

6/97

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

## ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département : Génie de l'Environnement

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

### Projet de fin d'Etudes

### Thème

*Etude des Particules en Suspension dans  
l'Agglomération d'Alger*

Proposé par :

Mr Pr. KERBACHI

Dirigé par :

Mr A. NAMANE

Mr Pr. R. KERBACHI

Etudié par

Mr A. BOUKADOUM

Soutenu devant le jury

Pr. S.E. CHITOUR

Mr A. NAMANE

Pr R. KERBACHI

Mme N. BELHANACHE

Mr M. BOUGHEDAOU

Mr H. LOUNICI

Président

promoteur

Co-Promoteur

Examinatrice

Examinateur

Examinateur

Prof. ENP

C.C. ENP

Prof. ENP

M.C. ENP

M.A. USTB

C.C. Tizi Ouzou

Promotion 1997

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

## **DEDICACES**

**JE DEDIE CE MODESTE TRAVAIL A :**

**MES CHERS PARENTS**

**MES SŒURS ET FRÈRES : MOHAMED RATIBA SAMIRA NANI ET ALI**

**MES GRANDS PARENTS ET SURTOUT GRANDS MERE DELLOULA**

**A MON ONCLE AMMAR SA FEMME ABLA ET LEIRS FILS HAITHEM**

**A MON COUSIN RIADH**

**ET A TOUTE MA FAMILLE**

**A MES AMIS (ES) : HAKIM SIHEM DJAMEL NADIA HAKIM BELLOUL ET A  
TOUT CE QUI ME SONT CHERS**

# Remerciements



*Pour leur apport et soutien, je tiens à remercier Prof. R. Kerbachi et A. Namane qui n'ont jamais cessé de m'orienter et de me prodiguer leurs précieux conseils.*

*Je tiens également à remercier les membres du jury :*

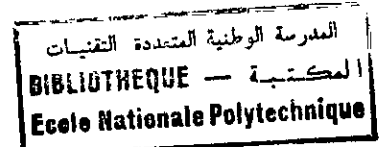
- |                           |                     |
|---------------------------|---------------------|
| <i>- Mr S. E. Chitour</i> | <i>Président</i>    |
| <i>- Mme Belhanache</i>   | <i>Examinatrice</i> |
| <i>- Mr Boughedaoui</i>   | <i>Examinateur</i>  |
| <i>- Mr H. Lounici</i>    | <i>Examinateur</i>  |

*Je tiens aussi à remercier Mr Tarek, Mr Bouaiche El Hadi du HCR, ainsi que Mr Benbata et Mme Boutemeur du CRD pour leur aide précieuse dans l'élaboration de cette étude.*

*Je remercie en outre l'ensemble des enseignants qui ont contribué à ma formation pendant cinq ans, ainsi que Lila notre secrétaire et notre technicien Mahfoud et tous le personnel de l'école spécialement Battata Réda, ammi Mahmoud, Saleh et krimo.*

*Ma gratitude va également à Karima et à Wahiba de la Bibliothèque centrale du COSU du Colonel Amirouche.*

## Résumé



Le travail porte sur l'étude de la pollution de l'air ambiant par les TSP et les métaux qui leur sont associés en deux sites de la ville d'Alger. On montre que les niveaux de pollution atteints par les TSP sont assez élevés mais demeurent en deçà de la norme de  $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Les résultats obtenus montrent par ailleurs que la ville d'Alger subit une pollution importante par les métaux lourds en particulier le Pb et le Cd. Les émissions de Pb issues du trafic qui s'élèvent à Alger annuellement à environ 300T, engendrent des teneurs atmosphériques en Pb de l'ordre de 0.2 à  $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La nature anthropique de cette pollution est mise en évidence par les facteurs d'enrichissement qui sont très élevés.

## Abstract

The aim of this work is the study of the pollution of the ambient air by the TSP and metals in Algiers-city. We show that the levels of pollution by the TSP are enough high but lower than the who recommended values ( $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). The results show elsewhere that Algiers-City have an important pollution by heavy metals in particular Rb and Cd. The lead emissions from road traffic are as high as 300 T annually which give atmospheric levels of lead of about 0.2 to  $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ . This antropic pollution is indicated by the enrichment factors which are very high.

# Sommaire



## Chapitre I Introduction

## Chapitre II Origine des particules

II. 1. Les particules d'origine naturelle	
a. L'érosion éolienne	6
b. Les éruptions	6
c. Les embruns et sels marins	7
d. Les particules d'origine extra-terrestre	7
II. 2. Les particules d'origine anthropogénique	8
a. La combustion	9
b. Les process industriels	9
c. Industrie des matériaux de construction	9
d. Incinération des déchets	10
e. Le trafic routier	10

## Chapitre III Granulométrie et dynamique des particules

III. 1. Dimension des particules	18
III. 2. Répartition granulométrique des particules	21
a. Les grosses particules sédimentables	
b. Les particules fines	
c. Les particules très fines	
d. Les particules infra-microscopiques	
III. 3. Dynamique des particules	26
III. 3. 1. Cas des particules de diamètre supérieur à 1 $\mu\text{m}$	
III. 3. 2. Cas des particules fines	
III. 3. 3. Cas des particules très fines	

## Chapitre IV Nuisances engendrées par les poussières en suspension

IV. 1. Effets nuisibles sur l'homme	34
IV. 2. Effets sur les animaux	44
IV. 3. Effets sur les plantes	44

IV. 4. Effets des particules solides sur les matériaux

IV. 5. Autres effets



### Chapitre V Prélèvement et analyse des particules

V. 1. Echantillonnage	49
V. 1. 1. Les prélèvements sans coupure spécifique	
a. Méthode des fumées noires (FN)	
b. Méthode de prélèvement sur filtre ouvert à débit moyen	
V. 2. Mesure de la concentration particulaire	53
V. 3. Les filtres et membranes de rétention	54
V. 4. Analyse des particules en suspension	55

### Chapitre VI Méthodologie

VI. 1. Sites de prélèvements	62
VI. 2. Mode de prélèvement	65
VI. 3. Traitement et analyse élémentaire des TSP	

### Chapitre VII Résultats et interprétations

VII. 1. Etude des particules totales en suspension	69
VII. 2. Niveaux de pollution par les métaux lourds et autres éléments véhiculés par les TSP	80

### Chapitre VII Conclusion

115

**Bibliographie**

**Annexes**

# *Chapitre 1*

## *Introduction*

## **I. Introduction**

Les problèmes liés à la pollution atmosphérique sont devenus ces dernières années une préoccupation permanente pour les pouvoirs publics, les scientifiques et même la société civile.

Le trafic routier qui est concentré en majeure partie dans les grandes villes, les diverses industries et le chauffage domestique constituent les principales sources anthropogéniques qui déversent des émissions polluantes dans la basse troposphère.

Ces émissions qui sont souvent facilement identifiables constituent néanmoins un phénomène complexe à étudier. Certains polluants, une fois dispersés et dilués dans l'atmosphère, subissent entre eux et avec le milieu, des interactions et conversions physico-chimiques comme la sédimentation, l'agglomération, la dissolution, l'adsorption et la photochimie qui donnent naissance à de nouveaux polluants et donc à d'autres formes de nuisances

Cette réactivité des polluants atmosphériques, ainsi que leur action synergique expliquent en partie, et ce malgré le nombre élevé d'études effectuées, l'existence de certaines incertitudes concernant les modélisations, les études de prévisions et les effets toxiques.

Du point de vue impact sanitaire, la communauté scientifique admet aujourd'hui que certains polluants aggravent les maladies respiratoires ( $\text{SO}_2$ , particules etc...) et que d'autres exercent des effets cancérogènes ( hydrocarbures polycycliques, particules fines des gaz d'échappement etc..).

Si de plus, on considère que l'homme respire 10 à 15  $\text{m}^3$  d'air quotidiennement, soit environ 300.000  $\text{m}^3$  d'air plus ou moins pollué au long de toute une vie, il devient clair que le contrôle et le suivi de la qualité de l'air soient indispensables.



Notre pays, à l'instar de tous les pays en voie de développement, est du point de vue pollution atmosphérique très mal loti; il connaît au même titre que les pays industrialisés des phénomènes de pollution atmosphérique mais ne dispose pas de moyens de lutte technologiques et juridiques appropriés. Par ailleurs et par manque d'études scientifiques fiables, le pays ne possède pas de données relatives à l'ampleur du phénomène.

Aussi et afin de contribuer à l'acquisition de données précises relatives aux niveaux de la pollution dans notre pays et d'améliorer nos connaissances dans ce domaine, nous nous proposons d'étudier dans ce travail le volet concernant la contamination de l'atmosphère par les particules solides et les éléments toxiques qui leurs sont associés. Cette forme de pollution, de part de son impact sur la santé publique, fait l'objet un peu partout dans le monde d'une attention particulière et constitue à ce jour encore un vaste champ d'investigation.

Il s'agit pour nous plus exactement d'étudier l'ampleur de la pollution par les particules totales en suspension (TSP) en milieu urbain et de déterminer dans quelle mesure ces particules véhiculent certains métaux lourds.

Un intérêt particulier sera accordé à l'étude du plomb issu du trafic routier qui est un des métaux lourds le plus incriminé dans la pollution atmosphérique.

# *Chapitre 2*

*Les Principales Sources  
Emettrices de Particules*

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

- Les particules sédimentables ou dépôts atmosphériques .
- Les TSP (Total Suspended Particles ) ou particules totales en suspension.

Les particules sédimentables concernent les poussières de granulométrie élevée (30  $\mu\text{m}$  et plus ) qui ont une grande vitesse de chute et qui se déposent rapidement, non loin de la source émettrice. Ce type de particule qui a fait l'objet de travaux antérieurs [1] ne sera pas étudié dans ce travail .

Les particules en suspension sont par contre, des particules plus en moins fines (granulométrie < 30  $\mu\text{m}$ ) qui séjournent longtemps dans l'atmosphère et peuvent être emportées loin de la source émettrice par les vents. On les désigne par « *particules totales en suspension* » pour les différencier des « PM10 » qui eux sont les particules en suspension dont le diamètre est inférieur à 10  $\mu\text{m}$ . Ce seuil granulométrique correspond aux particules fines qui pénètrent profondément dans les poumons.

Les sources d'émissions des particules en suspension sont nombreuses, et selon leur origine, elles peuvent être réparties comme suit :

- les particules en suspension d'origine naturelle.
- Les particules d'origine anthropique résultant des activités humaines.

## II.1. LES PARTICULES D'ORIGINE NATURELLE

Les phénomènes naturels sont à l'origine d'une importante émission de particules dans l'atmosphère. Annuellement et à l'échelle mondiale, la production de particules naturelles est estimée à environ  $2\ 096.10^6$  tonnes [2].

Dans certains cas, la capacité de pollution par les sources naturelles peut être considérable; c'est le cas par exemple lors du soulèvement dans l'atmosphère des particules du sol ou lors d'éruptions volcaniques, etc...

Cependant en général, on attribue une importance moindre à la pollution due aux sources naturelles et ce pour deux raisons:

- Elle est produite par des substances qui ont généralement un effet nocif faible ou bien qui se transforment assez rapidement en composés inoffensifs entrant dans les cycles biologiques naturels.
- Elle provient de sources émettrices dispersées et souvent éloignées des grandes agglomérations urbaines .

Les phénomènes naturels qui y contribuent le plus souvent sont:

#### a. L'érosion éolienne [3,4]

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

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

#### b. Les éruptions volcaniques [3,5]

Les régions volcaniques représentent une importante source de particules dans l'air , dont certaines résultent de la transformation de polluants gazeux en particules, c'est le cas par exemple, des particules de sulfates issues du gaz  $SO_2$ .

La quantité de particules solides qui peut accompagner une éruption volcanique peut être énorme. Ainsi, l'éruption du mont « *Saint HELENS* » en mai

1980 dans l'état de Washington aux USA, a provoqué une émission de près de 3 milliards de tonnes de particules qui ont pu atteindre la stratosphère [5].

### **c. Les embruns et sels marins**

A partir des océans et des mers, l'atmosphère terrestre s'enrichit en embruns marins. Ces aérosols donnent après évaporation des particules salines essentiellement du NaCl, MgCl<sub>2</sub>, CaCl<sub>2</sub> et KBr [3].

Sur le continent, les régions les plus touchées sont naturellement les zones côtières. Les vents forts et les tempêtes peuvent cependant transporter ces embruns à des grandes distances à l'intérieur des terres. Ainsi par exemple, on estime qu'au niveau des régions côtières de Bretagne, les pluies déposent au sol 25 à 35 gr de sel par m<sup>2</sup> au cours d'une année, 70 % de ces dépôts étant constitués par des chlorures de sodium. [3]

### **d. Les particules d'origine extra-terrestre**

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

Les particules d'origine extra-terrestre sont principalement composées de Sodium, Magnésium, Aluminium, Silicium, Potassium, Calcium, Titane, Chrome, Fer, Cobalt et Nickel [3].

On estime que ce phénomène contribue à la pénétration dans l'atmosphère terrestre d'environ 10 milles tonnes de particules par jour, soit 10<sup>-14</sup> gr/cm<sup>2</sup> .s [3].

Comme autres formes de pollution, on peut signaler :

- Les particules d'origine végétale comme les grains de pollen qui sont émis par une grande diversité de plantes et qui peuvent être de puissants allergènes.
- Les feux spontanés de forêts qui sont principalement causés par la foudre et qui émettent des quantités non négligeables de particules.

Nous récapitulons dans le tableau N°1 les sources et les taux d'émission des particules d'origine naturelle [2].

Tableau n°1  
*Production des particules d'origine naturelle [2]*

SOURCE D'EMISSION	QUANTITE EMISE ( MEGATONNES/AN)	POURCENTAGE
Aérosol	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	3	0.14
<b>Total</b>	<b>2096</b>	<b>100</b>

## II. 2. LES PARTICULES D'ORIGINE ANTHROPOGENIQUE

Les activités humaines sous toutes leurs formes sont productrices de poussières. Le simple phénomène d'usure tel que l'usure de nos chaussures, de nos vêtements, des pneus d'automobiles, des rails etc.. contribuent à la formation d'une quantité importante de particules.

Le développement industriel et socio-économique sont à l'origine de la création des plus grandes sources émettrices de particules. Les activités qui y contribuent le plus sont les processus de combustion ou l'industrie thermoénergétique, la sidérurgie, les mines, les cimenteries et le transport routier.

Par ailleurs, il faut noter qu'une partie importante de la pollution particulaire résulte des réactions chimiques que subissent dans l'atmosphère les polluants gazeux tels que  $\text{SO}_2$  et les  $\text{NO}_x$  [ 2 ].

#### **a. La combustion**

La combustion des énergies fossiles à l'état solide, liquide ou gazeux est à l'origine d'une pollution importante par les particules minérales et organiques.

On y retrouve particulièrement les particules d'imbrûlés, les métaux lourds comme le Nickel et Vanadium issus du pétrole et les composés polycycliques fixés sur les particules carbonées.

D'une manière globale, on attribue aux installations de combustion fixes (centrales thermiques, chauffages urbains etc..) la part la plus importante des émissions des particules. Ainsi, par exemple en France on a estimé cette part de pollution à  $73 \cdot 10^6$  Kg soit 26% du total des émissions de particules anthropiques [6].

#### **b. Les process industriels**

Les process industriels les plus incriminés dans la pollution particulaire sont incontestablement les diverses opérations sidérurgiques, la pyro-métallurgie ou fonderie des métaux ferreux et l'industrie des métaux non ferreux tels que le zinc, le cuivre et le plomb, où lors des diverses opérations de grillage, raffinage et fusion dans les fours, il y a émission de particules métalliques qui peuvent s'oxyder et sublimer en fines particules métalliques sédimentables ou non. Ainsi, la métallurgie du cuivre et du nickel émet presque autant de plomb que la métallurgie de plomb lui-même [7].

#### **c. 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 cé-

ramique, du verre, de l'asphalte et l'amiante sont tous responsables de l'émission d'importantes quantités de particules solides dans l'air.

Les cimenteries sont les plus polluantes du fait de l'importance des quantités de ciment produites et des roches utilisées pour sa production. Ainsi pour obtenir une tonne de ciment, il faut environ 1.6 tonnes de matières premières [4].

Ce sont surtout les installations dépourvues de systèmes de dépoussiérage qui contribuent le plus à la pollution. C'est le cas de la cimenterie de Rais -Hamidou à l'Ouest d'Alger où on a mesuré des teneurs très élevées en TSP, plus de  $0.6 \text{ mg/m}^3$  [8].

#### **d. 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 leur vie dans les décharges sous forme de déchets.

L'incinération de ces derniers engendre l'émission d'importantes quantités de particules. Ces particules contiennent des métaux lourds tels que : Fer, Zinc, Cadmium, Sodium, ...etc. ainsi que divers oxydes métalliques dont l'importance toxicologique est considérable [9].

#### **e. Le trafic routier**

Du fait de son intensification dans les grandes agglomérations, ce secteur constitue une des principales sources de pollution particulaire en milieu urbain.

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



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

Dans un grand nombre de pays le taux de motorisation est de l'ordre de 1 véhicule pour deux personnes. Dans certains pays comme la Chine, la motorisation a connu ces dernières années un bond extraordinaire.

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

- les suies qui sont des particules de carbone et d'imbrûlés dénommées « fumées noires » qui sont dues à la combustion incomplète. Leur présence est très importante dans les échappements des véhicules Diesel.
- Les hydrocarbures polynucléaires qui sont présents dans le carburant lui-même ou synthétisés lors de la combustion. Malgré leur présence à des proportions extrêmement faibles, ils exercent un pouvoir nuisible très élevé (susceptibles d'être cancérogènes).
- les métaux lourds : parmi ces composés c'est surtout le plomb qui, de loin est le plus incriminé dans la pollution par le trafic routier et le plus répandu en milieu urbain.

Ajouté aux carburants comme antidétonant sous forme de tétra-éthyle de plomb à raison de 0,15g à 0,4 g/l il est rejeté dans sa presque totalité dans l'atmosphère des villes [10].

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

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

Les émissions de Plomb issues du trafic routier sont estimées à  $248.10^6$  kg /an [7].

Cependant et depuis l'introduction dans les années 80 de l'essence sans plomb, ces taux d'émissions sont en nette régression.

Dans certaines grandes métropoles le taux de pollution particulaire issue du trafic routier s'élève à 20 - 30 % [12]. En France, la moyenne nationale donne un taux de 50 %, soit une teneur moyenne d'environ  $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$  imputable uniquement au trafic routier [13].

A toutes ces sources de pollution par les particules, il faut ajouter la part importante provenant de la conversion dans l'atmosphère, par divers mécanismes, de polluants gazeux en particules.

L'émission des particules d'origine anthropogénique s'élève globalement à  $269 \cdot 10^9 \text{ Kg/an}$ , soit environ 12 % du taux de particules d'origine naturelle [2].

Comme le montre le tableau n° 2, l'émission directe des particules anthropiques s'élève seulement au 1/3 du taux global, les 2/3 restant, résultent de la conversion gaz/particules [2].

Tableau n° 2

*Taux d'émission de particules anthropiques*

Source d'émission	Quantités émises
Emissions sous forme de particules	$84 \cdot 10^9$
Particules formées des gaz polluants	
• Sulfates à partir de $\text{SO}_2$	$133 \cdot 10^9$
• Nitrates à partir de $\text{NO}_x$	$27 \cdot 10^9$
• Particules photochimiques issues des hydrocarbures	$25 \cdot 10^9$
<b>Total</b>	$269 \cdot 10^9$

Comme les particules véhiculent certains métaux lourds toxiques, nous présentons au tableau n° 3 l'ampleur des émissions de certains d'entre-eux en fonction des sources émettrices [7].

**Tableau n° 3**  
*Valeurs médianes des émissions de métaux de sources naturelles et anthropogénique Tonnes /an [7]*

NATURE DES SOURCES	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
<b>Combustion du Charbon</b>	<b>11.275</b>	<b>5.005</b>	<b>13.763</b>	<b>8.158</b>	<b>11.101</b>
• Centrales Electriques	4.495	2.015	5.348	2.713	4.418
• Industries et Chauffage Domestique	6.780	2.990	8.415	5.445	6.683
<b>Combustion du Fuel</b>	<b>1408</b>	<b>1.959</b>	<b>27.065</b>	<b>2.419</b>	<b>2.159</b>
• Centrales électriques	334	1.334	9.170	986	727
• Industrie et Chauffage Domestique	1.074	625	17.895	1.433	1.432
<b>Production des métaux non Ferreux</b>	<b>0</b>	<b>26.738</b>	<b>8.781</b>	<b>49.085</b>	<b>71.572</b>
• 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		8510	64.400
<b>Production Secondaire des métaux non Ferreux</b>		<b>110</b>		<b>765</b>	<b>855</b>
<b>Sidérurgie Fer et Acier</b>	<b>15.620</b>	<b>1.491</b>	<b>3.568</b>	<b>7.633</b>	<b>19.525</b>
<b>Incinération des Déchets</b>	<b>1.139</b>	<b>1.575</b>	<b>464</b>	<b>2.370</b>	<b>5.900</b>
• Municipales	539	1.470	259	2.100	5.600
• Boues	600	105	105	270	300
<b>Industrie des Fertilisants</b>		<b>411</b>	<b>411</b>	<b>165</b>	<b>4.110</b>
<b>Production de Ciment</b>	<b>1.335</b>		<b>490</b>	<b>7.129</b>	<b>9.790</b>
<b>Combustion du Bois</b>		<b>900</b>	<b>1.200</b>	<b>2.100</b>	<b>3.600</b>
<b>Sources mobiles (Trafic Routier)</b>				<b>248.030</b>	
<b>Divers</b>				<b>4.000</b>	<b>3.254</b>
<b>Total des Emissions Anthropiques</b>	<b>30.777</b>	<b>38.189</b>	<b>55.642</b>	<b>331.851</b>	<b>131.866</b>
<b>Total des émissions Naturelles</b>	<b>44.000</b>	<b>28.000</b>	<b>30.000</b>	<b>12.000</b>	<b>45.000</b>

Ce tableau montre que le chrome issu des émissions naturelles est plus élevé que le chrome anthropique

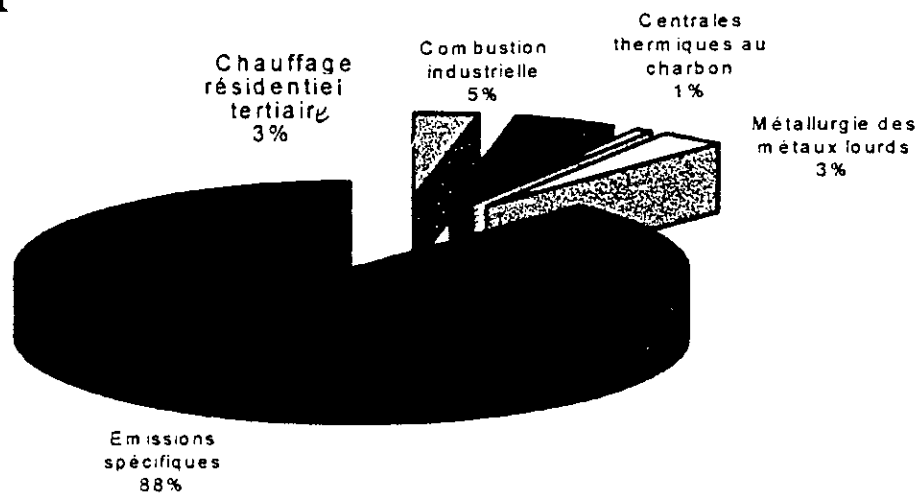
On remarque par ailleurs, l'ampleur du Ni qui est un traceur de la combustion de fuel et l'importance du Pb dont la quasi totalité est imputable au trafic routier.

Toujours en ce qui concerne les métaux lourds nous illustrons en fig N°1 a) et b) les distributions par origine de certains métaux lourds estimées pour la France en 1989 [7].

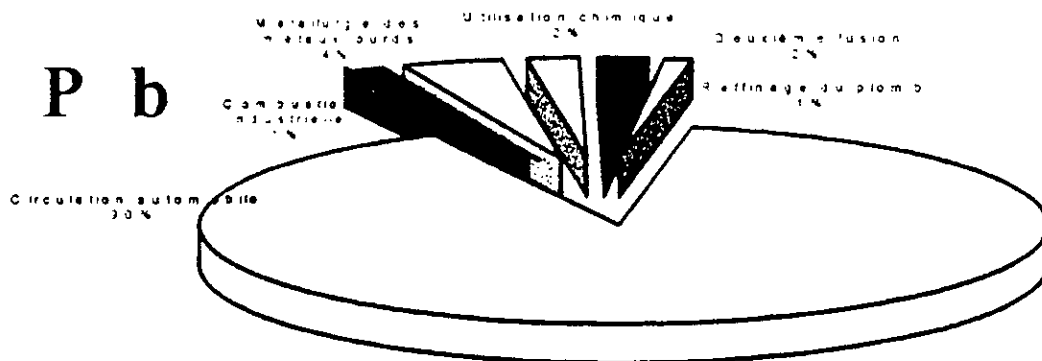
Enfin signalons que les teneurs habituelles en TSP, que l'on rencontre généralement dans la basse couche de l'atmosphère varient selon les régions et la nature des industries qui y sont implantées.

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

# Cr



# Pb



# Zn

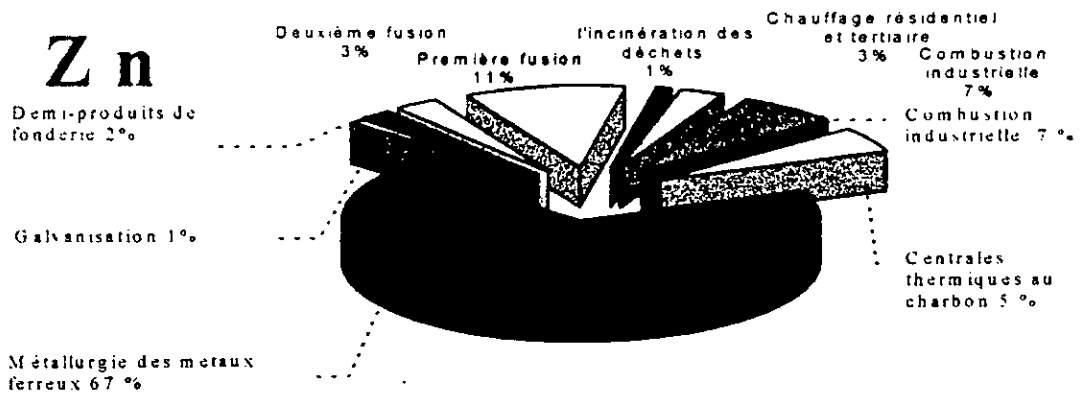
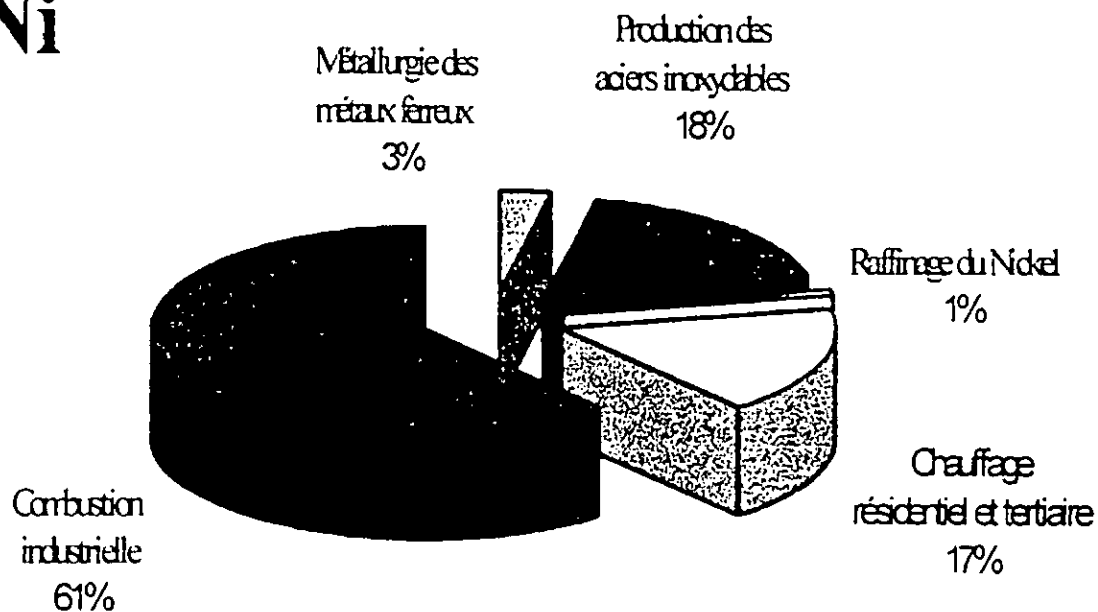


Figure n° 1.a

Distribution par origine des émissions des métaux lourds Cr, Pb et Zn en France [7]

**Ni**



**Cu**

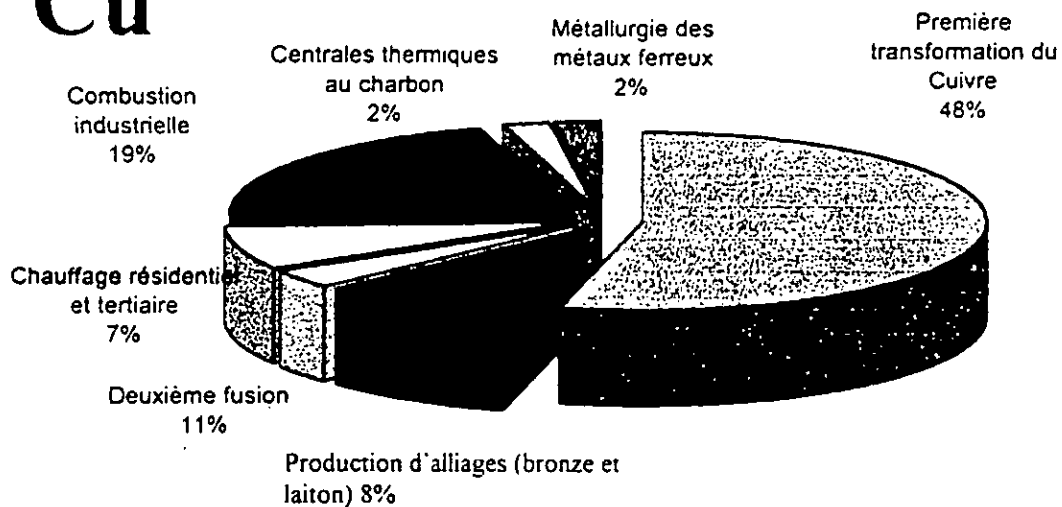


Figure n° 1.b

Distribution par origine des émissions de Ni et Cu en France [7]

# *Chapitre 3*

## *Granulométrie et Dynamique des Particules*

III. 1. DIMENSION DES PARTICULES

Les particules existant dans l'atmosphère présentent des dimensions très variables et prennent des formes diverses, souvent très irrégulières. La taille de ces particules peut varier de moins de 0.1 µm à plus de 100 µm.

