

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT :
Génie De L'environnement

**PROJET DE FIN
D'ETUDES**

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
الوزارة الوطنية للتحسين التعليمي والبحث العلمي
الكلية الهندسية
مادة : **THEME** من هندسة البيئة

*Etude de la pollution de
l'air
par les particules fines,
les PM-10, à Alger*

Proposé par :
Mr. Pr. R. KERBACHI

Etudié par :
Melle I. HAMIDI

Dirigé par :
Mr. Pr. R. KERBACHI
Mr. Y. KERCHICHE

Soutenu devant le Jury :

- | | | |
|---------------|---------------|------------|
| N. BELHANECHÉ | M.C. ENP | Présidente |
| R. KERBACHI | Prof. ENP | Rapporteur |
| Y. KERCHICHE | | Rapporteur |
| A. NAMANE | C.C. ENP | Examineur |
| A. MAZIGHI | A. ENP | Examineur |
| M. BOUGHEDAOU | C.C. U. Blida | Examineur |

Promotion : Juillet 1999

E.N.P. 10, Avenue Hassen Badi - El Harrach - Alger



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Dédicaces

*Je dédis ce modeste travail à tous ceux
qui me sont chers :*

*A mon père, qui a toujours cru en moi et qui a
toujours tout fait pour m'aider.*

*A ma mère et mes sœurs qui m'ont soutenu
tout au long de ce travail.*

*A Monsieur M. BENTIR, pour son aide qui a
été si précieuse.*

*Ainsi qu'à toute la famille, spécialement
la petite Yacemine SOUAG.*



Remerciements

Avant d'exposer ce modeste travail, il m'est très agréable d'adresser mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué à sa conception et à ceux qui ont bien accepté de le juger.

Qu'il me soit permis, en premier lieu, d'exprimer ma profonde gratitude à Monsieur R. KERBACHI, Professeur à l'ENP. C'est sous sa direction que s'est déroulée cette étude qu'il a bien voulu me confier. Ses conseils, ses critiques et ses interventions ont beaucoup contribué à la réalisation de ce travail.

Je tiens également à remercier Monsieur A. NAMANE, Monsieur Y. KERCHICHE et Monsieur H. LOUNICI pour leurs aides et disponibilité.

Je tiens aussi à remercier toute l'équipe de l'A.N.S.A, ainsi que Monsieur AMARRA, Monsieur AINOUCHE et Nabil de l'EPEAL.

Mes vifs remerciements sont adressés aussi à Monsieur A.DJENAT de l'EPM pour sa précieuse collaboration.

Ma gratitude va, également, à tous ceux qui m'ont aidé et soutenu de près ou de loin pendant toute cette période, particulièrement Riad.

Mots clés

Pollution atmosphérique, particules en suspension, PM-10, métaux lourds, teneurs atmosphériques, fractions massiques.

Résumé

Le travail effectué porte sur l'étude de la pollution atmosphérique par les PM-10 à Alger au niveau d'un site urbain de proximité.

Le prélèvement des particules est effectué par un dispositif à fort débit, le HVS-PM-10.

Les résultats obtenus donnent une teneur moyenne de l'ordre de $80\mu\text{g}/\text{m}^3$. Il en résulte une forte pollution par les particules fines issues principalement du trafic routier.

L'analyse des PM-10 montre par ailleurs que la ville d'Alger subit une pollution importante par les métaux lourds, en particulier par le Pb, où la teneur moyenne s'élève à $291\text{ ng}/\text{m}^3$.

Abstract

This work concerns the study of the air pollution by the PM-10 in Algiers on the level of urban site.

The taking away of the particulates is carried out by a device with strong flow, the HVS-PM-10.

The results obtained give an average content of $80\mu\text{g}/\text{m}^3$.

The results from it show a strong pollution by the fine particulates resulting mainly from the road traffic.

The analysis of the PM-10 show that the Algiers town undergoes an important pollution by heavy metals, in particular Pb.

ملخص

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

يتمثل العمل في دراسة التلوث الجوى الناتج عن الجزيئات ذات قطر أصغر من 10 ميكرومتر في محيط حظري بالجزائر .

التقاط الجزيئات يتم من خلال جهاز ذات تدفق قوى (HVS-PM-10) .

النتائج المتحصل عليها أعطت قيمة متوسطة مقدارها حوالي 80 ميكروغرام/م³ .

ينتج عن هذا تلوث حاد بالجزيئات الدقيقة المنبعثة أساسا من حركية مرور السيارات .

يظهر تحليل الجزيئات PM-10 من جهة أخرى أن مدينة الجزائر تشهد تلوث هام بالمعادن الثقيلة خاصة الرصاص .

Sommaire



Chapitre I Introduction

Chapitre II Généralités sur les particules en suspension

II.1 Introduction.....	3
II.2 Les sources d'émission de la matière particulaire en suspension.....	3
II.2.1 Les particules d'origine naturelle.....	3
II.2.2 Les particules d'origine anthropogénique.....	6
II.3 Caractéristique des particules en suspension.....	12
II.3.1 Dimensions des particules.....	12
II.3.2 Classement granulométrique des particules en suspension.....	14
II.4 Dynamique des particules.....	17
II.4.1 Cas des particules de $\varnothing > 1\mu\text{m}$	18
II.4.2 Cas de particules de taille comprise entre 0,1 et $1\mu\text{m}$	19
II.4.3 Cas des particules inférieures à $0,1\mu\text{m}$	20
II.5 La fraction thoracique et la fraction alvéolaire des particules fines : Les PM-10 et les PM-2,5.....	22

Chapitre III Effets des particules en suspension

III.1 Effets sur l'être humain.....	24
III.1.1 Le cheminement des particules dans l'appareil respiratoire.....	24
III.1.2 Impact des PM-10 et PM-2,5 sur la santé.....	26
III.1.3 Effet toxique de certains métaux lourds supportés par les PM-10.....	31
III.2 Effets sur les animaux	34
III.3 Effets des particules solides sur les matériaux.....	34
III.4 Effets sur les végétaux.....	35
III.5 Autres effets.....	35

Chapitre IV Prélèvement et analyse des particules

IV.1 Echantillonnage.....	36
VI.1.1 Les prélèvements sans coupure spécifique.....	37
VI.1.2 Prélèvement avec coupure granulométrique : Mesure des PM-10.....	38
VI.1.3 Les prélèvements avec fractionnement granulométrique.....	40
IV.2 Les filtres et membranes de rétention.....	41
VI.2.1 Les filtres à fibre de verre.....	41
VI.2.2 Les filtres membranes.....	41
VI.3 Analyse des particules en suspension.....	42

Chapitre V Méthodologie

V.1 Site de prélèvement.....	43
V.2 Mode de prélèvement.....	43
V.3 Traitement et analyse élémentaire des PM-10.....	48

Chapitre IV Résultats et interprétations

VI.1 Etude des teneurs en PM-10.....	49
VI.1.1 Etude des teneurs en PM-10 à l'ENP.....	49
VI.1.2 Ampleur de la pollution : Etude comparative	52
VI.2 Etude des métaux lourds associés aux PM-10.....	54

Chapitre VII Conclusion.....	65
------------------------------	----

Bibliographie.....	67
--------------------	----

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

CHAPITRE I

Introduction

Introduction

Depuis le début de l'ère industrielle, les émissions de polluants atmosphériques ont considérablement augmenté, du fait notamment du développement rapide de l'économie, des transports et de la croissance démographique. Les émissions naturelles, aussi importantes soient-elles, telles que l'érosion, les éruptions volcaniques ou les incendies de forêt, n'ont jamais eu autant de conséquences sur la qualité de l'air que nous respirons, que celles que les activités humaines (émissions anthropogéniques) exercent aujourd'hui.

La production de grandes quantités d'énergie par combustion et le développement des procédés industriels engendrent de nos jours une multitude d'aérocontaminants gazeux et solides qui sont préjudiciables à l'environnement et à la santé humaine.

Contrairement à la pollution gazeuse dite classique caractérisée par l'émission de polluants primaires comme le SO_2 , le NO , le CO etc...; la nature de la phase particulaire de la pollution atmosphérique est fort complexe en ce sens qu'elle est constituée d'un mélange de substances dont l'origine, la granulométrie, et la composition chimique peuvent fortement varier dans le temps et dans l'espace. D'ailleurs la variété des termes employés pour la caractériser traduit clairement sa diversité. On parle ainsi de : particules, poussières, fumées noires, cendres volantes, suies, aérosols etc...

De part le double impact qu'elle exerce sur la santé, effet nocif dû aux particules elles-mêmes et effet nocif dû aux composés chimiques que véhiculent ces particules, la pollution par les poussières fait de par le monde, l'objet d'une attention particulière et d'un suivi constant. De nos jours c'est surtout les PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$ qui représentent respectivement les particules fines de diamètres aérodynamiques moyens inférieurs à $10\mu\text{m}$ et $2,5\mu\text{m}$, qui attirent le plus l'attention des environmentalistes et des spécialistes de la santé publique. L'intérêt croissant porté à ces deux classes granulométriques est dicté par le fait que ces particules pénètrent profondément dans les voies respiratoires.

En Algérie et plus exactement au niveau de notre département, des études portant sur la pollution par les particules ont été récemment effectuées. Ces études ont toutefois porté sur l'ensemble des particules en suspension qui englobent les particules fines et les moins fines.

Aussi et afin de cerner uniquement les niveaux de pollution par les seules particules qui ont une incidence réelle sur l'être humain, nous nous proposons d'étudier l'ampleur de la pollution de l'air par les PM-10. Ceci est d'autant plus intéressant qu'en l'état actuel des connaissances, les PM-10 constituent un excellent indicateur pour l'évaluation des répercussions de la pollution atmosphérique sur la santé en zone urbaine.

A cet effet un dispositif de prélèvement spécifique à ce type de pollution a été placé en un site qui est influencé par les émissions du trafic routier. Les particules fines ainsi prélevées seront analysées afin de déterminer les teneurs atmosphériques en certains métaux lourds présents à l'état de traces.

CHAPITRE II

*Généralités sur les particules
en suspension*

II.1 Introduction

La pollution de l'air par les particules solides peut être classée en deux catégories :

1- Les particules sédimentables : ce sont des particules de grandes tailles qui sédimentent par gravité. Leur temps de séjour est relativement court et elles se déposent généralement à proximité de la source d'émission.

Dans ces retombées ou dépôts de particules, on distingue les dépôts secs et les dépôts humides. Dans ce dernier cas les particules sont éliminées de l'atmosphère par lessivage par les eaux de pluies.

2- Les particules totales en suspension : Les particules totales en suspension ou TSP constituent l'ensemble des particules en suspension dans l'air dont la vitesse de sédimentation est inférieure à 10 cm/s. Cette catégorie de particules comprend les poussières dont le diamètre peut atteindre 50 μ m et plus [1].

La partie fine des TSP est inhalée alors que le reste est bloqué dans les régions nasales et pharyngiennes.

Dans ce travail et conformément à l'objectif de l'étude, nous nous limiterons à décrire uniquement le comportement des particules en suspension en général et des PM-10 en particulier.

II.2 Les sources d'émission de la matière particulaire en suspension :

Les sources d'émission des particules en suspension sont nombreuses, et selon leurs origines, elles peuvent être réparties comme suit :

- Les particules d'origine naturelle
- Les particules d'origine anthropogénique résultantes de l'activité humaine.

II.2.1 Les particules d'origine naturelle :

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

a) 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 [1,2].

b) 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 de sulfates issues du gaz SO_2 .

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 [1,3].

c) 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 , MgCl_2 , CaCl_2 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 m^2 au cours d'une année. 70% de ces dépôts sont constitués par des chlorures de sodium [1].

d) Les particules d'origine extra-terrestre :

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

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

On estime que ce phénomène contribue à la pénétration dans l'atmosphère terrestre d'environ 10 milles tonnes de particules par jour, soit $10^{-14} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$ [1].

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 être de puissants allergènes.
- Les feux spontanés de forêts 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 [4].

Tabl.N°1 : Sources et taux d'émission des particules d'origine naturelle [4].

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

II.2.2 Les particules d'origine anthropogénique :

Les sources anthropogéniques peuvent être stationnaires ou mobiles. Comme sources stationnaires on retrouve :

- Les installations de production d'énergie
- Les installations industrielles
- L'incinération des déchets
- Les entreprises artisanales.

Les sources mobiles sont liées aux activités du transport et portent donc essentiellement sur le trafic routier qui en milieu urbain occupe sans conteste une place déterminante dans le niveau de pollution.

Les catégories les plus importantes des sources de particules anthropogéniques sont les suivantes :

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 de l'émission de particules dans l'atmosphère, on peut citer :

a.1) L'industrie thermoénergétique :

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 [4].

Les combustions incomplètes, assez fréquentes dans les petites installations de production d'énergie et des appareils de chauffage des habitations, sont à l'origine d'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 73.10^6 Kg soit 26% du total des particules anthropiques [5].

a.2) 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 [2].

a.3) La Métallurgie des métaux non ferreux :

De fait que les métaux non ferreux se trouvent dans les minerais sous forme de composés, en concentrations relativement réduites, 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 de plomb lui-même [6].

La Métallurgie des métaux non ferreux participe à l'émission d'importantes quantités de cuivre, zinc, cadmium, plomb, nickel, mercure, aluminium, étain, ...etc [2].

a.4) 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 [2].

Dans la ville de RAIS-HAMIDOU, où est implantée une petite cimenterie, on a mesuré des teneurs en TSP supérieur à $0,5 \text{ mg/m}^3$, les retombées atmosphériques s'élève en moyenne à $60 \text{ g/m}^2/\text{mois}$ [7].

a.5) 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 contenu dans le pétrole et certains hydrocarbures aromatiques polycycliques[1].

b) Incinération des déchets :

D'importantes quantités de produits déjà utilisés (boites de conserves, batteries, piles, plastique, 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 [8].

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

Tabl.N°2 : Rejets atmosphériques d'une usine d'incinération [9].

Usine d'incinération	Polluants	Quantités (mg/m ³ N)
Caractéristiques : Env. 7 t / h Avec filtrage de l'effluent Gazeux (env. 50 000 m ³ /h) M ³ N : m ³ de gaz aux conditions normales (0°, 1 atmosphère)	Poussières Plomb et zinc Cadmium Mercure Chlorures Fluorures SO ₂	34 2,7 0,04 0,12 2,5 traces 140

c) Le trafic routier :

Le secteur du transport qui est en pleine expansion dans les grandes agglomérations, constitue une des principales sources de pollution particulaire en milieu urbain.

Si dans toutes les autres activités, on arrive de nos jours à maîtriser et à maintenir la pollution à un taux acceptable, ce n'est pas le cas du trafic routier ou malgré tous les progrès technologiques réalisés sur le moteur et sur la réduction des émissions, on enregistre, en terme de volume, une pollution qui ne cesse de croître.

Cette situation est due à l'accroissement du parc automobile mondial qui a atteint le niveau d'environ 700 millions de véhicules.

Dans un grand nombre de pays comme la Chine, la motorisation a connu ces dernières années un bond extraordinaire.

La pollution qui en résulte est constituée principalement par les composés suivants :

- Les suies qui sont des particules de carbone et d'imbrûlés dénommées « fumées noirs » qui sont dues à la combustion incomplète. Leur présence est très importante dans les échappements des véhicules diesel et à un degré moindre dans les véhicules à essence.
- Les hydrocarbures polynucléaires (HAP) qui sont présent dans le carburant lui-même ou synthétisés lors de la combustion. Malgré leur présence à des proportions extrêmement faibles, ils exercent un pouvoir nuisible très élevé (susceptibles d'être cancérogènes). Comme pour les suies, le moteur Diesel rejette par rapport au moteur essence, plus de HAP qui adhèrent aux particules de suies [10].

- Les métaux lourds : parmi ces composés c'est surtout le plomb qui, de loin est le plus incriminé dans la pollution par le trafic routier et le plus répandu en milieu urbain.

Ajouté aux carburants comme antidétonant sous forme de tétra-éthyle de plomb à raison de 0,15 g à 0,6 g/l il est rejeté dans sa presque totalité dans l'atmosphère des villes [10].

On estime qu'environ 16% de la production mondiale du plomb était destinée à être utilisé comme additif dans l'essence.

Une voiture utilisant une essence à 0,15 g/l de plomb peut émettre 100 à 150 mg/Km de particules dont la masse en plomb peut dépasser les 25 % [11].

Les émissions de plomb issues du trafic routier étaient estimées à 248.10^6 Kg/an en 1993 [6].

Cependant et depuis l'introduction dans les années 80 de l'essence sans plomb, ces taux d'émissions sont en nette régression. En Algérie, la quantité de plomb émise annuellement dans l'atmosphère par le trafic routier est estimée à 800 tonnes [12].

Dans certaines grandes métropoles le taux de pollution particulaire issue du trafic routier s'élève à 20-30% [13]. En France, la moyenne nationale donne un taux de 50%, soit une teneur moyenne de particules d'environ $18 \mu\text{g} / \text{m}^3$ imputable uniquement au trafic routier [14].

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 [4].

L'émission de particules d'origine anthropogénique s'élève globalement à 269.10^9 Kg / an, soit environ 12% du taux de particules d'origine naturelle. 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 [4].

Tabl.N°3 : Taux d'émission des particules anthropiques [4].

SOURCE D'EMISSION	QUANTITES EMISES (Kg / An)
Emission sous forme de particules	84.10^9
Particules formées des gaz polluants :	
. Sulfate à partir de SO_2	133.10^9
. Nitrates à partir des NO_x	27.10^9
. Particules photochimiques issues des hydrocarbures	25.10^9
TOTAL	269.10^9

Le tableau N°4, résume l'ampleur des émissions mondiales de certains métaux lourds selon la source émettrice (source naturelle et source anthropique) [6].

Il est intéressant de constater que le chrome issu des émissions naturelles dépasse le chrome anthropique. A remarquer aussi l'ampleur du nickel et du vanadium qui sont des traceurs de la combustion du fuel et la quasi-totalité du plomb issu du trafic routier.

Tabl.N°4 : Valeurs médianes des émissions de métaux de sources naturelles et anthropogéniques (Tonnes/an) [6].

