

1/96

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
BIBLIOTHEQUE - المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE DE L'ENVIRONNEMENT

## PROJET DE FIN D'ETUDES

### SUJET

ETUDE DES PARTICULES  
EN SUSPENSION  
EN MILIEU URBAIN

Proposé par :

étudié par :

dirigé par :

Pr. R. KERBACHI

Mr. H. ACHTIOUANE

Pr. R. KERBACHI

PROMOTION

JUIN 1996

E.N.P. 10, Avenue Hassen Badi -EL-HARRACH - ALGER

*Dédicaces*

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique



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

*A ma mère.*

*A mon père.*

*A mes frères et sœurs.*

*A mon neveu : Moumouh.*

*A mes nièces : Ghanou, Faiza, Souad, et  
Hanane.*

*A et à tous mes amis (es).*

*Hamid*

## Remerciements



*Je remercie Monsieur R.KERBACHI pour tous ses conseils et son aide.*

*Je remercie également Yacine, Mohamed et RABIE pour leur assistance.*

*Comme je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce travail.*

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

*Je remercie également tous ceux qui ont contribué à ma formation.*

## TABLE DES MATIERES

### - INTRODUCTION

### I- PRINCIPALES SOURCES D'EMISSION DES PARTICULES.

#### I.1- Les Particules d'Origine Naturelle.

- a- l'érosion éolienne.
- b- Les éruptions volcaniques.
- c- Les embruns et sels marins.
- d- Les particules d'origine extra-terrestre.

#### I.2- Les Sources Anthropogéniques.

##### 1- Les industries.

- a- L'industrie thermoénergétique.
- b- L'industrie sidérurgique.
- c- La métallurgie des métaux non-ferreux.
- d- L'industrie des matériaux de construction.
- e- L'industrie chimique.

##### 2- Les moyens de transport.

##### 3- L'incinération des déchets.

### II- PROPRIETES DES PARTICULES EN SUSPENSION.

#### II-1- Dimensions des Particules.

#### II-2- Classement Granulométrique des Particules en Suspension.

#### II-3- Durée de Vie des Particules Atmosphériques.

#### II-4- Dynamique des particules.

### III- EFFETS DES PARTICULES EN SUSPENSION.

#### III-1- Effets sur l'Etre Humain.

#### III-2- Effets sur les Végétaux.

#### III-3- Effets sur les Animaux.

#### III-4- Effets sur les Matériaux.

#### III-5- Autres Effets.

#### IV- MESURE DES PARTICULES EN SUSPENSION DANS L'ATMOSPHERE.

IV-1- Echantillonnage.

IV-1-1- Les prélèvements sans coupure spécifique.

IV-1-2- Prélèvement avec coupure granulométrique

IV-1-3- Prélèvement avec fractionnement granulométrique.

IV-2- Mesure de la teneur en T.S.P.

IV-3- Estimation des teneurs des principaux constituants.

IV-4- Nature physico-chimiques des couches de filtration.

#### V- METHODOLOGIE.

V-1- Sites de Prélèvement.

V-2- Mode de Prélèvement.

V-3- Analyse des Echantillons.

#### VI- RESULTATS ET INTERPRETATION

VI-1- Les Particules Totales en Suspension.

VI-1-1- Les T.S.P à Alger-Centre.

VI-1-2- Les T.S.P à Cinq-Maisons (E.N.P)

VI-2- Etude des Métaux lourds associés aux T.S.P

VI-2-1- Teneurs atmosphériques en métaux lourds.

VI-2-2- Ampleur de la pollution métallique et comparaison avec les  
teneurs observées dans d'autres métropoles.

#### - CONCLUSION

## INTRODUCTION

La pollution de l'air par les particules existait déjà depuis, ou même avant l'apparition de la vie humaine, du fait du déplacement des poussières et de grains de pollen par les vents et les tempêtes océaniques, des émanations et des éruptions volcaniques,...etc.

Avec l'utilisation domestique du feu est apparue la pollution due à la fumée, qui a produit certaines perturbations, incommodités et même des intoxications telles que rencontrées encore de nos jours.

L'utilisation industrielle du feu à l'époque du fer et du bronze a ajouté aux impuretés de l'air produites par la combustion, celles provenant de la fusion et du raffinage des métaux.

L'intensification de l'utilisation du charbon qui a commencé au moyen âge, a conduit à une aggravation de la pollution de l'air.

La révolution industrielle du 19ème siècle a donné naissance à de plus graves problèmes de pollution atmosphérique par les particules, qui ne font que s'aggraver actuellement avec l'introduction de nouvelles sources telles que les moyens de transport dont le trafic routier est l'une des sources majeures de particules dans les milieux urbains.

Les industries diverses et les usines d'incinération de déchets sont aussi des sources importantes de particules dans l'air.

Les particules émises sont souvent très fines et séjournent longtemps dans l'atmosphère. Leur impact biologique dépend de leur granulométrie; les particules de diamètres inférieurs à  $10\ \mu\text{m}$  sont les plus nuisibles, car elles pénètrent profondément dans l'arbre trachéobronchique de l'être humain.

Ces particules sont par ailleurs chargées en éléments toxiques, tels les métaux lourds (Pb, Cd, Ni, ...etc.) et les hydrocarbures aromatiques polycycliques.

Elles sont susceptibles de porter préjudice à la santé humaine, au climat, à la végétation, aux animaux, ...

C'est ce qui a poussé les autorités concernées de plusieurs pays industrialisés à installer des réseaux de surveillance des teneurs atmosphériques en particules, et des éléments toxiques qui leur sont associés.

Notre pays, et à l'image de tous les pays en voie de développement, se trouve confronté au problème croissant de la pollution atmosphérique.  
La pollution particulaire y contribue considérablement.

Devant le manque de données relatives à cette forme de pollution atmosphérique, nous nous proposons dans ce travail d'évaluer l'ampleur de la pollution par les particules totales en suspension (TSP) en milieu urbain et périurbain.

Parallèlement nous essayerons de déterminer dans quelle mesure ces particules véhiculent certains métaux lourds. Dans ce contexte, une attention particulière sera accordée au plomb qui est un des métaux lourds les plus incriminés dans la pollution atmosphérique.

# **PREMIER CHAPITRE**

## **LES PRINCIPALES SOURCES D'EMISSION DES PARTICULES EN SUSPENSION DANS L'ATMOSPHERE**



# I. LES PRINCIPALES SOURCES D'EMISSION DES PARTICULES EN SUSPENSION DANS L'ATMOSPHERE

Les sources d'émission des particules dans l'air sont extrêmement nombreuses et selon leur origine, elles peuvent être réparties en deux grandes parties :

- Les Particules produites par des Phénomènes Naturels.
- Les Particules résultantes de l'activité Humaine, ou Les Particules Anthropogéniques.

## I.1. LES PARTICULES D'ORIGINE NATURELLE :

Les Particules qui sont présentes dans l'atmosphère sont dues généralement à divers phénomènes naturels. Les plus importants sont :

### a) L'Erosion Eolienne :

C'est l'action du vent sur la couche superficielle du sol. Les vents détruisent 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.

L'Erosion Eolienne s'accroît sur les sols désertiques et à faible couvert végétal ou dans les zones à climat sec et / ou à longue saison sèche.

Une grande partie des particules présentes dans l'atmosphère provient des tempêtes de sable dans les zones désertiques.

A titre d'exemple, une tempête de sable qui a eu lieu les 9-12 Mars 1901, a transportée d'Afrique vers l'Europe environ deux millions de tonnes de particules solides, sous forme de poussières, et celle de Février 1903, 7 millions de tonnes de poussières.[1]

***b) Les Eruptions Volcaniques :***

Elles représentent une importante source de particules dans l'air, ainsi que de gaz sulfureux (SO<sub>2</sub>) qui, par la suite, donne des particules de sulfates dans l'atmosphère. [2]

Ces particules peuvent atteindre des altitudes de plusieurs kilomètres, et sous l'action du vent, elles peuvent être transportées à des distances très éloignées de leur site d'émission

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 ( USA ) s'est accompagnée de l'émission de près de 3 Milliards de tonnes de particules, dont une partie non négligeable à atteint la stratosphère. [2]

***c) Les Embruns et Sels Marins :***

Les Tempêtes Océaniques entraînent des Embruns dans l'air, les aérosols marins ainsi constitués donnent après évaporation, des particules salines composées principalement de : NaCl, MgCl<sub>2</sub>, CaCl<sub>2</sub>, et KBr. [3]

Les régions les plus touchées sont naturellement les zones côtières. Le vent peut cependant transporter les embruns à de grandes distances à l'intérieur des terres.

***d) Les Particules d'origine extra-terrestre :***

Se sont 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 : Sodium, Magnesium, Aluminium, Silicium, Potassium, Calcium, Titane, Chrome, Fer, Cobalt, et Nickel. [3]

D'après la Station Spaciale de la N.A.S.A, 10 milles tonnes de particules solides d'origine extra-terrestre pénètrent quotidiennement dans l'atmosphère terrestre.[3]

D'autres particules sont émises par les végétaux, tel que les grains de pollen émis par une grande diversité de plantes qui ont atteint leur plein développement.

Les Feux spontanés de forêts, qui sont principalement causés par la foudre, participent aussi à l'émission de particules dans l'air.

Nous résumons dans le tableau N°01, les sources et les taux d'émission des particules d'origine naturelle. [4]

**TABLEAU 01 : Production des particules d'origine Naturelle. [4]**

| SOURCE D'EMISSION                           | QUANTITE EMISE<br>(Mégatonnes / An) | POURCENTAGE<br>DU TOTAL |
|---|-------------------------------------|-------------------------|
| • Aérosol Marin                             | 908                                 | 43,32                   |
| • Nitrate (issus du NO et NO <sub>2</sub> ) | 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                    |
| <b>TOTAL</b>                                | <b>2096</b>                         | <b>100</b>              |

## **I. 2 .LES SOURCES ANTHROPOGENIQUES :**

Les Catégories les plus importantes des sources de particules en suspension dans l'air sont représentées surtout par les Industries, les moyens de transport, les Cimenteries, et l'incinération des déchets:

### **1). Les Industries :**

La plupart 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.

Par ordre d'importance décroissant. les industries responsables de l'émission de particules dans l'atmosphère sont :

#### **1.a) L'Industrie Thermoénergétique :**

Elle est basée essentiellement sur la Combustion.

La combustion 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 NOx et SO<sub>2</sub>. [2]

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 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]

### **1.b) 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 poussières, dont la plus grande partie est émise par les Hauts - Fourneaux. [1]

### **1.c) La Métallurgie des Métaux Non Ferreux :**

De fait que les métaux non ferreux se trouvent dans les minerais sous forme de composés, en concentration relativement réduites, leur raffinages nécessitent 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, Etain,...etc. [1]

### **1.d) 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 .[1]

Ainsi, pour obtenir une tonne de Ciment, il faut environ 1,6 tonnes de matières premières.

Dans la ville de RAIS-HAMIDOU, où est implanté une petite Cimenterie, on a mesuré des teneurs en T.S.P (particules totales en suspension) supérieures à  $0,5 \text{ mg} / \text{m}^3$ , les retombées atmosphériques s'élèvent en moyenne à  $60 \text{g} / \text{m}^2 / \text{mois}$ . [7]

### **1.e) L'Industrie Chimique :**

L'Industrie Chimique ne représente pas une source importante de particules solides dans l'atmosphère, mais elle contribue d'une 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 Cadmium et certains hydrocarbures aromatiques polycycliques. [3]

### **2). Les moyens de transport :**

La plupart des moyens de transport Routiers, Maritimes ou Aériens participent à l'émission d'importantes quantités de particules dans l'air.

La nature et la quantité des particules émises est différente suivant le type de carburants utilisés ainsi que le moyen de transport considéré. Dans les milieux urbains, le trafic routier constitue la principale source.

Les véhicules à essence, surtout ceux utilisant une essence plombée sont à l'origine de l'émission d'importantes quantités de métaux lourds dont le Plomb constitue la principale composante. Ajouter au carburant comme antidétonant sous forme de tétra-éthyle de plomb à raison de 0,4 à  $0,15 \text{g} / \text{l}$ , il est rejeté dans sa presque totalité dans l'atmosphère des villes. [8]

Une voiture normale utilisant une essence à 0,15g / l de plomb peut émettre 100 à 150 mg / km de particules dont la masse en Plomb peut dépasser les 25%. [9]

Les véhicules Diesel et, en proportion moindre, les véhicules à essence émettent des particules de carbones nommées suies ou "fumées noires" qui sont dues à la combustion incomplète.

Ces suies véhiculent à l'état adsorbées des espèces organiques diverses (fraction organique soluble) tels que les Hydrocarbures aromatiques polycycliques qui sont cancérigènes. [9]

### 3) Incinération des déchets:

D'importantes quantités de produits déjà utilisés (boîtes 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 d'importantes quantités de métaux tel que : Fer, Zinc, Cadmium, Plomb, Mercure, Aluminium, Calcium, Sodium, ...etc, et d'oxydes métalliques divers dont l'importance toxicologique de certains métaux émis est considérable. [10]

A toutes ces sources de pollution par les particules, il faut ajouter celles provenant de la conversion dans l'atmosphère par divers mécanismes de polluants gazeux en particules, c'est surtout le cas des sulfates issues de SO<sub>2</sub> et nitrates issues de NO<sub>x</sub>.

L'émission des particules anthropiques s'élève globalement à 269.10<sup>9</sup> kg / an , soit environ 12% de la quantité des particules d'origine naturelle. [4]

On estime, comme indiqué au tableau N°02, que l'émission directe des particules anthropiques ne contribue qu'au 1/3 du taux global, les 2/3 restant sont issus de la conversion gaz-particules. [4]

**TABLEAU 02 : Taux d'émission de particules anthropiques. [4]**

| <b>SOURCE D'EMISSION</b>   | <b>QUANTITES EMISES (Kg / An)</b> |
|--|-----------------------------------|
| Emissions sous forme de particules<br>Particules formées des gaz polluants | 84.10 <sup>9</sup>                |
| • Sulfate à partir de SO <sub>2</sub>                                      | 133.10 <sup>9</sup>               |
| • Nitrates à partir des Nox  | 27.10 <sup>9</sup>                |
| • Particules photochimiques issues<br>des hydrocarbures                    | 25.10 <sup>9</sup>                |
| <b>TOTAL</b>   | <b>269.10<sup>9</sup></b>         |

Le tableau 03 illustre les taux d'émission des particules solides en France en milliers de tonnes par an, selon les principales sources pour l'année 1988. [5]

Par ailleurs, le tableau N°04, résume l'ampleur des émissions mondiales de certains métaux lourds selon la source émettrice (source naturelle et source anthropique). [6]

Le tableau montre entre autre que le chrome issu des émissions naturelles dépasse le chrome anthropique. Par ailleurs, on remarque que l'ampleur du Ni et V qui sont les traceurs de la combustion du fuel et la quasi totalité du Plomb issu du trafic routier.



**TABLEAU 03 : Intensités des émissions de particules en France pour l'année 1988, en milliers de tonnes / an. [5]**

| SOURCES  | QUANTITES EMISES<br>EN (Milliers de<br>Tonnes/An) | %             |
|--|---|---------------|
| Combustion Fixes.  | 73  | 26,2          |
| Procédés Industriels (Sidérurgie, Fabrication des Matériaux de Construction, Métallurgie des Métaux non Ferreux, Fabrication des Engrais, ...etc). | 132   | 47,3          |
| Sources Mobiles (Véhicules Routiers, Bateaux, Avions, Trains...)   | 74  | 26,5          |
| <b>TOTAL</b>   | <b>279</b>  | <b>100,00</b> |

**TABLEAU 04 : 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 Electriques.                       | 4.495  | 2.015  | 5.348  | 2.713   | 4.418   |
| - Industrie et Chauffage Domestiques.          | 6.780  | 2.990  | 8.415  | 5.445   | 6.683   |
| * Combustion du Fuel.                          | 1.408  | 1.959  | 27.065 | 2.419   | 2.159   |
| - Centrales Electriques                        | 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 Emissions Anthropiques               | 30.777 | 38.189 | 55.642 | 331.851 | 131.866 |
| Total des Emissions Naturelles                 | 44.000 | 28.000 | 30.000 | 12.000  | 45.000  |

**DEUXIEME CHAPITRE**

**PROPRIETES DES PARTICULES EN  
SUSPENSION**

## II. PROPRIETES DES PARTICULES EN SUSPENSION :

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

### II.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°01 donne la taille moyenne de certaines particules présentes dans l'atmosphère, selon leur nature. [11]

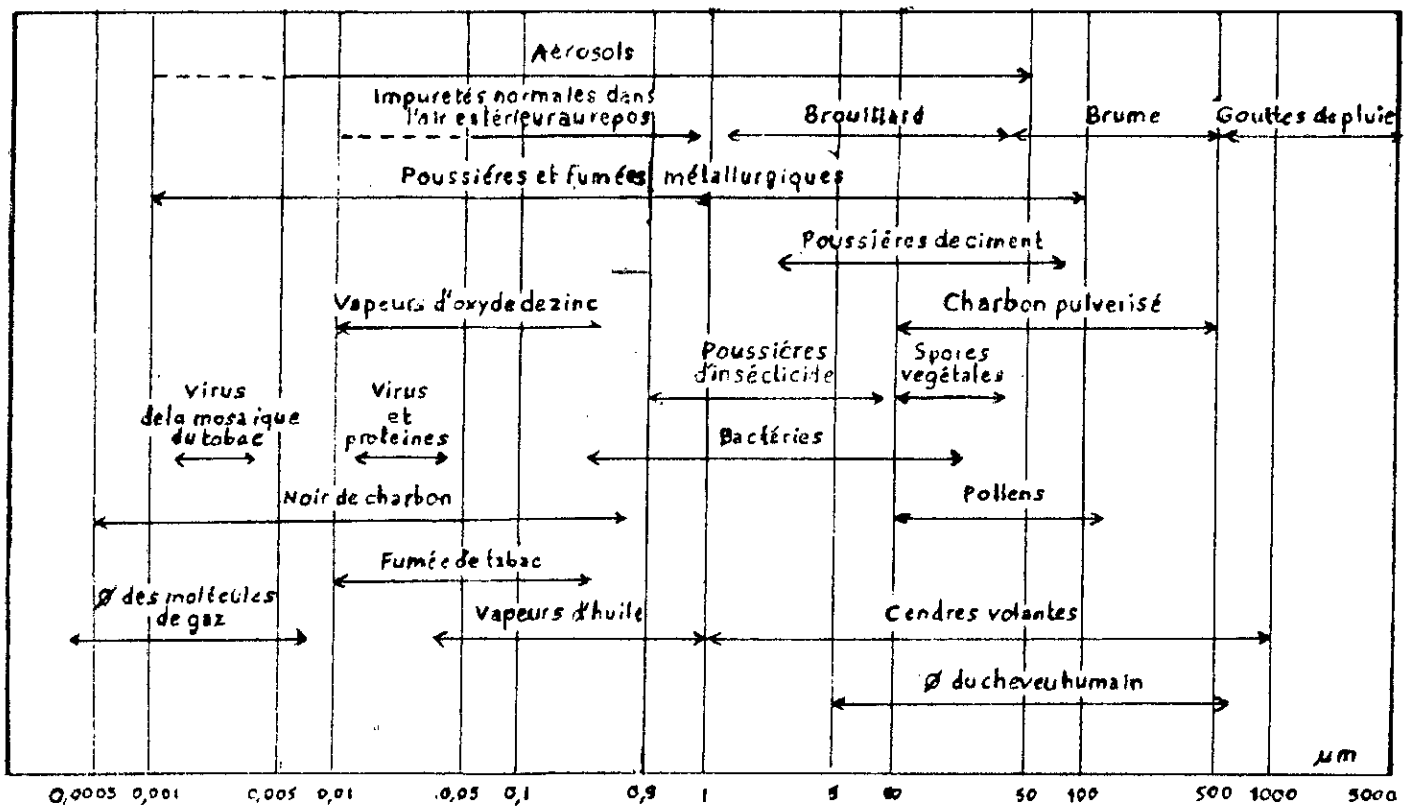


Figure N°01 : Taille moyenne de certaines particules en  $\mu\text{m}$  .