Les particules viables tels que les virus ont une taille allant de 0.005 à 0.1 µm, ils se présentent le plus souvent en colonie ou en compagnie d'autres particules. La plupart des germes ont une dimension de 0.4 à 0.8 µm et sont généralement portés par des particules de plus grande taille.

Les fumées noires (suies et particules de carbone) sont en général inférieures à 10 µm. La majeure partie des TSP présente des dimensions inférieures à 20 µm et la fraction inspirable est de taille inférieure à 10 µm. A titre indicatif, nous présentons en figure n°2 les intervalles de dimensions de diverses classes de particules inertes(non viables) et particules viables ainsi que leur système de rétention [14].

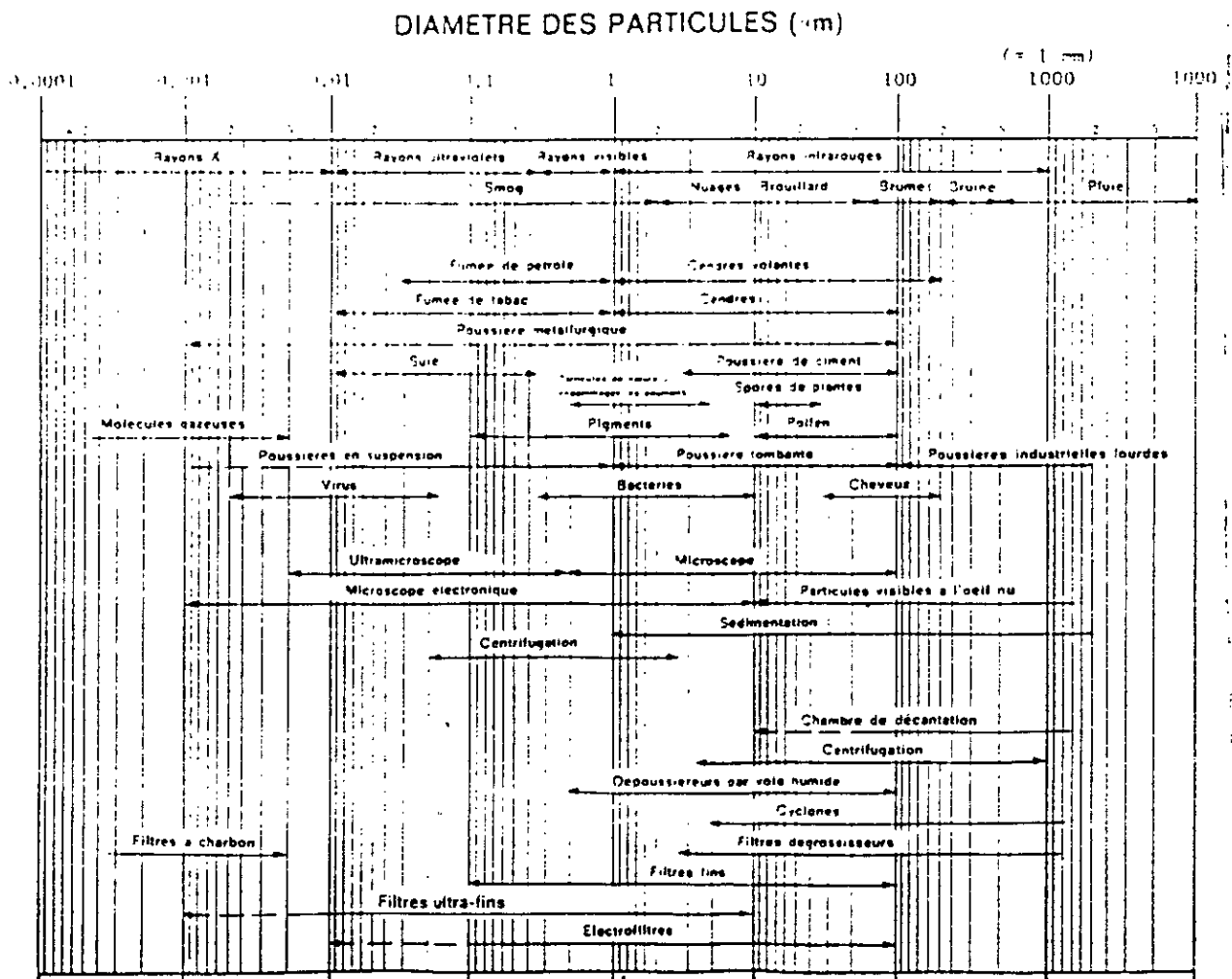


Figure n° 4

Intervalles de dimension de diverses classes de particules inertes et viables



La figure n° 3.a et b montrent sous un fort agrandissement les formes que prennent deux types de particules [ 3]:

- Les particules des poussières sédimentées de zones urbaine
- Les poussières d'une fraction fine de cendres volantes de charbon pulvérisé.

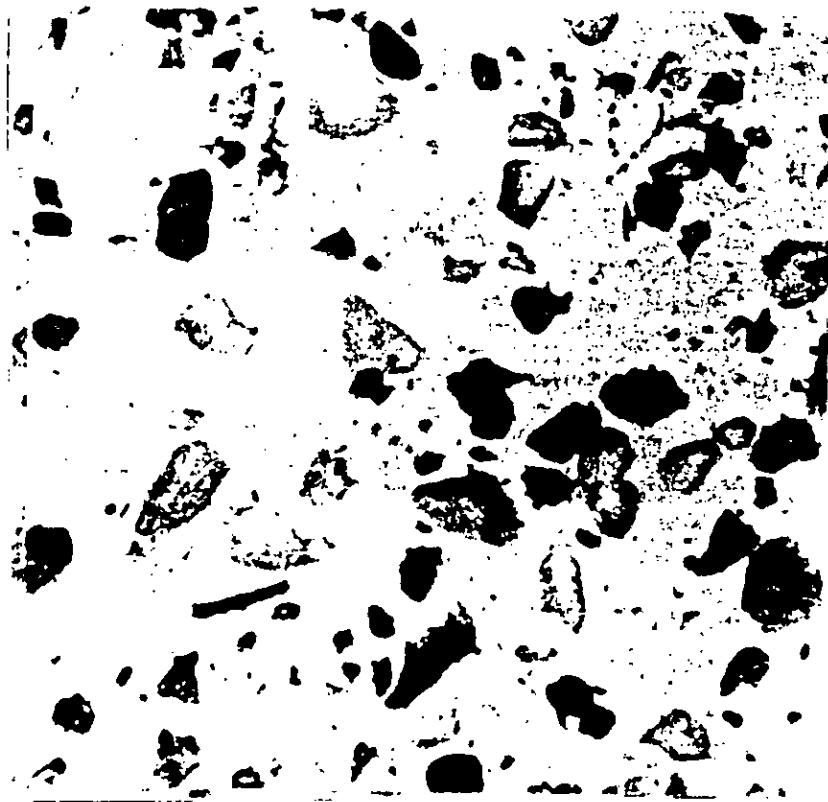


Figure n° 3.a  
*Les particules de poussières des zones urbaines*

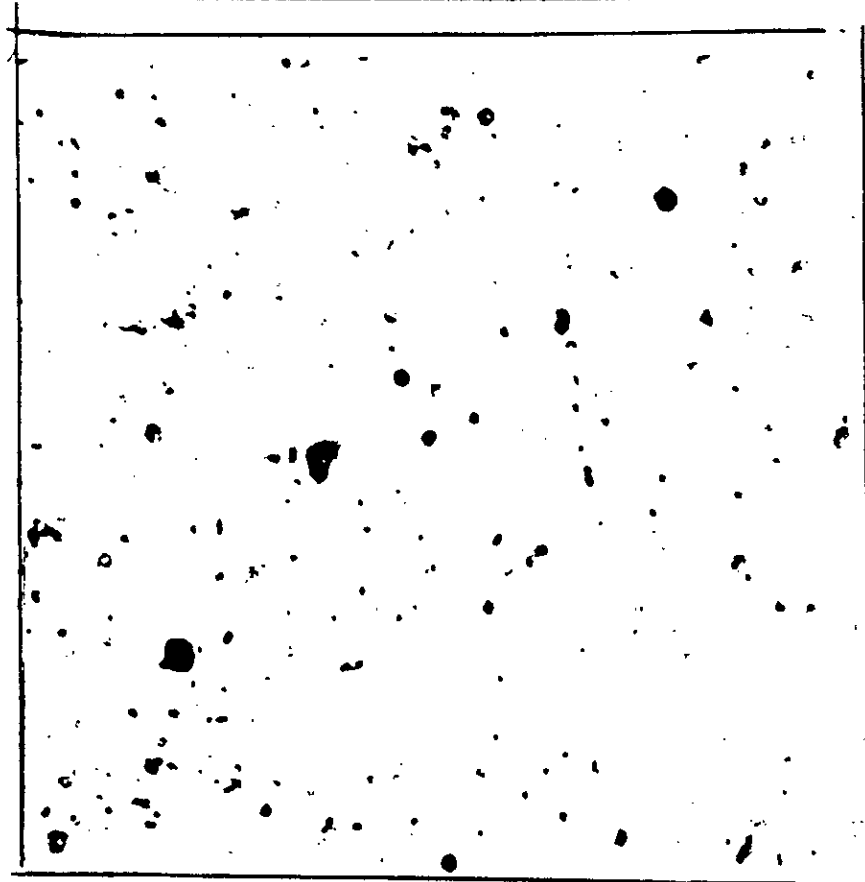


Figure n° 3.b Les poussières d'une fraction finie de cendres volantes de charbon pulvérisé

Comme les poussières ont des formes géométriques irrégulières on ne peut les caractériser que par une dimension relative.

La grandeur qui est le plus souvent utilisée est le diamètre aérodynamique moyen ou « *mass median equivalent diameter (M.M.E.D)* ».

Ce diamètre équivalent serait le diamètre d'une particule sphérique lisse qui se comporterait comme la poussière étudiée vis à vis d'un phénomène ou d'une propriété choisie a priori, par exemple un diamètre équivalent relié à la vitesse de sédimentation.

On dira ainsi d'une particule de forme et de densité quelconque qu'elle a même diamètre aérodynamique équivalent  $DAE = d$  ( $\mu\text{m}$ ), si elle sédimente à la même vitesse qu'une particule sphérique et lisse de densité unitaire ( $\rho = 1\text{g/cm}^3$ ) qui présente, précisément, un diamètre égale à  $d$  ( $\mu\text{m}$ ) [15].

Nous présentons à titre d'illustration dans le tableau n°4 les vitesses de sédimentation de quelques sphères lisses [15]

Tableau n° 4

Vitesse de sédimentation dans l'air de sphères lisses de densité  $\rho = 1\text{g/cm}^3$  à  $T=0^\circ\text{C}$

$d(\mu\text{m})$	$V(\text{cm/s})$
200	130
100	32
50	8
10	0.32
5	0.08
1	0.032

### III.2. REPARTITION GRANULOMETRIQUE DES PARTICULES [14,15 et 16]

La répartition des particules atmosphériques en classe granulométrique est importante du point de vue impact sanitaire pour différentes raisons, entre autres :

- Durée de séjour dans l'atmosphère.
- Pouvoir de pénétration dans l'appareil respiratoire
- Nature des composés chimiques qu'elles véhiculent.

C'est ainsi qu'on a tendance à classer les particules par ordre de taille décroissante en quatre classes :

- les poussières sédimentables de grand diamètre
- les poussières fines peu ou pas sédimentables
- les poussières très fines.
- les particules infra-microscopiques.

**a. Les grosses particules sédimentables**

Elles mesurent en moyenne plus de 20  $\mu\text{m}$ , se localisent dans les basses couches de l'atmosphère (en dessous de 300 m d'altitude) et retombent rapidement dans les environs de leurs sources d'émissions ; leur mouvement est en outre peu dépendant du vent.

Cette classe de particules prédominent dans l'atmosphère des agglomérations fortement industrialisées et dans les milieux à forte érosion éolienne.

Les retombées particulaires qui en résultent peuvent atteindre des niveaux très élevés [1,17].

**b. Les particules fines**

Cette catégorie désigne les TSP de diamètre compris entre 2.5 et 30 $\mu\text{m}$ . Elle englobe ainsi les particules dont la taille varie de 2.5 à 10  $\mu\text{m}$ .

De par leur faible vitesse de chute, ces particules ont un temps de séjour dans l'atmosphère élevé et peuvent voyager au grès des vents sur de longues distances.

Elle peuvent alors adsorber les polluants gazeux à leur surface et induire des conversions gaz/particules.

**c. Les particules très fines**

Elle représentent toutes les particules dont la taille varie entre 2.5 et 0.1  $\mu\text{m}$ . Cette dernière dimension représente la limite inférieure au delà de la quelle la sédimentation n'est plus possible et ce à cause du mouvement brownien qui l'emporte sur la gravitation.

Ces particules se rencontrent dans presque toute l'atmosphère, mais leur concentration décroît très vite au delà de la troposphère. Elles sont en général issues des émissions anthropiques, mais se forment aussi lors des transformations gaz/particules, ainsi que par coagulation des particules infra-microscopiques.

Malgré leurs finesse, ces particules sont tôt ou tard ramenées aussi au sol par les précipitations et certains phénomènes électrostatiques qui conduisent à leur agglomération.

**d. Les particules infra-microscopiques**

Elles sont appelées aussi *noyaux d'Aitken*, leurs diamètre varie entre 10 et 300 Å. Elles se transforment par coagulation en particules très fines de diamètre plus élevé [15].

Ce type de particule qui intéresse beaucoup plus les physiciens et les spécialistes d'aérosols n'est en général pas inclus dans l'étude de la pollution par les particules.

Quantitativement, la répartition granulométrique des particules peut être mise en évidence par le diagramme de WHITHBY que nous présentons sur la figure n°4 [14].

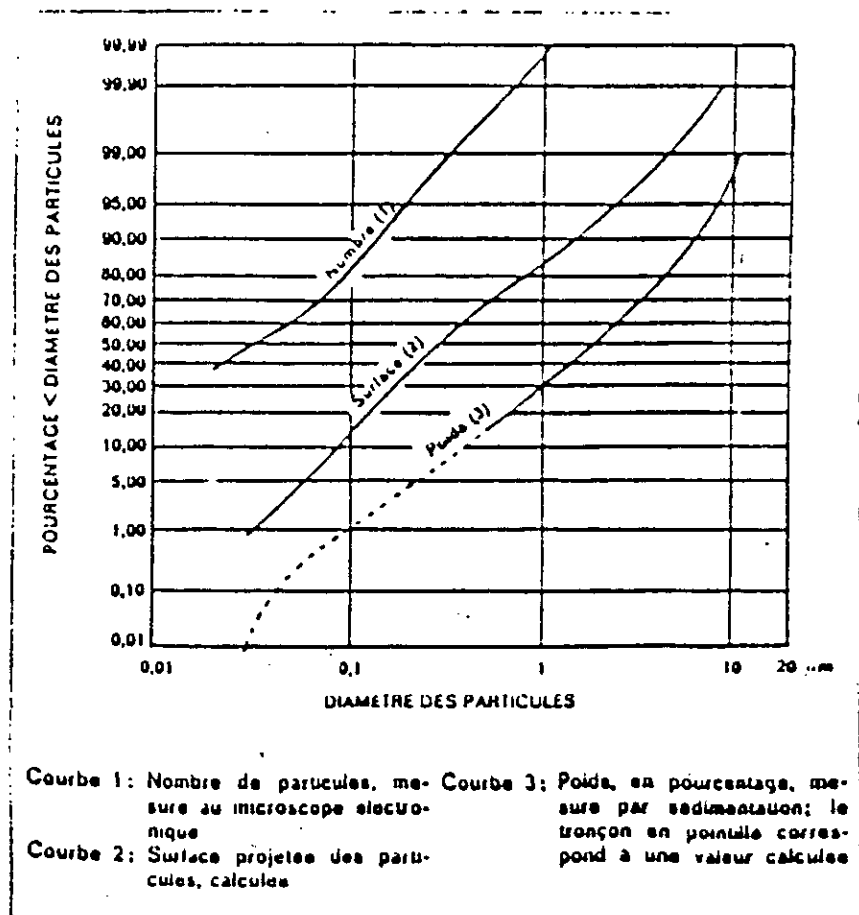


Figure n° 4

Répartition des particules dans l'atmosphère (diagramme de WHITHBY)

Ce diagramme présente 3 courbes qui montrent comment les particules sont réparties quant à leur nombre, à leur poids et leur surface projetée.

- La courbe supérieure indique en pourcentage du chiffre total, le nombre de particules en suspension dans l'air, d'un diamètre inférieur à un diamètre de référence donnée. Ainsi 99.9 % ont moins de 1  $\mu\text{m}$  de diamètre.
- La courbe du milieu montre la répartition de la surface projetée : par exemple, la surface projetée des particules d'une taille inférieure à 1  $\mu\text{m}$  représente 80 % environ de l'ensemble des particules.
- La courbe inférieure donne la répartition en poids de la poussière atmosphérique : par exemple, les particules de taille inférieure à 1  $\mu\text{m}$  représente 30 % du poids total des particules.

On voit ici la disproportion existant entre le nombre des particules de diamètre donné et leur poids correspondant. C'est ainsi que 0.1 % du nombre des particules dans l'air ont une taille supérieure à 1  $\mu\text{m}$ , mais leur poids représente 70 % du total.

Certains chercheurs pensent que partout dans le monde, les particules en suspension dans l'atmosphère se répartissent statistiquement sur une courbe à deux maxima (figure n°5) [18].

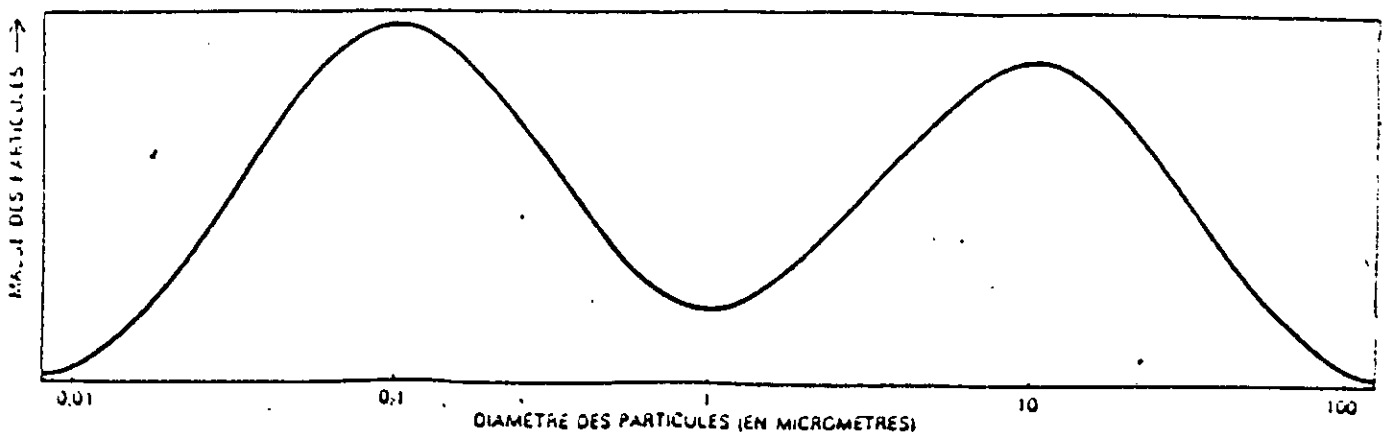


Figure n° 5

*Répartition des particules selon le diamètre*

Les particules de petites taille ( inférieure à  $1 \mu\text{m}$ ) sont surtout des sous-produits de combustion à caractère acide et se forment par un mécanisme de coagulation. Les grosses particules n'ont par contre aucun caractère acide et sont formées mécaniquement par effritement et dispersion de substances naturelles ou industrielles [18]

En fait il est difficile de prétendre assigner à l'aérosol atmosphérique une répartition granulométrique bien définie, car dès sa formation, l'aérosol atmosphérique est instable; il voit, comme nous le verrons dans le point suivant, sa répartition granulométrique évoluer en raison des phénomènes de sédimentation, d'agglomération, d'attractions électrostatiques et de condensation.

Toutefois, si l'on tient compte de l'ensemble de ces phénomènes, on trouvera dans un air au repos une répartition granulométrique voisine de celle définie par la fig. N°6 [19]

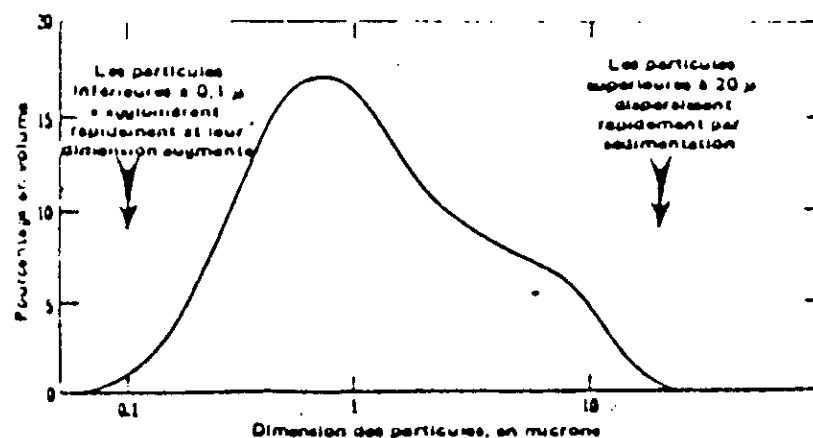


Figure n° 6

*Répartition granulométrique des poussières: effets de la sédimentation et l'agglomération*

Signalons, enfin que la taille des particules jouera un rôle primordial en ce qui concerne leur effet biologique, selon qu'elles soient inspirables ou non, précipitables ou non, dans le système pulmonaire.

Cet aspect relatif aux nuisances des particules sera discuté dans un autre chapitre.

### III.3 DYNAMIQUE DES PARTICULES

Selon leur taille, les particules en suspension peuvent avoir une tendance plus ou moins prononcée vers la sédimentation

- Les particules d'une grosseur inférieure à  $0.1 \mu\text{m}$  se comportent comme des molécules gazeuses et migrent selon la **loi de Brown** (mouvement Brownien), sans qu'il soit possible de déterminer ou de mesurer leur vitesse de chute.
- Les particules d'une grosseur de  $0.1 \mu\text{m}$  ont une vitesse de chute calculable. Mais cette vitesse est si faible qu'elle est sans importance pratique, étant donnée que les flux d'air ascendants empêchent la tendance à la sédimentation.
- Les particules d'une grosseur de  $1$  à  $10 \mu\text{m}$  tombent à une vitesse constante et calculable mais le flux d'air normaux les maintiennent généralement en suspension.
- Les particules d'une taille supérieure à  $10 \mu\text{m}$  tombent assez rapidement et ne peuvent être maintenues en suspension qu'au voisinage de la source ou dans certaines conditions de ventilation (tempête).

Pour des particules comprises entre  $1$  et  $5 \mu\text{m}$ , la sédimentation a lieu grâce aux processus d'interception et d'impaction, tandis que les particules de diamètre supérieures à  $5 \mu\text{m}$  se déposent grâce à la sédimentation gravitaire [14].



### III. 3. 1. Cas des particules de diamètre supérieur à 1 $\mu\text{m}$

En régime de sédimentation une particule atteint une vitesse limite de chute donnée par l'égalité des forces qu'elle subit :

*Force de gravité - Poussée d'Archimède = Force de viscosité*

soit :

$$\frac{4}{3} \pi \frac{d^3}{8} (\rho_{\text{particule}} - \rho_{\text{fluide}})g = 3\pi\eta V_s d \quad (1)$$

Comme  $\rho_{\text{fluide}}$  est négligeable dans l'air devant  $\rho_{\text{particule}}$ , on obtient la vitesse de sédimentation  $V_s$ , connue sous la loi de Stokes [15].

$$V_s = \frac{d^2}{18\mu} \rho_p g \quad (2)$$

Avec

$\rho_p$  : densité des particules

$\mu$  : viscosité de l'air

$d$  : diamètre des particules

Cette vitesse n'est toutefois valable que pour les particules ayant un diamètre compris entre 30 et 2  $\mu\text{m}$ .

Pour les particules ayant un diamètre comprise entre 2 et 0.5  $\mu\text{m}$ , on introduit le facteur de correction de *Cunningham* qui tient compte de l'influence grandissante de la viscosité, du nombre de Reynolds et de la valeur du libre parcours moyen des molécules.

L'expression de la vitesse de chute devient [14] :

$$V = V_s \left[ 1 + A \frac{\lambda}{2} \right] \quad (3)$$

Avec

A *facteur correctif de l'ordre de 0.8 à 0.9*

$\lambda$  *espace libre moyen intermoléculaire*

En général, les vitesses de sédimentation des particules inférieures à 10  $\mu\text{m}$  sont si faibles que la moindre convection les maintient en suspension.

Vers 0.5  $\mu\text{m}$  l'amplitude du mouvement Brownien devient supérieure à la vitesse de sédimentation, assurant le maintien des particules en suspension permanente.

### III: 3. 2. Cas des particules fines ( diamètre compris entre 0.1 et 1 $\mu\text{m}$ )

Si les dimensions des particules tombent en dessous d'une fraction de micromètre, l'air recommence à se comporter comme un milieu discontinu ( le libre parcours moyen des molécules est de 0.065  $\mu\text{m}$ ) et les particules subissent des collisions qui provoquent des déplacements aléatoires (mouvement brownien) : il en résulte une diffusion. Par contre les collisions des molécules d'air avec les grosses particules se compensent statistiquement et n'affectent pas le mouvement de la particule.

Cette diffusion est caractérisée par le coefficient de diffusion D qui peut être calculé à partir de la théorie cinétique des gaz

$$D = \frac{KT}{3 \pi \mu d} \quad (4)$$

avec

- K constante de Boltzman ( $1.38 \cdot 10^{-16}$  erg/°C)  
 $\mu$  viscosité de l'air (180  $\mu$ P à 27 °C)  
d diamètre des particules (cm)  
T température

à 27 °C

$$D = 2,6 \frac{1}{d(\mu m)} \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s} \quad (5) \quad [15]$$

Le déplacement moyen  $\bar{X}$  que subit la particule sur un temps t est alors donné par l'équation d'Einstein [15].

$$\bar{X} = \sqrt{2DT} \quad (6)$$

ou :

$$\bar{X} = \sqrt{\frac{2KTt}{3\pi\mu d}} \quad (7)$$

Nous représentons au tableau n°5 les vitesses de sédimentation et les déplacements moyens en fonction du diamètre des particules [15].

Tableau n° 5

Vitesse de chute et déplacement moyen des particules.

Ø particules µm	Vitesse de chute ( Sédimentation)		Déplacement moyen X dans un direction en µm/s
	cm/h	µm/s $\bar{X}$	
10	1080	$3 \cdot 10^3$	1.8
1	13	35	6
0.4	2 à 3	7	10
0.1	0.15 à 0.30	1	30

### III 3.3. Cas des particules très fines ( diamètre inférieure à 0.1 µm)

En raison du mouvement de diffusion, ces particules subissent de nombreuses collisions entre elles ; il en résulte une coagulation ou agglomération qui en réduit progressivement le nombre.