NATURE DES SOURCES	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
* Combustion du charbon	11.275	5.005	13.763	8.158	11.101
- Centrales électriques.	4.495	2.015	5.348	2.713	4.418
- Industrie et chauffage domestique.	6.780	2.990	8.415	5.445	6.683
* Combustion du fuel.	1.408	1.959	27.065	2.419	2.159
- Centrales électriques	334	1.334	9.170	986	727
- Industrie et chauffage domestique	1.074	625	17.895	1.433	1.432
* Production des métaux non ferreux	0	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
* Production secondaire des métaux non ferreux		110		765	855
* Sidérurgie fer et acier	15.620	1.491	3.568	7.633	19.525
* Incinération des déchets	1.139	1.575	464	2.370	5.900
- 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	1.335		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	30.777	38.189	55.642	331.851	131.866
Total des émissions naturelles	44.000	28.000	30.000	12.000	45.000

II.3 Caractéristiques des particules en suspension :

Les particules en suspension dans l'atmosphère sont caractérisées par plusieurs paramètres : dimension, vitesse de sédimentation, temps de séjour, ...

II.3.1 Dimensions des particules :

Les particules en suspension dans l'atmosphère présentent des dimensions très variables et des formes pouvant être très irrégulières.

La taille de ces particules peut varier de moins de $0,1 \mu\text{m}$ à plus de $100 \mu\text{m}$.
Les fumées et les fumées noires ont généralement un diamètre inférieur à $10 \mu\text{m}$.

La figure N°1 donne la taille moyenne de certaines particules présentes dans l'atmosphère, selon leur nature ainsi que leur système de rétention [15].

La taille de la particule est une caractéristique impossible à décrire à l'aide d'un seul paramètre. Elle est définie entre autre grâce à des mesures linéaires et des paramètres de forme. Ces paramètres ne sont en général pas mesurable directement sur la particule. C'est pourquoi on utilise un diamètre correspondant lors de la description de la taille des particules.

C'est ainsi qu'on a été amené à définir la notion de particule sphérique équivalente, soit en valeur, soit en comportement aérodynamique. Une particule irrégulière est ainsi caractérisée par le diamètre aérodynamique (cinétique) ou le diamètre de sédimentation (diamètre de Stokes).

a) Le diamètre Aérodynamique équivalent « Dae » :

C'est le diamètre de la sphère de densité égale à 1 et ayant dans l'air la même vitesse de chute que la sphère considérée.

En général, c'est ce diamètre aérodynamique équivalent qui est le plus utilisé dans la caractérisation des particules [16].

Diamètre des particules (μm)

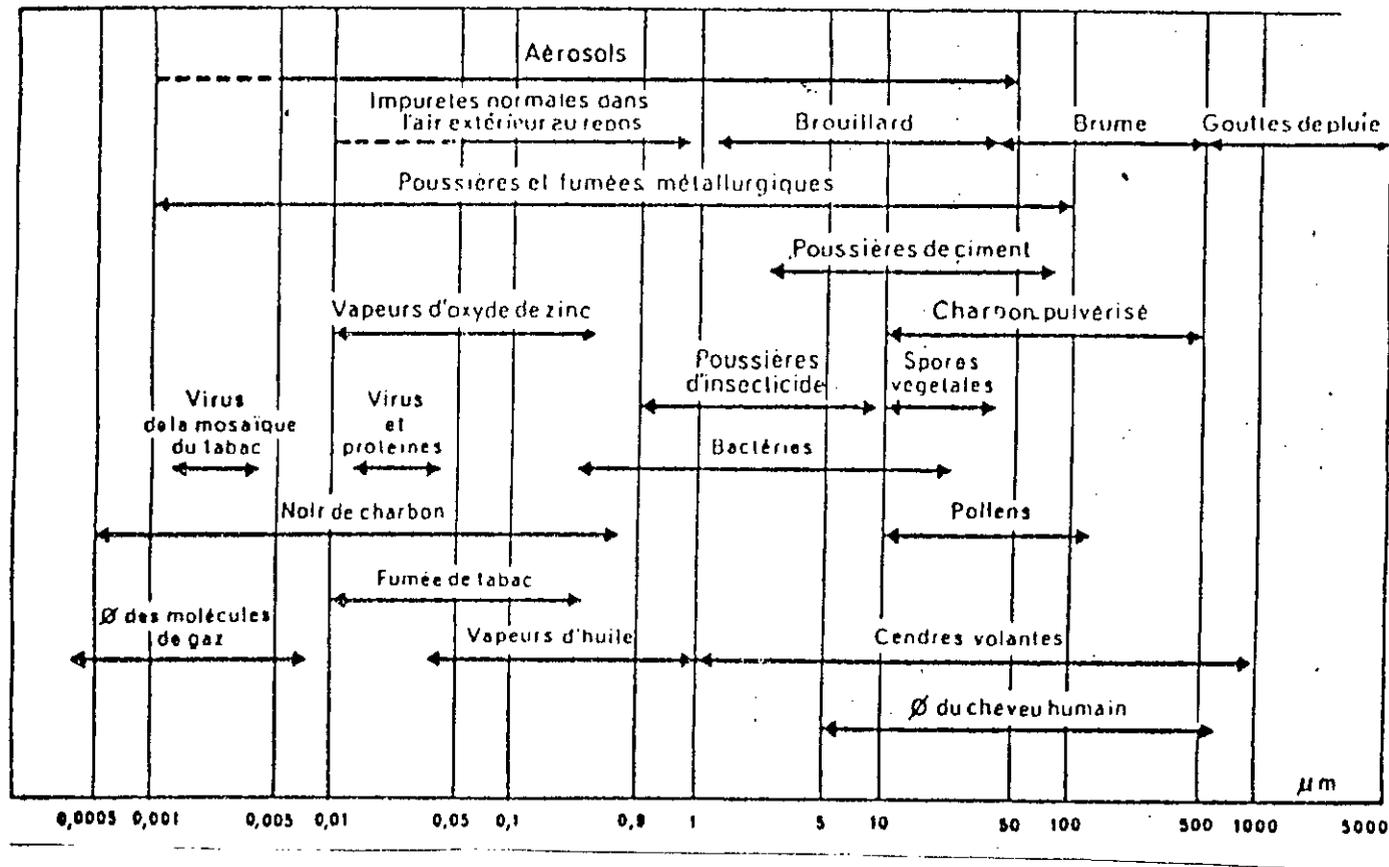
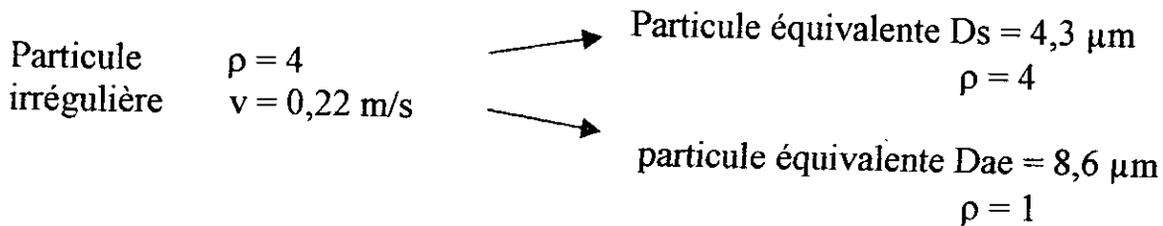


Fig.N°1 : Intervalles de dimension de diverses classes de particules inertes et viables.

b) Diamètre de Stokes « D_s » :

Le diamètre de Stokes d'une particule correspond au diamètre d'une sphère qui a la même densité et la même vitesse de migration que la particule examinée. En rapport avec la pesanteur, on parle communément de diamètre de sédimentation.

A titre d'exemple, une particule irrégulière de densité $\rho = 4$ et de vitesse de chute $v = 0,22$ m/s se comportera comme une particule équivalente ayant les D_{ae} et D_s suivants [17] :



Pour évaluer la vitesse de chute v des particules contenues dans l'air, il existe une formule d'approximation pour le domaine de grandeur des particules $1\mu\text{m} < d < 100\mu\text{m}$ [17].

$$v \text{ (cm/s)} = 0,003 \cdot \rho \cdot D_s^2 = 0,003 \cdot D_{ae}^2 \quad (1)$$

(les diamètres sont donnés en μm)

II.3.2 Classement granulométrique des particules en suspension [3, 18, 19, 20] :

Les particules en suspension présentes dans l'air peuvent être réparties en 3 classes granulométriques distinctes, selon des critères de taille, de masse, de composition, de formation et de comportement dans l'air. Cette répartition est importante surtout du point de vue impact sanitaire. En effet, le pouvoir de pénétration des particules dans l'appareil respiratoire dépend de leur granulométrie.

Bien qu'il existe plusieurs types de classification qui varient selon les pays, on a tendance à classer les particules par ordre de taille décroissant comme suit :

- Les poussières sédimentables de grand diamètre
- Les poussières fines peu ou pas sédimentables
- Les poussières très fines

a) Les grosses particules sédimentables :

Elles ont une taille supérieure à $30\mu\text{m}$ et on les trouve généralement en concentration élevée près de leur source d'émission.

Elles prédominent dans la basse couche de l'atmosphère (moins de 300m d'altitude) et sédimentent rapidement.

Elles sont formées mécaniquement par effritement et dispersion de substances naturelles (poussières de carrières, cimenteries et vent de sable).

b) Les particules fines :

Leurs tailles varient de $2,5$ à $30\mu\text{m}$ et ont généralement les mêmes origines que les grosses particules. Cette catégorie qu'on désigne souvent par les TSP englobe la classe particulière de $0,1$ à $10\mu\text{m}$.

Elles peuvent atteindre des altitudes plus élevées et sont plus faciles à emporter par les vents.

Elles ont une vitesse de sédimentation plus faible et peuvent rester en suspension plus longtemps, surtout dans le cas de turbulence aérienne. C'est en adsorbant les polluants gazeux à leur surface que sont induites les conversions gaz/particules.

c) Les particules très fines :

Elles désignent toutes les particules dont la taille varie entre $0,1$ et $2,5\mu\text{m}$, la dimension $0,1\mu\text{m}$ représente la limite inférieure au-delà de laquelle la sédimentation n'est plus possible en raison du mouvement brownien où les forces de viscosité deviennent supérieures à celles de la gravitation.

Ces particules se rencontrent dans presque tout l'atmosphère, mais leur concentration décroît très vite au-delà de la tropopause.

Elles sont issues des transformations gaz-particules ou par coagulation des particules inframicroscopique.

Pour compléter cette classification, il faut signaler qu'il existe une grande disproportion entre le nombre de particules de diamètre donné et leur poids correspondant. C'est ainsi qu'on a constaté que plus de 99% des particules en suspension ont moins de $1\mu\text{m}$ de diamètre. Cependant, des particules de taille inférieure à $1\mu\text{m}$ représente moins de 30% du poids total des particules.

Globalement cela signifie que la majeure partie de la masse des particules collectées est constituée en nombre d'une fraction extrêmement faible de particules fines ($>1\mu\text{m}$) [13].

L'aérosol atmosphérique est instable et sa répartition granulométrique évolue en raison de la sédimentation et de l'agglomération vers la répartition (air au repos) illustrée en figure N°2 [21].

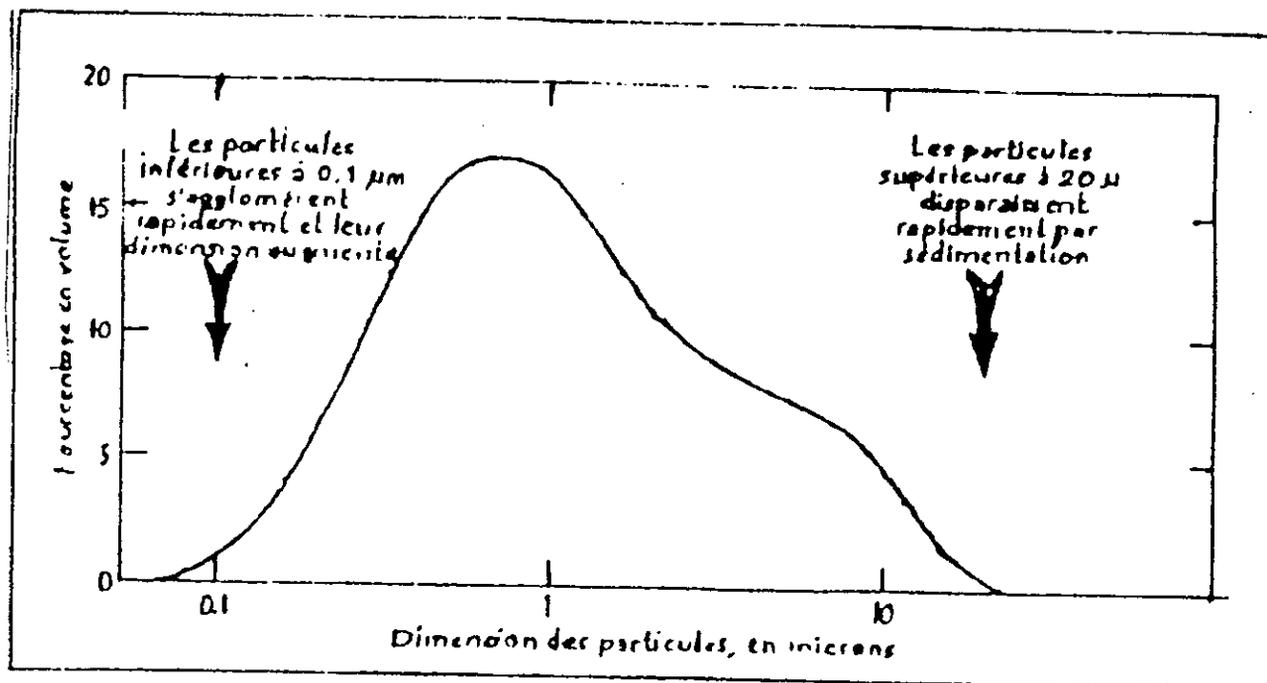


Fig.N°2 : Répartition granulométrique des poussières ; effets de la sédimentation et l'agglomération.

Il résulte de cette figure que les particules les plus fines ($\varnothing < 0,1 \mu\text{m}$) se condensent ou s'agglomèrent pour enrichir les fractions de diamètre supérieur, tandis que les particules les plus grosses ($\varnothing > 20 \mu\text{m}$) disparaissent de l'atmosphère par sédimentation ou par impaction sur différentes surfaces.

Le résultat, c'est qu'il ne devrait subsister en suspension dans l'air que les particules de taille comprise entre 0,1 et 15-20 μm , ce qui correspond au spectre granulométrique des TSP.

II.4 Dynamique des particules :

Une particule dans l'air est, en général, soumise aux forces suivantes :

- Forces de gravité.
- Forces d'inertie.
- Forces dues à la viscosité de l'air.
- Forces dues aux mouvements browniens (une particule aura un coefficient de diffusion et un libre parcours moyen).
- Une série de forces électriques, soniques, thermiques, ...

Ces forces peuvent agir sur la particule en même temps, comme elles peuvent agir sur elle séparément.

La vitesse de chute des particules, varie en fonction de leurs caractéristiques physiques (diamètre, poids, ...) et aussi, des conditions météorologiques du milieu (calme, tourbillonnement, mouvements verticaux et horizontaux, ...). Ainsi, les plus lourdes arrivent les premières à la surface du sol.

La présence des mouvements de tourbillonnement dans l'atmosphère influence considérablement la vitesse de chute des particules, surtout pour les fines particules. On donne ci-dessous (tableau N°5) quelques valeurs de la vitesse de sédimentation pour des particules sphériques de masse volumique $1 \text{ g}_t / \text{cm}^3$ dans l'air à 20°C (voir aussi équation 1, paragraphe II.3.1).

Tabl.N°5 : Vitesse de sédimentation de quelques particules sphériques [1].

DIAMETRE (μm)	VITESSE DE SEDIMENTATION (cm / s)
200	120
100	30
50	7
10	0,3
5	0,07
1	0,003
0,5	0,0007

Ainsi les particules de diamètre inférieur à $0,1\text{--}0,5\mu\text{m}$ se comportent comme des molécules gazeuses et migrent selon un mouvement Brownien. Leur vitesse de chute n'est pas mesurable.

Les particules de plus de $0,5 \mu\text{m}$ ont une vitesse de chute calculable, mais celle-ci est si faible que les flux d'air ascendants les maintiennent en suspension. Les particules de diamètres intermédiaires de 1 à $10 \mu\text{m}$ possèdent une vitesse de chute constante et calculable mais la moindre convection les maintient en suspension dans l'air.

En fin au-delà d'un diamètre de $10\mu\text{m}$, les particules sédimentent plus au moins rapidement et leur temps de séjour dans l'air est relativement court [23].

Pour les particules fines, la sédimentation a lieu grâce aux processus d'interception et d'impaction, tandis que les particules moins fines se déposent par sédimentation gravitaire [22, 23].

II.4.1 Cas des particules de $\varnothing > 1\mu\text{m}$ [23]:

L'air en circulation exerce sur une particule une force de viscosité F :

$$F = 3 \cdot \mu \cdot \pi \cdot v \cdot d \quad (2)$$

Avec : μ : Viscosité dynamique (Dynes.s / cm^2 ou la Poise)

d : Diamètre de la particule.

v : Vitesse d'écoulement de l'air.

Les particules dont la taille est supérieure à $1 \mu\text{m}$ de diamètre, se caractérisent par une vitesse de sédimentation non négligeable qui peut être estimée par la loi de Stokes :

Une particule dans l'air calme est soumise aux forces de gravité, poussée d'Archimède et la force de viscosité avec :

Force de gravité – poussée d'Archimède = force de viscosité, soit

$$(\rho_p - \rho_{\text{air}}) \frac{4}{3} \pi (d/2)^3 \cdot g = 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot v \cdot d \quad (3)$$

Comme ρ_{air} est négligeable devant ρ_p on obtient pour la vitesse de sédimentation :

$$v = (\rho_p \cdot g / 18 \cdot \mu) d^2 \quad (4)$$

II.4.2 Cas de particules de taille comprise entre 0,1 et 1 μm :

Généralement, au moment où les particules atteignent des diamètres inférieurs à 1 μm , l'air commence à se comporter comme un milieu discontinu et les particules subissent des collisions erratiques qui provoquent des déplacements aléatoires des particules et il en résulte une diffusion[23].

