, etc. Aussi, il est important de préciser la définition des termes utilisés dans l'étude des particules en suspension :

- **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 $100\mu\text{m}$, les plus fines ayant des dimensions de quelques angströms [12].

- **Les fumées noires** : sont des particules carbonées de diamètre inférieur à $5\mu\text{m}$ [14].
- **Les suies** : sont des particules de carbone et d'imbrûlés, que produisent les combustibles qui ne brûlent qu'incomplètement [15].
- **Les poussières** : on appelle ainsi les particules solides de diamètre inférieur à $75\mu\text{m}$, Les plus grosses retombent près de la source d'émission.
- **Les brumes** : la brume est un terme appliqué à un ensemble de gouttelettes dans un gaz. Ces particules ont des dimensions supérieures à $1\mu\text{m}$.
- **Les cendres volantes** : le mot « cendre » désigne le résidu solide subsistant après combustion des matériaux carbonés. Ces cendres finement divisées sont entraînées dans les fumées de combustion pour donner des cendres volantes [12].
- **Les particules** : ce terme englobe en fait l'ensemble des définitions précédentes indifféremment des propriétés physico-chimiques de chacune d'elles [14].

Les particules aéroportées ont un diamètre aérodynamique généralement inférieur à $100\mu\text{m}$. Il existe différentes approches pour les subdiviser. La plus répandue est basée sur l'efficacité de collecte propre aux échantillonneurs utilisés. On utilise :

- **Les particules totales en suspension (TSP)** : qui désignent les particules dont le diamètre est inférieur à $40\mu\text{m}$. La majeure partie de ces particules est captées par le segment extra thoracique du système respiratoire [16].
- **Les PM-10 (particulate matter < $10\mu\text{m}$)** : ces particules représentent les particules inhalables dont le diamètre est inférieur à $10\mu\text{m}$.
- **Les PM-2,5** : ceux sont les particules les plus fines dont le diamètre aérodynamique est inférieur à $2,5\mu\text{m}$.
- **Les PM-1** : sont des particules très fines de diamètre inférieur à $1\mu\text{m}$ qui se forment par coagulation et agglomération des particules submicroniques.

I.1.2- La fraction thoracique et alvéolaire

Parmi les particules totales en suspension, seules les particules fines peuvent s'infiltrer dans les bronches et les alvéoles pulmonaires. Elles sont alors susceptibles d'endommager le système respiratoire et de provoquer des réactions inflammatoires. Toutes les études effectuées sur les conséquences à long ou à court terme indiquent des relations doses-réponses linéaires uniquement lorsqu'on considère les particules de diamètres inférieur à $10\mu\text{m}$. Cette meilleure corrélation entre les teneurs en PM-10 et les effets sur la santé a conduit bon nombre de pays et

en premier les USA à remplacer l'étude des TSP par celle des PM-10 et donc d'introduire de nouvelles normes d'émissions relatives à la pollution par les particules.

Des études récentes ont montré que pour caractériser les polluants du milieu urbain, il est utile d'étudier en plus des PM-10, les PM-2,5 qui désignent les particules très fines de diamètre inférieur à 2,5 μm . C'est la fraction alvéolaire (fraction respirable) qui englobe les particules très fines pouvant se loger dans les ramifications pulmonaires finales (les alvéoles). Des travaux plus récents proposent aussi l'étude des PM-1 dont le dépôt dans les alvéoles est irréversible et qui échappent en général à la rétention par les systèmes de dépoussiérage. L'intérêt porté aux PM-2,5 et PM-1 provient du fait de la diésélisation du parc automobile, qui a pris une grande ampleur ces dernières années, donc évidemment une assez forte émission de fines particules dans l'air. En effet, des études menées sur les émissions des véhicules ont montré que ceux équipés d'un moteur diesel émettent deux fois plus de particules que ceux équipés d'un moteur essence catalysé.

Le diamètre aérodynamique moyen des particules issues des moteurs diesels est supérieur à ceux issues d'un moteur essence et il est centré autour de 0,1 μm en sortie d'échappement [16]. Les fines particules charriées par l'air se composent d'un mélange de différentes substances organiques et inorganiques. Les PM-2,5 se composent à 80 % de carbone élémentaire et carbone organique (suies et HAP), et des aérosols secondaires (nitrates et sulfates provenant de la conversion du SO_2 et NO_2) [17].

Les particules d'un diamètre compris entre 2,5 et 10 μm contiennent environ 50 % des substances citées auparavant, ainsi qu'un taux important de composés d'aluminium, de silicate, de fer et d'autres métaux lourds (minéraux insolubles) [17]. Ainsi la mesure des PM-10 représente globalement un mélange des émissions primaires, plus particulièrement les particules provenant de la combustion, des émissions de l'industrie, de la poussière qui tourbillonne dans la rue et celle due à l'usure de matériaux, ainsi que les aérosols secondaires.

I-1. 3- Origine de la pollution par les particules en suspension

La pollution de l'air par les matières particulaires atmosphériques, ou particules aéroportées, comprend une gamme très variée de composantes biologiques (pollens, bactéries, virus, insectes) et autres non viables (minéraux, métaux, produits de combustion, etc.). De grandes quantités de matières particulaires sont émises dans l'atmosphère par des phénomènes naturels (activité volcanique, érosion éolienne, feux de forêt, embruns marins, ...etc.).

I.1.3.1– Les émissions naturelles

Différents phénomènes naturels contribuent fortement à la pollution de l'air ; parmi ces phénomènes, on énumère les plus importants, à savoir :

- **L'érosion éolienne :**

C'est l'action du vent sur la couche superficielle du sol. Elle se produit et s'accroît surtout sur les sols désertiques à faible couvert végétal ou dans les zones à climat sec ou à longue saison sèche.

Les vents détruisent alors la couche superficielle des sols exposés et entraînent avec eux d'importantes quantités de particules solides à des distances qui peuvent être très longues et à des altitudes très élevées. C'est le cas par exemple, des vents de sable du Sahara qui arrivent parfois jusqu'à la rive Nord de la méditerranée ou même plus loin en Europe occidentale [18, 19].

- **Les éruptions volcaniques :**

Les régions volcaniques représentent une importante source de particules dans l'air, dont certaines résultent de la transformation de polluants gazeux en particules, c'est le cas par exemple, des particules sulfates issues du gaz SO₂.

La quantité de particules solides qui peut accompagner une éruption volcanique peut être énorme. Ainsi, l'éruption du mont « Saint HELENS » en mai 1980 dans l'état de Washington aux USA, a provoqué une émission de près de 3 milliards de tonnes de particules qui ont atteint même la stratosphère [18, 20].

- **Les embruns et les sels marins :**

A partir des océans et des mers, l'atmosphère terrestre s'enrichit en embruns marins. Ces aérosols donnent après évaporation des particules salines essentiellement du NaCl, MgCl₂, CaCl₂ et KBr.

Sur le continent, les régions les plus touchées sont naturellement les zones côtières. Les vents forts et les tempêtes peuvent cependant transporter ces embruns à des grandes distances à l'intérieur des terres. Ainsi par exemple, on estime qu'au niveau des régions côtières de Bretagne, les pluies déposent au sol 25 à 35 g de sel par m² au cours d'une année. 70% de ces dépôts sont constitués par des chlorures de sodium [18].

- **Les particules d'origine extraterrestre :**

Il s'agit de petites particules provenant de la décomposition des météorites pénétrant de façon constante dans l'atmosphère terrestre.

Les particules d'origine extraterrestre sont principalement composées de Na, Mg, Al, Si, K, Ti, Cr, Fe, Co, Ni.

On estime que ce phénomène contribue à la pénétration dans l'atmosphère terrestre d'environ 10 milles tonnes de particules par jour, soit $10^{-14} \text{ gr/cm}^2 \text{ s}$ [18].

Il existe d'autres formes de pollution naturelle, telles que :

- Les particules d'origine végétale comme les grains de pollen qui sont émis par une grande diversité de plantes et qui peuvent aussi pénétrer dans nos voies respiratoires et provoquer des réactions allergiques, parfois violentes, chez les sujets sensibles.
- Les feux spontanés de forêt qui sont principalement causés par la foudre et qui émettent des quantités non négligeables de particules.

Le tableau N°1 résume les sources et les taux d'émission à l'échelle mondiale des particules d'origine naturelle [22].

Tableau N° 1 : Sources et taux d'émission des particules d'origine naturelle [22]

Source d'émission	Quantité émise (MG tonne/an)	Pourcentage du total
Aérosols marins	908	43,32
Nitrates issus du NO et NO ₂	390	18,61
Ammonium	245	11,69
Sulfates	182	8,68
Terpènes biogénétiques	182	8,68
Erosion éolienne	182	8,68
Eruption volcanique	4	0,20
Feux spontanés de forêts	3	0,14
Total	2096	100

A l'échelle mondiale, le taux d'émission des particules d'origine naturelle s'élève à environ $2096 \cdot 10^6$ Tonnes/an. Environ 60% de ces émissions proviennent des aérosols marins et des nitrates issus du NO et NO₂ [22].

I.1.3.2– Les émissions anthropogéniques

Les activités humaines agissent de nos jours profondément sur les cycles de la plupart des aérosols par plusieurs sources qui peuvent être stationnaires ou mobiles.

I-1.3.2.1 – Les sources stationnaires :

Comme sources fixes on retrouve principalement :

a) – Les industries :

La plus part des branches industrielles sont génératrices de particules dans l'air. Les concentrations les plus élevées de particules dans l'air se rencontrent aux voisinages des installations industrielles. Comme exemple d'industries responsables des émissions de particules dans l'atmosphère, on peut citer :

- **L'industrie thermo énergétique :**

Elle est basée essentiellement sur la combustion. Celle-ci introduit dans l'atmosphère de nombreuses variétés minérales, des métaux et des particules carbonées (suies,...), ainsi que des gaz qui se transforment dans l'atmosphère en particules, tels que les NO_x et le SO₂ [21].

Les combustions incomplètes, assez fréquentes dans les petites installations de production d'énergie et des appareils de chauffage des habitations, sont à l'origine de l'émission d'importantes quantités de particules et d'impuretés de combustible.

La combustion est classée en premier rang parmi les sources artificielles de particules dans l'atmosphère.

En France, par exemple, on a estimé en 1988 les émissions de particules issues des installations de combustion fixes (centrales thermiques, chauffages urbains,...) à $73 \cdot 10^6$ Kg soit 26% du total des particules anthropiques [21].

Au Québec, on a estimé que la combustion issue des sources fixes, sous toutes ses formes, est responsable pour sa part de près de 41% des émissions particulaires [23].

- **L'industrie sidérurgique :**

Dans ce type d'industrie à cause des impuretés du minerai et du charbon et en raison des opérations technologiques qui ne peuvent être exécutées de façon hermétique, les particules sont émises aux différentes étapes de production de l'acier.

L'agglomération (frittage) des minerais, la cokéfaction, la fusion dans les hauts fourneaux, le chauffage, le transport, ...etc., sont tous des processus responsables de l'émission de particules sous forme de poussière, dont la plus grande partie est émise par les hauts fourneaux [19].

- **La métallurgie des métaux non ferreux :**

Du fait que les métaux non ferreux se trouvent dans les minerais sous forme de composés, en concentration relativement réduite, leur raffinage nécessite de nombreuses opérations au cours desquelles d'importantes quantités de métaux sont émises dans l'atmosphère.

Le traitement de fusion d'un métal considéré détermine la fusion simultanée des métaux avec lesquels il coexiste de sorte que la pollution de l'air se produit autant par le métal recherché que par les métaux coexistants. Ainsi, la métallurgie du cuivre et du nickel émet presque autant de plomb que la métallurgie du plomb lui-même [24].

La métallurgie des métaux non ferreux participe à l'émission d'importantes quantités de cuivre, zinc, cadmium, plomb nickel, mercure, aluminium, étain, etc. [19].

- **L'industrie des matériaux de construction :**

Les procédés de production du ciment, ainsi que les autres procédés de fabrication de la magnésie, du plâtre, de la chaux, du laitier, de la brique, de la céramique, du verre, de l'asphalte et de l'amiante sont tous responsables de l'émission d'importantes quantités de particules solides dans l'air.

Les cimenteries sont les plus polluantes, du fait de l'importance des quantités de ciment produites et des roches utilisées pour sa production. Ainsi, pour obtenir une tonne de ciment, il faut environ 1.6 tonnes de matières premières [19].

Dans la ville de Rais HAMIDOU (Alger) où est implantée une petite cimenterie, on a mesuré des teneurs en TSP supérieures à $0,5 \text{ mg/m}^3$, les retombées atmosphériques s'élèvent en moyenne à $60 \text{ g/m}^2/\text{mois}$ [13].

- **L'industrie chimique :**

L'industrie chimique ne représente pas une source importante de particules solides dans l'atmosphère, mais elle contribue de façon indirecte à la pollution particulaire de l'air du fait des quantités importantes de gaz qu'elle engendre et qui se transforment dans l'air en particules.

D'autres branches de cette industrie peuvent être considérées à l'origine d'émission de particules solides dans l'air, telle que la production d'engrais minéraux.

Les raffineries de pétrole participent aussi à l'émission de certains métaux tel que le vanadium et le nickel contenus dans le pétrole et certains hydrocarbures aromatiques polycycliques [18].

b) Incinération des déchets :

D'importantes quantités de produits déjà utilisés (boîtes de conserves, batteries, piles, plastiques, pneus, métaux, ...etc.) dont la composition chimique est très diversifiée, finissent leurs vies dans les décharges sous forme de déchets.

L'incinération de ces derniers engendre l'émission d'importantes quantités de particules.

Ces particules peuvent contenir des métaux tels que : Fer, zinc, cadmium, plomb, mercure, aluminium, calcium, sodium, etc., et d'oxydes métalliques divers. L'importance toxicologique de certains métaux émis est considérable [22].

A titre d'exemple, le tableau N°2 présente les rejets relatifs à une usine d'incinération :

Tableau N° 2 : Rejets atmosphériques d'une usine d'incinération [22].

Usine d'incinération	Polluants	Quantités (mg/ Nm ³)
Caractéristiques : Env. 7t/h Avec filtrage de l'effluent gazeux (env.50 000 Nm ³ /h)	Poussières	34
	Plomb et Zinc	2,7
	Cadmium	0,04
	Mercure	0,12
	Chlorure	2,5
	Fluorures	Traces
	SO ₂	140

En plus de ces deux sources principales, il y a les pollutions accidentelles. Ces formes de pollutions de causes diverses sont dues principalement à des grandes catastrophes industrielles mondiales (comme l'explosion d'un réacteur chimique) et les incendies de forêts, etc.

Ces incendies et accidents restituent des quantités considérables de poussières et d'autres éléments gazeux à l'atmosphère et participent ainsi à la formation d'autres particules par les effets de combinaison (synergiques) et de neutralisation (antagoniques).

I-1.3.2.2- Les sources mobiles :

Le parc automobile mondial, qui s'élève à plus de 700 millions de véhicules, connaît un taux de croissance annuel très élevé, particulièrement, dans les pays en voie de développement (plus de 17% en Chine et 3 à 4 % en Algérie) [25].

Il s'ensuit une pollution croissante en polluants gazeux et particulaires et ce malgré tous les progrès technologiques réalisés sur le moteur et sur la réduction des émissions.

Les efforts et progrès réalisés dans ce domaine sont en effet largement compensés par la croissance du trafic routier.

La pollution issue du trafic routier est constituée par les émissions particulières suivantes :

- **Les suies**, sont constitués majoritairement de carbone élémentaire et carbone organique.
- **Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)**, qui sont des composés complexes résultant de la fusion de plusieurs cycles benzéniques. Ils sont présents dans le carburant lui-même ou ils sont synthétisés par la suite lors de la combustion incomplète dans les moteurs à essence et diesel. Ces polluants sont comme pour les suies rejetés à des quantités plus élevées par les moteurs diesel. Ils se présentent généralement dans l'air liés aux particules des suies. Malgré leur présence à des proportions extrêmement faibles, ils exercent un pouvoir nuisible très élevé (susceptibles d'être cancérigène) [16, 26].
- **Les métaux dits « lourds »** qui englobent l'ensemble des métaux présentant des caractères toxiques pour la santé et l'environnement. Parmi ces composés, c'est surtout le plomb qui provoque dans les milieux urbains la plus grosse pollution atmosphérique. Cette pollution prend sa source dans l'adjonction du plomb tétra éthyle comme antidétonant dans les carburants à raison de 0,15 à 0,6 g/l et qui est rejeté par la suite presque totalement dans l'atmosphère des villes [24].

Dans les années 80, on estimait à environ 16% la production mondiale du plomb qui était destinée à être utilisé comme additif dans l'essence. Une voiture utilisant une essence à 0,15g/l de plomb peut émettre 100 à 150 mg/km de particules, dont la masse en plomb peut dépasser les 2,5% [23]. Les émissions mondiales de plomb issues du trafic routier étaient estimées à 248.10⁶kg/an en 1993 [24].

Cependant et depuis l'introduction dans les années 80 de l'essence sans plomb, ces taux d'émissions sont en nette régression. Dans certaines grandes métropoles le taux de pollution particulaire issue du trafic routier est de l'ordre de 20 à 30% [24].

A toutes ces sources de pollution par les particules, il faut ajouter la part importante provenant de la conversion dans l'atmosphère, par divers mécanismes, de polluants gazeux en particules. C'est surtout le cas des sulfates et nitrates issus respectivement du SO_2 et NO_x [21]. L'émission de particules d'origine anthropogénique s'élève globalement à 269.10^9 kg/an , soit environ 12% du taux des particules d'origine naturelle [22].

Comme le montre le tableau N°3, l'émission directe des particules anthropogéniques s'élève seulement au 1/3 du taux global, le reste résulte de la conversion gaz/particules[22].

Tableau N° 3 : Taux d'émission des particules anthropogéniques [22].

Source d'émission	Quantités émises (Kg/an)
- Emission sous forme de particules	
- Particules formées des gaz polluant :	84.10 ⁹
Sulfate à partir de SO_3	
Nitrates à partir des NO_x	133.10 ⁹
Particules photochimiques issues des hydrocarbures	27.10 ⁹
	25.10 ⁹
Total	269.10 ⁹

Sur le tableau N°4 on indique les émissions mondiales de certains métaux lourds selon la source émettrice. A remarquer l'ampleur des émissions du plomb par le trafic routier.