La présence dans l'air de particules de formes irrégulières, dont les dimensions sont difficiles à apprécier, a imposé la nécessité de définir la notion de la particule sphérique équivalente, soit en valeur, soit en comportement aérodynamique.

Une particule irrégulière est généralement caractérisée par l'un des trois diamètres équivalents suivants : [12]

• **Le diamètre de la sphère de volume équivalent "D<sub>e</sub>" :**

"D<sub>e</sub>" est définie par :

$$D_e = \left[ \frac{6m}{\pi \delta} \right]^{\frac{1}{3}}$$

δ et m représentent respectivement, la densité et la masse de matériau qui constitue la particule irrégulière.

• **Le Diamètre de Stocks "D<sub>s</sub>" :**

C'est le diamètre de la sphère de même densité et de même vitesse limite de chute que la particule considérée.

• **Le Diamètre Aérodynamique équivalent "D<sub>a e</sub>" :**

C'est le diamètre de la sphère de densité 1 ayant la même vitesse de chute que la sphère considérée.

Le tableau suivant donne à titre d'exemple, le diamètre équivalent et la vitesse limite de chute ainsi que la densité pour une particule irrégulière de densité δ<sub>p</sub> = 4 gr/cm<sup>3</sup> et de vitesse limite de chute égale à : V<sub>ts</sub>=0,22cm/s . [12]

| Particule irrégulière               | Particules équivalentes             |                                     |                                     |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
|                                     | V <sub>ts</sub> >0,22cm/s           | V <sub>ts</sub> =0,22cm/s           | V <sub>ts</sub> =0,22cm/s           |
| δ <sub>p</sub> =4gr/cm <sup>3</sup> | δ <sub>p</sub> =4gr/cm <sup>3</sup> | δ <sub>p</sub> =4gr/cm <sup>3</sup> | δ <sub>0</sub> =1gr/cm <sup>3</sup> |
|                                     | De=5μm                              | Ds=4,3μm                            | Dac=8,6μm                           |

En général, on caractérise une particule par son diamètre aérodynamique équivalent.

## II. 2 . CLASSEMENT GRANULOMETRIQUE DES PARTICULES EN SUSPENSION :

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. On distingue ainsi:

### a). Les grosses particules sédimentables :

Elles ont une taille supérieure à  $10\mu\text{m}$  et on les trouve généralement en concentrations élevées près de leur sources d'émission.

Elles prédominent dans la basse couche de l'atmosphère (moins de 300m) et sédimentent rapidement.[11]

Elles sont formées mécaniquement par effritement et dispersion de substances naturelles.[13]

### b). Les particules semi-fines :

Leur taille varie entre  $10$  et  $2,5\mu\text{m}$  et ont généralement les mêmes origines que les grosses particules.

Elles peuvent atteindre des altitudes plus élevées et sont plus facile 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 aériennes. [2]

### c). Les particules très fines :

Représentent toutes les particules dont la taille varie entre  $2,5$  et  $0,1\mu\text{m}$ , cette dernière dimension représente la limite inférieur au-delà de laquelle la sédimentation n'est plus possible à cause du mouvement brownien dont 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. [11, 2, 14]

## II . 3 DUREE DE VIE DES PARTICULES ATMOSPHERIQUES [15]

Le temps de séjour  $T_s$  d'une particule en suspension dans l'air est fonction de sa dimension, une particule de rayon ( $\mu\text{m}$ ) à un temps de séjour donné par la relation :

$$\frac{1}{T_{(s)}} = \frac{1}{C} \left[ \frac{r}{R} \right]^2 + \frac{1}{C} \left[ \frac{r}{R} \right]^{-2} + \frac{1}{T_{\text{wet}}}$$

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

$C$  est une constante  $C = 1,28 \cdot 10^8 \cdot \text{s}$

$T_{\text{wet}} = 6,91 \cdot 10^5 \text{s}$  est le temps de séjour correspondant aux disparitions humides.

Dans la basse atmosphère, le temps de séjour le plus long (une dizaine de jours) est celui des particules de  $0,1\mu\text{m}$ .

Les particules supérieures à  $10\mu\text{m}$  et celles dont les dimensions sont comprises entre  $10^{-3}$  et  $10^{-4} \mu\text{m}$  ont des temps de séjours les plus courts (quelques minutes à quelques heures). Par contre, dans la stratosphère la durée de vie d'une particule peut atteindre plusieurs années.

La répartition dans l'air des particules en suspension suivant leur dimension est représentée par la figure N°02. [4]

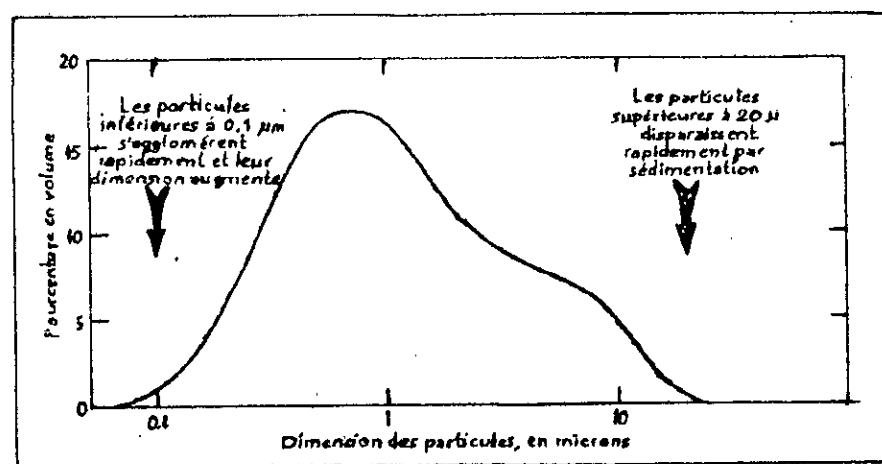


Figure N°02 : Répartition des particules en suspension dans l'air. [4]

D'après la figure N°02, On dira que les particules les plus fines ( $\varnothing < 0,1 \mu\text{m}$ ) se condensent ou s'agglomérant pour enrichir les fractions de diamètre supérieur, tandis que les particules les plus grosses ( $\varnothing > 10 \mu\text{m}$ ) 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 10 $\mu\text{m}$ .

## II . 4 .DYNAMIQUE DES PARTICULES :

Une particule dans l'air est, en général, soumise aux forces suivantes : [16]

- 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 leur caractéristiques physiques (diamètre, poids,...) et aussi, des conditions météorologiques de 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 sur la vitesse de chute des particules, surtout pour les fines particules.

On donne ci-dessous (tableau N°05).quelques valeurs de la vitesse de sédimentation pour des particules sphériques de masse volumique 1gr/cm<sup>3</sup> dans l'air à 20°C. [3]



**TABLEAU 05 : Vitesse de sédimentation de quelques particules sphériques.**

| DIAMETRE ( $\mu\text{m}$ ) | VITESSE DE SEDIMENTATION (cm/s) |
|----------------------------|---------------------------------|
| 200                        | 120                             |
| 100                        | 30                              |
| 50                         | 7                               |
| 10                         | 0,3                             |
| 5                          | 0,07                            |
| 1                          | 0,003                           |
| 0,5                        | 0,0007                          |

**a) Cas Des Particules de  $\varnothing > 1\mu\text{m}$  : [17]**

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

$$F = 3 \cdot \mu \cdot \pi \cdot v \cdot d$$

Avec :  $\mu$  : Viscosité dynamique ( dynes.S/cm<sup>2</sup> 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 et peut être estimée par la loi de Stocks :

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

F de gravité - poussée d'Archimède = force de viscosité.

$$(\delta_p - \delta_{\text{air}}) \frac{4}{3} \pi \left[ \frac{d_p}{2} \right]^3 \cdot g = 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot v \cdot d_p$$

$\delta_{\text{air}}$  est négligeable devant  $\delta_p$

$$v = \frac{\delta_p \cdot g}{18 \cdot \mu} d_p^2$$

**b) Cas de Particules de taille comprise entre 0,1 et 1  $\mu\text{m}$  :**

Généralement, au moment où les particules atteignent des diamètres inférieurs à 1  $\mu\text{m}$ , 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 en résulte une diffusion. [7]

Elles ont une vitesse de chute très faible, qui peut être calculable à l'aide de la loi de Stocks moyennant un facteur de correction qui tient compte de l'influence de la viscosité, du nombre de Reynolds et de la valeur du libre parcours moyen des particules.

La vitesse de chute  $V_c$  devient : [18]

$$V_c = V_p \left[ 1 + A \cdot \frac{\lambda}{2} \right]$$

avec :  $V_p$  : vitesse de chute de la particule calculée par la loi de Stocks.

$\left[ 1 + A \cdot \frac{\lambda}{2} \right]$ : facteur de correction (facteur de Cunningham), dont A est un facteur de correction secondaire  $A = 0,8-0,9$ . et  $\lambda$  est espace libre moyen intermoléculaire.

Le mouvement Brownien est significatif pour ces particules, et devient supérieur à la vitesse de sédimentation pour les particules inférieures à  $0,5 \mu\text{m}$ , et la diffusion devient supérieure à la sédimentation.

Les particules qui diffusent subissent alors un déplacement moyen " X " fonction de temps, donnée par la loi d'EINSTEIN :

$$X = (2.D.T)^{\frac{1}{2}}$$

ou D représente le coefficient de diffusion. [17]

**c) Cas des Particules inférieures à  $0,1 \mu\text{m}$  : [19]**

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 :

$$- \frac{dn}{dt} = k n^2$$

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.

$K = 1,93 - 22,6 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$  pour les particules du  $6 \cdot 10^{-3}$  à  $3 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}$  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 :

$$\frac{1}{n_t} - \frac{1}{n_0} = k t$$

En figure N°03 nous illustrons graphiquement les propriétés de migration des particules dans l'atmosphère en fonction de leur diamètre. [17]

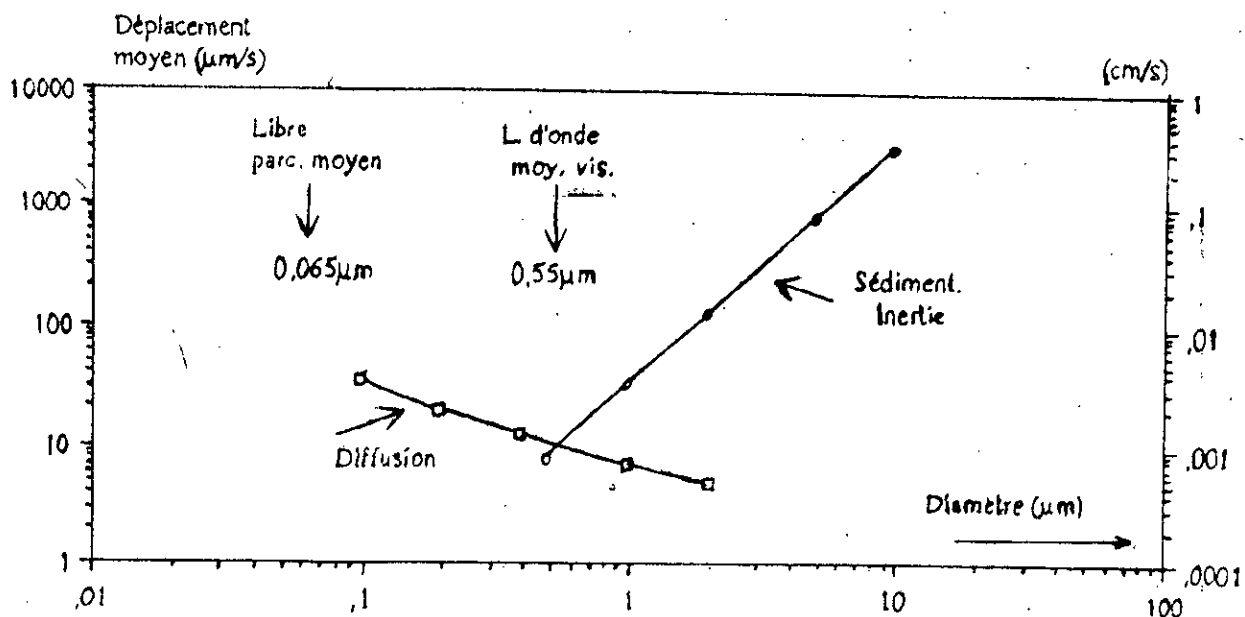


Figure N°03: déplacement moyen de certaines particules en fonction de leurs dimensions. [17]

**TROISIEME CHAPITRE**

**EFFETS DES PARTICULES EN  
SUSPENSION**

### **III. EFFETS DES PARTICULES EN SUSPENSION :**

#### **III .1 .EFFETS SUR L'ETRE HUMAIN :**

L'action nocive des particules en suspension dans l'air sur l'organisme humain s'exerce principalement si ce n'est exclusivement par les voies respiratoires.

Les autres formes d'action nocive interviennent de façon secondaire après que les particules se soient déposées et qu'elles aient été englobées dans l'eau et les aliments.

Les effets des particules sont assez bien connus en hygiène industrielle où se rencontrent des concentrations relativement élevées de particules de nature bien définie.

Ainsi, la respiration de particules d'Amiante est la cause de la maladie connue sous le nom de l'asbestose et l'inhalation de particules de silice est la cause de la silicose. [20]

Dans l'atmosphère des villes, les particules se trouvent à des concentrations très inférieures à celles de certains milieux ou postes de travail, de sorte que l'on observe rarement une action spécifique nettement différenciée.

Les effets nocifs des particules en suspension s'exercent par simple pénétration d'aérosols solides dans l'appareil respiratoire.

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. [11, 21]

- 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. [11, 21]

- Les particules de diamètre aérodynamique moyen inférieur à  $2-3\mu\text{m}$  pénètrent profondément dans l'appareil respiratoire jusqu'aux sacs alvéolaires. [11]

La figure N°4 illustre le devenir des particules atmosphériques dans l'appareil respiratoire en fonction de leur granulométrie moyenne. [11]

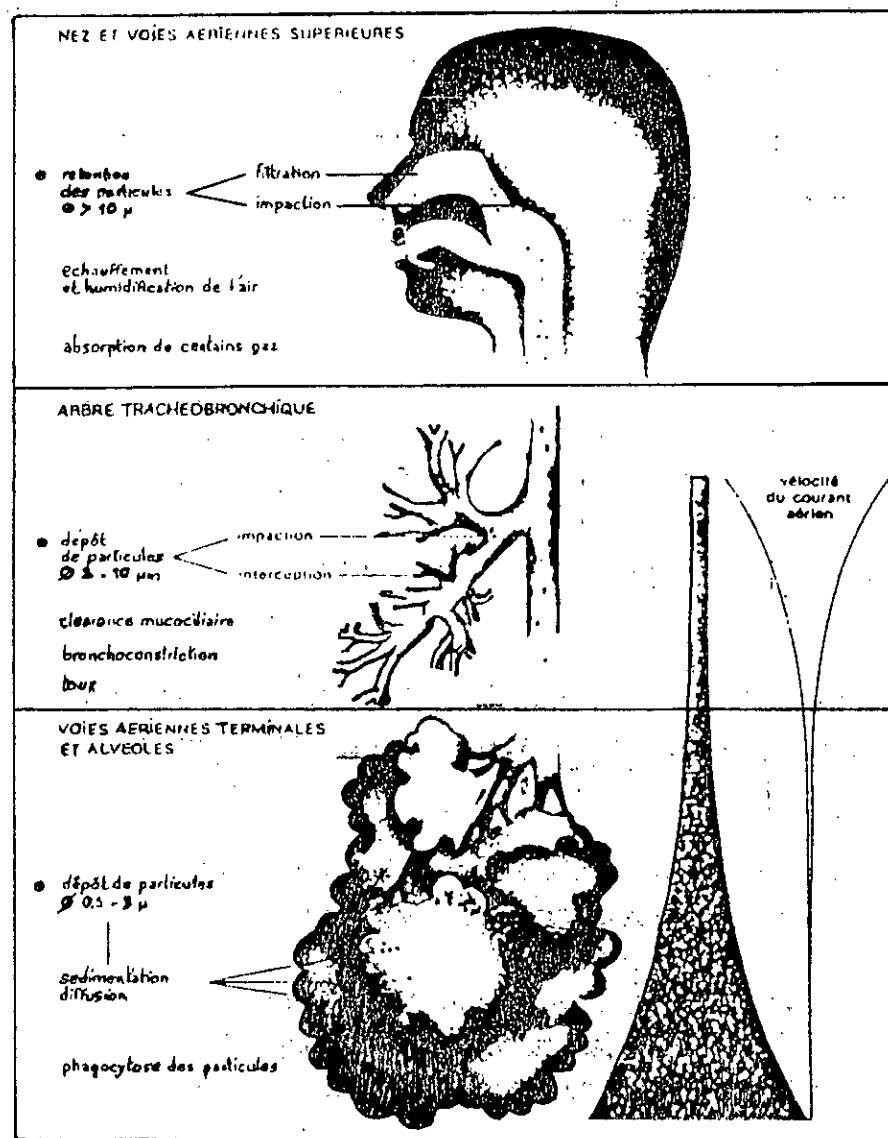
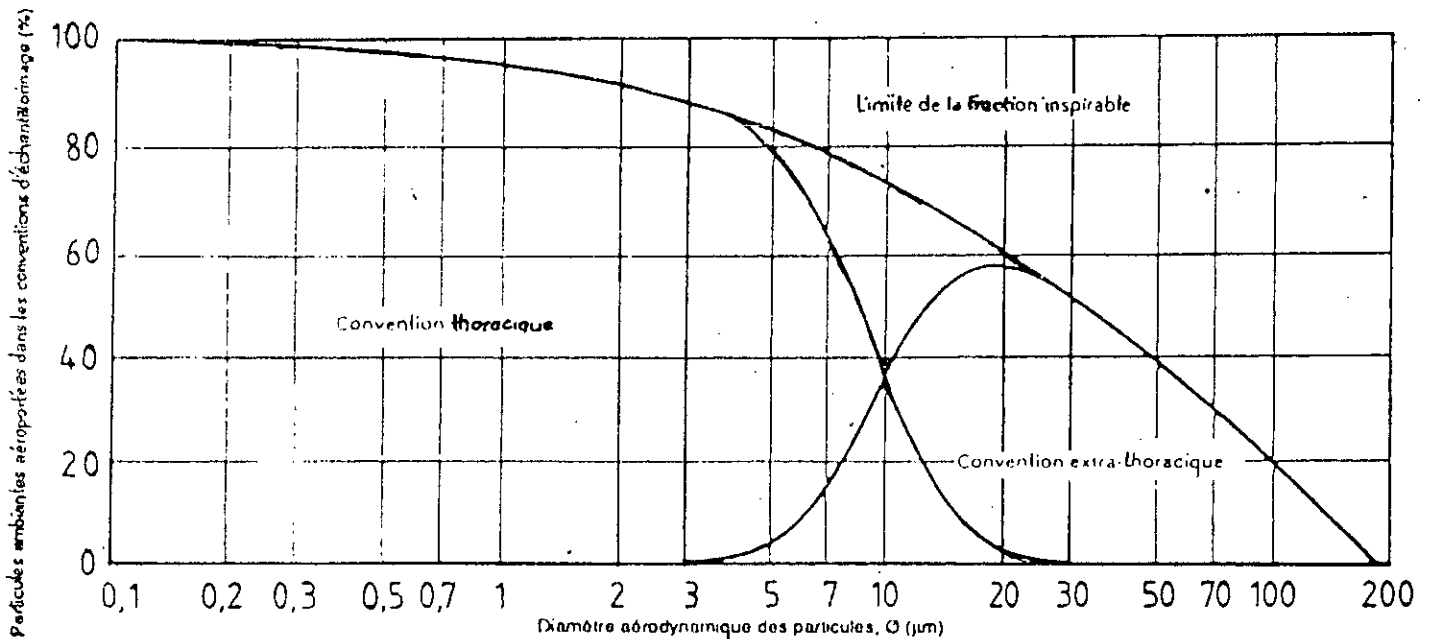