Le coefficient de diffusion D peut être calculé à partir de la théorie cinétique des gaz :

$$D = KT/3\pi\mu d \quad (5)$$

Avec : K = c^{te} de Boltzman = $1,38 \cdot 10^{-16}$ erg/°C

μ = viscosité de l'air = 180 μP à 27°C

d = diamètre des particules en cm

T = température °C.

A une température de 27°C, on obtient alors :

$$D = 2,6 [1/d(\mu\text{m})] \cdot 10^{-7} \text{ cm/s} \quad (6)$$

Le mouvement Brownien est significatif pour ces particules, et devient supérieur à la vitesse de sédimentation.

Les particules qui diffusent subissent alors un déplacement moyen X sur un temps t, donnée par la loi d'EINSTEIN :

$$X = (2 \cdot D \cdot T)^{1/2} \quad (7)$$

Où D représente le coefficient de diffusion [23].

A titre illustratif, nous présentons en tableau N°6, les vitesses de sédimentation et les déplacements moyens selon le diamètre des particules [23].

Tabl.N°6 : Vitesse de chute et déplacement moyen des particules en suspension.

\emptyset particules (μm)	Vitesse de chute ($\mu\text{m/s}$)	Déplacement moyen dans une direction ($\mu\text{m/s}$)
10	$3 \cdot 10^3$	1,8
1	35	6
0,4	7	10
0,1	1	30

II.4.3 Cas des particules inférieures à 0,1 µm [23, 24]:

Les phénomènes de diffusion de ces particules provoquent la collision de ces dernières, il en résulte une agglomération qui en réduit progressivement le nombre. Le taux de diminution de ces particules par agglomération est donné, en fonction du temps, par la relation :

$$- dn/dt = k n^2 \quad (8)$$

avec : k : constante dépendant de la taille des particules, de leur diffusivité, de la température, de la pression, de la viscosité et du degré de turbulence de l'air. Par exemple, $k = 1,93$ à $22,6 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^3 / \text{s}$ pour des aérosols de $6 \cdot 10^{-3}$ à $3 \cdot 10^{-2} \text{ µm}$ de diamètre.

Et si, à un temps $t = 0$ nous avons un nombre de particules $n = n_0$, après un certain temps t , on aura un nombre n_t ;

avec :

$$1/n_t - 1/n_0 = k \quad (9)$$

En conclusion de cette étude sur la dynamique des particules, et comme déjà mentionné auparavant on retiendra que les particules les plus fines se condensent et se coagulent pour enrichir les fractions de diamètre supérieur, tandis que les particules les plus grosses disparaissent de l'atmosphère à des vitesses variables, seul les particules d'un diamètre équivalent compris entre 0,1 et 15 à 20µm subsistent dans l'air (voir fig.N°2).

Le comportement dynamique des particules et leurs propriétés de migration dans l'atmosphère en fonction de leur diamètre équivalent est ainsi résumé en figure N°3 [23, 24].

Il faut toutefois signaler que le processus de croissance d'une particule dans l'atmosphère est un phénomène qui reste encore mal compris ; le diamètre d'une particule cesse de croître quand il atteint environ 1 µm. D'autre part, la nature et les processus mécaniques ne semblent pas capables de diviser une substance en particule de diamètre inférieur à 1 µm.

A ces phénomènes viennent s'ajouter les diverses transformations que peuvent subir les particules dans l'atmosphère ; certaines servent de noyaux de condensation des gaz, d'autres réagissent chimiquement avec les gaz et les vapeurs pour former d'autres composés (formation par exemple de particules de $(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$ à partir du SO_2 et NH_3).

On a très tôt reconnu que les particules fines proviennent surtout des réactions de combustion, elles sont essentiellement acides et nécessitent une attention particulière.

De même, les particules les plus fines contiennent la majorité des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) avec un diamètre aérodynamique médian de moins de 1 μm [18].

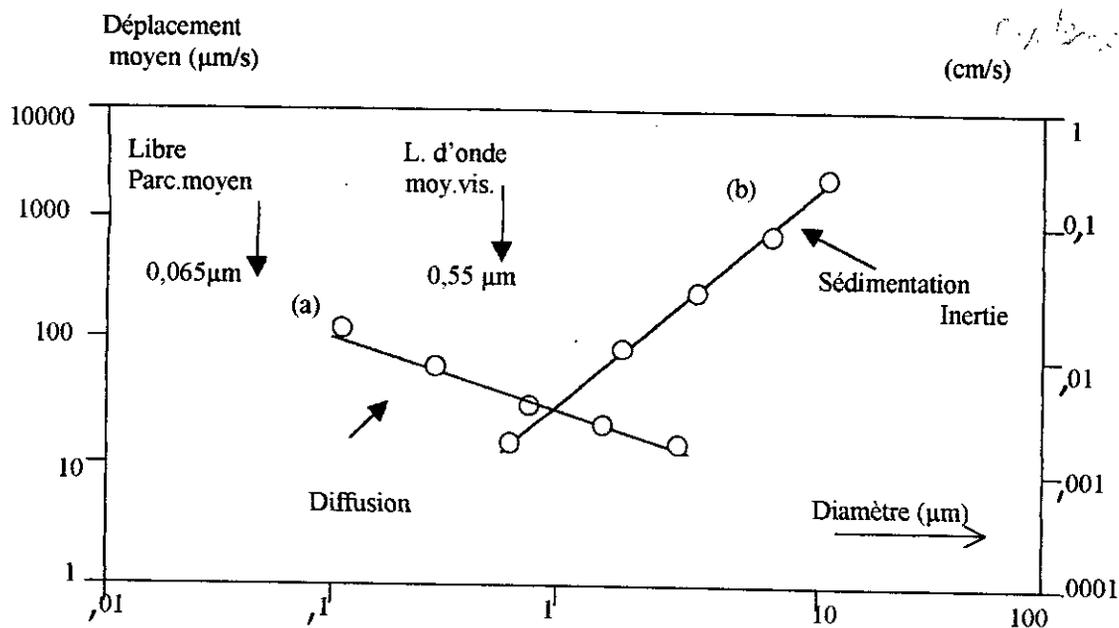


Fig.N°3 : Déplacement moyen par seconde, de particules de différents diamètres
 a) diffusion pour les plus fines ($d < 0,5 \mu\text{m}$)
 b) sédimentation pour les plus grosses ($d > 0,5 \mu\text{m}$).

II.5 La fraction thoracique et la fraction alvéolaire des particules fines : Les PM-10 et PM-2,5 :

Parmi les particules totales en suspension, seules les particules fines peuvent s'infiltrer dans les bronches, les bronchioles 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 diamètre inférieur à $10\mu\text{m}$ (PM-10, Particulate matter $10\mu\text{m}$). 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'admission relative à la pollution par les particules. Il est utile de signaler ici et pour éviter toute confusion que les termes « fines particules », « poussières thoraciques ou fraction thoracique en suspension » et « PM-10 » sont des synonymes désignant la partie inhalable des particules en suspension.

Des études plus 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 $2,5\mu\text{m}$. C'est la fraction alvéolaire (appelée aussi fraction respirable) qui englobe les particules très fines pouvant se loger dans les ramifications pulmonaires finales (les alvéoles).

L'intérêt porté aux PM-2,5 provient du fait que la diésélisation du parc automobile a pris une grande ampleur ces dernières années, d'où une plus forte proportion de particules fines et de suies.

En effet, des études menées sur les émissions des véhicules ont montré que le véhicule diesel le moins polluant émet environ deux fois plus de particules qu'un véhicule à essence catalysé [25].

Le diamètre aérodynamique moyen des particules diesels est supérieur à celui des particules issues des moteurs à essence et il est centré autour de $0,1\mu\text{m}$ en sortie d'échappement.

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 SO₂ et NO₂).

Les particules d'un diamètre compris entre 2,5 et 10µm 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.

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.

CHAPITRE III

*Effets des particules
en suspension*

III.1 Effets sur l'être humain :

III.1.1 Le cheminement des particules dans l'appareil respiratoire :

L'air est un des éléments indispensables à la vie de l'homme, qui en absorbe en moyenne 12 m^3 par jour, soit environ 15Kg. La pollution atmosphérique est incontestablement une gêne non seulement pour l'homme, mais également pour son milieu. L'analyse des épisodes de pollution aiguë prouve qu'à des teneurs élevées, les polluants atmosphériques peuvent altérer sérieusement la santé humaine et provoquer des décès.

Les travaux scientifiques les plus récents mettent en évidence une recrudescence de divers problèmes respiratoires tels que l'irritation des bronches ou l'asthme en réaction avec la pollution atmosphérique, qui légitiment les actions entreprises pour réduire les effets néfastes sur la santé. Il faut en effet conserver à l'esprit qu'une personne respire chaque jour 15 000 litres d'air, et que la zone des échangeurs gazeux de l'appareil respiratoire constitue une interface de 70 m^2 environ entre le milieu extérieur et l'organisme.

Le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France a en particulier mis en exergue le rôle irritatif des particules en suspension et des oxydants (dioxyde d'azote et ozone).

Les particules en suspension les plus fines peuvent avoir un effet direct mais aussi indirect en transportant les composés toxiques dans les voies respiratoires inférieures.

La profondeur de pénétration et le mécanisme de déposition des particules solides dans l'appareil respiratoire dépendent d'abord de leurs diamètres aérodynamiques et de la morphologie des voies aériennes qui conditionne les modalités de l'écoulement aérien.

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

Les particules dont le diamètre aérodynamique est compris entre 2 et $10 \mu\text{m}$ se déposent au niveau de l'arbre trachéobronchique par impaction et interception. Dans cette zone, les particules peuvent être éliminées par clairance mucociliaire et la toux [18, 26].

Les particules de diamètre aérodynamique moyen inférieur à $2-3 \mu\text{m}$ pénètrent profondément dans l'appareil respiratoire jusqu'aux sacs alvéolaires [18]. Or, les dispositifs de défense sont moins efficaces dans les voies profondes (cellules ciliées et muqueuses plus rares, muqueuse moins épaisse).

Les polluants peuvent traverser la paroi et être distribués dans certains organes par le sang, surtout les particules ultra-fines qui véhiculent à leur surface des éléments indésirables (métaux, hydrocarbures polycycliques).

Ces polluants provoquent des inflammations aiguës qui font le lit de l'infection, des inflammations chroniques qui peuvent conduire à la sclérose, des réactions immunologiques immédiates ou différées à médiation cellulaire qui sont susceptibles d'initier des attaques d'asthme ou de la fibrose, enfin la carcinogenèse. La figure N°4 illustre le devenir des particules atmosphériques dans l'appareil respiratoire en fonction de leur granulométrie moyenne [19].

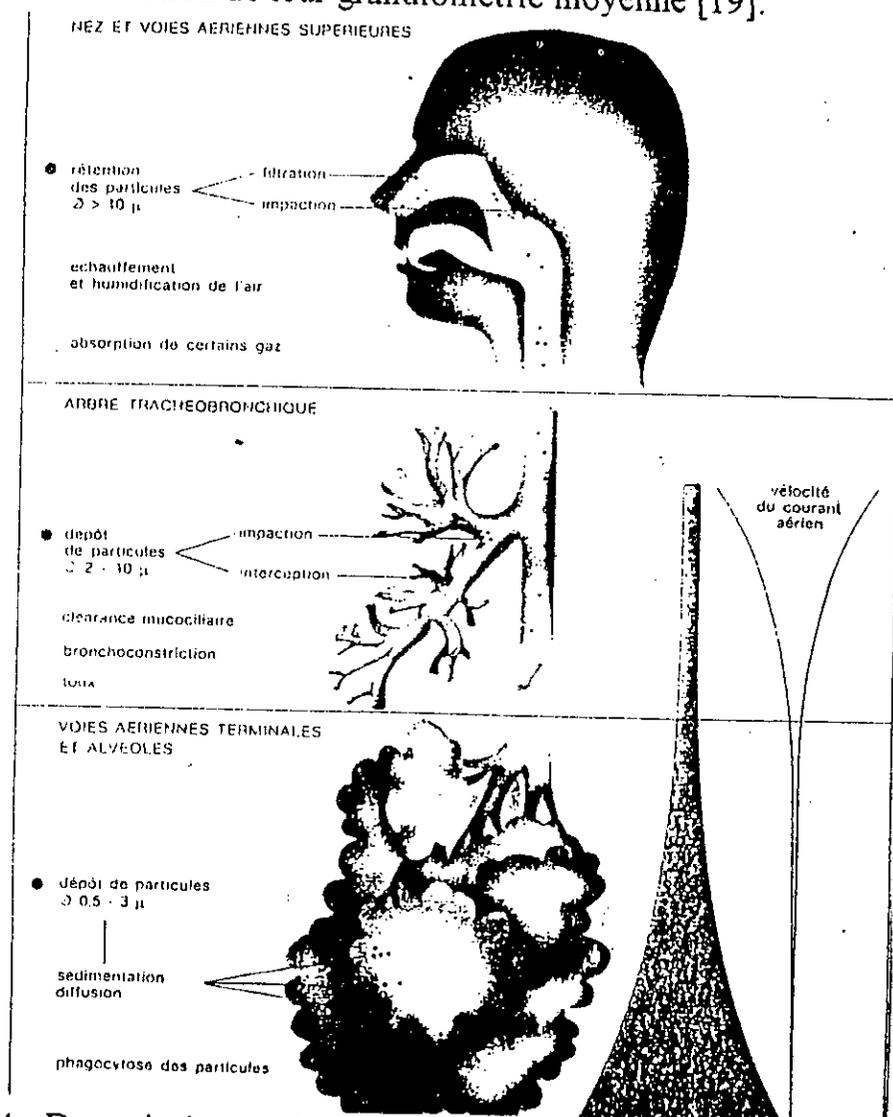


Fig.N°4 : Devenir des particules atmosphériques dans l'appareil respiratoire en fonction de leur granulométrie moyenne [19].

III.1.2 Impact des PM-10 et PM-2,5 sur la santé :

Dans l'évaluation des effets des particules sur la santé, toutes les études effectuées dans le but de faire apparaître une relation dose-reponse qu'elles se rapportent à des effets à court ou à long terme, ont trouvé un rapport linéaire entre les valeurs de PM-10 et les paramètres de santé. Au contraire des substances gazeuses nocives ou des poussières en suspension totales, il n'y a dans aucun cas de seuil identifiable au-dessous duquel plus aucun effet n'est perceptible.

Ainsi 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 des jours les plus froids, que ce sont les PM-10 qui sont le plus fortement en corrélation 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 % [27].

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 $10 \mu\text{g}$ 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 % [28].

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 de maladie des voies respiratoires. La relation la plus étroite est observée avec les valeurs de PM-10 [29].

Une synthèse des diverses études portant sur les effets à court et à long terme sur divers paramètres de santé (mortalité, consultations en urgence, diminution de la fonction pulmonaire etc ...) est à ce titre très instructive. Nous en présentons les principaux points :

a) Effets à court terme:

Une étude américaine portant sur les effets à court terme des PM-10 trouve pour un accroissement des teneurs en PM-10 par tranche de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM-10, un accroissement de la mortalité totale de 1%, de la mortalité par maladies respiratoires de 3,4%, et de la mortalité par maladies cardio-vasculaires de 1,4%. De plus, on observe une augmentation des hospitalisations pour asthme de 1,9% ou une augmentation de toutes les hospitalisations pour affections pulmonaires de 0,8%. Les crises d'asthme chez les asthmatiques augmentent, d'après cette synthèse par tranche de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM-10, d'environ 3%, les résultats des fonctions pulmonaires chez les enfants diminuent d'environ 0,08%.

Les symptômes des voies aériennes inférieures augmentent, pour une population moyenne, de 3%, ceux des voies aériennes supérieures d'environ 0,7% et la toux de 1,2% [30].

Le tableau N°7 résume les résultats de diverses études se rapportant aux effets à court terme. Les pourcentages indiquent les changements observés pour une augmentation des PM-10 par tranche de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$. Par exemple, lorsque la valeur moyenne journalière de la veille pesait de 30 à $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM-10, on relève un accroissement de 2 % des urgences pour asthme chez les enfants [22].

Tabl.N°7 : Effets à court terme par tranche de $10\mu\text{g}$ de PM-10

Mortalité totale sans les accidents	+ 1,1-1,6 %
Consultations en urgence pour asthme chez les enfants et les jeunes adultes	+ 2-3,5 %
Hospitalisations de personnes de plus de 65 ans pour pneumonie	+ 1,2-1,7 %
pour bronchite chronique	+ 1,9-2,7 %
diminution de la fonction pulmonaire chez l'enfant CVP, FEV1	- 0,1-0,25 %
symptôme des voies aériennes inférieures, enfant	+ 1,7-17 %

Le tableau N°8 indique selon l'OMS de combien devraient changer les concentrations des substances délétères pour obtenir un changement déterminant dans les paramètres de santé étudiés [31].

Tbl.N°8 : Résumé selon l'OMS des effets sur la santé, causés par un bref accroissement des PM-10 et PM-2,5.

Effets sur la santé	Evaluation de l'accroissement ou de la baisse de la valeur journalière moyenne correspondant à un changement dans les effets sur la santé, en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
	PM-2,5	PM-10
Nombre de décès par jour :		
changement de 5%	29	50
changement de 10%	55	100
changement de 20%	110	200
Hospitalisations pour maladies respiratoires :		
changement de 5%	10	25
changement de 10%	20	50
changement de 20%	40	100
Consommation de médicaments chez les asthmatiques (bronchodilateurs) :		
changement de 5%		7
changement de 10%		14
changement de 20%		29
Aggravation de la symptomatologie chez les asthmatiques :		
changement de 5%		10
changement de 10%		20
changement de 20%		40
Changements de la fonction pulmonaire :		
changement de 5%		200
changement de 10%		400

b) Effets chroniques :

En raison de la méthodologie différente, les résultats des études effectuées sur les effets à long terme ne se prêtent pas toujours à des comparaisons quantitatives. Nous présentons toutefois en tableau N°9 les principaux résultats portant sur un accroissement de l'exposition à long terme d'environ 10µg.

Tabl.N°9 : Résultats d'études sur les effets à long terme de l'exposition aux PM-10 et PM-2,5.