Nature des sources	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
<i>Combustion du charbon :</i>	11275	5.005	13.763	8.158	11.101
-Centrales électriques	4495	2.015	5.348	2.713	4.418
-Industrie et chauffage domestique	6780	2.990	8.415	5.445	6.683
<i>Combustion du fuel :</i>	1408	1.959	27.065	2.419	2.159
-Centrales électriques	334	1.334	9.170	986	727
-Industrie et chauffage domestique	1074	625	17.895	1.433	1.432
<i>Production des métaux non ferreux :</i>		26.738	8.781	49.085	71.572
-Mines		480	800	2.250	465
-Production de plomb		273	331	21.420	332
-Production de cuivre et nickel		25.525	7.065	16.575	6.375
-Production de Zinc et cadmium		460	8.510	64.400	64.400
<i>Production secondaire des métaux non ferreux :</i>		110		765	855
Sidérurgie fer et acier	15.620	1.491	3.568	7.633	19.525
<i>Incinération des déchets :</i>	1.139	1.575	464	2.370	5.600
-Municipales	539	1.470	259	2.100	5.600
-Boues	600	105	105	270	300
Industrie des fertilisants		411	411	165	4.110
Production de ciment	1335		490	7.129	9.790
Combustion du bois		900	1.200	2.100	3.600
Sources mobiles (trafic routier)				248.030	
Divers				4.000	3.254
Total des émissions anthropogéniques	30777	38.189	55.642	331.851	131.866
Total des émissions naturelles	44000	28.000	30.000	12.000	45.000

Tableau N° 4 : Valeurs médianes des émissions de métaux de sources naturelles et anthropiques (tonnes/an) [22].

Ce tableau montre que le chrome issu des émissions naturelles est plus élevé que le chrome anthropique. On remarque que par ailleurs, l'ampleur du Ni qui est le traceur de la combustion de fuel et l'importance du Pb dont la quasi totalité est imputable au trafic routier. Enfin signalons que les teneurs habituelles en TSP que l'on rencontre généralement dans la basse couche de l'atmosphère varient selon les régions et la nature des industries qui y sont implantées.

- En milieu urbain : les teneurs varient de dizaines de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à quelques centaines de $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- En milieu industriel, ces teneurs peuvent atteindre des niveaux plus élevés de l'ordre du mg/m^3 .

I.2- Propriétés des particules

I.2.1- Dimensions et granulométrie des particules

I.2.1.1- Dimensions des particules

Comme la granulométrie d'une particule a une influence prépondérante sur son comportement, il est important de déterminer ses dimensions. Les théories physiques des aérosols sont établies, le plus souvent, pour des particules sphériques. Malheureusement, les aérosols dispersés dans l'air sont loin d'avoir cette forme idéale. C'est ainsi, qu'on a été amené à définir la notion de la particule sphérique équivalente. Soit en valeur, soit en comportement aérodynamique.

Une particule est généralement caractérisée par l'un des diamètres suivants :

Le diamètre aérodynamique « Dae » :

C'est le diamètre d'une sphère ayant la même vitesse de chute que la particule, et une masse spécifique égale à $1\text{g}/\text{cm}^3$.

Le diamètre de Stokes « Ds » :

C'est le diamètre d'une sphère ayant la même vitesse de chute et la même masse volumique que la particule considérée.

Le diamètre de volume équivalent « Dev » :

C'est le diamètre de la sphère possédant la même masse que la particule, et la masse volumique de matériau.

Il est donné par :

$$Dev = (6.m/\pi\rho)^{1/3} \quad (1)$$

Où m et ρ représentent respectivement la masse de la particule et la masse volumique du matériau [27]. En pollution atmosphérique c'est en général le diamètre aérodynamique qui est le plus souvent utilisé.

I.2.1.2- Granulométrie des particules :

Il existe plusieurs classifications possibles pour les particules selon les effets qu'elles induisent sur la santé, leurs caractéristiques physiques et chimiques, ou suivant les méthodes utilisées pour les définir. Cependant, elles sont communément réparties en fonction de leur taille, de leur masse, de leur composition, de leur formation et de leur comportement dans l'air.

Dans cette optique, on a tendance à classer les particules en deux classes :

I.2.1.2.1- Les grosses particules :

Ces particules ont un diamètre supérieur à $2.5\mu\text{m}$, elles sont produites essentiellement par des moyens mécaniques : embruns, vent de sable, etc.

Ce type de particule joue un rôle important dans la physico-chimie de l'atmosphère par leur action catalytique dans l'absorption et l'adsorption des polluants gazeux et elles contribuent de façon notable à la masse de l'aérosol atmosphérique. Elles disparaissent de l'air par la sédimentation.

La portion ayant un diamètre inférieur à $10\mu\text{m}$ séjourne le plus de temps que celle ayant un diamètre supérieur à $10\mu\text{m}$ [27].

I.2.1.2.2- Les particules fines :

Elles représentent les particules dont le diamètre varie entre 2.5 et 0.1 μm , cette dernière dimension représente la limite inférieure au-delà de laquelle la sédimentation n'est plus possible à cause du mouvement brownien dont les forces de viscosité deviennent supérieures à celle de la gravitation [19].

Ces particules se rencontrent partout dans l'atmosphère, mais leur concentration décroît très vite au-delà de la troposphère. Elles sont issues essentiellement de la conversion à partir de la phase gazeuse ou d'effluents de combustion, ou de vapeurs organiques ou métalliques condensées. Ces aérosols disparaissent de l'air, par les mécanismes de diffusion, lessivage et pluies [28].

La figure suivante présente le classement des particules selon leur granulométrie.

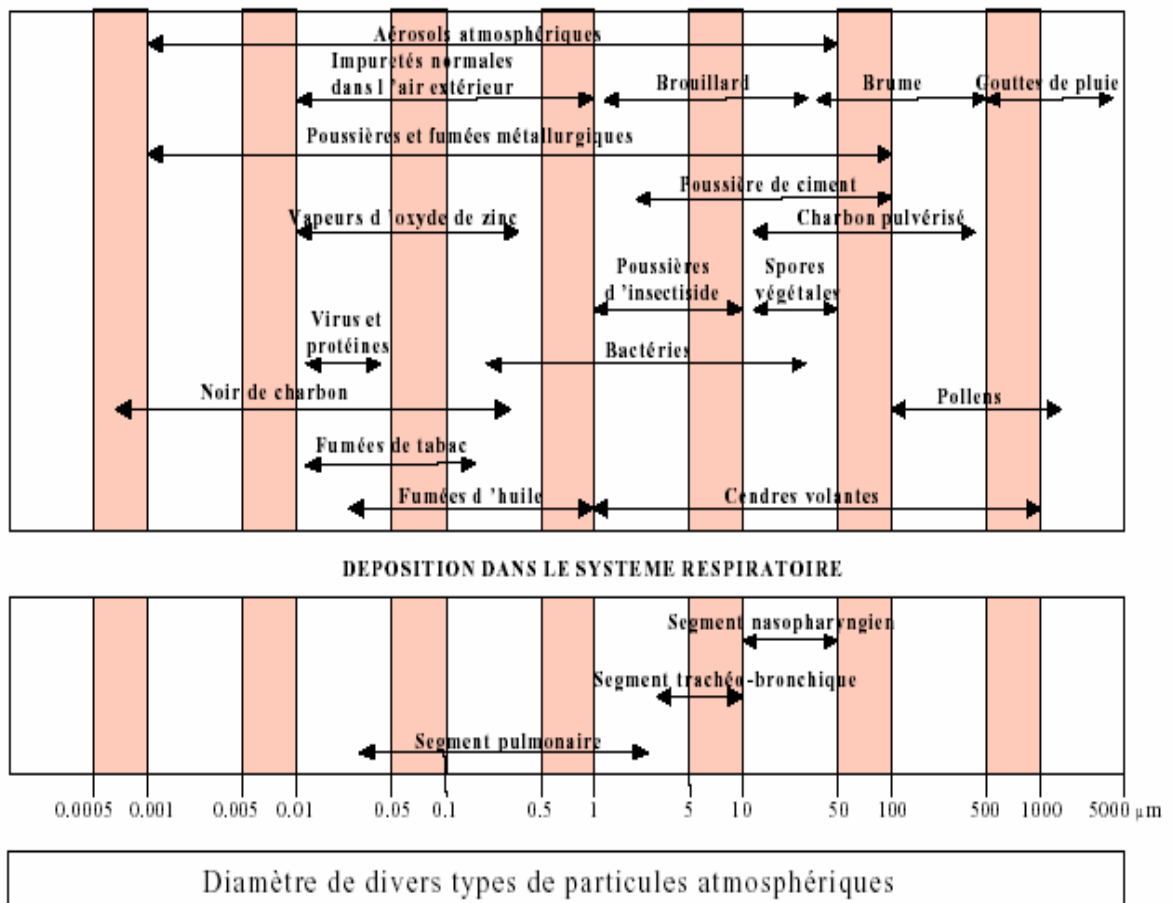


Figure N°1 : Le classement des particules selon leur granulométrie [29].

I.2.2- Formation des particules

Les particules atmosphériques recouvrent une large gamme de taille qu'on peut diviser en deux catégories [12, 15] :

- **Les grosses particules** : d'un diamètre supérieur à 10 micromètres, d'origine naturelle, elles sont principalement émises par des processus mécaniques, citons la friction du vent sur les surfaces solides (érosion des sols) et les surfaces liquides (la formation d'embruns marins) ; parmi les biologiques, il y a notamment la dispersion des spores et des pollens. Ces particules sont arrêtées par les moyens de défense naturels de l'organisme.

- **Les PM-10** : peuvent être émises en tant que telles par les procédés de combustion et les procédés industriels. Elles peuvent aussi résulter de la condensation de gaz à faible température de condensation ou encore des réactions chimiques entre gaz donnant lieu à la formation d'un solide (formation de sulfates, d'ammonium). De part de leur finesse ces particules pénètrent dans l'appareil respiratoire. La catégorie de PM-10 est elle-même subdivisée en deux catégories selon que leur diamètre est supérieur ou inférieur à $2,5\mu\text{m}$:

- la fraction thoracique englobant les particules de diamètre compris entre 2,5 et $10\mu\text{m}$.

- la fraction respirable ou alvéolaire de diamètre inférieur à $2,5\mu\text{m}$ (PM-2,5).

On définit de plus, les PM-1 (particules de diamètre $< 1\mu\text{m}$) qui sont des particules très fines issues de mauvaise combustion et qui englobent aussi les particules secondaires formées dans l'atmosphère après émission de polluants gazeux (cas des sulfates et des nitrates).

La formation des particules fines s'opère en deux étapes. D'abord, par la formation de petits agrégats par réaction chimique ou par condensation de gaz. Ces agrégats, composés de quelques molécules, ont des dimensions très faibles. Ils peuvent servir de noyau pour la condensation d'autres molécules de gaz ou coaguler avec d'autres agrégats pour former des particules de taille plus importante, ce qui constitue la seconde étape. Ainsi les grosses particules disparaissent dans l'atmosphère par sédimentation et les particules submicroniques s'agglomèrent pour donner des particules de diamètre supérieur. Il ne reste alors en suspension dans l'air que les particules de diamètre inférieur à environ $30\mu\text{m}$.

La composition des particules est très variable. En effet, les grosses particules contiennent les éléments abondants de la couche terrestre tels que Al, Ca, Fe, K, Ti, Mn, Sr, Si et les sels

marins, alors que les particules fines contiennent des sulfates, nitrates, ammonium résultant de la transformation dans l'air des oxydes de soufre et d'azote, de l'ammoniac, ainsi que du carbone, des composés organiques et des métaux, provenant entre autres des combustibles fossiles.

On distingue les particules primaires, qui ont été émises directement en tant que telles, et les particules secondaires, qui se sont formées dans l'atmosphère à partir de précurseurs gazeux.

Les particules primaires anthropiques se forment lors des combustions ; ce sont avant tous des particules ultrafines et fines d'un diamètre inférieur à environ $0.3 \mu\text{m}$ (par exemple la suie).

Les particules qui se forment par abrasion ou qui s'élèvent dans l'air du fait de tourbillons sont en général plus grandes que 1 à $2 \mu\text{m}$.

Les sources naturelles possibles sont le pollen, les embruns, l'érosion éolienne, et les volcans.

Les particules de grandeur moyenne (entre $0,1$ et de $2,5 \mu\text{m}$) proviennent en majorité de sources secondaires et se forment par conversion gaz particule à partir des précurseurs SO_2 , NO_x , NH_3 et COV.

La figure N° 2 présente le processus de formation des particules selon leurs tailles [30].

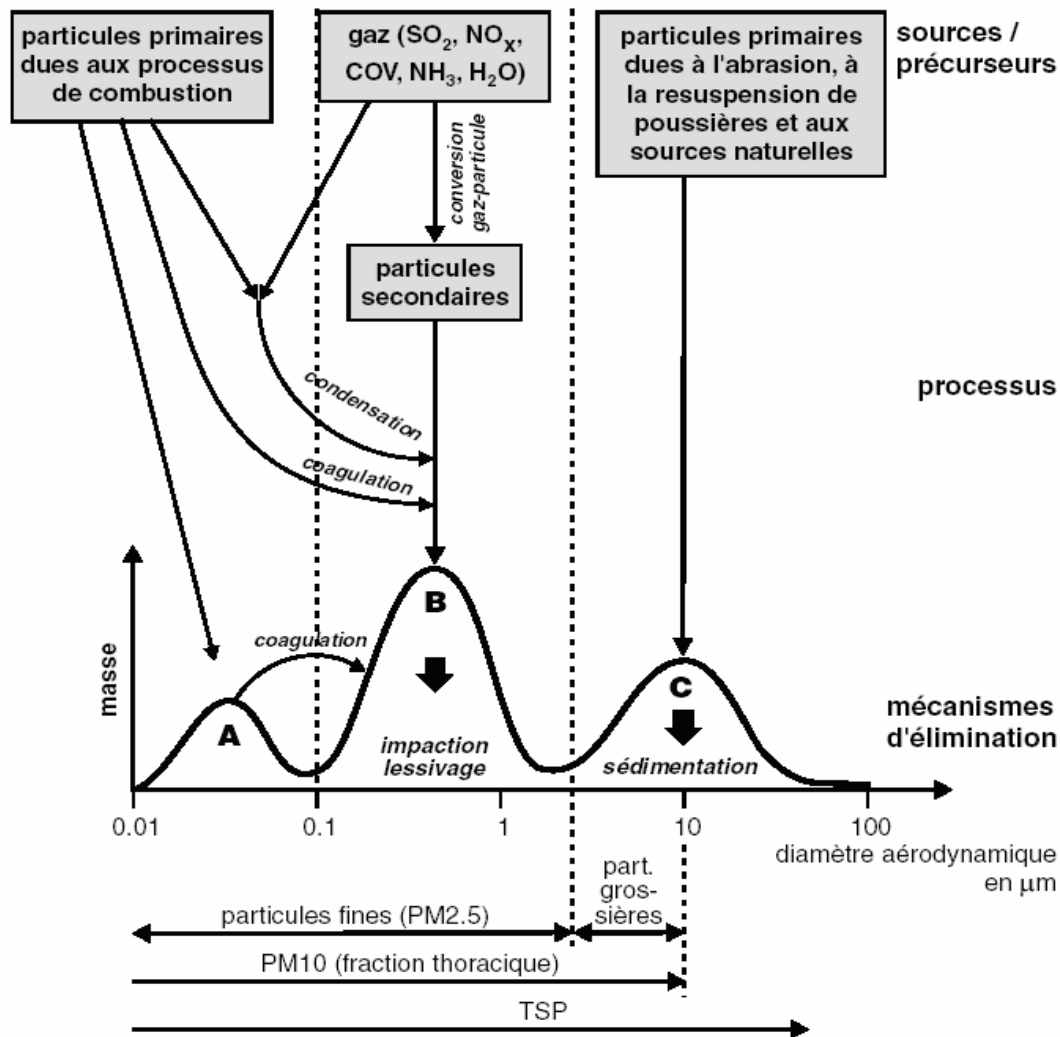


Figure N°2 : Différents processus de formations des particules. [30]

I.3 – Composition chimique des particules fines

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

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

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

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

L'importance relative des fractions carbonées et organiques varie beaucoup, mais la somme de ces deux fractions reste approximativement constante (Figure N°3) [28].

La fraction minérale soluble contient principalement les aérosols secondaires, sulfates et nitrates provenant de la conversion du SO₂ et NO₂ ainsi que les ions chlorures et ammonium.

La partie insoluble est riche en fer, aluminosilicates et métaux lourds.

La fraction carbonée est constituée de carbone élémentaire appelé aussi « carbone suie » ou « black carbon ». Ce carbone non fonctionnalisé et hautement polymérisé est non réactif. Il provient de toutes les combustions et des débris de matériaux organiques largués par les activités humaines

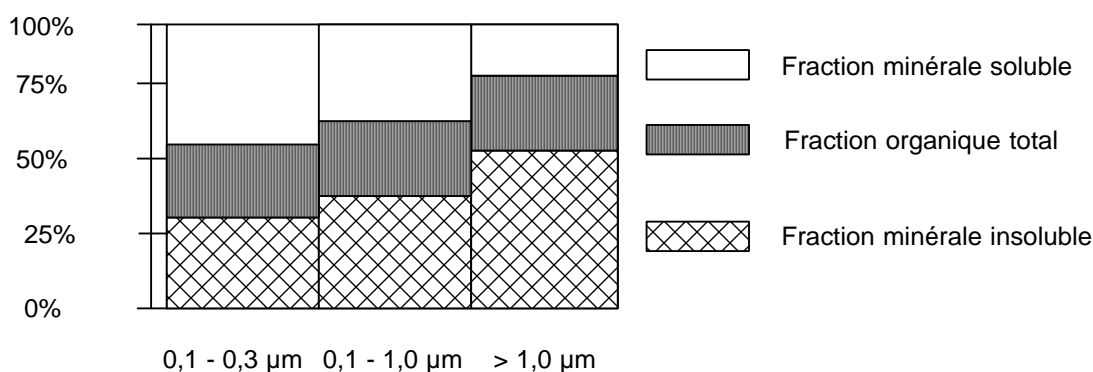


Figure N° 3 : Proportions relatives des fractions chimiques composant les particules en fonction de leur taille.

Le carbone organique se retrouve sous forme d'alcane lourds, d'alcools, d'esters et de composés aromatiques polycycliques (HAP). Il s'agit de composés organiques à chaînes longues de 8 à 30 atomes de carbone [28].

La figure N°4, présente un exemple des composés majeurs des PM-10 et leur proportion dans les particules fines mesurées en Angleterre en 1997 [31].

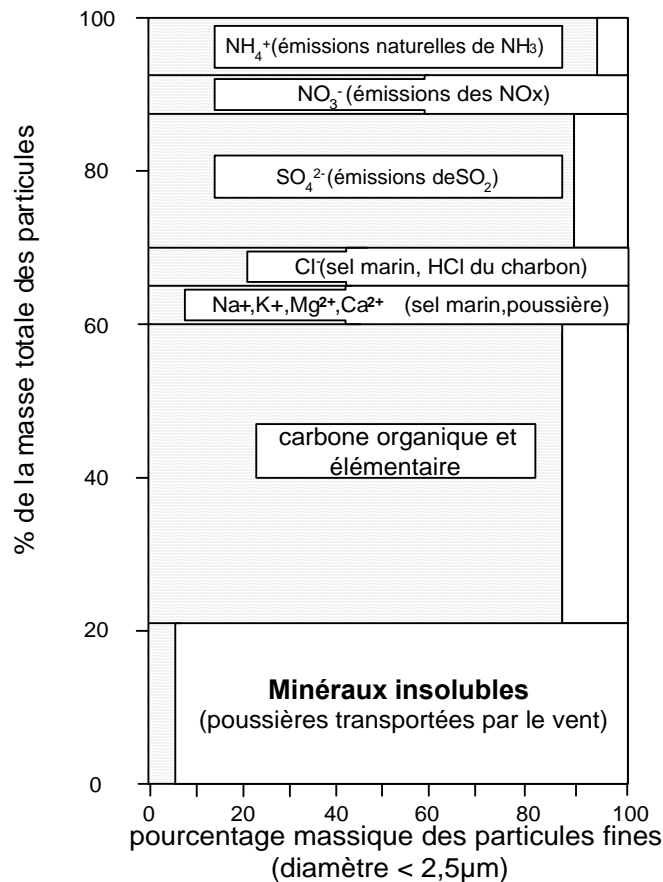


Figure N°4 : Composants majeurs des PM – 10 et leur proportion dans les particules fines (PM – 2,5) mesurées en Angleterre [31].