Figure N°4 : Devenir des particules atmosphériques dans l'appareil respiratoire en fonction de leur granulométrie moyenne.

La figure N°5 donne la division de la fraction inhalable des particules atmosphériques entre fractions thoracique et extrathoracique.[11]



**Figure N°5: Division de la fraction inhalable des particules atmosphériques.entre fractions thoracique et extrathoracique.[11]**

La rétention alvéolaire est maximale pour les particules qui ont un diamètre compris entre 1 et  $0,6\mu\text{m}$ . [21]

La rétention des particules solides et liquides dépend d'ailleurs, en partie du rythme et de l'amplitude de la respiration ainsi que de la densité relative des produits inhalés.

Ainsi, la ventilation par la bouche, en court-circuitant les fosses nasales, augmente la déposition dans les zones trachéobronchiques.

L'hygroscopie des particules peut amener à une majoration de leur taille d'un facteur 3 à 4 dans les voies aériennes, ce qui diminue le nombre de particules pénétrant dans les voies aériennes profondes. [21]

Dans les alvéoles, les particules présentes peuvent être phagocytées par les macrophages alvéolaires ou par les cellules épithéliales dont une partie peut migrer vers l'interstitium pulmonaire. [21]



Et selon leur solubilité, certaines sont retenues alors que d'autres sont véhiculées vers les lymphatiques bronchiques d'où elles pourront alors diffuser par voie hémotogène dans tous les organes.

Dans l'organisme, ces particules peuvent être excrétées par les reins et le tractus intestinal. [21]

Certaines s'accumulent spécifiquement dans tel ou tel organe où elles sont susceptibles d'atteindre des concentrations toxiques. D'autres agents nocifs peuvent être neutralisés par les mécanismes de défense de l'organisme. [3]

En général, il existe une action propre à l'ensemble des particules qui consiste en une irritation des voies respiratoires, mais les actions spécifiques sont d'avantage à rapporter aux substances dont les particules sont les supports.

Comme l'action particulière du SO<sub>2</sub>, qui intervient comme source potentielle d'acide sulfurique véhiculé par les particules et l'action cancérigène du benzopyrène supporté par les suies noires. [20]

D'importantes substances supportées par les particules en suspension sont cancérigènes.

Ces substances peuvent être regroupées par ordre d'importance décroissant, dans les catégories suivantes : [1]

- Les hydrocarbures aromatiques polycycliques condensés.
- Les métaux, les métalloïdes et leur composé ( Arsenic, Beryllium, Cobalt, Chrome, Fer, Nickel, Sélénium, ...).
- L'Amiante et autres substances que l'on rencontre sous forme de particules.

En ce qui concerne l'action toxique de certains métaux lourds supportés par les particules solides sur l'organisme humain, on peut donner l'exemple du plomb, du cadmium, du vanadium et du mercure. [22]

a) **Action Toxique du Plomb :**

Ce métal est toxique, aux propriétés cumulatives importantes. 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 :

- 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.

Le plomb peut aussi provoquer une atteinte du rein, avec hyperazotémie et du système nerveux central.

b) **Action Toxique du Cadmium :**

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 coeur et les grosses artères.

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

c) **Action du Vanadium :**

Le Vanadium est un métal cumulatif, il se fixe principalement dans le coeur, 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 coeur 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 :**

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 dû à des lésions de cervelet et parfois des troubles de la vision.

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

A titre illustratif, nous présentons en figure N°06, les organes du corps humain qui peuvent être affectés par les divers métaux lourds. [4]

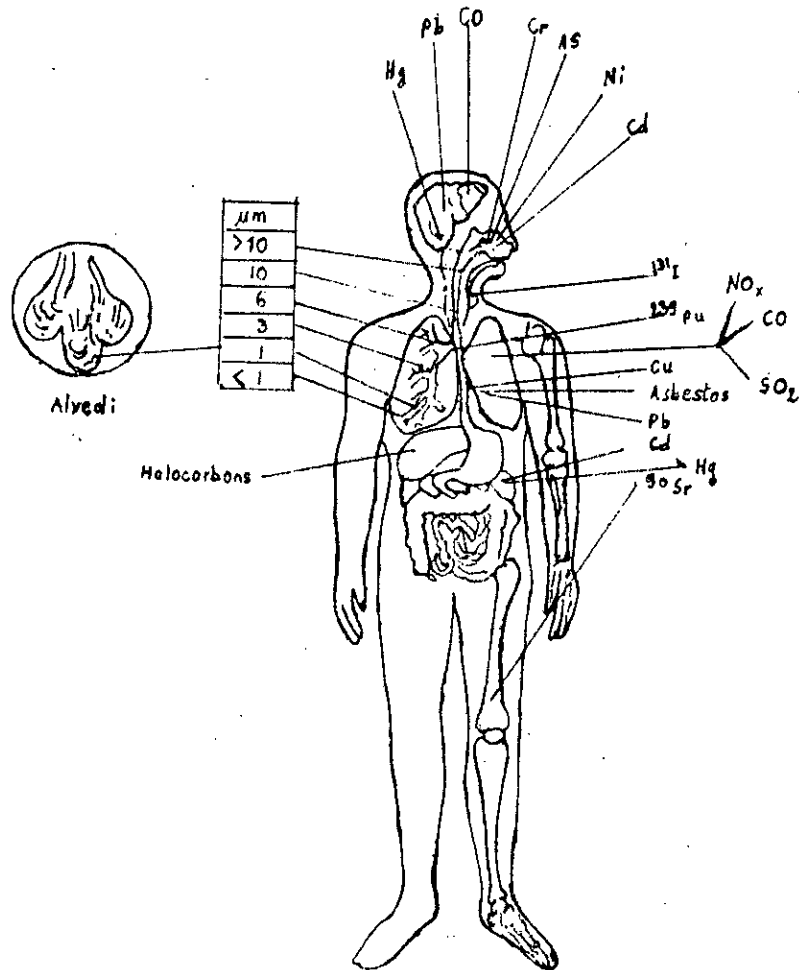


Figure N°06 : Différents organes et parties du corps humain peuvent être contaminés par certains aérocontaminants.

### **III . 2 .EFFETS DES PARTICULES SUR LES ANIMAUX : [1]**

Les principales voies de pénétration des particules dans l'organisme animal sont : la voie respiratoire et la voie digestive .

La voie digestive est prédominante pour les animaux herbivores, qui se nourrissent par les plantes et les herbes contaminés par les particules.

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

Ainsi, la consommation par les animaux des plantes contaminées par le fluor, conduit à l'accumulation de ce dernier dans leur organisme, ce qui peut produire la dégradation de certains organes tels que les os et les dents ( maladie dénommée fluorose des animaux ).

L'Arsenic, le Plomb, et le Sélénium sont toxiques pour les animaux, ils produisent certains symptômes au niveau du système nerveux, de l'appareil respiratoire et de tube digestif. [3]

Les poussières alcalines provenant des composés du calcaire traité dans les cimenteries peuvent provoquer des troubles chez les animaux pour des lésions du tube digestif et des modifications du P.H.

La suie a été incriminée pour la production de certaines tumeurs bronchopulmonaires chez les animaux comme chez les hommes à cause de sa teneur en hydrocarbures cancérigènes.

### **III . 3 . EFFETS SUR LES VEGETAUX :**

Lorsque les poussières se déposent sur les feuilles des plantes, elles forment écran entre les rayons lumineux et la feuille proprement dite et il peut s'ensuivre une modification de l'assimilation chlorophyllienne. [3] .

Lorsque les poussières sont acides, les points de contact avec les cellules des fleurs et les feuilles peuvent être le siège de nécroses locales.

La végétation la plus exposée à ce genre de problèmes est celle qui se trouve au voisinage des usines qui émettent beaucoup de poussières et les autoroutes.

Les poussières de ciment s'adhèrent aux feuilles en couches et croûtes, bouchent les stomates et intoxiquent les cellules à cause de leur composition alcaline.

Certains métaux sont toxiques pour les végétaux. Ainsi, le Zinc provoque la destruction de certaines plantes en bouchant leur stomates et en concentrant en elles sa toxicité après qu'il a été absorbé par les plantes poussant dans un sol qu'il pollue.

L'Arsenic ne provoque pas par lui-même de lésions apparentes mais s'accumule dans les plantes en rendant leur utilisation impossible. [2]

### **III . 4 . EFFETS DES PARTICULES SOLIDES SUR**

#### **LES MATERIAUX : [3]**

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

La dégradation de la propriété bâtie (bâtiments, monuments historiques,...etc) 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 leur 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.5. AUTRES EFFETS :

En plus de leur 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 constitué un écran pour les radiations solaires incidentes, ce qui peut avoir des répercussions sur le climat en général. [23]

## **QUATRIEME CHAPITRE**

### **MESURE DES PARTICULES EN SUSPENSION DANS L'ATMOSPHERE**



## IV. MESURE DES PARTICULES EN SUSPENSION DANS L'ATMOSPHERE:

La mesure des particules en suspension dans l'atmosphère repose généralement sur les étapes suivantes : [11]

- L'échantillonnage (prélèvement) des particules, qui se fait selon différentes méthodes par divers dispositifs selon la nature de l'étude exigée ou désirée.
- La mesure de la concentration en masse de l'échantillon recueilli.
- L'estimation des teneurs des principaux contaminants d'intérêt sanitaire (éléments métalliques, H.A.P,...).
- Une approche biologique si possible, appliquée à la composante organique.

### IV.1. ECHANTILLONNAGE:

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

Le rendement granulométrique d'un prélèvement de T.S.P n'est égale à 100% que pour les particules de taille approximativement inférieure à  $3\mu\text{m}$ . Les particules les plus grosses ( $\varnothing > 3\mu\text{m}$ ) sont collectées avec un rendement inférieur.

L'efficacité de leur collection est fortement influencée par les conditions météorologiques.(vitesse de vent) et les conditions de prélèvement (débit d'aspiration, position et conception du dispositif de captation).

En ce qui concerne la surveillance de la teneur en T.S.P dans un milieu urbain, on peut définir les méthodes de prélèvement suivantes :

#### IV.1.1 Prélèvement Sans Coupure Spécifique :

Ce mode de prélèvement est utilisé pour capter toutes les particules en suspension sans fractionnement granulométrique sur une couche filtrante (filtre, membrane).

Généralement, les dispositifs utilisés peuvent collecter des particules de taille pouvant aller jusqu'à  $30\mu\text{m}$ . [11]

D'après la taille et la nature des particules, on peut définir les méthodes de prélèvement suivantes :

**a). Méthode De Prélèvement Sur Filtre Ouvert :**

Cette méthode est généralement utilisée pour collecter les particules de taille allant de  $0,3$  à  $30\mu\text{m}$ .

Les particules de taille supérieure à  $10\mu\text{m}$  sont collectées avec une efficacité moindre.

La vitesse de prélèvement est de  $20\text{cm/s}$  en moyenne, avec un débit moyen d'environ  $1,5\text{ m}^3 / \text{h}$ . [24]

Les particules sont retenues sur des filtres classiques de  $47\text{mm}$  de diamètre.

La durée de prélèvement est de 24 heures et peut aller jusqu'à 7 jours. [11]

**b) Méthode Des Fumées Noires (F.N) :**

Cette méthode est utilisée en principe, pour la collecte des particules de faible diamètre ( $\varnothing < 10\mu\text{m}$ ).

Les particules de taille inférieure à  $5\mu\text{m}$  sont collectées avec une grande efficacité.

La vitesse d'aspiration est de l'ordre de  $1\text{cm/s}$ . [11]

Cette méthode est généralement utilisée pour les prélèvements de particules issues de la combustion.

La durée de prélèvement est généralement de 24 heures.

### **c) Méthode De Prélèvement à Haut-Débit :**

C'est une méthode utilisée pour la collecte des particules de taille plus importante. Les particules de taille supérieure à  $10\mu\text{m}$  sont collectées avec une efficacité significative, cette efficacité est de 25 à 40% pour les particules de  $30\mu\text{m}$ . [11]

Les dispositifs (appareils) utilisés sont de type "High volume simpler (H.V.S)". Leur débit d'aspiration peut aller de  $60$  à  $100\text{m}^3 / \text{h}$ .

La durée de prélèvement est généralement de 24 heures.

Cette méthode permet aussi de recueillir des quantités importantes de particules, ce qui facilite toutes sortes d'analyse de l'échantillon.

### **IV .1.2 Prélèvement Avec Coupure Granulométrique :**

Cette méthode est utilisée dans le cas où l'on désire obtenir des particules de taille inférieure à une valeur limite.

Les dispositifs utilisés sont équipés d'une tête qui permet une sélection granulométrique des particules . Cette tête ne laisse passer que les particules dont le diamètre est inférieur à une certaine valeur donnée. Le diamètre de coupure est caractéristique de la tête et il est généralement de  $10\mu\text{m}$ . [13]

Cette méthode est généralement utilisée pour le prélèvement des particules inhalables de  $\varnothing < 10\mu\text{m}$ , PM10. [13]

L'appareil le plus connu de nos jours est le HVS-PM10 de la Firme Américaine Andersen. C'est un appareil équipé d'une tête sélective pour la collection des particules de diamètre  $\leq 10\mu\text{m}$ .

### **IV . 1.3 Prélèvement Avec Fractionnement Granulométrique :**

Les prélèvements avec fractionnement granulométrique sont généralement utilisés pour collecter les particules en différentes classes granulométriques.

Les dispositifs utilisés fonctionnent à bas ou haut débit (respectivement 1,7 et 34 m<sup>3</sup> / h) et sélectionnent les particules par impaction.

Le dispositif le plus utilisé est l'impacteur en cascade qui se compose d'une série d'étages d'impaction (2 à 9, selon le nombre de fractions que l'on désire avoir) constitués d'un orifice perpendiculaire à une surface plane.

La vitesse croissante de l'air permet la captation de particules de plus en plus petites.

En général, la limite en dimension des impacteurs classiques se situe aux environs de 0,5 µm; un filtre absolu constitue l'étage terminal, il collectera toutes les particules les plus fines.

Les collecteurs à impact virtuel, ou impacteurs sont des dispositifs qui permettent d'aspirer les particules en suspension et les distribuent ensuite en deux courants distincts en fonction de leur taille.

Le tableau N°06 résume les principales méthodes de mesure utilisés pour le prélèvement des particules en suspension dans le cadre de la surveillance de la pollution particulaire urbaine. [11,24]

**TABLEAU 06 : Principales méthodologies de mesures utilisées pour l'échantillonnage des particules atmosphériques.**  
[11, 24]

| Dispositifs de prélèvement        | Sélection des particules | Nombre de fractions | Diamètre des particules ( $\mu\text{m}$ ) | Débit ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) | Durée de prélèvement (heure) | Principe de mesure | Analyses ultérieures des particules |
|-----------------------------------|--------------------------|---------------------|---|---------------------------------|------------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| SANS TETE (F.N)                   | NON                      | 1                   | 0 à 7                                     | 0,1                             | 1 - 24                       | Reflectométrie     | NON                                 |
| SANS TETE                         | NON                      | 1                   | 0 à 30                                    | 1,5                             | 24                           | Gravimétrie        | OUI                                 |
| H.V.S                             | NON                      | 1                   | 0 à 50                                    | 66 à 102                        | 24                           | Gravimétrie        | OUI                                 |
| PPA - 60 + TETE                   | OUI                      | 1                   | 0 à 10                                    | 1,5                             | 24                           | Gravimétrie        | OUI                                 |
| HVS-PM10                          | OUI                      | 1                   | 0 à 10                                    | 66 à 100                        | 24                           | Gravimétrie        | OUI                                 |
| Jauge Béta                        | OUI                      | 1                   | 0 à 10                                    | 1,5                             | 24                           | Radiométrie        | NON                                 |
| HVS.PM10 avec impacteur à cascade | OUI                      | 2 à 9               | 0 à 10                                    | 30                              | 24                           | Gravimétrie        | OUI                                 |
| Impacteur virtuel                 | OUI                      | 2                   | 0 à 10                                    | 1,7                             | 24                           | Gravimétrie        | OUI                                 |

#### IV 2 .MESURE DE LA TENEUR EN T.S.P :

Dans le cas où le prélèvement s'effectue par filtration sur filtre, la mesure de la concentration en masse globale recueillie sur le filtre s'effectue par :

##### a) Méthode Gravimétrique :

C'est une méthode simple dans son principe, mais relativement délicate à appliquer surtout pour des courtes périodes de prélèvement.