Le taux de diminution du nombre de particules par coagulation s'exprime

par :

$$-\frac{dn}{dt} = Kn^2 \quad (8)$$

soit

$$\frac{1}{n_t} - \frac{1}{n_0} = Kt \quad (9)$$

avec

$n_0$  nombre de particules au temps  $t=0$

La valeur du coefficient  $K$  dépend de plusieurs paramètres tels que la température de l'air, la pression, la viscosité etc..

On estime pour ce facteur les valeurs suivantes :

- aérosol avec  $d = 1.0$  à  $1.2 \mu\text{m}$   $K = 3.3 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
- aérosol avec  $d = 6 \cdot 10^{-3}$  à  $3 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}$   $K = 1.93$  à  $22.6 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$

Ce phénomène de coagulation s'observe surtout pour les particules de diamètre inférieure à  $0.5 \mu\text{m}$  pour lesquelles le mouvement brownien est significatif.

Les particules de diamètre supérieur à  $0.5 \mu\text{m}$  ont une diffusion négligeable et se comportent surtout comme noyaux de condensation des particules plus fines.

Pour les particules d'un diamètre de l'ordre de  $2 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}$  on estime le taux de perte des aérosols par coagulation à 50 % par heure, il n'est plus que de 50 % par jour pour les particules de diamètre égal à  $0.1 \mu\text{m}$  [15].

En conclusion de cette étude sur la dynamique des particules, nous retiendrons que les particules les plus fines se condensent pour enrichir les fractions de diamètre supérieur, tandis que les particules les plus grosses disparaissent de l'atmosphère par sédimentation ou impaction sur différentes surfaces.

Le résultat final est qu'il ne devrait subsister en suspension dans l'air que les particules d'un diamètre équivalent compris entre  $0.1$  et  $10$  à  $15 \mu\text{m}$ , ce qui correspond en général au domaine défini par les TSP.

Le comportement dynamique des particules et leurs propriétés de migration dans l'atmosphère en fonction de leur diamètre équivalent est ainsi résumé en fig.7. [15]

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

A ces phénomènes viennent s'ajouter les diverses transformations que peuvent subir les particules dans l'atmosphère ; certaines servent de noyaux de condensation des gaz, d'autres réagissent chimiquement avec les gaz et les vapeurs pour former d'autres composés ( formation par exemple de particules de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  à partir du  $\text{SO}_2$  et  $\text{NH}_3$ )

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

De même, les particules les plus fines contiennent la majorité des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) avec un diamètre aérodynamique médian de moins de  $1 \mu\text{m}$  [20].

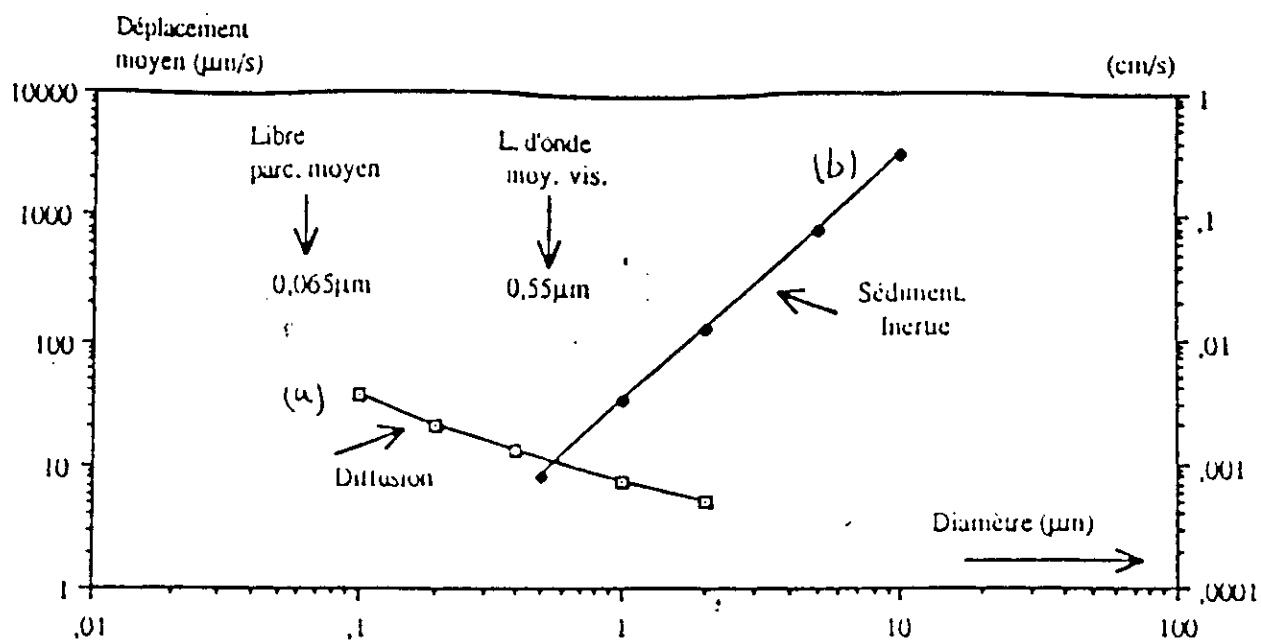


Figure n° 7

Déplacement moyen par seconde . de particules de différentes diamètres

a) diffusion pour les plus fines ( $d < 0,5\mu\text{m}$ )

b) sédimentation pour les plus grosses ( $d > 0,5\mu\text{m}$ )

# *Chapitre 4*

*Nuisances engendrées par les  
poussières en suspension*



#### IV.1 Effets nuisibles sur l'homme

Les conséquences à court terme sur la santé des polluants atmosphériques ont été étudiées, soit à partir des données statistiques de mortalité totale ou de mortalité pour cause spécifique, soit à partir d'indicateurs caractérisant directement ou indirectement, l'état de l'appareil respiratoire.

Comme indicateurs, on peut citer l'altération de la fonction ventilatoire (augmentation des résistances bronchiques, diminution des débits), les manifestations de symptômes en rapport avec une agression des voies respiratoires supérieures ou inférieures, le déclenchement de crise d'asthme, les consultations ou admissions hospitalières pour affections respiratoires aiguës, les décompensations aiguës d'affections respiratoires chronique etc...[21]

Cependant, l'appareil respiratoire n'est pas la seule « *cible* » des polluants atmosphériques. Dès 1952, date du tristement célèbre épisode du « *Smog londonien* » il a été observé dans les jours suivant le smog, un excès de décès par causes cardio-vasculaires (cas particulier chez les personnes âgées), ainsi qu'une augmentation d'admissions hospitalières pour ces mêmes causes [21].

A titre d'exemple et pour montrer l'influence d'une intensification de la pollution, nous présentons en tableau n° 6 les effets à court terme associés à la pollution atmosphérique particulaire lorsqu'il y a une augmentation de 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  des PM10 [22].

Tableau n° 6

Effets à court terme associés à la pollution atmosphérique particulaire

Indicateur sanitaire	Changement (% de l'indicateur sanitaire associé à une augmentation de 10 µg/m <sup>3</sup> des PM10)
<b>Accroissement de la mortalité infantile</b>	
• Décès totaux	1.0
• Décès respiratoires	3.4
• Décès cardio-vasculaires	1.4
<b>Accroissement du recours aux soins respiratoires hospitaliers</b>	
• Hospitalisation	0.8
• Urgences	1.0
<b>Exacerbation de l'asthme</b>	
• Crise d'asthme	3.0
• Usage de broncho-dilateurs	2.9
• urgences hospitalières	3.4 ( seule étude)
• Hospitalisation	1.9
<b>Dépression de la fonction pulmonaire</b>	
• Volume expiratoire maximum par seconde	0.15
• flux expiratoire de pointe	0.08

Tous les polluants qu'ils soient particulaires ou gazeux, pénètrent profondément dans les voies respiratoires et peuvent atteindre et se déposer dans les alvéoles pulmonaires.

Les polluants particulaires sont retenus suivant différents effets dans les différentes parties de l'appareil respiratoire .

Les polluants gazeux agissent surtout par adsorption physico-chimique (échange diphasique : gaz vapeur et solide-liquide ) [20].

Nous illustrons en figures n° 8, 9 et 10 la pénétration , le devenir et le dépôt des particules dans le système respiratoire en fonction de leur granulométrie [20,23].

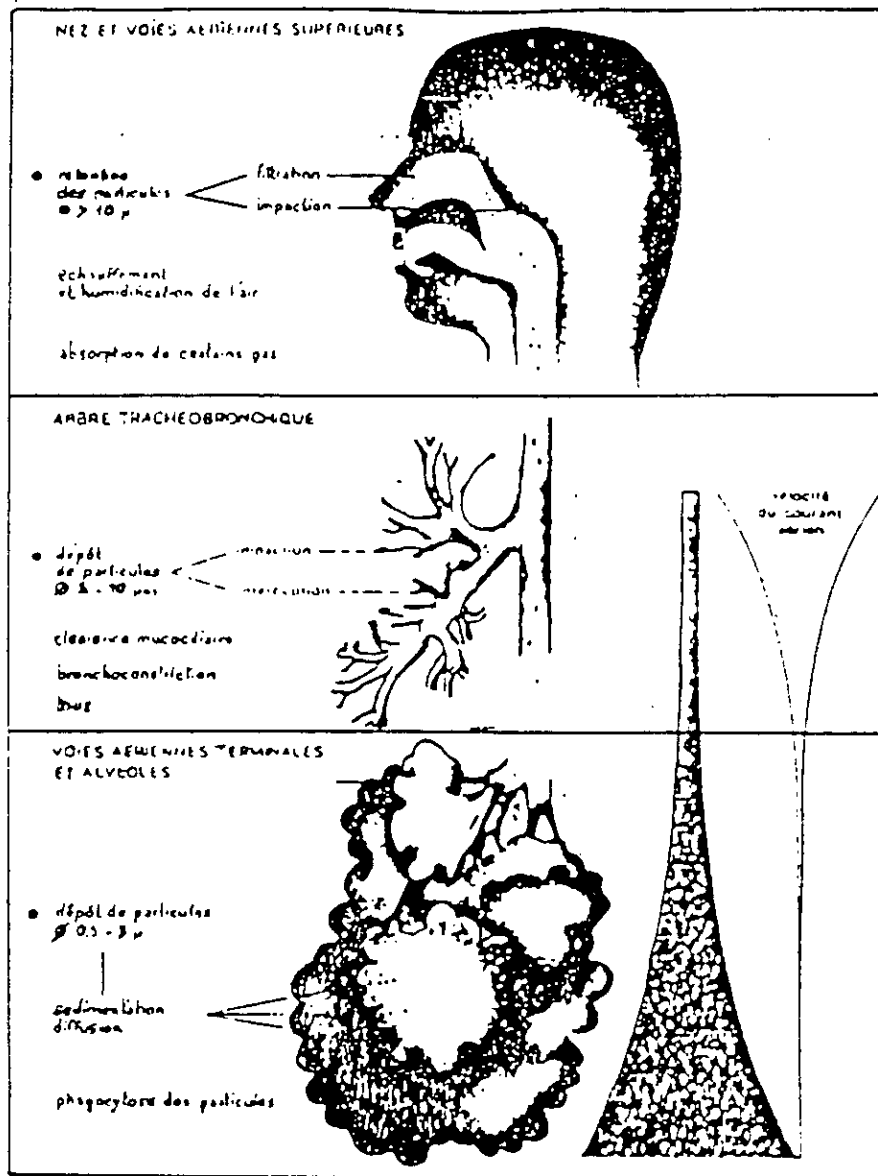


Figure n°8

Système respiratoire et pénétration des particules selon leur diamètre

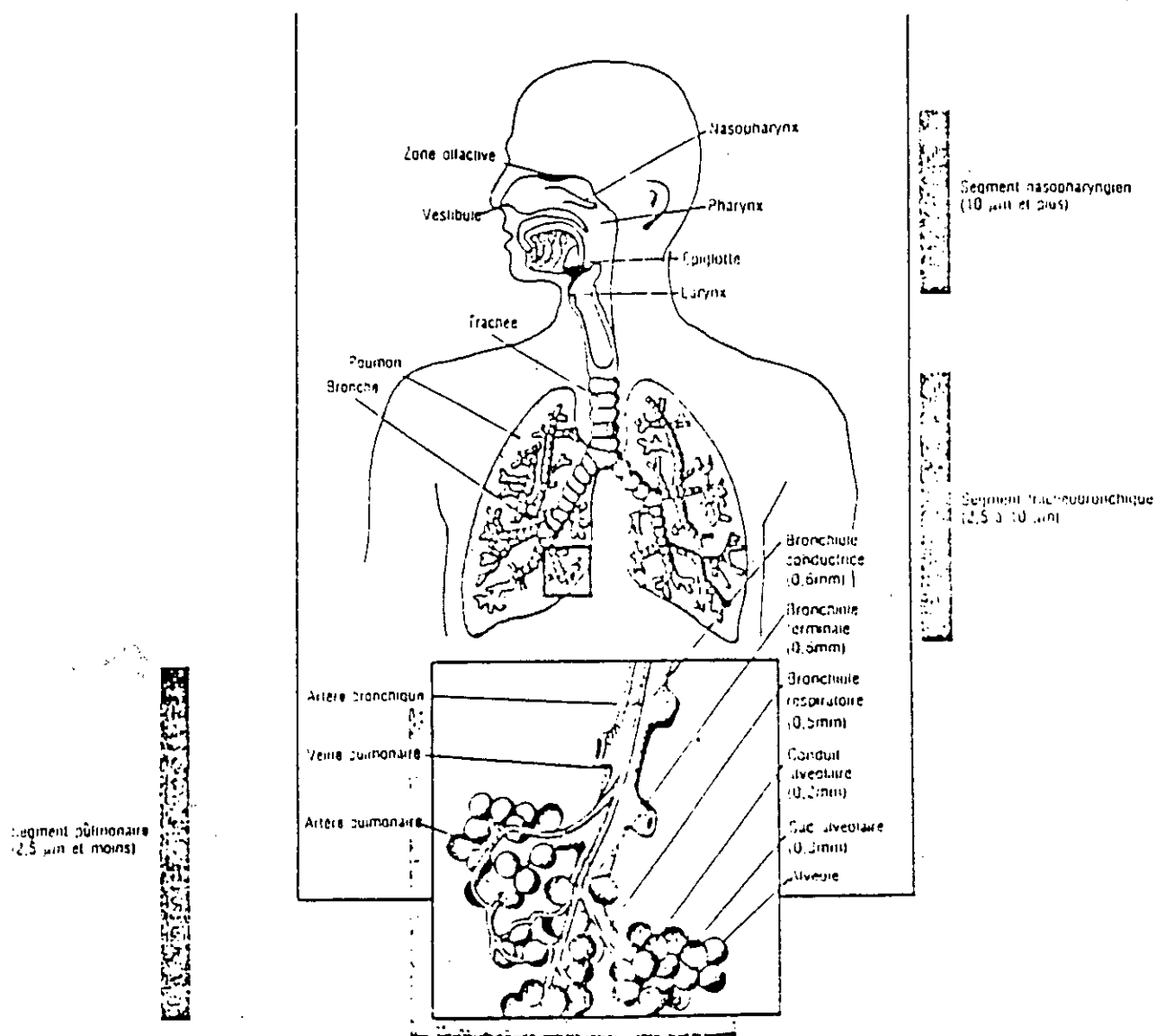


Figure n° 9

*Devenir des particules atmosphériques dans l'appareil respiratoire en fonction de leur granulométrie moyenne*

Le tableau N° 7 résume l'action locale des particules atmosphérique sur les voies respiratoires.

Tableau n° 7

*Action locale des particules atmosphériques sur les voies respiratoires [20].*

Action sur les voies respiratoires	Types de polluants
<b>1. pneumoconiose</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Sidérose</li><li>• Silicose</li><li>• Asbestose</li></ul>	Fer Silice Amiante
<b>2. Irritations</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Trachée</li><li>• Bronches</li><li>• Poumons</li></ul>	Poussières irritantes (éventuellement associées aux polluants gazeux)
<b>3. Allergie respiratoire</b> <b>4. Asthme</b>	Aéroallergènes (particules hygroscopiques atteignant l'épithélium)
<b>4. Les cancers pulmonaires</b>	Poussières cancérigènes (Hydrocarbures aromatiques polynucléaire)

Il est par ailleurs important d'étudier les métaux lourds qui sont supportés par les particules en suspension. Ils sont souvent toxiques et présentent de part leur pouvoir cumulatif un risque d'impact à long terme; c'est le cas notamment du Pb, du Cd et du Vanadium.

Dans ce contexte nous présentons en tableau n° 8, les principaux effets des métaux lourds Hg, Cd et Pb [25].

Tableau n° 8

Effets toxiques sur l'être humain du Hg, Cd et Pb.

<b>MERCURE</b>	
<b>Mercure minéral</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Néphrotoxicité (glomérulaire pour la vapeur de mercure)</li><li>• Neurotoxicité</li><li>• Dermatoxicité</li><li>• Génotoxicité</li></ul>
<b>Mercure organique</b>	
Dérivés alkylés	<ul style="list-style-type: none"><li>• Neurotoxicité dominante</li><li>• Néphrotoxicité placentaire</li><li>• Génotoxicité et tératoxicité</li></ul>
Dérivés alkoxylés	<ul style="list-style-type: none"><li>• Neurotoxicité plus faible</li><li>• Néphrotoxicité tubulaire</li></ul>
<b>CADMIUM</b>	
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Rôle de la métallothionéine</li><li>• Pouvoir cumulatif exceptionnel</li><li>• Néphrotoxicité</li><li>• Génotoxicité - Cancerogénicité</li></ul>
<b>PLOMB</b>	
<b>Plomb ionisé</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Hématotoxicité</li><li>• Neurotoxicité centrale et périphérique</li><li>• Néphrotoxicité</li><li>• Génotoxicité</li><li>• Formations de chélates</li></ul>
<b>Plomb.</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Neurotoxicité dominante</li><li>• Hématotoxicité</li></ul>

La figure n° 11 indique les organes et parties de l'organisme humain qui sont touchés par les principaux polluants atmosphériques [2].

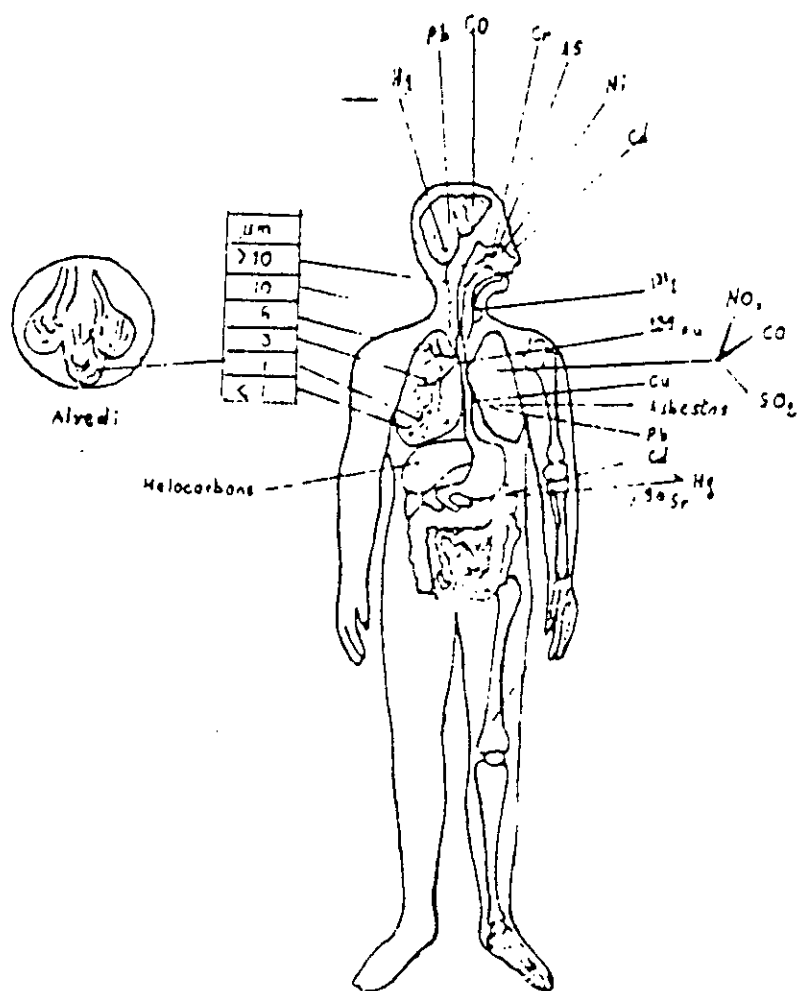


Figure n° 11

Organes et parties du corps humain affectés par les polluants atmosphériques

## **IV. 2 . EFFETS SUR LES ANIMAUX**

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

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

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

La suie a été incriminée pour la production de certaines teneurs broncho-pulmonaires chez les hommes à cause de sa teneur en hydrocarbures cancérigènes [20].

## **IV. 3. LES EFFETS NOCIFS SUR LES PLANTES**

Les plantes souffrent d'effets nocifs plus immédiats et plus puissants que chez les êtres vivants pour plusieurs raisons : sensibilité plus grande, capacité d'adaptation et de défense plus réduite, contacts plus étendus et presque permanents avec l'atmosphère polluée, dépendance totale des facteurs locaux pédologiques et chimiques.

Le mécanisme de l'action nocive des polluants sur la végétation est complexe, dépendant d'une part, des caractères anatomiques et physiologiques des plantes, d'autres part, de la nature physico-chimique des polluants.

La plus importante des voies de l'action nocive ~~consiste dans~~ la pénétration des polluants dans les organes de la respiration végétale représentée par les stomates des feuilles . Lorsque les poussières se déposent sur les feuilles des plantes



, elles forment un écran entre les rayons lumineux et la feuille proprement dite et il peut en résulter une modification de l'assimilation chlorophyllienne.

Ainsi par exemple, les particules d'oxydes métalliques de Zinc obturent les stomates et provoquent un lent dépérissement des végétaux. Les plantes examinées absorbent une partie du Zinc que l'on retrouve dans leurs divers organes. C'est le cas des régions touchées par des émissions issues d'usines électrochimiques [3].

La même constatation est faite aux alentours des cimenteries où les poussières formant des croûtes grisâtres adhèrent aux feuilles, bouchent les stomates et brûlent la matière végétale. La chaux en s'hydratant pénètre à l'intérieure des feuilles, dénature le cytoplasme, le noyau cellulaire et les chloroplastes et détruit la chlorophylle.

Les poussières attaquent également la cuticule en ôtant toute résistance aux plantes [15].

#### **IV. 4. EFFETS DES PARTICULES SOLIDES SUR LES MATERIAUX [3]**

Les dégradations des matériaux dues 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 (bâtiment, monument, historique, ... etc.) est l'effet le plus visible qui se traduit par le noircissement des façades par les dépôts de suie et de poussières. Les pertes sont souvent très élevées : dégradation des peintures, dégradation des fils de haute tension etc..

#### **IV. 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 effet, l'augmentation de la teneur en particules 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. Comme c'est le cas en présence du sable ou d'un taux élevé en fumée noire.

L'augmentation du taux d'aérosols dans l'atmosphère entraîne une plus forte turbidité atmosphérique qui réduit l'intensité du rayonnement solaire incident. A Katowice (ville industrielle de Pologne) par exemple, on estime cette réduction des radiations à environ à 12 % [26].

# *Chapitre 5*

## *Prélevement et analyse des particules*

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

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

## V.1 ECHANTILLONNAGE

Le prélèvement des particules en suspension comprend en général deux aspects :

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

Quelque soit, le mode d'échantillonnage utilisé, le rendement granulométrique des particules en suspension n'est égale à 100 % que pour les tailles approximativement inférieures à 3  $\mu\text{m}$ . Au delà de cette dimension, l'efficacité de la collecte des divers dispositifs est influencée, aussi bien, par les conditions météorologiques, en particulier la vitesse du vent que par les conditions de prélèvement telles que le débit d'aspiration, la position et les conceptions du dispositif de captage [20].

Comme les résultats dépendront des méthodes utilisées, les études de comparaison sont souvent difficiles à réaliser. Le protocole expérimental joue alors un rôle important dans la présentation des résultats.

Généralement, l'échantillonnage se fait avec ou sans fractionnement granulométrique, ce qui donne lieu à trois catégories de prélèvement [20, 27].

- Les prélèvements sans coupure granulométrique spécifique
- Les prélèvements avec coupure granulométrique
- Les prélèvements avec fractionnement granulométrique

### V. 1. 1. LES PRELEVEMENTS SANS COUPURE SPECIFIQUE

Il s'agit de capter toutes les poussières en suspension allant jusqu'à 30  $\mu\text{m}$  ou plus. Selon le débit d'aspiration choisi, on enrichit ou non le prélèvement avec les particules de diamètre supérieur à 10  $\mu\text{m}$ .

On distingue, dans cette catégorie selon la taille et la nature des particules 3 modes de prélèvement [20]:

#### a. Méthode de fumées noires (F.N)

Dans cette méthode normée, on privilégie la captation des particules fines inférieures à 7  $\mu\text{m}$ . Les particules de taille inférieure à 5  $\mu\text{m}$  sont collectées avec une grande efficacité.

La méthode est très adaptée pour l'étude et le prélèvement des particules issues de la combustion.

#### b. Méthode de prélèvement sur filtre ouvert à débit moyen

Dans ce cas, les prélèvements sont effectués par aspiration de l'air et rétention des particules sur un filtre ouvert de 47 mm de diamètre. Le débit d'aspiration est de l'ordre de 1.5  $\text{m}^3/\text{h}$ . La durée d'échantillonnage est de 24 h ou plus.

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

### c. Méthodes de prélèvement à très fort débit

La méthode utilise, comme la précédente, la rétention des particules sur filtre.

Toutefois les appareils sont dotés d'une pompe d'aspiration d'un très fort débit de l'ordre de 60 à 100 m<sup>3</sup>/h. Ces appareils portent le nom de *High Volume Sampler, HVS*.

Comme la méthode précédente ils donnent les TSP et peuvent avoir une efficacité de collecte des particules de diamètre supérieur à 10 µm qui atteint jusqu'à 25 % pour les grosses particules de 30 µm. Le fort débit utilisé permet d'avoir sur une durée de 24 heures de grandes masses de particules recueillies, ce qui facilite toutes sortes d'analyse de l'échantillon.

Les modes de prélèvement à débit moyen et par HVS sont largement utilisés de nos jours.

#### V. 1. 2. Prélèvement avec coupure granulométrique

Il s'agit d'un équipement équipé d'une tête, qui par sa conception, ne capte que des particules dont le diamètre est inférieure à une valeur fixe. En pratique, les têtes commercialisées sont conçues pour capter les particules de diamètre inférieure ou égale à 10 µm. Il s'agit ici de collecter uniquement les particules en suspension inspirables, c'est à dire, la fraction trachéobronchique et alvéolaire.

L'appareil le plus connu, de nos jours, et accepté comme référence, est le HVS-PM10 de la firme américaine Andersen. C'est un HVS équipé d'une entrée sélective pour la collecte des particules  $\leq 10 \mu\text{m}$ .

La jauge bêta, dont le principe de mesure est basé sur la radiométrie, est un autre appareil qui mesure les particules inspirables. La méthode ne permet cependant pas l'analyse ultérieure des particules collectées [18].

V. 1. 3. Les prélèvements avec fractionnement granulométrique

Ce sont des méthodes qui permettent une séparation plus fine des particules inspirables. La sélection des particules en classe granulométrique se fait par impaction d'où le nom d'impacteur.

Les impacteurs virtuels ou dichotomes travaillent à débit moyen (1,7 m<sup>3</sup>/h) et permettent d'avoir deux classes granulométriques : la fraction alvéolaire ( $d < 2.5 \mu\text{m}$ ) et la fraction trachéobronchique ( $2.5 < d < 10 \mu\text{m}$ ).

Les impacteurs à cascade sont équipés de 5 à 7 niveaux d'impaction et permettent d'avoir 5 à 7 fractions granulométriques ( de 0 à 1  $\mu\text{m}$  , de 1 à 2.5  $\mu\text{m}$  etc.). Ces cascadeurs travaillent à débit fort ( 30 à 60 m<sup>3</sup>/h).

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

Nous résumons dans le tableau n°9 les principales méthodologies de prélèvement utilisées pour l'échantillonnage des particules en suspension [20, 27].

Tableau n° 9

Principales méthodes d'échantillonnage des particules en suspension

Dispositif de prélèvement	Sélection granulométrique	Nombre de fractions	Diamètre de particules ( $\mu\text{m}$ )	Débit (m <sup>3</sup> /h)	Durée d'échantillonnage (h)	Principe de la mesure	Analyse ultérieure des particules
Sans tête (FN)	non	1	0-7	1.5	24 H	Réfectométrie	non
Sans tête	non	1	0-20	1.5	24 H	Gravimétrie	oui
HVS	non	1	0 à 20-30	66 à 100	24 H	Gravimétrie	oui
HVS -PM10	oui	1	0-10	66 à 100	24 H	//	//
Jauge Bêta	oui		0-10	1.5	24 H	Radiométrie	non
HVS -PM10 impacteur à cascade	oui	2 à 7	0-10	34 à 68	24 H	Gravimétrie	oui
Dichotomes	oui	2	0-10	1.7	24 H	Gravimétrie	oui

## V. 2. MESURE DE LA CONCENTRATION PARTICULAIRE

A partir des particules collectées sur filtres, l'appréciation de la charge globale s'effectue soit par gravimétrie, soit par réflectométrie, soit par radiométrie Bêta.