On estime globalement que plus de 80% du carbone élémentaire et carbone organique et des aérosols secondaires se trouvent dans les PM-2,5. Les particules d'un diamètre compris entre 2,5 et 10 μm contiennent environ 50% de ces substances et un taux important de minéraux insolubles [31].

Les particules atmosphériques ont des compositions chimiques différentes selon la nature du processus qui a conduit à leur formation.

On peut trouver une partie organique formée de carbone, une part minérale (aluminosilicates...), des nitrates provenant de l'oxydation des oxydes d'azote, des sulfates provenant de l'oxydation du dioxyde de soufre, des cations et anions solubles (Na⁺, Ca⁺⁺, K⁺, Mg⁺⁺, NH₄⁺, Cl⁻...), des métaux.

Cette multiplicité de sources conduit également à une multiplicité dans la composition chimique qui reste délicate et coûteuse à analyser.

Chapitre II :
Effets des particules en
suspension.

II – Effets des particules en suspensions

II.1- Effets des particules sur la santé humaine

II.1.1- Le cheminement des particules dans l'appareil respiratoire

L'inhalation est la principale voie d'exposition de l'être humain aux particules en suspension. L'action nocive des matières particulaires en suspension dans l'air s'exerce ainsi principalement, si ce n'est exclusivement, par les voies respiratoires. Il faut rappeler ici qu'une personne respire chaque jour $15 m^3$ d'air et que la zone des échanges gazeux de l'appareil respiratoire constitue une interface de $70 m^2$ environ entre le milieu extérieur et l'organisme.

La profondeur de pénétration et les mécanismes de déposition des particules dans l'appareil respiratoire dépendent d'abord de leur granulométrie et de la morphologie des voies aériennes qui conditionne les modalités de l'écoulement aérien.

Ainsi les particules de diamètre aérodynamique supérieur à $10 \mu m$ sont retenues au niveau des voies aériennes supérieures. Leur rétention se fait par deux mécanismes principaux : La filtration interception et l'impaction au niveau du nez, gorge et des voies aériennes supérieures.

Les particules de diamètre compris entre $2,5$ et $10 \mu m$ se déposent au niveau de l'arbre trachéobronchite par impaction. Dans cette zone, les particules peuvent être éliminées par clearance mucociliaire et la toux [29, 32].

Les particules de diamètre aérodynamique moyen inférieur à $2,5 \mu m$ (particules alvéolaires) pénètrent profondément dans l'appareil respiratoire jusqu'aux sacs alvéolaires où ils se déposent par diffusion. En ce point la vitesse de l'air est très faible. Au niveau alvéolaire, les particules déposées peuvent être phagocytées par les macrophages et selon leur solubilité, certaines seront retenues alors que d'autres sont véhiculées vers les lymphatiques bronchiques d'où elles pourront diffuser par voie hématogène dans tous les organes [29, 32].

Nous illustrons en figure N° 5 le devenir des particules atmosphériques dans l'appareil respiratoire en fonction de leur granulométrie [32].

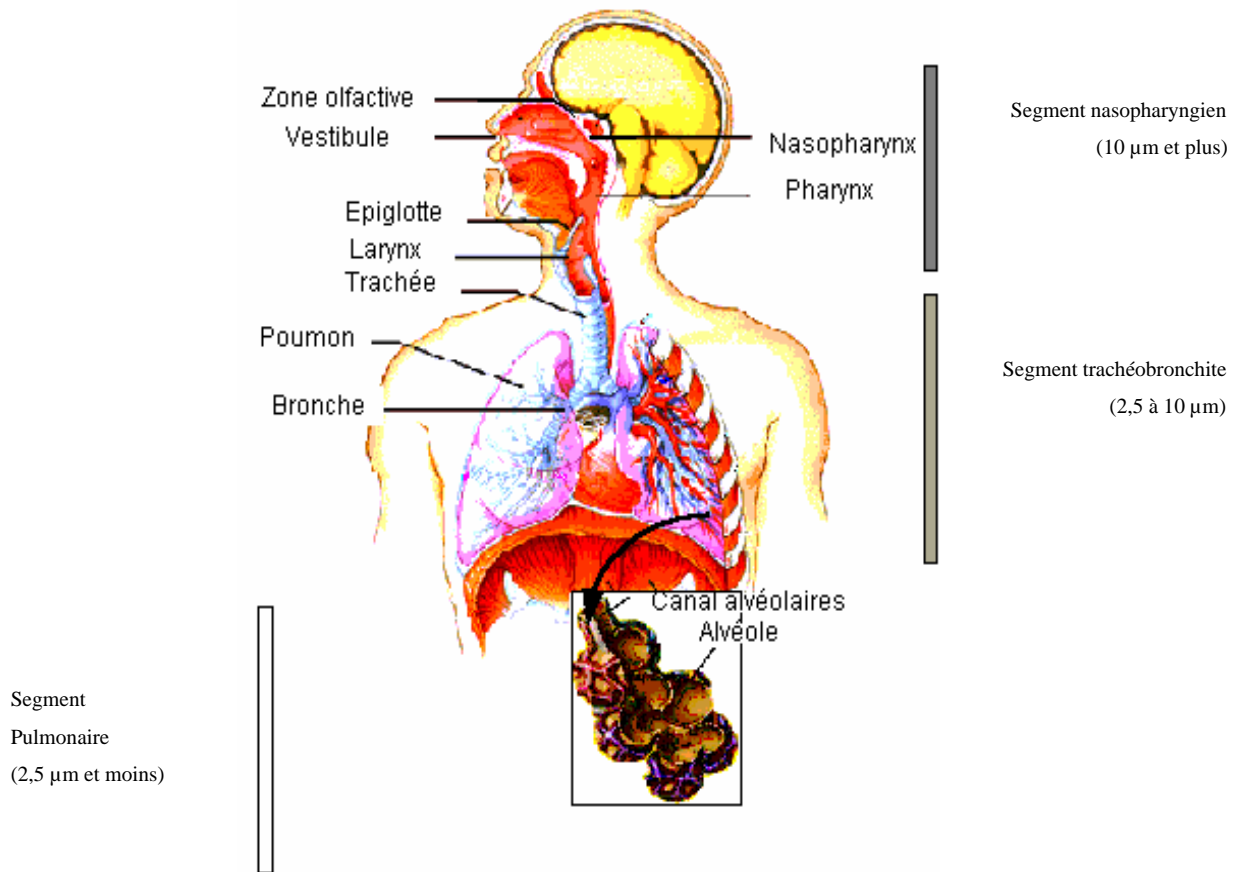


Figure N° 5 : Devenir des particules atmosphériques dans l'appareil respiratoire en fonction de leur granulométrie moyenne [32].

II.1.2 – Evaluation des effets des particules polluantes sur la santé

Les chercheurs utilisent trois principales approches pour étudier les relations entre santé humaine et polluants atmosphériques :

- Les études épidémiologiques
- Les études cliniques (exposition de sujets humains aux polluants, dans des conditions contrôlées)
- Les études toxicologiques

Dans le cas des études épidémiologiques sur les effets des particules, on examine les corrélations statistiques existant entre les fluctuations de la prévalence des troubles cardiorespiratoires dans la population générale. Il faut rappeler que les effets nocifs de l'exposition aux particules sont strictement associés à l'appareil cardiorespiratoire (cœur et poumons). Il arrive qu'on conteste les résultats des analyses épidémiologiques et leur interprétation, en raison de l'existence de facteurs confondants tels que la température, l'humidité, les autres polluants et l'état de santé des sujets, qui peuvent contribuer aux effets observés.

Les études cliniques permettent cependant d'examiner de manière plus approfondie les corrélations établies par les études épidémiologiques, en exposant des sujets à des quantités déterminées de polluants ; évidemment, pour des raisons d'éthique, les effets sur la santé induits doivent être réversibles et de courte durée.

Les études toxicologiques consistent à exposer des animaux, ou des tissus humains et animaux, à des polluants. Cependant, il est difficile d'extrapoler aux être humains les résultats obtenus chez les animaux.

Dans une optique de santé publique, les études épidémiologiques constituent le meilleur moyen d'examiner les effets sur la population générale d'une exposition aux polluants qui sont réellement présents dans l'atmosphère. Les études cliniques et toxicologiques sont alors utilisées pour corroborer éventuellement les signes épidémiologiques observés et expliquer les mécanismes par lesquels l'exposition aux particules peut provoquer l'apparition de certains effets.

Dans l'évaluation des effets des particules polluantes sur la santé, ce sont manifestement les études épidémiologiques réalisées en grand nombre qui présentent les preuves les plus probables de l'existence d'un lien de cause à effet entre les effets cardiorespiratoires et les particules présentes dans l'air ambiant à des concentrations usuellement rencontrées (Tableau N°8) [33].

Ces études menées dans des conditions ambiantes très diversifiées dans de nombreuses villes montrent les effets suivants [33]:

- Accroissement de la mortalité attribuable aux maladies cardiorespiratoires.
- Hausse des hospitalisations attribuables aux maladies cardiorespiratoires.
- Dégradation de la fonction pulmonaire chez les enfants et les adultes asthmatiques.
- Symptômes respiratoires entraînant l'absentéisme au travail et une restriction des activités.
- Existence de troubles chroniques de dégradation de la fonction et la capacité pulmonaire chez l'enfant ainsi qu'une grande incidence de la bronchite chronique et de l'asthme.

Tableau N° 5 : Concentration moyennes des particules fines et effets sur la santé [33].

Effets sur la santé	Intervalle des teneurs en particules observées dans diverses études ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).	
	Absentéisme scolaire	PM-10
Santé pulmonaire et fonction respiratoire	PM-2,5	0,5 – 11,0
Hospitalisations	PM-10	29,6 – 50,0
Mortalité	PM-2,5	11,0 – 29,6
	PM-10	18,2 – 47,9

Les personnes souffrantes et personnes âgées sont particulièrement sensibles à une exposition aux particules.

Les effets observés ne sont certes pas de forte ampleur, mais très significatifs.

On estime ainsi que les hausses de mortalité observées pour chaque hausse de concentration de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sont comprises entre 0,5 et 1,7 % environ pour les PM-10 et sont de l'ordre de 1,5 % pour les PM-2,5.

Les hausses d'hospitalisation, pour chaque hausse de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, vont de 0,7 à 0,8 % pour les PM-2,5. [32]

Dans le même contexte, une étude effectuée pendant une année à St-Louis (USA) a montré, qu'en tenant compte des effets de divers polluants, de la température, de la saison, des jours les plus chauds et les jours les plus froids, que ce sont les PM-10 qui sont le plus fortement corrélés avec le nombre de décès enregistrés. Une augmentation des teneurs en PM-10 de

100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ deux jours auparavant est suivie d'une augmentation des cas de décès de 16 % [5].

Une étude similaire de cohortes dans un immense collectif de 550.000 personnes provenant de 151 agglomérations des USA de 1982 à 1989 a montré que par tranche de 10 μg de PM-2,5, le risque de décès total augmentait de 7%, et le risque de décès par maladie cardiaque ou pulmonaire d'environ 12% [6].

En suisse, une étude portant sur les maladies respiratoires et les allergies chez les enfants en âge scolaire, montre une relation entre les TSP, les PM-10, le NO_2 et le SO_2 et la fréquence d'apparition des maladies des voies respiratoires. La relation la plus étroite est observée avec les valeurs de PM-10 [14].

II.2 – Effets sur les animaux

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

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

Les poussières alcalines provenant des composés du calcaire dans les cimenteries peuvent provoquer des troubles chez les animaux par des lésions du tube digestif et modifications du pH [26].

II.3 – Effets sur les végétaux

Les végétaux sont exposés de manière durable à la pollution atmosphérique. Dans certaines recherches, Ils sont d'ailleurs utilisés comme bio-indicateurs (lichens par exemple). Ils peuvent être l'objet d'atteintes aiguës telles que nécroses et d'atteintes chroniques telles que troubles de croissance. A part les forêts, la pollution de l'air touche aussi les céréales et les plantes agricoles, comme les pois, les épinards et le trèfle. Certaines espèces d'arbres fruitiers sont également très sensibles; c'est le cas par exemple des abricotiers. Les végétaux sont exposés à la fois à l'action des polluants en suspension dans l'atmosphère, aux retombées sèches de poussière et de métaux et aux dépôts acides. Ils sont atteints directement par le feuillage et aussi indirectement par l'intermédiaire du sol (lessivage d'éléments nutritifs). Bien que chaque polluant ait un effet spécifique, ce sont surtout les retombées acides qui sont dangereuses pour les végétaux. La couche protectrice des feuilles

et des aiguilles peut subir des lésions visibles, telles que fentes et augmentation de la taille des pores. L'eau de pluie ruisselant à l'intérieur des forêts présente un pH inférieur à celui des pluies en terrain découvert. La base du tronc est ainsi fortement atteinte [34].

L'augmentation de l'acidité des sols peut entraîner des lésions aux racelles des arbres et se répercuter sur l'activité des micro-organismes, comme les bactéries de l'azote par exemple. En tant qu'oligo-éléments, les plantes ont besoin de composés métalliques à base de cuivre, fer, zinc, ...etc. Mais une accumulation de ces métaux équivaut à un empoisonnement. L'obstruction des stomates par les particules fines contribue aussi au dépérissement des plantes [34].

II.4 – Effets des particules solides sur les matériaux

Les dégradations des matériaux, (métaux, pierres, peintures, tissus, cuir, plastiques, caoutchouc, papier...), utilisés dans différentes fonctions (bâtiment, grands équipements, matériels mécaniques et électroniques, revêtements...) dues aux particules solides peuvent se produire par abrasion, salissure et corrosion. Ce phénomène se produit par les substances oxydantes et acides supportés par les particules solides [18].

Les peintures peuvent être assombries par les dépôts de particules solides noires. Les surfaces fraîchement peintes sont généralement collantes et retiennent les particules.

A côté 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 s'infiltrer à l'intérieur des habitations et provoquent la salissure des murs, plafonds, tapis,...etc. Cette dégradation de la bâtie (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 suies ont été établies [34].

II.5 – Effet sur la visibilité

La visibilité est la qualité de l'atmosphère qui permet de voir à une plus ou moins grande distance, mais aussi de voir plus ou moins bien des objets proches et d'en apprécier les détails de couleur ou de texture. La visibilité est considérée comme un élément de bien-être. La pollution atmosphérique réduit la visibilité par absorption et par diffraction de la lumière.

L'absorption est principalement le fait des particules de carbone élémentaire émises notamment par les moteurs diesels, et de gaz tels que le dioxyde d'azote qui donne à l'atmosphère une couleur brune. La diffraction, qui est le fait des particules fines (PM-2,5), est fonction de la taille des particules ; elle est aussi donc en relation avec l'humidité de l'atmosphère, la composition chimique des particules et leur processus de formation.

Les sulfates et nitrates, composantes importantes des particules PM-2,5 dispersent très efficacement la lumière et contribuent fortement à la réduction de la visibilité [36].

Dans les effets sur l'environnement global, on invoque de plus en plus un éventuel effet des particules sur les changements climatiques. Les particules peuvent réfléchir les rayons ou constituer un écran, ce qui conduirait à un refroidissement de la planète (action antagoniste à l'effet de serre).

Chapitre III :

Aperçu sur les principales techniques et méthodes de mesure et d'analyse des particules en suspension.

III – Aperçu sur les principales techniques et méthodes de mesure et d’analyse des particules en suspension

L’étude de la pollution de l’air par les particules en suspension comprend généralement les étapes suivantes :

- L’échantillonnage et le prélèvement des particules sur filtres appropriés
- La mesure de la teneur atmosphérique en particules

Lorsque les techniques de prélèvement utilisées le permettent, une étude plus poussée permettra d’aborder :

- La détermination du spectre granulométrique (taille, nombre et répartition)
- L’analyse des composés toxiques qui sont associés aux particules en suspension

III.1 – Echantillonnage de l’air

Généralement l’échantillonnage des particules en suspension se fait sur filtres et membranes par filtration de l’air ambiant

Quel que soit le mode d’échantillonnage utilisé, le rendement granulométrique des particules en suspension n’est égal à 100 % que pour les tailles approximativement inférieures à 3 μm . Au-delà de cette dimension, l’efficacité de la collecte des divers dispositifs est influencée, aussi bien, par les conditions météorologiques, en particulier la vitesse du vent, que par les conditions de prélèvement telles que le débit d’aspiration, la position et les conceptions du dispositif de captage.

Ainsi, la géométrie de la tête de prélèvement et le débit d’air échantillonné conditionnent à la fois le diamètre des particules recueillies sur le filtre et le degré d’influence du vent sur l’efficacité d’échantillonnage.

Il n’existe pas d’instrument idéal capable de mesurer à la fois la masse, les dimensions et la nature des particules. Diverses méthodes permettent de mesurer une partie seulement de leurs caractéristiques. Par ailleurs, les techniques de mesure peuvent déboucher sur des résultats de concentration notablement différents selon que le filtre est pesé par simple gravimétrie, examiné par réflectométrie ou analysé par méthode automatique (absorption par rayonnement ou microbalance oscillante).

Comme il n'existe pratiquement pas d'échantillons de référence pour les particules, il est très difficile d'effectuer en laboratoire des évaluations des divers instruments de mesure de particules comme cela est couramment pratiqué sur les appareils d'analyse de gaz.

Généralement, l'échantillonnage se fait avec ou sans fractionnement granulométrique, ce qui donne lieu à trois catégories de prélèvement :

- Les prélèvements sans coupure granulométrique spécifique : Ce sont des méthodes dites intégrales qui collectent ou mesurent les aérosols sans dimension
- Les prélèvements avec coupure granulométrique
- Les prélèvements avec fractionnement granulométrique, ou méthodes discrètes qui collectent ou mesurent les aérosols sélectivement, en fonction de leur dimension [27, 37].

III.1.1 – Les prélèvements sans coupure granulométrique spécifique

Il s'agit de capter toutes les poussières en suspension jusqu'à 30 μm ou plus. Selon le débit d'aspiration choisi, on enrichit ou non le prélèvement avec les particules de diamètre supérieur à 10 μm .