Les filtres sont pesés dans les mêmes conditions de température et d'humidité sans pertes de substances au cours des manipulations. La masse particulaire recueillie est la différence de poids entre le poids du filtre après prélèvement et son poids avant prélèvement.

### b) Radiométrie Bêta :

Cette méthode permet de déterminer la masse de l'échantillon par atténuation d'un rayonnement bêta.

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. [23]

L'absorption du rayonnement bêta est indépendante de la nature des particules déposées sur le filtre. C'est le principe de la Jauge bêta marqué dans le tableau N°06. [11]

### c) Méthodes des Fumées Noires (F.N) :

Cette méthode est basée sur la réflectométrie.

Le réflectomètre mesure la réflectance du dépôt par rapport à celle du papier (filtre) vierge, fixée arbitrairement à 100%.

Une courbe de calibration est nécessaire, elle fournit une correspondance entre la noirceur du dépôt et la masse des particules déposées.[11]

Quelque soit la méthode utilisée, le résultat est toujours donné en  $\mu\text{g} / \text{m}^3$  d'air.

## IV.3. ESTIMATION DES TENEURS DES PRINCIPAUX CONSTITUANTS

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 ou 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 ( H.A.P ) est déterminée généralement par des techniques chromatographiques telles :
- - \* La chromatographie liquide haute performance ( C.L.H.P ).
  - \* Détection par émission de fluorescence.
  - \* Chromatographie en phase gazeuse ( C.P.G ).

#### **IV.4. NATURES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES COUCHES DE FILTRATION :[17]**

Ces couches filtrantes sont généralement des filtres à fibres de verre ou des filtres membranes.

Les filtres utilisés doivent répondre à certaines caractéristiques physiques et chimiques appropriées telles :

- Une Hygroscopie très faible.
- Une perte de charge négligeable.
- Une efficacité de collecte importante surtout pour les très fines particules.
- Les filtres doivent présenter un taux d'impuretés très faible pour éviter toute interférence avec les éléments déposés sur les filtres.
- Un temps de colmatage très long.

##### **\* Filtres à Fibres :**

Ce sont des fibres de cellulose, de verre, fibres synthétiques, métalliques, ... et retiennent les particules solides dans toute l'épaisseur de matelas de fibre pour lequel on ne peut définir qu'une porosité moyenne.

\* Filtres Membranes :

Ce sont des tamis dont l'efficacité de capture est totale pour les particules d'un diamètre supérieur au diamètre des pores. Ces filtres sont en nitrate de cellulose, acétate de cellulose, cellulose régénéré, P.T.F.E.



# **CINQUIEME CHAPITRE**

## **METHODOLOGIE**

## **V. METHODOLOGIE :**

### **V.1 SITES DE PRELEVEMENT:**

Dans le cadre de notre étude, l'objectif était l'évolution de la pollution particulaire au milieu urbain et périurbain.

Comme site purement urbain notre choix s'est porté sur le Boulevard Colonel Amirouche. Au niveau du Centre des Oeuvres Sociales Universitaires (C.O.U.S), en plein centre d'Alger.

Les particules y présentes sont principalement originaire de véhicules circulants à l'intérieur du Boulevard, L'apport des particules de l'extérieur est minimum à cause de l'influence des grands immeubles constituant le Boulevard.

Ce Site est représentatif de la plupart des axes routiers du centre ville où la circulation auto est importante et où on note la présence d'un important flux de piétons.

En ce Site, le prélèvement a lieu à environ 6m de hauteur.

Le deuxième Site, qu'on peut qualifier de semi-urbain est implanté sur la terrasse du Département de Génie-Chimique, de l'Ecole Nationale Polytechnique d'El-Harrach à environ 10Km à l'est d'Alger.

Le dispositif de prélèvement est placé à environ 15m de la route Nationale N°5 à une hauteur d'environ 4m du sol.

Les figures N°07 et 08 représentent respectivement la situation des Sites (1) et (2) sur les cartes (01) et (02).

La figure N°09 représente la situation globale des 2 Sites de prélèvement sur la carte d'Alger.

CARTE N°01.

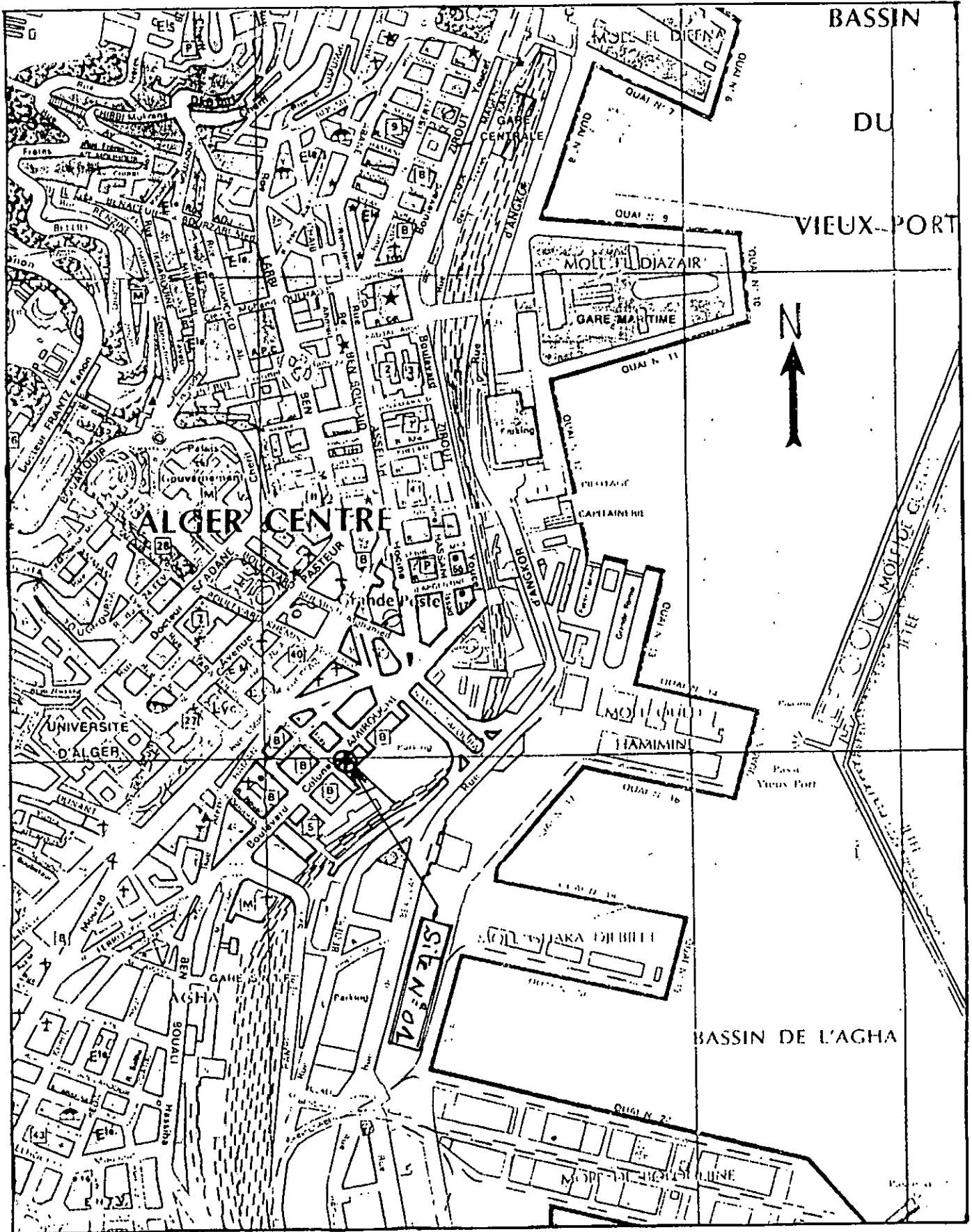


Figure N° 7: Position du site N°01 sur la carte.

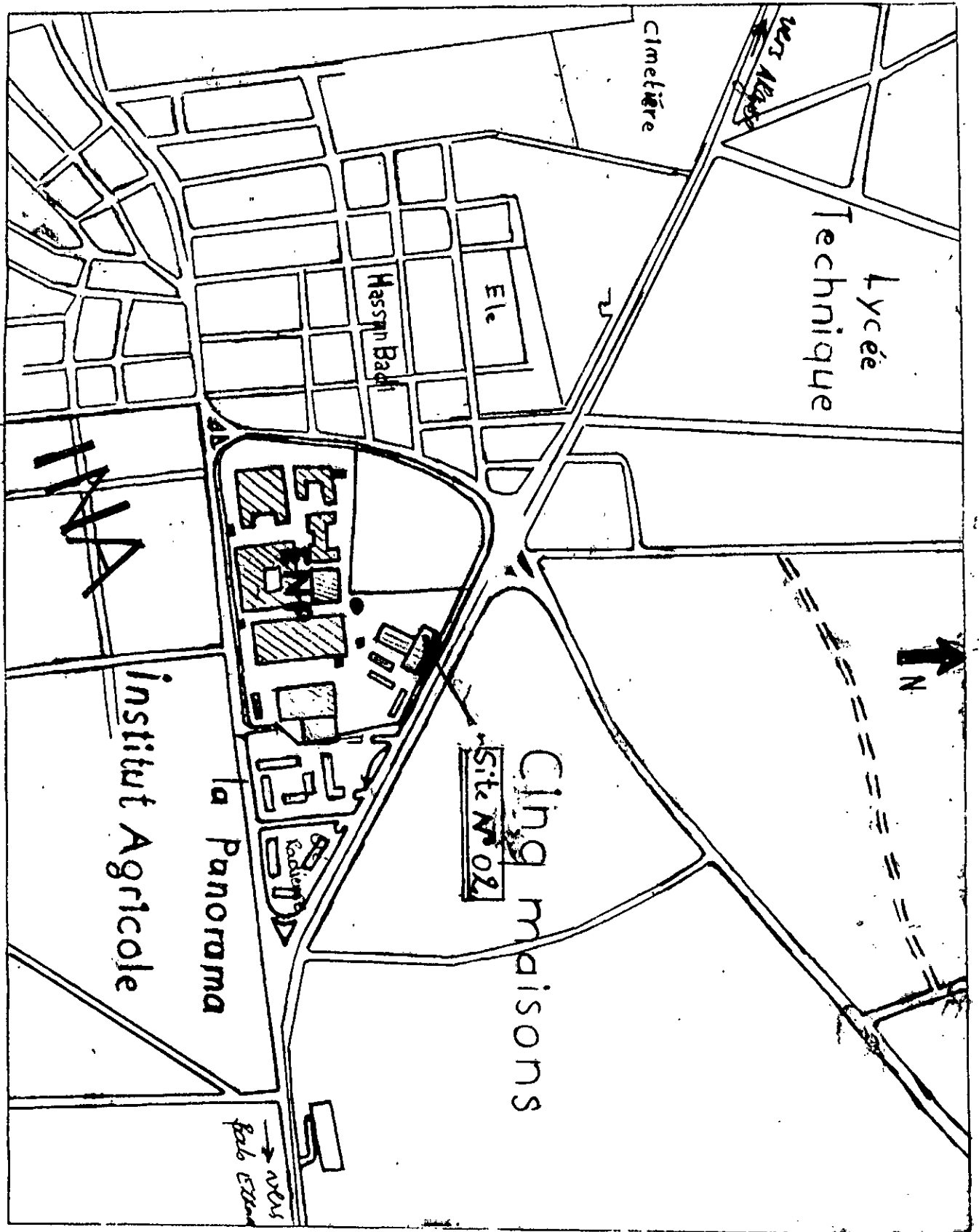


Figure N°08 : Position du site N°02 sur la carte.



## V.2 . MODE DE PRELEVEMENT :

Le prélèvement est effectué à l'aide d'une ligne d'échantillonnage que nous illustrons en figure N°10.

Le dispositif de prélèvement comprend :

- 1) Un entonnoir dirigé vers le bas pour éviter tout prélèvement de particules sédimentables et de l'eau de pluie.
- 2) Un filtre à poussière porté par un porte filtre, situé en tête de la chaîne le plus près possible de l'entrée de l'air pour réduire les pertes de particules par dépôt sur la canalisation.
- 3) un débitmètre situé entre le porte filtre et la pompe d'aspiration, permettant d'avoir le volume exacte d'air aspiré pour la période de prélèvement.
- 4) Une pompe d'aspiration capable de fonctionner pendant plusieurs jours sans arrêt et sans difficultés.
- 5) La sortie de l'air dirigée vers le sens inverse de l'aspiration, pour éviter toute recirculation de l'air filtré.

L'air aspiré à débit fixe de 2 à 4m<sup>3</sup> / h, passe à travers le filtre sur lequel les particules solides sont retenues.

La durée du prélèvement a été fixé à 48 heures afin d'avoir une masse de poussières suffisante pour les analyses ultérieurs.

Nous avons utilisé 2 types de filtres :

- Filtre membrane cellulose de 47mm de diamètre, de porosité 0,45µm de la firme M.S.I.
- Filtre en fibre de verre de 47mm de diamètre. (WHATMAN GF/F)

Les filtres sont pesés à 0,1mg près avant et après les prélèvements.

Avant chaque pesée et pour éliminer les traces d'humidité, on porte les filtres à 100°C à l'étuve pendant 2 heures.

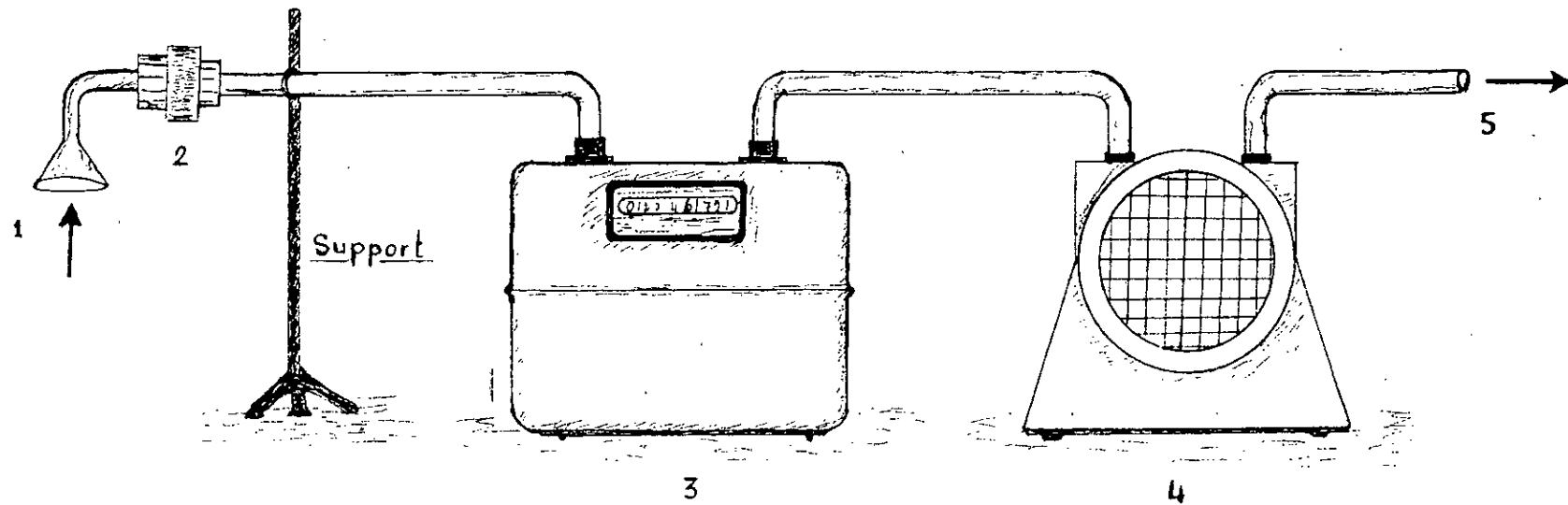


Figure N°10 : Dispositif expérimental de prélèvement des T.S.P

### V . 3 . ANALYSE DES ECHANTILLONS :

Afin d'analyser les métaux lourds qui sont véhiculés par les T.S.P, on procède à une minéralisation des échantillons.

La minéralisation se fait comme suit : [37]

Le filtre chargé de particules solides est introduit en entier dans un ballon en verre borosilicaté, contenant environ 10ml d'un mélange d'acides (2 volumes d'HCl concentré et 1 volume d'HNO<sub>3</sub> concentré de qualité P.A.Merck).

La minéralisation se fait sous reflux pendant 2 heures à environ 150°C.

Après évaporation partielle du minéralisa t, on laisse refroidir et on reprend la solution dans environ 20ml d'eau distillée qu'on chauffe de nouveau pendant quelques minutes.

Après refroidissement, le minéralisa t est 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, Cd, Mn, Zn, Fe.

Le dosage est effectué par spectrométrie d'absorption atomique à flamme (Appareil de Marque PHILIPS de fabrication française).

Les solutions étalons nécessaires aux dosages ont été effectuées selon les indications données par Rodier [26], à partir de solutions mères de 1g / l issues des solutions Titrisol de MERCK.



**SIXIEME CHAPITRE**  
**RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

## **VI. RESULTATS ET INTERPRETATION**

Au niveau d'Alger Centre, Boulevard Amirouche, la campagne de prélèvement des T.S.P que nous avons menée du 11 Mars au 08 Mai 1996, nous a permis de recueillir 16 échantillons.

A cinq-maisons (Ecole Nationale Polytechnique), l'étude s'est étalée sur la période du 13 Mai au 09 Juin 1996.

Avec une durée de prélèvement fixée à 48 heures, nous avons collecté en ce site 12 échantillons.

L'étude des Métaux associés aux T.S.P recueillis a porté sur environ la moitié des échantillons prélevés, 06 échantillons du premier site et 07 échantillons du deuxième site.

### **VI.1. LES PARTICULES TOTALES EN SUSPENSION :**

#### **VI.1.1 Les Particules Totales En Suspension à Alger Centre :**

Les teneurs en T.S.P que nous avons enregistré durant notre campagne de mesure sont illustrées en Figure N°11.