Effets chroniques	Valeurs moyennes annuelles	Changement par 10µg	Références
Mortalité	18-47µg PM-10/m ³	+ 9%	[32]
Mortalité Décès cœur/poumons Décès cancers poumons	11-29,6µg PM-2,5/m ³	+ 14% + 20% + 20%	[32]
Mortalité Décès par maladies cœur/poumons	9-33,5µg PM-2,5/m ³	+ 6,9% + 12,6%	[33]
Capacité vitale forcée	10-34µg PM-10/m ³	- 3,1%	[34]
Dyspnée Dyspnée travail léger Rhume allergique	10-34µg PM-10/m ³	+ 25% + 21% + 10%	[35]
Infections des voies respiratoires 12 mois écoulés, enfants	10-33µg PM-10/m ³	+ 26%	[36]
Toux à répétition au cours des 12 mois écoulés, enfants		+ 54%	
Bronchites 12 mois écoulés Toux chronique, enfants	20-59µg PM-2,5/m ³	+ 37% + 67%	[37]

Sur la base des études qui sont consacrées à la mortalité à long terme, l'organisation mondiale de la santé estime que la mortalité totale est environ 10% plus élevée lorsque l'exposition à 10µg de PM-2,5 supplémentaire est durable. Pour les PM-10, ce taux serait de 6 %.

Le tableau N°10 indique les fréquences en valeur absolue des maladies respiratoires en fonction des moyennes annuelles des PM-10 pour la Suisse.

Ainsi par exemple, 24% des enfants en âge scolaire souffrent d'une toux plus de 4 fois par année en moyenne pour une teneur annuelle moyenne de 10 µg/m³ en PM-10.

Pour une teneur de 30µg/m³, ce sont déjà 42% des enfants qui sont touchés[22].

Tabl.N°10 : Pourcentage de personnes avec des maladies respiratoires pour des valeurs moyennes annuelles de PM-10 différentes.

Valeur moyenne annuelle de PM-10 (µg/m ³)	10	15	20	25	30	35
Grippe et/ou bronchite au cours de l'année écoulée (%)	32	35	37	40	43	45
Toux à répétition, enfants (%)	24	28	32	37	42	47
Dyspnée chez les non-fumeurs (%)	5	6	7	8	10	11
Toux chronique ou expectorations chez les non-fumeurs (%)	5	5	6	7	8	9

En ce qui concerne l'effet cancérigène, le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC-Lyon) et l'U.S.EPA ont classé les émissions des véhicules comme étant :

- Potentiellement cancérigènes dans le cas des véhicules essence
- Probablement cancérigènes dans le cas des véhicules diesel [38].

Pour l'Algérie, l'association Algérienne de solidarité aux malades respiratoires estime que 5% des Algériens sont atteints d'asthme. Selon l'institut national de la santé publique, environ 20% des motifs de consultation hospitalière dans le grand-Alger sont pour raison d'insuffisance respiratoire. Il n'existe toutefois aucune étude confirmant le lien entre le taux de pollution et son incidence sur la santé en Algérie.

III.1.3 Effet toxique de certains métaux lourds supportés par les PM-10 :

a) Action toxique du plomb :

Ce métal qui a des propriétés cumulatives importantes est toxique.

Le plomb minéral est distribué à raison de 94% dans les os et de 6% dans les autres tissus, dont 4% dans le sang.

Le plomb organique se fixe préférentiellement dans le cerveau d'où des manifestations toxiques particulières (Encéphalopathie).

L'action toxique essentielle du plomb minéral est la perturbation de la biosynthèse de l'hémoglobine, qui se traduit par une légère anémie hypochrome, parfois des hématies à granulations basophiles, dites « ponctuées » et une augmentation de la plombémie.

C'est aussi un toxique du système nerveux, du sang et du rein qui, à forte dose, provoque chez les enfants des troubles du développement cérébral qui se manifestent par des perturbations psychologiques et des difficultés d'apprentissage scolaire.

Plusieurs auteurs ont montré qu'il existe une relation linéaire entre le plomb dans l'air et le plomb dans le sang [39, 40]. La corrélation qui est la plus citée dans la littérature est [40] :

$$[\text{Pb}]_{\text{sang}} = 1,216 [\text{Pb}]_{\text{air}} + 15,65 \quad (10)$$

En milieu non pollué le plomb émis est de l'ordre de 15µg/dl de sang.

Certaines interrogations subsistent sur l'impact à long terme, en particulier sur certains sujets sensibles. Néanmoins, à l'image des connaissances concernant les infections virales et les pneumo-allergies, on peut redouter une augmentation de l'inflammation des bronches favorisant de ce fait les maladies respiratoires chroniques, surtout en cas d'expositions répétées au cours de l'année.

b) Action toxique du Cadmium [41]:

Le cadmium est un poison cumulatif, il s'accumule surtout au niveau du foie et des reins ; les autres organes privilégiés sont les poumons, le pancréas, les testicules, la thyroïde, les glandes salivaires, le cœur et les grosses artères.

L'intoxication cadmique se manifeste par des inhibitions d'enzymes diverses, parfois l'apparition de coloration jaune au collet des dents, des lésions osseuses, de l'emphysème, peut être des cancers pulmonaires et surtout des lésions rénales type néphrite interstitielle chronique et cancers de la prostate.

c) Action du Vanadium [41]:

Le Vanadium est un métal cumulatif, il se fixe principalement dans le cœur, la rate, le foie et les reins et à un moindre degré dans les testicules.

Le Vanadium a des effets membranaires : il augmente l'activité de l'adénylcyclose et inhibe l'ATPase Na^+K^+ au niveau du rein, du cerveau et du cœur et en conséquence, il inhibe la pompe à sodium.

Il perturbe d'autres métabolismes, diminue la résistance immunologique et la réactivité allergique et présente une certaine toxicité rénale.

Il provoque en quelque sorte la bronchite chronique et la pneumonie.

d) Action toxique du Mercure [41]:

Le Mercure ionisé affecte divers systèmes enzymatiques de la cellule et des membranes, il se fixe sur l'ADN.

L'intoxication chronique du mercure se manifeste par une symptomatologie non spécifique constitué de fatigue, anorexie, perte de poids, troubles gastro-intestinaux, saveur métallique au niveau de la bouche et salivation intense.

Au niveau rénal, de petites doses de mercure peuvent causer l'irritabilité. Des pertes de mémoires, faiblesse musculaire, des accès dépressifs, des cauchemars, des insomnies, un tremblement caractéristique due à des lésions de cervelet et parfois des troubles de la vision.

Les organomercuriels attaquent généralement le cerveau et c'est le syndrome neurologique qui prédomine.

A titre illustratif, nous présentons en figure N°5, les organes du corps humain qui peuvent être affectés par les divers métaux lourds [4].

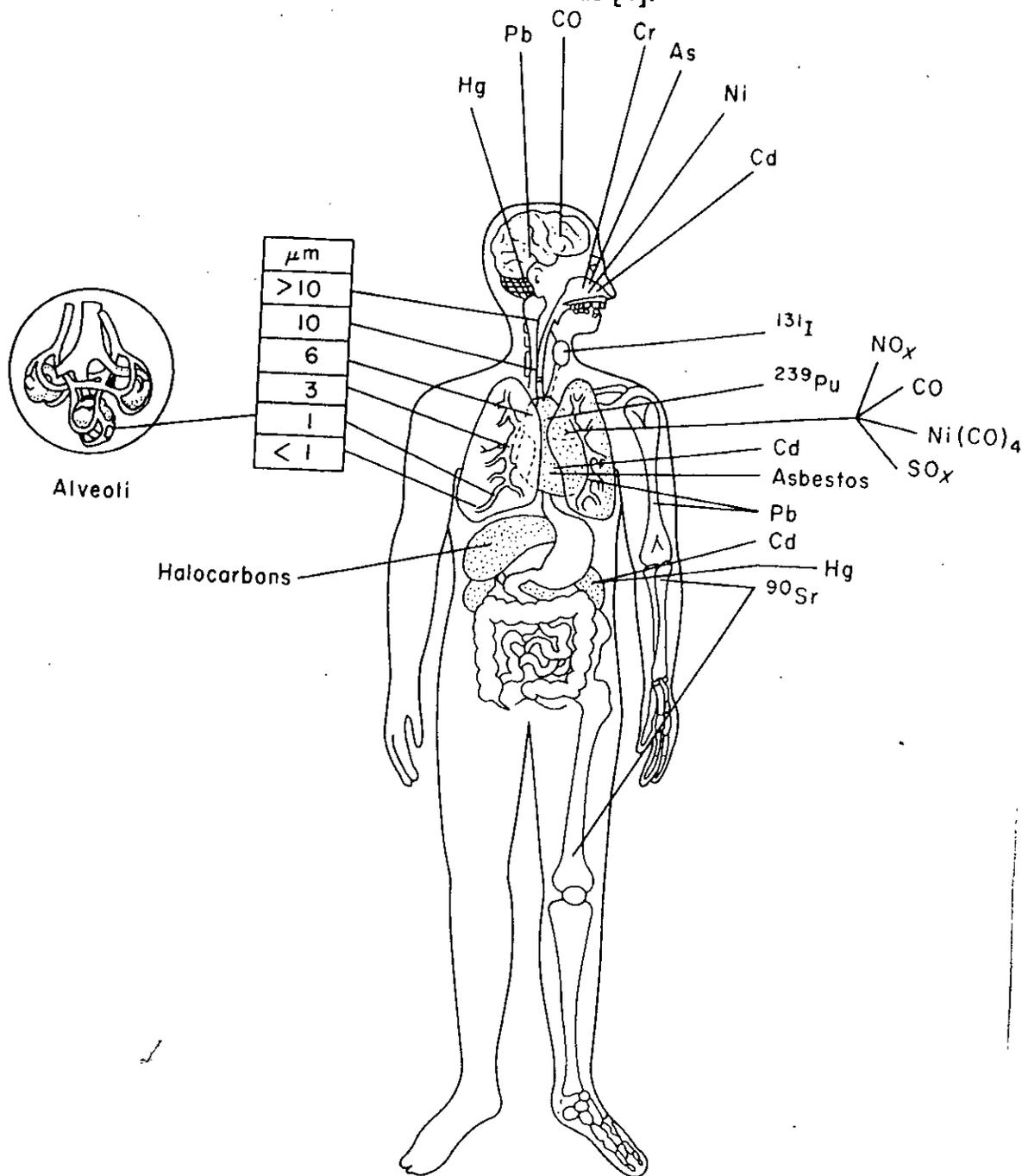


Fig.N°5 : Différents organes et parties du corps humain pouvant être contaminé par certains aérocontaminants.

III.2 Effets sur les animaux [18]:

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 traité dans les cimenteries peuvent provoquer des troubles chez les animaux par des lésions du tube digestif et des modifications du pH.

III.3 Effets des particules solides sur les matériaux [1]:

Les dégradations des matériaux dus aux particules solides peuvent se produire par abrasion, salissure et corrosion. Ce phénomène se produit par les substances oxydantes et acides supportées par les particules solides.

La dégradation de la propriété bâtie (bâtiments, monuments historiques,...) est l'effet le plus visible qui se traduit par le noircissement des façades par les dépôts de suie et de poussières.

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

Les particules solides se disposent aussi sur les rebords des fenêtres, des porches, des automobiles, des vêtements et provoquent leurs salissures. Ces particules peuvent s'infiltrer à l'intérieur des habitations et provoquent la salissure des murs, plafonds, tapis, ...etc.

Les substances oxydantes et acides véhiculées par les particules solides sont, en quelque sorte, la cause de la corrosion de certains matériaux.

III.4 Effets sur les végétaux [9]:

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 ; le cas des abricotiers est bien connu. Les végétaux sont exposés à la fois à l'action des polluants en suspension dans l'atmosphère, aux retombées sèches de poussières et de métaux et aux dépôts acides. Ils sont atteints directement par le feuillage et aussi indirectement par l'intermédiaire du sol (lessivage d'éléments nutritifs). Bien que chaque polluant ait un effet spécifique, ce sont surtout les retombées acides qui sont dangereuses pour les végétaux. La couche protectrice des feuilles et des aiguilles (cutine) 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.

L'augmentation de l'acidité des sols peut entraîner des lésions aux racines 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.

III.5 Autres effets [42]:

En plus de leurs effets sur les êtres humains, les animaux, les matériaux et les végétaux, les particules en suspension dans l'atmosphère peuvent avoir des effets sur la transparence de l'atmosphère et le climat.

En fait, l'augmentation de la teneur en particules dans l'air se traduit par la diminution de la visibilité, ce qui a des répercussions importantes sur les activités humaines, notamment en matière de transport terrestre et aérien.

Les particules peuvent aussi constituer un écran pour les radiations solaires incidentes, ce qui peut avoir des répercussions sur le climat en général.

CHAPITRE IV

*Prélevement et analyse
des particules*

L'étude des particules en suspension comprend généralement les étapes suivantes :

- L'échantillonnage et prélèvement des particules sur filtres appropriés.
- La mesure de la teneur atmosphérique en particules
- L'analyse des principaux composés toxiques qui sont associés aux particules en suspension.

IV.1 Echantillonnage :

L'échantillonnage des particules en suspension dans l'atmosphère se fait généralement par filtration sur filtres et membranes.

Leur prélèvement comprend en général deux aspects :

- L'analyse pondérale qui permet d'accéder à la masse des particules par unité de volume d'air.
- L'analyse granulométrique en nombre ou en masse qui donnent des informations quant à l'origine des particules et des informations relatives aux risques d'inhalation par les êtres humains.

Quelque 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 [18].

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.

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 bêta 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.

b) Méthode de prélèvement sur filtre ouvert à débit moyen :

Dans ce cas, les prélèvements sont effectués par aspiration de l'air et rétention des particules sur un 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, sont supérieures à celle des fumées noires.

Par cette méthode, les particules collectées sur filtre peuvent faire l'objet de toutes sortes d'analyse au laboratoire.

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 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 30µm. 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 utilisés de nos jours.

IV.1.2 Prélèvement avec coupure granulométrique : Mesure des PM-10

Il s'agit d'un équipement équipé 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 10µm. Il s'agit ici de collecter uniquement les particules en suspension inspirables, c'est à dire, la fraction trachéobronchique et alvéolaire.

L'appareil le plus connu de nos jours et qui est accepté comme référence, est le HVS-PM10 de la firme américaine Andersen. C'est un HVS équipé d'une entrée sélective pour la collecte des particules < 10 µm [43].

En principe, tout appareil destiné à la mesure des TSP peut également être utilisé pour les analyses 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 régulier), 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.

- Méthode par radiométrie bêta :

Cette méthode consiste à mesurer l'atténuation d'un rayonnement bêta constitué d'électrons d'énergie 0,01 et 0,1MeV ayant traversé un filtre chargé de particules (source radioactive C14).

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 [42].

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

- Méthode TEOM :

La méthode Tapered Element Oscillating Microbalance TEOM (microbalance à élément conique oscillant) 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 étude ultérieure des particules.

IV.1.3 Les prélèvements avec fractionnement granulométrique :

Ce sont des méthodes qui permettent une séparation plus fine des particules inspirables. 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 m³/h) et permettent d'avoir deux classes granulométriques : la fraction alvéolaire ($d < 2,5 \mu\text{m}$) et la fraction trachéobronchique ($2,5 < d < 10 \mu\text{m}$).

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 μm , de 1 à 2,5 μm etc.). Ces cascadeurs travaillent à débit fort (30 à 60 m³/h).

L'appareil le plus connu est le HVS-PM10 équipé d'un impacteur d'Andersen. Il est considéré comme référence par l'agence américaine EPA.

Très souvent on se restreint à l'étude de la classe PM-2,5.

Nous résumons dans le tableau N°11 les principales méthodologies de prélèvement utilisées pour l'échantillonnage des particules en suspension [18,44].

Tabl.N°11 : Principales méthodes d'échantillonnage de la matière particulaire en suspension.

Dispositif de prélèvement	Sélection granulométrique	Nombre de fractions	Diamètre de particules (μm)	Débit (m ³ /h)	Durée d'échantillonnage (h)	Principe de la mesure	Analyse ultérieure des particules
Sans tête (fumée noire)	Non	1	0-5	<1	24h	Réfectométrie	Non
Sans tête (TSP)	Non	1	0.1 à 20-30	1.5	24h	Gravimétrie	Oui
HVS (TSP)	Non	1	0.1 à 20-30	66 à 100	24h	Gravimétrie	Oui
HVS-PM10	Oui	1	0-10	66 à 100	24h	Gravimétrie	Oui
Jauge - bêta	Oui	1	0-10	1.5	24h	Radiométrie	Non
HVS-PM10 Impacteur à Cascade	Oui	2 à 7	0-10	34 à 68	24 h	Gravimétrie	Oui
TEOM	Oui	1	0-10	1	5mn-24h	Fréquence de vibration	Non

IV.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 égale à $0,3\mu\text{m}$ et plus.
- Une hygroscopicité faible
- Un taux d'impuretés 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).

IV.2.1 Les filtres à fibre de verre [45]:

Ils ont une efficacité de collection de 99.9% pour les particules de diamètres $0,3\mu\text{m}$. Cette efficacité est mesurée sur les particules d'aérosol du dioctyl-phthalate.

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, l'élément le plus gênant est le zinc qu'on retrouve lors de la minéralisation des filtres à des teneurs élevées. La teneur des filtres **Gelman** type A et **Whatman** GF-A contiennent plus de $50\ \mu\text{g Zn/cm}^2$.

IV.2.2 Les filtres membranes [45]:

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 de $0,8\ \mu\text{m}$. Ces fibres sont plus hygroscopiques 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 μm de diamètre.

IV.3 Analyse des particules en suspension [48]:

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.

- 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 :
 - La chromatographie liquide haute performance (C.L.H.P) équipé d'une détection par émission de fluorescence.
 - Chromatographie en phase gazeuse (C.P.G).

CHAPITRE V

Méthodologie

Dans ce chapitre relatif au protocole expérimental, nous présentons le site étudié, le mode de prélèvement et enfin la méthode d'analyse utilisée dans la caractérisation des échantillons.

V.1 Site de prélèvement:

Pour l'étude des PM-10 en milieu urbain dans l'agglomération d'Alger nous avons, en fonction de l'objectif fixé et des moyens disponibles, opté pour un site de proximité c'est à dire un site qui est plus ou moins fortement influencé par les sources émettrices en l'occurrence le trafic routier.

Le site choisi se situe à l'Ecole Nationale Polytechnique à environ 10Km à l'Est d'Alger.