On distingue, dans cette catégorie, selon la taille et la nature des particules, trois modes de prélèvement [38-39]:

a) – Les Fumées Noires :

(FN; « Black Carbon – BC ou Black Smoke – BS)

Cette méthode est utilisée en principe, pour la collecte des particules fines de taille inférieure à 5 μm qui sont collectées avec une grande efficacité.

L'échantillonnage est pratiqué à débit relativement faible (environ 80 l/h).

L'analyse ultérieure du filtre est effectuée par réflectométrie. Celle-ci consiste à mesurer le degré de noircissement du filtre collecteur par référence à une échelle de gris étalons. Une courbe de calibration fournit une correspondance entre la noirceur du dépôt et la masse des particules déposées. Cette méthode est généralement utilisée pour les prélèvements de particules issues de la combustion de fuel et du charbon et pour les suies émises par le trafic routier diesel.

La durée de prélèvement est généralement de 2 heures. L'indice de fumée noire est donné en $\mu g/m^3$. Les mesures de fumées noires bénéficient en Occident d'un historique important. De

nos jours cette technique est de plus en plus remplacée par celle des PM-10 qui est plus représentative.

b) – Méthode de prélèvement sur filtres ouvert à débit moyen :

Dans ce cas, les prélèvements sont effectués par aspiration de l'air et la rétention des particules sur filtre ouvert de 47 mm de diamètre. Le débit d'aspiration est de l'ordre de 1,5 m³/h. La durée d'échantillonnage est de 24 heures ou plus.

La méthode donne la teneur des particules totales en suspension, les TSP, qui en général, est supérieure à celle des fumées noires.

Les particules fixées sur le filtre peuvent servir d'échantillons pour d'autres analyses.

c) – Méthode de prélèvement à très fort débit :

La méthode utilise, comme la précédente, la rétention des particules sur filtre. Toutefois les appareils sont dotés d'une pompe d'aspiration d'un très fort débit de l'ordre de 60 à 100 m³/h. Ces appareils portent le nom de High Volume Sampler, HVS.

Comme dans la méthode précédente ils donnent les TSP et peuvent avoir une efficacité de collecte des particules de diamètre supérieur à 10 µm qui atteint jusqu'à 25 % pour les grosses particules de 30 µm.

Le fort débit utilisé permet d'avoir sur une durée de 24 h de grandes masses de particules recueillies, ce qui rend aisé les analyses ultérieures de l'échantillon.

Les modes de prélèvement à débit moyen et par HVS sont largement utilisées de nos jours [4, 37].

III.1.2 – Prélèvement avec coupure granulométrique

Mesure des PM-10 [37] :

Il s'agit d'un équipement doté d'une tête, qui par sa conception, ne capte que des particules dont le diamètre est inférieur à une valeur fixe.

En pratique, les têtes commercialisées sont conçues pour capter les particules de diamètre inférieur à 10 µm. Il s'agit ici de collecter uniquement les particules en suspension inhalables, c'est-à-dire, la fraction trachéobronchite et alvéolaire.

L'appareil le plus connu de nos jours et qui est accepté comme référence, est le HVS- PM-10 de la firme américaine Andersen. C'est un HVS équipé d'une entrée sélective pour la collecte des particules < 10 µm [37].

En principe, tout appareil destiné à l'étude des TSP peut également être utilisé pour l'analyse des PM-10, si toute fois la tête de prélèvement TSP est remplacée par une tête certifiée PM-10.

Toute fois et pour permettre des études comparatives, les méthodes de prélèvement ont été perfectionnées et surtout standardisées.

En plus de la technique HVS-PM-10 qui demeure une méthode manuelle (changement manuel du filtre collecteur à intervalles de temps réguliers), il existe deux autres méthodes automatisées qui de nos jours équipent la majorité des réseaux de surveillance. Il s'agit de la jauge bêta et de l'appareil TEOM [4, 37].

– La jauge à absorption bêta :

Cette méthode consiste à mesurer l'atténuation d'un rayonnement bêta constitué d'électrons d'énergie 0,01 à 0,1 MeV ayant traversé un filtre chargé de particules (source radioactive C14). Les particules sont collectées par filtration ou impaction sur un filtre approprié.

Le filtre, après prélèvement est placé entre un émetteur de rayonnement bêta et un détecteur qui compte le nombre d'électrons qui ont traversé le filtre.

La masse des particules déposées sur le filtre est d'autant plus grande que le nombre d'électrons qui traversent le filtre est faible.

La mesure consiste à calculer la variation d'absorption entre le filtre vierge et celui chargé du dépôt de particule [16].

L'absorption du rayonnement bêta est indépendante de la nature des particules déposées sur filtre. Par cette méthode, les particules collectées ne peuvent pas faire l'objet d'analyse au laboratoire.

Dans cette méthode, des erreurs peuvent se produire, si la taille des particules est importante, si le dépôt n'est pas homogène ou si l'aérosol est composé de particules de poids atomiques élevés [16].

– La balance piézo-électrique ou « balance à quartz » : appareil de type TEOM [39]

Cette méthode repose sur le principe suivant : « Un cristal piézo-électrique, quand il est soumis à une pression, développe des charges électriques. Le quartz, qui est un corps piézo-électrique, vibre à une fréquence propre très précise qui peut être mesurée avec une grande précision s'il est placé dans un circuit oscillant approprié. Si l'on dépose une masse supplémentaire telle que des aérosols, sur la surface active du cristal, on observe une décroissance de la fréquence d'oscillation en fonction de la masse ajoutée. Cette propriété a été mise en œuvre dans de nombreux dispositifs commerciaux appelés « balance à quartz ». Ces dispositifs permettent, avec un temps de réponse très court, la mesure de masses très faibles.

C'est sur cette base que fonctionne l'appareil Tapered Element Oscillating Microbalance TEOM (microbalance à élément conique oscillant) qui consiste à mesurer les variations de fréquence de vibration d'un élément oscillant maintenu à la température de 50 °C et sur lequel les particules prélevées se sont déposées. Dans ce dispositif on peut avoir les teneurs instantanées.

Toutefois, le maintien du dispositif à une température élevée de 50°C afin de réduire l'effet négatif des variations thermiques sur la microbalance, induit une volatilisation de particules peu stables (nitrates d'ammonium, composés organiques) et donc une sous-estimation de la concentration massique des particules fines. Par ailleurs, et comme pour la jauge bêta, la méthode TEOM ne permet pas une analyse ultérieure des particules.

Le TEOM et la jauge bêta travaillent en continu et permettent de mettre en évidence d'éventuels pics de pollution.

III.1.3 – Les prélèvements avec fractionnement granulométrique

Ce sont des méthodes qui permettent une séparation plus fine des particules inhalables.

La sélection des particules en classe granulométrique se fait par impaction d'où le nom d'impacteur. Les impacteurs virtuels ou dichotomes travaillent à débit moyen ($1,7 \text{ m}^3 / \text{h}$) et permettent d'avoir deux classes granulométriques : la fraction alvéolaire ($d < 2,5 \mu\text{m}$) et la fraction trachéobronchite ($2,5 < d < 10 \mu\text{m}$).

Les impacteurs à cascade sont équipés de 5 à 7 niveaux d'impaction et permettent d'avoir 5 à 7 fractions granulométriques (de 0 à $1 \mu\text{m}$, de 1 à $2,5 \mu\text{m}$ etc.). Ces cascadeurs travaillent à débit fort (30 à $60 \text{ m}^3 / \text{h}$).

L'appareil le plus connu est le HVS-PM-10 équipé d'un impacteur d'Andersen. Il est considéré comme référence par l'agence américaine EPA.

Nous résumons dans le tableau N° 6 les principales méthodes de prélèvement utilisées pour l'échantillonnage des particules en suspension [4].

Tableau N° 6 : Principales méthodes d'échantillonnage de la matière particulaire en suspension [4].

Dispositif de prélèvement	Sélect. Granulo.	Nbre de fract.	Diamètre de particules (μm)	Débit (m^3/h)	Durée d'échantill. (h)	Principe de la mesure	Analyse ultérieure des particules
Sans tête (fumée noire)	Non	1	0-5	<1	24 h	Réfectométrie	Non
Sans tête (TSP)	Non	1	0.1 à 20-30	1.5	24 h	Gravimétrie	Oui
HVS (TSP)	Non	1	0.1 à 20-30	66 à 100	24 h	Gravimétrie	Oui
HVS-PM 10	Oui	1	< 10	66 à 100	24 h	Gravimétrie	Oui
Jauge bêta	Oui	1	< 10	1.5	5 mn - 24 h	Radiométrie	Non
HVS-PM 10 Impacteur à cascade	Oui	2 à 7	< 10	34 à 68	24 h	Gravimétrie	Oui
TEOM	Oui	1	< 10	1	5 mn-24 h	Fréquence de vibration	Non

III.2 – Les filtres et membranes de rétention

Les filtres utilisés dans la collection des particules en suspension doivent remplir trois conditions :

- Une efficacité de collection d'au moins 99% pour les particules de diamètre égal à $0,3 \mu\text{m}$ et plus.
- Une hydroscopicité faible.
- Un taux d'impureté aussi faible que possible pour éviter les interférences dans l'analyse quantitative des composés métalliques que véhiculent les poussières.

Les filtres les plus utilisés sont les filtres en fibres de verre et les filtres membranes à base de dérivés de cellulose (acétate et ester de cellulose).

III.2.1 – Les filtres en fibre en de verre

Ils ont une efficacité de collection de 99,9% pour les particules de diamètres supérieur à $0,3 \mu m$. Cette efficacité est mesurée sur les particules d'aérosol du dioctyl-phalate.

L'hygroscopicité des filtres en fibre de verre est faible.

L'inconvénient majeur de ces filtres provient du fait qu'ils contiennent divers éléments métalliques à des teneurs variables. Dans ce contexte, les éléments les plus gênants sont le zinc et le fer qu'on retrouve lors de la minéralisation des filtres à des teneurs élevées. La teneur des filtres **Gelman** type A et **Whatman** GF-A contient plus de $50 \mu g Zn/cm^2$ [40].

III.2.2 – Les filtres membranes

Ce sont des filtres nitro-cellulose (**Sartorius et Millipore**) ou acétate et ester de cellulose (**Gelman GA-3**) qui sont solubles dans les éthers et alcools. On peut ainsi dissoudre les filtres dans l'acétone et récupérer totalement les particules après évaporation du solvant organique. L'étape de minéralisation est ainsi facilitée.

Les filtres membranes les plus utilisés pour la collecte des particules ont une porosité supérieure à $0,8 \mu m$. Ces fibres sont plus hydroscopiques que les filtres en fibres de verre, mais présentent l'avantage d'avoir des teneurs extrêmement faibles en éléments métalliques.

Leur inconvénient est qu'ils présentent une forte résistance à l'écoulement de façon qu'on ne puisse pas les utiliser dans les HVS pour les prélèvements à fort débit.

Avec les deux types de filtres (filtres en fibres de verre et filtres membranes) on recueille avec une bonne efficacité même les particules très fines de $0,1 \mu m$ de diamètre [40].

III.3 – Analyse des particules en suspension

La diversité des substances qui peuvent constituer les particules en suspension dans l'atmosphère rend difficile leur mise en évidence. Mais il existe des méthodes plus au moins développées qui permettent de déterminer certains constituants ainsi que leur concentration, après une préparation préliminaire de l'échantillon [41].

- La composante acide c'est à dire les sulfates et nitrates particuliers, est déterminée généralement par:
 - La chromatographie ionique
 - La spectrométrie UV-visible
- Les éléments métalliques sont déterminés par diverses méthodes classiques:

- La spectrométrie d'absorption atomique (S.A.A).
- Emission par plasma.
- Fluorescence X.
- Méthodes nucléaires.
- La composante organique contenant les HAP est déterminée généralement par des techniques chromatographiques telles que:
 - La chromatographie liquide haute performance (C.L.H.P) équipé d'une détection par émission de fluorescence.
 - Chromatographie en phase gazeuse (C.P.G).

Le carbone élémentaire (carbone suie) et le carbone organique sont généralement analysés après combustion à différentes températures sous forme de CO₂.

Chapitre IV : Méthodologie

IV – Méthodologie

Nous présentons dans ce chapitre la méthodologie adoptée pour le prélèvement et l'analyse des particules fines.

IV.1– Site de prélèvement

Pour l'étude des particules fines en milieu urbain à Alger, nous avons, en fonction de l'objectif fixé, opté pour un site de type urbain, c'est-à-dire un site qui n'est pas influencé directement par les émissions du trafic routier ou industrielles.

Le site choisi se situe à l'intérieur de l'Hôpital Mustapha Pacha à la place du 1^{er} Mai à Alger Centre.

En ce site, le poste de mesure est implanté sur la terrasse du service d'urologie, à une altitude d'environ 15 m par rapport au sol et pratiquement à 1,5 Km perpendiculairement du bord de la mer. L'absence d'obstacles, comme des murs, constructions, etc., qui gêneraient la circulation libre de l'air, permet d'avoir un échantillonnage optimal.

Ce site peut-être considérée comme étant représentatif de l'exposition des populations résidentes à Alger Centre.

IV.2 – Mode de prélèvement

Les prélèvements ont été effectués par la méthode à fort débit avec seuil de coupure granulométrique à $10\ \mu\text{m}$, et fractionnement en plusieurs classes granulométriques.

L'appareil utilisé est le HVS-PM-10 de la firme Graseby équipé d'un cascadeur Andersen dont le principe de fonctionnement est illustré en figure N° 6.

L'ensemble de l'échantillonneur est composé de deux parties :

- Le High Volume Sampler (HVS)
- La tête PM-10
- Cascadeur Andersen

Le HVS comprend principalement une turbine d'aspiration d'air, un filtre et porte filtre de collecte des particules et un variateur de tension pour varier le débit et un débitmètre connecter directement à la turbine.

La tête sélective PM-10 comporte une zone où le fractionnement 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 de diamètre inférieur au seuil de coupure de $10\ \mu\text{m}$ sont entraînées par le flux d'air dans les buses et sont collectées, sur le média filtrant, alors que les particules plus grosses s'écartent du flux et impactent sur la surface d'impaction en raison de leur inertie plus élevée. Afin d'éviter le réentraînement des grosses particules, la surface d'impaction est graissée par huile de silicone et est nettoyée régulièrement.

Le débit d'aspiration est fixé à $1,04\ \text{m}^3/\text{mn}$. L'étalonnage régulier du débit est effectué à l'aide d'un dispositif de 5 disques à trous multiples pour simuler les différentes charges (dispositif PN G 25 de Sierra) [52]. La durée de prélèvement est de 24 heures.

Les filtres utilisés pour la rétention des particules sont en fibres de verre de type Whatman et de dimensions $20 \times 25 \text{ cm}$. Pour la détermination de la teneur en PM-10, chaque filtre est pesé avant et après collecte à $0,1 \text{ mg}$ près. La teneur en PM-10 est alors exprimée en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Le cascadeur d'Andersen à 4 étages qui fonctionne par impaction sur surface plane permet d'accéder aux classes granulométriques : $0 - 1 \mu\text{m}$; $1 - 1,5 \mu\text{m}$; $1,5 - 3 \mu\text{m}$; $3 - 7 \mu\text{m}$ et $7 - 10 \mu\text{m}$.

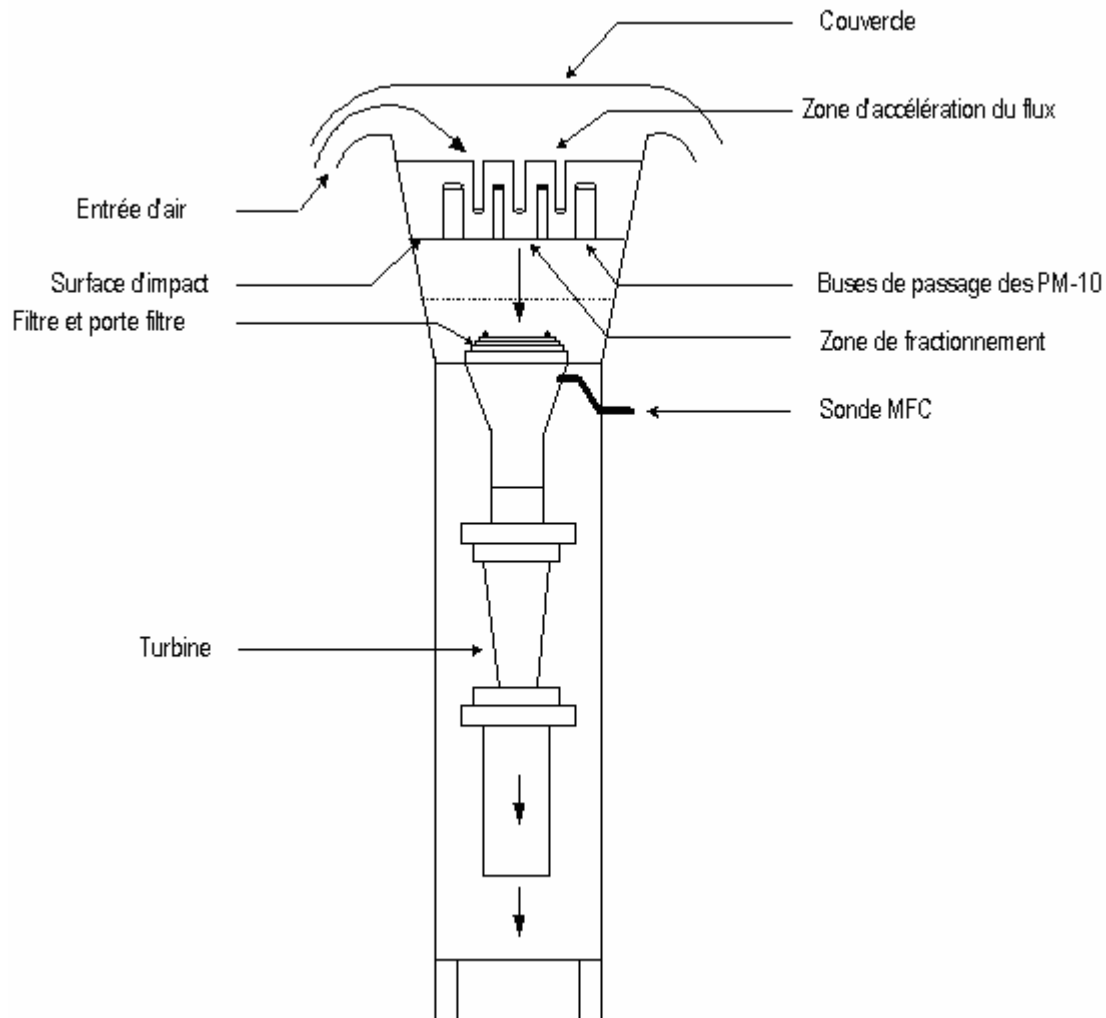


Figure N° 6 : Schéma du principe de collecte des PM – 10 par l'échantillonneur HVS– PM–10.