On remarque ainsi que les teneurs mesurées évoluent dans une large fourchette de valeurs. La plus basse teneur s'élève à  $30,9 \mu\text{g} / \text{m}^3$ , alors que le maximum atteint le niveau de  $137,5 \mu\text{g} / \text{m}^3$ . La teneur moyenne calculée sur tous les prélèvements s'élève à  $59,1 \mu\text{g} / \text{m}^3$ .

Du point de vue statistique 95% des teneurs restent en dessous de  $81 \mu\text{g} / \text{m}^3$  (P 95 =  $81 \mu\text{g} / \text{m}^3$ ).

Ces variations temporelles des teneurs en T.S.P sont dues à plusieurs paramètres : précipitation, vent, intensité du trafic routier, week-end,....

Ainsi, les plus faibles teneurs sont enregistrées les jours de fortes pluies, de vents forts et les jours de week-end, c'est le cas par exemple de l'échantillon du 25-26 / 03 où le vent était très fort, ce qui entraîne une importante diffusion des fines particules. La teneur mesurée ne s'élève alors qu'à  $39,5 \mu\text{g} / \text{m}^3$ .

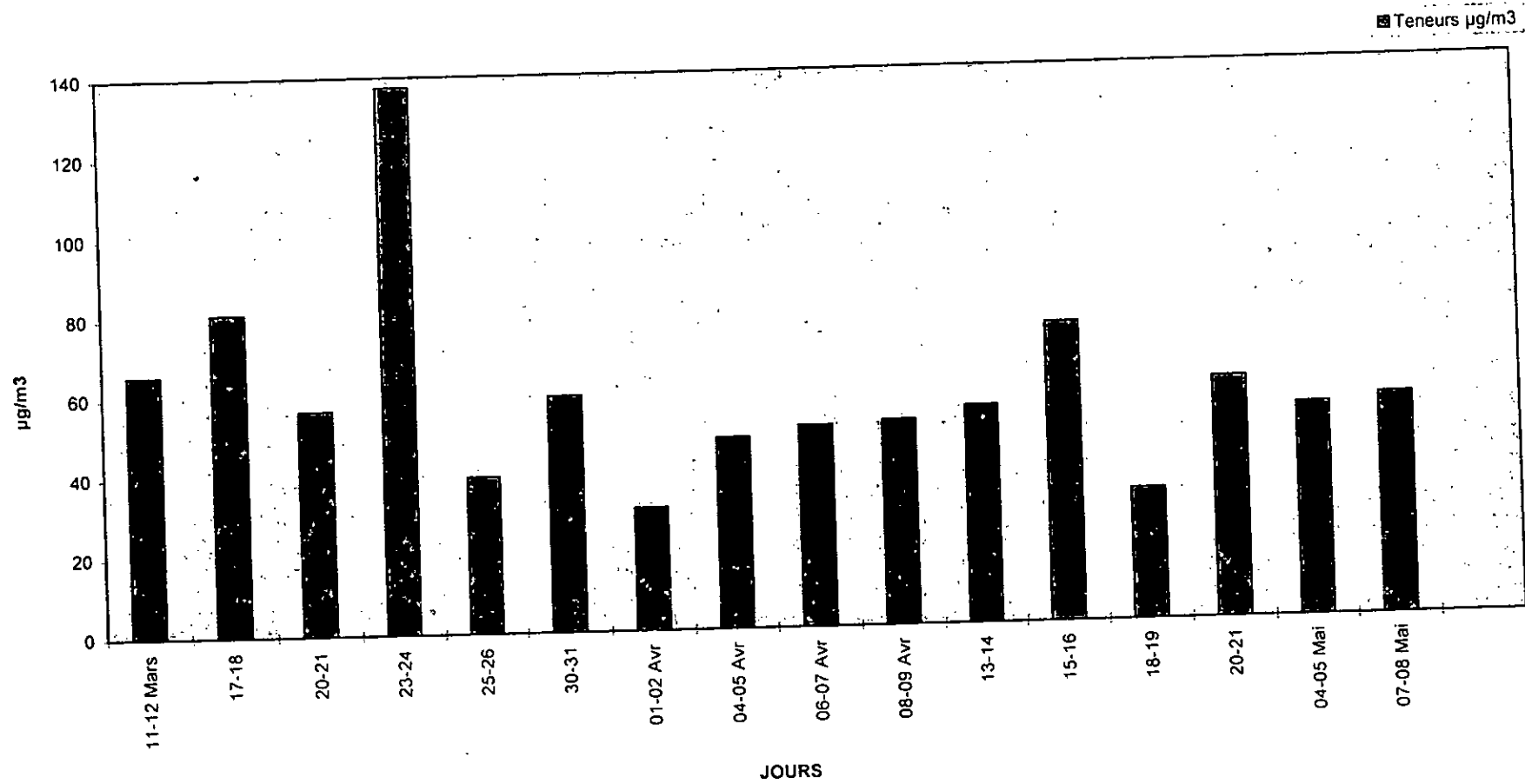


Figure N°11 : Evolution temporelle des teneurs en TSP à Alger Centre (Bd. AMIROUCHE)

L'influence des précipitations est visible surtout dans le cas de l'échantillon prélevé le 01-02 / 04. La teneur mesurée en ces jours est parmi les plus basses ( $31 \mu\text{g} / \text{m}^3$ ).

L'influence due à la réduction du trafic routier est par exemple, visible dans l'échantillon prélevé le week-end du 18 et 19 / 04 qui coïncide en même temps avec une légère pluie.

La teneur la plus élevée ( $137,5 \mu\text{g} / \text{m}^3$ ) est mesurée un samedi et dimanche du 23-24 / 03 où l'intense trafic routier du début de semaine et l'absence ou faiblesse du vent induisent une certaine stagnation et accumulation des particules dans l'atmosphère.

Les teneurs en T.S.P sont donc influencées par les conditions météorologiques (surtout les précipitations) et la densité du trafic routier.

Du fait que le Boulevard Amirouche présente une rue de type canyon qui est plus ou moins propre, il y a peu de particules sédimentables et les vents forts qui ont parfois lieu n'entraînent pas la suspension de telles particules, qui viendraient s'ajouter aux T.S.P.

#### **VI.1.2 Les Particules totales en suspension à Cinq-Maisons (E.N.P) :**

Les teneurs en TSP enregistrées au niveau de l'Ecole Nationale Polytechnique, du côté de la route nationale N°05, sont illustrées en Figure N°12.

Les teneurs enregistrées sont comprises dans une fourchette allant de  $44,76 \mu\text{g} / \text{m}^3$  à  $80,70 \mu\text{g} / \text{m}^3$ , avec une moyenne de  $56,17 \mu\text{g} / \text{m}^3$ , durant la période étudiée. L'évolution temporelle des teneurs en T.S.P est assez homogène et moins accentuée qu'à Alger Centre.

Globalement, les teneurs en TSP enregistrées en ce site sont du même ordre de grandeur que celles d'Alger Centre. La seule différence c'est que ce site est mieux ventilé que celui d'Alger, et l'influence des vents devient plus importante.

Les teneurs les plus faibles sont enregistrées les 13-14 / 05 et 20-21 / 05 pour lesquels le vent était important.

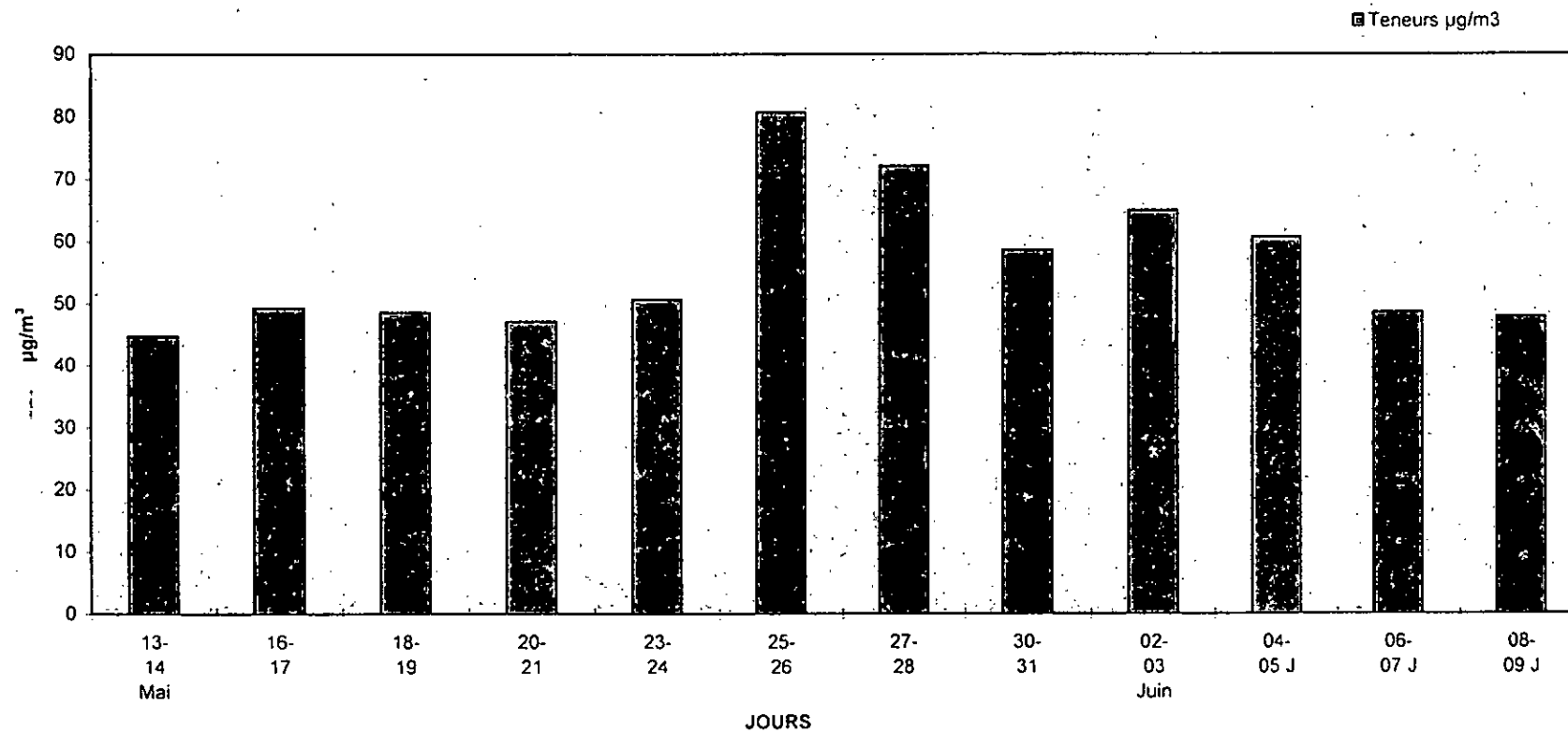


Figure N°12 : Evolution temporelle des teneurs en TSP à Cinq-maisons (E.N.P.)

L'influence des précipitations ne peut être mise en évidence du fait de la rareté des pluies ou de leurs faibles intensités durant la période étudiée.

Durant les jours ouvrables et comme à Alger Centre, la teneur maximale est mesurée les jours de samedi et dimanche ( $80 \mu\text{g} / \text{m}^3$ ).

La réduction du trafic routier sur la RN 05 durant les week-end et jours fériés entraîne une légère réduction des teneurs en TSP.

En ces jours les niveaux relevés sont à l'exception d'un prélèvement inférieur à la moyenne de toute la campagne de mesure.

Cette réduction des TSP qui n'est donc pas suffisamment significative est due au fait que le poste de mesure implanté en ce site est assez éloigné de la chaussée, et qu'il subit en même temps l'influence des particules issues des embruns marins et autres sources naturelles.

Globalement et durant la période des deux campagnes de mesure, nous étions en présence d'une atmosphère relativement propre. Les fréquentes pluies enregistrées durant ce printemps, la bonne couverture végétale, l'absence de vent du sud ont conduit à une bonne autoépuration de l'air ambiant.

Par ailleurs, il faut signaler que les teneurs en TSP enregistrées aussi bien à Alger qu'à l'Ecole Nationale Polytechnique sont en majeure partie des fumées noires ou suies issues des échappements des véhicules. Les particules recueillies sur les filtres sont noires, alors que les études précédentes effectuées du côté de la cimenterie de Rais-Hamidou ou à Bachdjarah, où l'influence du trafic routier est plus faible, sont de couleur marron à grise. [35]

En comparant les teneurs en TSP enregistrées durant cette étude aux normes et valeurs guides de certains pays (tableau N°07), on constate que les taux de pollution par les T.S.P mesurés lors de cette étude sont acceptables.

S'agissant cependant en majeure partie de fumées noires, cette pollution peut être considérée comme étant excessive car dans ce cas la norme Européenne est de  $40 \text{ à } 60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , limite qui a été souvent dépassée aussi bien à Alger qu'à Cinq-Maisons (ENP).

**TABLEAU 07 : Normes régissant les teneurs limites urbaines en TSP.**

| <b>Pays ou organisme</b> | <b>Normes requises en <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math></b>                     | <b>Référence</b> |
|--------------------------|---|------------------|
| <b>Canada et U.S.A.</b>  | 150 (moyenne annuelle des prélèvements, 24 h)                                     | [27]             |
| <b>Allemagne</b>         | 150 (moyenne annuelle des prélèvements, 24 h) P 98 = 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | [28]             |
| <b>Suisse</b>            | 70 (moyenne annuelle des prélèvements, 24 h)                                      | [29]             |
| <b>CEE</b>               | 150 (moyenne annuelle des prélèvements, 24 h).                                    | [28]             |
| <b>CEE</b>               | 40-60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les fumées noires.                            | [36]             |

P.98 : Percentie 98 : 98 % des teneurs enregistrées ne doivent pas dépasser la valeur indiquée.

La comparaison avec les teneurs mesurées en milieu urbain dans les grandes métropoles que nous présentons en tableau N° 08 montre par ailleurs que les teneurs que nous avons mesurées durant cette étude sont relativement faibles.

Il faut cependant signaler l'importance du site de mesure (site industriel; site urbain,...).

Il est clair que les teneurs que nous avons enregistrées durant cette période peuvent être dépassées en période estivale aride où les terrains sont nus et où on a de fréquents vents du sud (sirocco).

Il est nécessaire dans ce contexte de continuer cette étude sur une plus longue période d'une ou deux années pour avoir les tendances et les moyennes annuelles qui englobent toutes les circonstances d'ordre climatiques et autres.

**TABLEAU 08 : Teneurs moyennes de TSP dans certaines grandes villes du monde ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )**

| Villes                  | Teneurs en TSP ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )                | Observations                       | Référence |
|-------------------------|--|------------------------------------|-----------|
| Québec<br>(Canada)      | 60 (moyenne annuelle)                                      | Zone semi-urbaine                  | [27]      |
|                         | 100 (moyenne annuelle)                                     | Zone urbaine                       |           |
| Lille                   | 100 (moyenne annuelle)                                     | Zone urbaine                       | [31]      |
|                         | 61 (moyenne annuelle)                                      | Zone urbaine à circulation moyenne |           |
| Marseille               | 128 (moyenne annuelle)                                     | Zone urbaine                       | [32]      |
|                         | 140 (moyenne annuelle)                                     | Zone urbaine industrielle          | [32]      |
| Paris                   | 101 (moyenne annuelle)                                     | Zone urbaine                       | [33]      |
|                         | 47,49 (moyenne annuelle)                                   | Zone rurale                        | [33]      |
|                         | 51 (moyenne trimestrielle : janvier, février et mars 1992) | Zone urbaine                       | [34]      |
|                         | 45 (moyenne mensuelle : mars 1993)                         | Zone urbaine                       | [30]      |
| Berlin                  | 64 (moyenne annuelle)                                      | Zone urbaine                       | [28]      |
| Ruhr<br>(Allemagne)     | 80 (moyenne annuelle)                                      | Zone urbaine industrielle          | [28]      |
| Alger :<br>Raïs-Hamidou | 217 (moyenne sur 2 mois) 1995                              | Zone industrielle (cimenterie)     | [35]      |
| Badjarah                | 109 (moyenne mensuelle) mai 1995                           | Zone de construction (habitation)  |           |
| Alger Centre            | 59,1 (moyenne sur 2 mois : mars, avril) 1996               | Zone urbaine                       |           |
| Cinq-Maisons            | 56,17 (moyenne mensuelle) mi-mai, mi-juin 1996.            | Zone périurbaine                   |           |



## VI.2. ETUDE DES METAUX LOURDS ASSOCIES

### AUX T.S.P

#### VI.2.1. Teneurs atmosphériques en métaux lourds :

L'analyse de quelques échantillons recueillis à Alger Centre, ainsi qu'à Cinq-Maisons (E.N.P), nous a permis d'accéder aux teneurs atmosphériques de certains métaux lourds associés aux TSP.

Les éléments recherchés sont le Pb, le Fe, le Zn, le Ni, le Cu, le Mn et le Cd. Le Cd présent à des teneurs extrêmement faibles n'a pu être détecté par SAA à flamme, dont la limite de détection pour ce métal est de l'ordre de  $10 \text{ ng/m}^3$ . Son dosage nécessite l'utilisation de la SAA électrothermique, dont la sensibilité est 10 à 100 fois plus élevée que la SAA classique.

Parallèlement au dosage des métaux Pb, Fe, Zn, Cu, Mn, et Ni, nous avons testé les filtres vierges sur leur teneur métallique.

Les filtres membrane en cellulose n'ont pas révélé pour les métaux étudiés une teneur détectable. Par contre les minéralisats des filtres en fibre de verre contenaient des teneurs notables en Zn et à un degré moindre en Fe. Ces teneurs ont été alors retranchées dans le dosage global de l'échantillon.

Les résultats ainsi obtenus sont résumés dans le tableau (09).