En ce site, le poste de mesure est implanté sur la terrasse des salles de cours du département de génie chimique à une altitude d'environ 4m par rapport au sol et à quelques 9m perpendiculairement au bord de la RN5. 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 qui est presque quotidiennement balayé par la brise de mer reçoit les émissions du trafic routier de la RN5 qui est estimé à 30.000 véhicules/jours pour les 4 voies dans les deux sens avec un taux important de véhicules lourds (diesel) d'environ 15% [47].

Il n'existe aucune usine industrielle émettrice de particules à proximité de ce site.

V.2 Mode de prélèvement :

Le prélèvement se fait à fort débit avec coupure granulométrique.

L'appareil utilisé est le **HVS-PM-10** que nous illustrons en figure N°6 [48].

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

- Le high volume sampleur (HVS)
- La tête PM-10

Le HVS comprend principalement une turbine d'aspiration d'air, un filtre et porte-filtre de collection des particules et un contrôleur électronique de débit, le MFC (Masse Flow Controller).

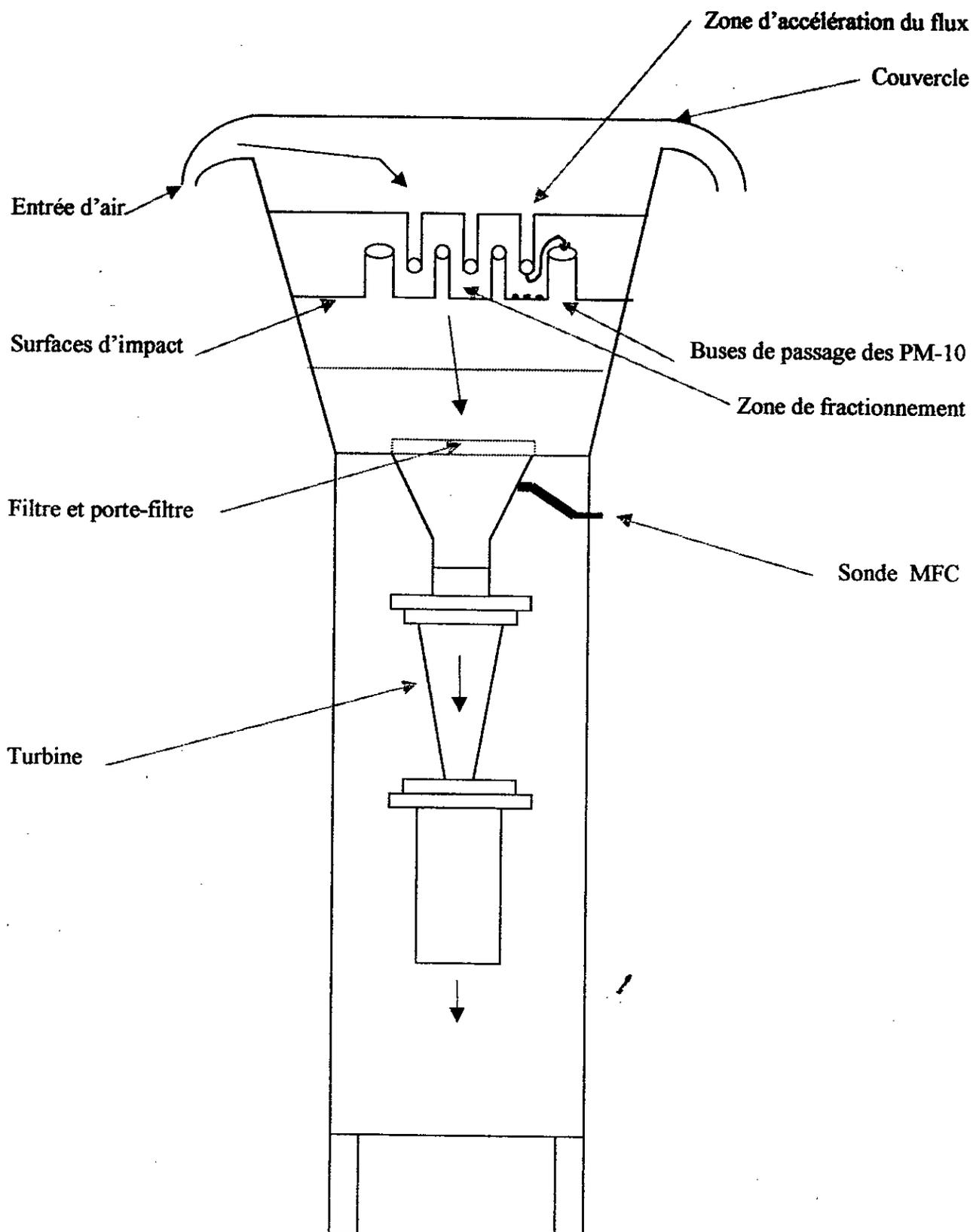


Fig. N°6 : Schéma du principe de collecte des PM-10 par l'échantillonneur HVS PM-10

Durant le prélèvement, le MFC maintient le flux d'air entrant à travers le filtre à un débit constant. Il agit sur la vitesse ou puissance du moteur par ajustage électronique du voltage. De cette façon, une éventuelle réduction du débit par colmatage du média filtrant est automatiquement corrigée.

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 inférieures 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 particules grosses, la surface d'impaction est graissée (huile de silicone) et nettoyée régulièrement.

Les figures N°7 et 8 représentent à titre illustratif respectivement le HVS PM-10 vue de l'extérieur et couvercle ouvert [48].

Le débit d'aspiration est de $1,1 \text{ m}^3/\text{mn}$, 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 $20\text{cm} \times 25\text{cm}$. Pour la détermination de la teneur en PM-10, chaque filtre est pesé avant et après collecte à $0,1\text{mg}$ près. Le résultat est ensuite exprimé en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

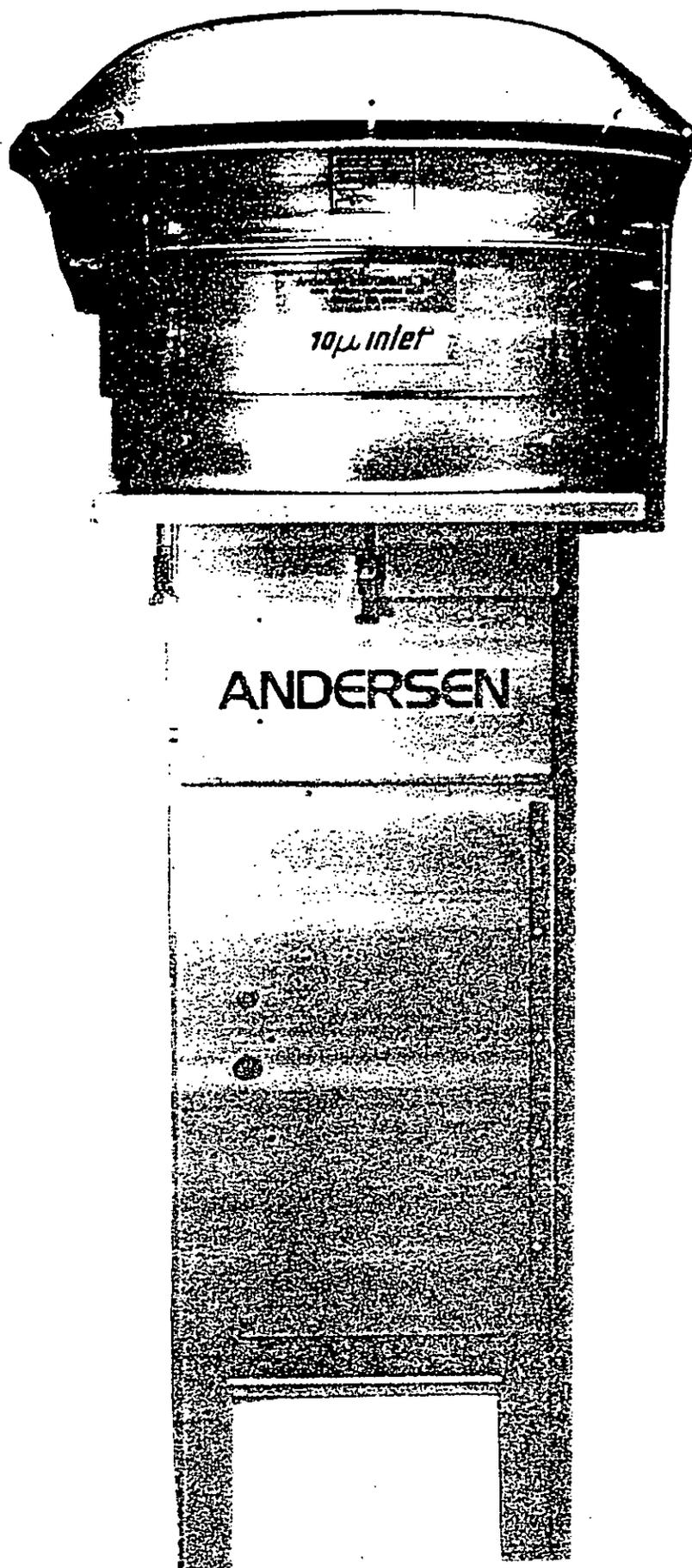


Fig.N°7 : Le HV5 PM-10 vue de l'extérieur.

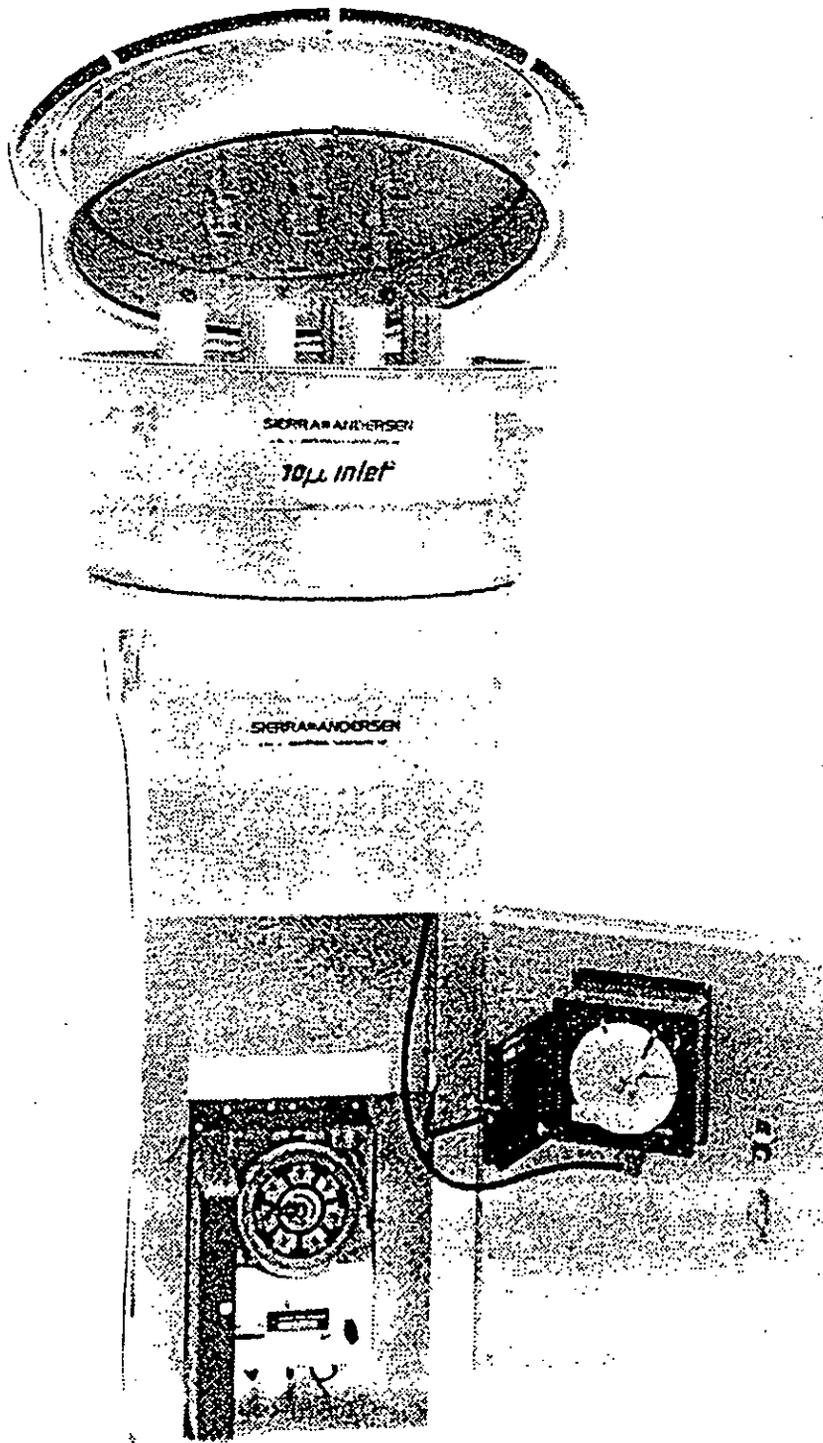


Fig.N°8 : Le HVS PM-10 couvercle ouvert.

V.3 Traitement et analyse élémentaire 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 [49], elle se fait comme suit :

Le filtre chargé de particules est introduit dans un ballon de 250 ml contenant 60 ml d'acide nitrique (1 : 8) et quelques gouttes de HClO_4 .

La solution est portée à ébullition sous reflux pendant 2 heures.

Après évaporation partielle, une seconde minéralisation est effectuée dans les mêmes conditions.

On évapore en suite à sec et après refroidissement. Le résidu est repris dans 30ml d'eau distillée, le minéralisât est ensuite filtré sur filtre Whatman pour retenir les impuretés insolubles (carbone noir, silicates).

Le filtrat est transféré dans une fiole jaugée, puis ajusté avec de l'eau distillée à un volume de 50ml.

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

Les métaux lourds analysés sont ceux qui du point de vue sanitaire ont une incidence importante, il s'agit du Pb, Cu, Ni, Mn, Cr et Cd.

Le dosage est effectué par spectrométrie d'absorption atomique à four électrothermique (Appareil de marque Unicam 939) avec correction Zeeman du bruit de fond. La S.A.A à four est la méthode la plus indiquée pour l'analyse des métaux lourds présents à l'état de trace (elle est 100 fois plus performante que la S.A.A classique).

CHAPITRE VI

*Résultats et
Interprétations*

VI.1 Etude des teneurs en PM-10 :

VI.1.1 Etude des teneurs en PM-10 à l'ENP :

Selon le but fixé, nous avons effectué durant ce travail un suivi journalier des teneurs atmosphériques en PM-10 au niveau de l'ENP en bordure de RN5.

Cette campagne de mesure, qui s'est étalée du 21 Avril 1999 au 28 Mai 1999, nous a permis de collecter 28 échantillons. Les filtres PM-10 sont relevés toutes les 24 heures. Le changement des filtres a lieu généralement le matin vers 8 heures.

Les résultats obtenus sont résumés dans la figure N°9.

Comme dans tout suivi de n'importe quel polluant atmosphérique, on constate dans l'évolution des PM-10 une importante fluctuation temporelle. La teneur minimale en PM-10 s'élève à $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tandis que le maximum atteint environ $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Calculée sur l'ensemble des observations, la teneur moyenne est de $83,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La déviation standard correspondante est de l'ordre de $17,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (tableau N°12).

Le paramètre statistique percentile 95, qui en pollution atmosphérique est souvent important à indiquer, s'élève, ici, à $105 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabl.N°12 : Teneurs moyennes et extrêmes en PM-10 mesuré à Alger (ENP).

Paramètres	PM-10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Maximum	110
Minimum	50
Moyenne	83,2
σ	17,5
P 95	105

Cette large fourchette de variation des teneurs en PM-10 qu'on relève dans ce suivi est due, d'une part aux variations dans l'intensité du trafic routier, et d'autre part aux influences météorologiques.

C'est surtout par vent fort (plus de 3 m/s) qu'on relève les teneurs les plus faibles. C'est le cas, notamment, du 10,11, et 12 Mai, où les conditions météorologiques ont été favorables à une très bonne dispersion des particules. Durant cet épisode, un vent fort soufflait avec de très fréquents changements de direction. En ce qui concerne l'influence des pluies, celle-ci n'a pu être étudiée car, notre campagne de mesure n'a malheureusement pas coïncidé avec des précipitations conséquentes.