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

### a. Méthode gravimétrique

La méthode est simple dans son principe, les filtres doivent être pesés dans les mêmes conditions avant et après prélèvement. La nature du filtre, sa résistance au fort débit, son hygroscopicité et sa porosité doivent faire l'objet d'un choix adapté à l'étude envisagée.

### b. La réflectométrie : méthodes des fumées noires FN

L'air échantillonné passe à travers d'un papier filtre sur lequel se déposent les particules.

La réflectométrie mesure la réflectance du dépôt par référence à celle du papier vierge, fixée arbitrairement à 100 %. Une courbe de calibration fournit une correspondance entre la noirceur du dépôt ainsi évaluée et la masse des particules recueillies. Cette méthode privilégie les particules fines issues des combustions fixes et mobiles (suies et imbrûlés) et n'est valable que dans les zones urbaines [20].

### c. Détecteur du rayonnement Bêta

Le principe de la méthode est la mesure sur le filtre lui-même de la masse particulaire par atténuation d'un rayonnement bêta. La jauge se compose d'un émetteur de rayons bêta de faible énergie et d'un détecteur.

Le rayonnement bêta est absorbé par la matière et la mesure consiste à calculer la variation d'absorption des rayons bêta entre le filtre chargé et le filtre vierge.



L'absorption du rayonnement bêta est indépendante de la nature des particules [18]

### V. 3. LES FILTRES ET MEMBRANES DE RETENTION [18,29]

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

- Une efficacité de collection au moins 99 % pour les particules de diamètre égale à 0.3  $\mu\text{m}$  et plus.
- Une hygroscopicité faible.
- Un taux d'impuretés aussi faible que possible pour éviter les interférences dans l'analyse quantitative des composés métalliques que véhiculent les poussières.

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

#### a. Les filtres à fibres de verre

Ils ont une efficacité de collection de 99.9% pour les particules de diamètres 0.3  $\mu\text{m}$ . Cette efficacité est mesurée sur les particules d'aérosol du diacétylphtalate [28].

L'hygroscopicité des filtres en fibre de verre est faible, la teneur d'humidité est de 0.1 à 0.5 %. Ils sont adaptés aussi bien pour les prélèvements à fort débit que ceux à faible ou moyen débit.

L'inconvénient majeur de ces filtres provient du fait qu'ils contiennent divers éléments métalliques à des teneurs variables. Dans ce contexte, l'élément le plus gênant est le zinc qu'on retrouve lors de la minéralisation des filtres à des teneurs élevées. La teneur des filtres **Gelman** type A et **Whatman** GF-A contiennent plus de 50  $\mu\text{g Zn/cm}^2$  [28].

### b. Les filtres membranes

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

Les filtres membranes le plus utilisés pour la collecte des particules ont une porosité de  $0.8 \mu\text{m}$ . Ces fibres sont plus hygroscopiques que les filtres en fibres de verre, mais présentent l'avantage d'avoir des teneurs extrêmement faibles en éléments métalliques.

Leur inconvénient est qu'ils présentent une forte résistance à l'écoulement de façon qu'on ne peut pas les utiliser dans les HVS pour les prélèvements à fort débit [28].

Avec les deux types de filtres (filtres à fibres et filtre membrane) on recueille avec une bonne efficacité même les particules très fines de  $0.1 \mu\text{m}$  de diamètre.

## V. 4. ANALYSE DES PARTICULES EN SUSPENSION

La diversité et le grand nombre de constituants chimiques qu'on rencontre dans les particules en suspension font que l'étude analytique complète est souvent difficile à réaliser.

Il existe de nos jours cinq ou six principales techniques d'analyses qui sont souvent complémentaires et qui malgré les faibles quantités échantillonnées, sont d'une grande précision et sensibilité. Certains métaux lourds peuvent être détectés même à des teneurs de l'ordre du  $\text{ng}/\text{m}^3$ . Une analyse élémentaire complète ne peut cependant être obtenue que par la conjugaison de plusieurs méthodes analytiques.

Nous présentons dans ce qui suit brièvement quelques aspects généraux des méthodes les plus utilisées. Certaines méthodes nécessitent un prétraitement de l'échantillon à l'état brut.

#### **V. 4. 1. La spectrométrie d'absorption atomique (SAA)**

La SAA permet l'analyse quantitative d'un grand nombre de métaux. Elle est basée sur la pulvérisation d'une solution de l'échantillon dans une flamme où les composés sont atomisés. Les éléments à l'état d'atomes sont ensuite excités par une source lumineuse issue d'une cathode creuse de même élément que celui dont l'analyse est envisagée. L'énergie lumineuse absorbée par l'étape d'excitation est alors directement proportionnelle à la concentration de l'élément (loi de Lambert Beer).

La SAA est largement utilisée dans l'analyse des TSP. Elle nécessite toute fois une minéralisation préalable des particules piégées sur le filtre.

Il existe une autre version de la SAA qui utilise à la place d'un brûleur ou de la flamme, un four à graphite chauffé électriquement à 1500 - 2000 °C. C'est la SAA à four de graphite ou SAA électrothermique. Son avantage réside dans l'analyse des teneurs métalliques extrêmement faibles (la sensibilité est 100 à 1000 fois meilleure qu'avec la SAA à flamme) [29].

#### **V. 4. 2. La spectroscopie d'émission**

En spectroscopie d'émission, les molécules sont vaporisées puis excitées. Le retour à l'état initial est suivi d'une émission des photons donnant un spectre de raies caractéristiques à chaque élément.

L'excitation atteint des températures de l'ordre de 5000 °C (10.000 °C dans le cas d'un plasma). L'excitation se fait en général par étincelle ou en plasma. Les séries de raies émises sont détectées sur photomultiplicateur.

L'avantage par rapport à la SAA est l'analyse simultanée de dizaines d'éléments métalliques et non métalliques.

De nos jours c'est la version ICP (*Inducted Coupled Plasma*) ou torche à plasma qui est la plus répandue. Dans cette méthode, les spectres d'émissions sont obtenus à l'aide d'un plasma dans le gaz Argon par induction haute fréquence. La température atteinte par le plasma est de l'ordre de 10.000 °C ce qui permet d'exciter et d'ioniser un grand nombre d'éléments non accessibles à la SAA [29].

#### V. 4. 3. La fluorescence X [2, 28, 30]

Les rayons X sont produits lorsque des électrons accélérés acquièrent une énergie suffisamment élevée qui peut dans un atome expulser un électron des couches proches du noyau vers les couches externes.

La place libre de l'électron expulsé est susceptible d'être comblée par un électron se situant sur un autre niveau d'énergie avec émission d'un rayonnement électromagnétique : C'est la spectrométrie d'émissions X

A chaque couche correspond une série de raies d'émissions X dont les longueurs d'ondes sont caractéristiques pour chaque élément ou atome considéré. Un exemple de transition est donné en figure n° 12

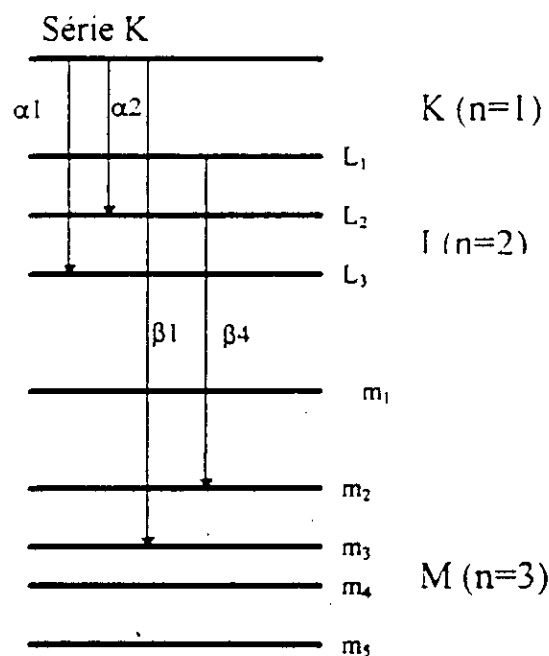


Figure n° 12

*Exemples de transitions associées à une émission de X.*

L'exemple montre que si un atome a perdu un électron de la couche K, il va se retrouver dans le même niveau quantique  $\pi$  qui est instable ; Il y a alors un électron des couches supérieures par exemple de la couche  $L_3$  qui va remplacer l'électron perdu. L'atome atteint alors un niveau quantique plus stable L. La différence d'énergie K et L est émise sous forme de rayonnement X d'une longueur d'onde bien déterminée ici  $K\alpha_1$  ( pour Molybdène par exemple  $\lambda_{K\alpha_1} = 0.7093 \text{ nm}$ ,  $E = 17.48 \text{ keV}$ ,  $\lambda_{K\beta_1} = 0.6323 \text{ nm}$ ,  $E = 19.61 \text{ keV}$ ).

De la même manière des atomes peuvent en absorbant des rayons X d'énergie suffisamment élevée, être excités à des niveaux d'énergie plus élevés. En revenant à l'état initial ces atomes émettent un rayonnement X caractéristique pour chaque élément. C'est le rayonnement X secondaire. La fluorescence X es basée sur ce principe.

Les rayons X nécessaires à l'excitation sont généralement produits par un tube RX, les rayons secondaires issus de l'échantillon arrivent sur un monochromateur ( cristal) placé au centre d'un goniomètre ou ils sont dispersés selon un angle  $\theta$  bien déterminé ( Relation de Bragg  $n\lambda = 2 d \sin\theta$ )

La détermination des longueurs d'onde permet d'accéder à l'analyse qualitative. L'intensité des raies permet d'avoir l'analyse élémentaire quantitative.

Ce système d'équipement qui effectue un balayage des longueurs d'onde est appelé « fluorescence X à dispersion de longueurs d'ondes ».

Il existe aussi la fluorescence X à dispersion d'énergie ( XRF énergie dispersive). Cette technique est basée non pas sur la détermination des longueurs d'onde mais sur la mesure des énergies du rayonnement X issu de l'échantillon. L'énergie du Photon  $h\nu$  mesuré est caractéristique des éléments.

Cette méthode est de nos jours très utilisée en pollution atmosphérique. L'inconvénient dans l'analyse élémentaire par XRF est que les rayons d'intensité  $< 1$  eV ne sont que difficilement saisis, ce qui ne permet d'analyser que les éléments se trouvant au delà de Na ( $Z > 11$ ).

La XRF est une méthode d'analyse non destructive, qui en plus des métaux permet une analyse des éléments S, P, Cl, etc..

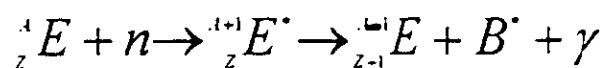
#### V. 4. 4. Analyse par activation aux neutrons INAA (Instrumental Neutron Activation Analysis) [15, 28]

Cette est une technique d'analyse élémentaire qualitative et quantitative qui a trouvé ces dernières années une grande application dans le domaine de l'analyse des poussières.

Ayant une grande sensibilité pour un grand nombre d'éléments, elle permet l'analyse d'éléments traces tels que le Hg, As, etc. (la technique est applicable à l'analyse de plus d'une quarantaine d'éléments métalliques et non métalliques)

L'analyse est basée sur la spectroscopie et le comptage de la radioactivité induite dans un échantillon qui subit auparavant une irradiation. Cette irradiation de l'échantillon a lieu dans un réacteur nucléaire par des neutrons.

La réaction nucléaire qui a lieu pour un isotope donné de l'élément E est



Dans ce processus l'identification de l'élément E est basée sur la mesure de l'énergie du rayon  $\gamma$  émis par  ${}^{A+1}_Z E^*$ , suivant une période radioactive qui dépend de l'isotope  ${}^{A+1}_{Z+1} E$ .

L'analyse peut se faire directement sur filtre et quelques mg d'échantillons suffisent pour une analyse multi-éléments.

L'inconvénient principal est l'inaccessibilité de l'analyse du Pb et du Cd dont les périodes radioactives sont trop longues et qui ne peuvent être étudiés que quelques mois après l'irradiation.

Dans ce chapitre relatif au protocole expérimental, nous présentons les sites étudiés, le mode de prélèvement et enfin les méthodes d'analyse utilisées dans la caractérisation des échantillons.

## VI. 1. SITES DE PRELEVEMENT

Pour l'étude des TSP en milieu urbain dans l'agglomération d'Alger nous avons, en fonction de l'objectif fixé, choisi deux sites de prélèvement qu'on peut qualifier de « *sites de proximité* » c'est à dire des sites qui sont directement influencés par les sources émettrices en l'occurrence le trafic routier.

Le premier site est implanté au Boulevard Colonel Amirouche, plus exactement au niveau du centre des oeuvres universitaires (COUS) en plein centre d'Alger. Ce site peut être considéré comme étant représentatif de la plupart des axes routiers du centre ville où on note la présence d'un important flux de piétons. Sur ce site, le poste de mesure est fixé à environ 8 m d'altitude et latéralement à 2 m du bord de la chaussée.

Le deuxième site est implanté sur la terrasse des classes de cours du Département de Génie chimique de l'Ecole Nationale Polytechnique qui est situé à environ 10 Km à l'Est d'Alger.

Le poste de prélèvement est placé à une hauteur d'environ 4 m et à 9 m de la RN5 vers laquelle, il est orienté. Ce deuxième site se différencie du premier par la très bonne ventilation naturelle qu'il subit.

A proximité de ces deux sites, il n'existe aucune usine industrielle émettrice de particules.

A noter que les hauteurs choisies permettent d'éviter les perturbations causées au niveau du sol par des sources locales accidentelles ou par des turbulences diverses (balayage des rues, jeux des enfants etc.)

Nous représentons en figures 13.a et b, la localisation de ces sites sur la carte d'Alger.



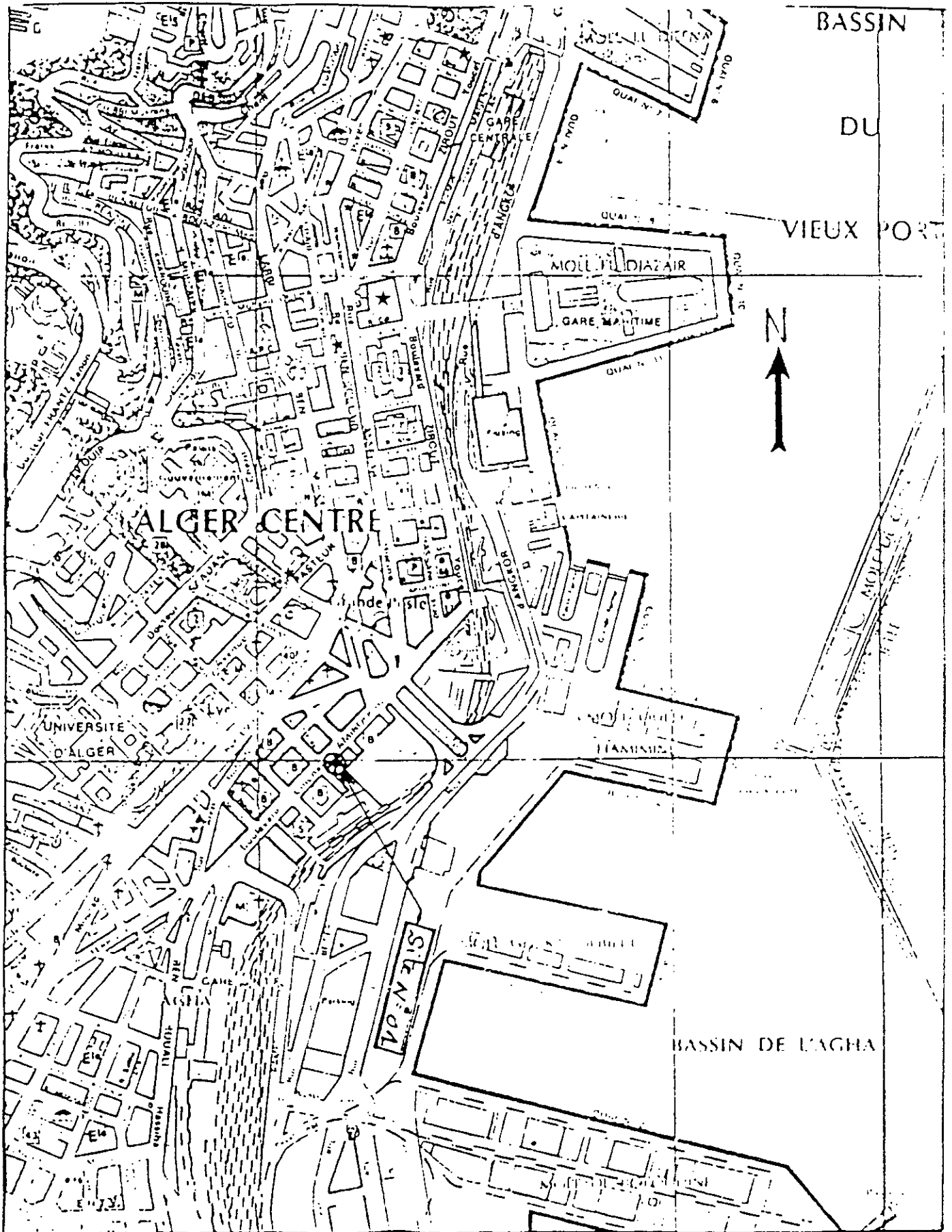


Figure n° 13.a  
Position du site n° 01 sur la carte d'Alger Centre

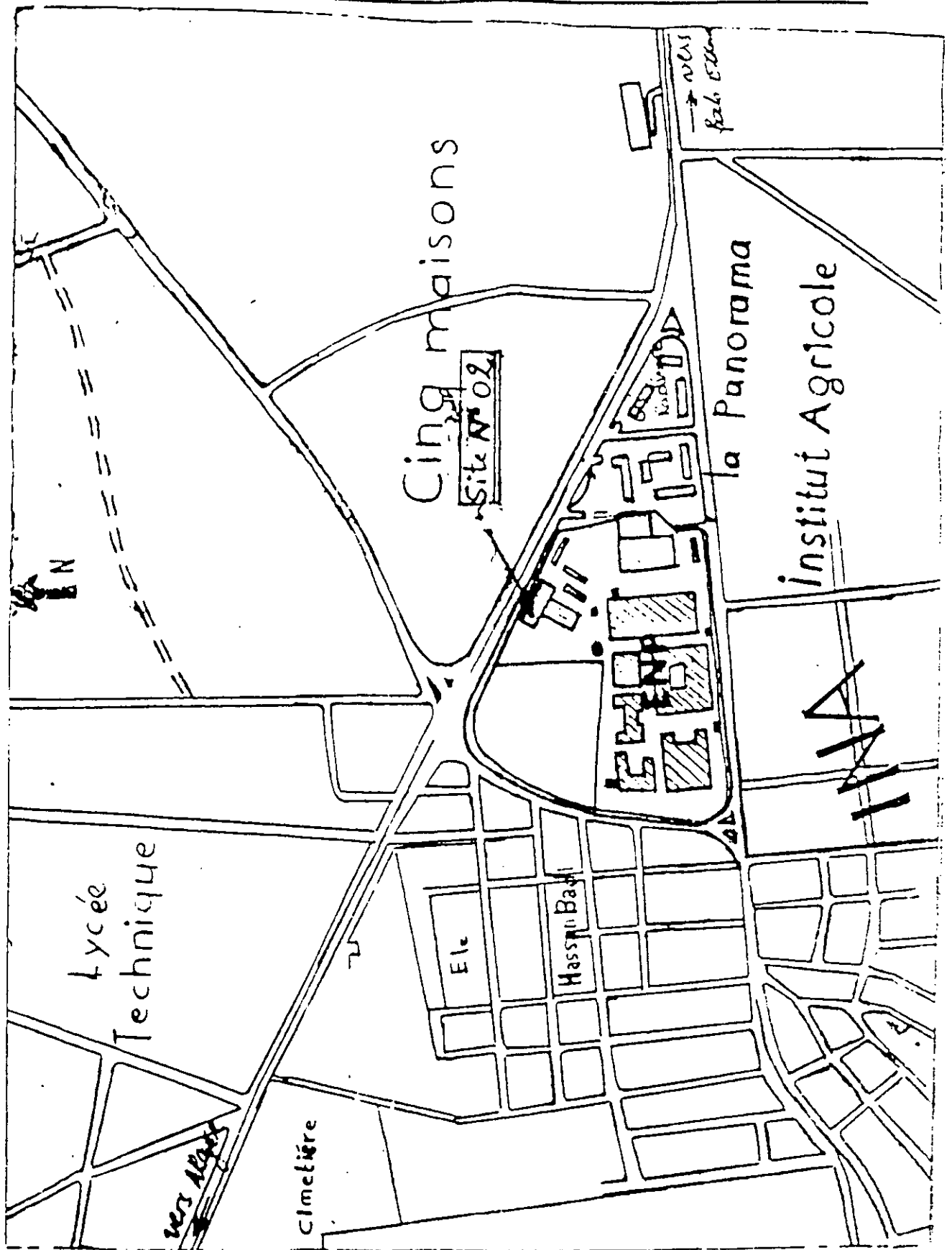


Figure n° 13.b

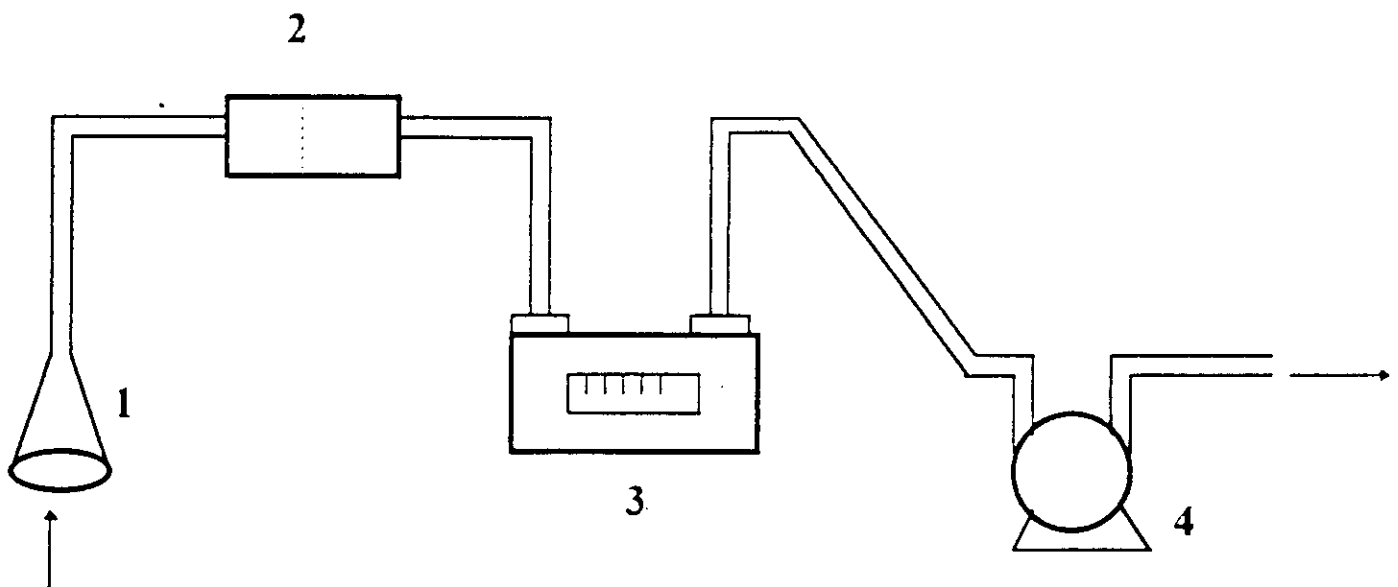
Position du site n° 2 sur la carte d'Alger Centre

## VI. 2. MODE PRELEVEMENT

En fonction des moyens disponibles, nous avons opté pour un prélèvement à débit moyen sans tête de coupure granulométrique comme indiqué en paragraphe V.1, ce mode d'échantillonnage permet donc la collecte des TSP de granulométrie allant de  $0.1$  à environ  $30\mu\text{m}$

Le dispositif expérimental utilisé est illustré en figure n°14. Il s'agit d'une ligne d'échantillonnage classique qui se compose d'un entonnoir dirigé vers le bas, d'un porte filtre, d'un compteur à gaz sec et d'une pompe à vide. Pour éviter la recirculation de l'air filtré nous avons fixé à la sortie de la pompe un long tuyau qui évacue les gaz filtrés dans le sens opposé à l'aspiration.

Les pompes utilisées ne nécessitent pas une maintenance spéciale et permettent de travailler sans problème pendant plusieurs mois.



- 1 : Entonnoir dirigé vers le sol
- 2 : Porte filtre et filtre de rétention
- 3 : Débitmètre à air
- 4 : Pompe d'aspiration

**Figure n° 14**  
Dispositif expérimental pour les prélèvements des TSP

Au site du Colonel Amirouche, le débit d'aspiration mesuré par un compteur à gaz de la société *Sonelgaz* est de 2.5 m<sup>3</sup>.h. Sur ce site et afin d'avoir une masse de poussières suffisante pour les analyses ultérieures, la durée de prélèvement a été fixée à 48 heures (exceptionnellement 72 heures).

Au poste de prélèvement implanté à l'ENP ou le débit d'aspiration s'élevait à 8 m<sup>3</sup>/h, la durée de prélèvement est de 24 heures.

Les filtres utilisés pour la rétention de particules sont :

- les filtres en fibre de verre  $\varnothing = 47$  mm du type Whatman GF/F
- Les filtres membranes en ester de cellulose  $\varnothing = 47$  mm de porosité 0.45 $\mu$ m de la firme *Schleischert Schül*

Pour les débits moyens choisis, les deux sortes de filtres sont adaptées au type d'étude que nous avons menée.

Bien que du point de vue analyse élémentaire des TSP, les filtres organiques sont plus avantageux, nous avons, pour des raisons de disponibilité, utilisé alternativement aussi bien l'un que l'autre.

Pour déterminer la masse des TSP collectée, les filtres sont pesées avant et après prélèvement à 0.1 mg près. Un séchage des filtres à l'étude avant chaque pesée n'a pas eu d'influence sur les pesées (la rétention de l'humidité est très faible).

### VI. 3. TRAITEMENT ET ANALYSE ELEMENTAIRE DES TSP

Afin d'effectuer une analyse élémentaire qualitative et quantitative des TSP recueillies, un certain nombre d'échantillons a été soumis à une analyse par spectroscopie d'absorption atomique et par spectroscopie d'émission ICP (Torche à plasma). Une autre lot d'échantillons a subi une analyse élémentaire par fluorescence X.

Les échantillons étudiés par spectroscopie d'absorption et d'émission ont été auparavant minéralisés. La minéralisation acide a lieu conformément à la norme ISO 9885 [31].

Le filtre chargé de particules est introduit dans un ballon de 50 ml contenant 10 ml d'acide nitrique (50 :50 V/V) et quelques gouttes de  $\text{HClO}_4$ .

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

Après évaporation partielle, une seconde minéralisation est effectuée sur une durée d'une heure. On évapore ensuite à sec et on reprend le minéralisat dans 10 à 20 ml d'eau distillée. La partie insoluble (carbone noir, alumines, silicates ) est alors filtrée et le filtrat transféré dans une fiole jaugée de 25 ml.

Les filtres vierges en ester de cellulose et en fibres de verre servant de « blanc » subiront la même procédure de minéralisation.

Les métaux lourds ainsi analysés sont ceux qui du point de vue sanitaire ont une incidence importante Pb, Ni, Cu, Cd, Mn, Zn et Fe.

Les appareils SAA et ICP utilisés sont de marque Phillips, les éléments Ni, Cu, et Cd ont été aussi analysés par SAA - électrothermique.

Pour l'analyse par fluorescence X , les TSP sont étudiées directement sur le filtre, l'appareil utilisé est un spectromètre à balayage de longueur d'onde de type Philips PW1480, équipé d'un cristal LiF 220 et de cristaux organiques TLAP (phtalate acide de thalium), et PCT (pentacerythriol).

# *Chapitre 7*

## *Résultats et Interprétations*

Pour l'étude des TSP au niveau de deux sites à Alger Centre et à l'ENP, nous avons réalisé en parallèle deux campagnes de prélèvements.

La première campagne relative au site Boulevard Colonel Amirouche qui s'est étalée sur la période allant du 07. 01. 1997 au 30. 06. 1997, nous a permis de collecter 51 échantillons.

Le suivi journalier relatif au site de l'ENP ( RN5) a porté sur la durée du 9 Mars 97 au 12 Mai 1997. Cette campagne nous a permis d'accéder à la collecte de 38 échantillons.