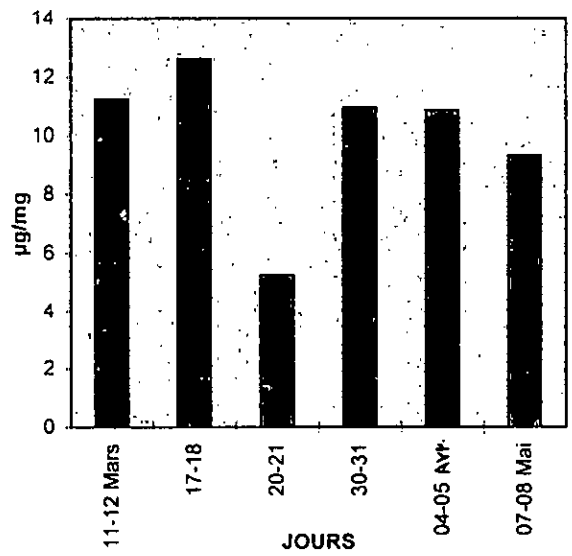
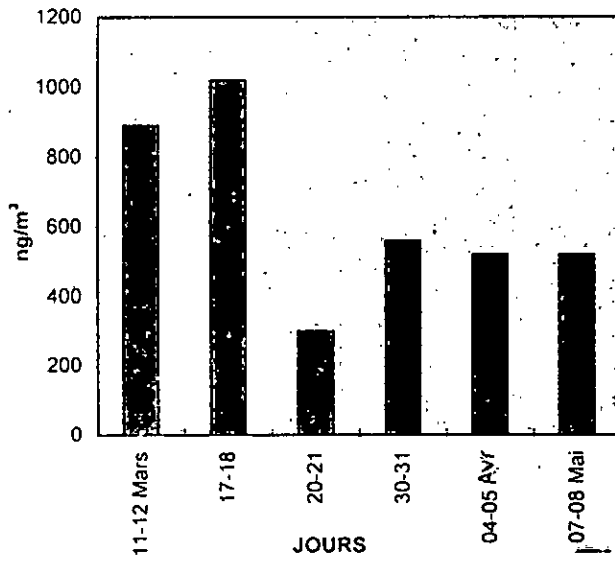
**TABLEAU 09 : Teneurs atmosphériques moyennes en Fe, Pb, Zn, Cu, Ni et Mn à Alger et à Cinq-Maisons (E.N.P).**

| Site  | Jours       | Teneurs en TSP ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Teneurs en métaux ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ) |       |     |     |     |    |
|---|-------------|---|--|-------|-----|-----|-----|----|
|   |             |   | Fe   | Pb    | Zn  | Cu  | Ni  | Mn |
| Bd.Amirouche<br>(Alger Centre)                            | 11-12 Mars  | 65,8  | 2.843  | 890   | 430 | 159 | 148 | 31 |
|   | 17-18 Mars  | 81,1  | 1.339  | 1.020 | 40  | 43  | 15  | 7  |
|   | 20-21 Mars  | 56,6  | 761  | 300   | 90  | 57  | 10  | 3  |
|   | 30-31 Mars  | 51,5  | 859  | 560   | 180 | 41  | 32  | 1  |
|   | 04-05 Avril | 48,1  | 564  | 520   | 60  | 26  | 16  | 4  |
|   | 07-08 Mai   | 55,5  | 920  | 520   | 20  | 38  | 15  | 7  |
| Ecole<br>Nationale<br>Polytechnique<br>(Cinq-<br>maisons) | 13-14 Mai   | 44,76                                       | 531  | 270   | 70  | 27  | 5   | 10 |
|   | 16-17 Mai   | 49,30                                       | 518  | 190   | 40  | 30  | 8   | 4  |
|   | 18-19 Mai   | 48,57                                       | 452  | 155   | 57  | 23  | 9   | 16 |
|   | 20-21 Mai   | 47,14                                       | 321  | 286   | 37  | 16  | 2   | 30 |
|   | 23-24 Mai   | 50,71                                       | 1.644  | 614   | 178 | 14  | 4   | 54 |
|   | 25-26 Mai   | 80,71                                       | 1.321  | 628   | 78  | 13  | 7   | 45 |
|   | 27-28 Mai   | 72,14                                       | 1.237  | 634   | 161 | 27  | 5   | 39 |

La teneur en Cd est inférieure à la limite détection ( $< 10 \text{ ng} / \text{m}^3$ ).

Les figures N°13 à 18 illustrent les évolutions temporelles des teneurs et les fractions massiques pour chaque métal étudié.

ALGER CENTRE



CINQ MAISONS (ENP)

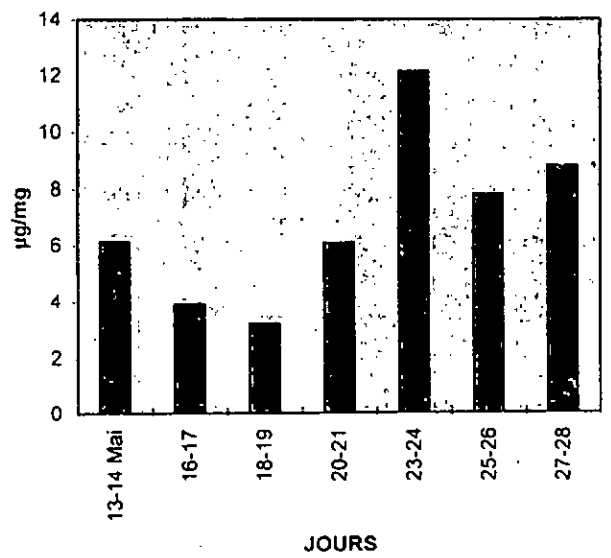
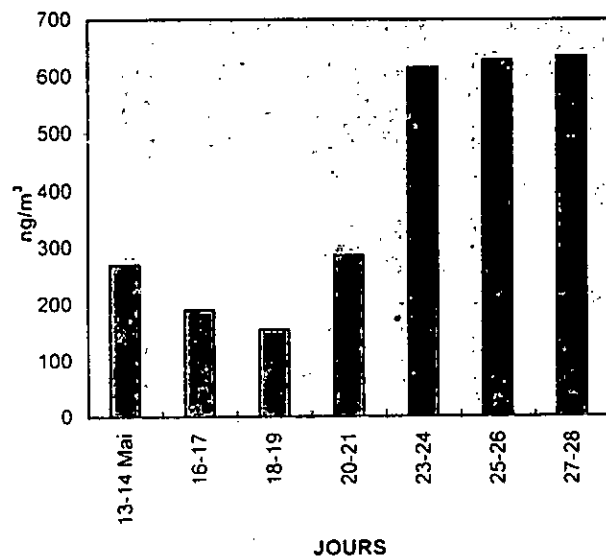
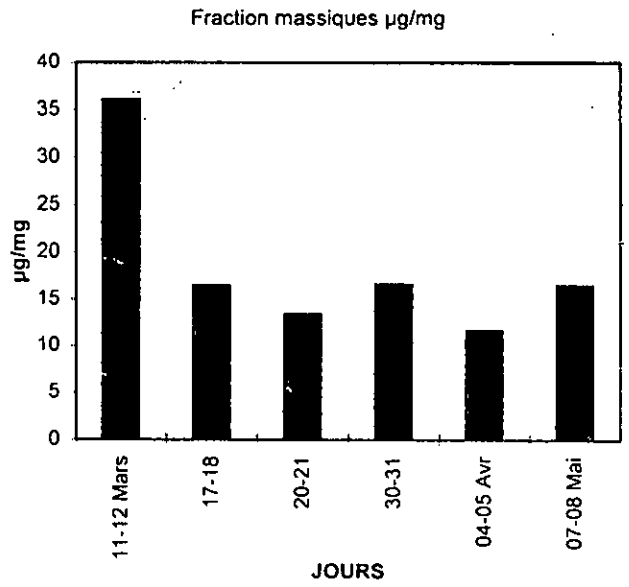
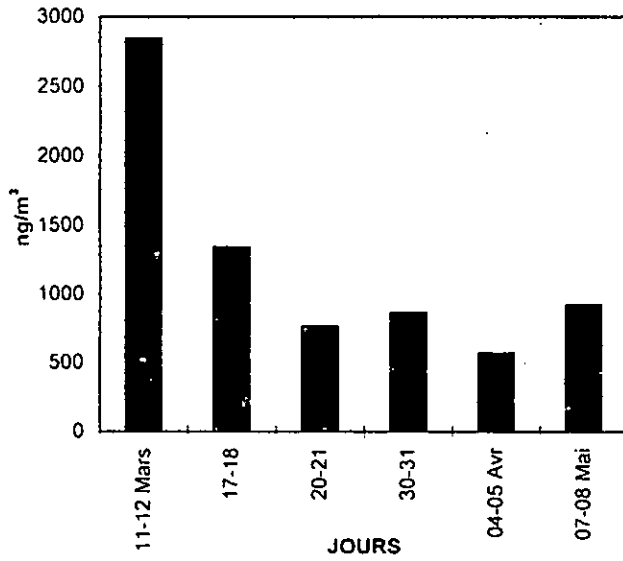


Figure N°13 : Teneurs atmosphériques en Pb et fractions massiques correspondantes

**ALGER CENTRE**



**CINQ MAISONS (ENP)**

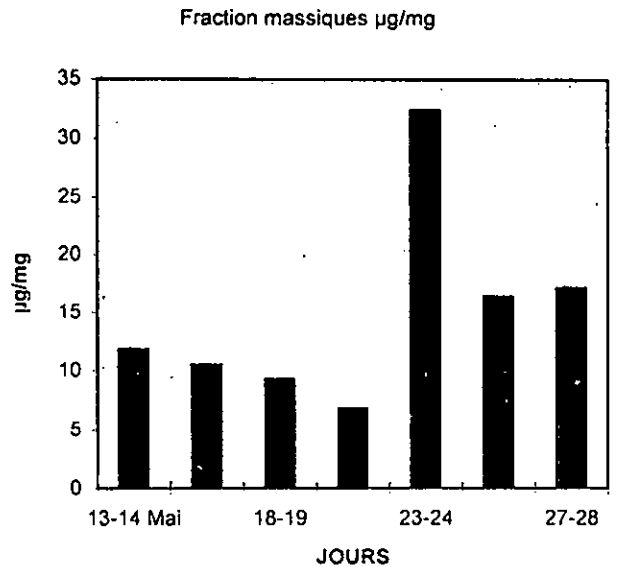
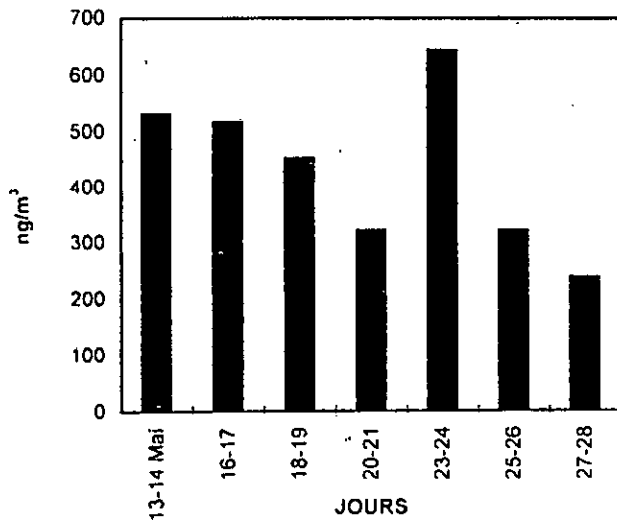
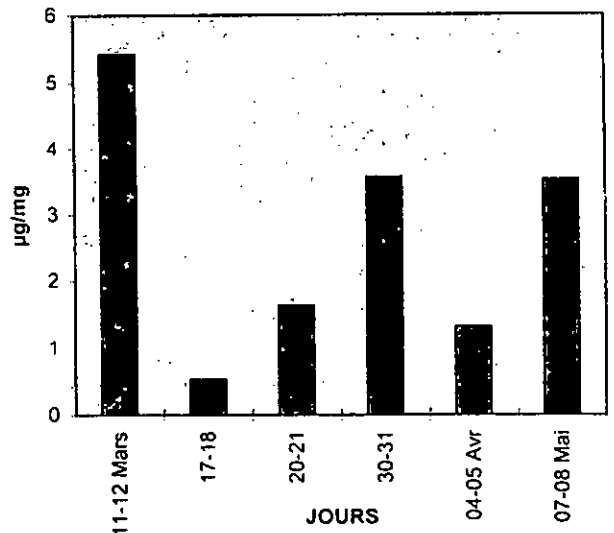
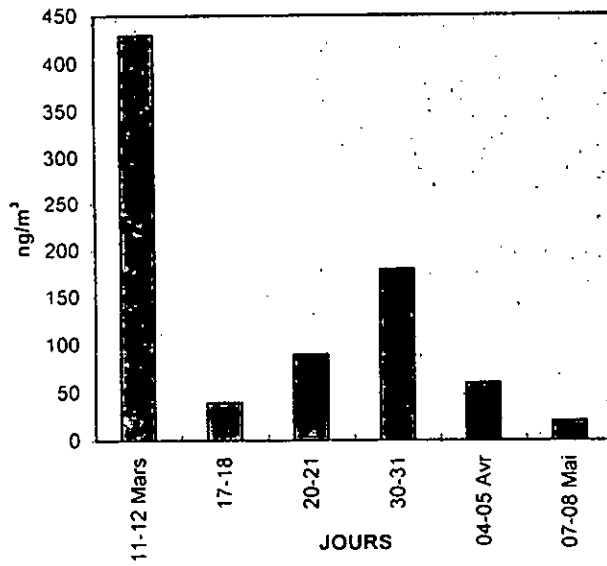


Figure N°14 : Teneurs atmosphériques en Fe et fractions massiques correspondantes

ALGER CENTRE



CINQ MAISONS ( ENP )

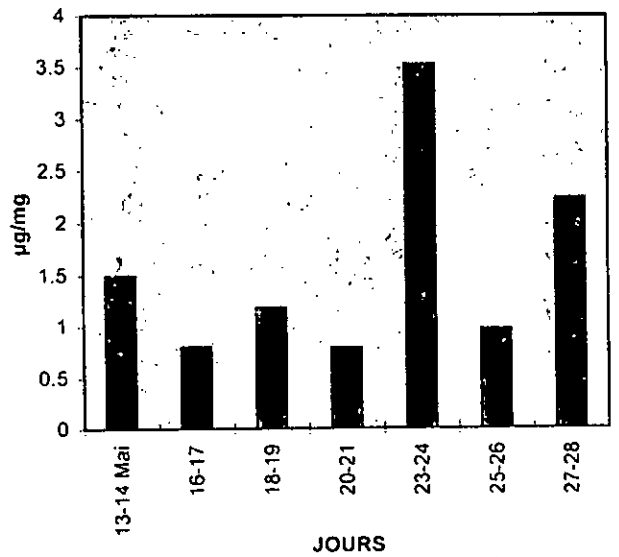
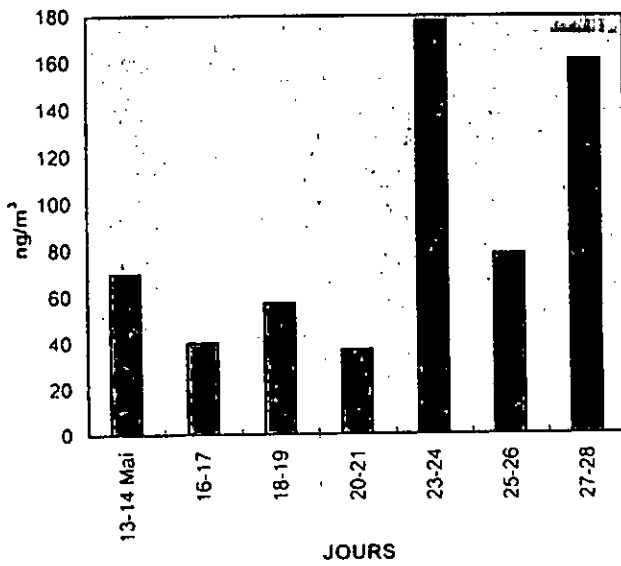
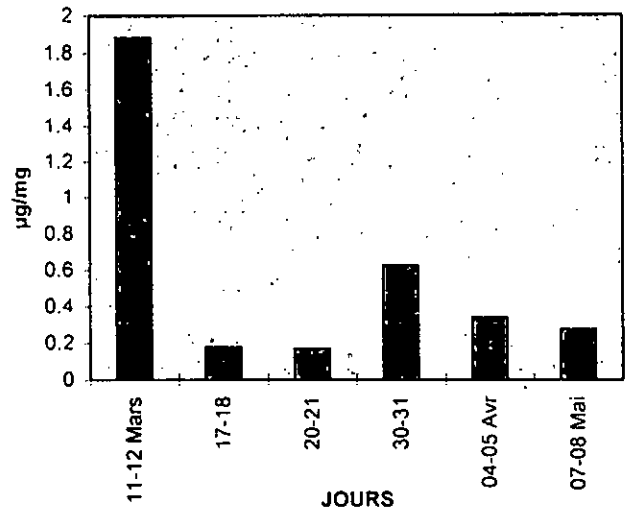
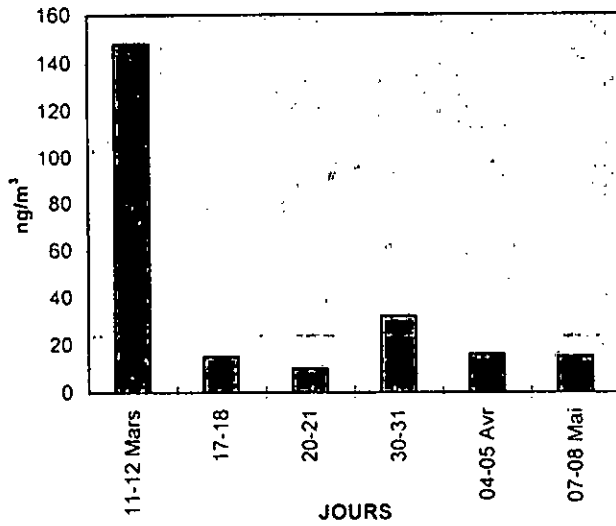


Figure N°15 : Teneurs atmosphériques en Zn et fractions massiques correspondantes

ALGER CENTRE



CINQ MAISONS (ENP)