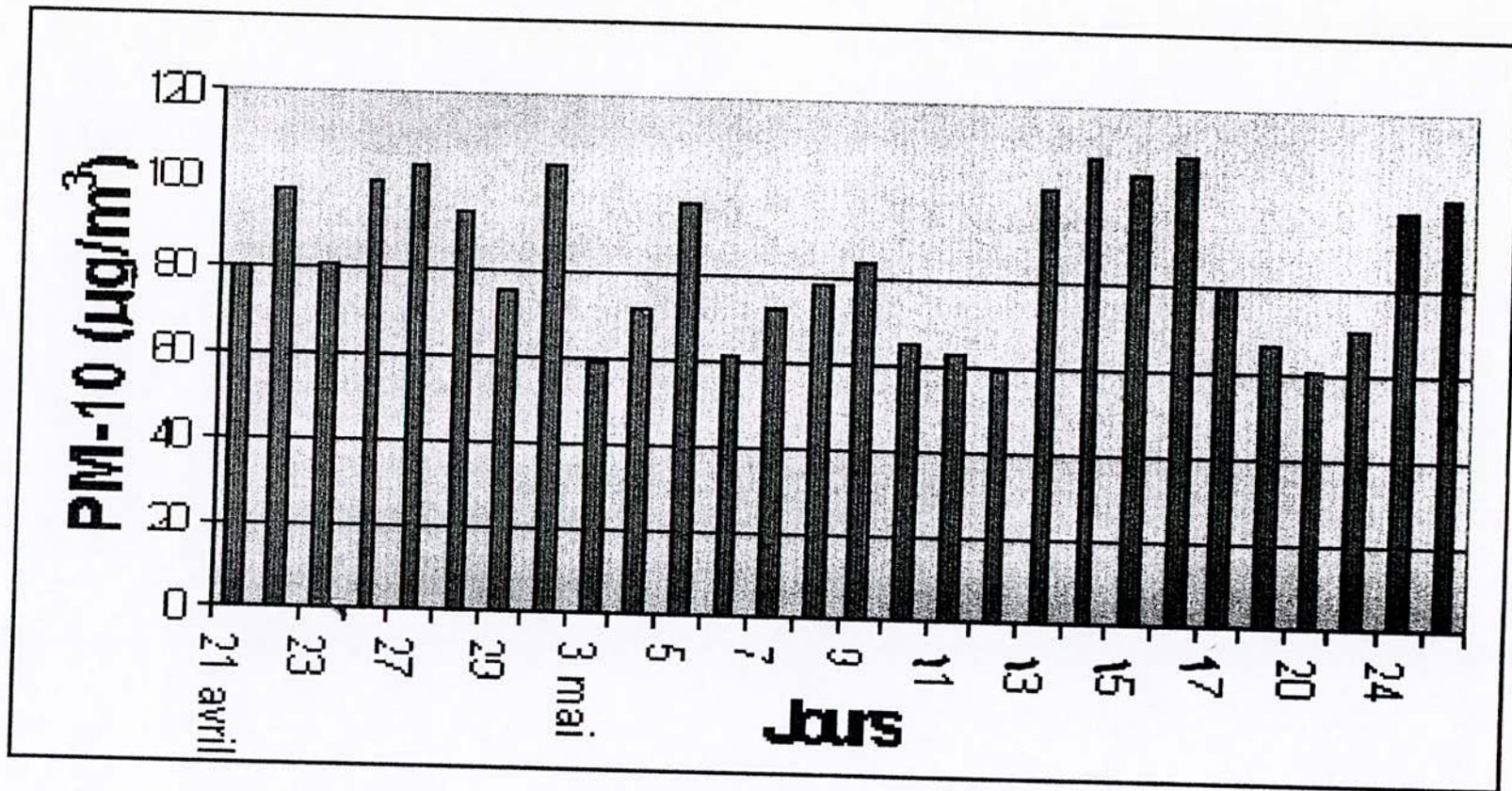


Fig. N°9 : Evolution temporelle des teneurs en PM-10

Cet épisode de vent fort, a été suivi de quelques journées de temps très calme (vent faible) qui favorise la stagnation des polluants, d'où les teneurs les plus élevées mesurées entre le 18 et le 21 Mai.

il est clair que la période de mesure est trop courte pour mettre clairement en évidence l'ensemble des facteurs qui interagissent sur les teneurs des PM-10. En ce qui concerne les jours de week-end et les jours fériés, nous relevons avec une certaine surprise, l'absence de différence palpable entre les teneurs mesurées les journées du jeudi et vendredi, et celles des jours ouvrables de la semaine. Ceci peut-être dû au fait que le nombre d'observations (8 teneurs pour les week-end seulement) est relativement faible pour en déduire des associations statistiques significatives. Par ailleurs et comme la durée de prélèvement est de 24 heures, il peut y avoir l'effet de compensation des creux et des pointes de l'intensité du trafic routier. Pour le vendredi, par exemple, en matinée le trafic routier est faible, mais il prend beaucoup plus d'ampleur en fin d'après-midi avec le retour des familles sur Alger. Enfin et s'agissant des particules fines, issues majoritairement du trafic routier, celles-ci séjournent longtemps dans l'atmosphère. On constate, en effet, que dans tous les prélèvements effectués, les couches de particules collectées sur le média filtrant sont de couleur noire, couleur caractéristique des fumées noires et des suies dégagées par les gaz d'échappement par suite de combustion incomplète. Des études antérieures ont montrées que les particules en suspension, prélevées en site non influencé par le trafic routier, sont soit marrons (site de Badjarah), soit grises (site cimenterie de Rais-Hamidou) [50].

Il est aussi important de signaler, que le résultat obtenu sur les teneurs des PM-10 durant le week-end, rejoint celui de l'étude des TSP effectuée l'année passée au même site, où l'on constatait déjà que les teneurs en TSP les plus faibles ne correspondaient pas toujours à un jour de week-end [51].

Si on compare les teneurs moyennes en PM-10 et celles en TSP mesurées une année auparavant au même site et à la même saison, on constate que le niveau de pollution par les PM-10 est légèrement plus élevé que celui des TSP. En général, c'est l'effet inverse qui se produit : lorsque des mesures simultanées sont effectuées, les PM-10 sont plus faibles et constituent une fraction d'environ 70 à 80% des TSP [22].

Dans notre cas, la valeur élevée du rapport PM-10 / TSP peut-être expliquée, soit par une pollution plus élevée durant notre campagne de mesure, soit par une sous-estimation des niveaux des TSP mesurés l'année précédente. Cette sous-estimation résulterait, éventuellement, du faible débit de prélèvements ou du colmatages des filtres. Pour avoir une réelle et juste comparaison, il serait nécessaire d'effectuer des prélèvements simultanés sur HVS-PM 10 pour les particules fines, et sur HVS pour les TSP.

VI.1.2 Ampleur de la pollution : étude comparative

Afin d'estimer l'ampleur de la pollution par la fraction thoracique à Alger, il est nécessaire de comparer les niveaux mesurés aux normes et valeurs-guides internationales réglementant cette forme de pollution, et aux teneurs mesurées un peu partout dans le monde.

A cet effet, nous résumons dans le tableau suivant, les normes et les valeurs-guides d'immission des PM-10 en vigueur ou en projet, dans certains pays.

Tabl.N° 13 : valeurs limites pour les PM-10

Pays	Valeur Limite ($\mu\text{g} / \text{m}^3$)		Références
Etats-Unis	150	P 99 des moyennes des 24 heures	[52]
	50	moyenne annuelle	
Californie	50	moyenne sur 24 heures (en révision)	[22]
	51	moyenne annuelle (en révision)	
Japon	200	moyenne sur 1 heure	[22]
	100	moyenne annuelle	
Suède	100	P98 des moyennes sur 24 heures	[22]
Union Européenne	150 ¹⁾	seuil journalier maximum	[53]
	50*	à ne pas dépasser plus de 25 fois par an	
	30*	moyenne annuelle	
Suisse	50*	moyenne sur 24 heures à dépasser une seule fois par an	[22]
	20*	moyenne annuelle	
OMS	Pas de normes, mais des relations doses-réponses		[31]

1) Normes portant sur les PM-13.

* Propositions futures non encore officialisées.

On remarque, à partir de ce tableau, que la prise de conscience sur le danger des PM-10 est assez récente, et que les anciennes normes régissant les TSP ou les fumées noires sont en voie de révision, pour être remplacées par celles des PM-10. Plusieurs normes sont actuellement 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 sur la santé. Aussi, l'OMS prévoit de publier, très prochainement, des relations du type dose-réponse qui donne le risque encouru par une personne exposée une vie entière à une teneur déterminée de PM-10.

Si l'on compare les niveaux mesurés à Alger, on constate que par rapport aux normes U.S, les teneurs à court terme ne sont pas dépassées, mais la moyenne annuelle risque fortement d'être dépasser. Par rapport aux futures normes européennes, il est quasi certain qu'à Alger elles seront constamment dépassées. Globalement, on peut dire qu'au niveau des sites de proximité, Alger fait l'objet d'une pollution excessive par les PM-10.

Une comparaison entre les teneurs en PM-10 mesurées à Alger et celles relevées dans certaines villes de plus au moins grandes envergures, 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.

Tabl.N°14 : Teneurs en PM-10 mesurées dans quelques villes.

Villes	Moyenne Annuelle $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Teneurs max. $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Année	Remarques	Références
Paris :					
- Champs de mars	39	117	1995	Sites urbains	[25]
- Creteil	28	133			
Zurick	28		1993	Site urbain	[22]
Berlin	97			Site urbain	[22]
Edmonton (Canada)	27	86	1996	Site urbain	[54]
Arnheim (Pays-bas)	74,5	99	1996	Site de proximité (mesures sur 3 mois)	[55]
Prague	105	198,7	1996	Site de proximité-intersection (mesuré sur 5 mois)	[56]
Mexico	96,4		1990	Teneur relative au PM-2,5. Site de proximité (mesures sur 2 mois)	[57]
Barcelone	49,8	118	1996	Site urbain	[58]
Alger	83,2	109 ↗	1999	Site de proximité (mesures sur 1 mois)	Présente étude

VI.2 Etude des métaux lourds associés au PM-10 :

L'étude des métaux lourds Pb, Cd, Ni, Cu, Mn et Cr contenus dans les PM-10 a porté sur une vingtaine d'échantillons.

Nous présentons en figures N°10 à 21, l'évolution temporelle des teneurs des différents éléments étudiés ainsi que leur fraction massique correspondante c'est à dire leur teneurs en pourcentage de masse dans les particules collectés.

Le tableau N°15 et la figure N°22 résument les teneurs moyennes calculées sur l'ensemble des échantillons étudiés. Les fractions massiques moyennes correspondants sont présentées en tableau N°16 et illustrées graphiquement en figure N°23.

Tout comme le cas des teneurs en PM-10 observe pour l'ensemble des éléments une variation temporelle assez importante.

Parmi les métaux lourds, le plomb est de loin le composé majoritaire. Il varie de 100~~mg~~^{ng} à 480 ng/m³.

La teneurs moyenne est de l'ordre de 291 ng/m³.

Les autres métaux lourds ne dépassent en moyenne pas quelques ng/m³.

En moyenne le plomb contribue à 0,37% de la masse totale des particules collectées. Il est intéressant ici de noter qu'une forte teneurs en PM-10 ne signifie pas toujours une forte pollution par le plomb.

C'est ainsi qu'on a par exemple :

Jours	PM-10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Pb (ng/m^3)
Dimanche 16-05-99 :	109,9	250
Mardi 27-04-99 :	103,8	320
Samedi 22-05-99 :	69,6	480

Cette distribution irrégulière entre les teneurs en PM-10 et les teneurs en plomb est due au fait que dans les PM-10 on retrouve les suies issues des émissions diesel qui ne contiennent pas de plomb.

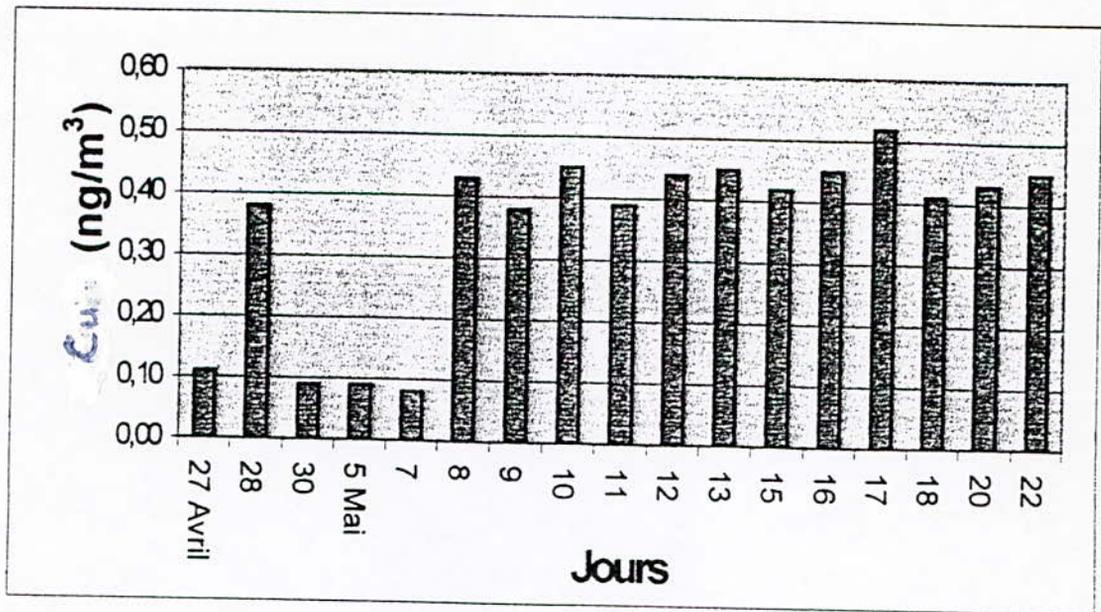


Fig. N°10 : Teneurs atmosphériques en Cu (ng/m³).

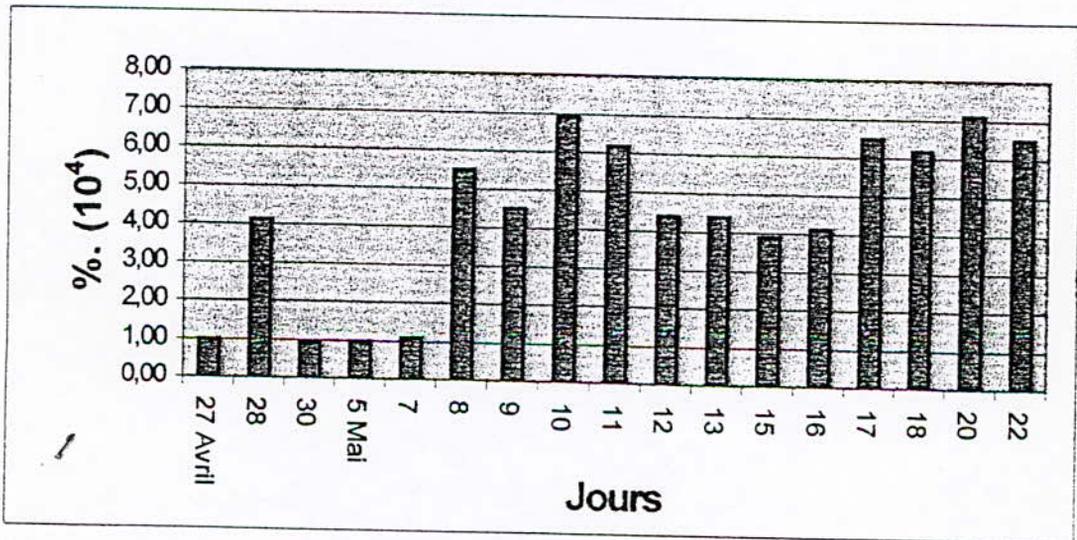


Fig. N°11 : fractions massiques du Cu contenues dans les PM-10

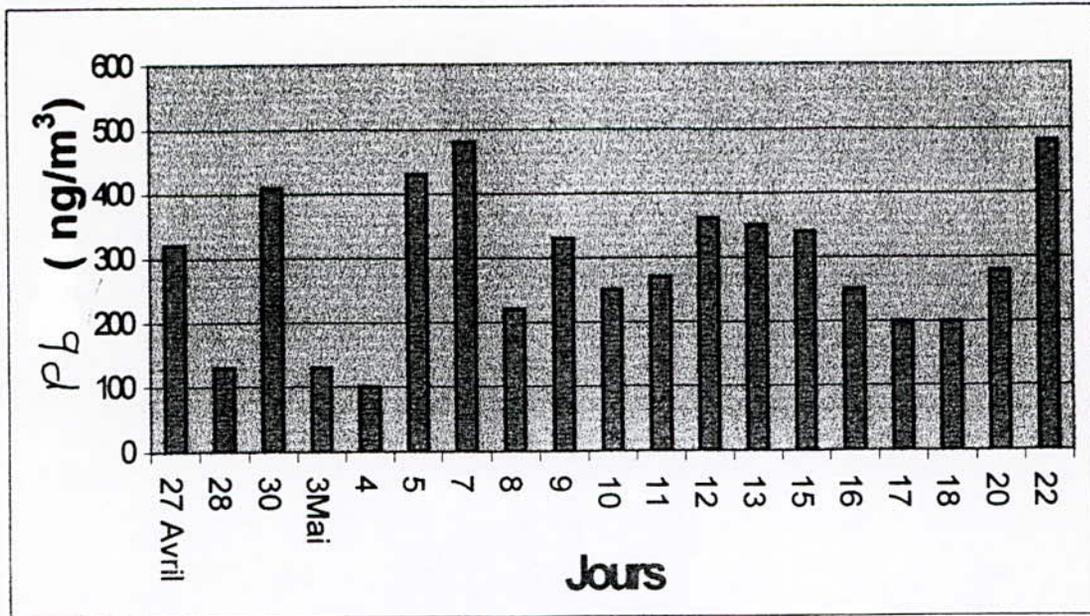


Fig N°12 : Teneurs atmosphériques du Pb (ng/m³)

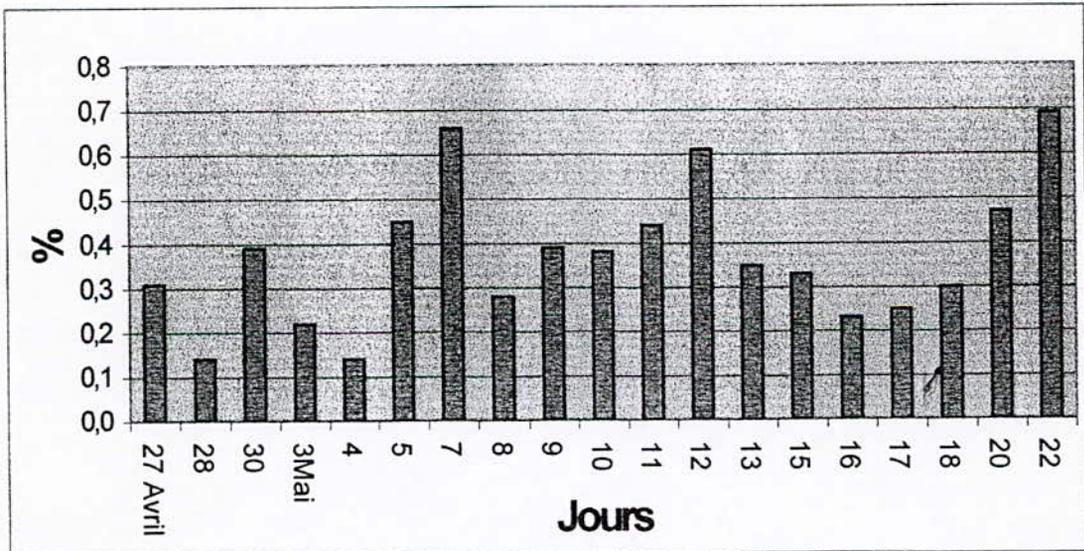


Fig. N°13 : Fractions massiques du Pb contenues dans les (PM-10)