IV.3 – Traitement et analyse des PM-10

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 à lieu conformément à la norme ISO 9885 [40]. Le filtre chargé de particules est introduit dans un ballon de 250 *ml* contenant 60 *ml* d'acide nitrique (dilution 1:8) et quelques gouttes de HClO₄.

La solution est alors portée à ébullition sous reflux pendant 2 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 30 *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 50 *ml*.

Un filtre vierge va subir la même procédure pour servir de blanc.

Les métaux lourds Pb, Cu, Ni, Co, Mn et Cd, qui du point de vue sanitaire ont une incidence importante, sont alors analysés par spectrophotomètre d'absorption atomique.

Chapitre V :
Résultatset discussions

V- RESULTATS ET DISCUSSION

L'évolution de la pollution de l'air par les particules fines (PM_i ; i = 1 ; 1,5 ; 3 ; 7 ; 10) à Alger a été effectuée durant une période allant du 15 Mars à 8 Juin 2006, avec cinq prélèvements journaliers par mois. Chaque prélèvement journalier permet d'obtenir 3 à 4 classes granulométriques de particules. Ces mesures nous ont permis de collecter 40 échantillons pour 16 jours de mesures.

L'évolution temporelle des PM-10 mesurées est illustrée en figure N° 7.

Le tableau N° 7 résume les teneurs extrêmes et moyennes en PM-10 observées en ce site.

La teneur minimale enregistrée est de 26,8 µg/m³, tandis que le maximum s'élève à 82,5 µg/m³.

La teneur moyenne calculée sur l'ensemble des observations, est de 61,4 µg/m³.

Tableau n° 7 : Valeurs moyenne et extrêmes de teneurs en PM-10 mesurées à Alger Centre.

Paramètres	PM-10 (µg/m ³)
Maximum	82,5
Minimum	26,8
Moyenne	61,4
Ecart type	16,5

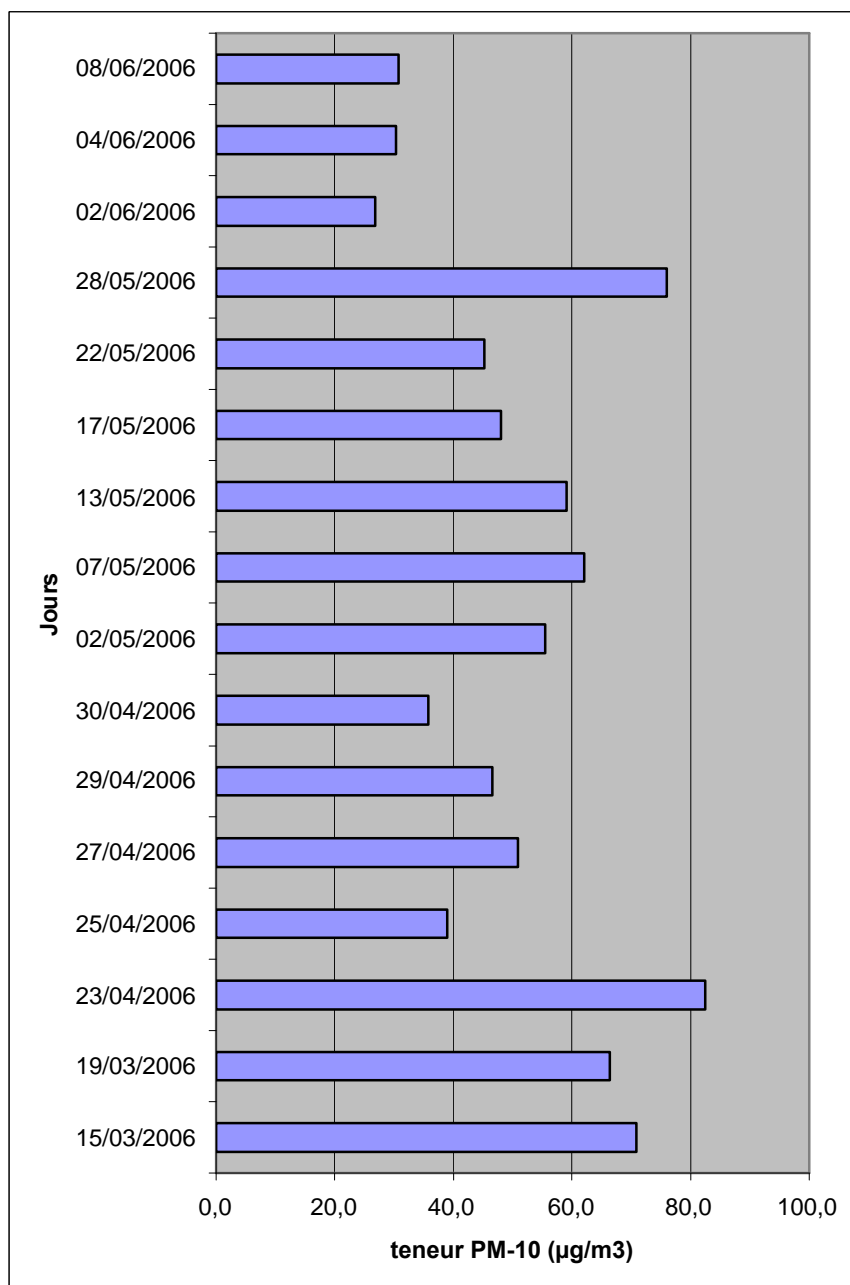


Figure N° 7 : Evolution temporelle de teneur en PM-10.

L'importance de la fourchette de variation des teneurs en PM-10 est certainement due aux variations dans l'intensité du trafic routier et 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. C'est le cas par exemple du 23 Avril où on a enregistré la teneur maximale en PM-10. Les concentrations diminuent quand la vitesse du vent augmente grâce à une meilleure dispersion des particules atmosphériques, ceci explique en partie les faibles teneurs mesurées le 25 et 30 Avril où un vent fort balayait le site de mesure, et ce, juste deux jours après l'enregistrement de la valeur maximale, cela illustre au mieux la complexité du phénomène liée à plusieurs facteurs en même temps.

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

Il est clair que le nombre de mesures effectuées est insuffisant pour mettre clairement en évidence l'ensemble de facteurs qui interagissent sur la teneur en PM-10.

On constate aussi que les couches de particules collectées sur les filtres lors des prélèvements de PM-10 ont une couleur noire ce qui explique la prédominance de fumées noires et de suies dégagées par les véhicules suite à une combustion incomplète du carburant.

Si on compare la teneur moyenne en PM-10 enregistrée durant cette étude à celle mesurée en 2005 pour la même saison de printemps au niveau d'un site urbain à Bab-Ezzouar [41], on relève une certaine diminution de l'ordre de 10 % entre les teneurs moyennes qui est probablement due aux différences topographiques existantes entre les deux sites.

Par ailleurs, nos valeurs sont du même ordre de grandeur que celles mesurées au même site par un appareil automatique, la jauge β , de l'institut de la santé publique, qui tourne autour d'une moyenne de $60,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

V.1- Etude de la répartition granulométrique des particules fines

Afin de déterminer la distribution des particules en suspension selon leur dimension et d'évaluer la part de pollution imputable à la fraction alvéolaire (PM-2,5) et à la fraction très fine (PM-1), nous avons effectué des prélèvements avec fractionnement granulométrique.

Les fractions recueillies sur les quatre étages du cascadeur d'Andersen sont : 10 à 7 μm , 7 à 3 μm , 3 à 1.5 μm , 1.5 à 1 μm et enfin la fraction terminale du filtre absolu 1 à 0 μm . Ces fractions permettent d'aboutir aux PM-1 ; PM-1,5 ; PM-3 ; PM-7 ; PM-10.

Les résultats obtenus sont illustrés en figure n° 8 où nous représentons l'évolution journalière des différentes classes granulométriques mesurées.

Le tableau suivant résume les teneurs moyennes et extrêmes des différentes fractions granulométriques ainsi que les rapport PM-i / PM-10.

Tableau N° 8 : Caractérisation des différentes classes granulométriques.

Classe granulométrique	Maximum ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Minimum ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	moyenne ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Rapport PM-i / PM-10
PM-1	28,9	20,5	15,1	0,33
PM-1.5	43,1	19,9	25,6	0,41
PM-3	49,1	17,9	34,7	0,56
PM-7	48,6	35,5	47,7	0,78
PM-10	82,5	26,8	61,4	1

On doit noter que les moyennes sont calculées pour le même nombre de prélèvement et que les PM-i est la valeur limite supérieur de diamètre des particules collectées.

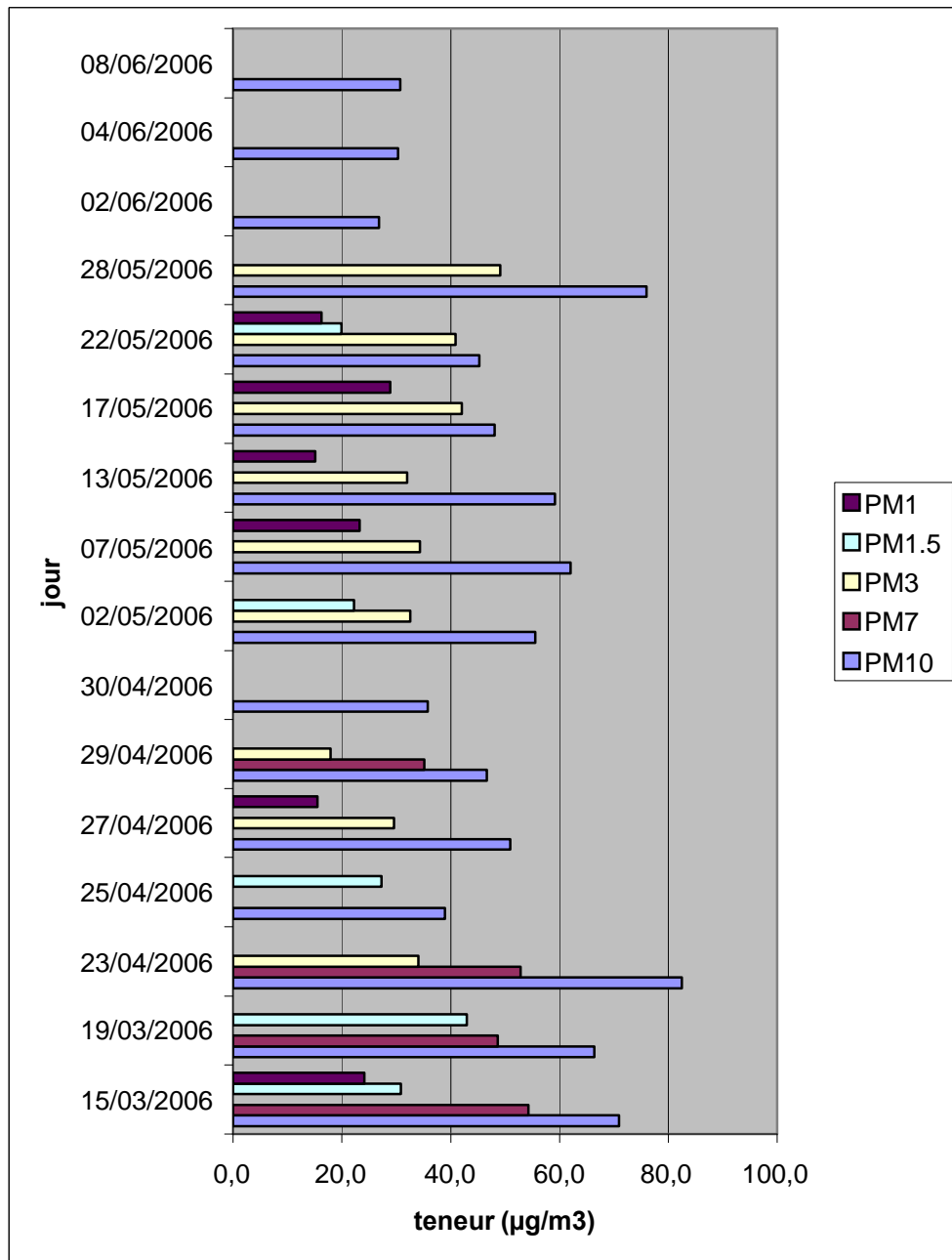


Figure N° 8 : Evolution journalière de la pollution par les particules fines selon leur classe granulométrique.

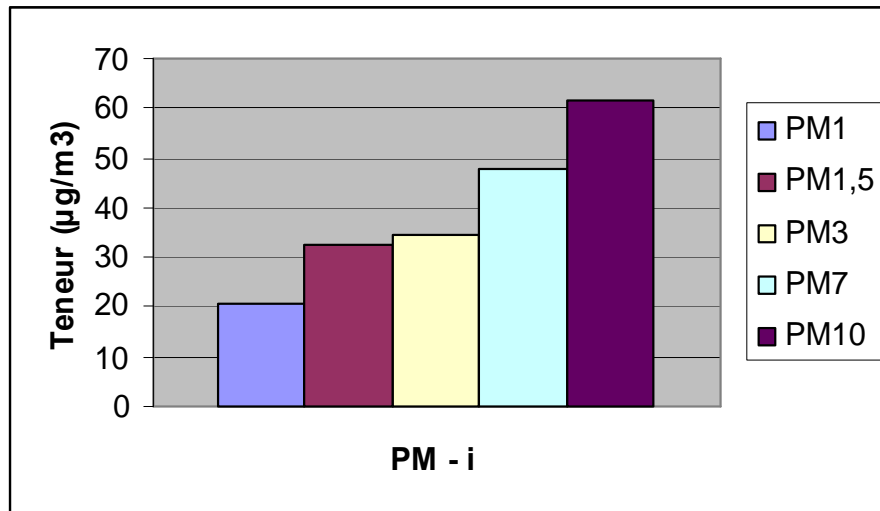


Figure N° 9 : Répartition moyenne des particules fines selon leur taille.

On constate, une similitude entre l'étude des PM-10 et les fractions PM-i, c'est à dire de grandes variations dans les teneurs journalières.

On relève par ailleurs que plus de la moitié des particules inhalables appartiennent à la fraction fine (PM-3) et qu'environ le tiers est constitué essentiellement de particules très fines (PM-1).

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

- 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.

a)- 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 de pourcentage de la masse cumulée des particules ayant un diamètre $\leq d_i$ (axe des abscisses à échelle probabilité). Cette représentation résulte de l'interprétation mathématique du fractionnement de particule par fractionnement des particules par dimension. On montre en effet que la densité de probabilité est une distribution log-normale entre le diamètre des particules et la distribution de leur masse. [7]

Pour construire le graphe log-probabilité, nous résumons en tableau suivant, les données recueillies par fractionnement granulométrique.

Tableau n° 9 : Exploitation de données recueillies par fractionnement granulométrique.

Étage Andersen	Masse des particules collectées par étage (mg)	Masse Cumulée en (mg)	Masse cumulée en %	100 – masse cumulée en %	Diamètre de l'étage (μm)
<i>1</i>	<i>25.70</i>	<i>25.70</i>	<i>20.69</i>	<i>79.31</i>	<i>7</i>
<i>2</i>	<i>26.50</i>	<i>52.20</i>	<i>42.01</i>	<i>57.98</i>	<i>3</i>
<i>3</i>	<i>20.74</i>	<i>72.94</i>	<i>58.71</i>	<i>41.29</i>	<i>1.5</i>
<i>4</i>	<i>17.82</i>	<i>90.76</i>	<i>73.05</i>	<i>26.94</i>	<i>1</i>
<i>5</i>	<i>33.48</i>	<i>124.4</i>	<i>100</i>	<i>0</i>	<i>0.01</i>

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 ci-dessous.

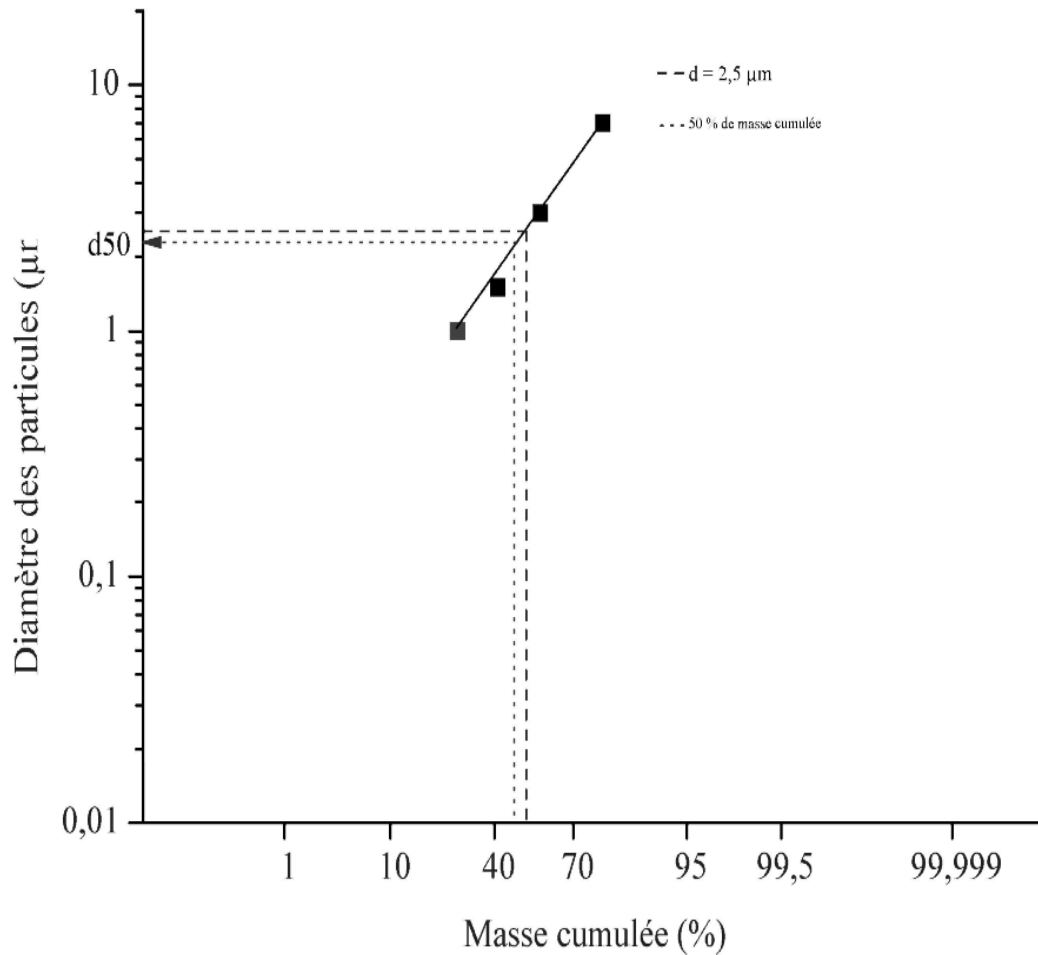


Figure N° 10 : Diagramme log-probabilité de la masse cumulée des particules en fonction du diamètre.