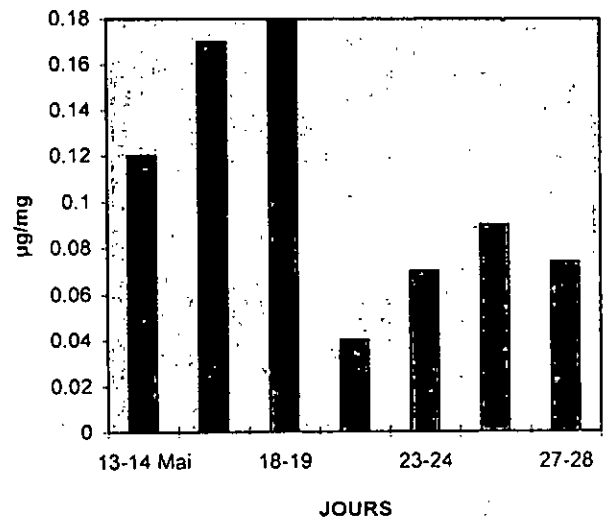
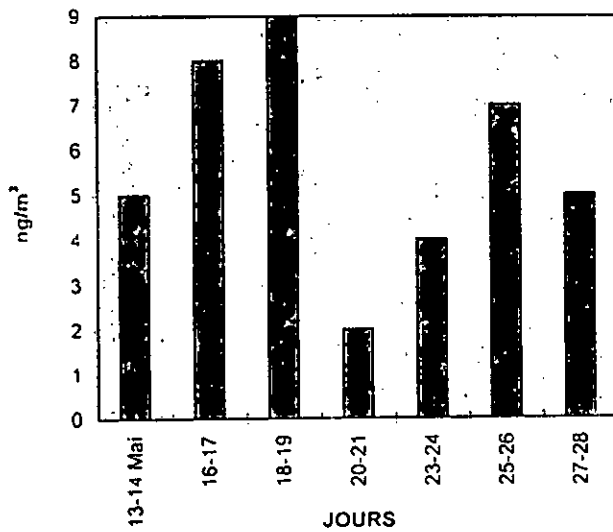
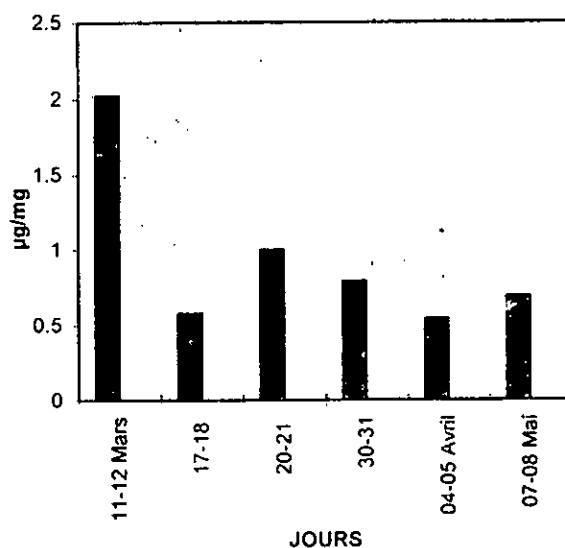
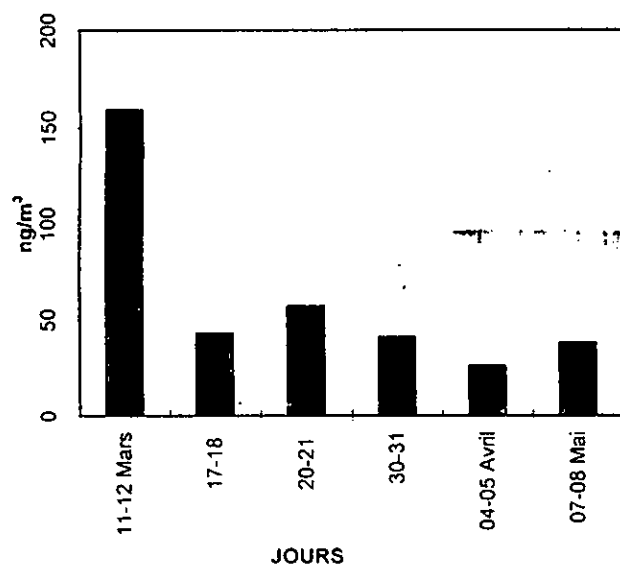


Figure N°16 : Teneurs atmosphériques en Ni et fractions massiques correspondantes

**ALGER CENTRE**



**CINQ MAISONS ( ENP )**

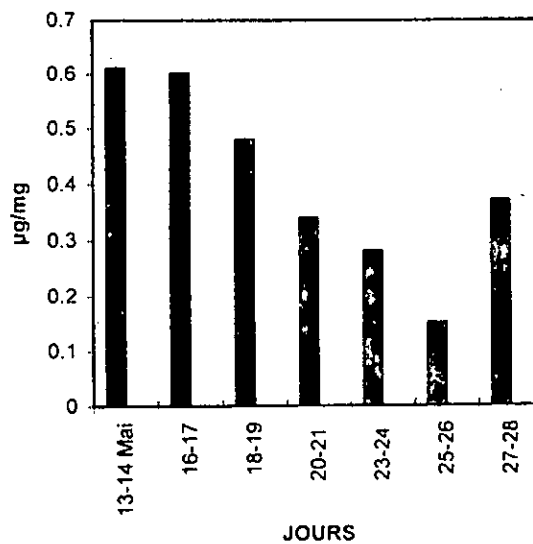
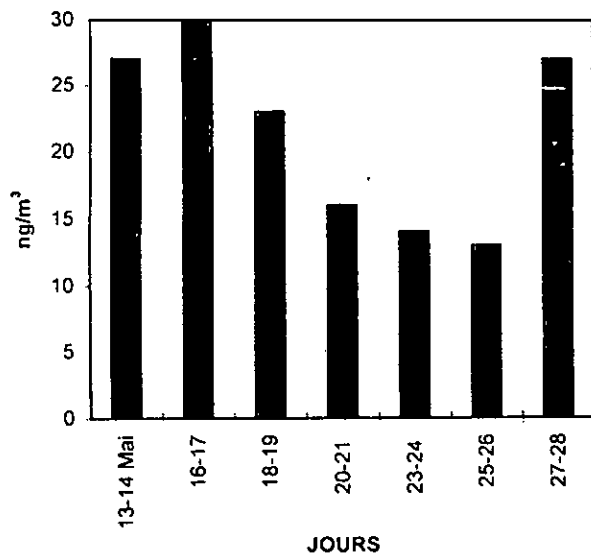
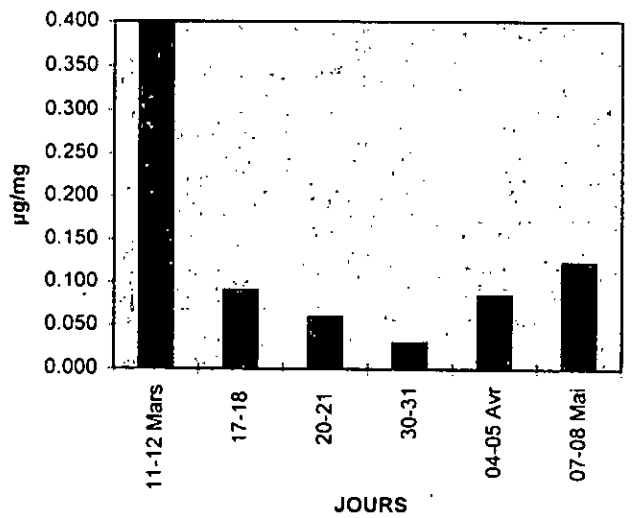
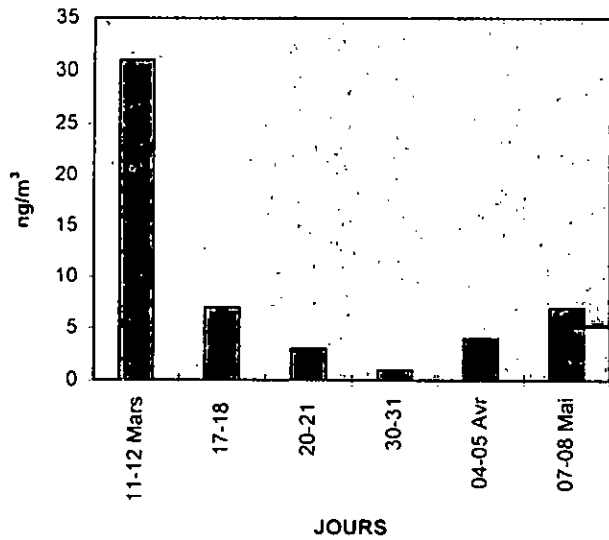


FIGURE N°17 : Teneurs atmosphériques en Cu et fractions massiques correspondantes

ALGER CENTRE



CINQ MAISONS (ENP)

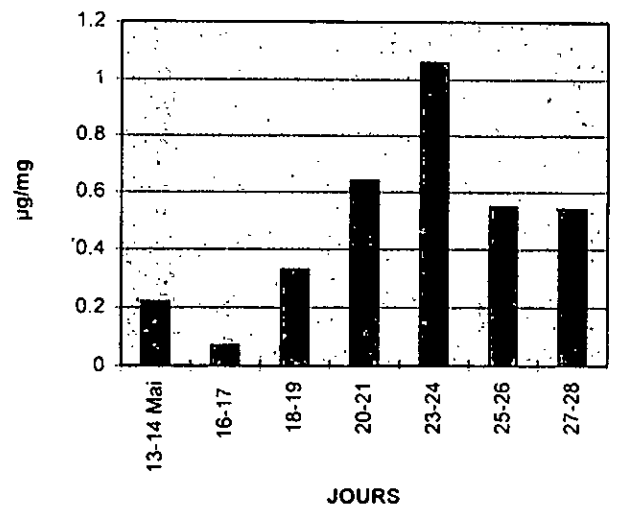
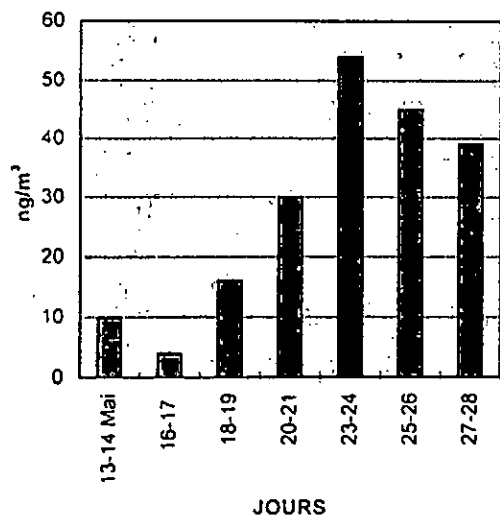


Figure N°18: Teneurs et fractions massiques en Mn des TSP.



D'après les résultats obtenus, on remarque qu'au sein du même site, il existe une importante variation temporelle des teneurs atmosphériques en certains métaux lourds.

C'est, par exemple, le cas du Pb, dont les teneurs varient de 0,30 à 1,02  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  avec une moyenne de 0,635  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  à Alger Centre, et de 0,19 à 0,634  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  avec une moyenne de 0,400  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  à Cinq-maisons (E.N.P).

Dans le cas du fer les teneurs varient de 0,564 à 2,843  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  avec une moyenne de 1,214  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  à Alger, et de 0,321 à 1,644  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  avec une moyenne de 0,860  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  à Cinq-maisons (E.N.P).

Les teneurs atmosphériques moyennes et les fractions massiques moyennes pour chaque élément aux deux sites (Alger Centre et Cinq-maisons (E.N.P)) sont résumées dans le tableau N°10 et illustrées en figures N°19 et figure N°20.

**TABLEAU 10 : Teneurs et fractions massiques en métaux lourds mesurées à Alger Centre et à Cinq-Maisons (E.N.P)**

| Elément | Alger Centre                       |   | Cinq-Maisons (E.N.P)               |   |
|---------|------------------------------------|---|------------------------------------|---|
|         | Teneurs ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ) | Fractions Massiques ( $\mu\text{g}/\text{mg}$ ) | Teneurs ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ) | Fractions Massiques ( $\mu\text{g}/\text{mg}$ ) |
| Pb      | 635                                | 10,04   | 400                                | 6,85  |
| Fe      | 1.214                              | 18,49   | 860                                | 14,84   |
| Zn      | 137                                | 2,47  | 89                                 | 1,57  |
| Ni      | 39                                 | 0,65  | 6                                  | 0,11  |
| Cu      | 61                                 | 0,94  | 21                                 | 0,40  |
| Mn      | 9                                  | 0,13  | 28                                 | 0,48  |

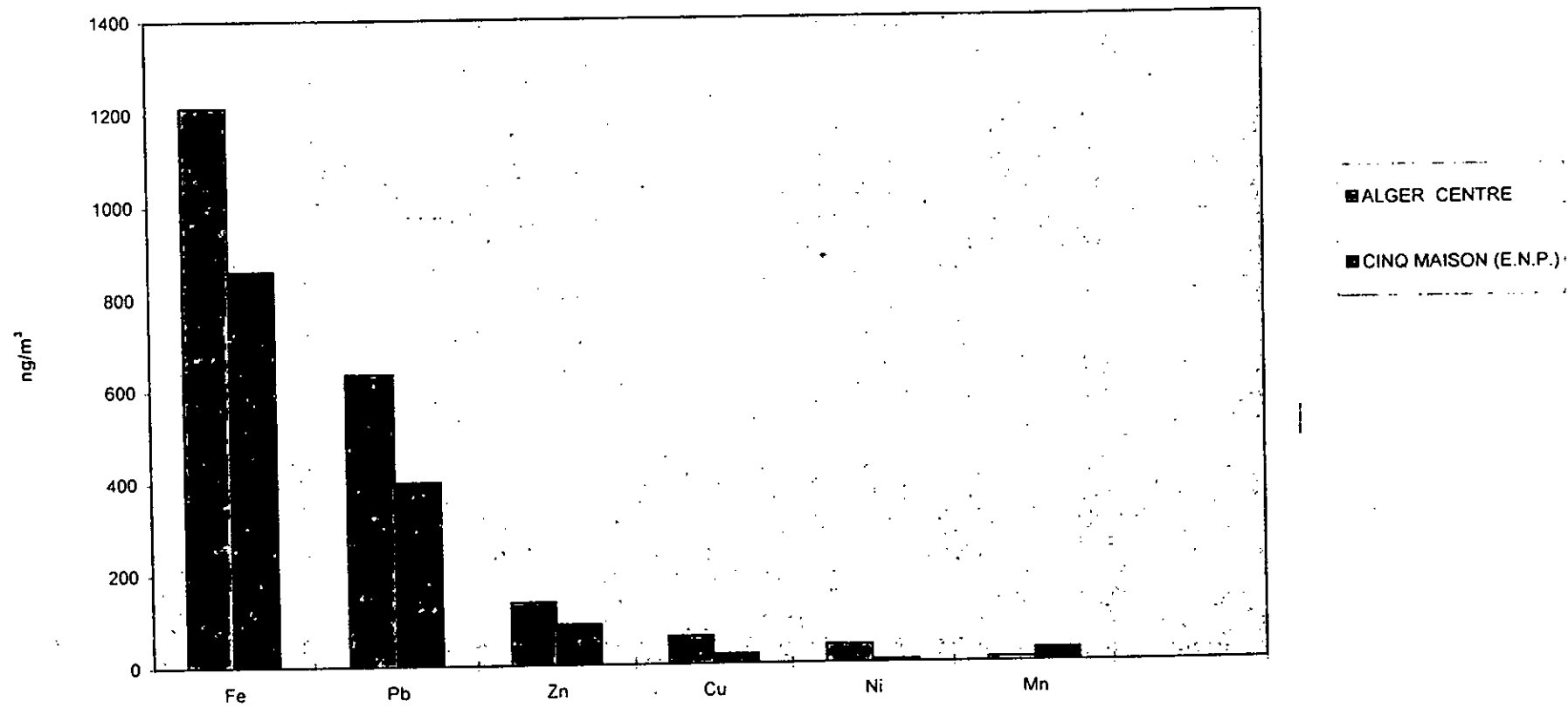


Figure 19: Comparaison des teneurs moyennes en métaux lourds enregistrées à Alger-Centre, à celles de Cinq-maisons (E.N.P.)

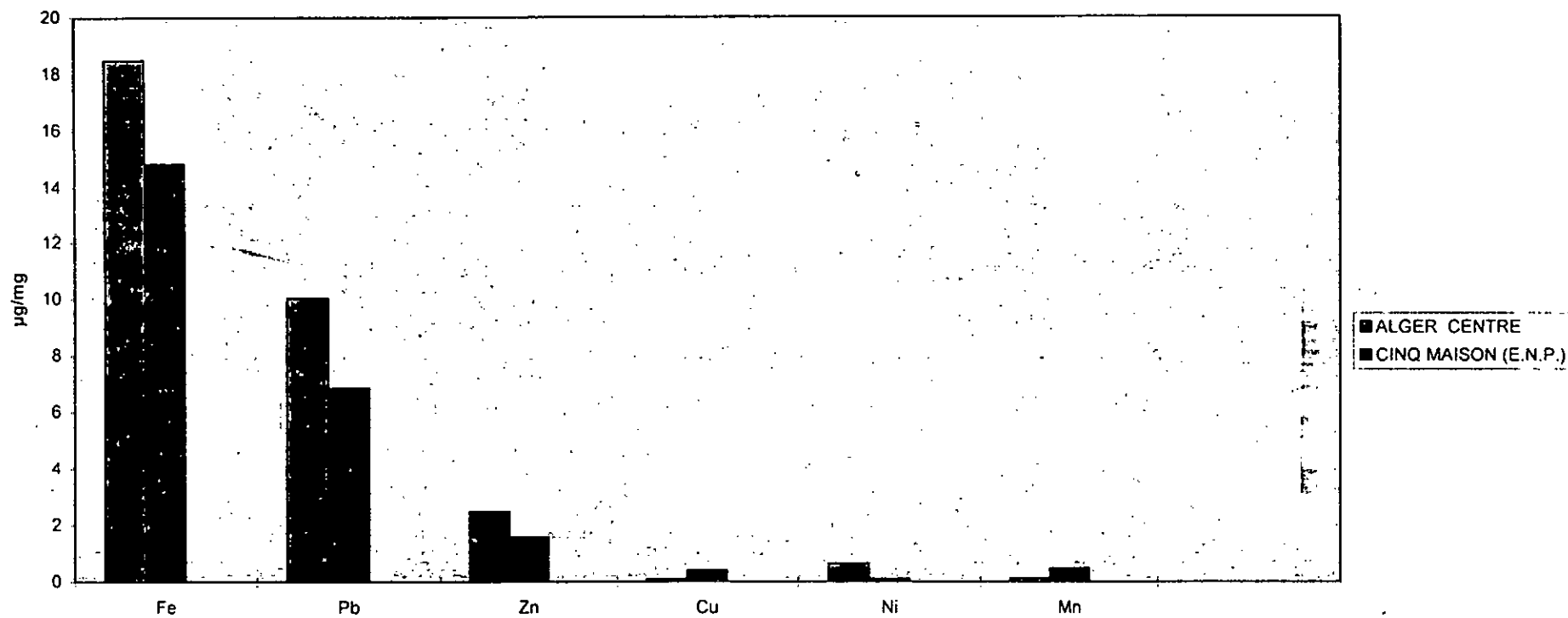


Figure 20: Comparaison des fractions massiques du Fe, Pb, Zn, Cu, Ni et Mn entre les sites d'Alger centre et cinq maisons (E.N.P)

On constate par ailleurs qu'il existe, d'un site à un autre une importante différence dans les teneurs atmosphériques en métaux lourds.

A l'exception du Mn, la contamination de l'atmosphère par les métaux lourds étudiés est plus importante à Alger Centre au Bd Colonel Amirouche qu'au niveau de l'E.N.P (figure 19).

Parmi les composés dosés et quelque soit le site, le fer est l'élément le plus abondant suivi du Pb, et du Zn,...