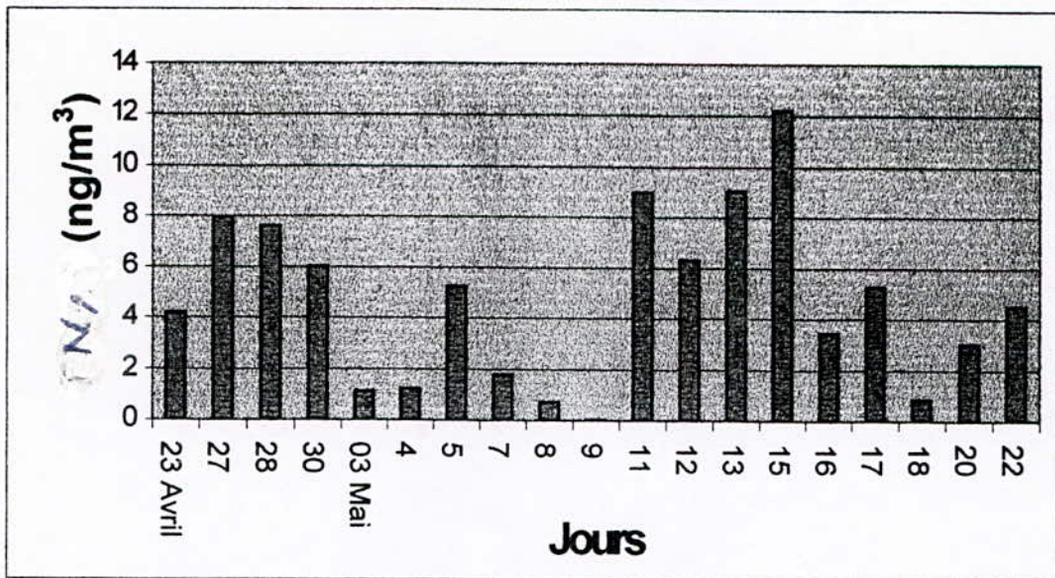


Fig. N°14 : Teneurs atmosphériques du Ni (ng/m³)

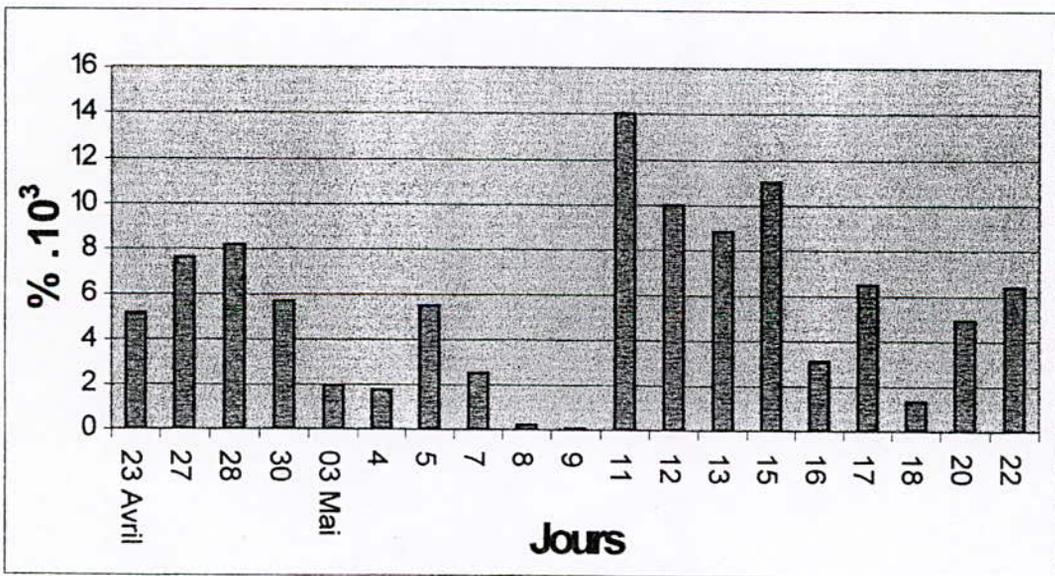


Fig. N°15 : Fractions massiques du Ni contenues dans les PM-10

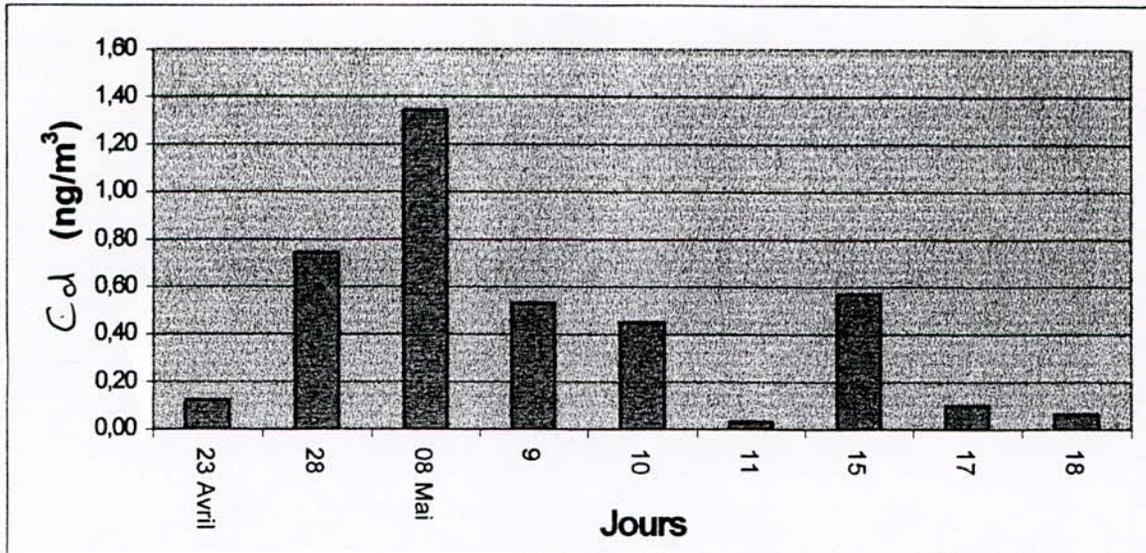


Fig. N°16 : Teneurs atmosphériques du Cd (ng/m³)

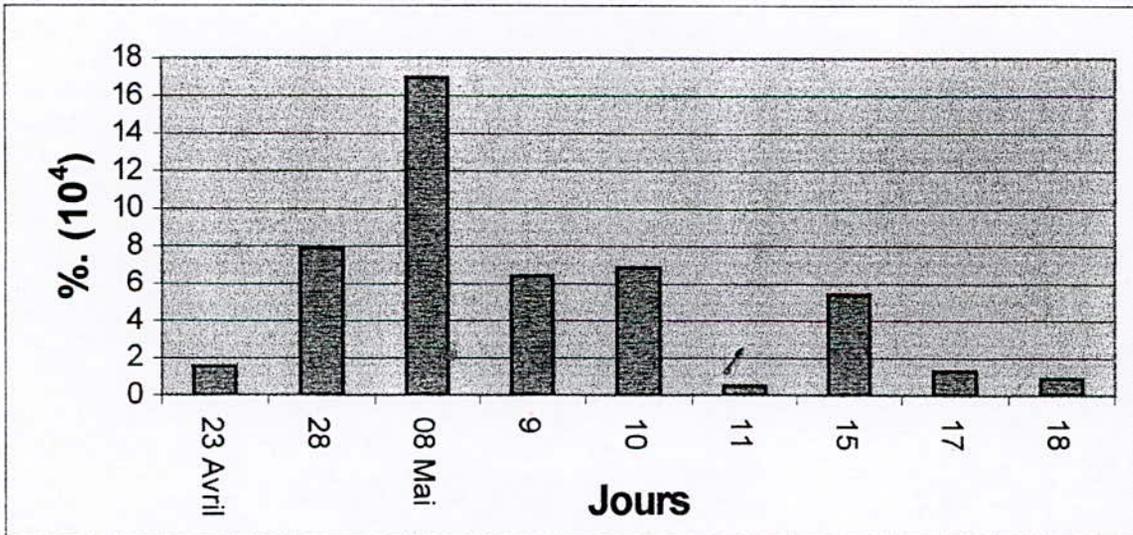


Fig. N°17 : Fractions massiques du Cd contenues dans les PM-10

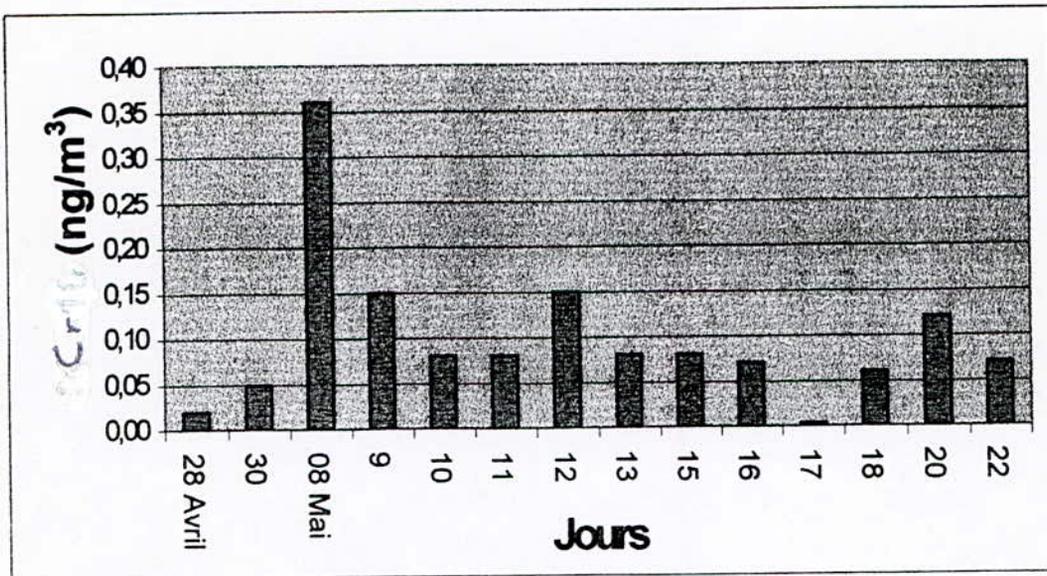


Fig. N°18 : Teneurs atmosphériques du Cr (ng/m³)

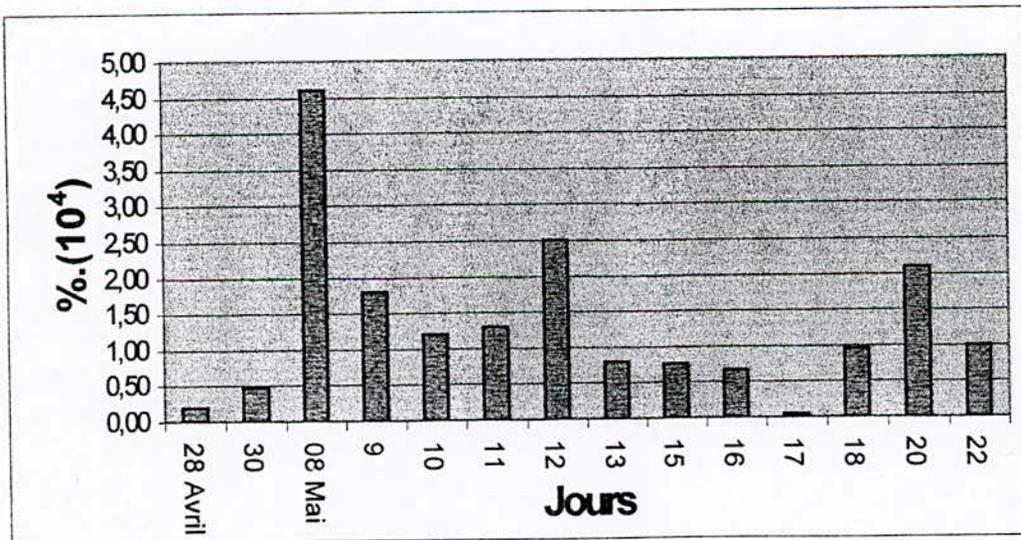


Fig. N°19 : Fractions massiques du Cr contenues dans les PM-10

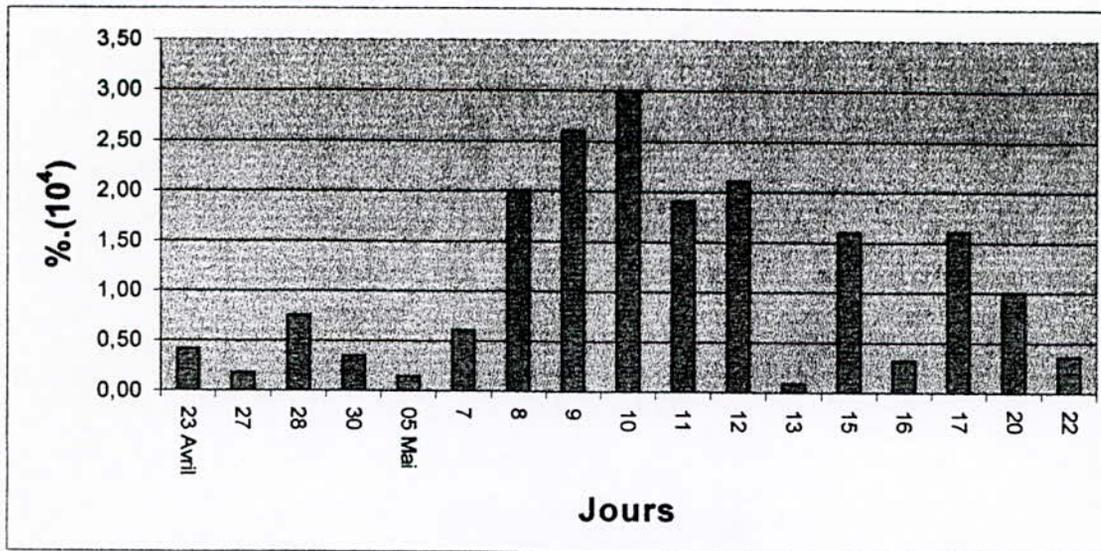


Fig. N°20 : Teneur atmosphériques du Mn (ng/m3)

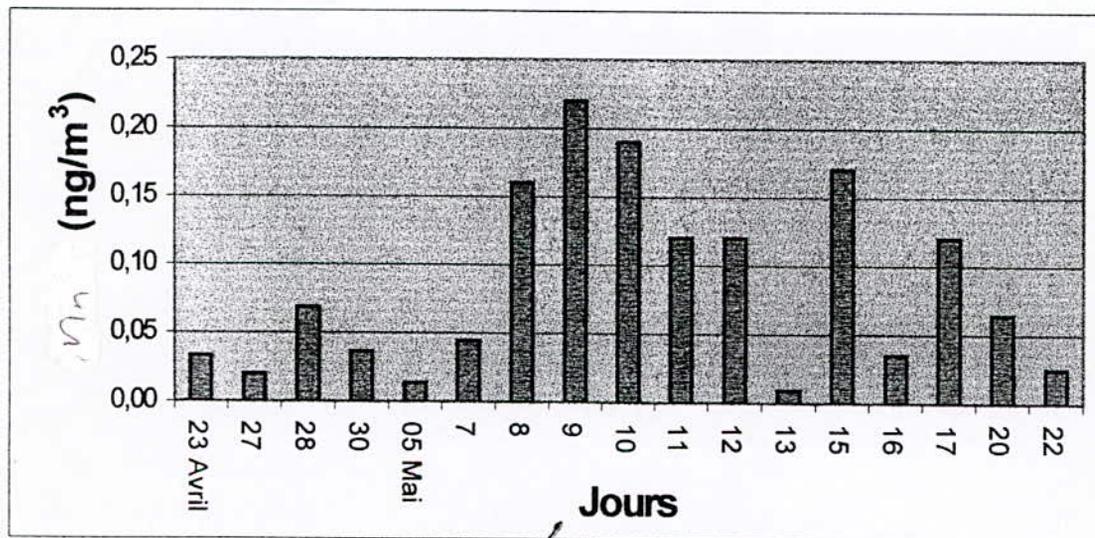


Fig. N°21 : Fractions massiques du Mn contenues dans les PM-10

Tabl. N°15 : Teneurs moyennes des éléments associés aux PM-10 mesurées à l'ENP.

Eléments	Teneurs moyennes en ng/m^3	Ecart type en ng/m^3	Nbre d'observations
Cu	0,35	0,15	17
Ni	4,68	3	19
Pb	291	113	20
Cd	0,43	0,42	9
Cr	0,097	0,086	14
Mn	0,08	0,068	17

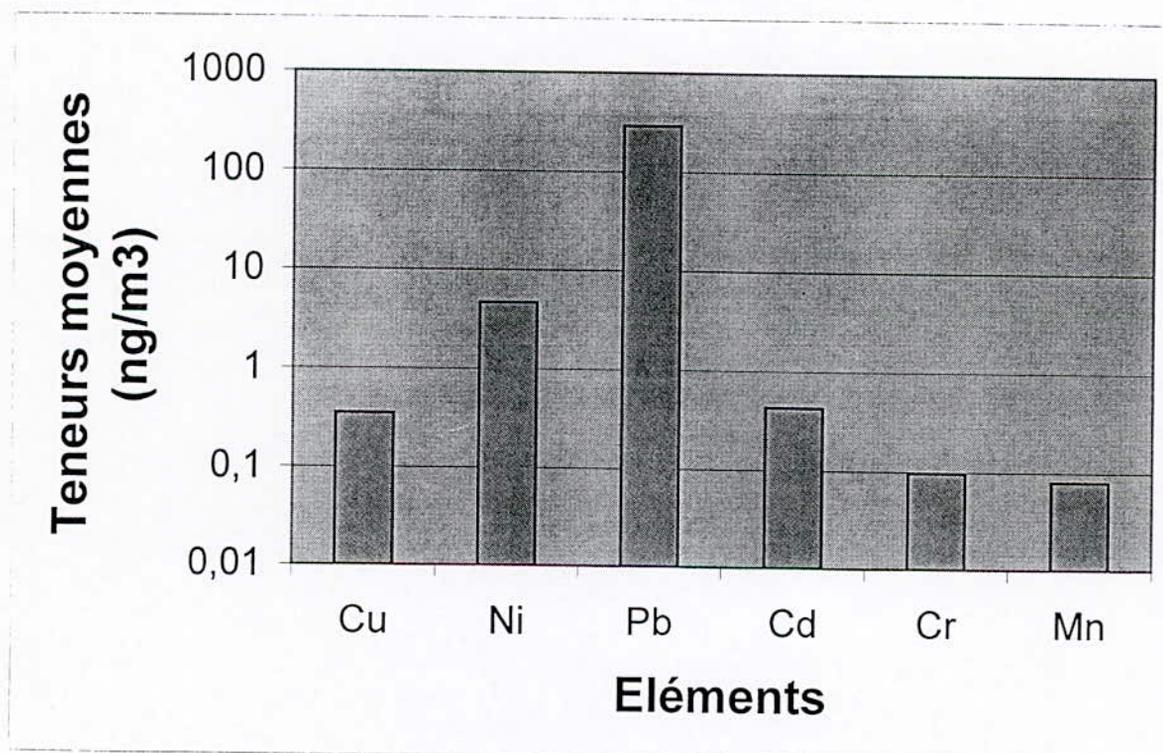


Fig. N°22 : Teneurs moyennes des éléments associés au PM-10 mesurées à l'ENP.