Pour l'analyse chimique des éléments et métaux lourds associés au TSP prélevée, nous avons étudié 9 échantillons d'Alger Centre et 13 échantillons de l'ENP.

## VII. 1. ETUDE DES PARTICULES TOTALES EN SUSPENSION

### VII. 1. 1. Particules totales en suspension à Alger Centre ( Bd CI Amirouche)

Les teneurs en TSP enregistrées à Alger Centre et exprimées en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  sont illustrées sous forme d'histogrammes en figure n° 15.

On constate à première vue qu'il existe une large fourchette de variations des teneurs atmosphériques en TSP, le minimum étant de  $23.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et le maximum atteint un niveau de  $99 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La moyenne s'élève à  $49.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La déviation standard  $\sigma = 19.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  est assez élevée, ce qui dénote de la présence, autour de la moyenne d'une dispersion assez large des teneurs relevées.

Par ailleurs, on constate que le percentile 95 (P95) est de  $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , c'est à dire que 5% des teneurs sont supérieures à cette valeur (le P95 est intéressant à déterminer car il sert souvent de norme ou seuil-limite à ne pas dépasser).

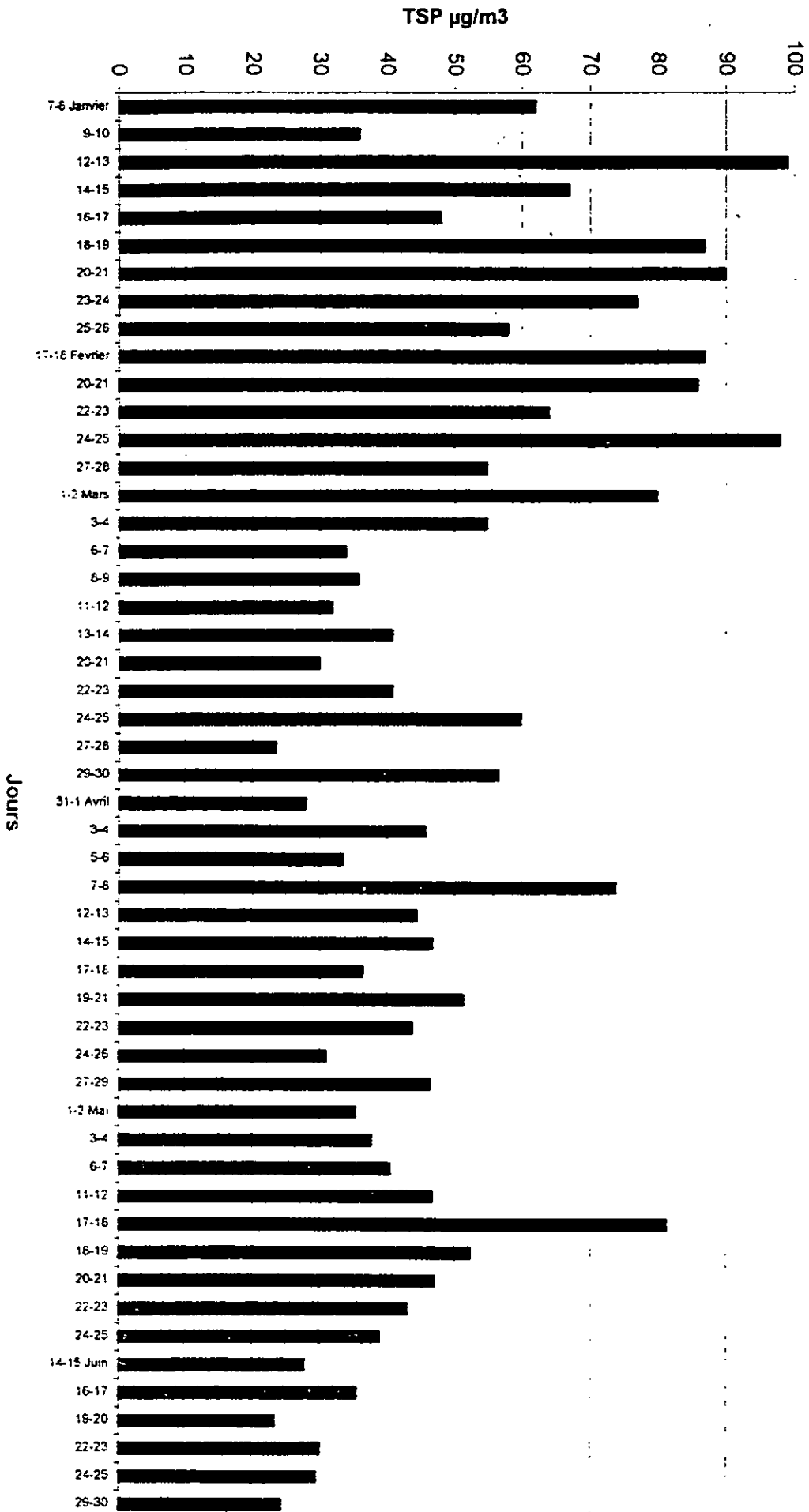


Figure n°15  
Evolution temporelle des teneur en TSP à Alger Centre (Bd Cl Amirouche)



Les variations temporelles qu'on observe sont dues d'une manière générale à l'intensité du trafic routier et en particulier à l'effet du week-end (Jeudi-Vendredi) où le trafic automobile est moins dense. C'est le cas par exemple de la teneur la plus basse ( $23.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) qui a été mesurée le Week End du 27 et 28 Mars.

Ainsi, les jours ouvrables, la moyenne des TSP s'élève à  $54.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  alors qu'elle n'est que de  $41.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  les jours de week-end, soit une réduction de 25 % du taux de pollution.

Nous avons vérifié statistiquement dans quelle mesure, la différence entre ces deux moyennes est significative et non fortuite due par exemple aux fluctuations d'échantillonnage [32].

Le calcul donné en Annexe I, montre que la différence est très significative au seuil de probabilité de 5 %. En d'autres termes, la probabilité que la différence jours ouvrables / jour de week-end soit purement fortuite et très inférieure à 5 %. Ce résultat permet d'affirmer avec certitude qu'une diminution du trafic routier, réduit sensiblement les teneurs en TSP. Ceci permet aussi d'affirmer que les activités du transport sont, à Alger, au moins responsables de 25 % de la pollution par les particules.

Les influences météorologiques qui jouent aussi un rôle dans les fluctuations des teneurs, sont quant à elles difficiles à mettre en évidence et ce pour deux raisons : d'une part l'hiver et le printemps 97 n'ont pas connu de véritables épisodes pluvieux et les rares cas de précipitations n'ont pas toujours coïncider avec nos prélèvements. D'autre part le site se trouve dans une rue type « Canyon » où les immeubles qui bordent de part et d'autre la rue, forment un obstacle au vent et réduisent son intensité.

Il est naturellement difficile de corréler les niveaux de pollution avec les divers facteurs qui les influencent. Ces facteurs agissent par synergie ou par antago-

nisme. Un vent fort favorise la resuspension mais en même temps on a une dispersion des particules dans l'air. Un temps stagnant est favorable à la sédimentation des TSP mais il est défavorable à la dispersion, d'où une accumulation des particules dans la basse atmosphère; tout cela sans parler de la conversion de polluants gazeux aux particules qui dépend elle même d'autres facteurs comme l'ensoleillement, le brouillard, la présence de métaux lourds catalyseurs etc.

### VII. 1. 2. Etude des TSP à Cinq Maisons (ENP)

Les teneurs atmosphériques en TSP enregistrées au niveau de l'ENP du côté de la RN5 sont illustrées en figure n° 17.

Les teneurs mesurées sont comprises dans un intervalle allant de 32.8 à 145  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La moyenne s'élève à 73.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  avec une déviation standard de  $\sigma=32.57\mu\text{g}/\text{m}^3$ . En ce site aussi l'évolution temporelle des TSP qui accuse d'importantes fluctuations, n'est pas homogène.

Des teneurs très faibles sont mesurées par exemple la veille et le Week End du 1er Mai (32.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et 35.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

A l'inverse du site d'Alger centre, les teneurs mesurées le jeudi ou vendredi ne sont pas forcément les plus faibles.

Les teneurs les plus élevées ( Teneurs supérieures à 130  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ) apparaissent plus fréquemment les jours de dimanche, de mardi et à un degré moindre les jeudis. Apparemment ces journées coïncident avec d'intenses activités. On sait par exemple que le dimanche est jour de marché à El-Harrach, ce qui conduit à d'énormes embouteillages à Cinq Maisons non loin du poste de mesure.

Comme à Alger Centre et pour les mêmes raisons, l'influence des facteurs météorologiques n'est pas très nette.

Par ailleurs, durant le week-end la réduction des TSP n'est pas suffisamment significative, ce qui montre que ce site subit, en plus des émissions du trafic routier, d'autres émissions naturelles ou anthropiques.

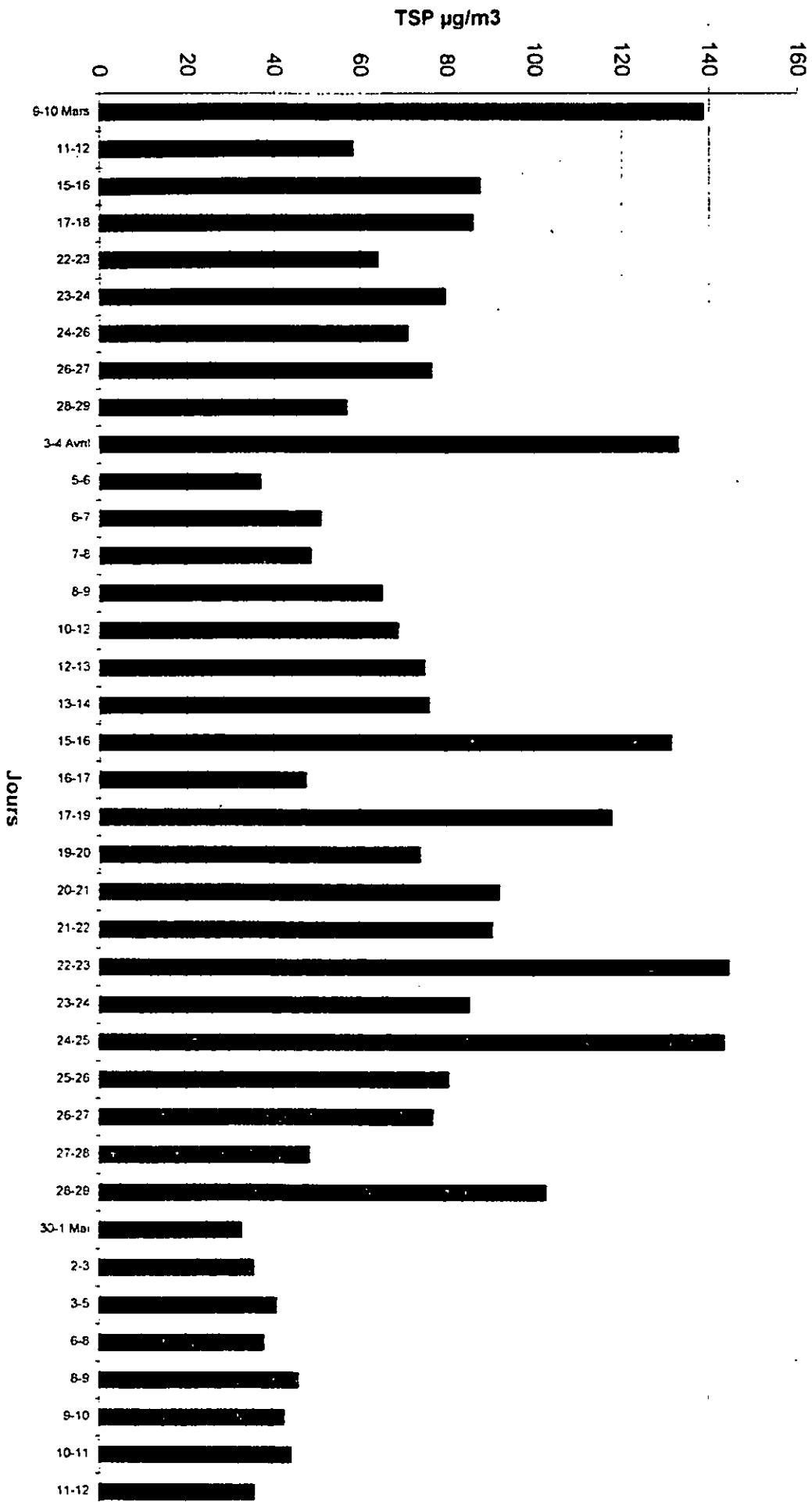


Figure n°16  
Evolution temporelle des teneur en TSP à ENP Cinq Maisons

En comparant les teneurs en TSP mesurées au niveau des deux sites, on constate globalement que les niveaux de pollution sont plus élevés à Cinq Maisons qu'au site d'Alger Centre où la teneur moyenne ne s'élève qu'au 2/3 de celle de l'ENP.

Ce résultat peut être expliqué par la nature du site de Cinq Maisons qui est localisé en un endroit très dégagé, très bien ventilé et qui est exposé à la mer, sous un vent dominant Nord-Est qui le balaye en chargeant la zone d'embruns marins et de diverses particules, notamment les particules des sols nus avoisinants.

Le site d'Alger centre se trouve par contre dans un environnement « propre » dans le sens où les rues et les trottoirs sont asphaltés et régulièrement balayés de façon que la remise en suspension des particules par les vents ne joue pas un rôle important. Il faut aussi signaler que la RN5 est très fréquentée par les poids lourds et bus (Diesel) qui émettent plus de particules de suies.

Enfin il est possible qu'en vertu de l'altitude plus élevée du poste de mesure d'Alger Centre, on capte moins de particules. Il serait intéressant d'effectuer une étude comparative pour déterminer cette influence en prélevant les TSP simultanément, au même site et à des altitudes différentes. Une étude dans ce sens portant sur le NO et le Pb a montré qu'une différence d'altitude de 4 mètres réduit fortement les teneurs en NO mais influençait peu les teneurs en Pb [33]. Comme le Pb est associé aux particules, on est tenté de dire que vis-à-vis des TSP l'influence de l'altitude est minime.

Dans le but de voir s'il existe une loi commune qui régit les fluctuations aux deux sites, nous comparons en tableau n° 10, les teneurs des prélèvements effectuées simultanément aux deux sites.

Tableau n° 10

*Teneurs des TSP prélevées simultanément à Alger et à l'ENP*

Jours	Teneurs en TSP à Alger Centre ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Teneurs en TSP à l'ENP ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )*
Samedi-Dimanche (22-23 Mars )	40.86	72.25
Lundi-Mardi (24-25 Mars)	59.2	71.02
(Jeudi-Vendredi) (27-28 mars)	23.65	56.98
Jeudi-Vendredi (3-4 Avril)	45.84	122.13
Samedi -Dimanche (5-6 Avril)	33.64	44.01
Lundi -Mardi (7-8 Avril)	73.8	57.03
Samedi-Dimanche (12-13 Avril)	44.78	75.52
Lundi -Mardi (14-15 Avril)	64.89	78.38
Mercredi-Jeudi-Vendredi 16-17-18 Avril	36.63	94.44
Mardi Mercredi (22-23 avril)	43.88	115.10
Samedi-Dimanche (3-4 avril)	37.97	40.89

\* Le prélèvement étant quotidien, nous avons effectué la moyenne sur deux journées consécutifs.

La présentation graphique de ces données en Figure n°18 montre qu'il n'y a pas de corrélation significative entre les TSP des deux sites.

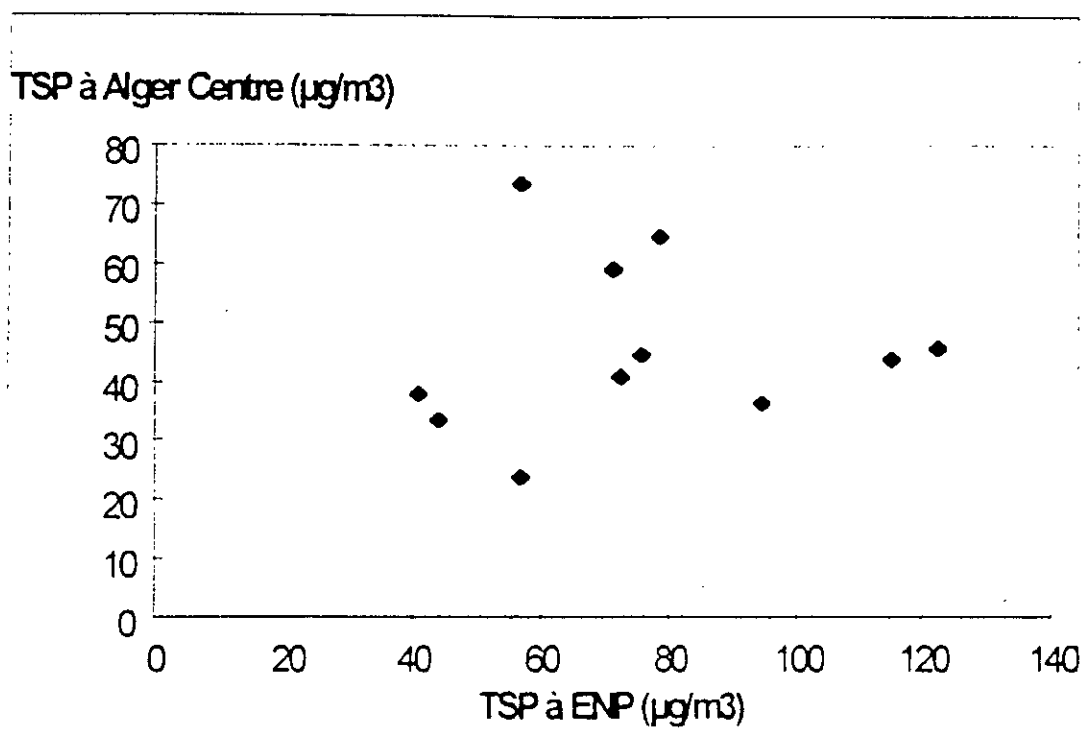


Figure N° 18

*Corrélation entre les teneurs mesurés à Alger Centre à l'ENP*

Ainsi, bien que les données météorologiques mesurées à Dar-El-Beida sont normalement valables pour les deux sites, on ne retrouve pas leur incidence sur les TSP.

Une chose est cependant commune à ces prélèvements, c'est la nature des particules; on constate en effet aussi bien à Alger Centre qu'à l'Enp que les couches de particules collectées présentent une couleur noire caractéristique des fumées noires et suies que dégagent généralement la combustion incomplète et les gaz d'échappements. Dans le cas de zones non exposées au trafic routier ou dans l'entourage des cimenteries, les filtres sont comme l'a montré une étude antérieure soit marrons (particules du sol de Badjarah) soit grisâtres (particules de ciment à Rais -Hamidou) [8].

Cette constatation est importante car du point de vue normes, les seuils limites pour les fumées noires sont plus sévères que pour les TSP.

Enfin, signalons que par rapport à l'étude effectuée l'année dernière aux mêmes sites mais sur une période plus courte [34]. On retrouve ici des niveaux de pollution qui sont du même ordre de grandeur, voire légèrement plus élevés.

### VII. 1. 3. COMPARAISON ENTRE LES NORMES ET AUTRES PAYS

En comparant les teneurs en TSP enregistrées durant cette étude aux normes et valeurs guides de certains pays que nous présentons en tableau n° 11, on constate que les niveaux de pollution mesurés restent globalement en dessous des normes fixées. Sur les deux campagnes, le seul limite de 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  n'a pas été atteint.

Tableau n° 11

*Normes régissant les teneurs en TSP*

Pays	Normes ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		Référence
Canada et USA	150	moyenne annuelle des prélèvements en 24h	[35]
Allemagne	150	moyenne annuelle des prélèvements en 24h	[36]
	300	P 98	
Suisse	70	moyenne annuelle des prélèvements en 24h	[37]
CEE	150	moyenne annuelle des prélèvements en 24h	[38]
	40-60	pour les fumées noires	

Si on considère cependant que nos prélèvements sont très riches en fumées noires, ces niveaux de pollution sont excessifs car dans ce cas la norme européenne de  $40-60\mu\text{g}/\text{m}^3$  est presque constamment dépassée aussi bien à Alger Centre qu'à Cinq maisons ENP.

Il est par ailleurs intéressant de comparer les niveaux des teneurs mesurées dans l'agglomération d'Alger avec ceux relevés dans certaines grandes métropoles étrangères.

Cette comparaison présentée en tableau n° 12 montre que Alger accuse une pollution par les TSP qu'est aussi importante que celle mesurée dans les grandes villes européennes comme Paris ou Berlin qui sont quand même des villes d'une toute autre taille (trafic routier plus importante, activités industrielles plus importantes etc.). Ces villes présentent toutefois l'avantage d'avoir un climat pluvieux qui participe au lessivage des particules et à l'auto-épuration de l'atmosphère, ce qui n'est pas le cas dans notre pays.

Aussi faut-il s'attendre en période sèche d'été à des teneurs encore plus élevées que celles que nous avons relevées durant cette étude.



Tableau n°12

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	60 (moyenne annuelle)	Zone semi-urbaine	[35]
	100 (moyenne annuelle)	Zone urbaine	[35]
Lille	128 (moyenne annuelle)	Zone urbaine à circulation moyenne	[39]
Marseille	128	Zone urbaine	[40]
Paris	101 (moyenne annuelle)	Zone rurale	[41]
	47.49 (moyenne trimestrielle Janv. fév mars 92)	Zone urbaine	[41]
	45 moyenne mensuelle mars 1993	Zone urbaine	[41]
Berlin	64 (moyenne annuelle)	Zone urbaine	[36]
Ruhr (Allemagne)	80 (moyenne annuelle)	Zone urbaine et industrielle	[36]
Alger Rais Hamidou	217 (moyenne sur 2 mois 1995)	Zone industrielle (Cimenterie)	[8]
Badjarah	109 (moyenne mensuelle) mai 1995	Zone de construction (habitation)	[8]
Alger centre	49.1 (moyenne sur 5 mois)	Zone urbain	Présente étude
Cinq-maison	73.4 (moyenne sur 3 mois)	Zone périurbaine	Présente étude

Cette comparaison présentée en tableau n° 12, montre qu'Alger accuse une pollution par les TSP qui est aussi importante que celle mesurée dans les grandes villes européennes comme Paris ou Berlin qui sont quand même des villes d'une tout autre taille ( trafic routier plus important ; activités industrielles plus importantes etc..) Ces villes présentent toutefois l'avantage d'avoir un climat pluvieux qui

participe au lessivage des particules et à auto-épuration de l'atmosphère, ce qui n'est pas le cas dans notre pays.

Aussi faut-il s'attendre en période sèche d'été à des teneurs encore plus élevées que celles que nous avons relevées durant l'étude.

Globalement cette étude comparative montre qu'en milieu urbain à Alger, la pollution pour les TSP est assez excessive. Certes les moyennes satisfont aux normes, mais on relève souvent notamment à cinq Maisons, des teneurs ponctuelles qui se trouvent juste à la limite du niveau toléré.

## VII. 2. Niveaux de pollution par les métaux lourds et autres éléments véhiculés par les TSP

### VII. 2. 1. Teneurs atmosphériques

L'analyse de certains échantillons de TSP recueillies à Alger Centre ainsi qu'à l'ENP (Cinq Maisons) nous a permis d'accéder aux teneurs atmosphériques en éléments majeurs tels que Si, Al, Ca, S etc. et en éléments métalliques présents le plus souvent à l'état de traces.

Selon la disponibilité des méthodes analytiques, le nombre d'échantillons analysés est pour certains éléments assez réduit (2 à 3 échantillons) et assez important dans le cas d'autres éléments (environ 20 échantillons pour le Pb, le Cu et le Ni).

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau n° 13 qui résume les teneurs atmosphériques mesurées à Alger Centre. Les figures n° 19, 20, 21 et 22 illustrent graphiquement les teneurs en ng/m<sup>3</sup> des différents éléments étudiés et les fractions massiques correspondantes en %.

A partir de ces données, nous avons calculé les teneurs moyennes des différents éléments véhiculés par les TSP à Alger Centre que nous présentons dans le tableau n° 14. La figure n° 23 illustre graphiquement (histogrammes) ces teneurs moyennes.

Les fractions massiques moyennes ainsi que les écarts-types sont présentés dans le tableau n° 15.



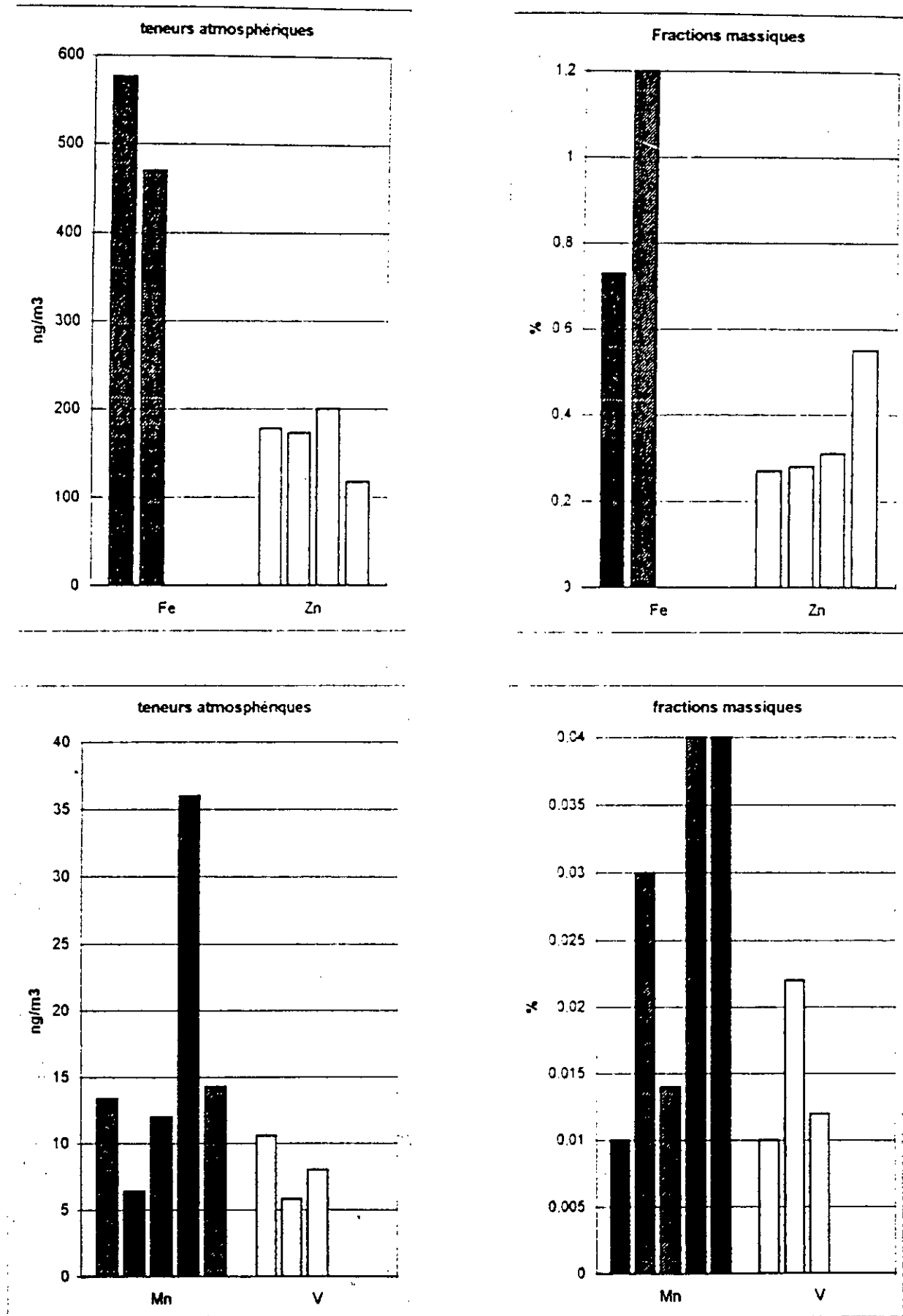


Figure n° 19 : Teneurs atmosphériques en Fe, Zn, Mn et V et les fractions massiques correspondantes mesurées à Alger-centre