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

$$d_{50} = 2,3 \mu\text{m}.$$

En d'autres termes 50% de la masse des particules PM-10 a un diamètre $\leq 2,3 \mu\text{m}$.

b)- Teneur atmosphérique en PM-2,5 :

A partir du diagramme log-probabilité, on obtient pour le diamètre 2,5 μm :

100 – masse cumulée = 53 % \rightarrow Masse cumulée = 47 %.

$$\text{PM-2,5} = \frac{53 * \text{PM10}}{100} = 32,5 \mu\text{g}/\text{m}^3.$$

Ainsi la teneur en PM- 2,5 s'élève à environ 93 % de la teneur en PM-3 mesurée expérimentalement.

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

- Particule inhalables $\text{PM-10} = 61,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Particules respirables $\text{PM-2,5} = 32,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Particules très fines $\text{PM-1} = 20,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

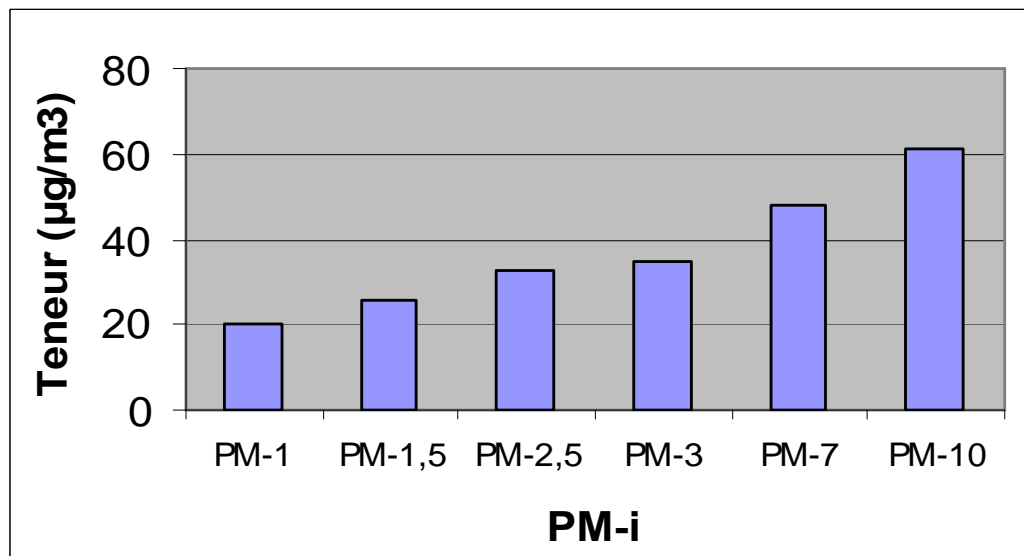


Figure N° 11 : Répartition des différentes classes granulométriques.

De part leur ampleur, ces niveaux de pollution sont inquiétants ce d'autant plus qu'ils constituent des fractions très importante des PM-10. Le tableau 8 montre à cet effet que les particules alvéolaires constituent environ 56% de la masse des particules respirables. La fraction très fine (PM-1) qui se dépose d'une manière irréversible dans les poches alvéolaires constitue environ 1/3 des PM-10.

De plus ce sont les particules très fines qui véhiculent les composés les plus toxiques tels que les métaux lourds (plomb, cuivre, nickel, cadmium, etc.), les HAP.

V.2- Etude des particules fines et leur relation avec les PM-10

Du fait de leur effet nocif sur la santé, on s'intéresse dans ce qui suit aux classes des particules ayant de dimensions inférieures à 3 et 1 μm respectivement et à leur contribution aux PM-10.

Corrélation entre PM-1, PM-3 et PM-10 :

La figure N° 12 montre que les PM-10, PM-3 et PM-1 suivent une évolution similaire. C'est particulièrement le cas des PM-1 et PM-3 qui varie dans le même sens. Cette similitude dans l'évolution suggère que ces particules ont en grande partie la même origine, le trafic routier dans notre cas.

Dans l'étude des corrélations entre les PM-1 et les PM-10 ; PM-3 et PM-10 et PM-1 avec PM-3 (figures 13, 14, 15). On constate, qu'il n'existe pas de corrélations significatives entre les différentes classes de particules. Certaines études aboutissent à de bonnes corrélations entre les PM-1 et PM-3 qui ont souvent le même origine [42].

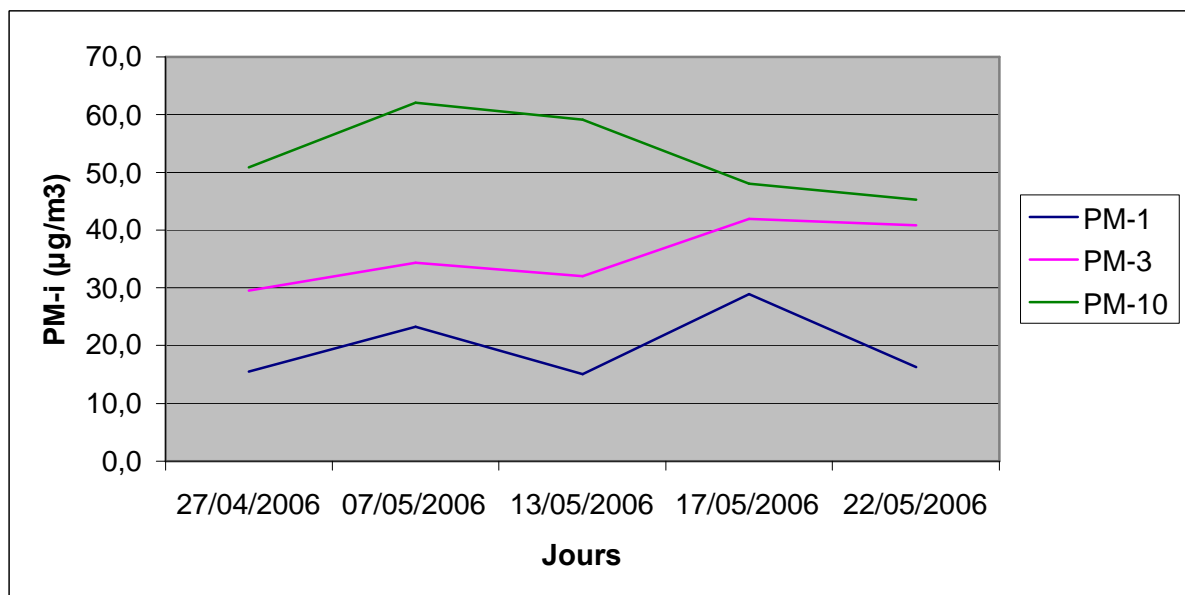


Figure N°12: Evolution des teneurs en particules fines PM-10, PM-3 et PM-1.

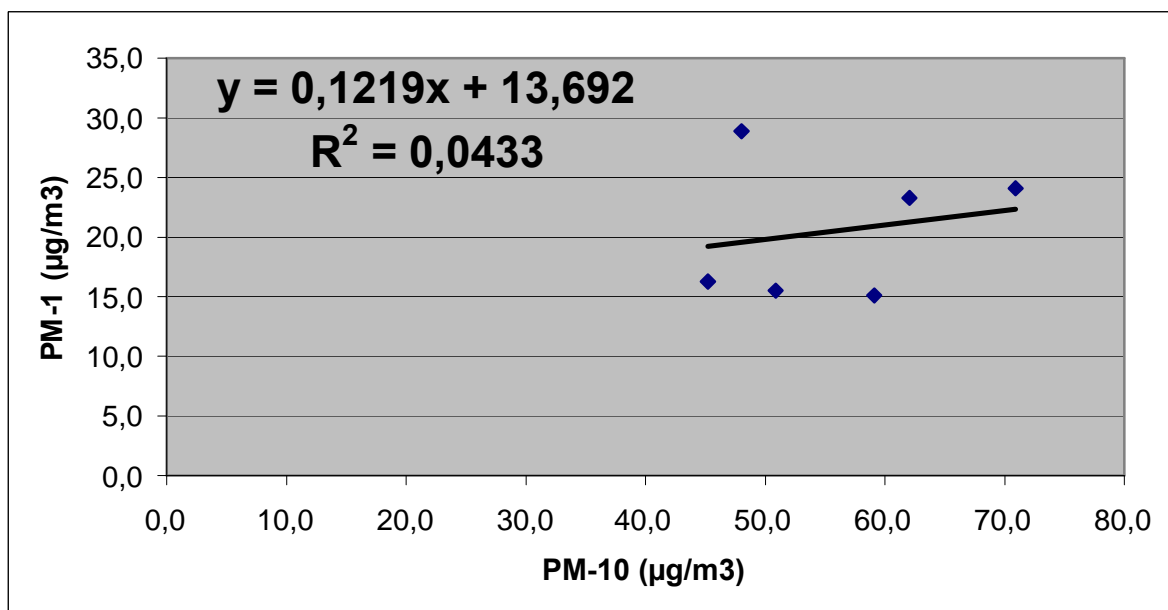


Figure N°13: Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-1 et PM-10.

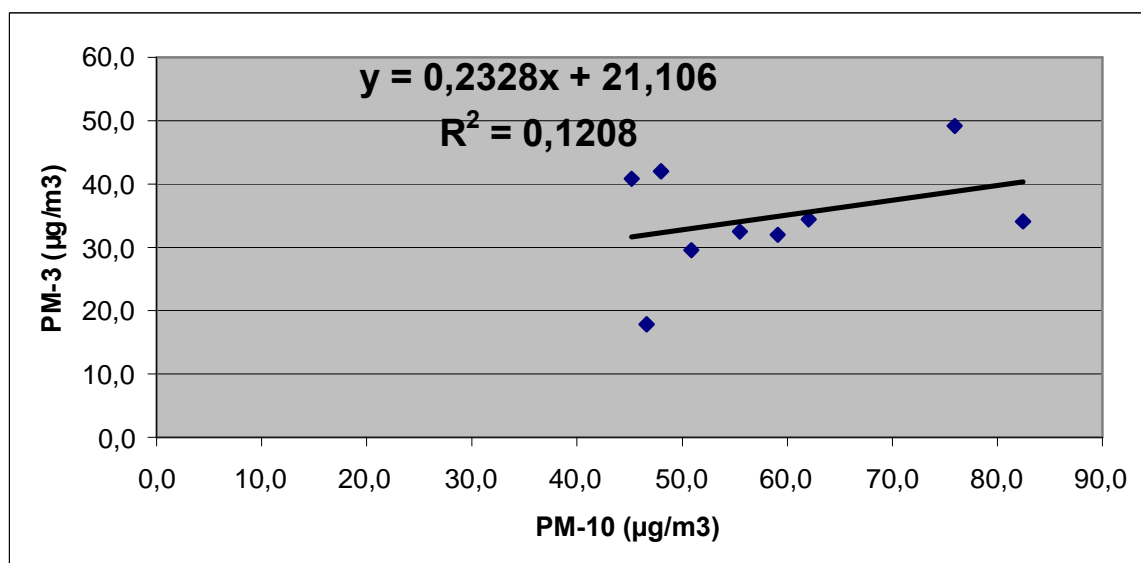


Figure N°14 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-3 et PM-10.

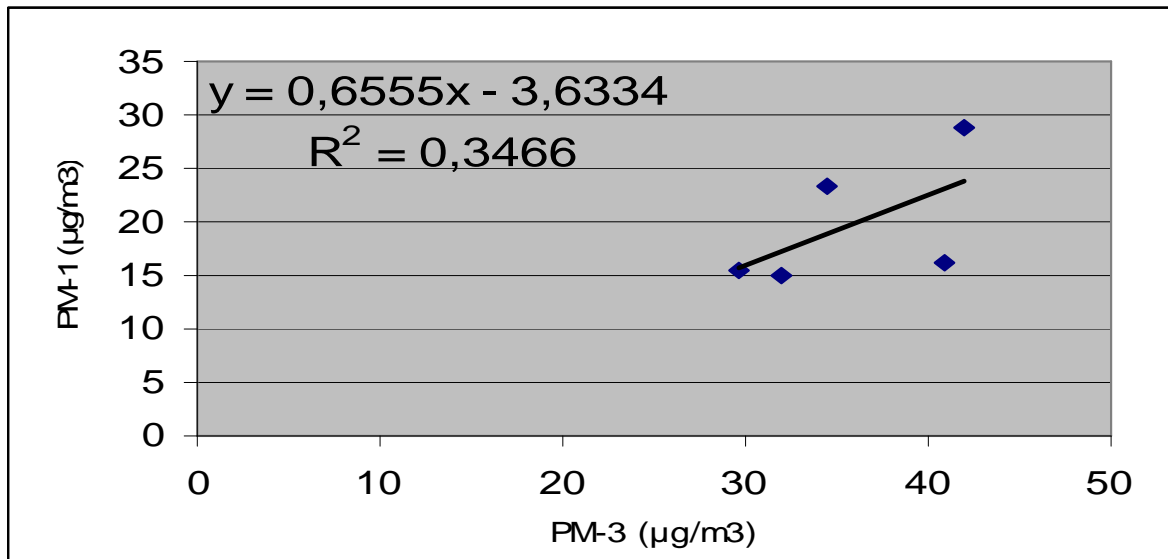


Figure N° 15 : Corrélation entre les teneurs atmosphériques en PM-1 et PM-3.

V.3 – Ampleur de la pollution : étude comparative

Afin d'estimer l'ampleur de la pollution de l'air par la fraction inhalable des particules en suspension à 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 N° 10, les normes et les valeurs limites des PM-10 en vigueur ou en projet dans certains pays.

Tableau N° 10: Valeurs limites pour les PM-10.

Pays	Valeur Limite ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Références
Etats-Unis	150	maximum journalier (P99 sur 3 ans)	[44]
	50	moyenne annuelle des teneurs journalières (mesurée sur 3 années)	
Japon	200	moyenne sur 1 heure	[14]
	100	moyenne annuelle	
Suède	100	P98 des moyennes sur 24 heures	[14]
Suisse	50*	moyenne sur 24 heures	[14]
	20*	moyenne annuelle	
Union Européenne	moyenne annuelle		[45]
	2000	48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, décroissant régulièrement	
	2005	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
	2010	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
	moyennes sur 24 heures		
2000	: 35 dépassements de 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au maximum		
2005	: 35 dépassements de 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au maximum		
2010	: 7 dépassements de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au maximum		
OMS	Les connaissances actuelles ne permettent pas de déterminer une concentration en dessous de laquelle aucun effet n'est observé.		[46]

On constate ces dernières années qu'avec la récente prise de conscience du danger exercé par les PM-10, les anciennes normes régissant les TSP ou les fumées noires sont progressivement remplacées par celles des PM-10. La norme US a été revue vers la baisse, tandis que d'autres normes sont encore au stade de projet. Pour l'OMS et en fonction de l'état actuel des connaissances, il n'existe pas une valeur seuil pour laquelle il n'y a aucun risque pour la santé. Sur la base de ces normes, on constate qu'à Alger, la pollution par les PM-10 est très excessive.

Les niveaux mesurés dépassent déjà sur une période d'un trimestre aussi bien le seuil à court terme que les normes régissant le long terme.

La comparaison entre les teneurs en PM-10 mesurées à Alger et celles relevées dans certaines villes de plus ou moins grandes envergures présentée en tableau N° 11, montre aussi qu'Alger accuse en site de proximité un taux très élevé en PM-10. Certes des villes comme Prague et Mexico présentent des teneurs similaires, mais ces dernières sont connues pour leur très forte pollution due entre autres à des émissions industrielles proches du centre urbain.

Tableau N° 11 : Teneurs en PM-10 mesurées dans quelques villes.

Villes	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	[17]
Zurick	28	-	1993	Site urbain	[14]
Berlin	97	-		Site urbain	[14]
Edmonton (Canada)	27	86	1996	Site urbain	[45]
Arnhem (Pays bas)	74,5	99	1996	Site de proximité (mesure sur 3 mois)	[3]
Prague	105	198,7	1996	Site de proximité intersection (mesure sur 5 mois)	[47]
Mexico	96,4	-	1990	Teneur relative au PM 2,5. Site de proximité (mesure sur 2 mois)	[48]
Barcelone	49,8	118	1996	Site urbain	[49]
Marseille	29	-	1999	Site urbain	[50]
Rennes	24		1999	Teneur relative au PM-10 site de proximité	[50]
Alger (région EST)	84,1	151,3	2003	Site de proximité	[43]
Alger (Banlieue urbaine) *	67,8	158,8	2005	Site urbain (mesure sur 3 mois)	[42]
Alger (région Centre) *	64,1	82,5	2006	Site urbain (mesure sur 3 mois)	Présente étude.

* donnée ajoutée à titre comparatif.

V.4 – 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, Cd, Ni, Cu, Mn et Co associés aux particules fines a porté sur une trentaine de fractions granulométriques.

Les résultats obtenus sont présentés dans les figures 16 à 21. Ces figures illustrent graphiquement l'évolution temporelle des teneurs atmosphériques en métaux lourds véhiculés par les PM-10 et PM-3.

Le tableau N° 12 et les figures de 22 à 25 résument les teneurs atmosphériques moyennes et les fractions massiques moyennes correspondantes.

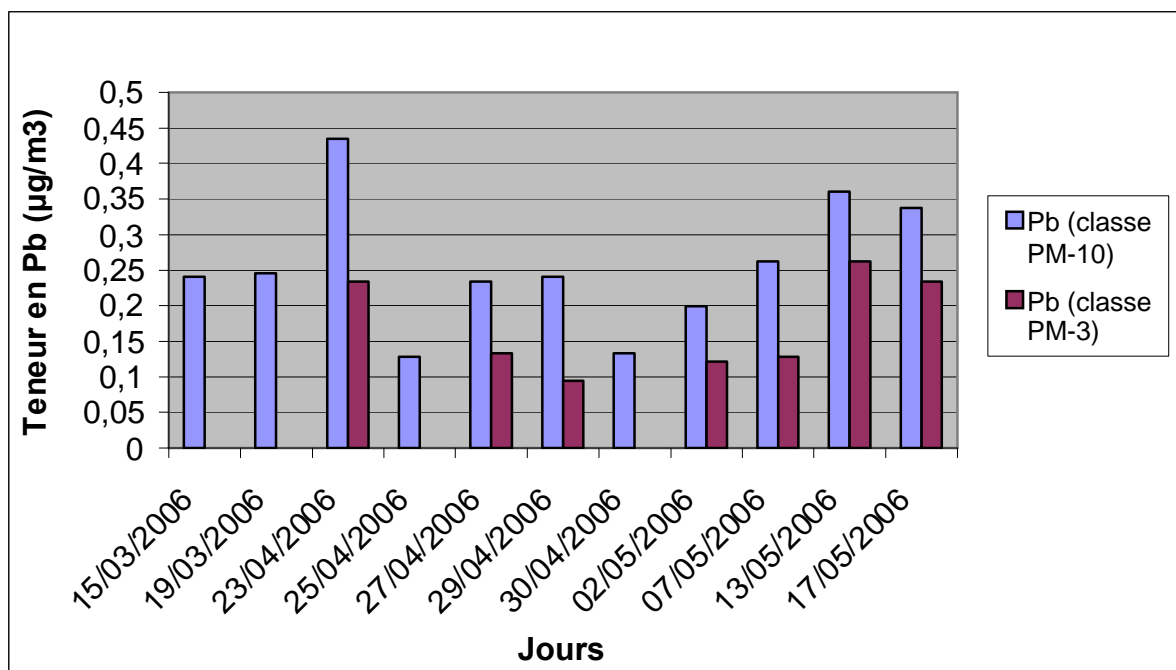


Figure N° 16 : Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en Pb.