Tabl. N°16 : Fractions massiques moyennes des éléments mesurés.

Eléments	Fraction massique moyenne en %	Ecart type en %	Nbre d'observations
Cu	0,000458	0,000207	17
Ni	0,005	0,004	19
Pb	0,37	0,16	20
Cd	0,00053	0,00052	9
Cr	0,00013	0,000117	14
Mn	0,00011	0,000094	17

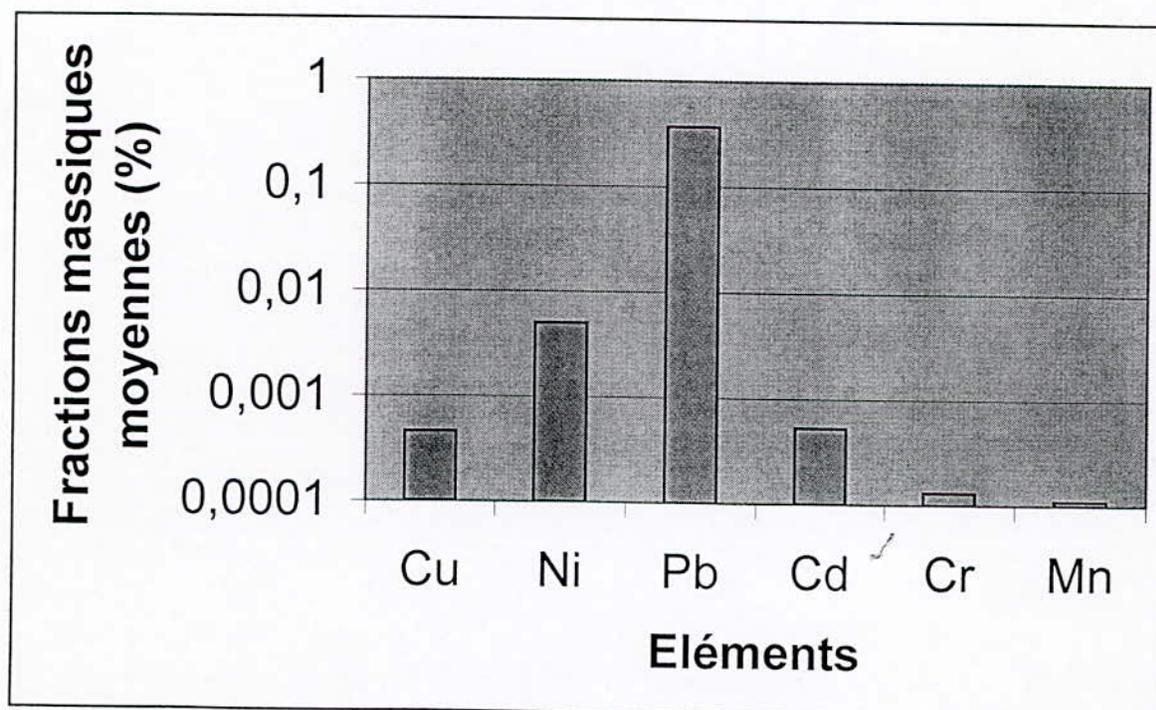


Fig. N°23 : Fractions massiques moyennes des éléments mesurés.

Dans le cas du site étudié, on constate qu'il est exposé à une assez dense fréquentation de poids lourds et bus de transport en commun qui transitent par la RN5 entre le centre ville et la région Est de l'agglomération, le site reçoit naturellement aussi les émissions provenant de l'autoroute de l'Est ainsi que des quantités variable de particules naturelles ne contenant pas de plomb.

Globalement la pollution par le plomb au site ENP est du même ordre de grandeur que celle relevée l'année passée durant la même saison [51]. Il ne s'agit pas d'une pollution qui est très excessive, elle reste en général inférieure à la norme OMS (0,5-1,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de Pb) et même à la nouvelle proposition du seuil limite européen de 0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (ce seuil était, rappelons-le, de 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Il est clair qu'en centre-ville où la ventilation naturelle est plus réduite qu'au site ENP, il faut s'attendre à une plus forte pollution par le plomb.

En ce qui concerne les autres métaux lourds réglementés, Cd (norme OMS : 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Mn (norme OMS : 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et non réglementés Cr, Ni et Cu, les résultats obtenus montrent que ces aérocontaminants présents tous à l'état de traces ne constituent apparemment pas une menace sérieuse pour les citoyens exposés.

Le cadmium qui est un toxique cumulatif, ne dépasse pas les teneurs de 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et dans certains échantillons il est soit à la limite de détection ($\cong 0,01\mu\text{g}/\text{m}^3$) soit non décelable.

La comparaison avec les teneurs en métaux lourds mesurés dans d'autres villes (tableau N°17) confirme aussi la relative faible pollution par les métaux lourds à Alger.

Tabl.N°17 : Comparaison des teneurs en métaux lourds dans certaines grandes villes.

Villes <i>métaux lourds</i>	Prague[56]	Paris[59]	Khartoum [60]	Barcelone [58]	Alger (ENP)
Pb ng/m ³	132	162	47	340	291
Cd ng/m ³	1,76	2,2	-	-	0,43
Mn ng/m ³	36,2	22	91	-	0,08
Ni ng/m ³	7,8	12,8	6,1	-	4,68
Cu ng/m ³	55,7	31	6,9	-	0,35
Cr ng/m ³	6,7	-	-	-	0,097

Ainsi, globalement, ce n'est que la pollution par le plomb qui peut susciter des inquiétudes, car devant une motorisation croissante cette forme de pollution ne peut que s'amplifier.

Bien que l'essence sans plomb a fait dernièrement une timide apparition sur le marché algérien, cette mesure ne sert à rien car la quasi-totalité du parc automobile national n'est pas équipé de pots catalytiques.

CHAPITRE VII

Conclusion

Conclusion

Au cours de cette étude nous avons mesuré, pour la première fois en Algérie, les niveaux de pollution de l'air ambiant par les particules fines, les PM-10.

En site de proximité de type urbain, la teneur moyenne calculée sur une campagne de mesure de plus d'un mois s'élève à environ $84 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ce taux de pollution est assez élevé, et malgré la courte période d'étude, il donne une idée sur la tendance annuelle. La norme annuelle de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ la moins sévère sera, sans aucun doute, dépassée.

La couleur des particules recueillies indique qu'il s'agit d'une pollution issue, majoritairement, de la mauvaise combustion dans les véhicules à essence et diesel (fumées noires).

La caractérisation des PM-10 et l'analyse quantitative des métaux lourds, Pb, Mn, Ni, Cr, Cd et Cu, montre qu'à l'exception du plomb la pollution par les toxiques associés au PM-10, n'atteint pas un niveau inquiétant.

La pollution plombifère accuse, par contre, des niveaux qui sont certes en deçà des normes, mais qui suscitent quand même des inquiétudes pour le futur car, devant un trafic routier qui s'intensifie de plus en plus, il faut s'attendre à une aggravation de cette pollution et ce à un moment où, un peu partout dans le monde, les teneurs diminuent de plus en plus et la pollution par le plomb ne constitue plus une préoccupation.

Aussi une amélioration graduelle de la pollution de l'air, issue du trafic routier, peut-être atteinte par certaines mesures, sérieuses et soutenues, sans pour autant être drastiques ou trop coûteuses pour l'économie du pays.

Nous en recommanderons les points suivants :

- Instaurer, effectivement, le contrôle technique et la maintenance des véhicules (mesures des gaz d'échappement et réglages des carburateurs) pour améliorer la combustion. Cette mesure qui devait être généralisée dès le début de 1999 n'a pas encore vu le jour.
- Exiger que les véhicules nouvellement importés soient équipés d'un catalyseur à trois (03) voies. En 1998, plus de 20.000 véhicules (Daewoo, Hyundai, Peugeot) importés, ne possédaient pas de pot catalytique. En Europe, depuis 1993, tout véhicule neuf doit être obligatoirement muni d'un catalyseur. Une telle mesure devait être suivie par une meilleure offre de l'essence sans plomb.

- Améliorer la fluidité du trafic car, au ralenti, la combustion est incomplète et, de ce fait, les véhicules émettent plus de polluants.
- Encourager plus la bicarburation essence - GPL. On peut, par exemple, en équiper certaines flottes qui roulent énormément en milieu urbain : les taxis, les véhicules administratifs, les véhicules des PTT, etc....
- Tendre vers une meilleure gestion des modes de transport : transférer, par exemple, le transport des marchandises vers le rail.

→ Parallèlement à ces mesures, il y a lieu d'inventorier les sources industrielles émettrices de particules, et de les équiper de système de dépollution.

Enfin et à l'instar de ce qui se passe dans la majorité des grands centres urbains, le Gouvernement d'Alger est appelé à installer et gérer un réseau ou, tout au moins, une station de mesure des polluants atmosphériques, et d'en informer le public sur la qualité de l'air que nous respirons.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J.P. Detrie, «La pollution atmosphérique », Ed.Dunod, Paris, 1969.
- [2] M.Barnea, P.Ursu, «Pollution et d'écologie protection de l'atmosphère », Ed.Eyrolles, Paris, 1974.
- [3] F.Ramade, «Elément d'écologie, action de l'homme sur la biosphère », M.C. Graw Hill, Paris, 1982.
- [4] J.D. Butler, «Air pollution chemistry », Académie press, London, 1979.
- [5] C. Dang, T.P. Fontelle et R. Leygonie, «Les émissions de poussières et généralités sur leur mesure à l'émission ». Pollution atmosphérique, Janvier Mars, 1990, pp 38-46.
- [6] R. Leygonie, «Les métaux lourds dans l'air : sources, émission, mesures, effets ». Pollution atmosphérique, Juillet-Septembre 1993, pp 63-74.
- [7] M. Boughedaoui, R. Kerbachi, «La pollution particulaire à Raïs-Hamidou, ampleur et dispersion » Ajour, Volume 10, série D.N°1, 1994, pp 149-168.
- [8] P.H. Brumer, «Approche globale des problèmes d'environnement liés à l'incinération d'ordures ménagères ». Pollution atmosphérique, Juillet-Septembre 1988, pp 301-308.
- [9] J. Martin, L.Y.Mayster, «Santé et pollution de l'air », Presses polytechniques Romandes, Suisse, 1988.
- [10] R. Kerbachi, «Cours de pollution atmosphérique, 5^{ème} année », ENP, Alger, 1998.
- [11] P. Degobert, «Pollution atmosphérique, origine et réduction des émissions au niveau du moteur ». Techniques de l'ingénieur, B2710.5, 1994, pp 1-16.
- [12] R. Kerbachi, «Cours de pollution atmosphérique de post graduation », ENP, Alger, 1999.
- [13] R. Joumard, «Quels polluants ? Contribution des transports ». Pollution atmosphérique, 121, 1989, pp 5-8.

- [14] M. Chiron, P. Quenel, D. Zmivau, «La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique ». Pollution atmosphérique, Janvier-Mars 1997, pp 41-52.
- [15] J.Y. Reult, «Pollution particulaire de l'air », Chaud-Froid-Plombrie (CFP) n°464, pp 155-163.
- [16] Akkleitz, O. Boulaud, «Granulométrie des particules en mouvement et des aérosols » ; Techniques d'ingénieurs. R.2360. Juillet 1995, pp 1-26.
- [17] Hinds W.C, «Aerosol technology », Wiley Interscience, Londres, 1982.
- [18] F. Petit. Courieux, A. Person, Y.LE. Moullec, «Connaissance atmosphérique, Janvier-Mars, 1990, pp 21-30.
- [19] G. Madelaine, «Métrologie des aérosols ». Pollution atmosphérique, Janvier-Septembre, pp 277-283.
- [20] A. Renoux, «Les aérosols de notre environnement ». Pollution atmosphérique, Janvier-Septembre 1988, pp 10-20.
- [21] L. Herrebaut, J. Beguin, «Mesure des pollutions particulaires et gazeuses ». Nuisance et environnement, Mai 1976, pp 24-28.
- [22] «Cahier de l'environnement, publication de l'office fédéral de l'environnement, des forêts e du paysage (OFE FP) n° 270, 1996, Berne Suisse.
- [23] J.C. Ronneau, «Les particules atmosphériques », conférence donnée à l'ENP, Alger, 1992.
- [24] A.C. Stern, «Air pollution ». 3^{ème} édition, Volume 1, London, 1976.
- [25] «La qualité de l'air en France en 1995-96 », agence de l'environnement et de la maitrise de l'énergie (ADEME), Editions ADEME, Paris, 1998.
- [26] D. Brochard, J.C Paireon, J. Bignon, «Aérosol et santé : Déposition et épuration des particules inhalées ». Pollution atmosphérique, Avril-Juin 1999, pp 178-182.
- [27] Dockery D. W, Schwartz J, Spengler J. D «Air pollution and daily mortality : Associations with particulates and acid aerosols », Environ Res,

- 59, 1992, pp 362-373.
- [28] Pop et al, «Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of US-adults », *AM J. Respir Crit Care* ;151, 1995, pp 669-674.
- [29] Schuartz et al, «Total suspended particulate matter and daily mortality in Cincinnati, Ohio », *Environ Health Perspect* ; 102/2, 1994, pp 589-598.
- [30] Dockery et al, «Acute respiratory effects of particulate air pollution », *Annu Rev Publ Helth* ; 15, 1994, pp 107-132.
- [31] «OMS :Update and revision of air quality guidelines for Europe », WHO regional publications, European, Serien, Copenhagen, 1997.
- [32] Dockery et al, «An association between pollution and mortality in six U.S. Cities », *N. Engl J.Med* ; 329/24, 1993, pp 107-132.
- [34] Ackermann-Liebrich. U et al, «Effects of long term exposure to air pollution on lung function », *SAPALDIA Study. Am. J. Respir Crit Care Med* ; 149/4, : A663, 1994.
- [35] Zemp. E et al, «Long term ambient air pollution and chronic respiratory symptoms », *SAPALDIA-Study, Am. J. Respir Crit Care Med* ; 149/4 : A662, 1994.
- [36] Braun-Fahrlander C. et al «Respiratory symptoms and exposure to long term air pollution and climate in Swiss schoolchildren », *Am J Respir Crit Care Med* ; (accepté pour publication), 1996.
- [37] Dockery D. W et al, «Effects of inhaled particles on respiratory health of children. *Am Rev Respir Dis*, 1989, pp 138 : 587-594.
- [38] Société française de santé publique, «La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique », collection santé et société n°4, Paris, 1996.
- [39] Snee.R.D, S. P, Bailey, W. H. Feller et C.G. Pfeiffer, «Variation on the relationship between blood lead and air lead », *Atm. Env.*, Juin, 1985, pp 1017-1020.
- [40] A.Colombo, «The under defined nature of the blood lead and air lead relationship from biological and statistical grounds », *Atm. Env.*, Septembre, pp 1485, 1493 ;1985.

- [41] A. Viala, F. Gouezd, «Action sur la santé de l'homme des métaux lourds (Bp, Cd, V, Hs) on suspension aérienne aux faibles concentration ».
- [42] C. Elichegaray, «Aérosols et visibilité, aérosols et climat ». Pollution atmosphérique. Janvier-Mars 1990. PP-07-09.
- [43] R. Shaw, «La pollution par les particules atmosphérique ». Pour la science, Octobre 1987 , PP.22-31.
- [44] W. H. Shreoder, M. Dobsou, D. M. Kaen, N. D. Johnson, «Toxic trace elements associated will air borne particule mater ». A. review.
- [45] K. O. I kawa, «Trace analysis atmospheric ». Edition John Wiley of Sons,London,1977.
- [46] H. Achtiouane, «Etude des particules on suspension en milieu urbain », PFE,ENP 1996.
- [47] Communication personnelle, «Comptage DTP », Alger, 1998. ✓
- [48] Documentation de la firme Anderson.
- [49] Norme ISO 9855, «Air ambient, dosage du Plomb dans les particules d'aérosols collectées sur des filtres ». France 1993.
- [50] S. Nessah, «Contribution à études des TSP dans le grand Alger » P.F.E ENP 1995.
- [51] A. Boukadoum, «Etude des particules en suspension dans le grand Alger », P.F.E, ENP 1996.
- [52] US- EPA, «National ambient air quality standards (NAAQS) for particulate matter », Federal register vol.62 ,N°138,1997.
- [53] Commission Européenne, «Législation règlementaire ». Pollution atmosphérique, Janvier-Mars 1998 , pp. 13-16.
- [54] L. CHENG et al. «Characteristics of inhable particulate matter in Alberta cities », Atm. Env., vol .32, N°22, pp. 3835- 3844, 1998.

- [55] A. M. Janssen et al., «Mass concentration and elemental composition of air borne particulate matter at street and background locations », *Atm. Env.*, vol. 31, N°8, pp 1185-1193, 1997.
- [56] J. Hovorka and M. Donkelaar, «Elemental composition and stable lead isotope ratios of wintertime PM-10 aerosols in prague-centre cross-roads », 8th international symposium transport and air pollution, 31 Mai-2 Juin 1999, Graz, Autriche.
- [57] E. Vega, 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.
- [58] La contaminació atmosfèrica a Barcelona, «Rapport annuel de ajuntament de Barcelone », Direction des services de surveillance de l'air ambiant, Avril 1997.
- [59] A. Person et al. «Contribution des principales sources en métaux et métalloïdes à la pollution particulaire dans l'agglomération parisienne », *Pool. Atm.* , N° 139, pp. 75-88, 1993.
- [60] M. H. El-Tayeb et al, «Source and composition of aerosols from Khartoum, Sudan, », *Atm. Env.* vol. 976, N°1, pp. 67-76, 1993.