En moyenne les teneurs en Fe, Pb, et Zn sont à Alger Centre une fois et demi plus élevées qu'au deuxième site. Ce résultat reflète bien l'influence du trafic routier, surtout en ce qui concerne le Pb qui provient uniquement des activités du transport. Ainsi au Bd Colonel Amirouche où le prélèvement se fait à proximité de l'axe routier, les teneurs dépassent parfois le niveau de  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . De plus dans cette rue de type Canyon, la ventilation naturelle est fort réduite et il y a une certaine accumulation des particules métalliques.

En ce site où la pollution d'origine naturelle n'est pas importante, une bonne partie du fer et du zinc, provient du trafic routier (usure des pièces métalliques et émission de zinc par les frottements des pneus).

Au site de Cinq-maisons (E.N.P) qui connaît une bonne ventilation et dont le poste de mesure est assez éloigné de l'important axe routier de la RN5, les teneurs en Pb sont moindres et l'apport d'origine naturelle est plus important, d'où des teneurs plus élevées en Mn.

En ce qui concerne l'examen des fractions massiques, il est intéressant de relever que sur les deux sites, l'évolution temporelle des fractions massiques du Pb et du Fe montre une certaine homogénéité, c'est à dire pour une teneur en TSP variable, le taux de présence de l'élément métallique varie peu. Ce résultat signifie que ces deux polluants métalliques proviennent de la même source : la combustion de l'essence pour le Pb et les émissions naturelles et en partie du trafic routier pour le fer.

Pour les autres métaux lourds, la forte hétérogénéité dans les fractions massiques implique l'existence de plusieurs sources naturelles et anthropogéniques diffuses ou ponctuelles.

Une comparaison des fractions massiques moyennes entre les deux sites étudiés (figure 20) montre que les TSP mesurées à Alger Centre sont plus riches en métaux lourds et ce à l'exception du Mn. Ce résultat rejoint la constatation faite sur les teneurs atmosphériques en métaux lourds.

Dans les TSP prélevées à Alger Centre, le Pb contribue à 1% de la masse, il ne participe plus qu'à hauteur de 0,7% à Cinq-Maisons.

### VI.2.2. Ampleur de la pollution Métallique et Comparaison avec les teneurs observées dans d'autres métropoles :

En l'absence de normes et de réglementation nationales, il est nécessaire de comparer les résultats de notre étude aux normes étrangères et aux niveaux de pollution mesurés de part le monde.

Les normes et recommandations relatives à la présence des métaux lourds dans l'air ambiant n'existent que pour le Pb, Cd, et Mn. [34]

|   |   |
|---|---|
| Pb : 0,5 à 1,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$<br>: 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Valeur guide de l'O.M.S.<br>Recommandation de la C.E.E.   |
| Mn : 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$   | Valeur guide de l'O.M.S.                                  |
| Cd : 10 $\text{ng}/\text{m}^3$  | Valeur guide de l'O.M.S et<br>recommandation de la C.E.E. |

En comparaison à la norme O M S, le Pb atmosphérique mesuré aux deux sites étudiés se trouve juste à la limite tolérée (sur les 13 échantillons étudiés, on a une seule teneur supérieure à 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Le seuil limite proposé par la C.E.E n'a par contre pas été atteint.

Il existe un grand nombre d'études effectuées sur la pollution plombifère dans les milieux les plus oscillants, avant l'introduction de l'essence sans Pb et sa généralisation, entre 0,2 et 2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

En 1987, les moyennes annuelles du Pb s'élevaient à Amsterdam à 0,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , à Hamburg 0,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , à Bruxelles 0,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , à Athènes 0,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , Dublin à 0,9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , Barcelone 1,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et à Lyon à 2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . [40]

Par rapport à ces grandes agglomérations dont le trafic routier est bien plus intense qu'à Alger, les teneurs que nous avons mesurées sur les deux sites sont excessives.

Ceci est d'autant plus inquiétant que la tendance chez nous, est vers une pollution plus intense, alors qu'ailleurs, la situation est inversée. L'exemple que nous présentons au tableau 11, est à ce sujet instructif.

**TABLEAU 11: Evolution des teneurs atmosphériques en Pb en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . [31,39]**

| ANNEE | Marseille      | Lille          | Alger Centre |
|-------|----------------|----------------|--------------|
| 1984  | 1,7            | 1,4            |              |
| 1989  | 0,5            | 0,52           |              |
| 1991  | 0,25           | 0,25           |              |
| 1996  | tend vers zéro | tend vers zéro | 0,52 à 1,02  |

Ainsi, bien que la teneur actuelle mesurée à Alger Centre est en deça des teneurs mesurées il ya quelques années dans les villes européenne, il ya lieu de réfléchir sérieusement sur ce problème qui s'accroît de plus en plus.

Les teneurs en Pb sont naturellement plus intense dans certains sites spécifiques. C'est le cas par exemple des stations service de distribution d'essence. Dans ce contexte, une étude menée parallèlement à notre travail au niveau de la Station Naftal de cité radieuse située à quelques 200m de notre poste de mesure de Cinq-maisons a mis à jour des teneurs en Pb total (organique et minéral) qui dépassent le taux de  $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ , soit cinq fois les niveaux que nous avons mesurés [38]. En ces sites spécifiques l'évaporation lors de la distribution de l'essence est à l'origine de ces fortes émissions de Plomb.

Rappelons ici qu'en milieu non pollué, les teneurs atmosphérique en Plomb sont de l'ordre de  $0,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . [34]

Une étude comparative englobant les autres métaux lourds est présentée dans le tableau 12.

**TABLEAU 12: Comparaison des teneurs en Fe, Pb, Mn, Cu, Zn et Mn dans certaines villes du monde.[34]**  
**Les teneurs sont données en ng/m<sup>3</sup>.**

| LIEU               | Antwerp         | Athènes          | Tokyo           | Paris                    | Paris              | Alger Centre             | Cinq - maisons   |
|--------------------|-----------------|------------------|-----------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|------------------|
| Périodes           | Jan-Fev<br>1987 | Avr-Juin<br>1986 | Oct-Nov<br>1986 | Jan-Fev-<br>Mars<br>1992 | Juin-Juill<br>1992 | Avr-<br>Mars-Mai<br>1996 | Mai-Juin<br>1996 |
| Type de particules | T.S.P           | 2,3 µm           | T.S.P           | PM10                     | PM10               | T.S.P                    | T.S.P            |
| Fe                 | 275             | 1.100            | 2.200           | 808                      | 584                | 1.214                    | 860              |
| Zn                 | 64              | 273              | 370             | 188                      | 88                 | 137                      | 89               |
| Mn                 | 11              | 21               | 100             | 22                       | 15                 | 9                        | 28               |
| Cu                 | 13              | 50               | 3.100           | 31                       | 18                 | 61                       | 21               |
| Pb                 | 74              | 699              | 170             | 162                      | 74                 | 635                      | 400              |
| Ni                 | 5,8             | 11,8             | 10              | 12,8                     | 3,4                | 39                       | 6                |

A partir de cette comparaison, on peut conclure que les niveaux de pollution métallique à Alger sont intermédiaires entre ceux observés dans un site périurbain tel Antwerp, situé à 30Km de Bruxelles et ceux observés dans le centre des grandes métropoles comme Athènes et Tokyo qui présentent la particularité d'être influencées par d'importantes sources industrielles.

Il est intéressant aussi de comparer les fractions massiques, le tableau 13 présente une telle comparaison entre Alger et Paris.

**TABLEAU 13 : Comparaison des fractions massiques des métaux lourds véhiculés par les particules en suspension.**

|                                     | Teneurs en particules ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | % Fe | % Pb | % Zn | % Cu  | % Ni | % Mn  |
|-------------------------------------|--|------|------|------|-------|------|-------|
| Paris (hiver 1992) [34]             | 51   | 1,6  | 0,32 | 0,38 | 0,058 | 0,02 | 0,042 |
| Alger Centre (Printemps 96)         | 59,1   | 1,85 | 1,00 | 0,25 | 0,09  | 0,07 | 0,013 |
| Cinq maisons (Alger) (Printemps 96) | 56,1   | 1,48 | 0,69 | 0,16 | 0,04  | 0,01 | 0,05  |

Ce tableau montre une fois de plus l'ampleur de la charge polluante plombifère véhiculée par les particules en suspension. Cette charge est à Alger-Centre 3 fois plus élevée qu'à Paris.

Ainsi, à part le problème posé par les teneurs excessives en Pb, la ville d'Alger qui n'est pas une agglomération à forte industrie ne fait pas l'objet d'une importante pollution métallique.



## CONCLUSION:

En résumé, au cours de notre étude sur la pollution particulaire dans la région d'Alger, nous avons pu faire une évaluation des teneurs en particules totales en suspension au niveau de deux sites.

Le premier à Alger Centre, qui est un site purement urbain, le deuxième à Cinq maisons (ENP), et qui peut être considéré comme étant site périurbain.

Cette étude nous a permis de conclure que la région d'Alger présente des teneurs en TSP plus ou moins comparables à celles mesurées dans les grandes villes du monde.

Avec des teneurs moyennes de l'ordre de 59,1 et 56,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivement pour Alger Centre et cinq maisons (ENP), les niveaux de TSP mesurés en ce printemps sont inférieurs à la norme préconisée par l'O.M.S.

S'agissant cependant en majeure partie de fumée noire de faible granulométrie dont le seuil toléré est de 60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , on peut conclure qu'on est en présence d'une pollution légèrement excessive. Avec l'intensification du trafic routier et en l'absence de systèmes de dépollution et de contrôles techniques des véhicules, ces niveaux connaîtront certainement une évolution croissante.

Dans le volet relatif à l'étude des teneurs atmosphériques en métaux lourds associés au TSP : Fe, Pb, Zn, Cu, Ni et Mn, nous avons montré que c'est surtout le plomb qui pose problème. Ce polluant issu exclusivement du trafic routier se retrouve à Alger Centre à une teneur moyenne de 0,635  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  avec des maxima supérieurs à 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La valeur guide de l'O.M.S est à quelques exceptions près respectée, mais le problème reste préoccupant car à l'inverse de ce qui se passe dans le monde, ses teneurs évolueront vers la hausse.

Avec la constante rapide baisse des teneurs atmosphériques en Pb dans les villes européennes, suite à l'introduction de l'essence exempte du Pb, les teneurs mesurées actuellement à Alger sont parmi les plus élevées des grandes agglomérations, d'où le rapport alarmant et accablant que la banque mondiale a présenté en Juin 96 lors des travaux préparatoires à la conférence U.N. sur l'habitat tenue à Istanbul.

Dans cette estimation, Alger est présentée avec le Caire, Karachi, etc... comme étant une des villes les plus polluées par le plomb.

Nous avons, par ailleurs, montré que la charge massique en Pb véhiculée par les particules aéroportées s'élève à 1 % à Alger Centre ; Ce taux n'est que de 0,7 % à Cinq maisons. A Paris en 1992, cette fraction massique était de l'ordre de 0,3 %.

Ces chiffres montrent clairement l'ampleur de la pollution par le plomb que nos raffineries ajoutent à l'essence à raison de 0,4 g/l d'essence.

En ce qui concerne les autres métaux lourds, leurs teneurs évoluent dans une gamme assez faible qui, à l'heure actuelle ne peut être considérée comme étant préoccupante. C'est le reflet d'une ville qui n'est pas fortement industrialisée.

En fin, et au vu des résultats présentés et discutés, la principale recommandation consiste en une prise en charge réelle du trafic routier :

- Contrôle technique régulier des véhicules afin d'améliorer la combustion et réduire les fumées noires.
- Réduction de la teneur en plomb dans l'essence et introduction dans un futur proche de l'essence exemptée du plomb. Dans ce contexte, la banque mondiale estime que l'adaptation des raffineries modernes à la production d'essence sans plomb est techniquement simple et ne consiste pas des investissements colossaux. Le coût qui en résulterait, serait de 0,02 dollars US, Par litre de carburant soit environ 1 DA/l.

Devant l'inflation que notre pays traverse actuellement, ce prix à payer pour un environnement sain est dérisoire !.

## BIBLIOGRAPHIE

- 1- M. BARNEA, P. URSU, "Pollution et protection de l'atmosphère".  
ed. EYROLLES, par 1974.
- 2- F. RAMADE, "Elément d'Ecologie", M.C. GRAW HILL, Paris 1982
- 3- J.P. DETRIE, "La pollution atmosphérique", DUNOD, Paris 1969.
- 4- J.O. BUTLER, "Air pollution chemistry", Académie Press London.  
1979.
- 5- C. DANG, T.P. FONTELLE, R. LEYGONIE, "les émissions  
de poussières et généralités sur leur mesure à l'émission".  
Pollution Atmosphérique, Juillet-Septembre 1988, PP-301-308.
- 6- R. LEYGONIE, "les métaux lourds dans l'air : sources, émissions,  
mesures, effets".  
Pollution Atmosphérique. Juillet-Septembre 1993 PP. 63-74.
- 7- M. BOUGHEDAOU, R. KERBACHI, "la pollution particulaire à Rais-  
Hamidou, ampleur et dispersion" AJOUT, volume 10, série D.N°. 1.  
1994, PP. 149-168.
- 8- R. KERBACHI, "cours pollution atmosphérique" 5ème année,  
ENP Alger 1995.
- 9- P. DEGOBERT, "pollution atmosphérique : origine et réduction des  
émissions au niveau moteur".  
Techniques d'ingénieurs. B 2710, 5 . 1994 . PP. 01-16.
- 10- P.H. BRUNNER, "Approche globale des problèmes d'environnement  
liés à l'incinération d'ordures ménagères".  
Pollution Atmosphérique, Juillet-Septembre. 1988, PP. 301-308.
- 11- F. PETIT. COVIOUX, A. PERSON, Y. LE. MOULLEC,  
"Connaissance des particules atmosphériques".  
Pollution Atmosphérique, Janvier-Mars 1990 PP. 21-30.

- 12- AK KLEITZ, O. BOULAUD, "Granulométrie des particules en mouvement et des aérosols".  
Techniques d'ingénieur. R. 2360. Juillet 1995 . PP. 01-26.
- 13- G. MADELAINE, "Métrologie des Aérosols"  
Pollution Atmosphérique, Janvier-Mars 1990. PP. 14-19.
- 14- A. RENOUX, "Les aérosols dans notre environnement".  
Pollution Atmosphérique Janvier-Septembre 1988. PP. 277-283.
- 15- A. RENOUX, "Ce qu'il faut savoir sur l'aérosol atmosphérique".  
Pollution Atmosphérique. Janvier-Mars 1990. PP. 10-20.
- 16- Groupe d'ingénieurs, Médecins et spécialistes de l'INRS, "Aérosols et poussières".  
Techniques d'ingénieurs A 8630 Novembre 1990 PP. 10-12.
- 17- J.C. RONNEAU, "Les particules atmosphériques", Conférence donnée à l'ENP Alger 1992.
- 18- A. ASSAILLY, "Les poussières". Que sais-je ? N°. 717. 1956.
- 19- A.C. STERN, "Air pollution". 3ème édition, volume 1, London 1976.
- 20- P. CHOVIN, A. ROUSSEL, "physiochimie et physiopathologie des polluants atmosphériques". Paris, 1973.
- 21- D. BROCHARD, J.C. PAIRON, J. BIGNON, "Aérosol et santé :  
Déposition et épuration des particules inhalées".  
Pollution Atmosphérique. Avril-Juin 1990. PP. 178-182.
- 22- A. VIALA, F. GOUEZD, "Action sur la santé de l'Homme des métaux lourds (pb, Cd, V, Hg) en suspension aérienne aux faibles concentrations".  
Pollution Atmosphérique. Octobre-Décembre 1988, PP. 389-393.
- 23- C. ELICHEGARAY, "Aérosols et visibilité, aérosols et climat".  
Pollution Atmosphérique. Janvier-Mars 1990. PP. 07-09.

- 24- W.H. SCHROEDER, M. DOBSON, D.M. KANE, N.D. JHONSON, "Toxic trace éléments associated with air born particule matter". A. Review. J.A.P.C.A. Volume 37. N°. 11. 1987. PP. 1267-1285.
- 25- R. SHAW, "La pollution par les particules atmosphériques". pour la science, Octobre 1987. PP. 22-31.
- 26- J. RODIER, "L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer" ; London 1977.
- 27- Y.BOUTIN, R.LEDUC, " Les poussières en suspension à Québec " Pollution atmosphérique : Octobre, Décembre 1983, P.P 292-298.
- 28- E.LAHMAN, " Immissions messung in der B.R.D ", Stand, Band 47 N°314,1987 P.P 82-87
- 29- C.HUTTER et J.HERTZ, Schwermetal-Immissionen in der Gesant, déposition und schwebstand in wohn und erholungsgebieten der stadt Zurich, Stand, Band 46, N°7/8, 1986, P.P 327-333.
- 30- F. VERLEY, "pollution, les dangers de la ville". Science et vie n°. 918 Mars 1994. PP. 37-47.
- 31- P.THOMAS, C.VOISIN, C.MERDY, " Huit années de mesures des métaux lourds dans l'atmosphère de l'agglomération lilloise " Pollution atmosphérique, Juillet-Septembre 1993, P.P 89-97.
- 32- A.VIALA, F.GOVEZO, B.MALLET, J.FONDARAI " Mesure de quatre métaux traces ( Pb, Cd, Cr, Zn) dans les poussières atmosphériques à Marseille de 1977 à 1979 " Pollution atmosphérique, Juillet-Septembre 1981, P.P 207-220.
- 33-N.KOUTAL " Etude de l'ozone et de ses précurseurs les Nox dans le grand Alger " Thèse magister, E.N.P 1995.
- 34- A. PERSON, F. PETIT. COVIAUX, Y. LE MOULLEC, B. FESTY, "Contribution des principales sources en métaux et métalloïdes à la pollution particulaire dans l'agglomération parisienne". Pollution Atmosphérique Juillet-Septembre 1993.PP. 75-88.

- 35- S. NESSAH, "Contribution à études des TSP dans le grand Alger"  
P.F.E ENP 1995.
- 36- Rapport AIR MARAIX, la qualité de l'air à Marseille - AIX  
1995. PP. 13-15.
- 37- Norme ISO 9855, Air ambiant, dosage du Plomb dans les particules  
d'aérosols collectées sur des filtres. France 1993.
- 38- Y. Kerchiche, M. Rebahi, PFE, Juin 1996, ENP.
- 39- F. Grimaldi et al, "action du comité Marseille-Provence de l'APPA en  
matière d'étude des polluants métalliques de l'atmosphère".  
Pollution atmosphérique n°. 139 PP. 98-103 (1993).
- 40- J.P. Olivier, J.P. Vidal, R. Stroebel. "Surveillance du plomb  
particulaire atmosphérique en sites urbains".  
Pollution atmosphérique, Janvier-Mars 1990. PP. 31-37.