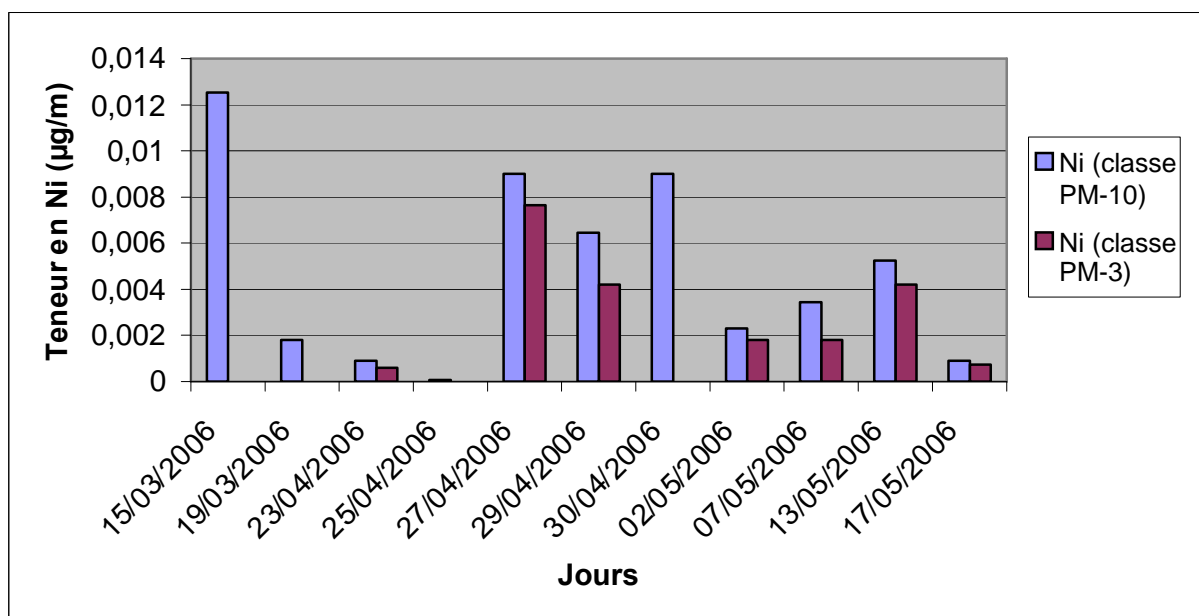


Figure N° 17 : Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en Ni.

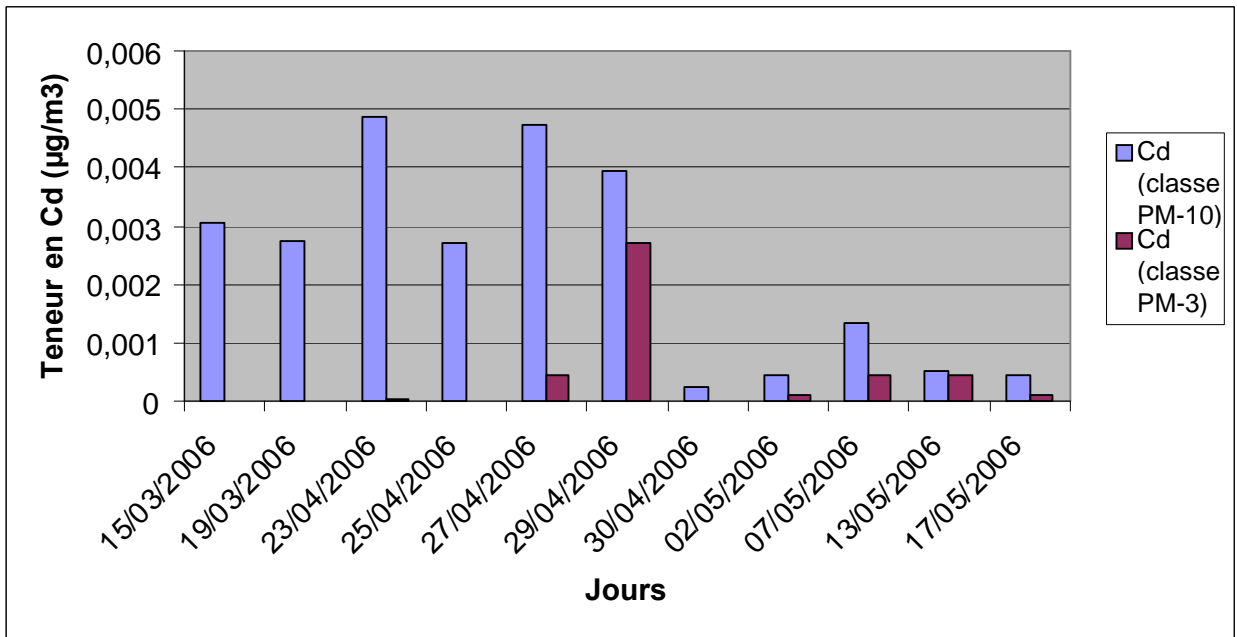


Figure N° 18 : Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en Cd.

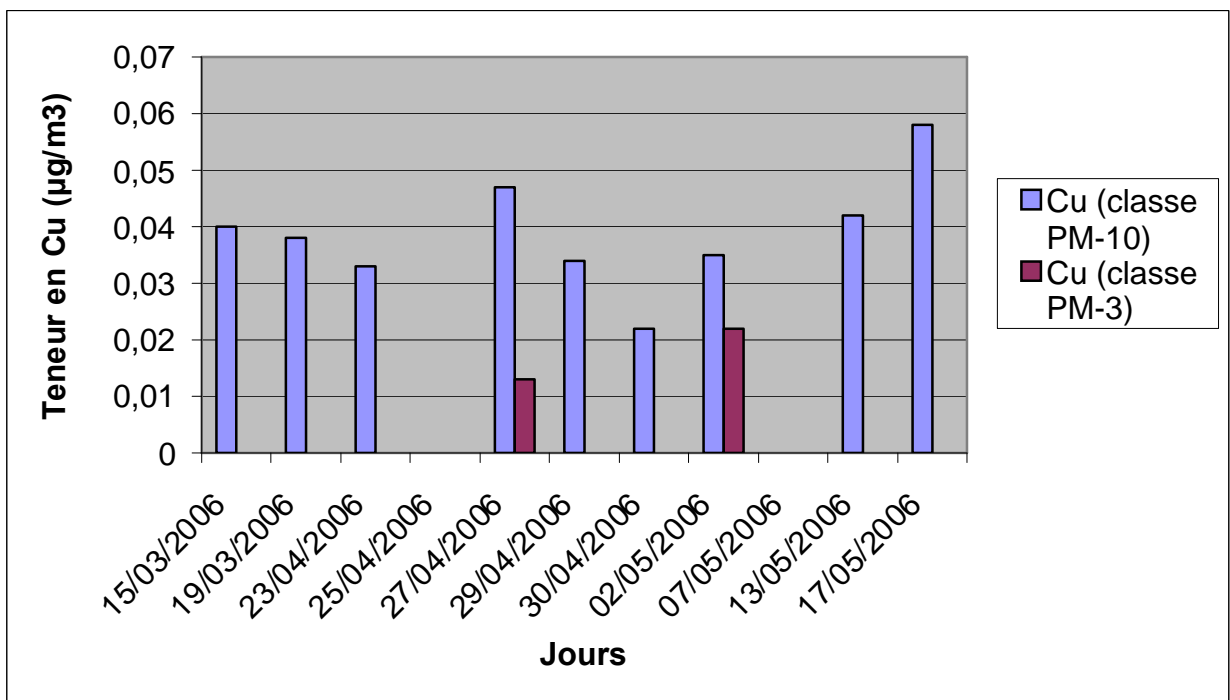


Figure N° 19 : Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en Cu.

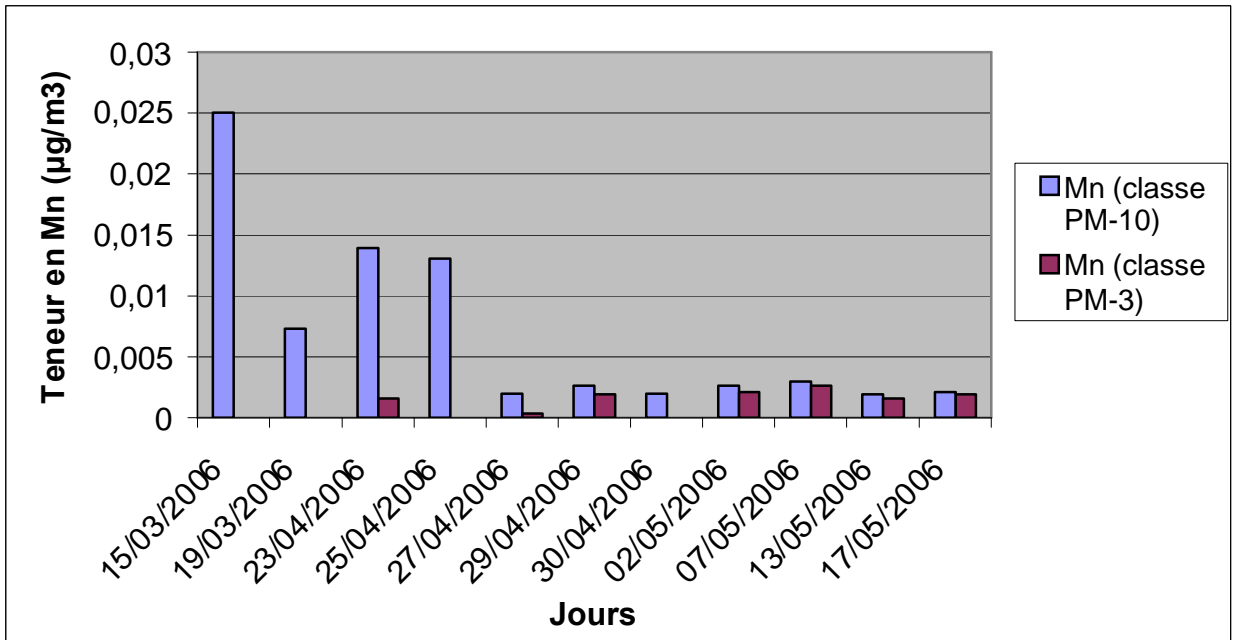


Figure N° 20 : Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en Mn.

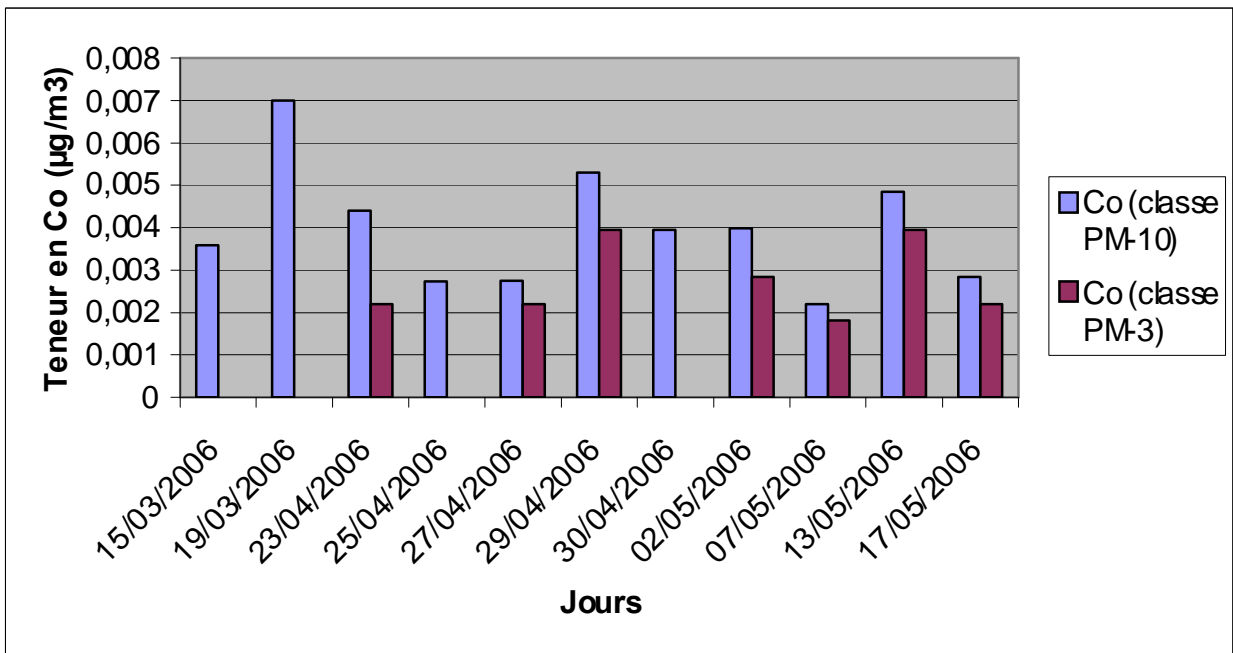


Figure N° 21 : Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en Co.

**Tableau N° 12 : Teneurs atmosphériques et fractions massiques moyennes
des métaux lourds étudiés**

Paramètres		Pb (ng/m ³)	Cu (ng/m ³)	Ni (ng/m ³)	Mn (ng/m ³)	Co (ng/m ³)	Cd (ng/m ³)
PM-10	Teneur Maximale	435	58	12,5	25,1	7	4,8
	Teneur Moyenne	256	31,7	4,7	6,9	3,9	2,3
	Fraction Moyenne	0,4	0,05	0,007	0,01	0,006	0,003
PM-3	Teneur Maximale	262	22	7,65	2,625	3,95	0,445
	Teneur Moyenne	172,6	17,5	3	1,72	2,7	0,61
	Fraction Moyenne	0,5	0,05	0,009	0,005	0,008	0,002

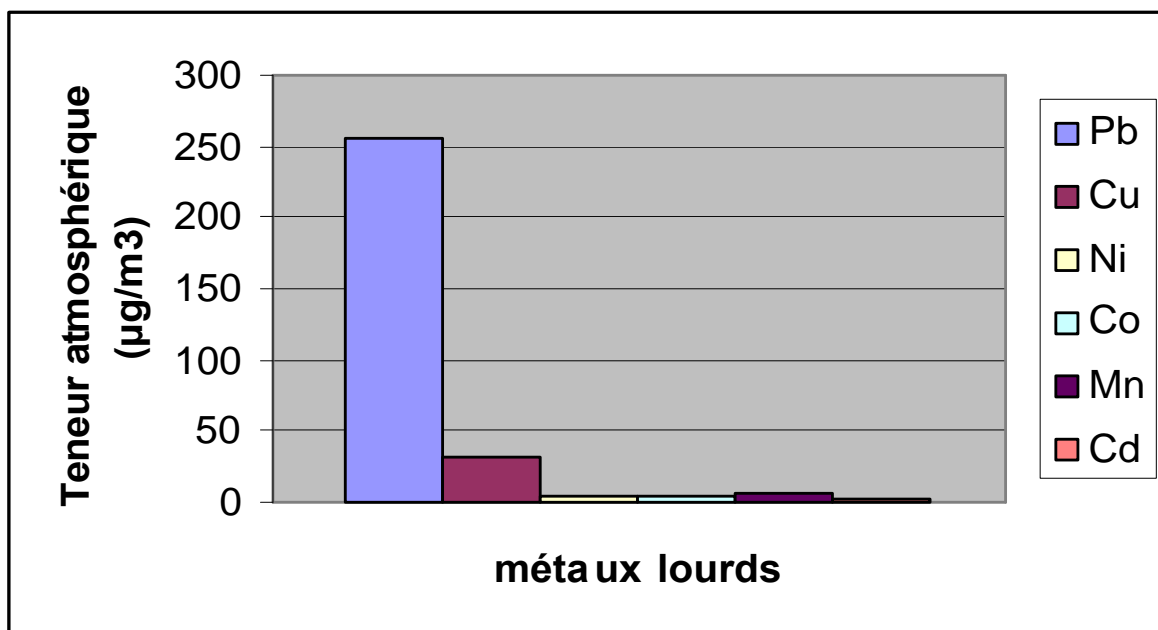


Figure N° 22 : Teneurs moyennes des métaux lourds dans les PM-10.

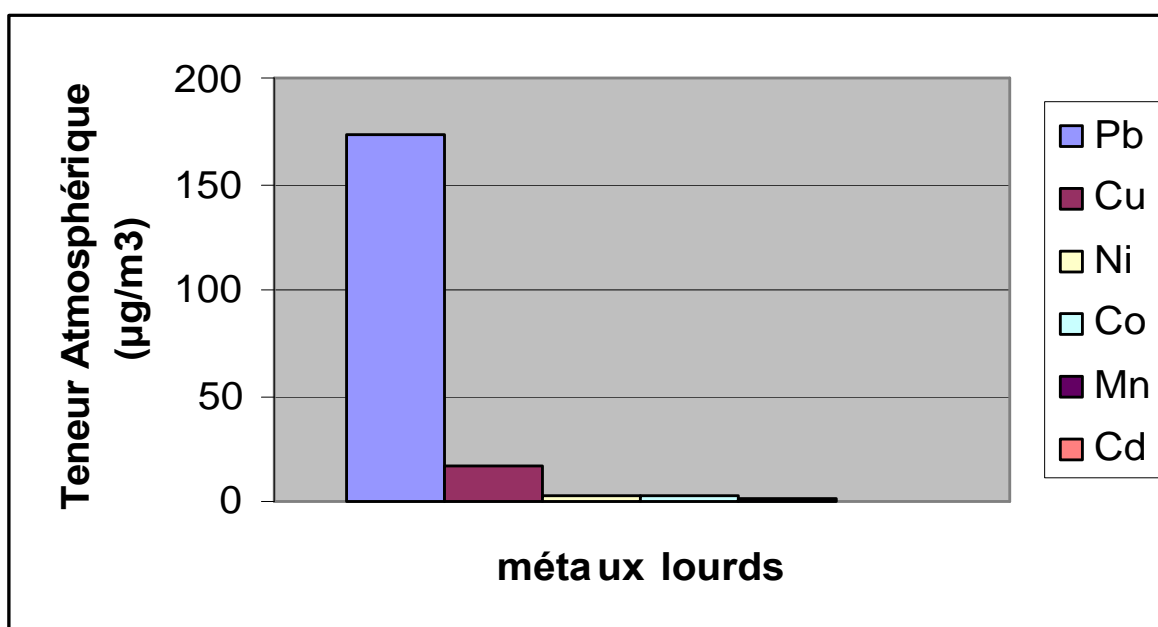


Figure N° 23 : Teneurs moyennes des métaux lourds dans les PM-3.