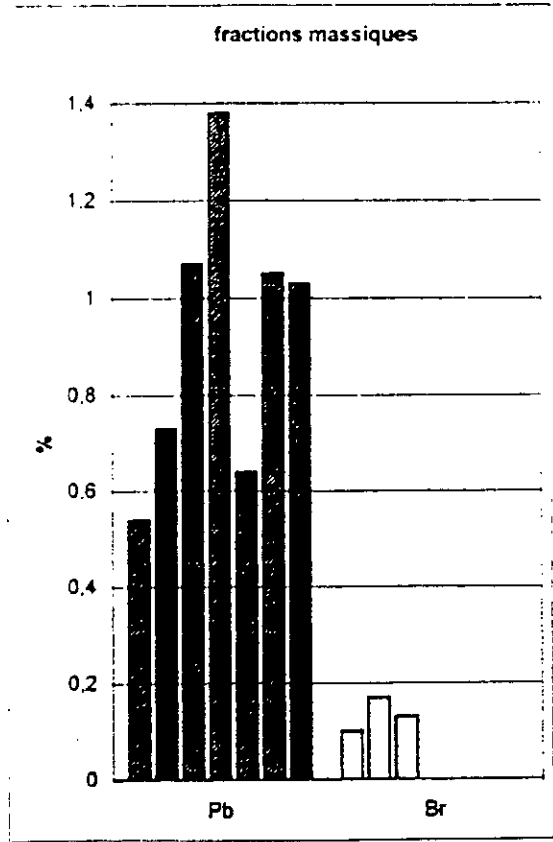
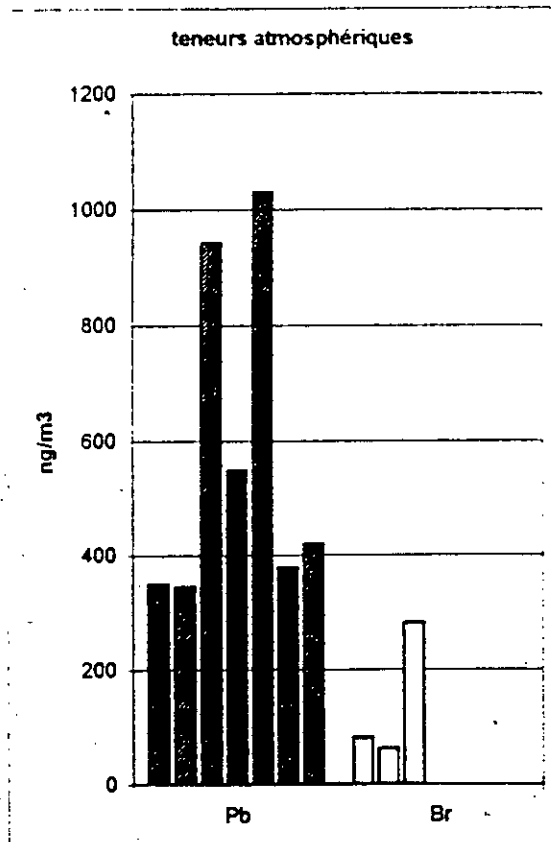
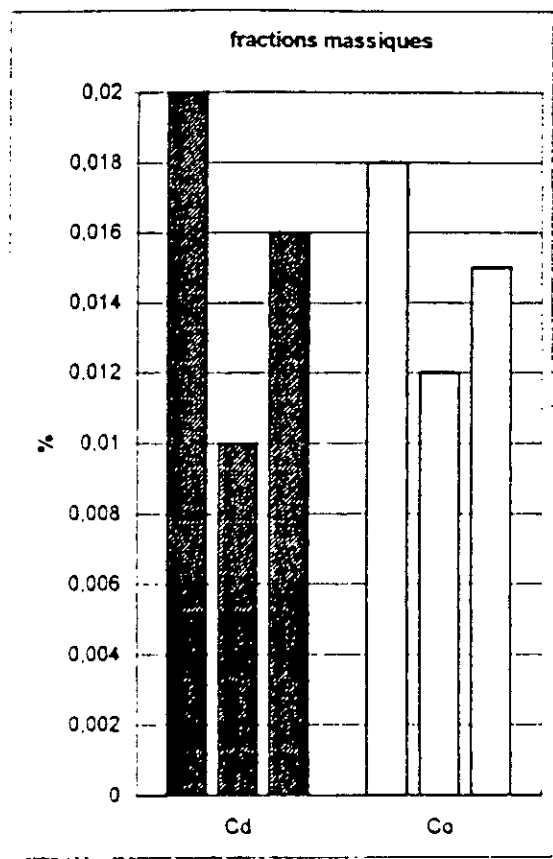
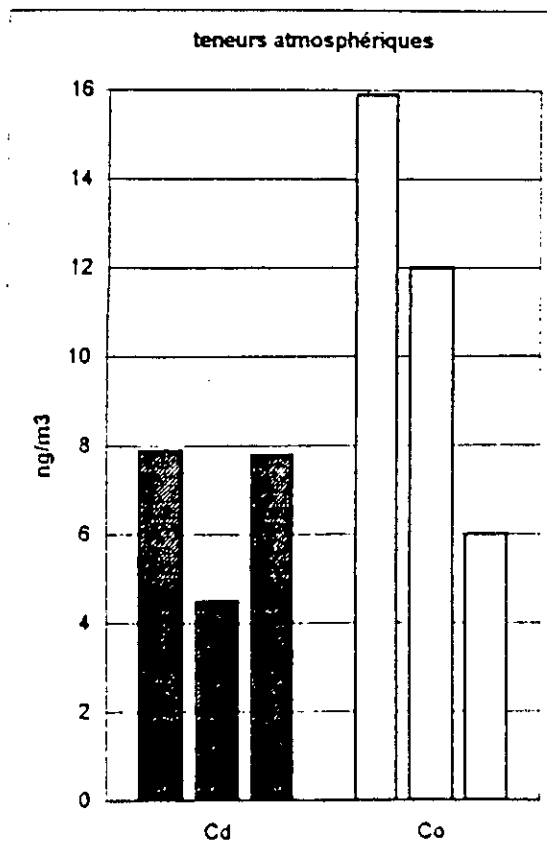


Figure n°20 : Teneurs atmosphériques en Cd, Co, Pb et Br et les fractions massiques correspondantes mesurées à Alger-centre

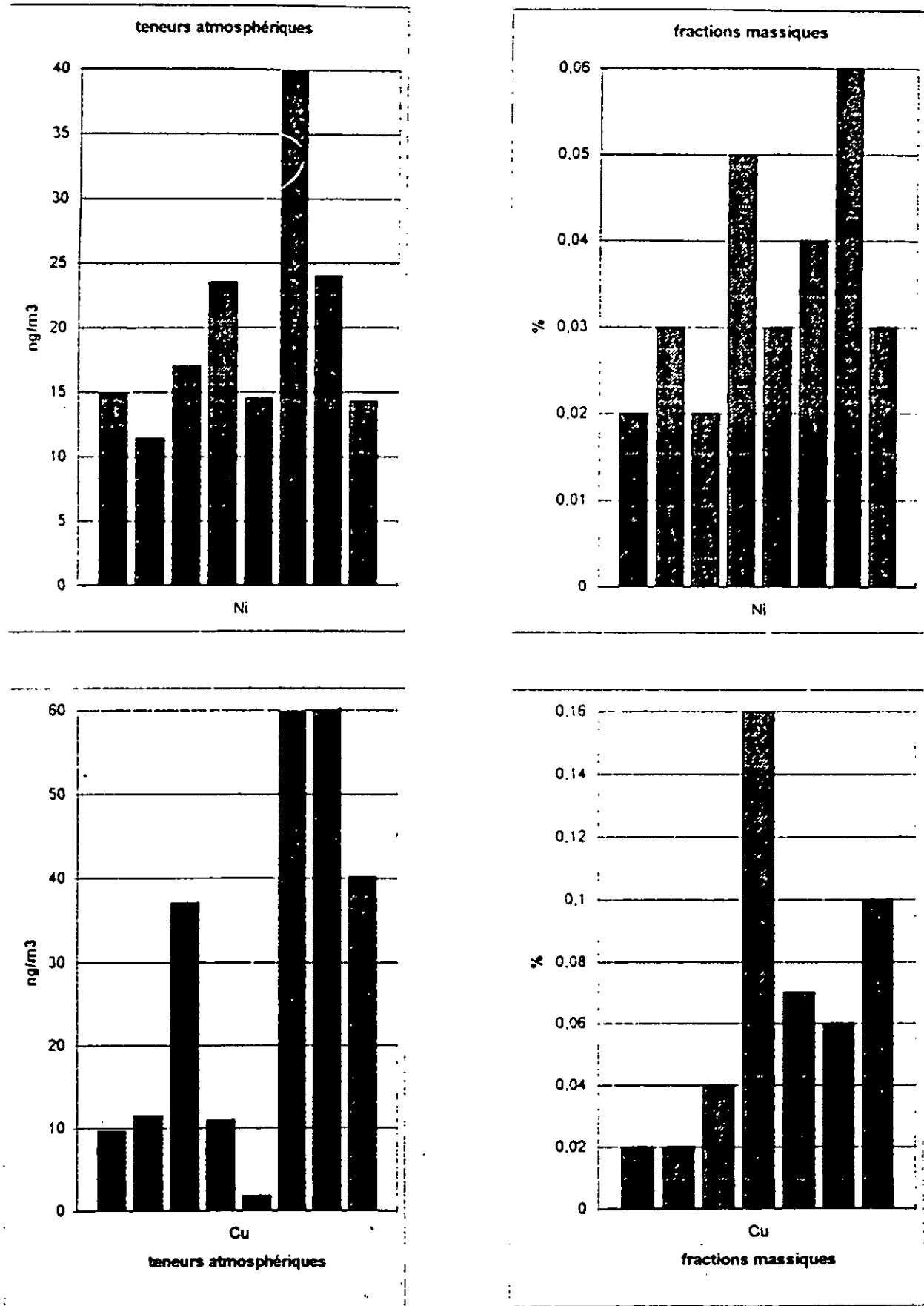


Figure n°21 : Teneurs atmosphériques en Ni et en Cu et les fractions massiques correspondantes mesurées à Alger-centre

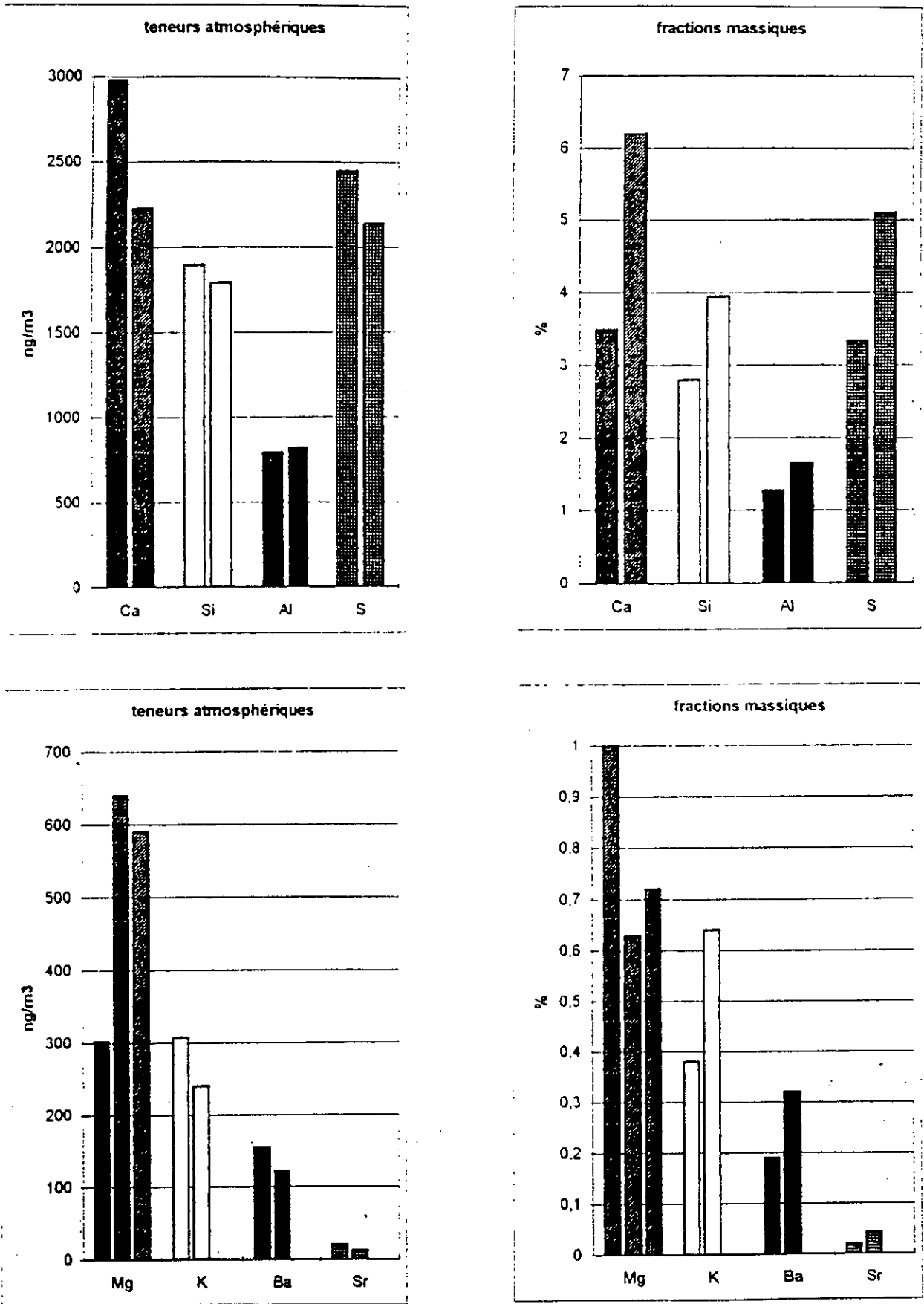


Figure n°22 : Teneurs atmosphériques en Ca, Si, Al, S, Mg, K, Ba et Sr et les fractions massiques correspondantes mesurées à Alger-centre

Tableau n° 14

*Teneurs moyennes des éléments associés aux TSP mesurées à Alger Centre*

Elément	Teneur moyenne en ng/m <sup>3</sup>	Ecart type en ng/m <sup>3</sup>	Nbre d'observations
Mn	16.4	11.36	5
Zn	167.3	8.88	4
Fe	523	74.95	2
Ni	20	9.19	8
Cu	28.8	23	8
V	8.2	2.40	3
Cd	6.7	2.74	3
Co	11.3	4.98	3
Pb	574	290.76	7
Br	141.5	121.178	3
Ca	2605	530.33	2
Si	1843	74.95	2
Al	806	19.79	2
K	273.5	33.99	2
Mg	510.8	179.58	3
Ba	137.6	22.62	2
Sr	16.7	5.51	2
S	2295	219.200	2
P	8.1	1.45	2



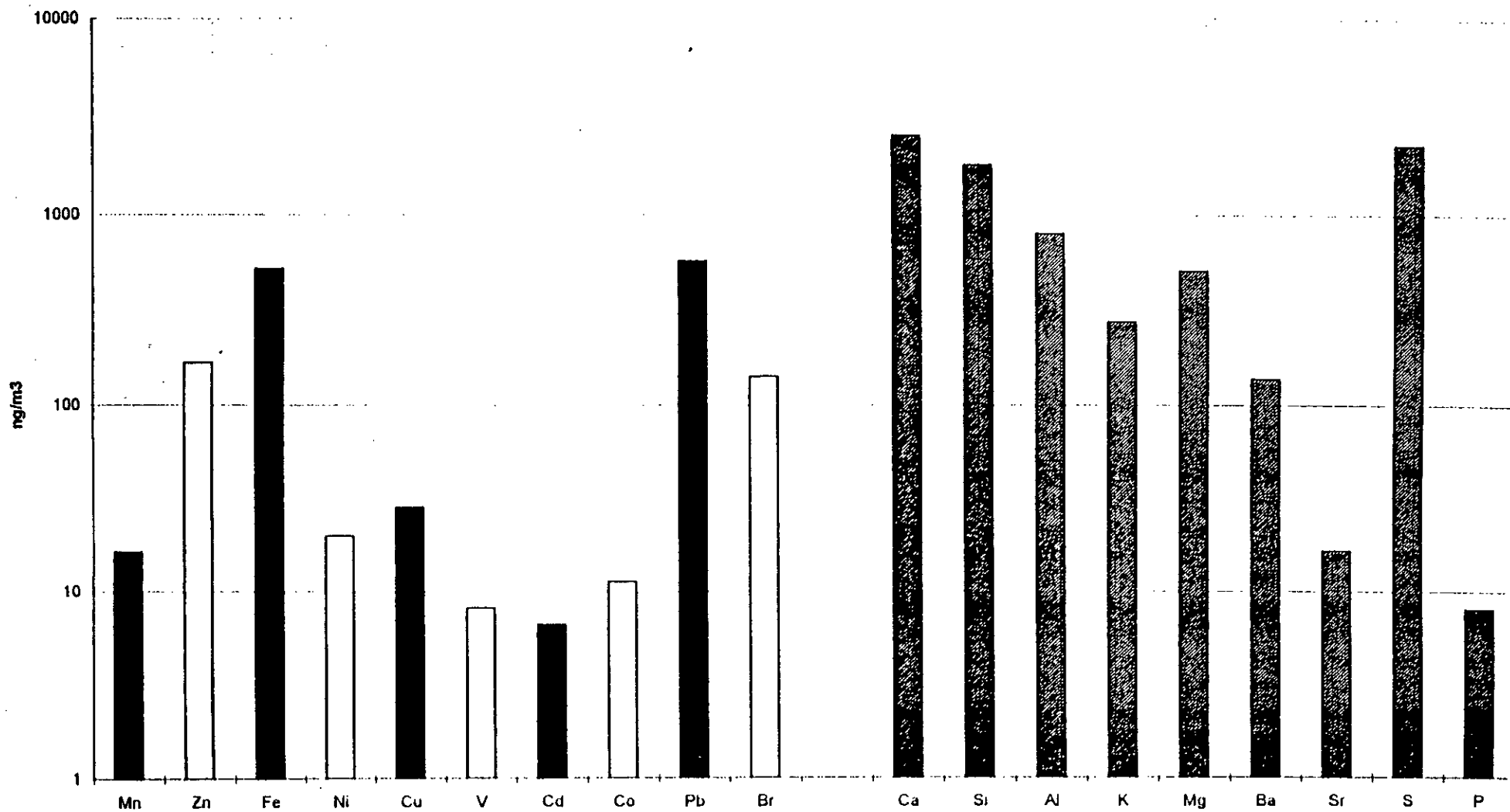


Figure n°23 : Teneurs Atmosphériques moyennes des éléments associés aux TSP mesurées à Alger-centre

Tableau n° 15

*Fractions massiques moyennes des éléments mesurées à Alger Centre*

Elément	Fraction massique moyenne en %	Ecart type en %	Nbre d'observations
Mn	0.027	0.01418	5
Zn	0.35	0.1329	4
Fe	0.97	0.3324	2
Ni	0.035	0.01414	8
Cu	0.07	0.05	7
V	0.015	$6.442 \cdot 10^{-3}$	3
Cd	0.015	$5.049 \cdot 10^{-3}$	3
Co	0.015	$3 \cdot 10^{-3}$	3
Pb	0.92	0.2949	7
Br	0.13	0.035	3
Ca	4.85	1.916	2
Si	3.38	0.813	2
Al	1.46	0.0722	2
Mg	0.78	0.193	3
K	0.51	0.0338	2
Ba	0.255	0.0919	2
Sr	0.03	0.0164	2
S	4.22	1.5488	2
P	0.015	$5.65 \cdot 10^{-3}$	2

En ce qui concerne le deuxième site à l'ENP, les résultats obtenus sont résumés dans le tableau n° 16.

Tableau n° 16

*Teneurs en métaux lourds mesurées dans les TSP à ENP- Cinq Maisons*

Elément	Teneurs en ng/m <sup>3</sup> déterminées par							
	XRF	SAA					ICP	
Mg	222.1						410	
Cr		33	28.6	36.4	23.4	15.6	15.6	
Mn		10.4	10.4	5.2				
Fe	230	700	980	625	360	600	200	
Zn	155.5	120	164.1	108.9				135.4
Ni	20.7	26	13.4	33	17.8	10.4	9.31	
		20.8	12.8	10.4	10.1			
Cu		28.6	2.5	4.9	52.1	52.2	23.4	
		0.4	26.1	18.2	1.1	26	14.3	
Cd		10.4	13	10.3	2.7	3.5	1.2	
		4.9	2.1					
Co		5.2	2.6					
Pb	260	104	560	140	200	140	160	
		110.7						280
Br	64.2							

Comme dans le cas du site d'Alger, nous présentons en tableau n° 17 les teneurs atmosphériques moyennes calculées sur l'ensemble des échantillons étudiés.

La figure n° 27 illustre graphiquement ces teneurs moyennes.

Les fractions massiques moyennes ainsi que les écarts-types relatifs à ce deuxième site sont reportés dans le tableau n° 18.

Tableau n° 17

*Teneurs moyennes des éléments associés aux TSP mesurées à ENP-Cinq Maisons*

Elément	Teneur moyenne en ng/m <sup>3</sup>	Ecart type en ng/m <sup>3</sup>	Nbre d'observations
Mg	316	132.86	2
Cr	25.4	8.77	6
Mn	8.6	18.04	3
Zn	151.2	23.92	5
Fe	527.9	291.92	7
Ni	16.8	7.68	11
Cu	20.8	17.91	12
Cd	6.2	18.28	9
Co	3.9	2.9	2
Pb	205.7	137.174	10
Br	64.2		1

Tableau n° 18

*Fractions massiques moyenné des éléments mesurées au site ENP-Cinq Maisons*

Elément	Fraction massique moyenne en %	Ecart type en %	Nbre d'observations
Mg	0.44	0.127	2
Mn	0.015	$4.183 \cdot 10^{-3}$	3
Cr	0.026	0.017635	6
Fe	0.77	0.4	6
Zn	0.25	0.0747	5
Ni	0.024	$9.623 \cdot 10^{-3}$	11
Cu	0.032	0.0217	11
Cd	0.009	$5 \cdot 10^{-3}$	9
Co	0.009	$2.828 \cdot 10^{-3}$	2
Pb	0.27	0.06851	10
Br	0.09		1

Les figures 24, 25 et 26 donnent une illustration graphique des teneurs mesurées ainsi que les fractions massiques des éléments considérés.

Il est à noter que dans le cas de ce site, les éléments majeurs Ca, Si, Al et S qui n'ont été analysé par XRF que dans un seul échantillon n'ont pas été repris dan ce travail. Nous avons jugé qu'un échantillon unique ne peut assurer une représentativité même minime des teneurs observées.

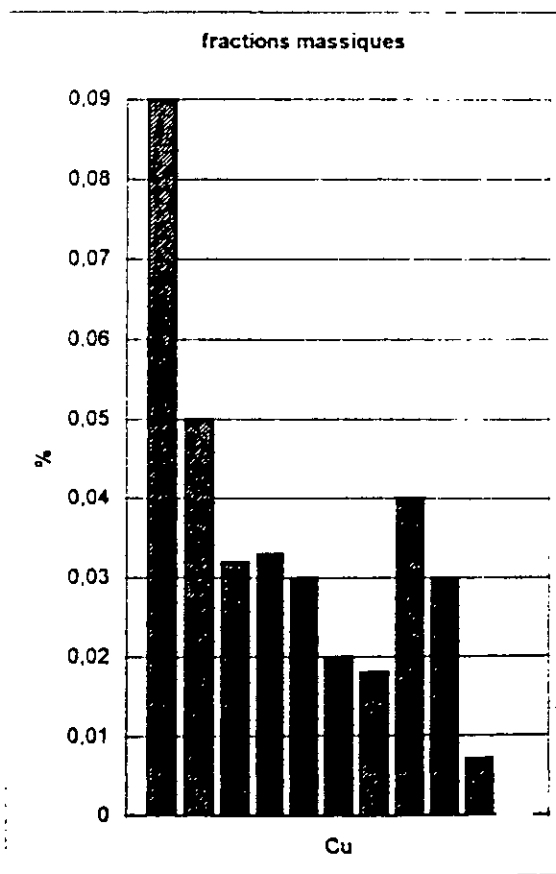
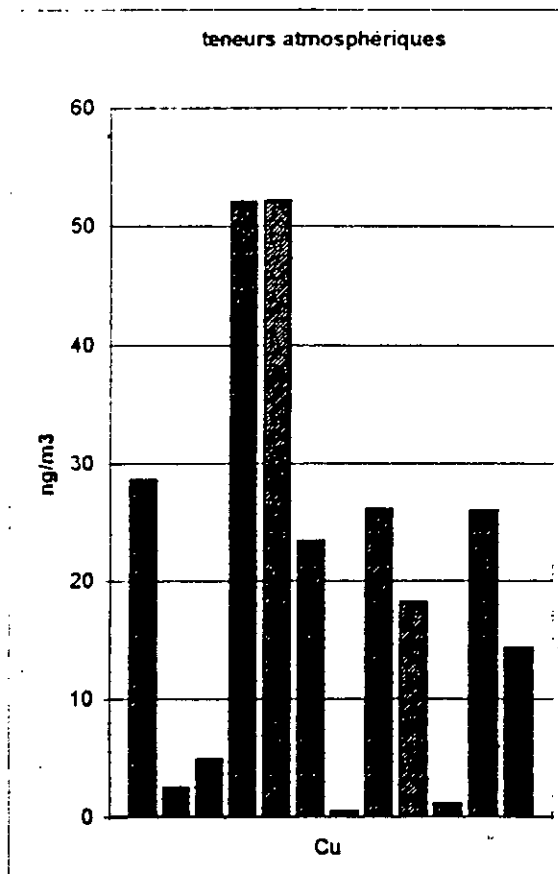
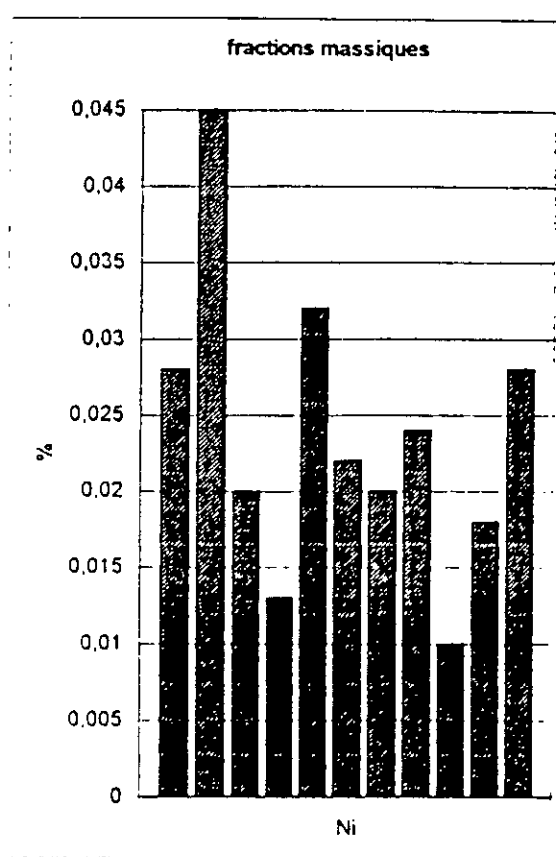
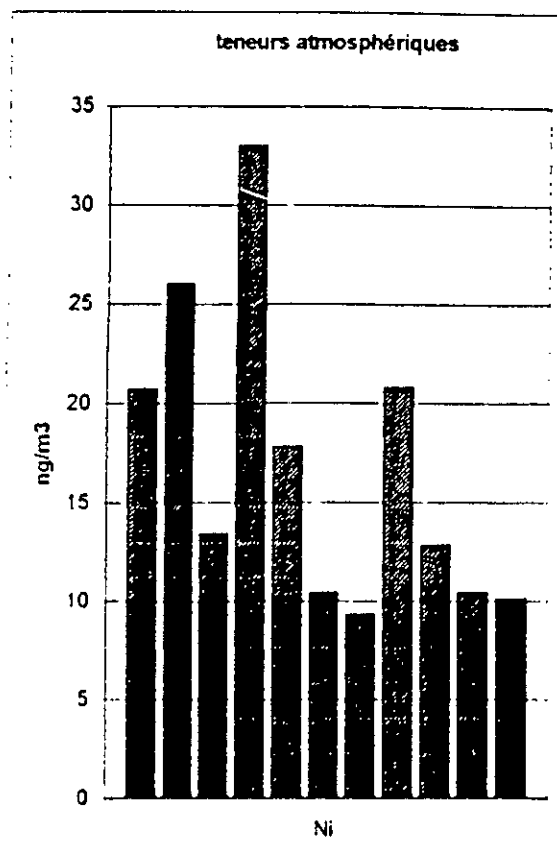


Figure n°25 : Teneurs atmosphériques en Ni et Cu et les fractions massiques correspondantes mesurées à ENP - Cinq Maisons