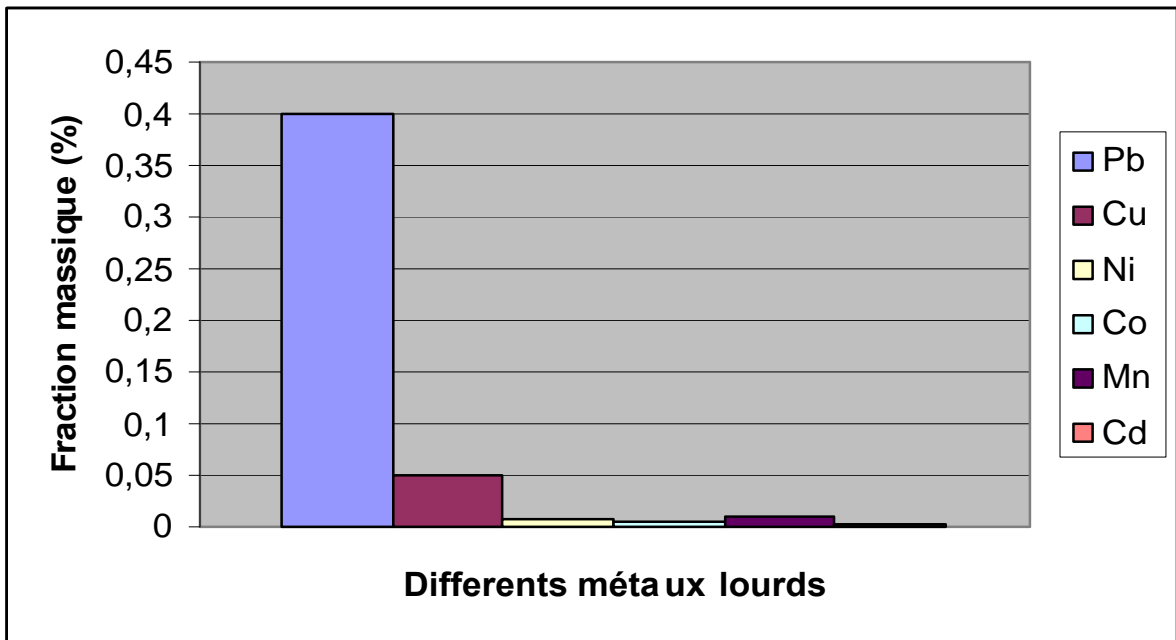


Figure N° 24 : Fractions massiques moyennes des métaux lourds dans les PM-10.

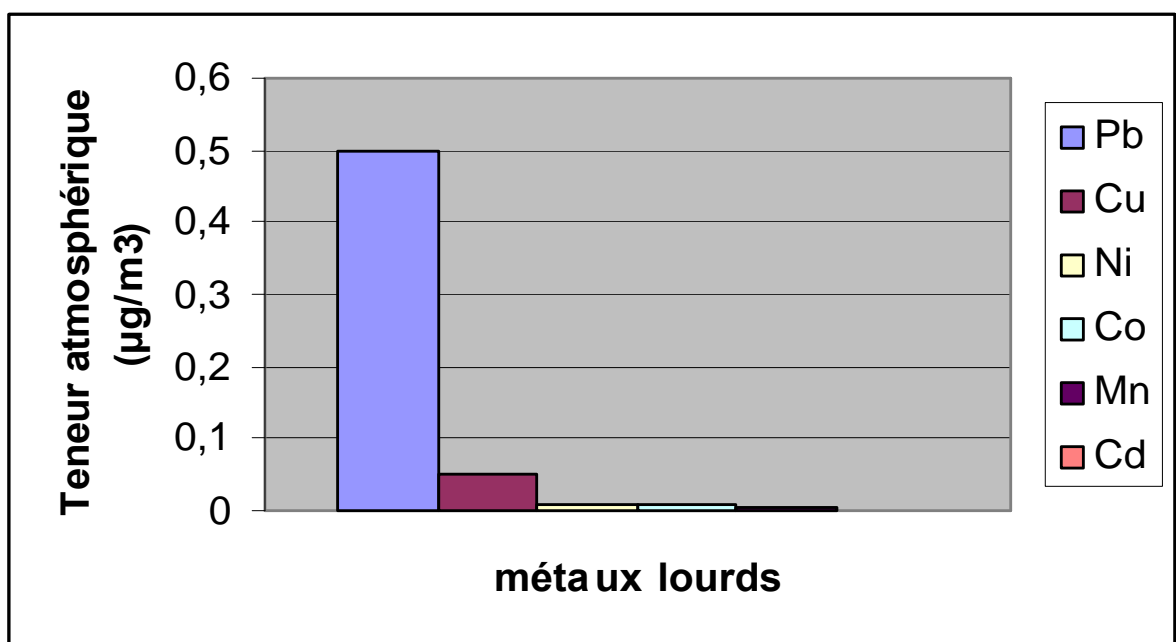


Figure N° 25 : Fractions massiques moyennes des métaux lourds dans les PM-3.

Tout comme dans le cas de l'étude des PM-10, on relève pour l'ensemble des éléments une variation temporelle assez importante.

Parmi les métaux lourds étudiés, le plomb est de loin le composé majoritaire, Il varie de 0,09 à 0,43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et la teneur moyenne est de l'ordre de 0,25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En fraction massique le plomb constitue en moyenne 0,4 % de la teneur des PM-10, tandis que dans les PM-3 il en constitue environ 0,3 %.

Les éléments Cd et Co sont les moins abondants et dans plusieurs échantillons ils sont à des teneurs non détectables.

La figure N° 28 montre, qu'il n'y a pas de corrélation entre les teneurs en PM-10 et celles de Pb. Ainsi cela signifie qu'une forte pollution en PM-10 n'entraîne pas systématiquement une forte pollution par le plomb. Ceci peut s'expliquer entre autre par la présence importante de suies issues des émissions diesel qui augmentent les taux en PM-10 sans pour autant affecter les émissions de plomb.

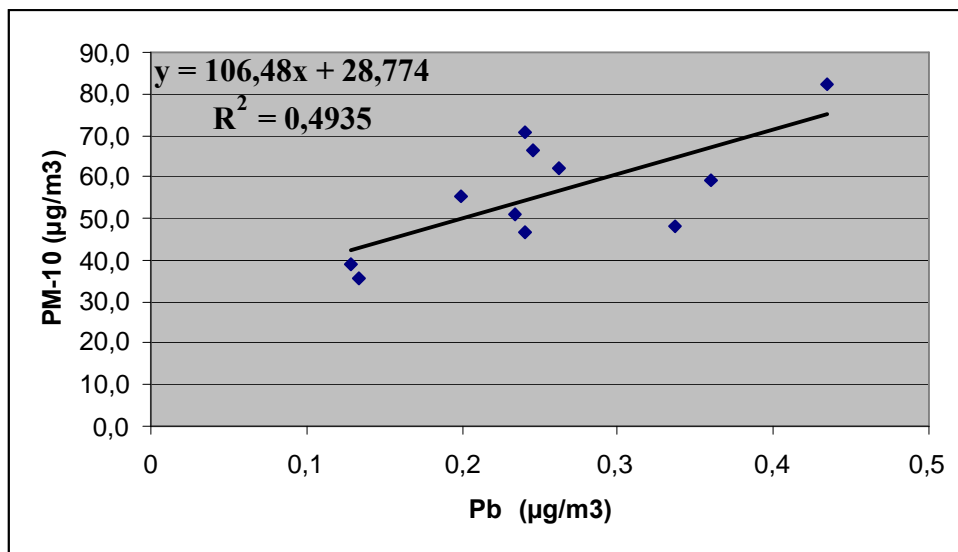


Figure N° 26 : Evolution des teneurs en plomb en fonction des teneurs en PM-10.

A Alger où l'essence non plombée vient juste d'être introduit sur le marché, la pollution par le plomb est assez préoccupante. Certes les teneurs mesurées en ce site très aéré demeurent en général en dessous des valeurs guides de l'OMS et de l'Union Européenne (norme de 0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) [53], mais au centre ville et particulièrement dans les rues de type canyon où la ventilation naturelle est très réduite, il faut s'attendre à des niveaux de pollution plus élevés.

La comparaison avec les teneurs en métaux lourds mesurés dans d'autres villes (tableau N° 13) confirme aussi la faible pollution par les métaux lourds à Alger.

Tableau N° 13 : Comparaison des teneurs atmosphériques en métaux lourds mesurés dans certaines grandes villes.

Villes	Prague [47]	Paris [51]	Khartoum [52]	Barcelone [49]	Alger Est [42]	Alger Centre [Présente étude]
Pb (ng/m^3)	132	162	47	340	182,8	256
Cd (ng/m^3)	1,7 6	2,2	-	-	1,17	2,3
Mn (ng/m^3)	36, 2	22	91	-	47,7	6,9
Ni (ng/m^3)	7,8	12,8	6,1	-	-	4,7
Cu (ng/m^3)	55, 7	31	6,9	-	81,8	31,7

Conclusion

Conclusion

Au cours de cette étude, nous avons mesuré par classe granulométrique, 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 urbain d'Alger, la pollution de l'air par les PM-10 atteint des niveaux relativement élevés, qui dépassent les normes en vigueur dans les pays occidentaux.

La teneur journalière moyenne s'élève à $61,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la teneur journalière est supérieure à $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ces particules se distinguent par le fait qu'environ la moitié des PM-10 est constitué de particules respirables (PM-2,5) très nocive.

L'ampleur de cette pollution résulte sans doute de la mauvaise combustion d'un parc 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, Ni, Cu, Mn et Co) associés aux particules fines montre, qu'à l'exception du plomb, les PM-10 ne véhiculent pas une pollution excessive par les métaux lourds à caractère toxique. Par contre, pour ce qui est du plomb avec une moyenne de $0,25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, teneur relativement élevée. Bien qu'étant en deçà des normes, elle suscite quand même des inquiétudes, car devant un trafic routier qui s'intensifie de plus en plus et où la consommation en carburant non plombée est négligeable, il faut s'attendre à une aggravation de cette pollution et ce à un moment où un peu partout dans le monde, les teneurs tendent vers zéro et où la pollution par le plomb ne constitue plus une préoccupation.

Il faut rappeler que ces résultats concernent un site urbain qui de part sa topographie est très bien aérée. Dans les rues de type "canyon" bordées d'immeubles élevés, les niveaux de pollution seraient certainement plus élevés.

L'Algérie présente ainsi la particularité d'être un pays qui n'est pas fortement motorisé, mais qui présente une pollution particulaire plus importante que dans les pays développés où le trafic routier est bien plus intense.

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

- Mise en place d'une réglementation imposant la présence d'un catalyseur sur tout véhicule nouvellement importé avec une meilleure offre de l'essence sans plomb ;
- 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.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] Elichegaray C., Pollution Atmosphérique, Rapport de l'ADEME, 1999.
- [2] Chiron M., P. Quenel et D. Zmivau: La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique. *Poll. Atm.*, Janvier mars, p 41-52, 1997.
- [3] 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.
- [4] Schroeder W.H. et al.: Toxic trace elements associated with airborne particulate matter, a review. *JAPCA*, 37, 11, p 1267 – 1285, 1987.
- [5] Dockery D.W., C.A. Pope, X. Xu, J.D. Spengler, M.E. Ware, B.G. Fay, Jr. Ferris and F.E. Speizer (1993) : An association between air pollution and mortality in six US cities. *N. Eng. J. Med.*, 329, p 1753 –1759.
- [6] Pope C.A., M.J. Thun, M. Namboodira, D.W. Dockery, J.S. Evans, F.W. Speizer and Jr. C. W. Heath: Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of U.S. adults. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, vol. 151, N°3, p 669-674, 1995.
- [7] Butler J. D., *Air pollution Chemistry*, Academic Press, London, 1979.
- [8] Kerbachi R., M. Boughedaoui, N. Koutai et T. Lakki: La pollution par les oxydes d'azote et l'ozone dans la ville d'Alger. *Poll. Atm.*, avril-juin, p 89-101, 1998.
- [9] Kerbachi R., M. Keddou, M. Boughedaoui, et R. Joumard : Aromatic hydrocarbons in the ambient air of Algiers. *Proc. Int. Symp. " Transport and Air Pollution"*, Graz, Austria, 31. May-2 June 1999.
- [10] Kerbachi R., M. Boughedaoui, Y. Kerchich et Joumard R., Evaluation de la pollution de l'air par les PM- 10 à Alger, 9th Colloque International Transport and Air Pollution, 5-7 juin 2000, Avignon (France).

- [11] Kerbachi R., M. Boughedaoui, et A. Bitouche, Etude de la pollution l'air par les particules fines à Alger, 15^{ème} conférence transport et pollution 12-15 juin 2006, Reims (France).
- [12] Renoux A., « Ce qu'il faut savoir sur l'aérosol atmosphérique » Poll. Atmo., Janvier Mars, pp10-16, 1990.
- [13] Boughdaoui M., Kerbachi R., « la pollution particulaire à Rais Hamidou, ampleur et dispersion » Ajot, volume10, série D, N°1,pp149-168,1994.
- [14] Cahier de l'environnement « Particule en suspension mesures et évaluations des effets sur la santé », OFEFP, Berne, 1996.
- [15] Stern A., Fundamentals of air pollution, 2^{ème} édition, Academic Press, London, 1984.
- [16] Kerbachi R., Cours de pollution atmosphérique 5^{ème} année, ENP, Alger, 2005.
- [17] 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.
- [18] Detrie J. P., « La pollution atmosphérique », Ed. Dunod, Paris, 1969.
- [19] Barnea M., P. Ursu, « Pollution et protection de l'atmosphère », Ed. Eyrolles, Paris, 1974.
- [20] Ramade F., « Elément d'écologie, action de l'homme sur la biosphère », M. C. Graw Hill, Paris, 1982.
- [21] Dang C., T. P. Fontelle et R. Leygonie, « Les émissions de poussières et généralités sur leur mesure à l'émission », La pollution atmosphérique, Janvier Mars, 1990, pp. 38-46.
- [22] P. H. Brumer, « Approche globale des problèmes d'environnement liés à l'incinération d'ordures ménagères », Pollution atmosphérique, Juillet-Septembre 1988, pp. 301-308.
- [23] Gagnon C., « Rapport annuel de la qualité de l'air - 1994. Communauté urbaine de Montréal, Service de l'environnement, Division de l'assainissement de l'air et de l'eau », 55 p, 1995.

- [24] Leygonie R., « Les métaux lourds dans l'air : source, émissions, mesures, effets », Pollution atmosphérique, Juillet Septembre, 1993, pp. 63-74.
- [25] Office National des statistiques (Alger), données statistiques, parc national automobile N° 225, 1998.
- [26] Petit.Courieux F., A.Person, Y .Le Moullec, « Connaissance atmosphérique en milieu urbain : représentativité biologique et difficultés météorologiques », Pollution atmosphérique, Janvier Mars, 1990, pp. 21-30.
- [27] Hinds W. C., «Aerosol technology», Wiley Interscience, Londres, 1982.
- [28] Masclet P.C, H.Cachier, « L'aérosol atmosphérique », analysis magazine, 1998, 26, N°09 pp. 11-17.
- [29] Brochard.D, Pairon.J.C, Bignon.J, « Aérosol et santé : Déposition et épuration des particules inhalées », Pollution atmosphérique, Avril Juin, pp178-182, 1999.
- [30] Arthur C., Stern, “Air pollution, air pollutants, their transformation and transport”, Academic Press, New York, 1976.
- [31] Colls J., Air Pollution, an introduction, Ed. E et FN SPON, London, 1997.
- [32] 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.
- [33] Environnement Canada, Les particules de l'air ambiant - Vue d'ensemble, Québec, Février, 1998.
- [34] Martin J. et L. Y. Mayster, « Santé et pollution de l'air », presse polytechniques Romandes, Suisse, 1998.
- [35] Hamilton R. S., « The soiling of materials in the ambient atmosphere », Atm. Env., Vol. 26A, N°18, p 3291-3296, 199212/12/02.
- [36] Sisler J. F., «The relative importance of soluble aerosols to spatial and seasonal trends of impaired visibility in the United States», Atm. Env., Vol. 28, N° 5, p 851-862, 1994.

- [37] Ikawa K. O., « Trace analysis atmospheric », Edition John Wiley and Sons, London, 1997.
- [38] Techniques de l'ingénieur, « Traité d'analyse chimique, caractérisation, spectrométrie d'émission des rayons X, Fluorescence X ».
- [39] Gaëlle DELETRAZ – SET, Emmanuel PAUL – LAMA, « Etat de l'art pour l'étude des impacts des transports routiers à proximité des routes et autoroutes », Contrat ADEME n° 97 93 022, Mars 1998.
- [40] Norme ISO 9885, « Air ambiant, dosage du plomb dans les particules d'aérosols collectées sur des filtres », France 1993.
- [41] Renoux A., D. Borland, «Les aérosols : physique et méthodologie ; Technique et Documentation», Paris, 1998.
- [42] Badj S., PFE « Evaluation de la pollution atmosphérique par les particules fines en site urbain », ENP, El-Harrach, 2005.
- [43] Kerchich Y., Thèse de magister « Etude de la pollution de l'air par les particules fines et les métaux lourds qui leurs sont associés. », ENP, El-Harrach, janvier 2003.
- [44] US-EPA, « National ambient air quality standars (NAAQS) for particulate matter », Federal register vol. 62, N°138, 1997.
- [45] Journal officiel des communautés européennes, L 163/41, Directive 1999/ 30/CE du 27 avril 1999, Bruxelles.
- [46] « OMS: Update and revision of air quality guidellines for Europe », WHO regional publications, European, Serien, Copenhegen, 1997.
- [47] Hovorka J. et M. Donkellaar, « Elemental composition and stable lead isotope rations of wintertime PM-10 aerosols in Prague-centre cross-roads », 8th international symposium transport and pollution, 31 Mai-02 Juin 1999, Graz, Autriche.
- [48] Vega E., I. Garcia et al., « Application of a chemical mass balance receptor model to respirable particulate matter in Mexico-cities », J. A. W. M. A., vol. 47, pp. 524-529, 1997.

[49] La contaminatio atmosférica a Barcelona, « Rapport annuel de ajuntament de Barcelona », Direction des services de surveillance de l'air ambiant, Avril 1997.

[50] 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.

[51] Person A. et Al., «Contribution des principales sources en métaux et métalloïdes à la pollution particulaire dans l'agglomération parisienne », Poll. Atm., N°139, pp. 75-88, 1993.

[52] El-Tayeb M. H. et al.,«Source and composition of aerosols from Khartoum, Sudan», Atm. Env., vol.976, N°01, pp.67-76, 1993.

[53] « OMS: Update and revision of air quality guidellines for Europe », "Classical" air pollutants EUR/ICP/EHAZ 94 OS/ PB01. Regional office for Europe, World Healt Organisation, Copenhegen, 1995.