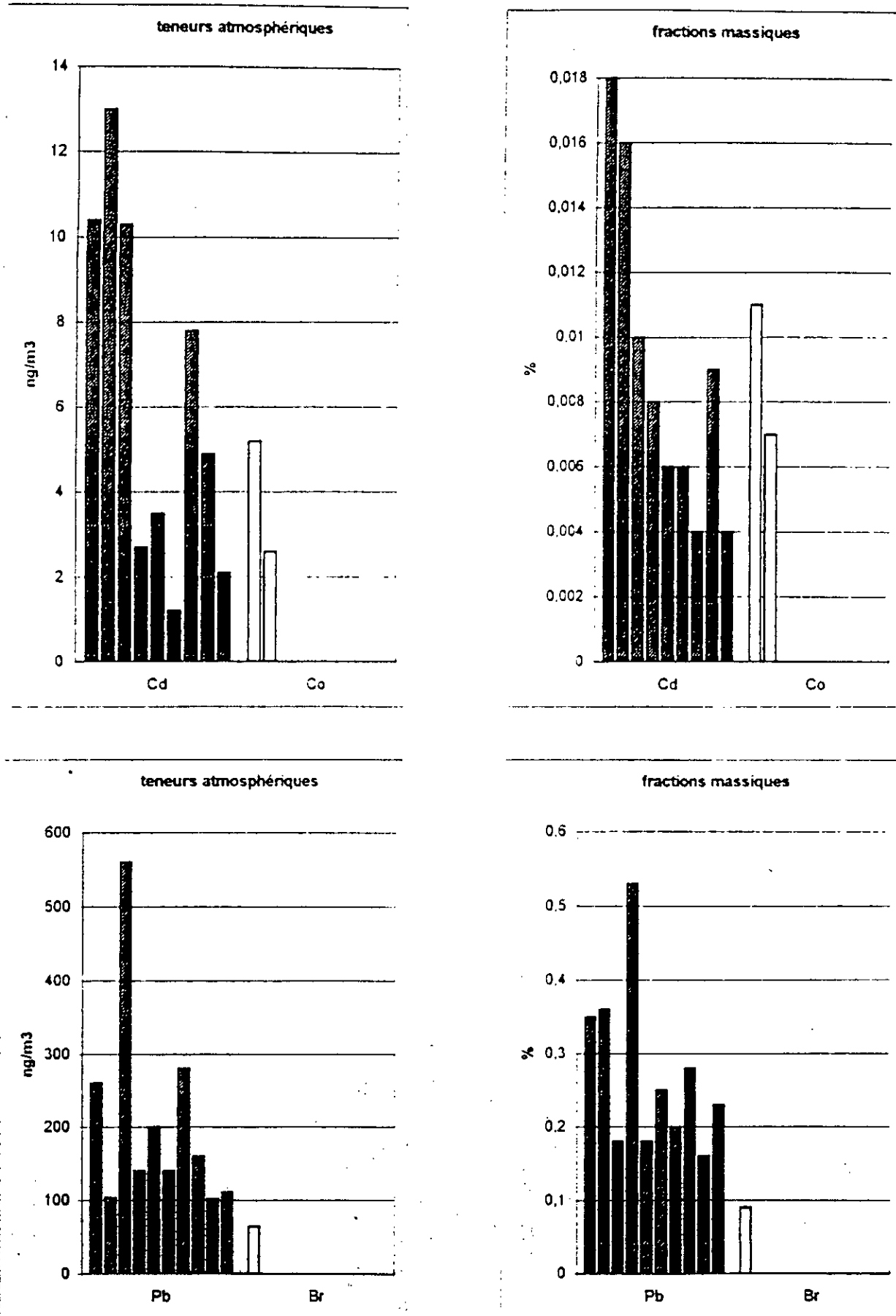


Figure n°26 : Teneurs atmosphériques en Cd, Co, Pb et Br et les fractions massiques correspondantes mesurées à ENP - Cinq Maisons

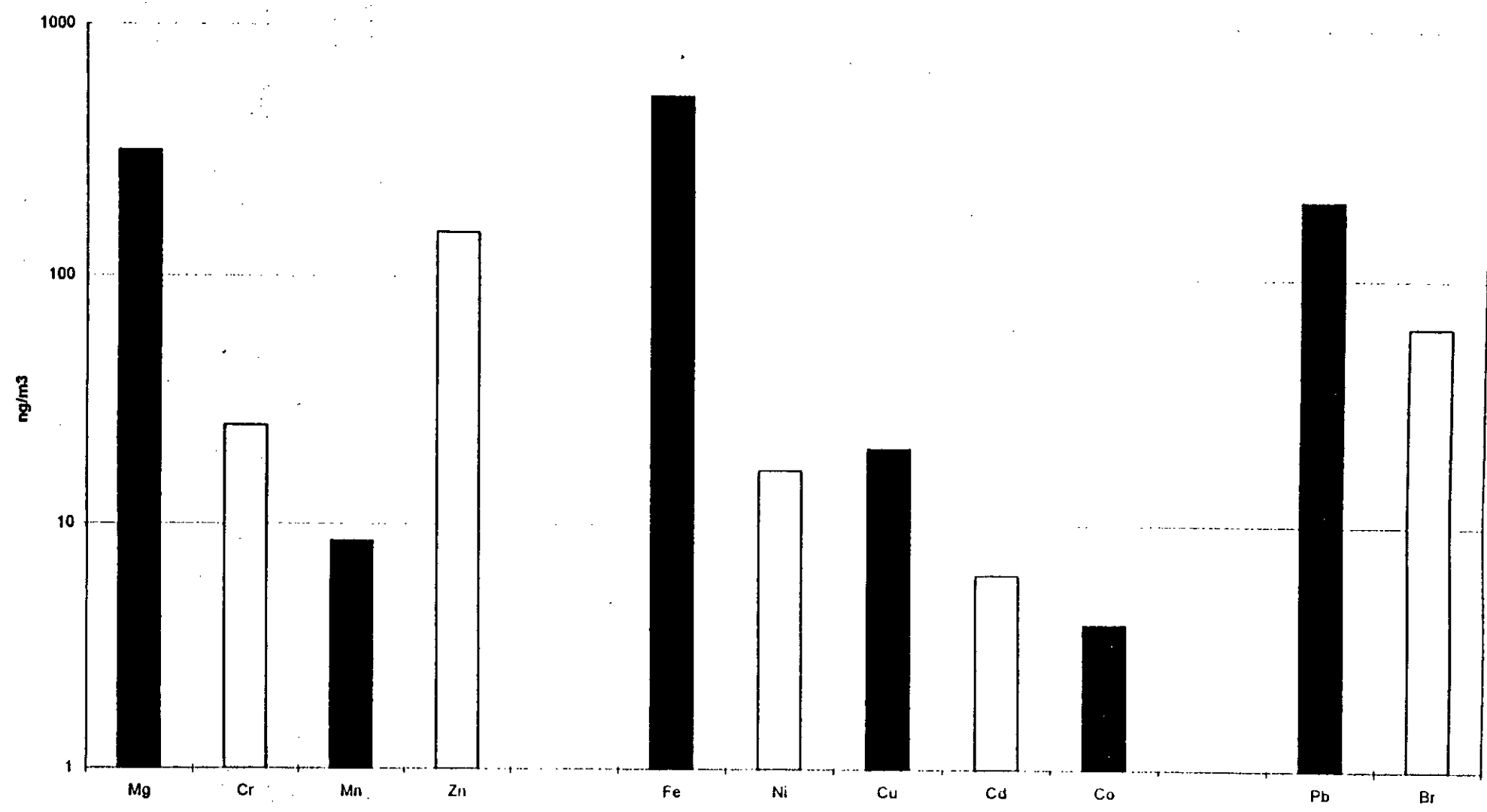


Figure n°27 : Teneurs Atmosphériques moyennes des éléments associés aux TSP mesurées à ENP - Cinq Maisons



D'après l'ensemble des résultats obtenus, on constate qu'au sein du même site les teneurs atmosphériques de chacun des éléments étudiés varient plus ou moins fortement d'un jour à l'autre. C'est le cas par exemple du Pb dont les teneurs varient de 345 à 1030 ng/m<sup>3</sup> avec une moyenne de 574 ng/m<sup>3</sup> à Alger Centre et de 102 à 560 ng/m<sup>3</sup> avec une moyenne de 205.7 ng/m<sup>3</sup> à l'ENP.

Pour le Cu, la fourchette de variation est de 1.8 à 60 ng/m<sup>3</sup> à Alger Centre et de 0.4 à 52.2 ng/m<sup>3</sup> à l'ENP.

Ces variations temporelles engendrent ainsi pour les teneurs moyennes des écarts-types qui sont relativement élevés (tableau 14 et 17).

Parmi les éléments majeurs, on retrouve le Calcium, le Silicium, le Soufre et l'Aluminium, ce sont, à part le Soufre, des composés d'origine naturelle qui constituent à eux seuls environ 12% de la masse des TSP recueillies.

Parmi les métaux lourds à caractères toxiques Mn, Zn, Fe, Pb, Ni, Cu, V, Cd, et Co, c'est le Pb qui est le plus abondant dans l'atmosphère d'Alger-centre, suivi de Fe et de Zn. Les éléments avec les teneurs atmosphériques les plus faibles sont le Co, le V et le Cd.

Au niveau du site ENP, c'est le Fe qui est le plus abondant suivi du Pb et du Zn. Comme pour le premier site, le Co et le Cd présentent des teneurs atmosphériques très faibles (moins de 10 ng/m<sup>3</sup>).

A Alger Centre, les métaux lourds participent en moyenne à environ 2.5% de la masse des TSP, dont 2% reviennent seulement au Pb et au Fe (Tableau n° 15). Les composés identifiés dans la partie minérale constituent ainsi environ 15% de la masse des particules. A cette proportion, il faudrait ajouter d'autres éléments et sels tels que Na et Cl qui, en ces sites côtiers peuvent atteindre des taux élevés (embruns marins). Le reste étant constitué majoritairement de Carbone élémentaire et de Carbone organique dans lequel on retrouve, entre autres les HC polycycliques.

En comparant les teneurs en métaux lourds au niveau des deux sites (figure n° 28), on constate que la contamination de l'atmosphère en métaux lourds est globalement plus importante à Alger-centre qu'au niveau du site ENP. Ainsi, à l'exception du Fer, tous les métaux lourds se retrouvent à Alger à des teneurs plus élevées. La différence est très importante pour le Pb et donc aussi pour le Br qui lui est associé.

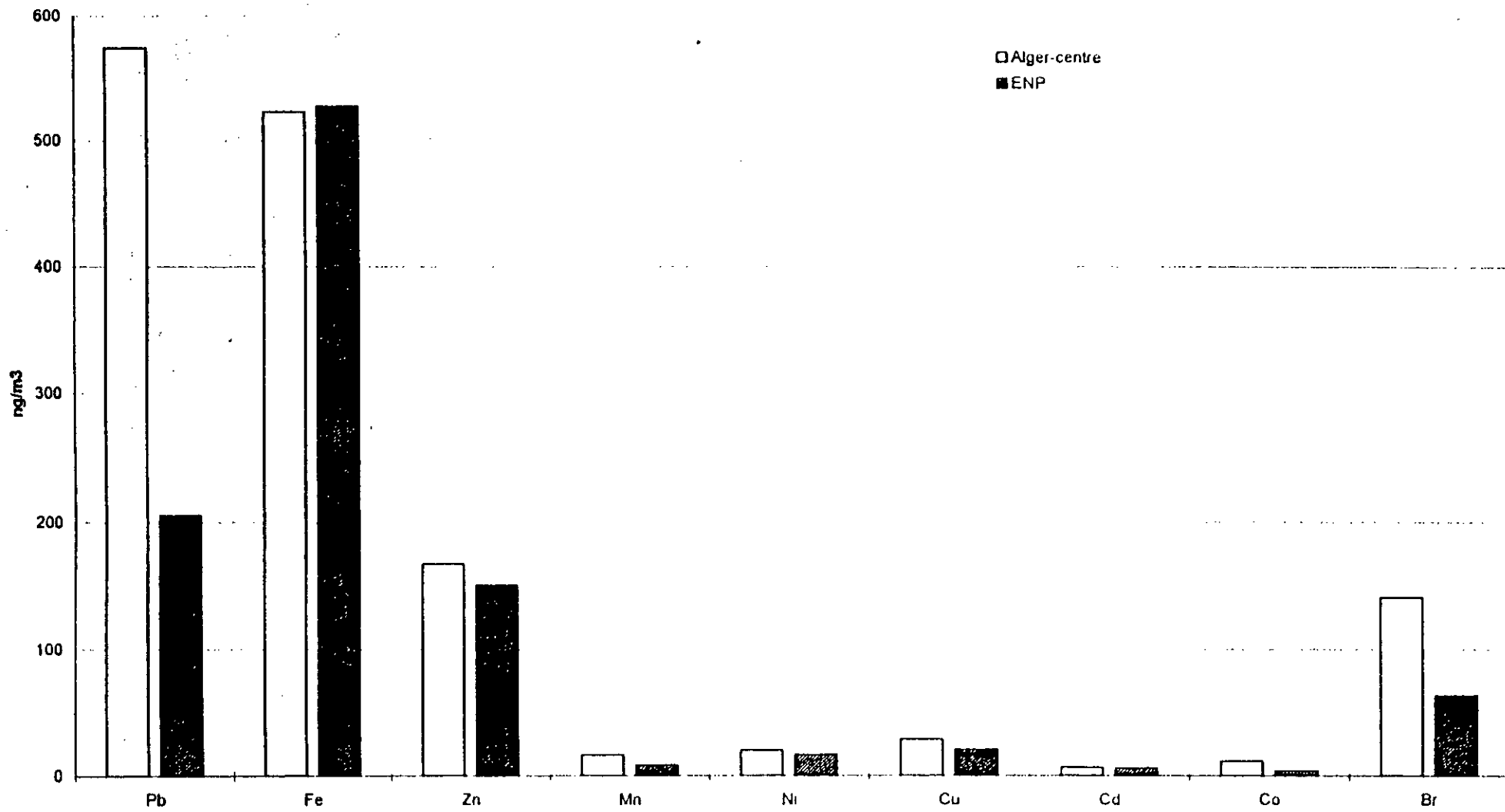


Figure n°28 : Comparaisons des teneurs en métaux lourds mesurées à Alger-centre et au site ENP-Cinq Maisons

A Alger Centre, la teneur de l'air ambiant en Pb est presque trois fois plus élevée qu'à l'ENP. Ce résultat reflète bien l'influence du trafic routier sur les émissions de Pb qui proviennent dans la région étudiée uniquement des activités de transport. Ainsi au Boulevard Colonel Amirouche où le prélèvement se fait à proximité de la route, les teneurs plombifères dépassent parfois le niveau de  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Par ailleurs, le Bd Cl Amirouche constitue une rue de type canyon bordée de part et d'autre d'immeubles qui réduisent la ventilation naturelle favorisant par là l'accumulation des différents métaux lourds qui sont soit émis directement par les véhicules (Pb, Fe, Zn et Cd) ou provenant de la resuspension des particules.

A l'ENP par contre, le site subit une bonne ventilation naturelle qui favorise la dispersion des particules et donc des métaux mais qui reçoit en même temps plus de particules d'origine naturelle.

Il est intéressant de remarquer qu'en ce site, le trafic routier qui est aussi important qu'au Bd Cl Amirouche n'engendre pas d'aussi importantes teneurs en Pb. Ceci est dû d'une part au fait que la RN 5 (axe routier à 4 voies) est très fréquentée par les poids lourds et les autobus roulant au diesel qui ne contient pas de Plomb et d'autre part à l'éloignement du poste de mesure (à environ 10 m de l'axe routier). La forte diésélisation de la RN 5 est par contre à l'origine de teneurs plus élevées en TSP ou fumées noires.

Il nous a été malheureusement impossible d'effectuer une vaste étude sur l'influence de la réduction du trafic routier sur les teneurs atmosphériques en métaux lourds (étude des cas de week-end). Nous avons certes constaté dans deux échantillons de week-end que les teneurs en Pb étaient parmi les plus basses, mais il faudrait analyser un plus grand nombre d'échantillons de week-end pour évaluer quantitativement cette influence.

En ce qui concerne le rapport Pb/Br que la littérature évalue à 2.7 [42], nous retrouvons des rapports allant de 3.2 à 4. Certains auteurs [43] trouvent des rapports supérieurs à 5 qu'ils expliquent par la perte de Brome par volatilisation lorsque les échantillons ne sont pas analysés assez rapidement après prélèvement.

Il y a lieu aussi de signaler que nous n'avons pas trouvé de corrélations significatives entre les teneurs en TSP et les teneurs en métaux lourds (les cas étudiés sont le Pb, le Cu et le Ni). En d'autres termes, une atmosphère riche en TSP n'induit pas automatiquement des niveaux atmosphériques de Pb élevés. Ceci est dû à l'existence de plusieurs sources émettrices de particules diverses : sources naturelles et sources anthropogéniques diffuses ou ponctuelles.

En ce qui concerne l'examen des fractions massiques moyennes données en figure n° 29, on constate que les TSP prélevées à Alger-centre sont plus riches en métaux lourds et ce particulièrement pour le Plomb.

A Alger-centre, le Pb contribue à environ 1% de la masse des particules, il ne participe plus qu'à hauteur de 0.3% à l'ENP.

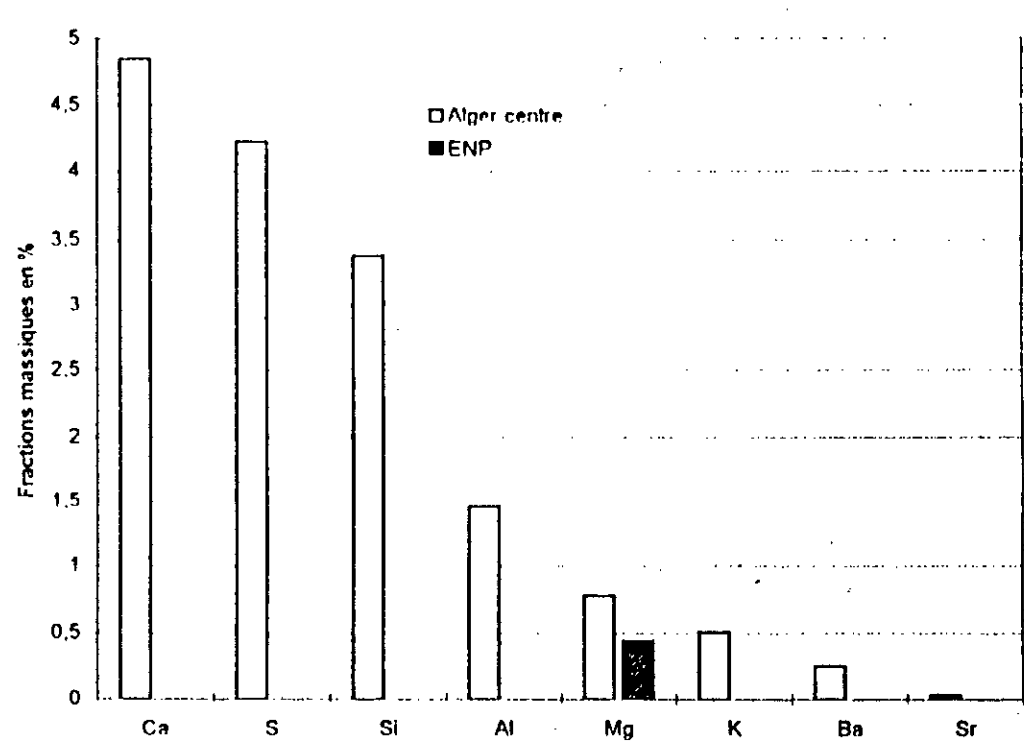
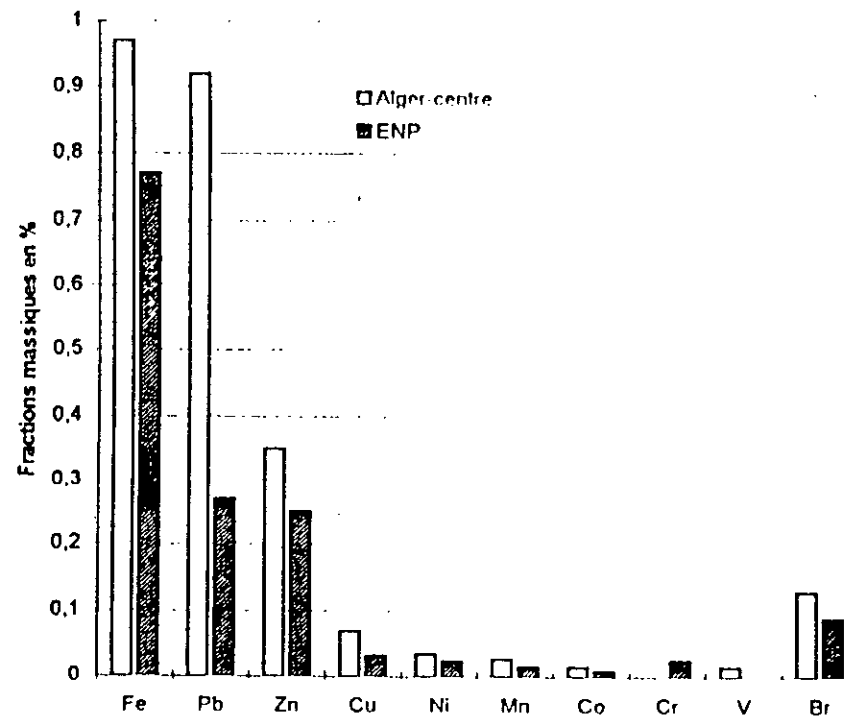


Figure n°29 : Fractions massiques moyennes des métaux lourds et autres éléments mesurés aux deux sites Alger-centre et ENP (Cinq Maisons)

Ces résultats obtenus sur les fractions massiques rejoignent globalement les constatations faites auparavant sur les teneurs dans l'air ambiant des différents métaux lourds.

### VII. 2. 2. 2. Facteurs d'enrichissement

L'enrichissement de l'atmosphère en composés issus d'une pollution quelconque se mesure par les facteurs d'enrichissement qu'on détermine par rapport à un élément-référence. La référence la plus souvent utilisée est le Scandium Sc qui est un élément émis naturellement par la croûte terrestre et qu'on ne retrouve généralement pas dans les émissions artificielles.

Le facteur d'enrichissement F est défini par [2] :

$$F = \frac{\frac{\text{teneur de l'élément dans l'air}}{\text{teneur Sc dans l'air}}}{\frac{\text{teneur de l'élément dans le sol}}{\text{teneur Sc dans le sol}}} \dots \dots \dots (10)$$

Pour les teneurs des éléments dans le sol, on utilise usuellement des valeurs déterminées par Masson [44] et que nous présentons en annexe n° 2. La teneur de Sc s'y élève à 22 µg/g.

Pour la teneur en Sc dans l'air urbain, la littérature donne une moyenne de 0.20 ng/m<sup>3</sup> [45]. Cette valeur concorde avec les teneurs en Sc mesurées par activation aux neutrons dans des prélèvements effectués en 1995 à Alger [46].

Les facteurs d'enrichissement ainsi calculés sont présentés en tableau n° 19 et 20 respectivement pour les sites d'Alger Centre et de Cinq Maisons.

Les facteurs moyens et les valeurs extrêmes sont illustrés en figure n° L et M.

En fonction de ces facteurs, les éléments étudiés peuvent être répartis en trois classes :

1. Les éléments non ou faiblement enrichis qui sont d'origine purement naturelle et dont le facteur d'enrichissement est en général inférieur à 10. Il s'agit des éléments majeurs Si, Al, Ca, Fe ainsi que des métaux-traces tels que Mn et V.
2. Les éléments moyennement enrichis qui proviennent aussi bien d'origine naturelle que d'origine anthropique. C'est le cas des métaux lourds Ni, Co, Cu et Zn (F allant de quelques dizaines à quelques centaines).
3. Les éléments très fortement enrichis qui reflètent l'ampleur de la pollution d'origine anthropique et qui sont dans notre cas les métaux lourds toxiques Cd et Pb ainsi que le Br associé au Pb. Ces composés atteignent des facteurs F allant de 1700 à plus de 6000.

Une comparaison entre les deux sites montre qu'à l'exception du Pb, les métaux étudiés présentent des facteurs d'enrichissement qui sont du même ordre de grandeur. Le Pb par contre est trois fois plus enrichi dans l'atmosphère urbaine d'Alger qu'au niveau de Cinq Maisons.

Dans la littérature, on relève souvent en milieu urbain des facteurs d'enrichissement similaires à ceux déterminés dans la présente étude. A Paris par exemple, les éléments Cd, As et Pb ont des facteurs F supérieurs à 1000 [47].

Tableau n° 19

*Facteur d'enrichissement des éléments mesurés à Alger Centre*

Élément	Facteur d'enrichissement moyen	Fourchette de variation
Si	0.73	0.71 - 0.75
P	0.85	0.74 - 0.95
Al	1.09	1.07 - 1.11
K	1.16	1.0 - 1.28
Mg	1.19	0.70 - 1.49
Fe	1.15	1.0 - 1.3
Mn	1.9	0.74 - 4.1
Sr	4.9	3.75 - 6.05
Ca	7.9	6.75 - 9.02
V	7.2	6.3 - 8.6
Ni	29	16.7 - 58
Ba	35.5	31.5 - 39.8
Co	49.7	26.4 - 70
Cu	57.6	3.6 - 120
Zn	263	185 - 315
Cd	3685	2475 - 4345
Pb	4856	2919 - 8715
Br	6226	2818 - 12772



Figure n° 30  
Facteur d'enrichissement Alger-centre

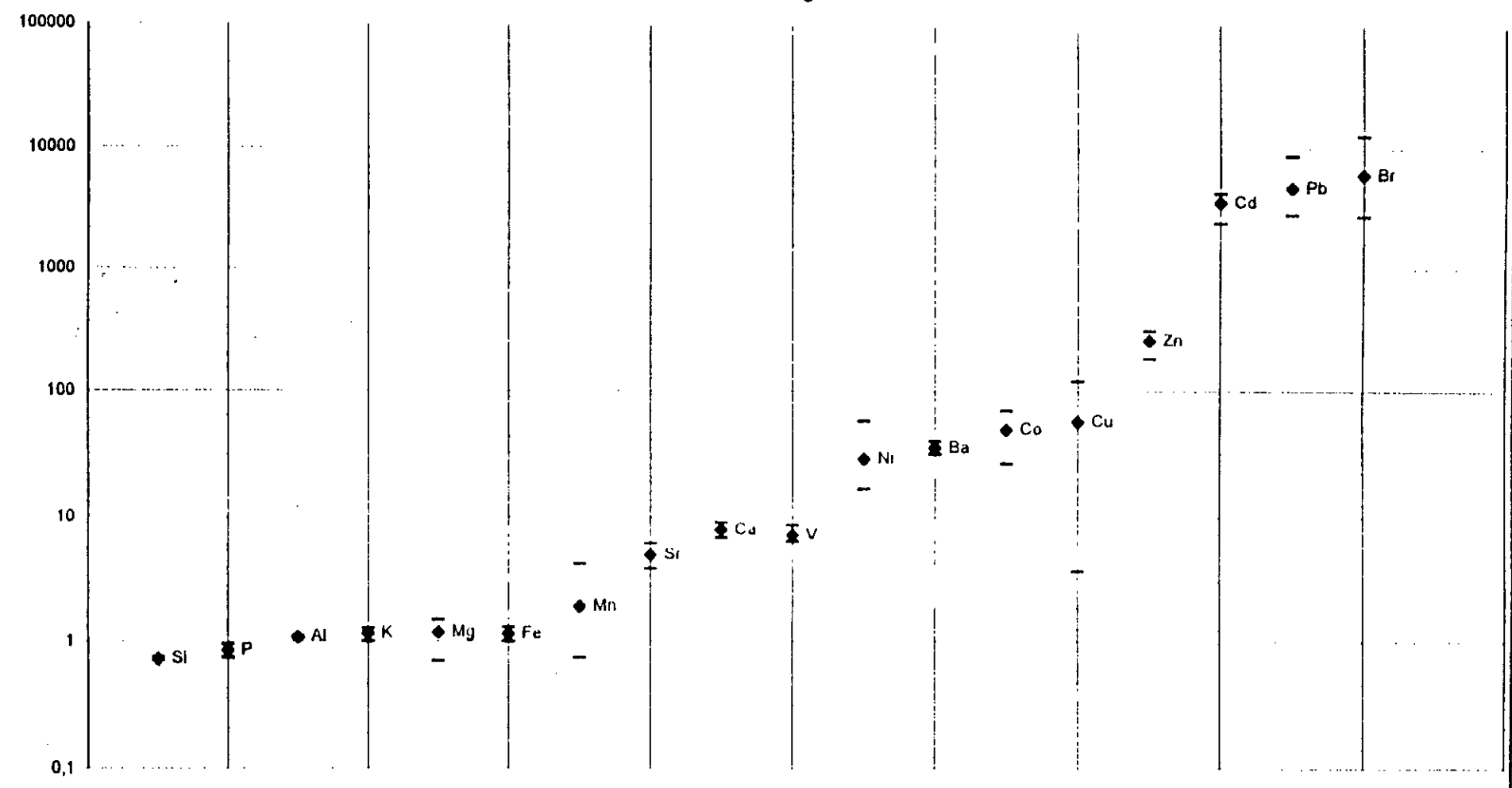
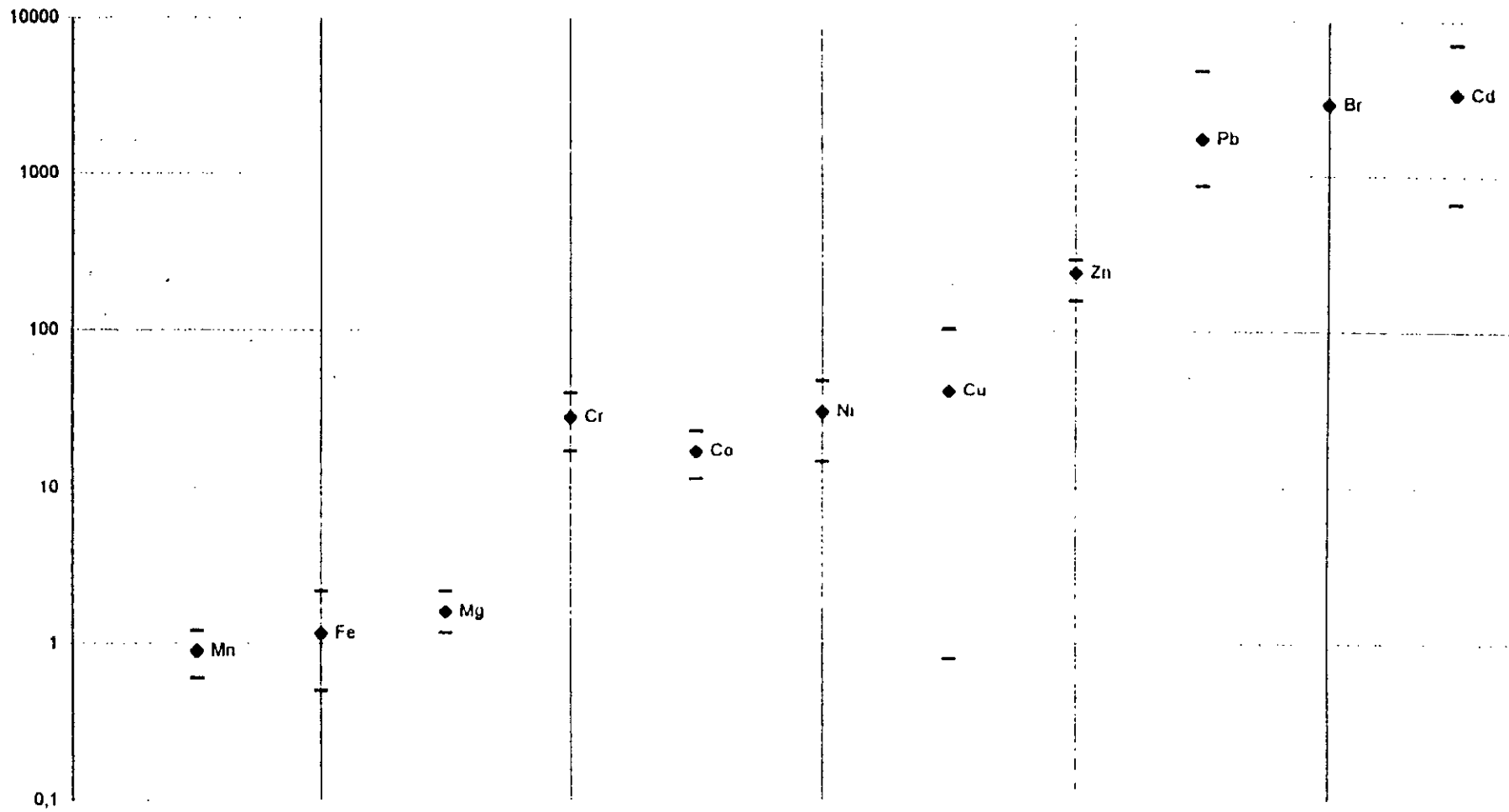


Tableau n° 20

*Facteurs d'enrichissement des éléments mesurés à ENP - Cinq Maisons*

Elément	Facteur d'enrichissement	Fourchette de variation
Mn	0.9	0.6 - 1.2
Fe	1.16	0.5 - 2.15
Mg	1.6	1.17 - 2.16
Cr	28	17.1 - 40
Co	17.1	11.4 - 22.9
Ni	30.4	14.8 - 48.4
Cu	41.6	0.8 - 104.4
Zn	237.7	157.3 - 284.6
Pb	1740.5	863.1 - 4738.5
Br	2918	
Cd	3410	660 - 7150

Figure n° 31  
Facteur d'enrichissement ENP - Cinq Maisons



### VII. 2. 3. Ampleur de la pollution métallique et comparaison avec les données d'autres métropoles

En l'absence de normes algériennes et d'études antérieures dans notre pays, nous ne pouvons comparer les niveaux de pollution relevés dans cette étude que par rapport aux normes étrangères et au taux de pollution relevés dans certaines grandes métropoles étrangères.

Les normes et recommandations relatives à la présence des métaux lourds dans l'air ambiant n'existent que pour certains éléments toxiques : Pb, Cd, As, Hg, Mn.

Une comparaison par rapport aux normes des éléments Pb, Cd, et Mn est donnée en tableau n° 21.

Tableau 21

*Comparaison des teneurs atmosphériques en Pb, Cd, et Mn  
par rapport aux normes ou valeurs-guides [48, 49]*

Élément	Teneur moyenne à Alger-centre	Teneur moyenne à ENP	Normes ou valeurs-guides
Pb	0.574 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.206 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.5 à 1.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Valeur-guide OMS 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Norme CE
Cd	6.7 $\text{ng}/\text{m}^3$	6.2 $\text{ng}/\text{m}^3$	10 $\text{ng}/\text{m}^3$ Valeur-guide OMS et norme CE
Mn	16.4 $\text{ng}/\text{m}^3$	8.6 $\text{ng}/\text{m}^3$	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Valeur-guide OMS et norme CE

Cette comparaison montre que :

- a. Les teneurs en Mn sont largement inférieures aux normes.
- b. Les teneurs en Pb sont en moyenne inférieures à la limite supérieure recommandée par l'OMS. On relève cependant à Alger-centre un échantillon qui dépasse ce seuil de  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La norme de la communauté européenne n'a jamais été atteinte.
- c. Les teneurs atmosphériques moyennes en Cd sont assez proches du seuil recommandé. Sur 9 échantillons de l'ENP analysés, on relève trois cas soit 30%, avec des teneurs dépassant légèrement la norme de  $10 \text{ ng}/\text{m}^3$ .

Il en ressort ainsi de cette comparaison avec les normes qu'on est en présence d'une pollution excessive par le Plomb et le Cadmium.

La situation d'Alger par rapport à d'autres villes est donnée en tableau n° 22.

Cette comparaison montre que la ville d'Alger accusé en sites de proximité une pollution atmosphérique par les métaux lourds qui est en deçà de celle mesurée à Athènes, ville renommée pour sa pollution, mais qui par ailleurs ne diffère que peu de celle de Paris qui est quand même une ville de toute autre envergure qu'Alger.

Ainsi, toutes proportions gardées, on peut conclure que la ville d'Alger a atteint un stade de pollution qui n'est certes pas critique, mais qui est suffisamment élevé pour susciter des inquiétudes quant à la santé des populations urbaines.

Tableau n° 22

Comparaison des teneurs en métaux lourds en ng/m<sup>3</sup>  
avec celles mesurées dans certaines villes étrangères [47, 50]

Villes	Antwerp	Athènes	Tokyo	Paris	Paris	Khar-toum	Alger (centre)	Alger (ENP)
Périodes	Jan - Fév 87	Avr - Juin 86	Oct - Nov 86	86 - 88	Jan - Mars 92	Déc 89	Jan - Juin 97	Mars - Mai 97
Type de particule	TSP	2.5 µm	TSP	TSP	PM10	TSP	TSP	TSP
Fe	275	1100	2200	750	808	5700	523	528
Zn	64	273	370	220	188	109	167	151
Mn	11	21	100	20	22	91	16	9
Cu	13	50	3100	35	31	6.9	29	21
Ni	5.8	11.8	10	10	12.8	6.1	20	17
V					19	14	8.2	
Pb	74	699	170	500	162	47	574	206
Cd		220	3.1	5	2.2		6.7	6.2

Par ailleurs, la comparaison des fractions massiques entre Alger et Paris, qu'on présente en tableau n° 23 montre elle aussi l'ampleur de la charge polluante plombifère véhiculée par les particules en suspension. Cette charge est à Alger Centre trois fois plus élevée qu'à Paris [47].

Tableau n° 23

Comparaison entre Alger et Paris [47] des fractions massiques des métaux lourds véhiculés par les particules en suspension

Ville	Teneur moyenne en particules	Fractions massiques en %										
		Fe	Pb	Zn	Cu	Ni	Mn	Cd	V	Co	Mg	Ca
Paris (hiver 92)	51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1.6	0.32	0.38	0.058	0.02	0.042	0.005	0.036	0.002	0.61	3.8
Alger-centre (1997)	49.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.97	0.92	0.35	0.07	0.035	0.027	0.015	0.015	0.015	0.78	4.85

### VII. 3. Le Plomb en Algérie

Le Plomb présent dans l'atmosphère provient essentiellement de la combustion des carburants où il est utilisé dans les essence normal et super comme additif antidétonant.

En Algérie, on utilise comme additif le tétraéthyle de plomb à raison de 0.4 g Pb/l de carburant. Certaines raffineries, pour corriger le déficit en aromates, utilisent parfois des teneurs de 0.6 à 0.7 g Pb/l [51].

Après combustion de l'essence, le Plomb est rejeté dans l'atmosphère sous forme de fines particules véhiculées par les gaz d'échappement. Ce Plomb est émis sous des formes chimiques telles que  $\text{PbCl}_2$ ,  $\text{PbBr}_2$  et  $\text{PbBrCl}$  qui peuvent ensuite être converties en sulfates, carbonates et oxydes [52]. La présence du bromure de Plomb explique la bonne corrélation qu'on trouve généralement entre le Pb et le Br.

Une partie des particules plombifères se dépose avec les suies dans les pots d'échappements où elles forment des grosses particules par agglomération et adhèrent plus ou moins aux parois du tuyau. En phase de démarrage ou d'accélération, ces grosses particules sont évacuées dans l'air où elles sédimentent rapidement.

La majeure partie, soit environ 75% du Pb contenue dans le carburant est cependant émise dans l'atmosphère sous forme de fines particules qui viennent enrichir

les TSP issues d'autres sources [52]. C'est ce Plomb qui est étudié dans la collecte et l'analyse des TSP.

Dans notre pays, pour les 2 000 218 véhicules roulant à l'essence [53] la consommation en carburant s'est élevée en 1996 à environ 438 000 m<sup>3</sup> de super et 2 380 000 m<sup>3</sup> de normal, soit au total 2 818 000 m<sup>3</sup> d'essence plombée [51].

A raison seulement de 0.4 g Pb/l et avec un taux d'émission de 75%, la quantité de Pb émise annuellement s'élève alors à 1127 tonnes.

L'agglomération du Grand-Alger qui comptabilise le quart du parc national automobile [53] reçoit ainsi une charge polluante de Plomb d'environ 300 tonnes/an. La dispersion de cette pollution et sa dilution entraîne en milieu urbain des teneurs atmosphériques en Pb de l'ordre de 600 ng/m<sup>3</sup>.

L'étude du transfert du Pb de l'air au sang a donné lieu à une relation linéaire du type [54, 55] :

$$Pb_{\text{sang}} = 1.216 Pb_{\text{air}} + 15.65 \dots \dots \dots (11)$$

Ainsi, en milieu non pollué, [Pb]sang est de l'ordre de inférieure à 15 µg/dl.

Pour  $Pb_{\text{air}} = 0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$   $Pb_{\text{sang}} = 16.3 \mu\text{g}/\text{dl}$

et pour  $Pb_{\text{air}} = 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$   $Pb_{\text{sang}} = 16.9 \mu\text{g}/\text{dl}$ .

Dans plusieurs pays, la teneur moyenne, toutes populations confondues, est de l'ordre de 17 µg Pb/dl, un tel niveau régnerait aussi dans notre pays en milieu urbain. Des teneurs dans le sang jusqu'à 80 µg/dl chez les adultes et 50 µg/dl chez les enfants sont considérés comme étant acceptables [2].

Globalement, les teneurs moyennes que nous avons mesurées sont assez excessives et les taux d'enrichissement de l'atmosphère en Pb l'attestent clairement, mais nous sommes loin des rapports alarmants de la Banque Mondiale dont la presse nationale en a fait de larges échos en 1996.

En 1987, les moyennes annuelles de Pb s'élevaient à Amsterdam à 0.2 µg/m<sup>3</sup>, à Hambourg à 0.3 µg/m<sup>3</sup>, à Bruxelles à 0.6 µg/m<sup>3</sup>, à Athènes à 0.7 µg/m<sup>3</sup>, à Dublin à 0.9 µg/m<sup>3</sup>, à Barcelone à 1.7 µg/m<sup>3</sup> et à Lyon à 2 µg/m<sup>3</sup> [41].



Par rapport à ces agglomérations, les teneurs que nous avons mesurées sur les deux sites d'Alger ne sont pas plus inquiétantes. Ce qui est par contre très inquiétant c'est que la tendance chez nous va vers une pollution plus intense, alors qu'ailleurs la situation est inversée et on tend vers l'émission "zéro" en Pb.

L'exemple que nous présentons en tableau n° L est à ce titre très instructif.

Tableau n° 24

*Evolution des teneurs atmosphériques en Pb en  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^3$  en fonction de la nature de l'essence [39, 56]*

Année	Marseille	Lille	Alger-centre
1984 (0.4 g Pb/l essence)	1.7	1.4	
1989 (0.25 g Pb/l essence et essence sans Pb)	0.5	0.52	
1991 (0.15 g Pb/l essence et essence sans Pb)	0.25	0.25	
1997 (essence sans Pb)	tend vers zéro	tend vers zéro	0.35 à 1.03

Ce tableau montre que la teneur actuelle mesurée à Alger Centre est en deçà des teneurs mesurées il y a une dizaine d'années dans les villes françaises avant l'introduction de l'essence sans Plomb et l'utilisation de pots catalytiques. Il y a lieu de réfléchir sérieusement à l'offre de l'essence sans Plomb si on veut réduire la pollution plombifère. La conversion des raffineries algériennes vers ce nouveau procédé n'est pas insurmontable, d'ailleurs l'Algérie exporte déjà vers les pays nordiques de l'essence sans Plomb à indice d'octane 98.

L'autre alternative réside dans l'encouragement de l'utilisation des carburants gazeux (GPL) qui sont nettement moins polluants [57]. Ce carburant introduit au début des années 80 n'a pas connu l'essor escompté et on ne compte à ce jour que quelques 30 000 véhicules convertis. Sa large disponibilité en Algérie en fait un carburant de choix pour le futur.

# *Chapitre 8*

# *Conclusion*

Au cours de cette étude, nous avons effectué durant plusieurs mois en deux sites d'Alger un suivi de la pollution de l'atmosphère par les particules totales en suspension (TSP). Les particules recueillies au niveau des deux sites présentent une couleur noire qui est caractéristique des fines particules (fumées noires) issues de la combustion incomplète des véhicules moteur.

Au niveau d'Alger Centre, le taux moyen des TSP s'élève à  $49.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Une nette réduction de la pollution de l'ordre de 25% est observée les jours de week-end où le trafic routier est moins dense.

Au deuxième poste de mesure implanté à Cinq Maisons (ENP-RN 5) la teneur moyenne en TSP s'élève à  $73.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ce site est influencé par une plus importante pollution d'origine naturelle ainsi que par de plus fortes émissions de suies dues à un trafic routier diesel qui est plus conséquent qu'à Alger Centre.

La norme de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  réglementant les TSP n'a pas été atteinte. La norme relative aux fumées noires a été par contre largement dépassée, ce qui dénote d'une pollution excessive en fines particules.

L'analyse élémentaire de ces particules par XRF a montré que ces TSP contiennent, en plus du carbone élémentaire et carbone organique, au moins une vingtaine d'éléments, des éléments majeurs tels que Si, Al, Ca, S etc... et des éléments-traces à des teneurs de quelques  $\text{ng}/\text{m}^3$  tels que P, Mn, Cr, Cd et V.

L'analyse quantitative des éléments associés aux TSP nous a permis d'avoir une idée assez précise sur les niveaux de contamination de l'atmosphère par les métaux lourds. Les éléments comme le Fe, Zn, Cu et Ni se retrouvent à des teneurs appréciables, les teneurs en Cd dépassent parfois la norme de  $10 \text{ng}/\text{m}^3$ .

Le calcul des fractions massiques montre que les métaux lourds classiques constituent environ 2.5% de la masse des particules, dont la majeure proportion revient aux Pb et au Fe.

A Alger Centre où le plomb est un des métaux lourds le plus abondant, on mesure une teneur moyenne de  $574 \text{ng}/\text{m}^3$ .

Les recommandations de l'OMS ( $0.5$  à  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ne sont que rarement dépassées. La norme européenne de  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  n'a jamais été atteinte dans les 19 échantillons étudiés.

Globalement, la pollution par les métaux lourds mesurée à Alger est de par sa nature et son ampleur aussi importante que celle relevée dans les grandes métropoles européennes. La ville de Paris par exemple qui est de tout autre envergure présente des niveaux de pollution comparables à ceux d'Alger.

Le calcul des facteurs d'enrichissement montre que l'air ambiant d'Alger est très fortement enrichi en Cd et en Pb; les 300 tonnes de Pb émis annuellement à Alger par le trafic routier engendrent un facteur d'enrichissement moyen de 4856.

Les autres métaux lourds qui sont surtout d'origine naturelle ne sont que faiblement enrichis.

En ce qui concerne la pollution par le plomb, les résultats obtenus montrent que la situation actuelle n'est pas très critique ou alarmante, elle équivaut en fait à celle qui prévalait en Europe occidentale dans les années 80 avant l'introduction de l'essence non plombée; elle suscite toutefois des inquiétudes car devant un trafic routier qui prend de plus en plus d'ampleur, il faut s'attendre à une intensification de cette forme de pollution et ce à un moment où dans d'autres pays, la tendance est inversée et le Pb ne constitue plus une préoccupation majeure.

Aussi, une réduction de cette pollution plombifère passe impérativement par la mise sur le marché national de l'essence sans plomb que les raffineries algériennes produisent déjà.

Parallèlement, il y a lieu d'encourager l'utilisation de la bicarburant: le gaz carburant GPL-C qui est largement disponible dans le pays est un carburant propre (pas de Plomb et moins d'émission de CO et d'hydrocarbures) qu'il faudrait généraliser dans un futur plus ou moins proche.

# *Annexes*

## Annexe I

Il s'agit de déterminer si deux séries de mesures présentent deux moyennes qui sont significativement différentes.

Pour cela, on détermine :  $\Delta m = \text{moyenne}_1 - \text{moyenne}_2$

$\sigma_1 =$  Déviation standard de la moyenne<sub>1</sub>

$\sigma_2 =$  Déviation standard de la moyenne<sub>2</sub>

Et on calcule la déviation standard sur les moyennes d'après :

$$S_d^2 = \frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}$$

$n_1$  et  $n_2$  sont les nombres d'observations des séries 1 et 2.

Si  $\Delta m > S_d$ , on dira que la différence est significative à une probabilité de 5%.

Dans notre cas :

série 1 : jours ouvrables ;, moyenne =  $54.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

$n=35$

$\sigma^2=443.3$

série 2 : jours de week-end ;, moyenne =  $41.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

$n=15$

$\sigma^2=350.44$

On obtient :

$$\Delta m = 54.7 - 41.5 = 13.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$S_d = 5.97 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

Ainsi,  $\Delta m = 13.2 \mu\text{g}/\text{m}^3 > S_d = 5.97 \mu\text{g}/\text{m}^3$

## Annexe II

Teneurs des éléments dans le sol d'après Masson [44]

Si	277.2 mg/g
Al	81.3 //
Ca	36.3 //
Mg	20.9 //
K	25.9 //
Fe	50 //
P	1.05 //
V	135 µg/g
Cr	100 //
Mn	950 //
Co	25 //
Ni	75 //
Cu	55 //
Zn	70 //
Sr	375 /
Ba	425 //
Pb	13 //
Br	2.5 //
Cd	0.2 //
Sc	22 //

## BIBLIOGRAPHIE

- [1]-M.Boughdaoui et R.Kerbachi , « La pollution particulaire à Rais Hamidou ,ampleur et dispersion » AJOT ,Volume 10,série D, n° 1 ,pp 149-168,1994
- [2]-J.D.Butler , « Air pollution Chemistry » , Academic Press London ,1979.
- [3]-J.P.Detrie, « La pollution atmosphérique » ,Ed.DUNOD,Paris , 1969.
- [4]-M.Barnea ,P.Ursu , « Pollution et protection de l'atmosphère » ,Ed.EYROLLES ,Paris,1974.
- [5]- F-Ramade , « Eléments d'écologie ,action de l'homme sur la biosphère » ,Mc Graw – Hill ,Paris ,1982.
- [6]-C.Dang , T.P.Fontelle, R.Leygonie, « Les émissions de poussières et généralités sur leur mesure à l'émission » ,Pollution atmosphérique ,Janvier-Mars 1990 pp 38-46.
- [7]-R.Leygonie , « les métaux lourds dans l'air : sources ,émissions, mesures ,effets » .Pollution atmosphérique ,Juillet-Septembre 1993 ,pp 63-74.
- [8]-S.Nessah, « Contribution à l'étude des TSP dans le Grand Alger » .PFE ENP-Alger ,1995.
- [9]-P.H.Brunner , « Approche globale des problèmes d'environnements liés à l'incinération d'ordures ménagères » . Pollution atmosphérique ,Juillet-Septembre 1988,pp 301-308.
- [10]-R.Kerbachi, « COURS de pollution atmosphérique , 5<sup>ème</sup> Année » ENP ,Alger ,1996.
- [11]-P.Dogubert , « Pollution atmosphérique , origine et réduction des émissions au niveau du moteur».Techniques de l'ingénieur ,B2710,5,1994,pp01-16.
- [12]-R.Joumard , « Quels polluants ? contribution des transports ».Pollution atmosphérique ,121,1989,pp 5-8.
- [13]-M.Chiron ,P.Quenel ,D.Zmirou , « La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique ». Pollution atmosphérique ,Janvier-Mars 1997,pp 41.
- [14]-J.Y.Reult, « Pollution particulaire de l'air »,Chaud-Froid-Plomberie (CFP) n° 464, pp155-163.
- [15]-J.C.Ronneau, « La pollution particulaire de l'air ».Cycles de conférences données à l'ENP-Alger 1992.
- [16]-A.C.Stern , « Air pollution »,Volume 3,Academic press ,3<sup>ème</sup> édition ,New york 1976.



- [17]-J.Useru, I.Gracia, « Trace and major elements in atmospheric deposition in the campo of Gibraltar region ». Atmospheric environment , Volume 20,n° 8, pp 1639-1646,1986.
- [18]-R.Shaw , « La pollution par les particules atmosphériques ».Pour la science ,Octobre 1987, pp 22-31.
- [19]-L.Herrebaut, J.Beguin, « Mesure des pollutions particulaires et gazeuses ».Nuisance et environnement, Mai 1976 , pp 24-28 .
- [20]-F.Petit-Coviaux, A.Person et All « Connaissances des particules atmosphériques en milieu urbain : représentativité biologique et difficultés météorologiques ».Pollution atmosphérique ,Janvier-Mars 1990, pp 21-30.
- [21]-C.Boudene, « Impact du smog londonien sur la population »Pollution atmosphérique Octobre-December 1996.
- [22]-Duckery et Pope , « Mortalité cardio-vasculaire due à la pollution atmosphérique» .Pollution atmosphérique Janvier-Mars 1997.
- [23]-A .C.Stern , R.W.Boubel, D.B.Turner, D.L.Fox, « Fundamental of air pollution »,2<sup>ème</sup> édition , 1984,Academic Press .
- [24]-G.Bonnaud, « Poussières dans la pollution atmosphérique ».Nuisances et environnement ,Avril 1976, pp 37-41.
- [25]-C.Boudene, «Les métaux lourds en question ».Pollution atmosphérique, Juillet-septembre 1993,pp56-62 .
- [26]-J.Pastuska, S.Hlawicka, « Particulate pollution levels in Katowice a highly industrialized » . Polisyty , Atmospheric environment , Vol 27B ,n° 1 , pp 59-65, 1993 .
- [27]-W.H.Shreoder , M.Dobsou , D.M.Kaen , N.D.Johnson , « Toxic trace elements associated with air borne particulate mater ». A review
- [28]-K.O.Ikawa , « Trace analysis of atmospheric » . Edition John Wiley & Sons , London 1977 .
- [29]-R.Kerbachi , « Cours de méthodes physiques d'analyse de 1<sup>ère</sup> Année P » , ENP-Alger 1996.
- [30]-Techniques de l'ingénieur , « Traite d'analyse chimique , caractérisation , spectrométrie d'émission des rayons X , Fluorescences X ».
- [31]-Norme ISO 9855 , « Air ambiant et dosage du Pb dans les particules d'aérosols collectés sur des filtres » .France 1993.
- [32]-

[33]-B.N.Gally , P.Ritter , M. Sepejan , « Pollution ambiante extérieure urbaine ». Pollution atmosphérique , Janvier-Mars 1991.

[34]-H. Achtiouane , « Etude des particules en suspension en milieu urbain » . PFE , ENP-Alger ,1996.

[35]-Y.Boutin et Leduc , « Les poussières en suspension en Octobre » .Pollution atmosphérique ,Octobre-December 1983 ,pp 292-298 .

[36]-E.Laahman , « Emission missingen in der BRD ». Stabv , Band 47 , n° 314 , 1987 , pp 82-87 .

[37]-C.Hutter , J.Hertz , « Shwermetal in miossionen in der gresant deposition and shwebstamb in wohn und erholunngzgebieten der stadt Zurich » . Stamb , Band 46 ,n °7/8, 1986 , pp 327-333 .

[38]-Rapport air Marasx , « La quantité de l'air à Marseille ».Aix 1995, pp 13-15 .

[39]-P.Thomas , Cyrvoisin , « Huit années de mesure des métaux lourds dans l'atmosphère de l'agglomération lilloise » . Pollution atmosphérique , Juillet- Septembre 1993 , pp 89-97 .

[40]-A.Viala , F.Govezo , B.Maillet , J.Fondaraï , « Mesure de 4 métaux traces (Plomb , Cadmium , Chrome et Zinc ) dans les poussières atmosphériques à Marseille de 1977 à 1979 » . Pollution atmosphérique , Juillet -Septembre 1981 , pp 207-230.

[41]-J.P.Olivier , J.P.Vidal , R. Strokel , « Surveillance du Plomb Particulaire atmosphérique en sites urbains » .Pollution atmosphérique , Janvier-Mars 1990 , pp 31-37 .

[42]-R.M.Harrison and W.T.Struges , « The mesurment and interpretation of Br/Pb ratios in airborne particles ».Atm,Env , n° 17, pp 311-328 , 1983.

[43]-P.D.Hien and al , « Monitoring lead in suspend air particulate matter in Hochi Minh City » . Atm . Env , Vol 31 ,n° 7 , pp 1073 ,1076 ,1997 .

[44]-B.Masson , « Principles of geochemistry» . J. Wiley , 3<sup>ème</sup> Edition , New York , 1966.

[45]-Y.Hashimoto , Y. Sekine and T. Otohi , « Atmospheric Aluminium for human activities ». Atm. Env , Vol 26b , n° 3 , pp 295-300 , 1992 .

[46]-Communication personnelle , R. Kerbachi , ENP, Alger ,1997 .

[47]-A. Person , F.Petit-Coviaux , Y. Le Moullec et B. Festy , « Contribution des principales sources en métaux et métalloïdes à la pollution particulaire dans l'agglomération parisienne ».Poll.Atm , n° 139 , pp 75-88 , 1993 .

[48]-OMS , « Air Quality guidelines for europe » . Rapport n° 23 , Copenhague , 1987 .

[49]- Communauté Européenne , décret n°91 , 1122 du 25 Octobre relatif à la qualité de l'air

- [50]-M.H.El Tayeb , C.f. Xhoffer , P.J. Van Espen , R.E. Van Grieken and W. Maehaut , « Sources and composition of aerosols from Khartoum , Soudan » .Atm. Env, Vol 97b , n°1 , pp 67-76 , 1993 .
- [51]-Communication personnelle , Naphtal , Direction Générale ,Alger , 1997 .
- [52]-J.C.Guibert , « Carburant et moteurs » . Volumes 1 et 2 Publication de l'IFP , Ed Thq , Paris , 1987 .
- [53]-ONS , « Données statistiques , parc national automobile , n° 225, Alger , 1997 . ;
- [54]-R.D.Snee , S.P. Bailey and Al , « Variation in the relationship between Blood-lead and air-lead » . Atm.Env , Vol . 19 , pp 1017-1020 , 1985 .
- [55]-A.Columbo , « The underdefined nature of the blood lead - air lead relationship from biological and statistical grounds » . Atm . Env , Vol 19 , n° 9 , pp 1485-1493 , 1985 .
- [56]-F.Grimaldi et Al, « action du comité Marseille-Provence de l'APPA en matière d'étude des polluants métalliques de l'atmosphère » . Poll .ATM , n°139 ? pp 98-103 , 1993 .
- [57]-R. Kerbachi , M.Boughdaoui , S.Chikhi , « Les émissions des véhicules utilisant le gaz carburant GPL » . Séminaire sur le développement et la promotion du GPL-C , Alger , 23-24 Mars 1997 .